

Du cosmos aux particules La matière noire

Eric Armengaud
IRFU - CEA Saclay

Rencontres d'été de l'infiniment grand à l'infiniment petit
Orsay - Paris
2018

Plan

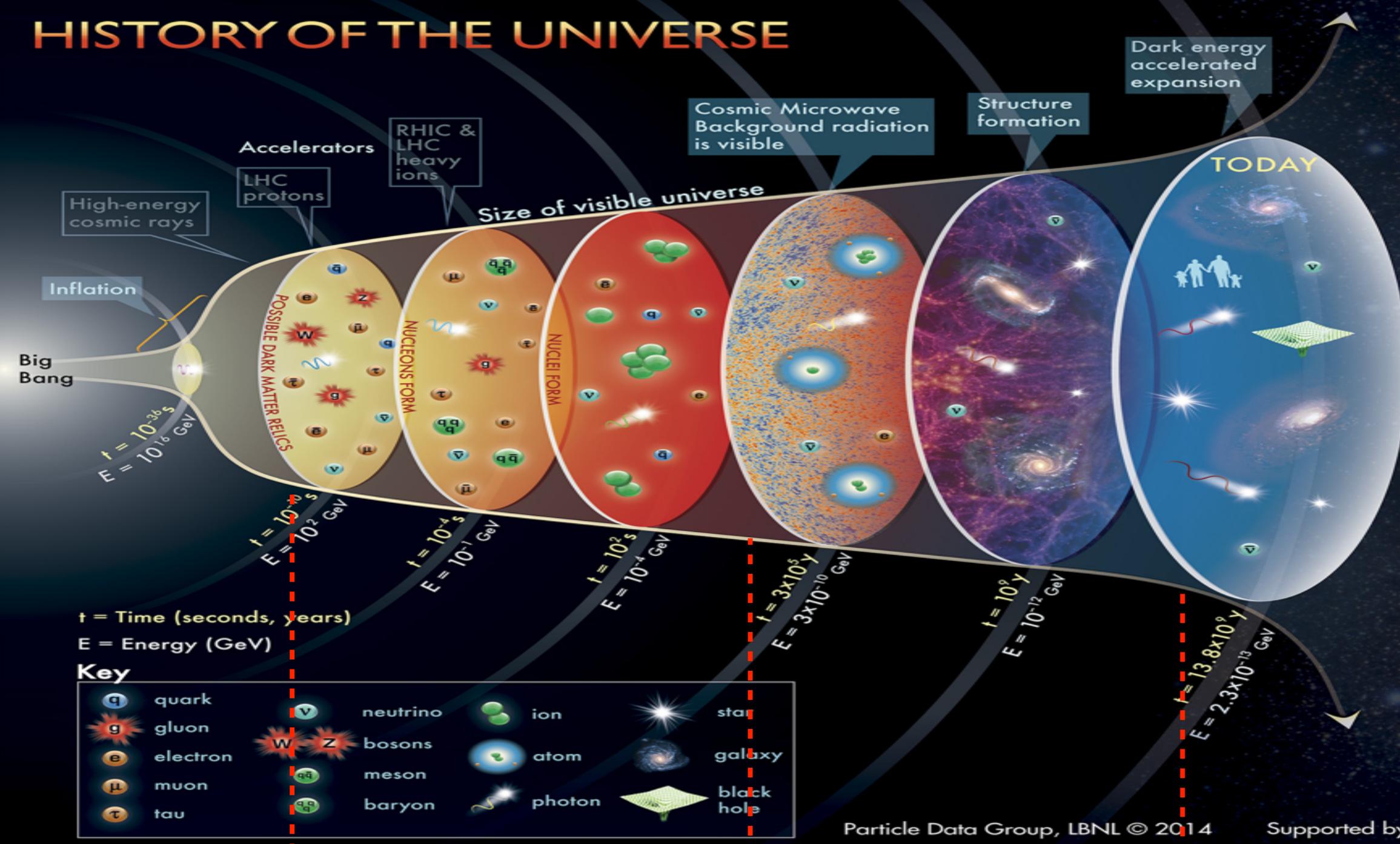
- Rappels sur l'histoire de l'Univers
- **Indications en faveur de l'existence de matière noire** : quelques exemples
 - oscillations acoustiques des baryons
 - amas de galaxies et collisions d'amas
- **Modèles de matière noire**
 - Rappels sur le modèle standard des particules, et revue des idées
 - WIMPs : motivations, recherches « directe » et « indirecte »
 - Neutrinos stériles : motivations, contraintes astrophysiques

Matière noire = fil conducteur

Exemples de sujets de recherche

phénoménologie (théorie) – observations (astro) – expériences (phys. particules)

HISTORY OF THE UNIVERSE



physique inconnue

radiation domine
plasma primordial

matière domine :
formation des structures

énergie noire

→ temps

redshift z

10^6

3000

1100

10

1

facteur d'échelle a

température T

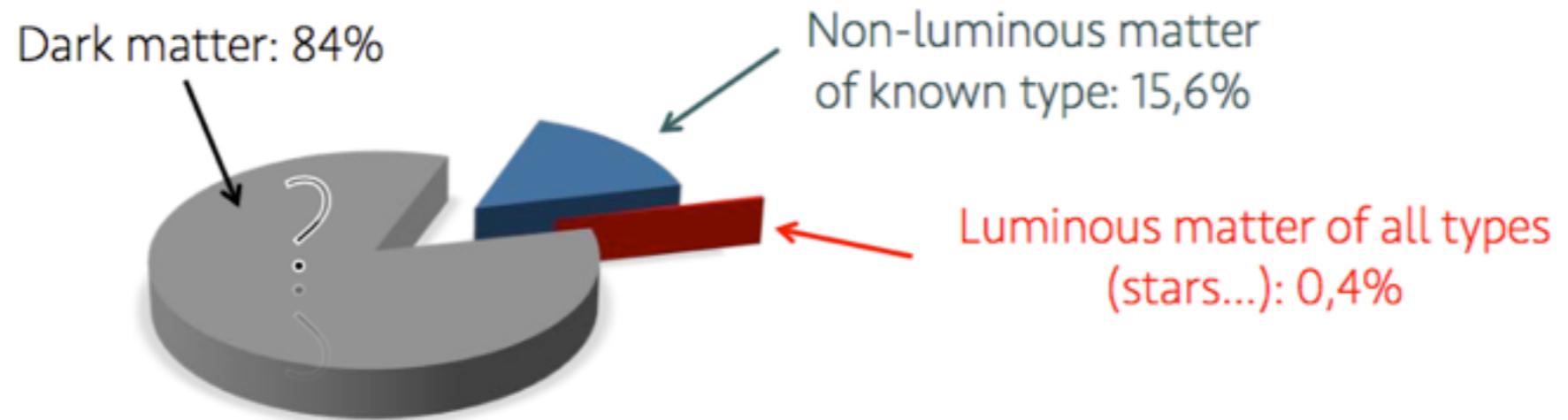
TeV

keV

eV

2.7 K

84% de la masse de l'Univers est de nature inconnue



Dynamique des objets liés par la gravitation

amas de galaxies

galaxies et galaxies naines

Formation des grandes structures

oscillations baryoniques acoustiques (CMB, BAO)

clustering des galaxies

Dynamique globale de l'univers

équations de Friedmann + cosmographie : $\Omega_M \sim 0.3$

nucléosynthèse primordiale : $\Omega_b \sim 0.05$

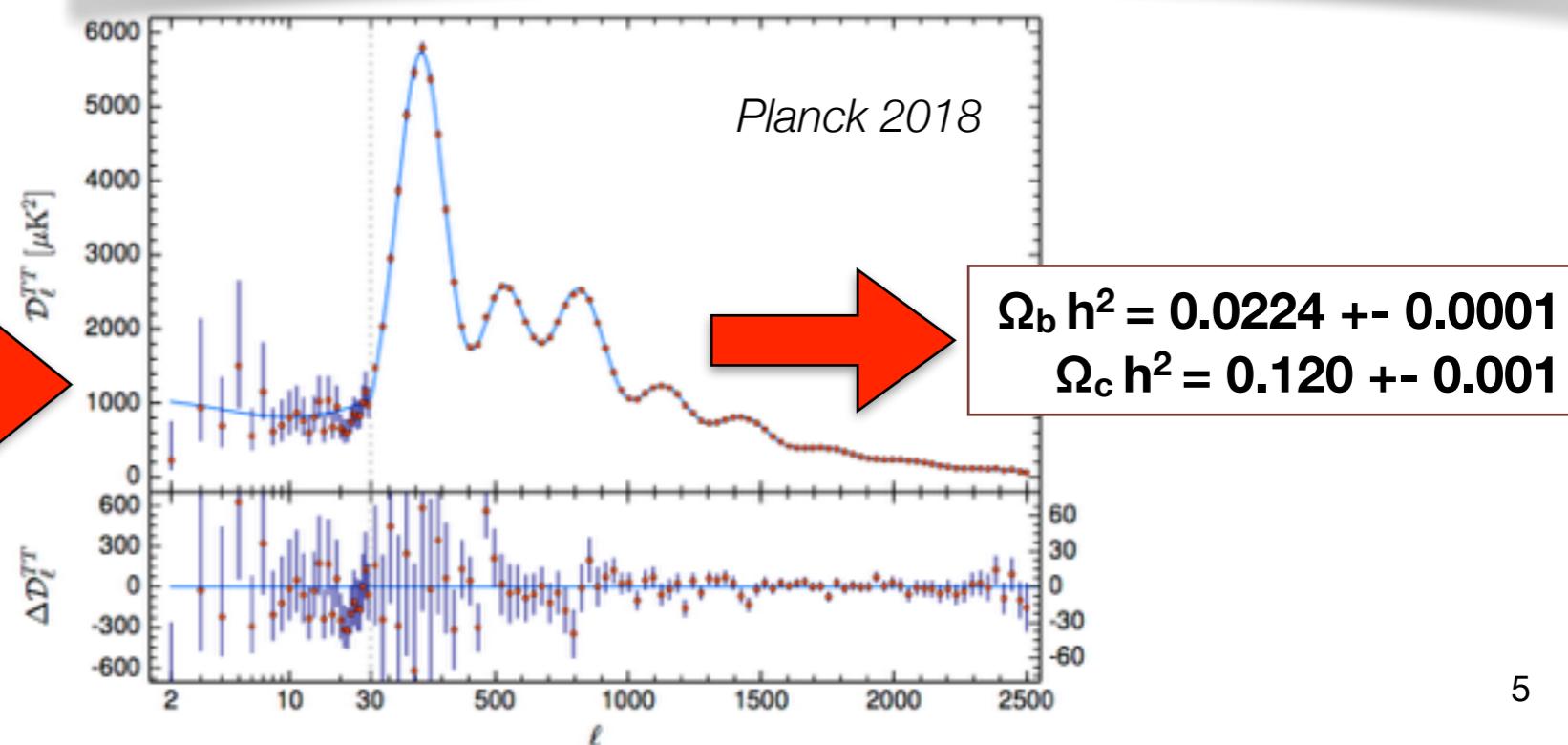
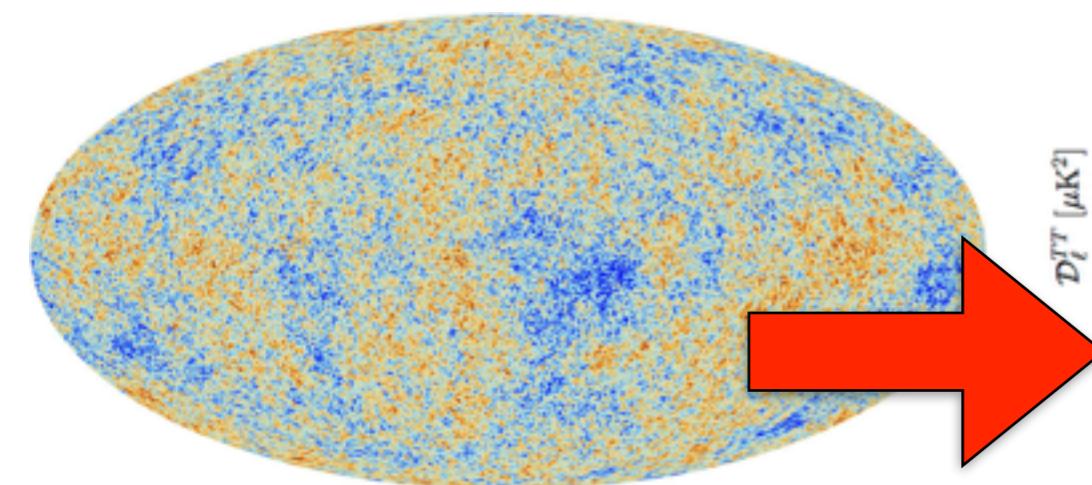
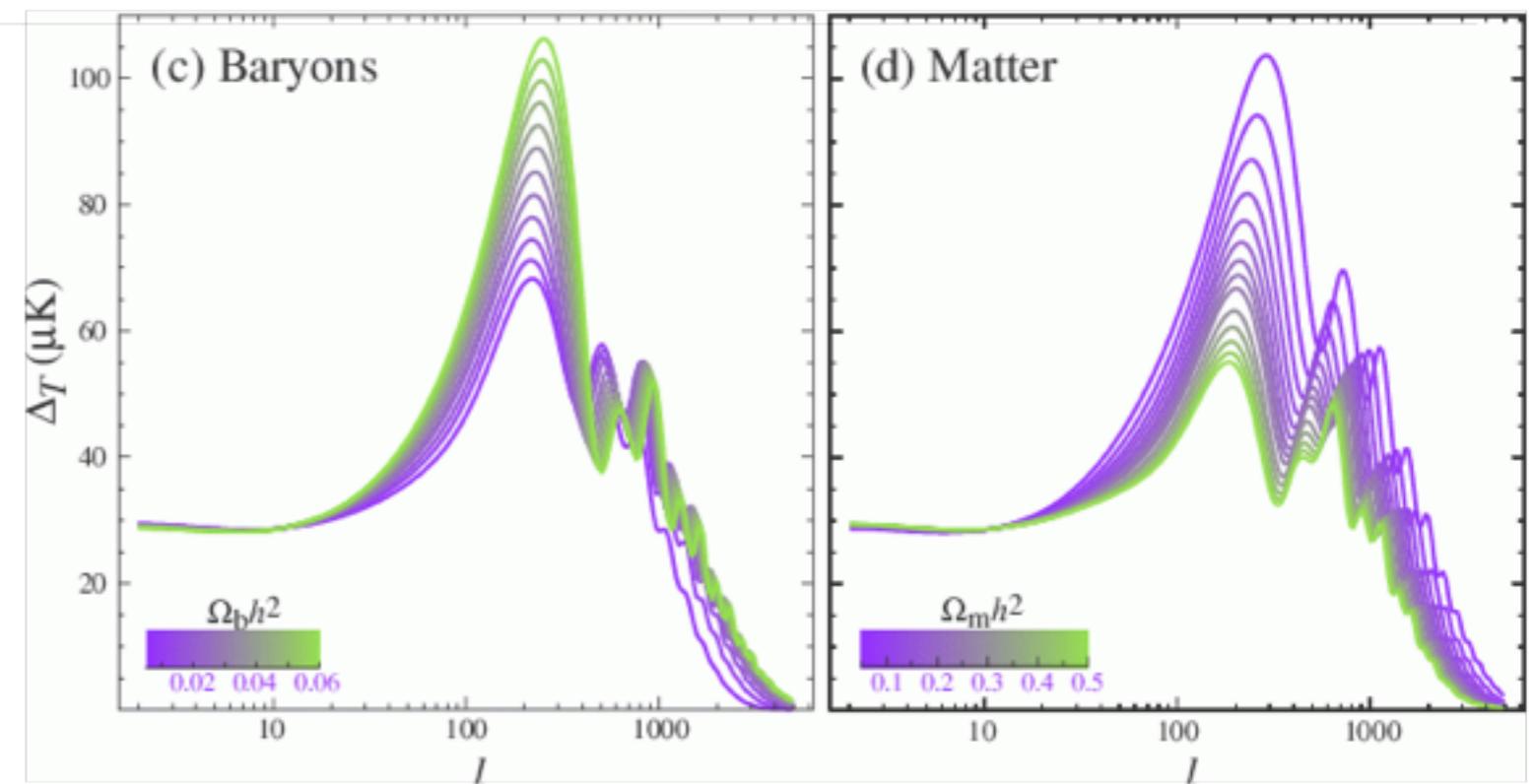
Oscillations acoustiques baryoniques

Entre $z_{\text{eq}} \sim 3000$ et $z_{\text{dec}} \sim 1100$

La matière noire creuse des trous de potentiel gravitationnel

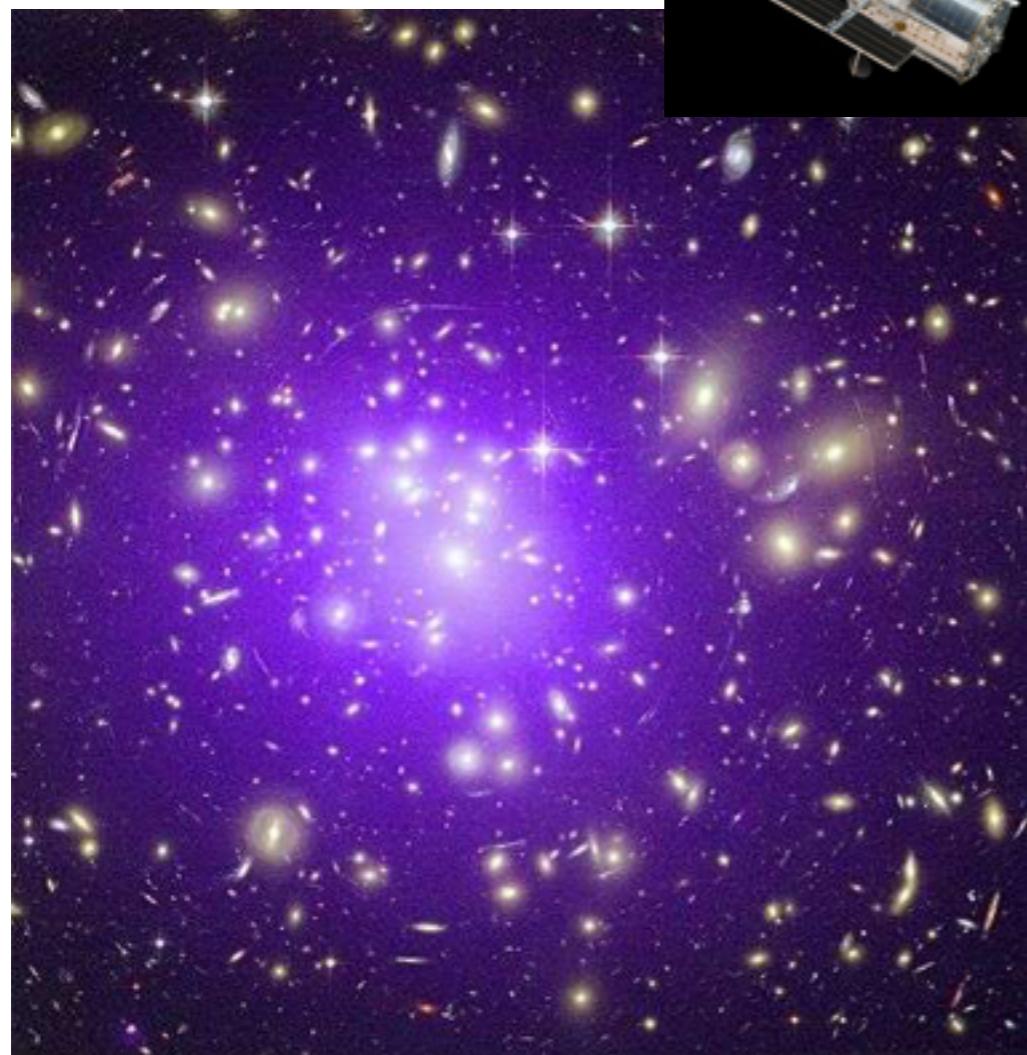
Force de pression dans le fluide couplé baryons-photons

=> Gravité vs pression : oscillations



Amas de galaxies

ex. Abell 1689



Galaxies (optique) sous dominant
Gaz diffus (violet = rayons X)

Taille ~ 2 Mpc

Dispersion des vitesses des galaxies ~ 800 km/s

Théorème du Viriel $E_p + 2E_c = \frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2}$

=> A l'équilibre $\langle v^2 \rangle \sim \frac{GM}{R}$

M_{totale} $\sim 5 \times 10^{14} M_{\odot}$

(Zwicky ~1930s)

Autre mesure : lentillage de galaxies en arrière-plan

Amas de galaxies (2)

Température du gaz (équipartition énergie) :

$$kT \sim \langle E_p \rangle \sim m_{\text{proton}} \langle v^2 \rangle$$

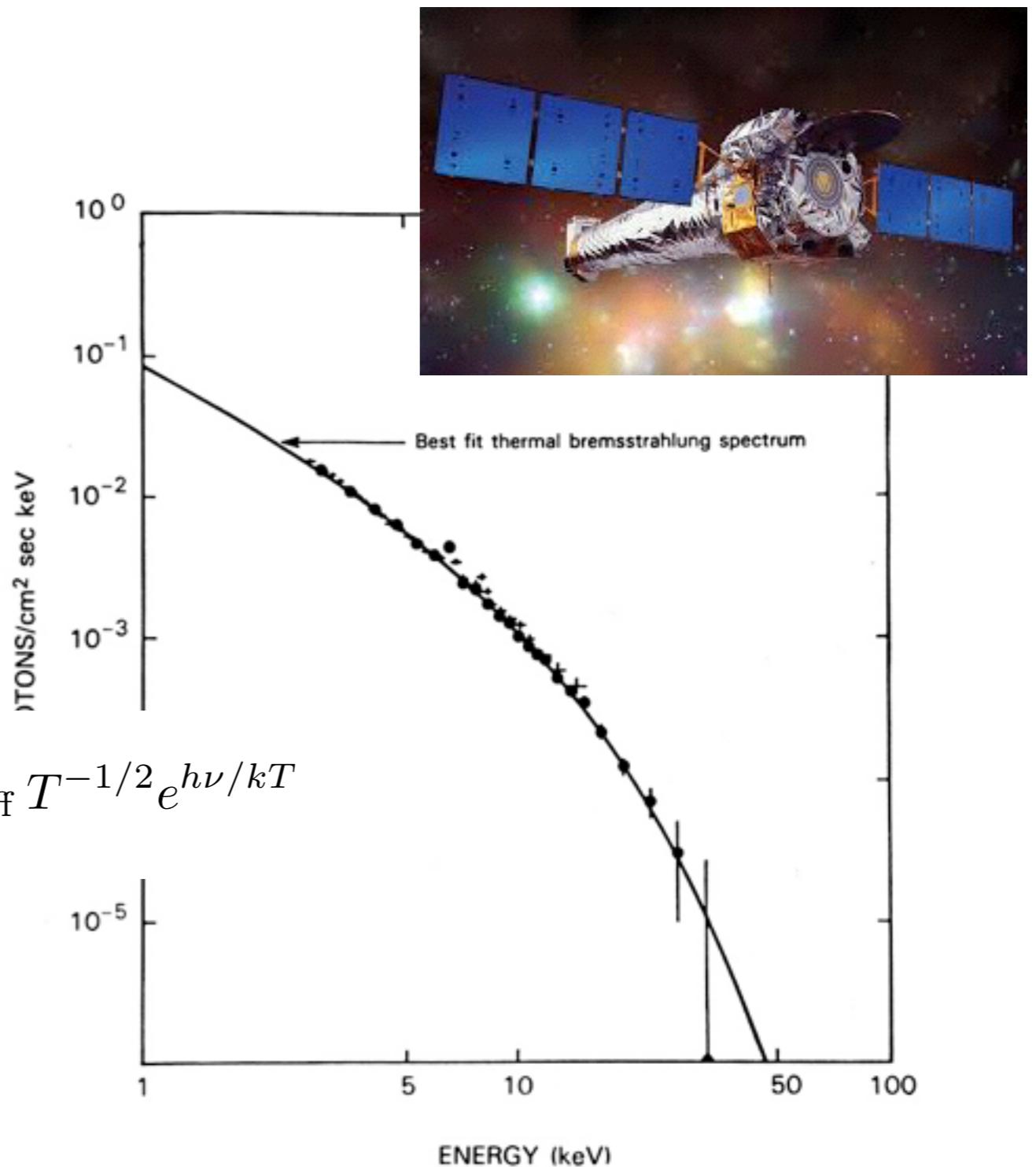
$T \sim \text{keV}$ rayons X

Spectre en énergie : bremsstrahlung

$$\epsilon_{\text{brem}} = \left(\frac{2^5 \pi e^6 Z^2}{3m_e c^3} \sqrt{\frac{2\pi}{3m_e k}} \right) n_e n_{\text{ion}} g_{\text{ff}} T^{-1/2} e^{h\nu/kT}$$

=> Mesure masse du gaz

M_{gaz} ~ 10% M_{totale}



Le Bullet cluster

Nuages de gaz interagissent (choc); se séparent des trous de potentiel

La matière noire est « sans collision »



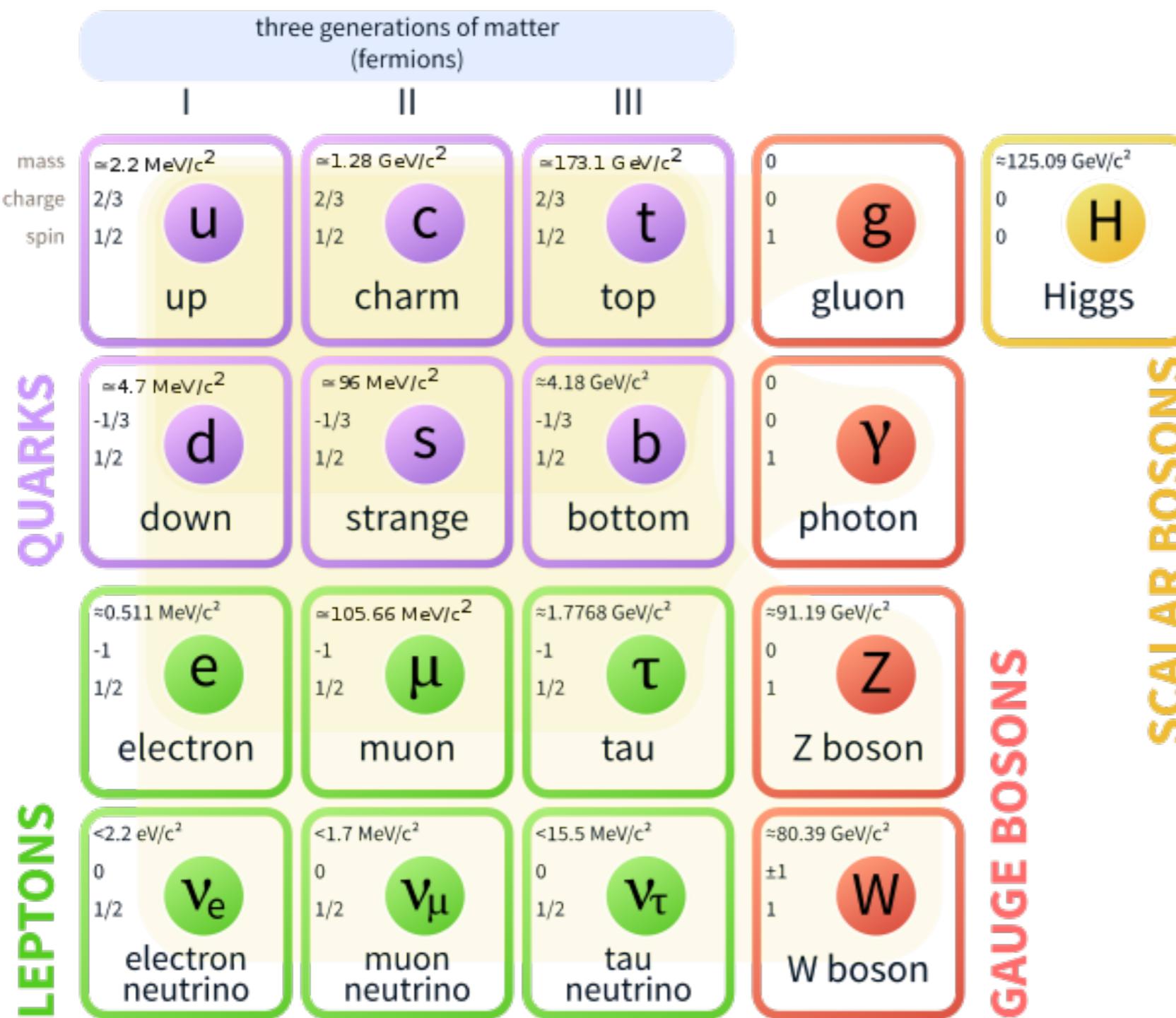
σ = section efficace de diffusion DM-DM
 $\langle \text{nb de diffusions} \rangle = \sigma \times R \times \text{densité}$

$$\frac{\sigma}{m} \lesssim \frac{R^2}{M}$$

$\sigma/m < \text{cm}^2/\text{g}$
pour $m \sim \text{GeV}$: $\sigma < \text{barn}$
interaction forte

=> Un exemple de contrainte sur les propriétés microphysiques de la matière noire

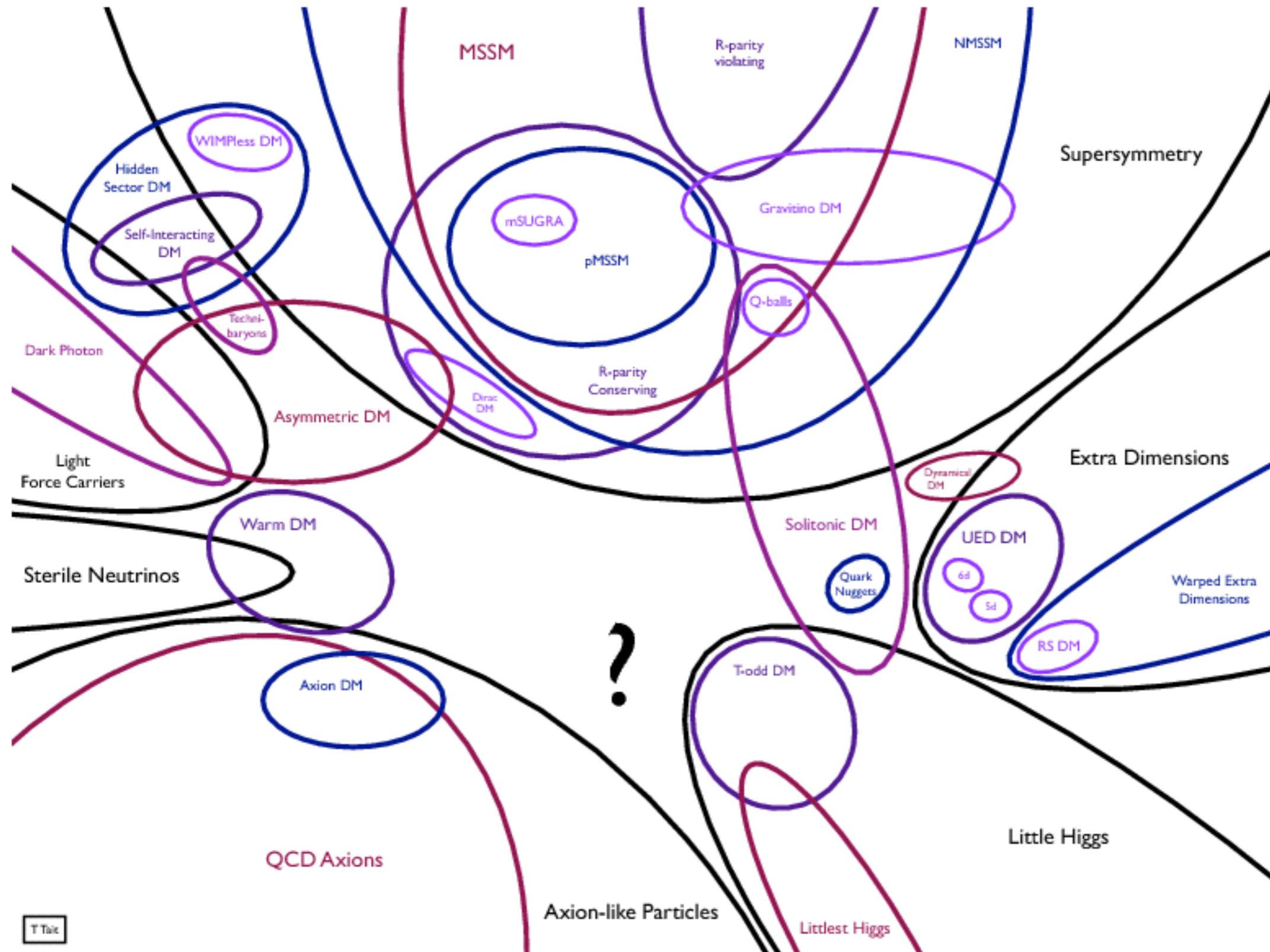
Standard Model of Elementary Particles



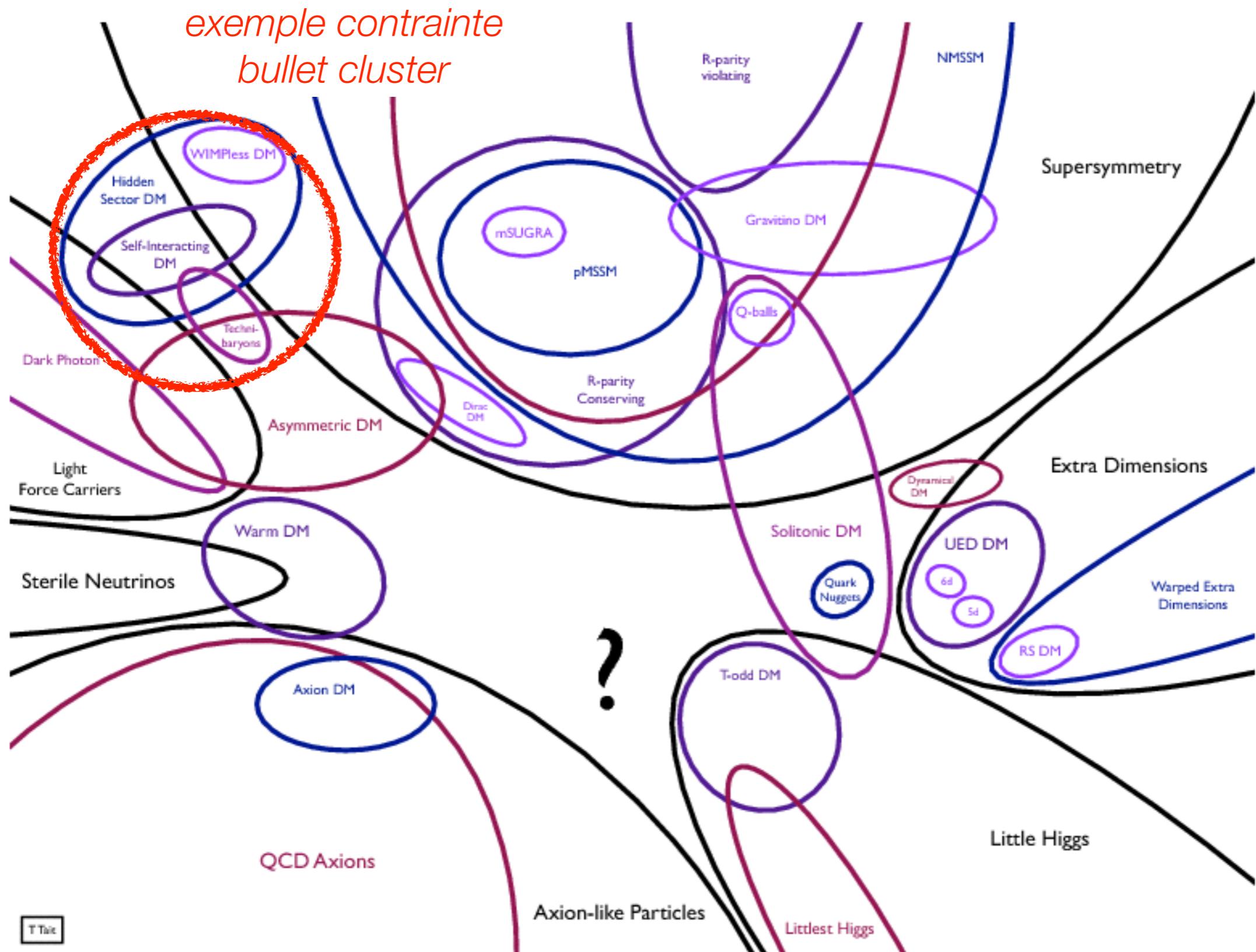
matière noire :
stable, neutre (QED
et QCD)

Neutrinos ?
Non, trop légers
(relique « chaude » :
relativiste au moment
de la formation des
structures)

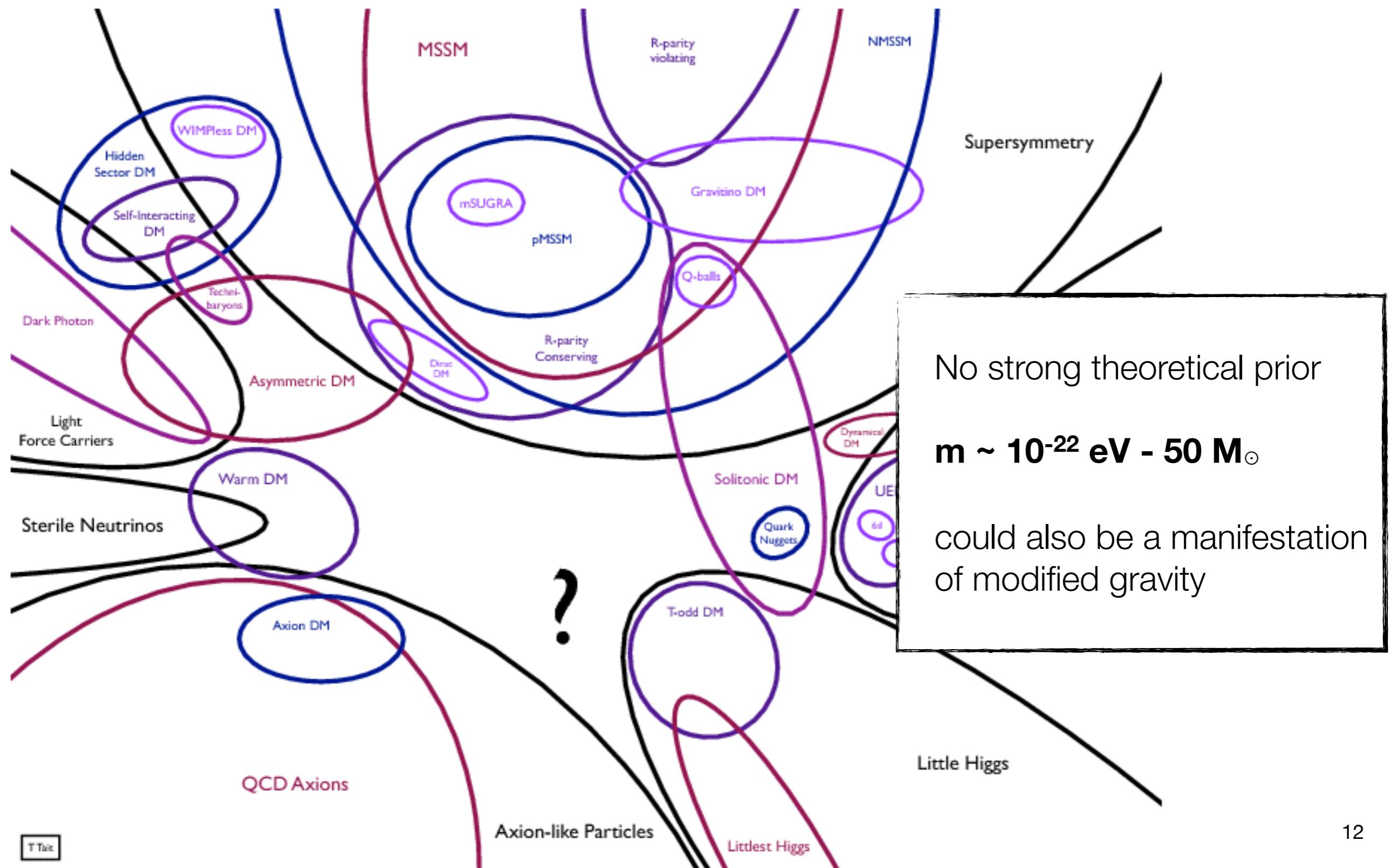
What is Dark Matter ??



What is Dark Matter ??



What is Dark Matter ??



Fuzzy DM

Sterile
neutrinos

WIMPs

Primordial
black holes

10^{-22} eV

μeV

keV

MeV

GeV

TeV

M_{Pl}

$50 M_{\odot}$

QCD
axions

Asymmetric DM
Self-interacting DM

WIMPzillas

Les WIMPs

LE « candidat » privilégié par beaucoup de chercheurs depuis les années 1980

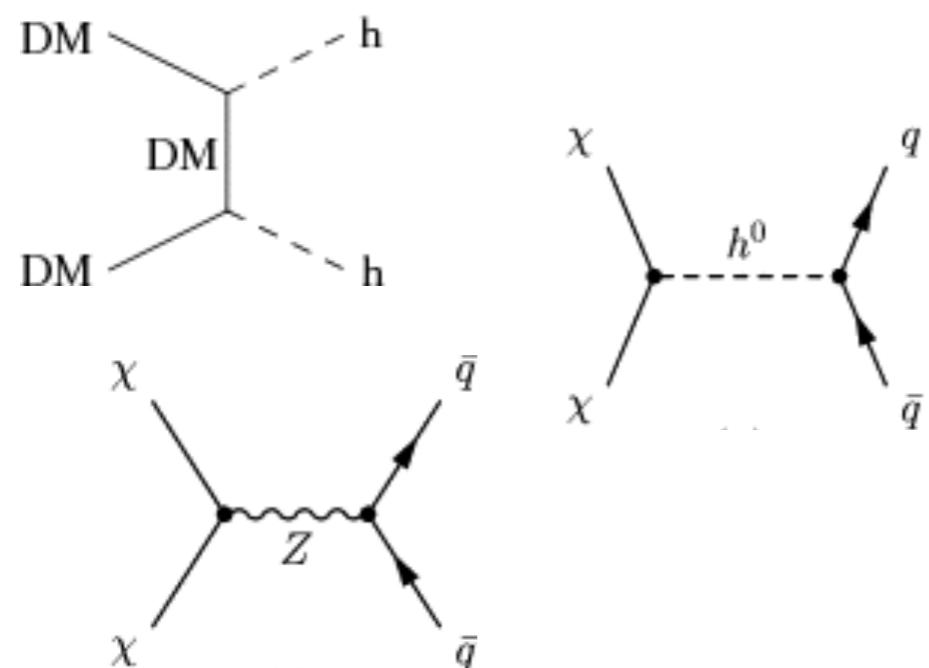
- motivation théorique + testable
- *mais de moins en moins privilégié de nos jours ...*

« Nouvelle physique » à l'échelle électrofaible

Nouvelles particules stables $m \sim 100 \text{ GeV}$, couplages « faibles »

SUSY, dimensions supplémentaires, Higgs + complexe...

Processus-clef : annihilation (particule = antiparticule)

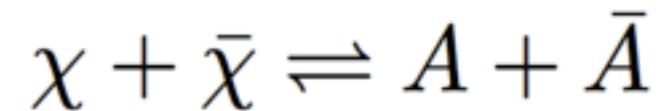
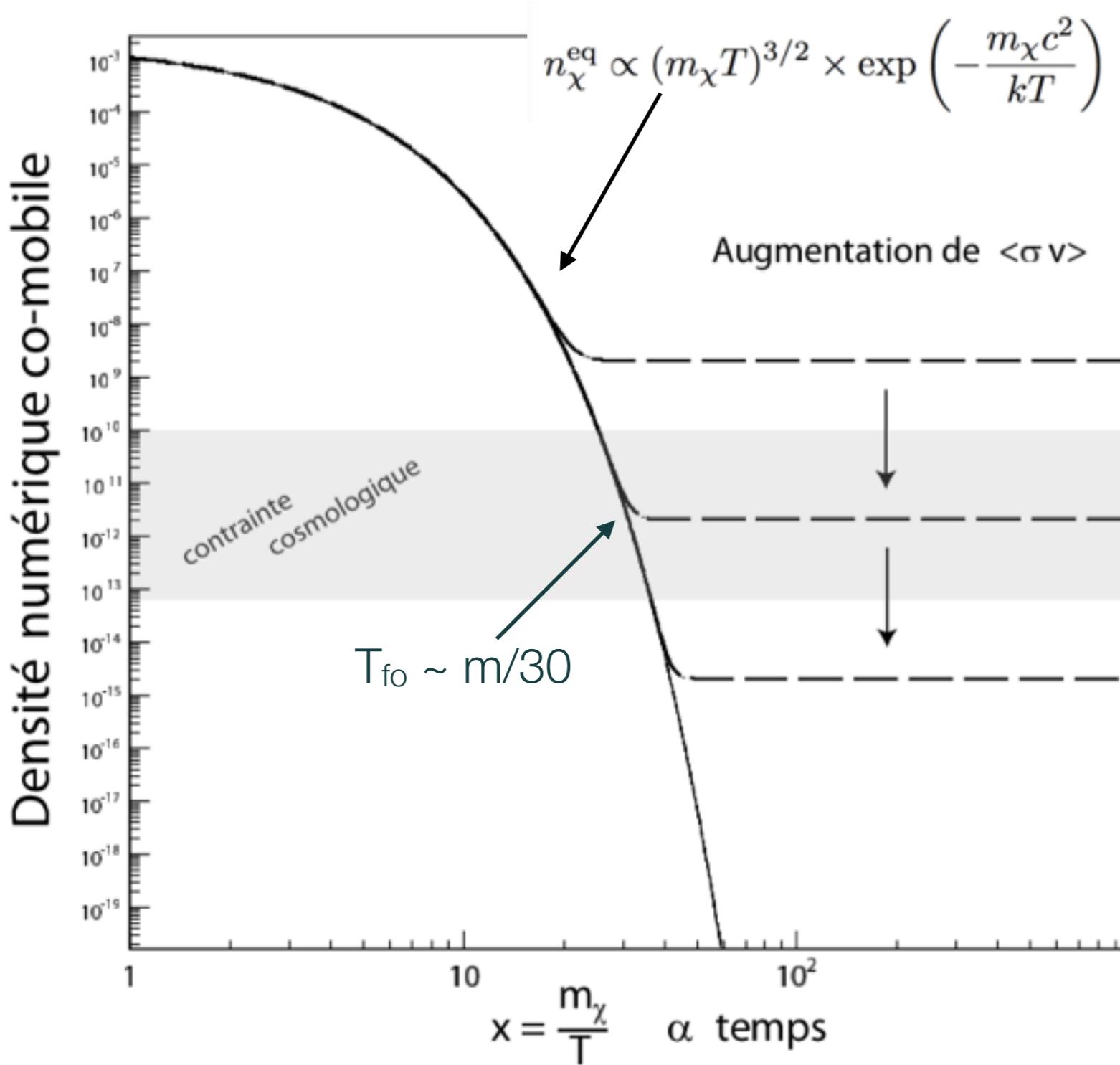


$$\sigma \sim \frac{g^4}{m^2}$$

$$g^2 \sim 1/137$$
$$m \sim 100 \text{ GeV}$$

$$\Rightarrow \sigma \sim 2 \times 10^{-36} \text{ cm}^2$$

Le miracle WIMP



Initialement à l'équilibre thermique

Expansion => gel des interactions
« freeze-out »

$$\Gamma_{\text{fo}} = n_{\text{fo}} \langle \sigma v \rangle \sim H_{\text{fo}}$$

$$H \sim T^2 \text{ (Friedmann)}$$

$$\Omega = \frac{\rho_{\text{now}}}{\rho_c} \sim \frac{m}{\rho_c} \left(\frac{T_0}{T_{\text{fo}}} \right)^3 n_{\text{fo}}$$

$$\boxed{\Omega_\chi h^2 = \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma v \rangle}}$$

$\Omega \sim 1$ coïncidence ?

Plus en détail

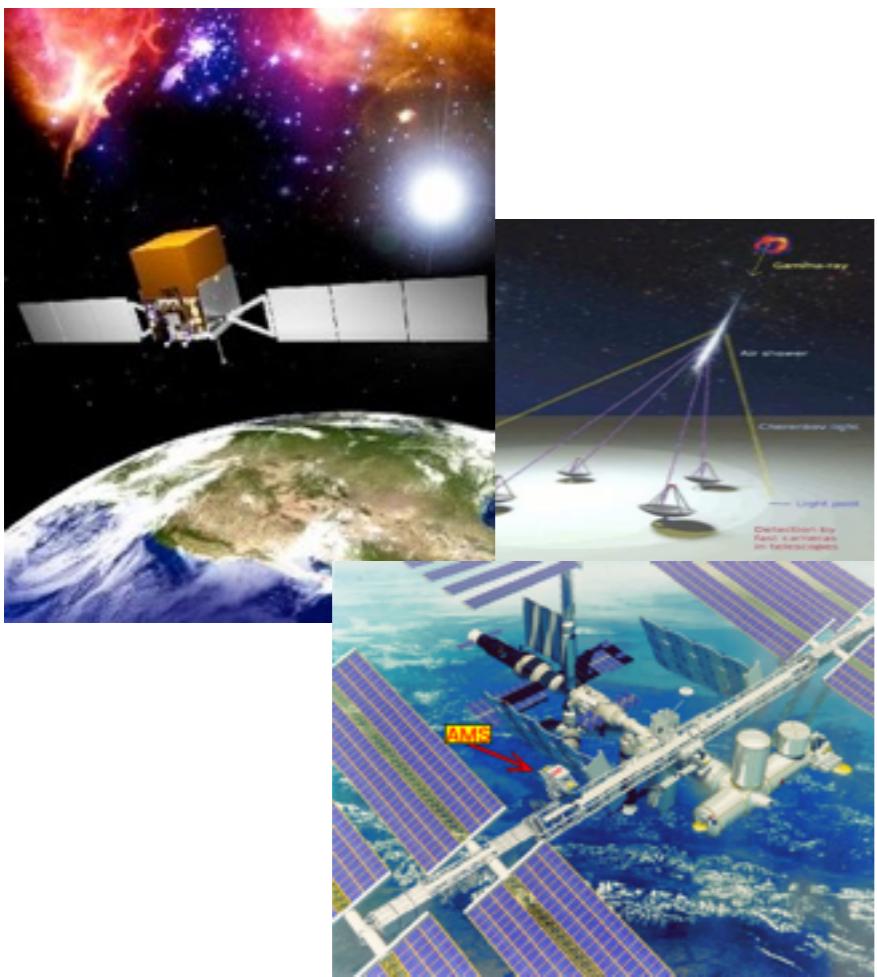
$$\frac{dn_\chi}{dt} = -3 H n_\chi - \langle \sigma v \rangle \{ (n_\chi)^2 - (n_\chi^{\text{eq}})^2 \}$$

Equation de Boltzmann

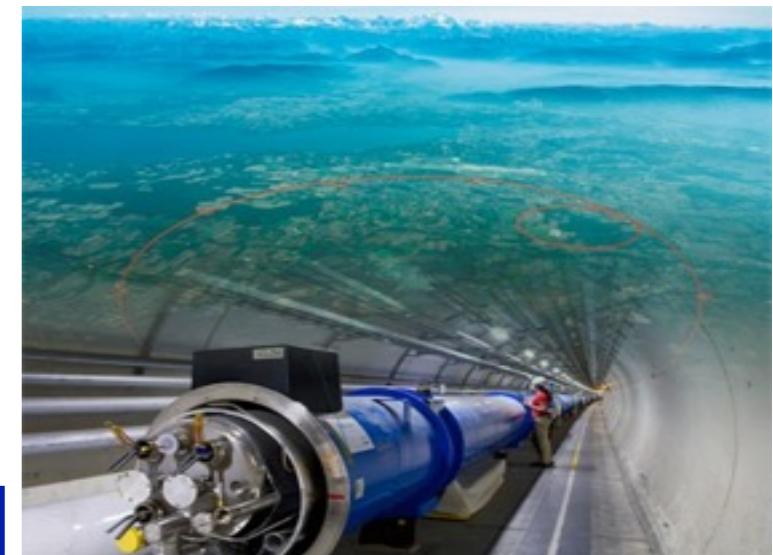
=> Résolution numérique

Le scénario WIMP est testable

Indirect detection



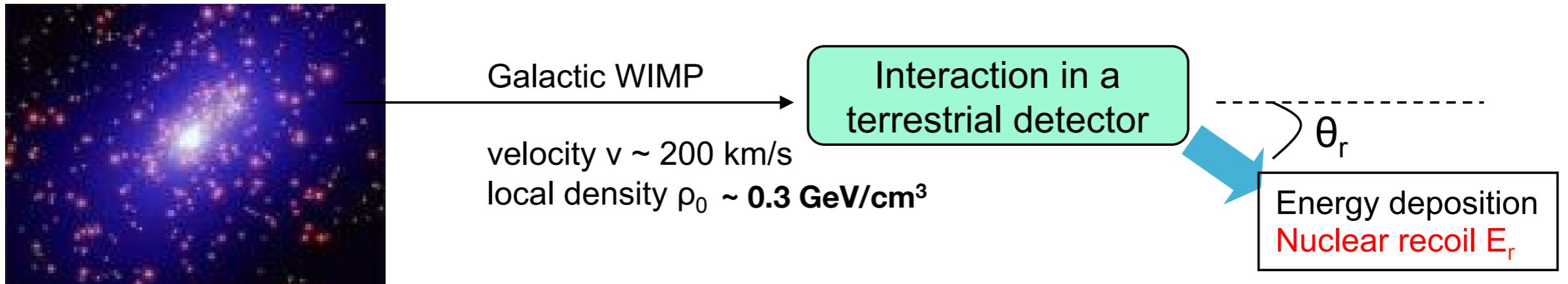
Colliders



Direct detection



Détection directe des WIMPs



$$E_r = \left(\frac{m_\chi}{2} v^2 \right) \times \frac{4m_N m_\chi}{(m_N + m_\chi)^2} \times \cos^2 \vartheta_r \quad \sim 1 - 100 \text{ keV}$$

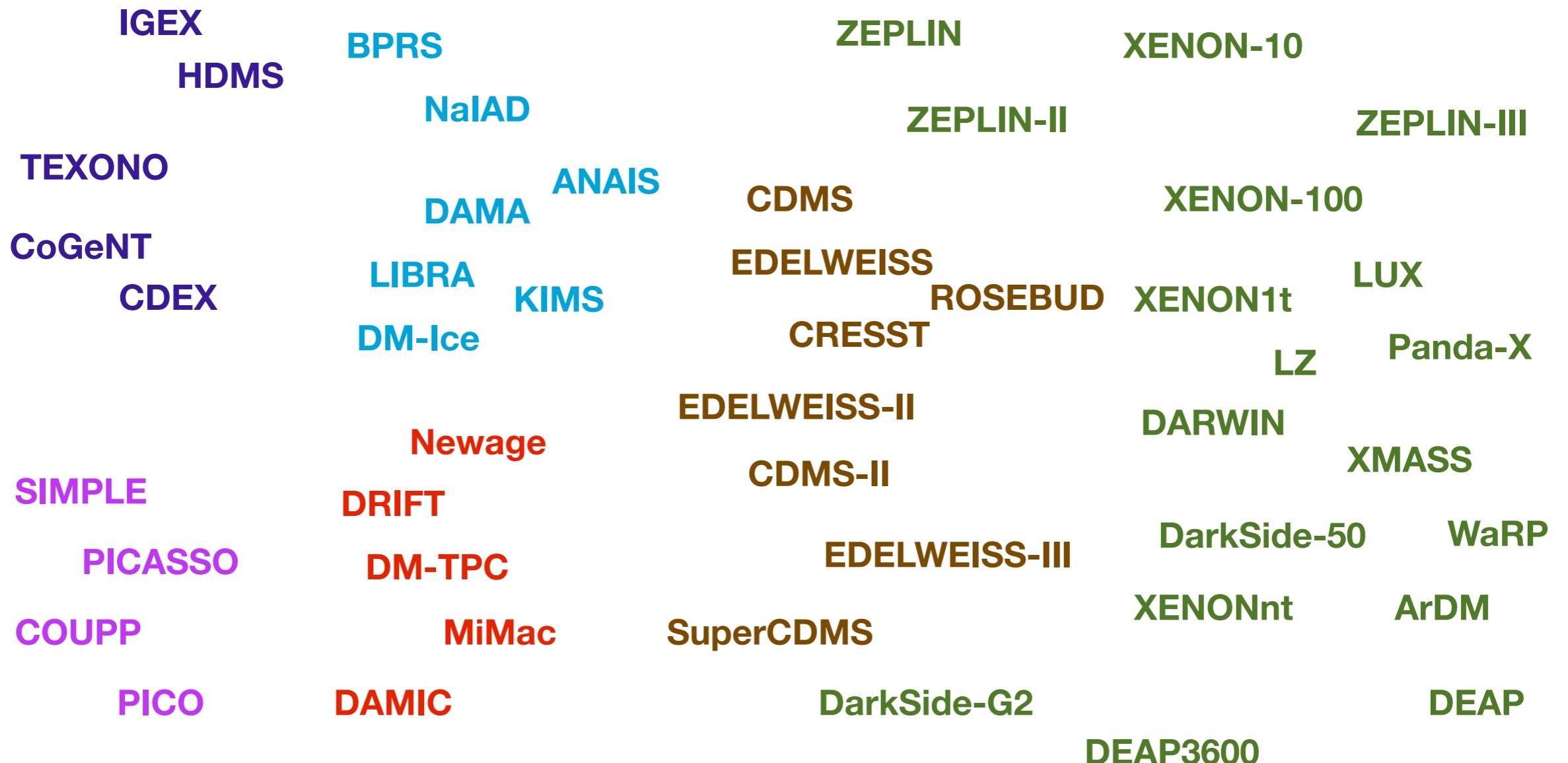
$$\text{Taux}(\text{/kg/s}) \sim \frac{1}{m_N} \frac{\rho_{\text{local}}}{m_X} \sigma v$$

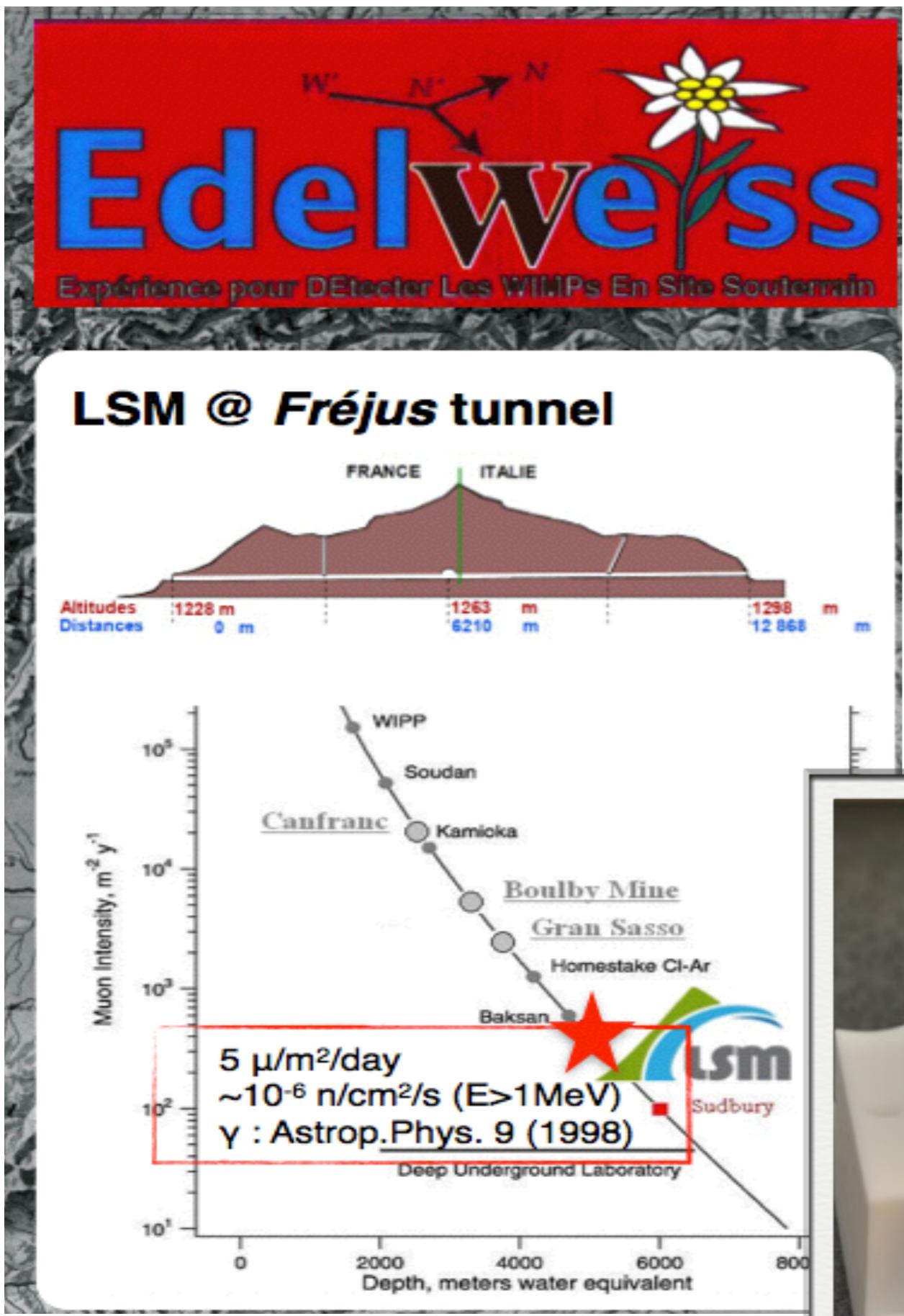
$\sim 1 \text{ interaction / tonne / jour}$
pour $A = 100$ et $\sigma \sim 3 \times 10^{-32} \text{ cm}^2$

=> DéTECTEURS spécifiques :

- **bas seuil en énergie**
- **ultra-bas bruit de fond radioactif**

Beaucoup de développements de détecteurs ...

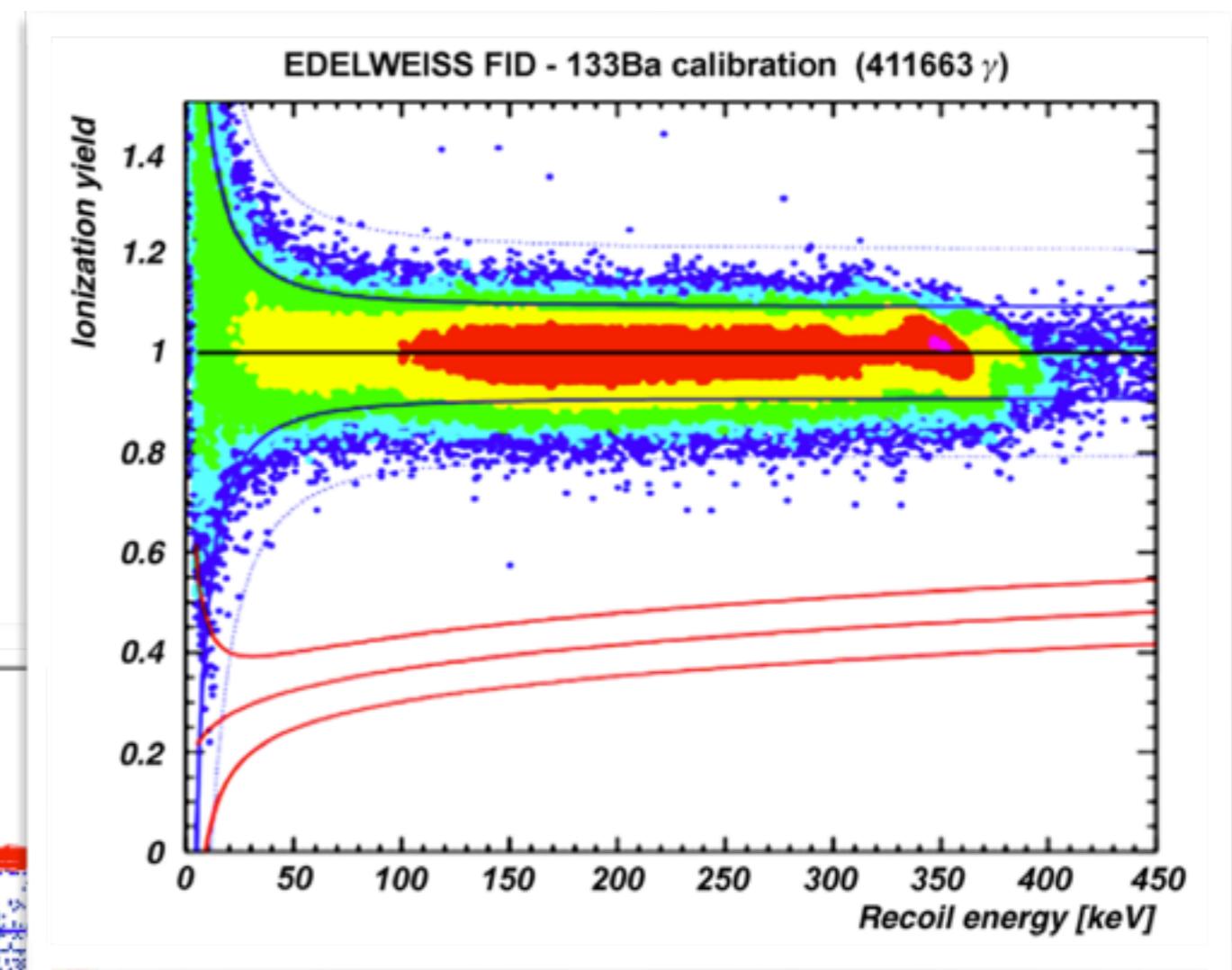
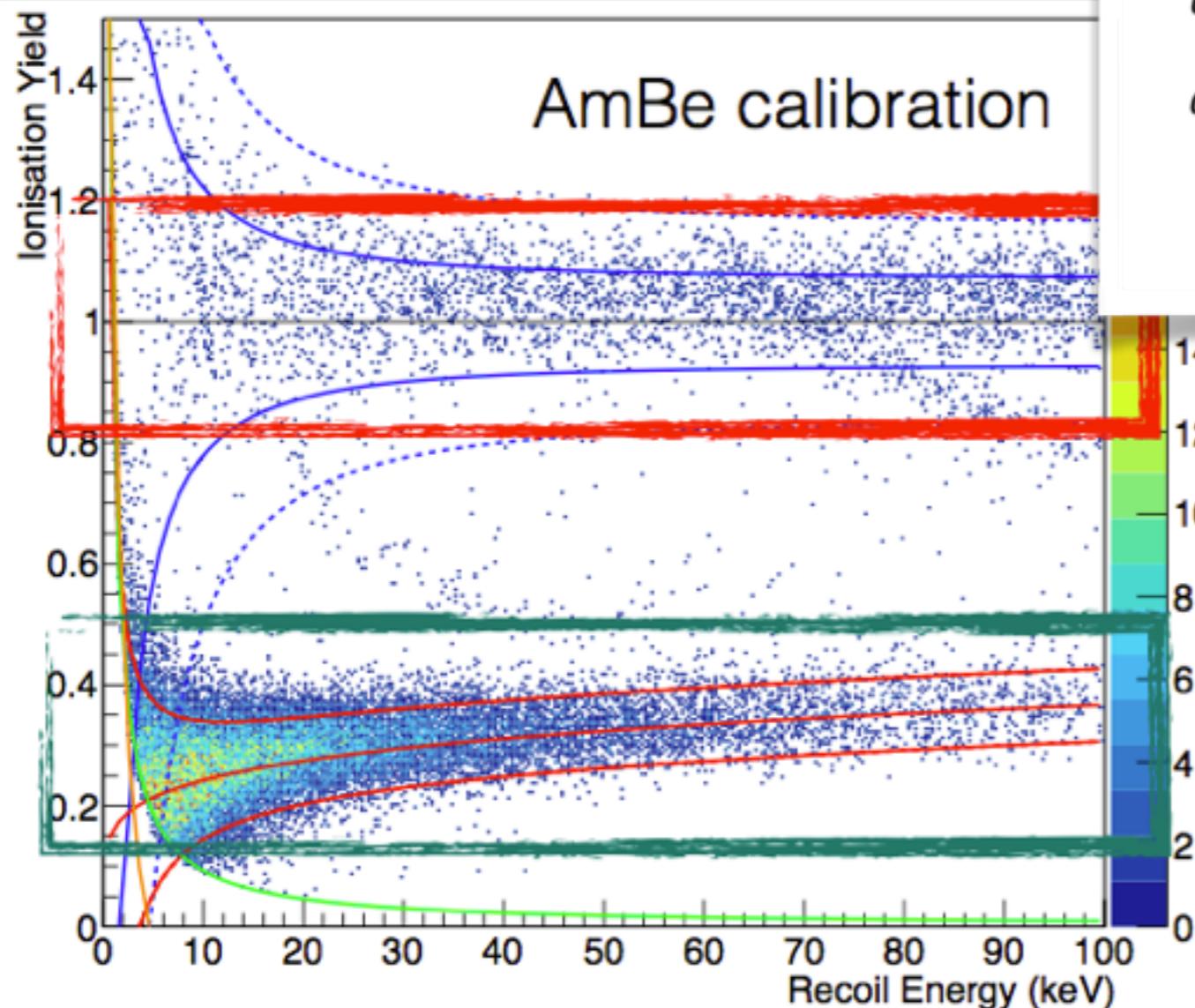




Bolomètres en germanium refroidis à ~ 20 mK

Interaction (radioactivité, WIMP...) :

- Mesure élévation de température
- Mesure signal d'ionisation

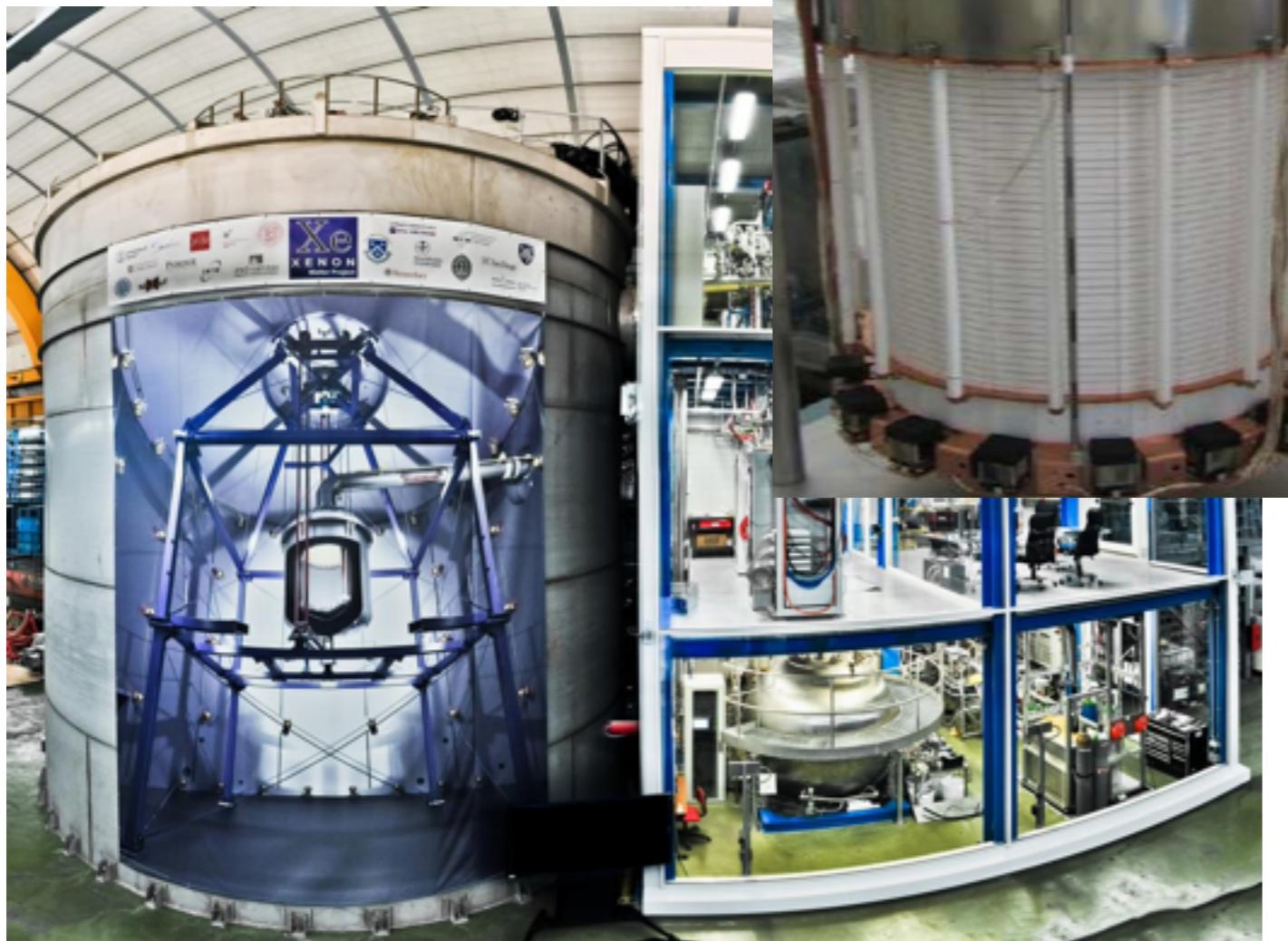


Reculs électroniques (bruits de fond)

**Neutrons = reculs nucléaires
~ signal de WIMPs**



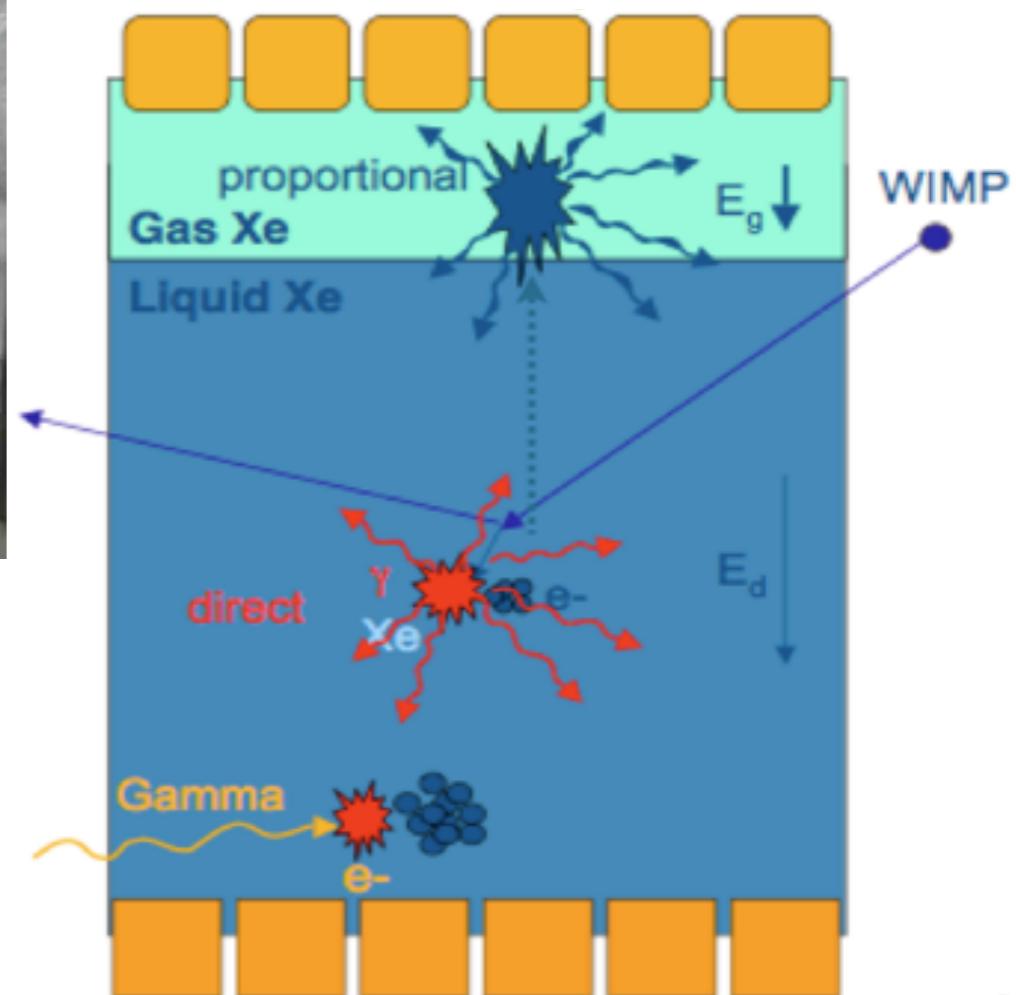
XENON1t @ Gran Sasso

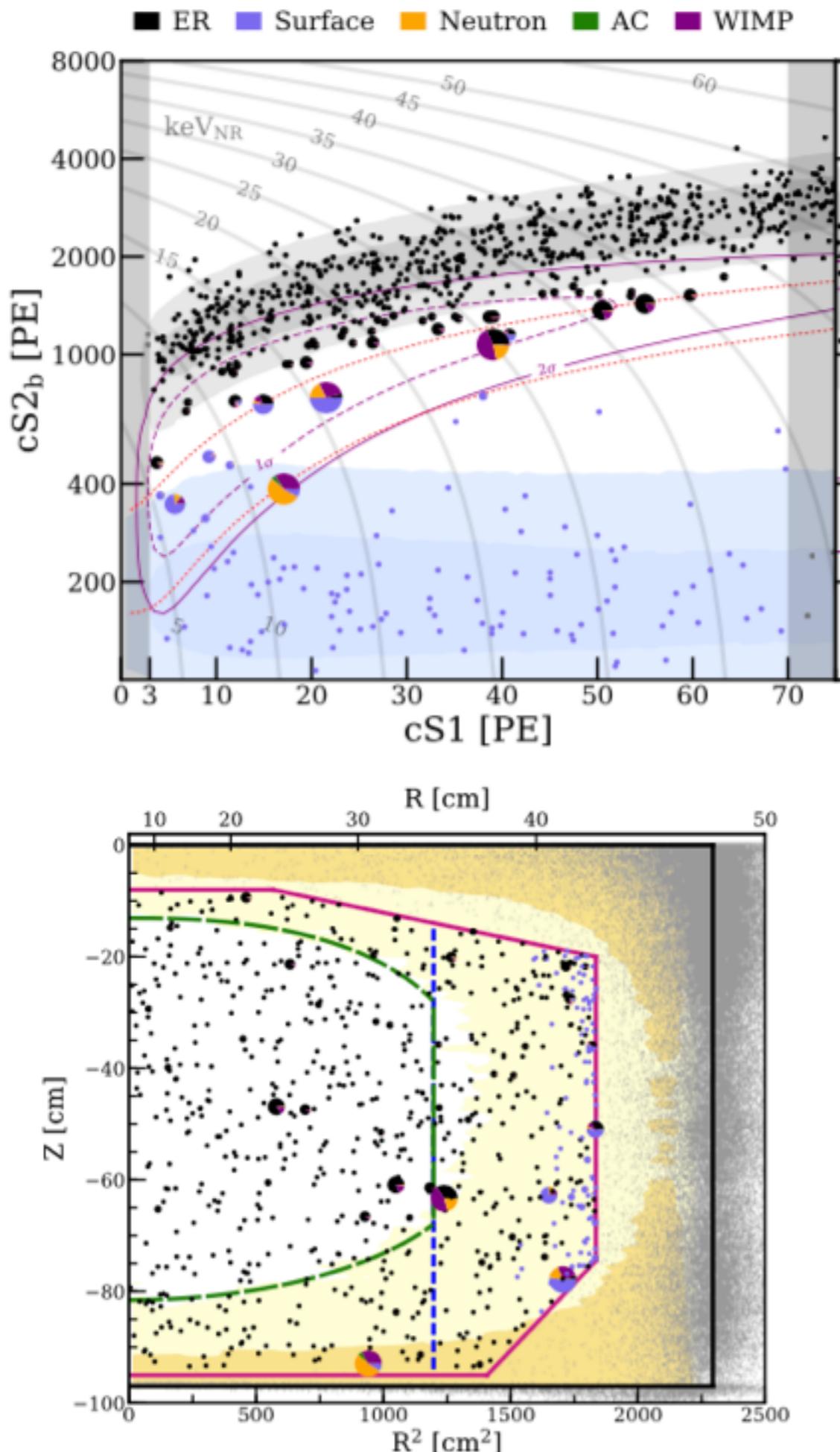


XENON100



S1 : scintillation
S2 : ionisation
3D event reconstruction

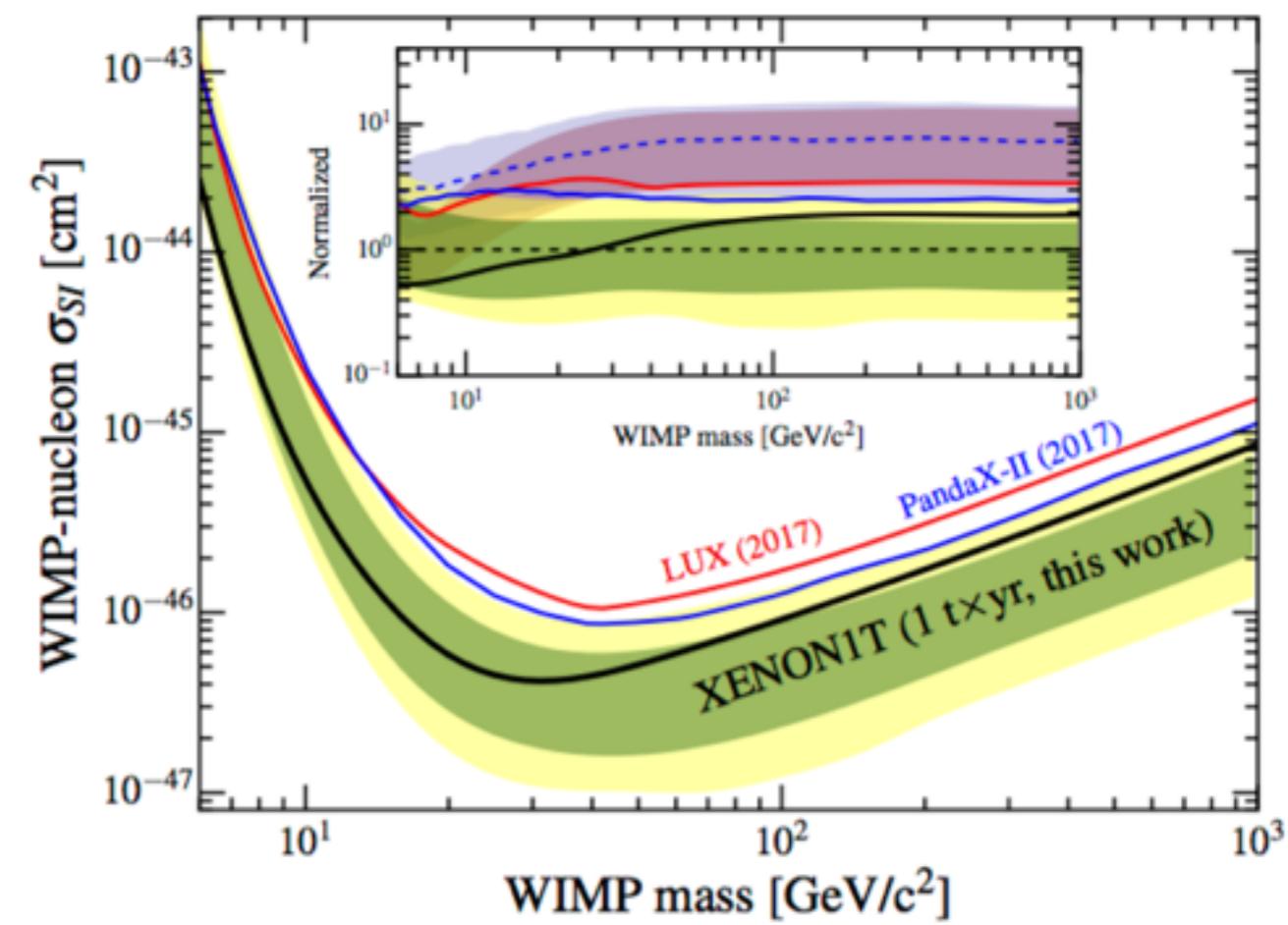




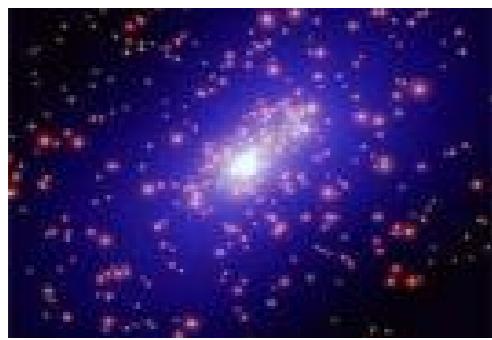
XENON1t 2018

Résultat d'une exposition 1 tonne-an

Analyse statistique : données compatible avec bruits de fond => limite sur la section efficace de diffusion WIMP-noyau



WIMPs : « détection indirecte »



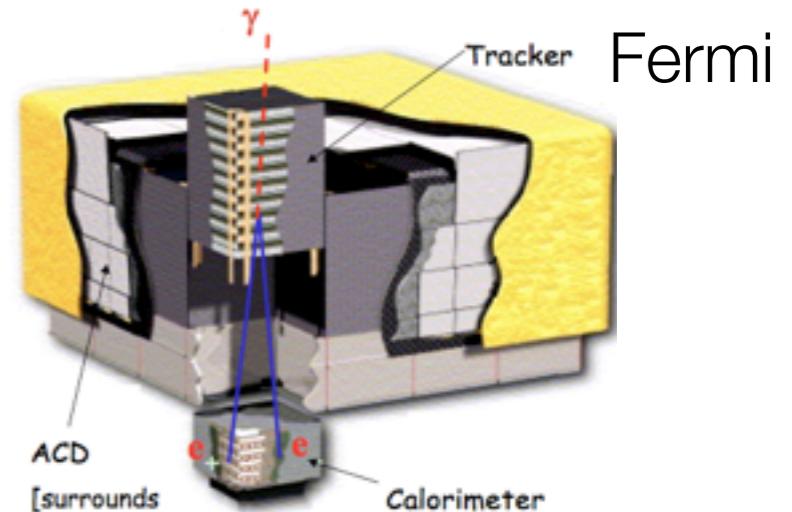
} Area of high DM density :
 $\chi \chi \rightarrow \gamma, p, e\dots$
 high energy secondaries
 propagate towards the observer

$$\Phi_i(\psi, E) = \sigma v \frac{dN_i}{dE} \frac{1}{4\pi m_{\text{DM}}^2} \int_{\text{line of sight}} ds \rho^2(r(s, \psi))$$

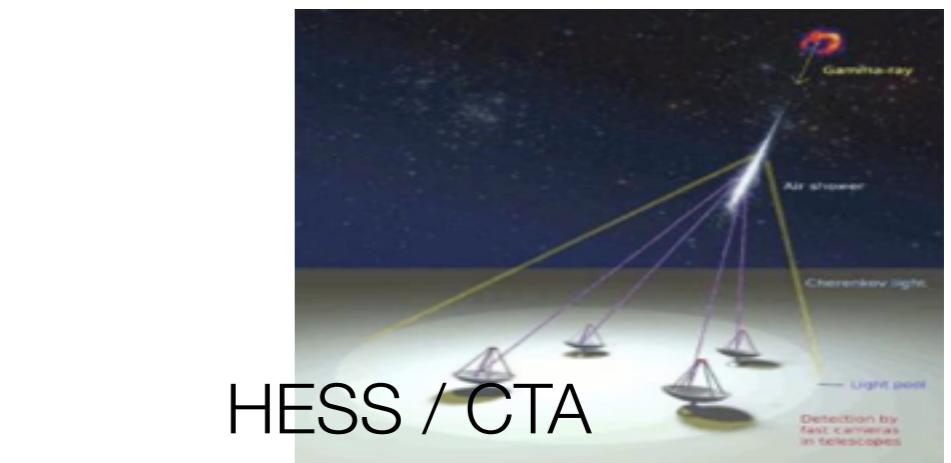
Annihilation

Particle
physics

astrophysics

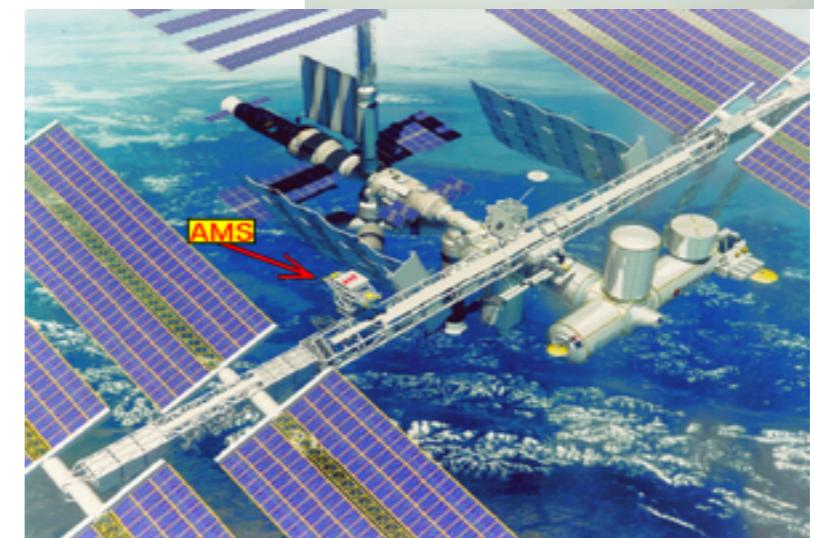
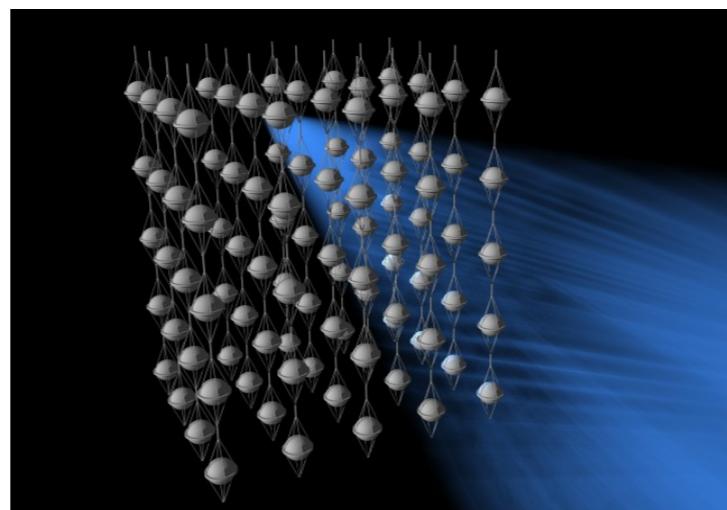


Fermi



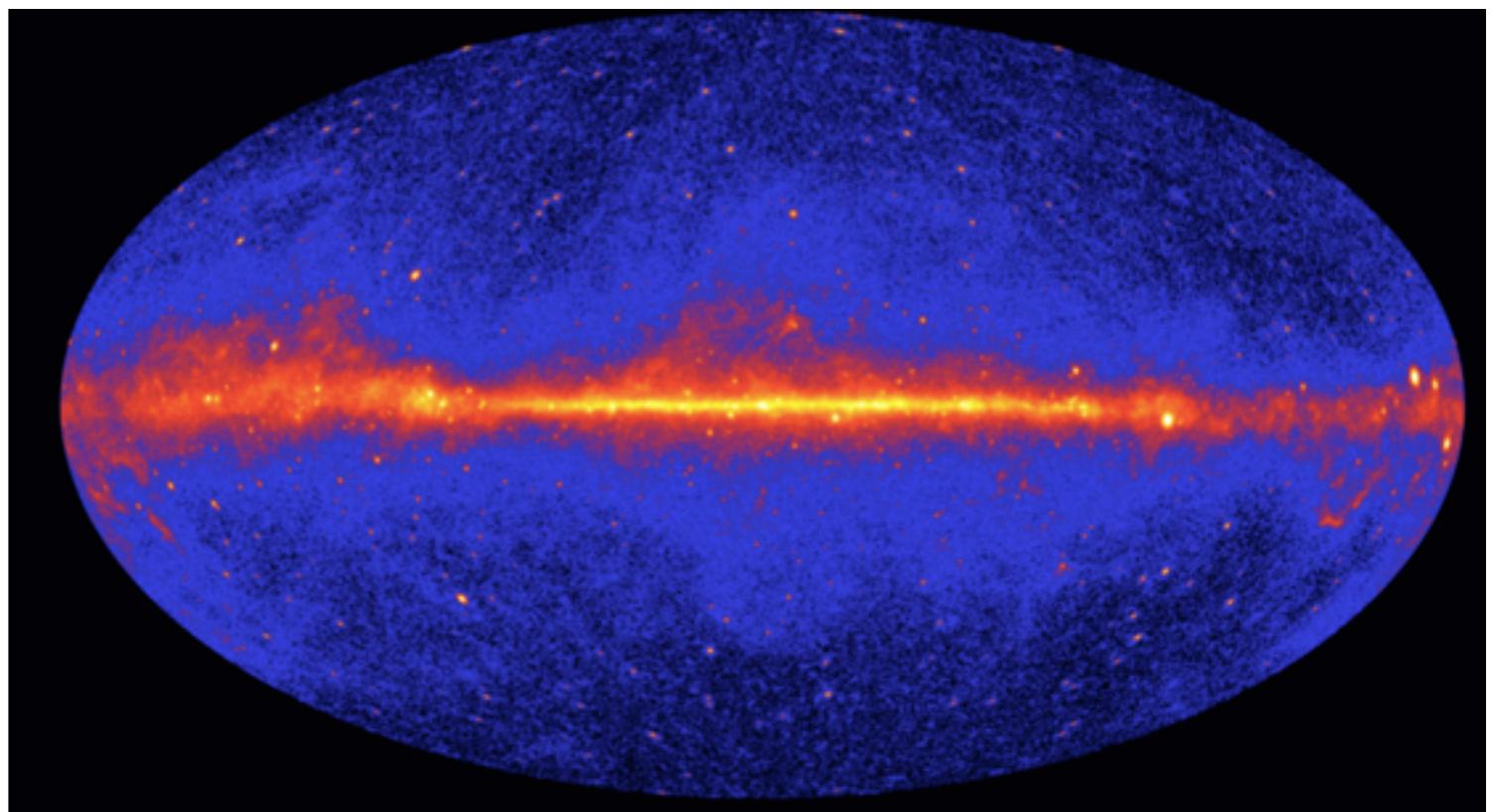
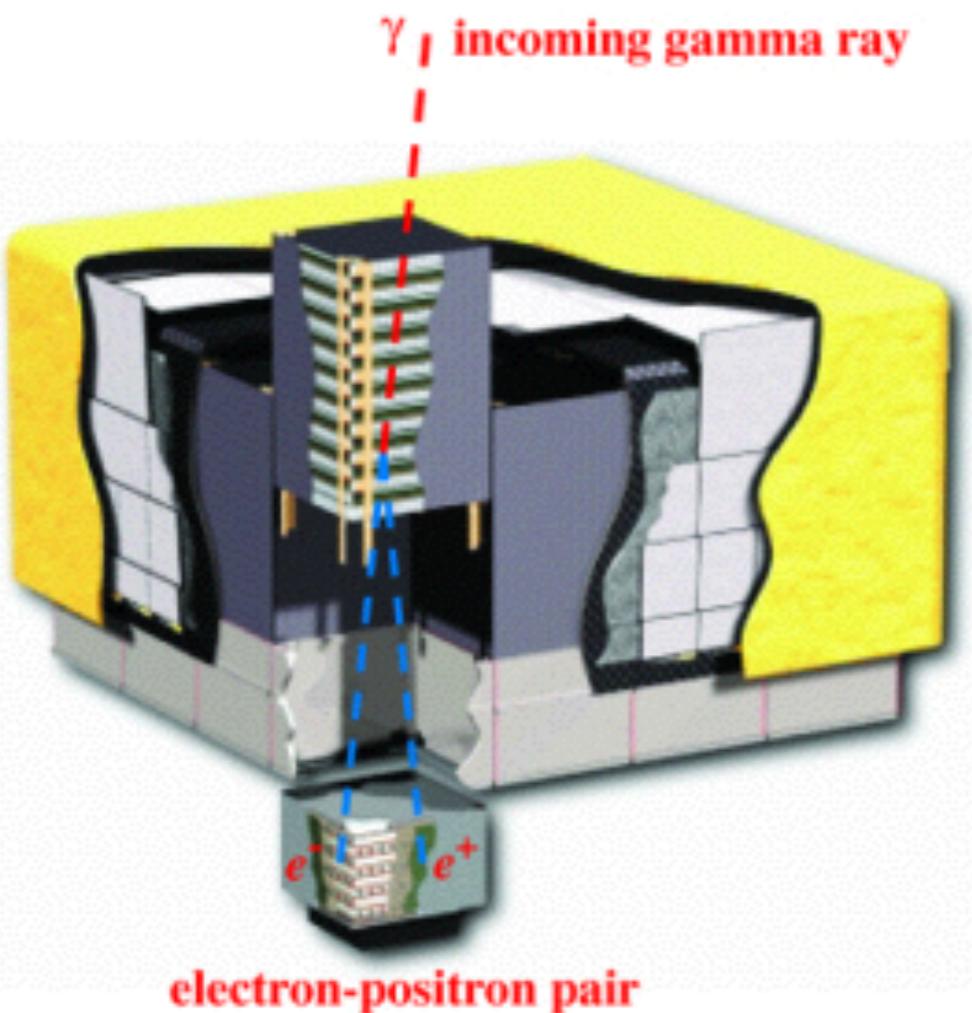
HESS / CTA

Antares /
IceCube



AMS

Exemple : Fermi



Exemple : annihilation de WIMPs dans les galaxies naines sphéroïdales (Fermi)

- Pas de flux de photons au GeV observé : $\phi \lesssim 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Fornax

- Flux prédict : $\Phi = \frac{\bar{n}}{4\pi} \int d\Omega \int dl \frac{d\Gamma}{dV} \equiv \frac{\bar{n} \langle \sigma v \rangle}{4\pi m^2} J$

n : nb de photons / annihilation
taux volumique d'annihilations :

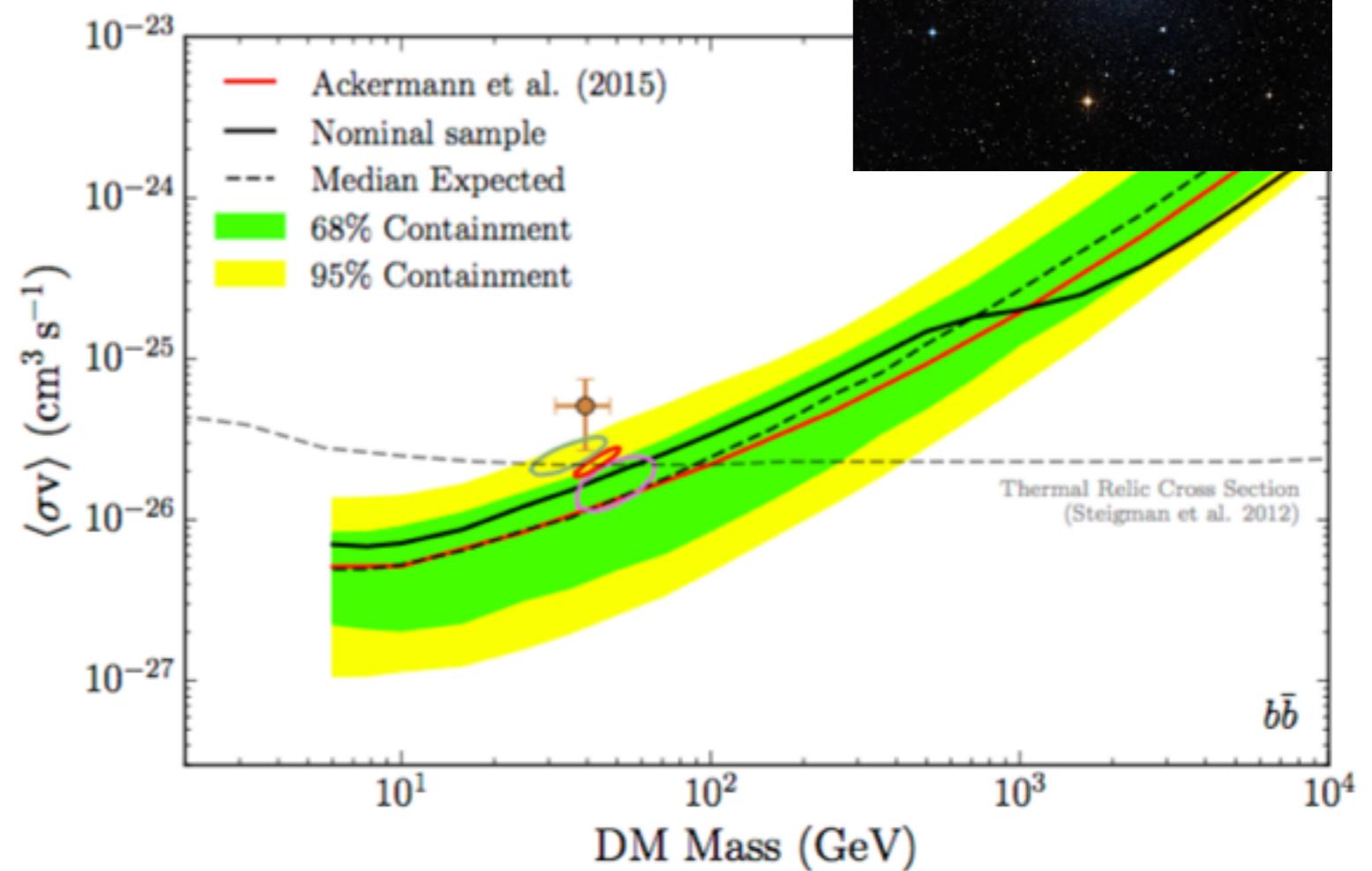
$$\frac{d\Gamma}{dV} = \left(\frac{\rho}{m} \right) \langle \sigma v \rangle$$

« J-factor » (astro) :

$$J = \int d\Omega \int dl \rho^2 \sim \frac{M^2}{D^2 R^3}$$

$$\Rightarrow \Phi_{\text{prédict}} \sim n \times 10^{-9} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

\Rightarrow Fermi a la bonne sensibilité



Au final :

De nombreuses recherches de WIMPs ont été menées, avec la bonne sensibilité pour des modèles plausibles

Pas de résultat positif

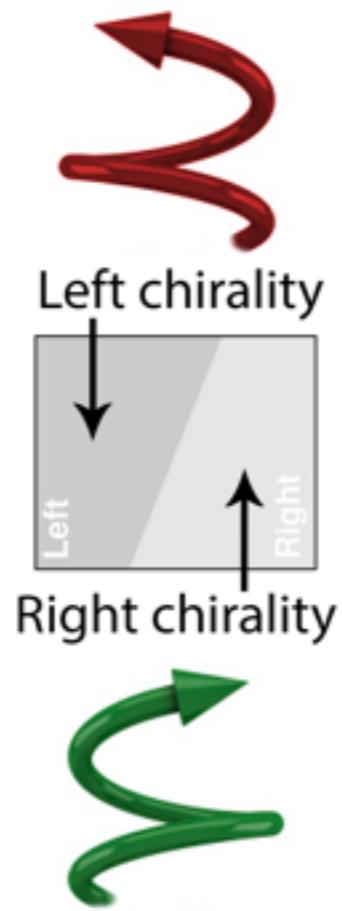
Sauf quelques « anomalies » qui n'ont pas convaincu la communauté ...

L'hypothèse WIMP n'est pas encore exclue (espace des paramètres très large)

Mais elle est de moins en moins privilégiée

Neutrinos stériles

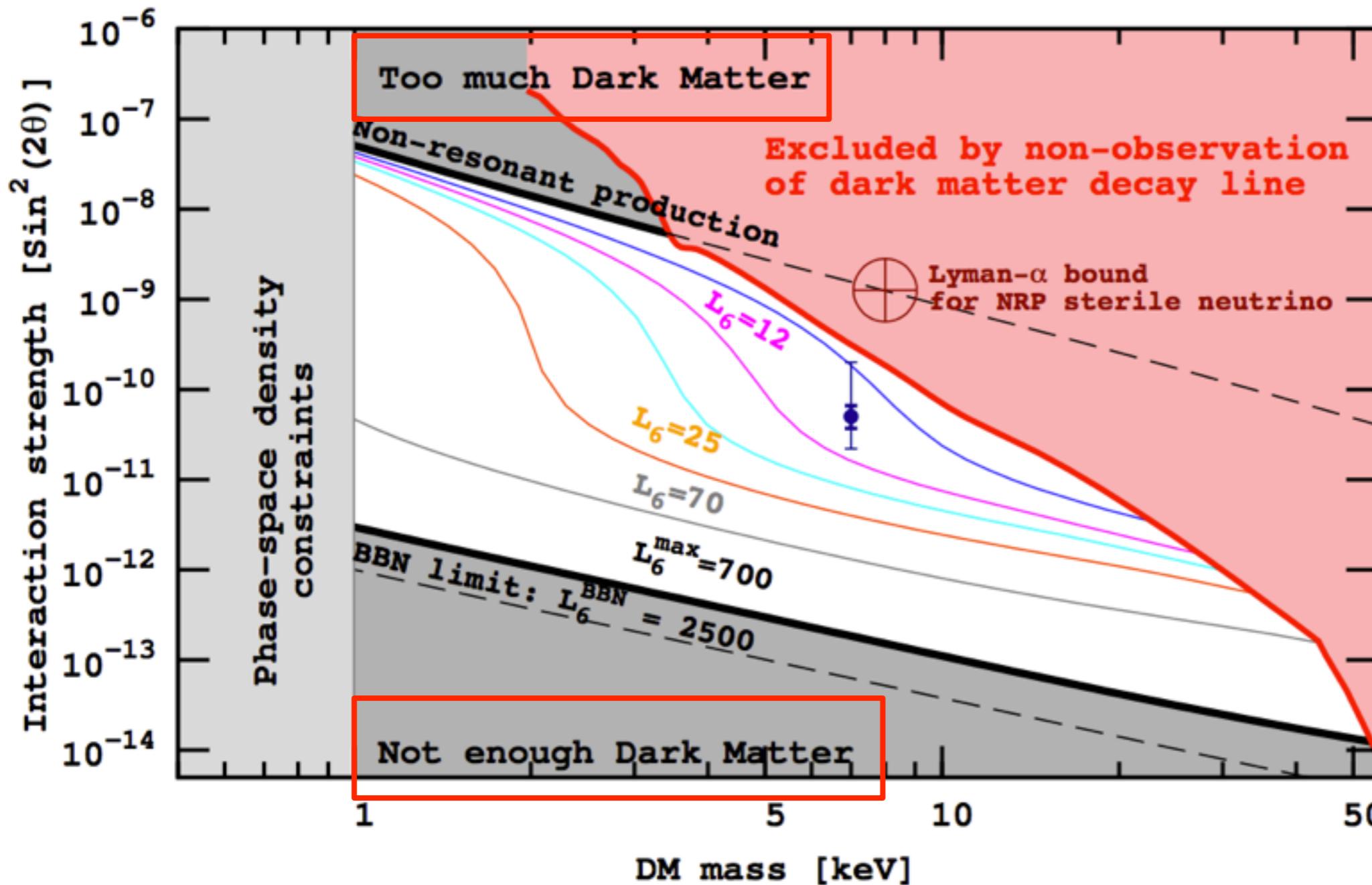
$\frac{2}{3}$	2.4 MeV	$\frac{2}{3}$	1.27 GeV	$\frac{2}{3}$	171.2 GeV
Left	u up	Left	c charm	Left	t top
$-\frac{1}{3}$	4.8 MeV	$-\frac{1}{3}$	104 MeV	$-\frac{1}{3}$	4.2 GeV
Left	d down	Left	s strange	Left	b bottom
0	<0.0001 eV	0	\sim keV	0	\sim GeV
Left	ν_e electron neutrino	Left	N_1 sterile neutrino	Left	ν_μ muon neutrino
-1	0.511 MeV	-1	\sim GeV	-1	\sim GeV
Left	e electron	Left	ν_τ tau neutrino	Left	N_2 sterile neutrino
-1	105.7 MeV	-1		-1	1.777 GeV
Left	μ	Left		Left	τ
	muon				tau



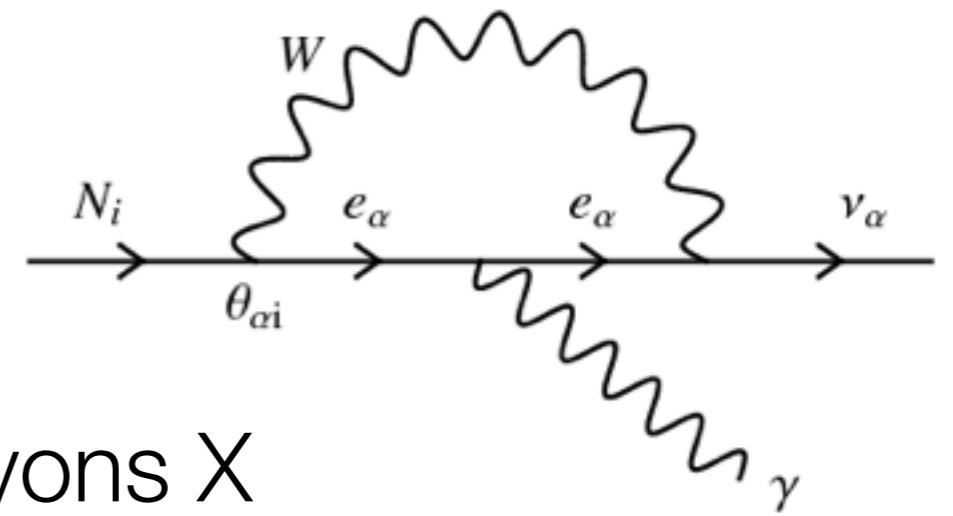
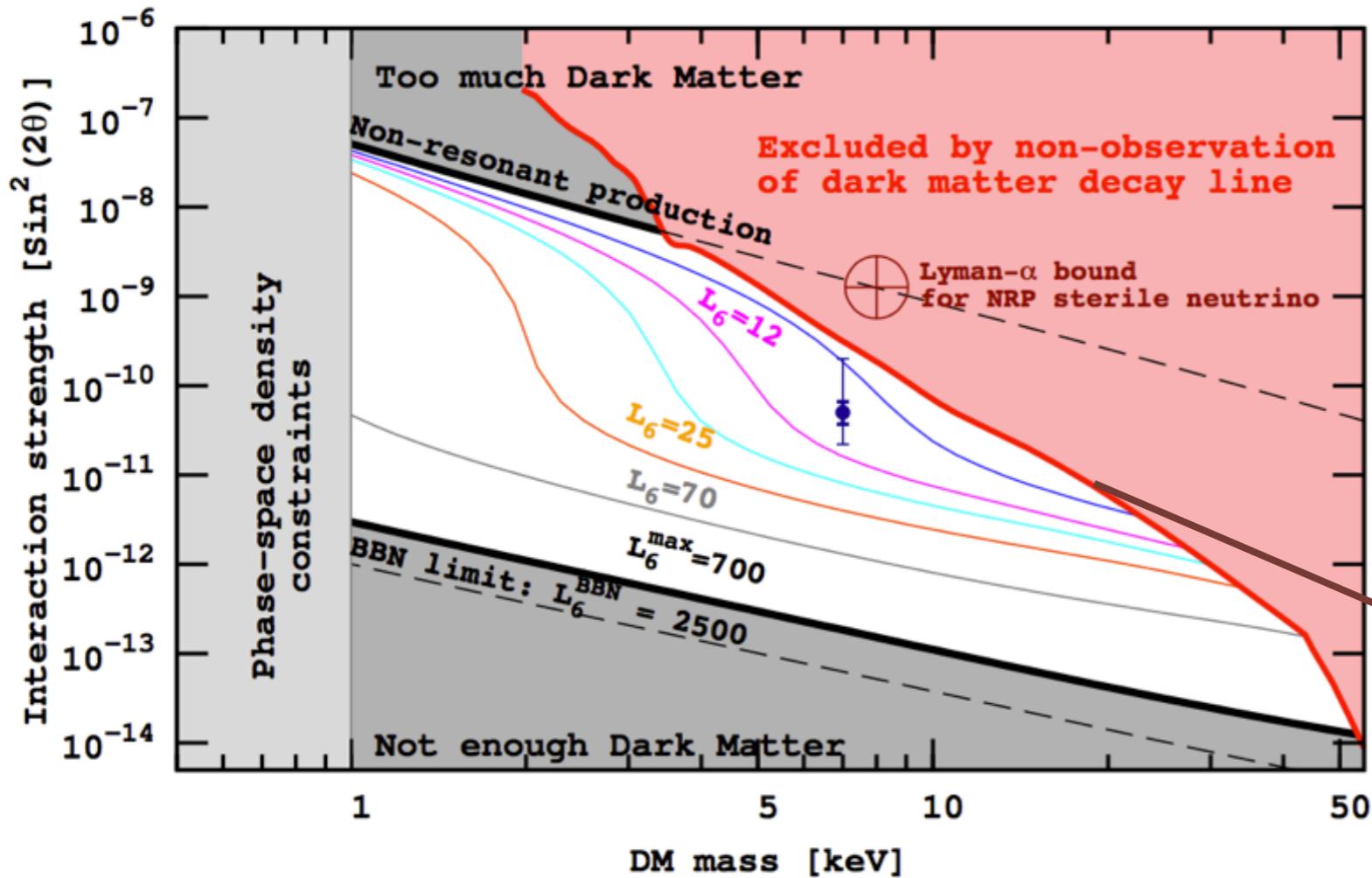
oscillation ν (actif) $\leftrightarrow N$ (stérile) : angle de mélange θ

Les masses des N_i sont indéterminées

Neutrinos stériles comme matière noire



Neutrinos stériles comme matière noire

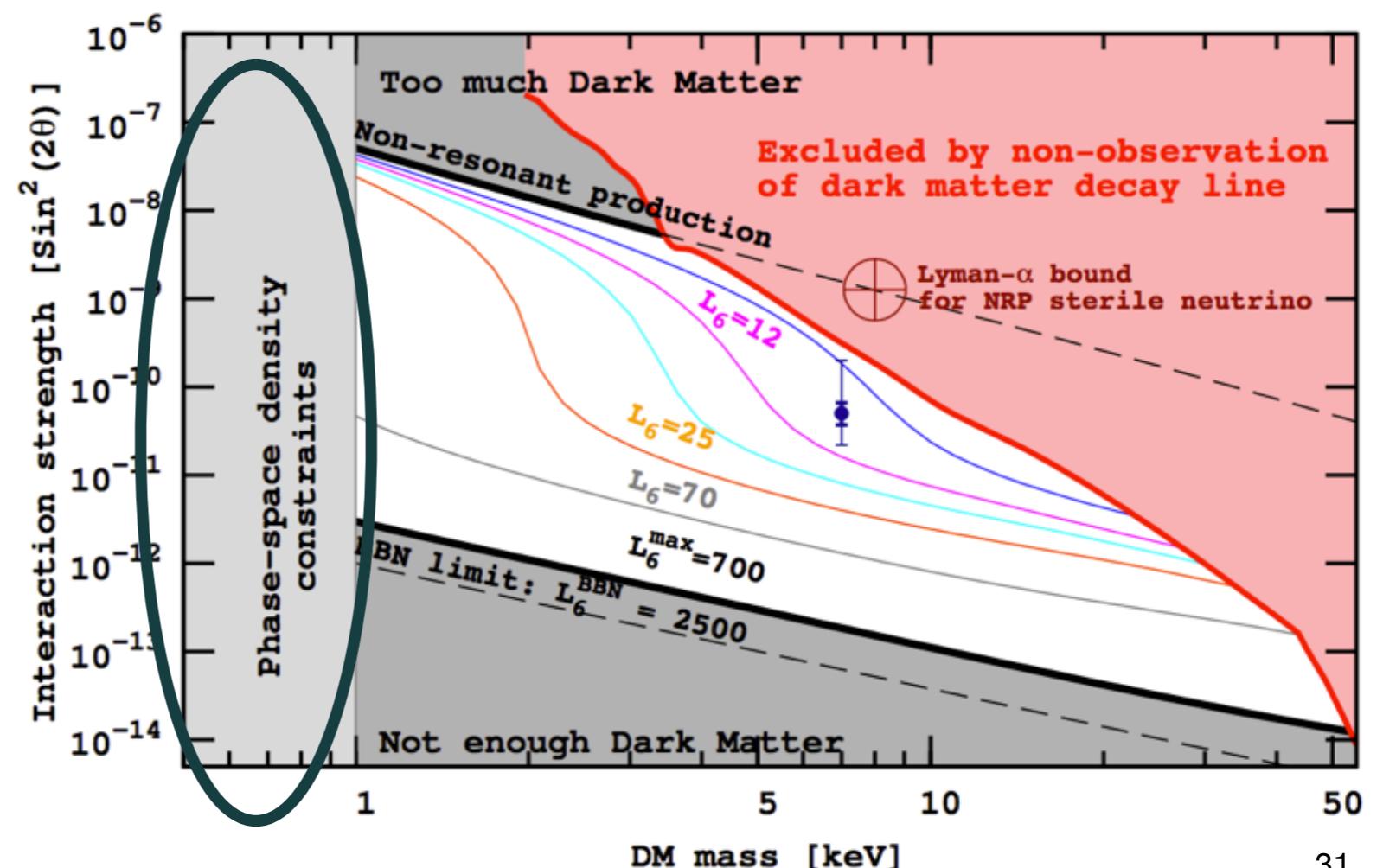


$$E_\gamma = M_N / 2 \quad : \text{ rayons X}$$

Neutrinos stériles comme matière noire

Fermions : $\rho_{\text{espace de phase}} = \frac{\text{Nb}}{\Delta x^3 \Delta p^3} \lesssim \frac{1}{\hbar^3}$

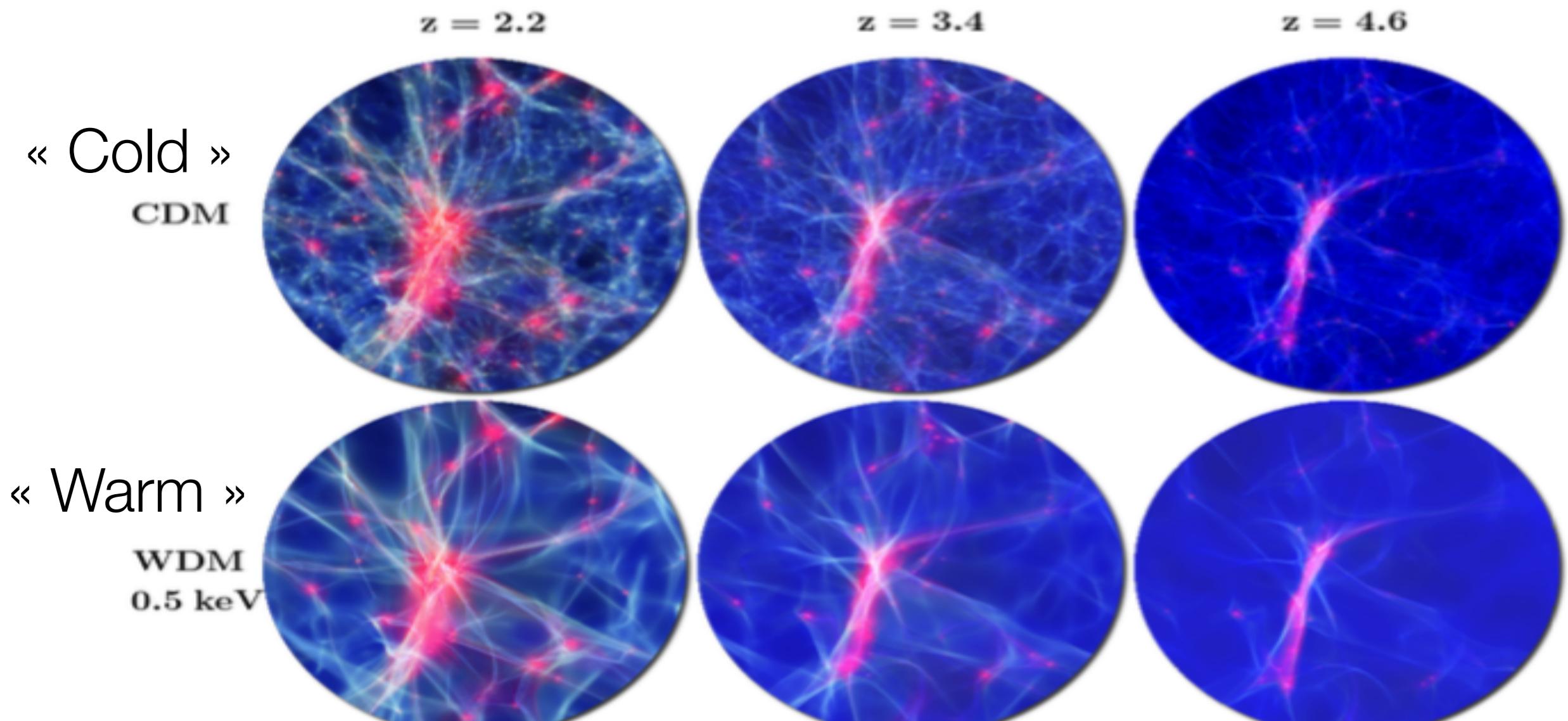
Galaxie naine (masse M, taille R) : $m^4 \gtrsim \frac{\hbar^3}{G^{3/2} M^{1/2} R^{3/2}} \sim \frac{\hbar^3}{V R^2 G}$



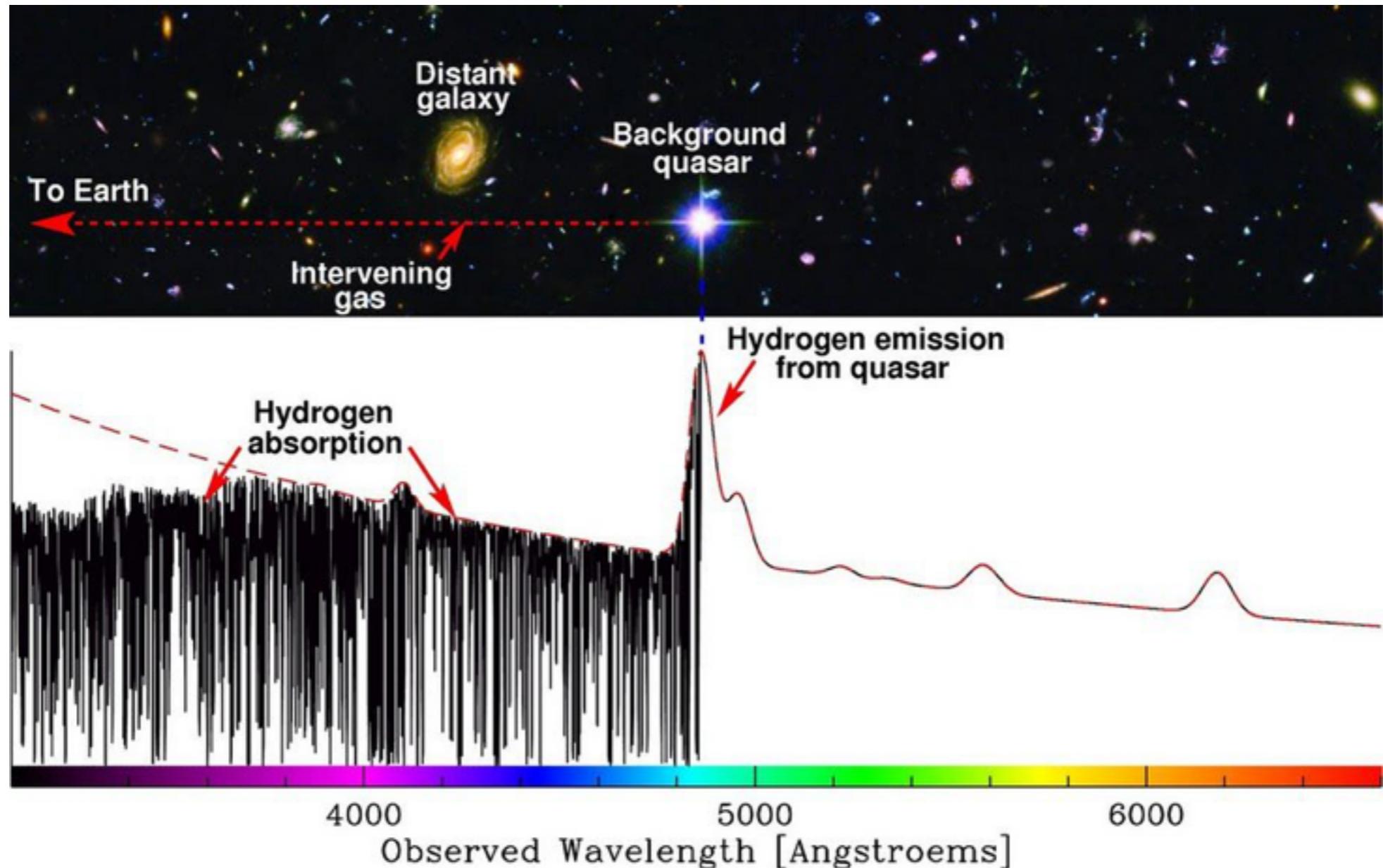
Une autre contrainte sur les neutrinos stériles

Matière noire légère :

- Relativiste plus longtemps dans le plasma primordial
- Moins de fluctuations de densité à « petite » échelle



Une autre contrainte sur les neutrinos stériles



Forêt Lyman-alpha

- => Mesures des fluctuations de densité de la matière à « petite » échelle (\sim Mpc)
- => Compatible avec « Cold Dark Matter »

Une autre contrainte sur les neutrinos stériles

