

Des particules au cosmos **À la recherche de la matière noire**

Eric Armengaud - CEA Saclay

Rencontres d'été de l'infiniment grand à l'infiniment petit
20 - 21 juillet 2022



Plan

Rappel sur l'histoire de notre Univers

I. La matière noire : un ingrédient nécessaire

- Galaxies et amas de galaxies
- Cosmologie à "grande échelle"

II. Quelles sont les propriétés et la nature de la matière noire ?

- Un exemple : que nous disent les observations sur sa masse ?
- Hypothèses théoriques sur la nature de la matière noire

III. Un exemple : tester le scénario "WIMP"

- Détection directe : l'expérience XENON1t
- Détection indirecte : observations du satellite FERMI

IV. Un autre exemple : les neutrinos stériles

Plan

Rappel sur l'histoire de notre Univers

I. La matière noire : un ingrédient nécessaire

- Galaxies et ar
- Cosmologie à

Matière noire = fil conducteur

II. Quelles sont

- Un exemple :
- Hypothèses th

interface cosmologie /
physique des particules /
astroparticules

III. Un exemple

- Détection directe
- Détection indirecte : observations du satellite FERMI

IV. Un autre exemple : les neutrinos stériles



James Peebles Prix Nobel 2019

(shared with exoplanets - Mayor / Queloz)

“for theoretical discoveries in physical cosmology”

" laid a foundation for the transformation of cosmology over the last fifty years, from speculation to science "

" Using his theoretical tools and calculations, James Peebles was able to interpret these traces [cosmic microwave background] from the infancy of the universe and discover new physical processes. "

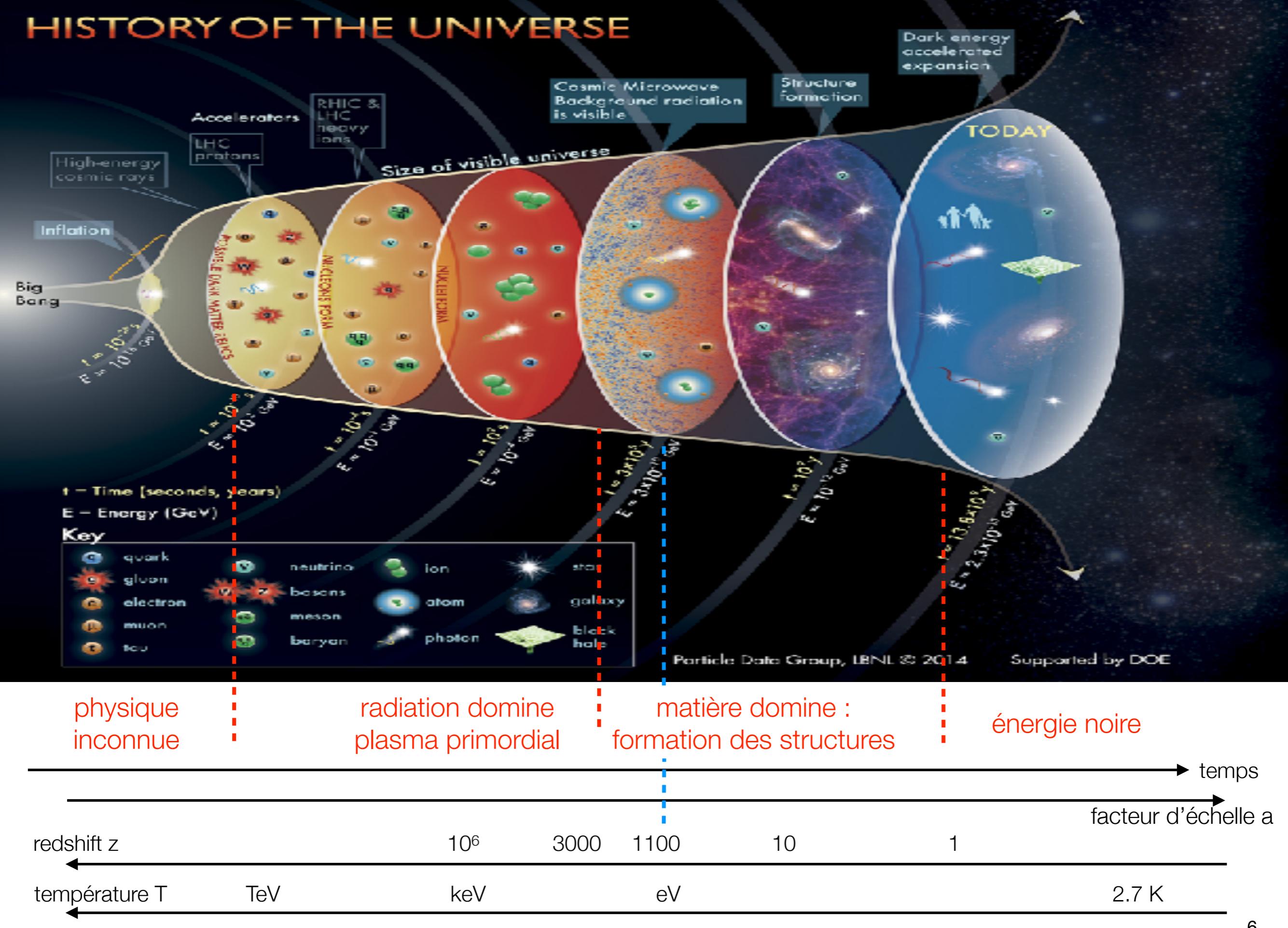
" **The results showed us a universe in which just five per cent of its content is known**, the matter which constitutes stars, planets, trees – and us. **The rest, 95 per cent, is unknown dark matter and dark energy. This is a mystery and a challenge to modern physics.** "



Une des premières images JWST
SMACS-0723
 $z=0.39$, $M=8.4 \times 10^{14} M_{\text{sun}}$

Système dominé par la matière noire !

HISTORY OF THE UNIVERSE



Plan

Rappel sur l'histoire de notre Univers

I. La matière noire : un ingrédient nécessaire

- Galaxies et amas de galaxies
- Cosmologie à "grande échelle"

II. Quelles sont les propriétés et la nature de la matière noire ?

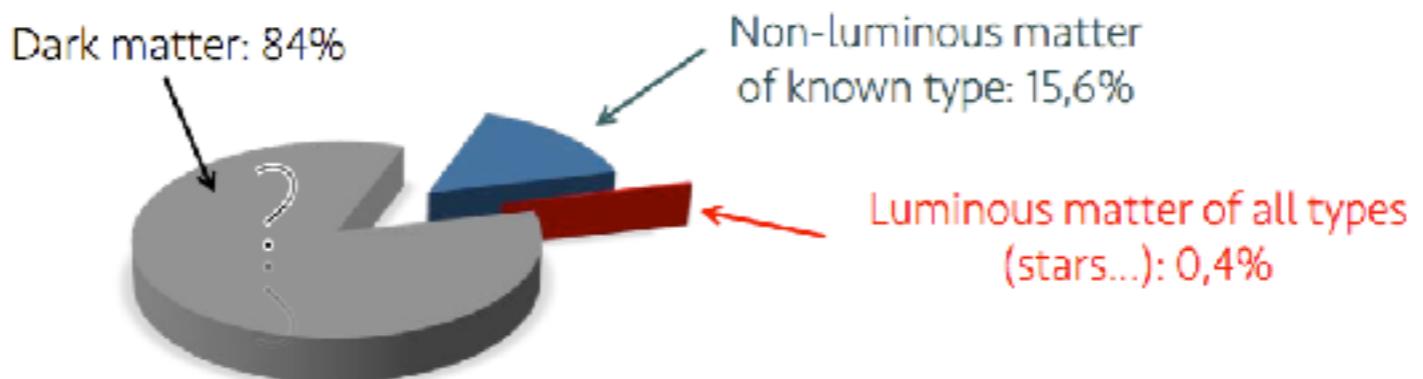
- Un exemple : que nous disent les observations sur sa masse ?
- Hypothèses théoriques sur la nature de la matière noire

III. Un exemple : tester le scénario "WIMP"

- Détection directe : l'expérience XENON1t
- Détection indirecte : observations du satellite FERMI

IV. Un autre exemple : les neutrinos stériles

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



Comment le sait-on ?

a) Dynamique des objets liés par la gravitation

galaxies et galaxies naines
amas de galaxies

b) Formation des grandes structures

oscillations acoustiques des baryons (BAO)
fluctuations de densité de matière à grande échelle
observations anisotropies du CMB + distribution à grande échelle des galaxies

c) Dynamique globale de l'Univers

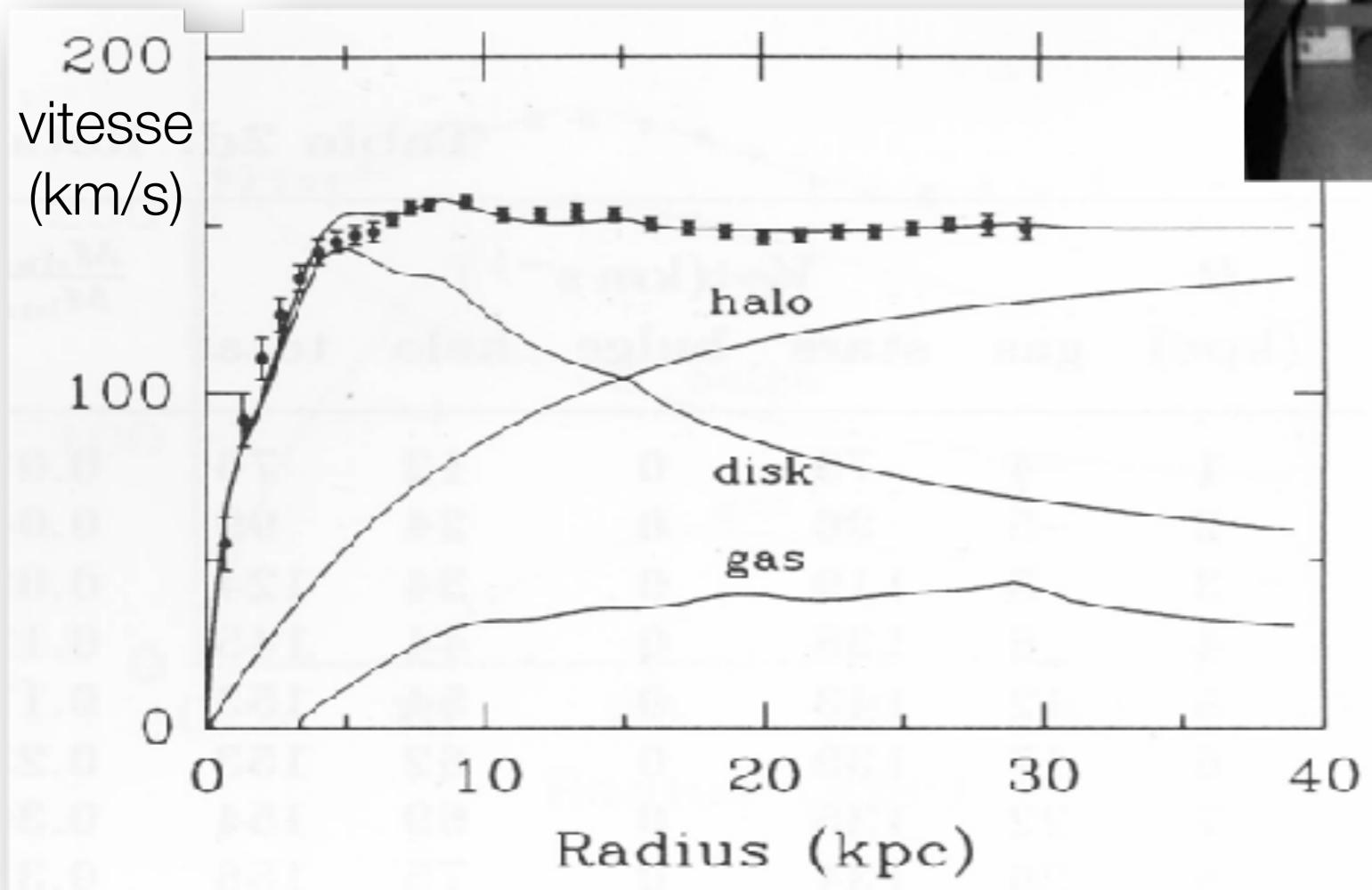
équations de Friedmann + mesures de distance dans l'Univers

a) La matière noire dans les galaxies

"Courbes de rotation" (~1970, Vera Rubin)

$$v^2(R) \sim \frac{G M_{r < R}}{R}$$

Spectroscopie => mesure v (effet Doppler)



- ou bien introduire un halo sphérique de "matière noire"
- ou bien modifier la loi de Newton

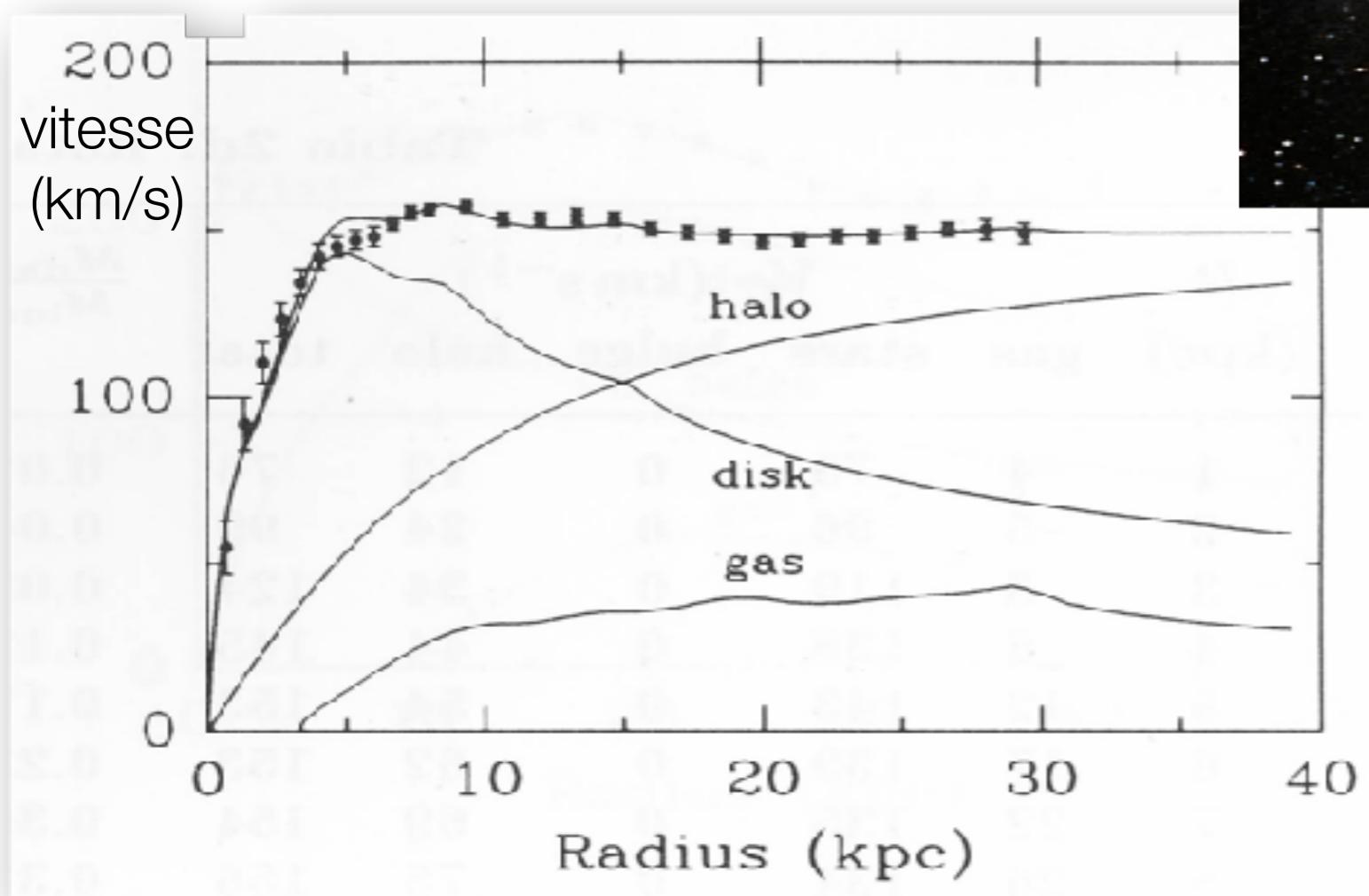
Difficulté: une galaxie est un système complexe, dur à modéliser et à mesurer

a) La matière noire dans les galaxies

"Courbes de rotation" (~1970, Vera Rubin)

$$v^2(R) \sim \frac{G M_{r < R}}{R}$$

Spectroscopie => mesure v (effet Doppler)



- ou bien introduire un halo sphérique de "matière noire"
- ou bien modifier la loi de Newton

Difficulté: une galaxie est un système complexe, dur à modéliser et à mesurer

a) La matière noire dans les amas de galaxies



- **Galaxies** (émission optique) : masse sous-dominante
- **Gaz diffus** (émission rayons X)

Taille ~ 2 Mpc

Quelle est la masse totale ?

Dispersion des vitesses des galaxies ~ 800 km/s

Théorème du Viriel

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

$$\Rightarrow \text{Si hypothèse d'équilibre} \quad \langle v^2 \rangle \sim \frac{GM}{R}$$

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

(Zwicky ~1930s)

Autre mesure (meilleure !) : lentillage de galaxies en arrière-plan

a) La matière noire dans les amas de galaxies



ex. SMACS-0723

- **Galaxies** (émission optique) : masse sous-dominante
- **Gaz diffus** (émission rayons X)

Taille ~ 2 Mpc

Quelle est la masse totale ?

Dispersion des vitesses des galaxies ~ 800 km/s

Théorème du Viriel

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

$$\Rightarrow \text{Si hypothèse d'équilibre} \quad \langle v^2 \rangle \sim \frac{GM}{R}$$

$$\mathbf{M_{totale} \sim 8 \times 10^{14} M_\odot}$$

(Zwicky ~1930s)

Autre mesure (meilleure !) : lentillage de galaxies en arrière-plan

a) La matière noire dans les amas de galaxies

Quelle est la masse du gaz ?
(les "baryons")

Température du gaz (équipartition énergie) :

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

T ~ keV rayons X

Spectre en énergie : bremsstrahlung

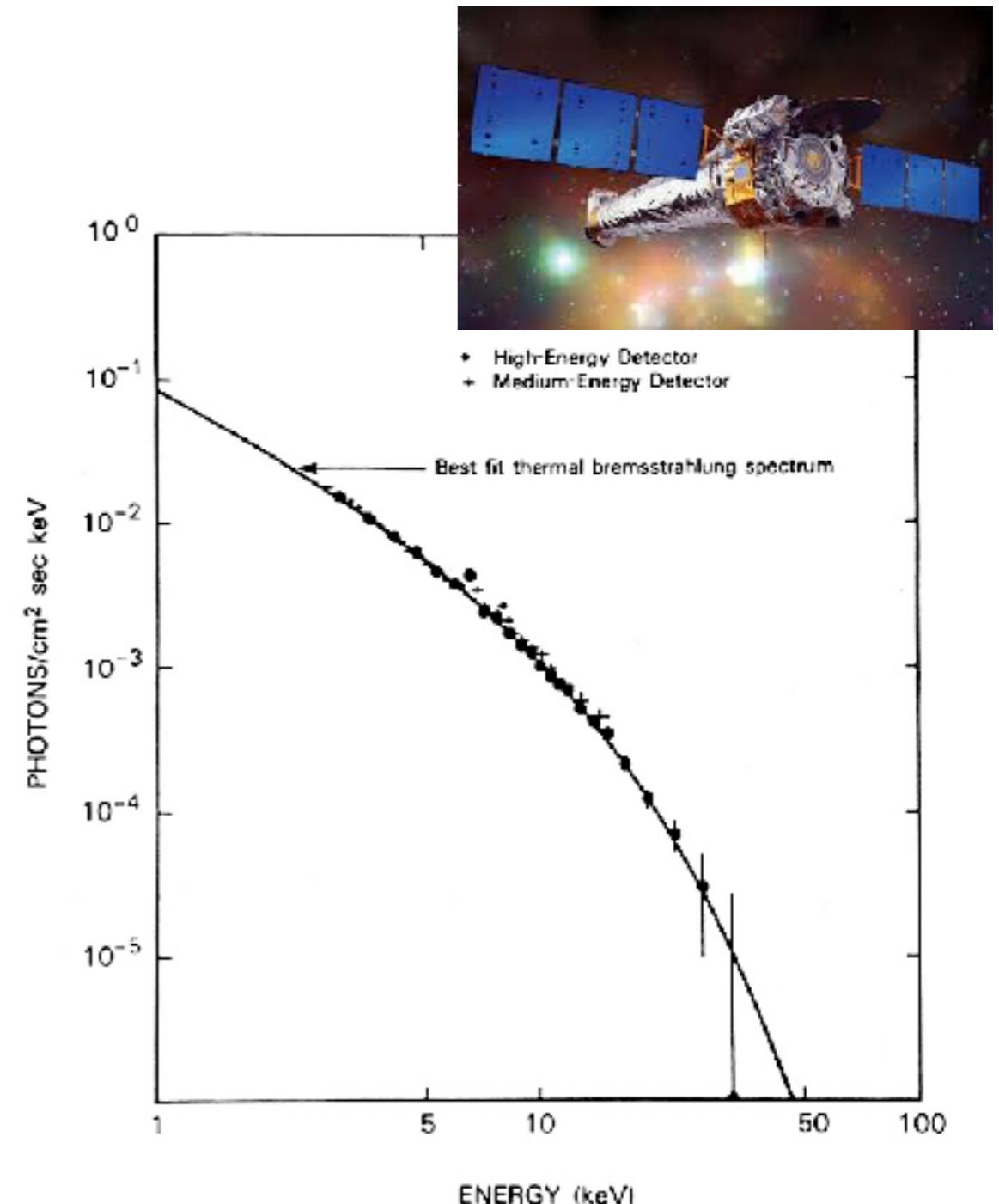
$$\epsilon_{\text{brem}} = \left(\frac{2^5 \pi e^6 Z^2}{3m_e c^3} \sqrt{\frac{2\pi}{3m_e k}} \right) n_e n_{\text{ion}} g_{\text{ff}} T^{-1/2} e^{h\nu/kT}$$

=> Mesure masse du gaz :

M_{gaz} ~ 10% x M_{totale}

Le reste est de la matière noire..

télescope Chandra

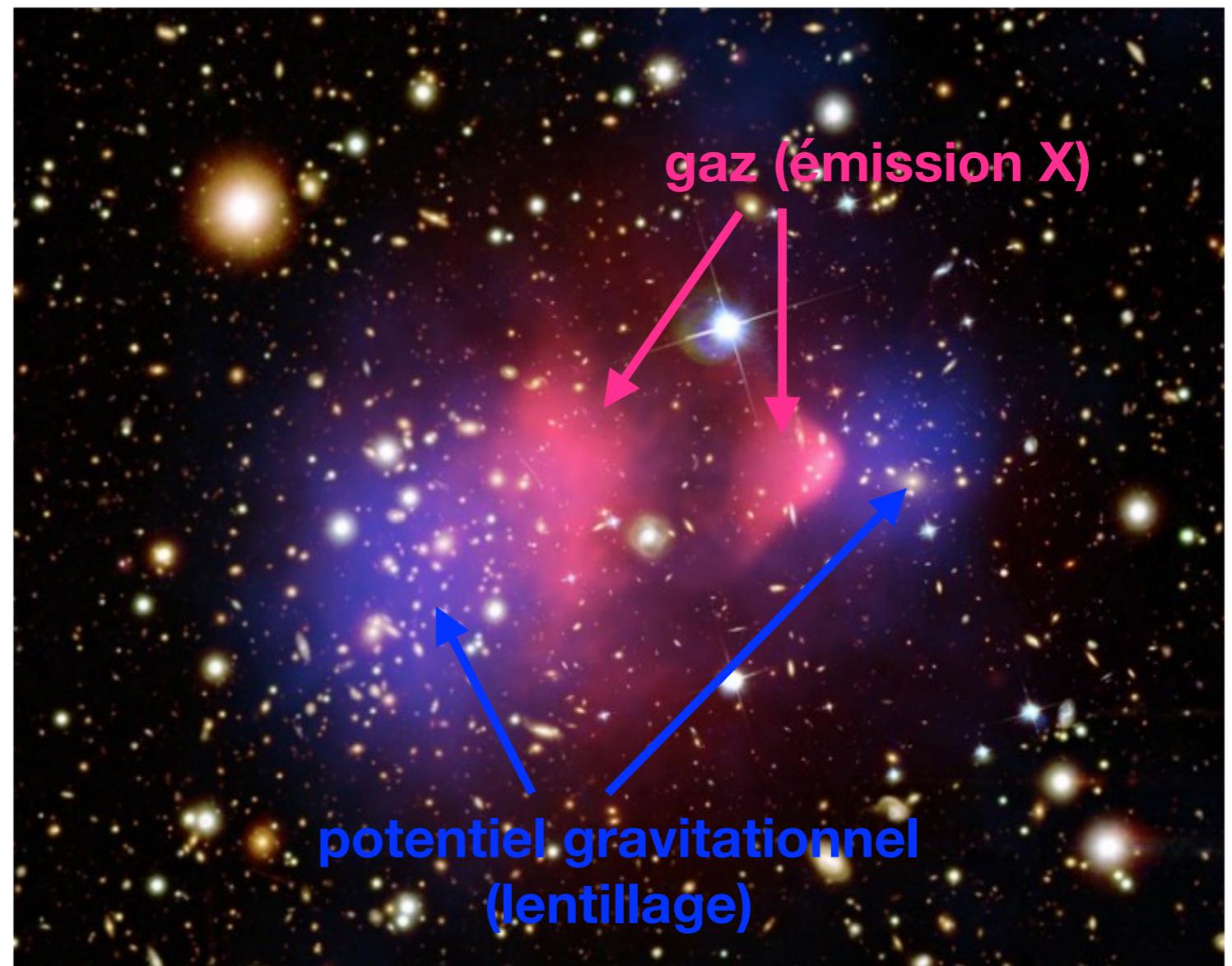


a) Le Bullet cluster

2007

Deux amas en collision
Les nuages de gaz interagissent
(choc); se séparent des puits de potentiel

La source du potentiel n'est pas
le gaz : **"Proof of dark matter"**



La matière noire DM est « sans collision » :
*Un exemple de contrainte sur les propriétés
microphysiques de la matière noire*

Notons σ = section efficace de collision DM-DM

$$\text{nb d'interactions} = \sigma \times R \times \text{densité} < 1$$

$$\Rightarrow \frac{\sigma}{m} \leq \frac{R^2}{M} \sim \text{cm}^2/g$$

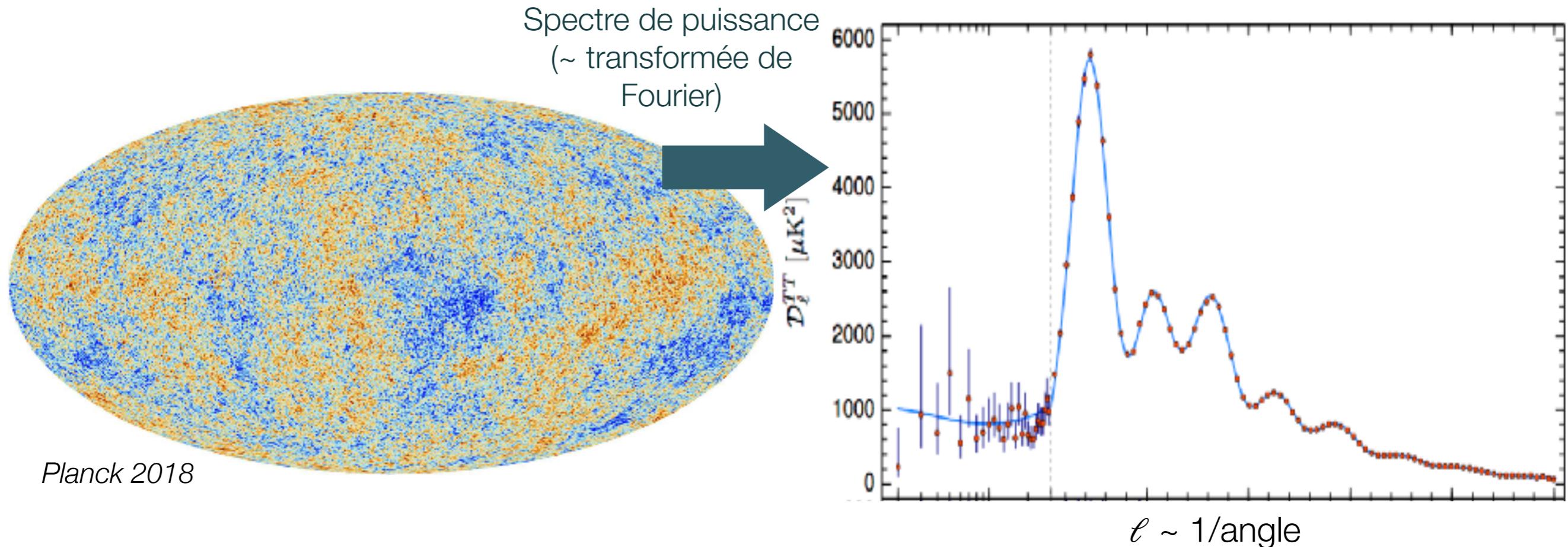
pour $m \sim \text{GeV}$: $\sigma < \text{barn}$
interaction forte

b) Les BAO (oscillations acoustiques de baryons)

Environ 3×10^5 ans après le big bang : juste avant que l'Hydrogène ne devienne neutre

- un fluide baryons + photons, fortement couplé (force de pression)
- la matière noire amplifie les fluctuations de densité (gravitation)

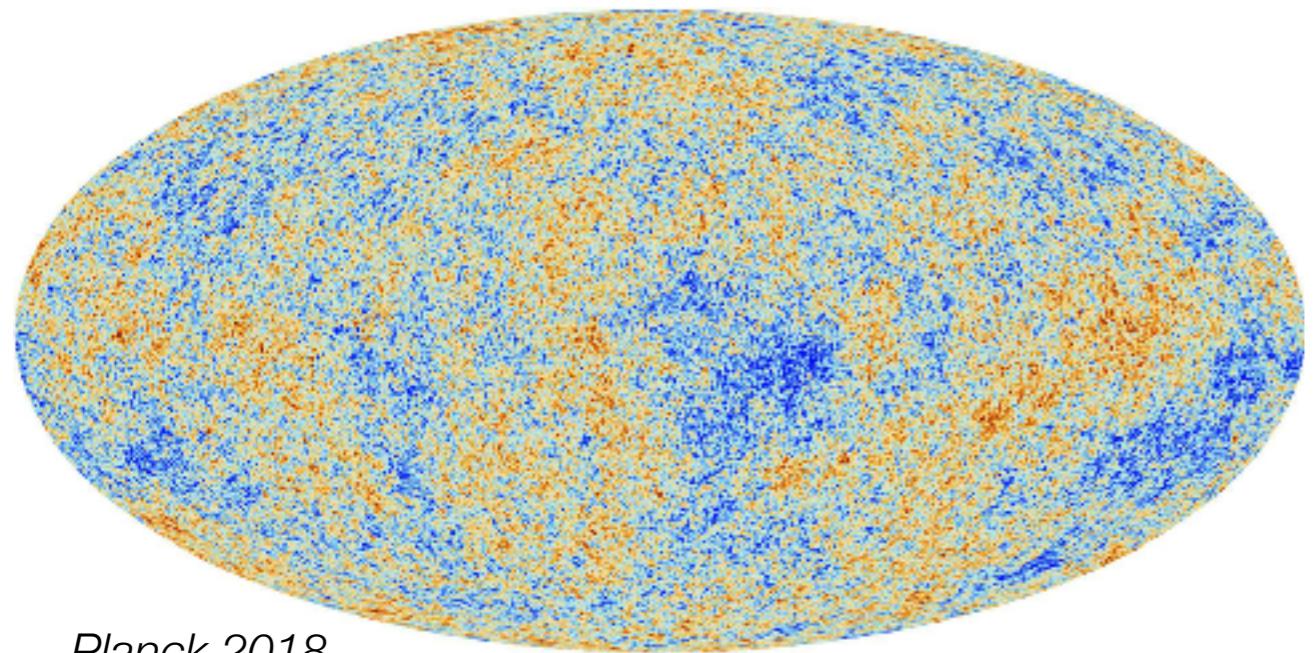
**"oscillations": gravitation (matière noire surtout) vs pression (photons)
visible dans les fluctuations de température du CMB @ échelle ~ degré**



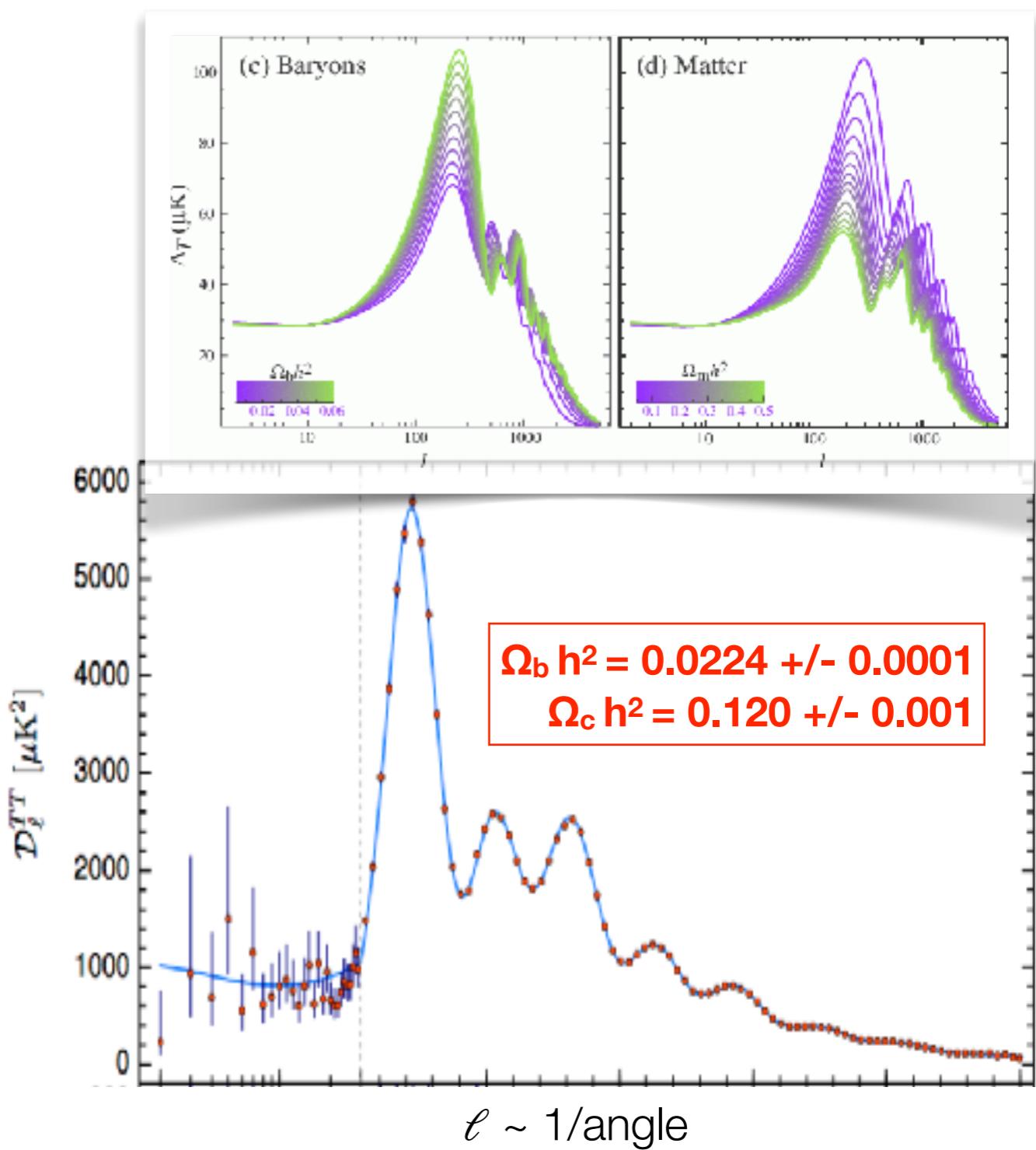
b) Les BAO (oscillations acoustiques de baryons)

- Prédictions théoriques :
robustes : physique connue
précises (pour mille) : régime linéaire
- Observations du CMB très précises (%)

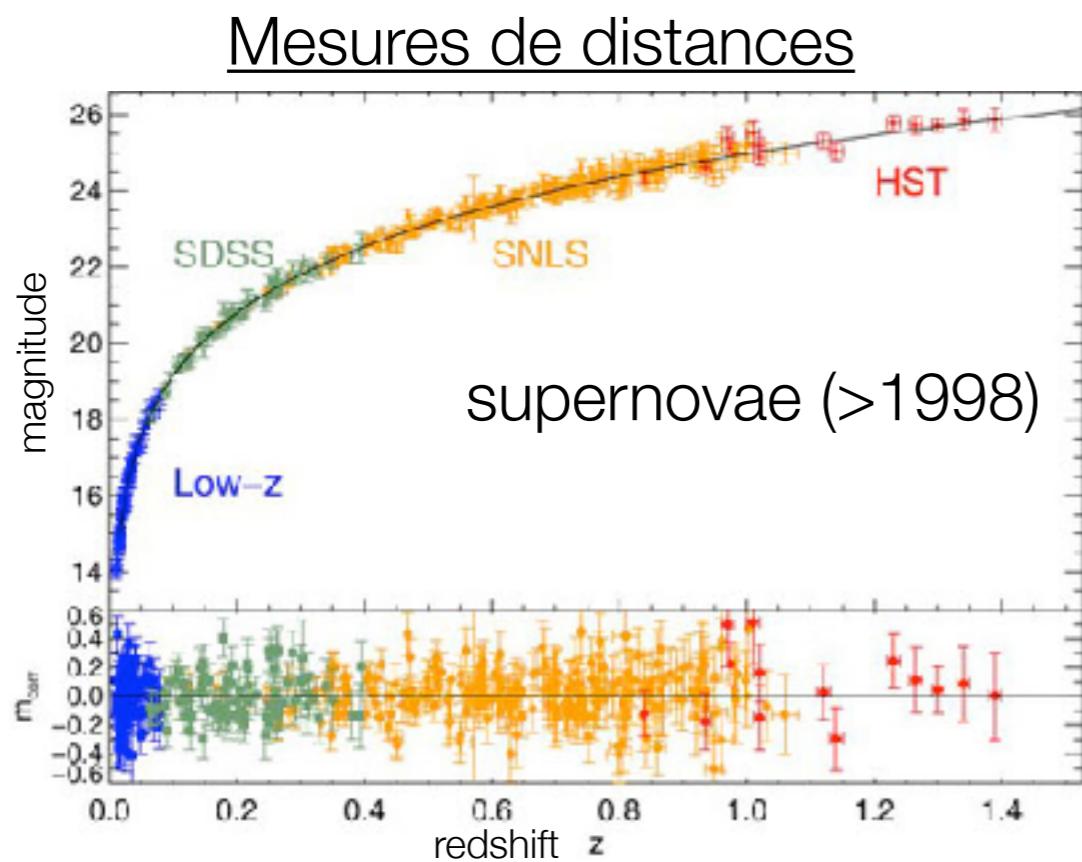
**"Preuve" claire de la matière noire
Mesure précise de sa densité de masse**



Planck 2018



c) Dynamique globale de l'Univers



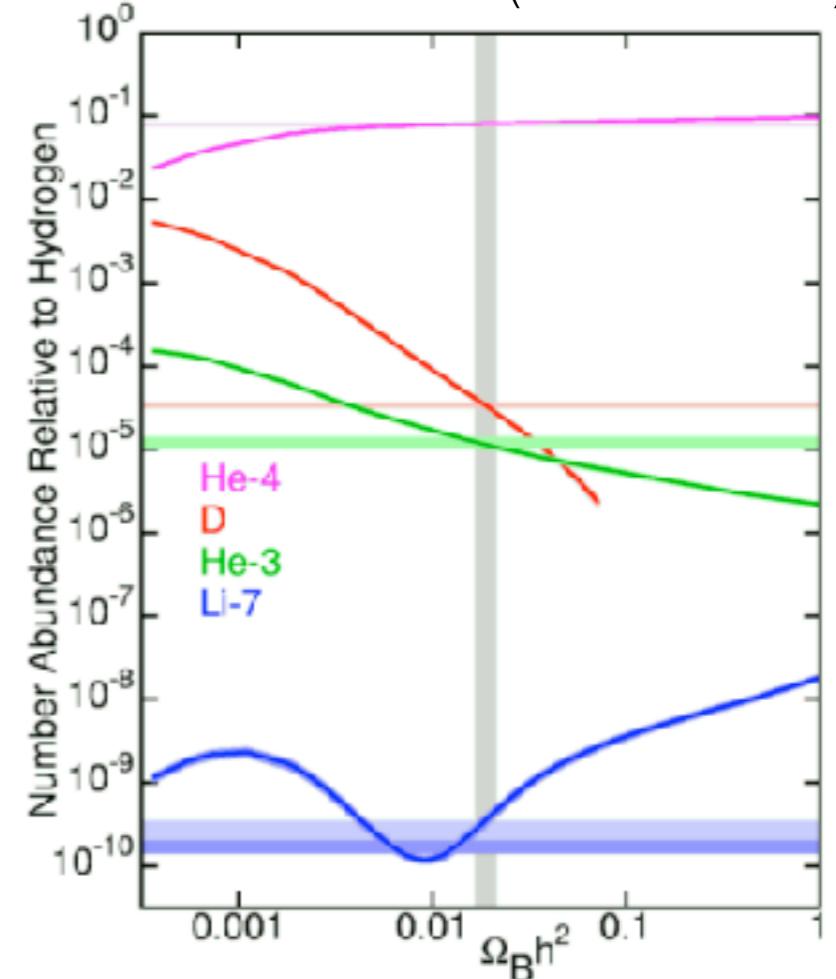
Supernovae, CMB, BAO
Utilisent les équations de Friedmann

- L'Univers est plat
- Composantes : $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$

Λ : énergie noire

M: matière totale (fluide non-relativiste)

Nucléosynthèse primordiale
(Gamow 1948)

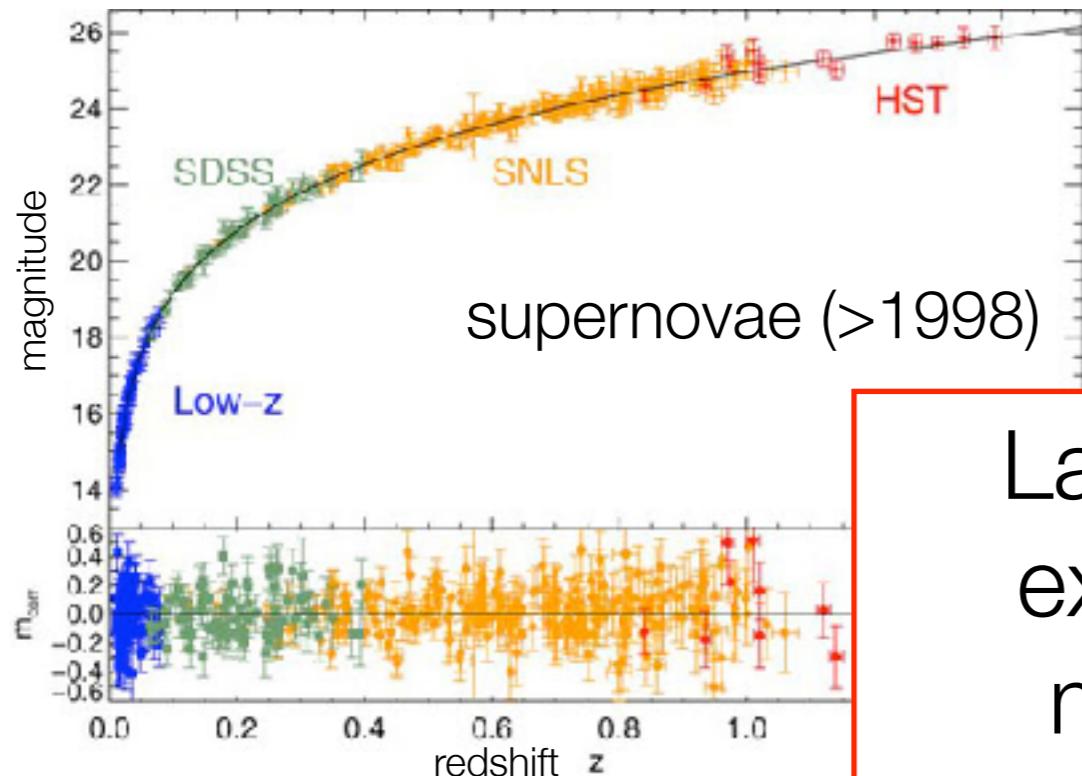


B: baryons = "matière ordinaire"
Prédictions dépendent de Ω_B

Observations : $\Omega_B = 0.04$

c) Dynamique globale de l'Univers

Mesures de distances



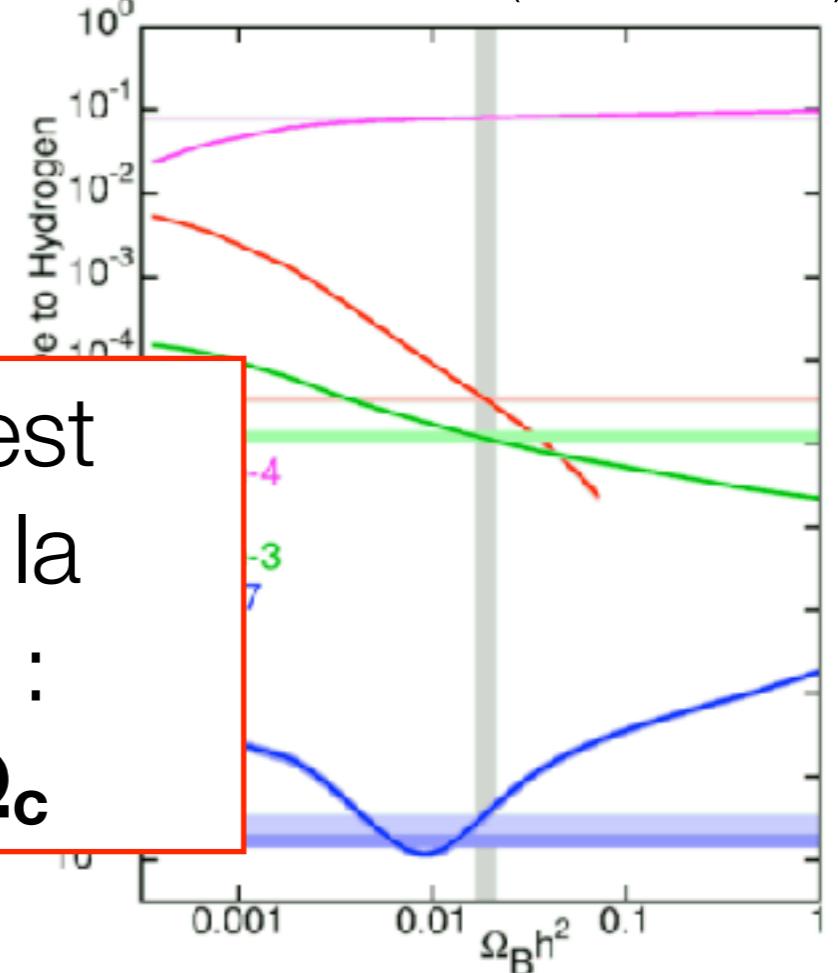
Supernovae, CMB, BAO
Utilisent les équations de Friedmann

- L'Univers est plat
- Composantes : $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$

Λ : énergie noire

M: matière totale (fluide non-relativiste)

Nucléosynthèse primordiale
(Gamow 1948)



La différence est expliquée par la matière noire :

$$\Omega_M = \Omega_B + \Omega_c$$

B: baryons = "matière ordinaire"
Prédictions dépendent de Ω_B

Observations : $\Omega_B = 0.04$

Plan

Rappel sur l'histoire de notre Univers

I. La matière noire : un ingrédient nécessaire

- Galaxies et amas de galaxies
- Cosmologie à "grande échelle"

II. Quelles sont les propriétés et la nature de la matière noire ?

- Un exemple : que nous disent les observations sur sa masse ?
- Hypothèses théoriques sur la nature de la matière noire

III. Un exemple : tester le scénario "WIMP"

- Détection directe : l'expérience XENON1t
- Détection indirecte : observations du satellite FERMI

IV. Un autre exemple : les neutrinos stériles

Quelle est la masse de la matière noire ?

Un exemple : interprétation des **observations de galaxies naines**

- "Petites" galaxies (kpc)
- Beaucoup de matière noire (vitesses ~10-50 km/s)

- a) Principe d'incertitude de Heisenberg : longueur d'onde de de Broglie

$$\frac{\lambda_{dB}}{2 \text{ kpc}} \sim \left(\frac{10^{-22} \text{ eV}}{m} \right) \left(\frac{10 \text{ km/s}}{v} \right)$$

λ_{dB} ne doit pas dépasser la taille de la galaxie !

m_{DM} ≥ 10⁻²² eV/c²



Fornax dwarf galaxy

Quelle est la masse de la matière noire ?

Un exemple : interprétation des **observations de galaxies naines**

- "Petites" galaxies (kpc)
- Beaucoup de matière noire (vitesses ~10-50 km/s)

b) Si DM = fermion (spin 1/2)

Principe d'exclusion de Pauli : pas plus d'une particule par état quantique.

Chaque état occupe un "volume" d'espace de phase $\Delta x \cdot \Delta p \sim h$:

$$\rho_{\text{phase space}} = \frac{\text{Nb density}}{\Delta x^3 \Delta p^3} \lesssim \frac{1}{h^3}$$

La densité en masse est ~ connue, la densité en nombre est contrainte → **m_{DM} ≥ 0.5 - 1 keV/c²** si fermion



Fornax dwarf galaxy

Quelle est la masse de la matière noire ?

Un exemple : interprétation des **observations de galaxies naines**

- "Petites" galaxies (kpc)
- Beaucoup de matière noire (vitesses $\sim 10\text{-}50 \text{ km/s}$)

- c) Si m_{DM} est grand : structure "granulaire" du halo
→ *forces de marée*
→ destruction de la galaxie
(simulations à N corps)



$$m_{\text{DM}} \lesssim 10\text{-}100 M_{\odot}$$

(bien plus grand que la masse de Planck !)

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)					
	I	II	III		
QUARKS	mass charge spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 1
	u	c	t	g	H
	up	charm	top	gluon	Higgs
	d	s	b	γ	photon
	down	strange	bottom		
	e	μ	τ	Z	Z boson
	electron	muon	tau		
	ν_e	ν_μ	ν_τ	W	W boson
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino		

eV: mass unit

Matière noire :

- stable (10^{10} ans au moins)
- neutre (charges électrique et nucléaire faibles ou nulles)

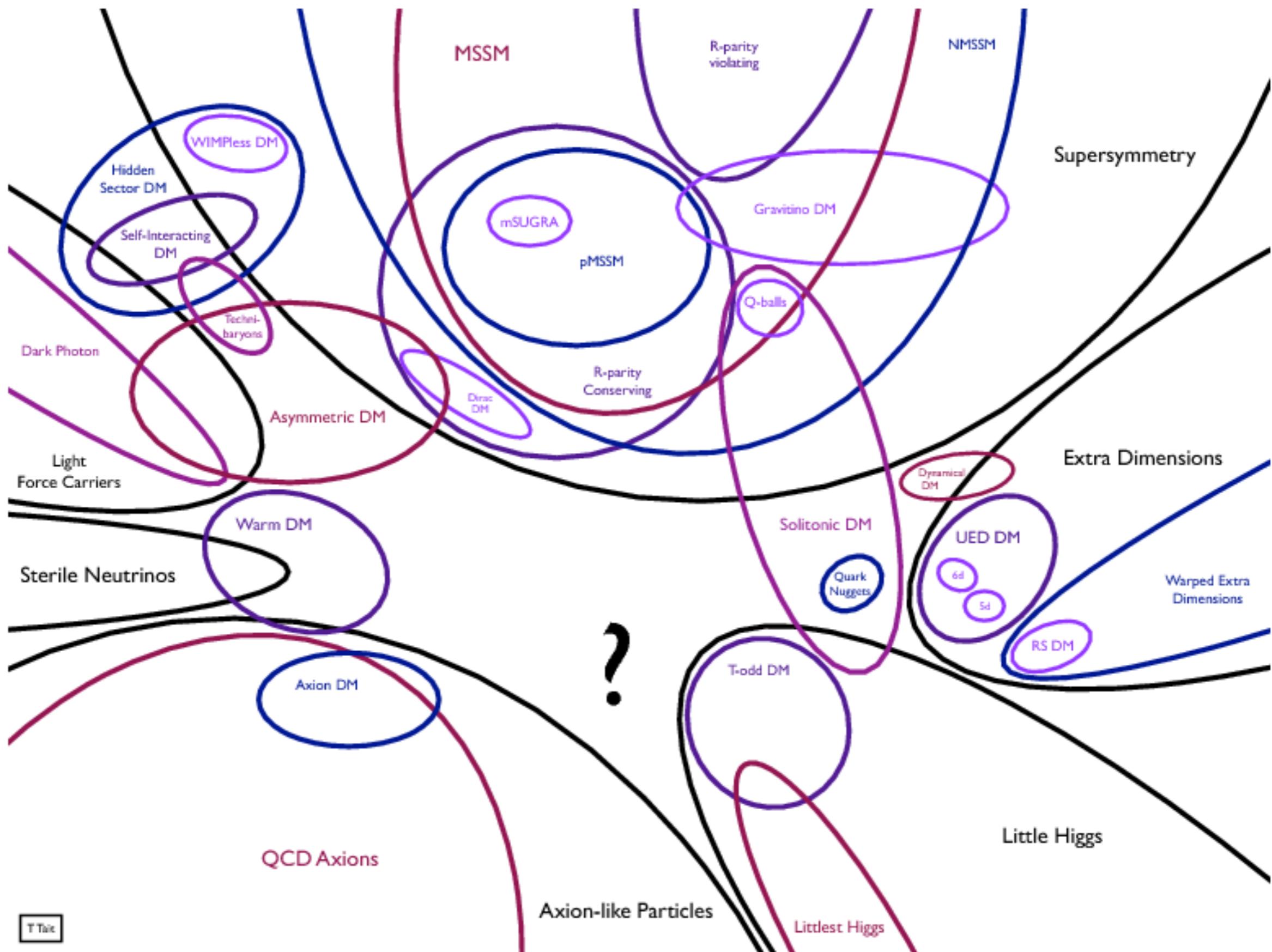
→ Neutrinos ? (années 80)

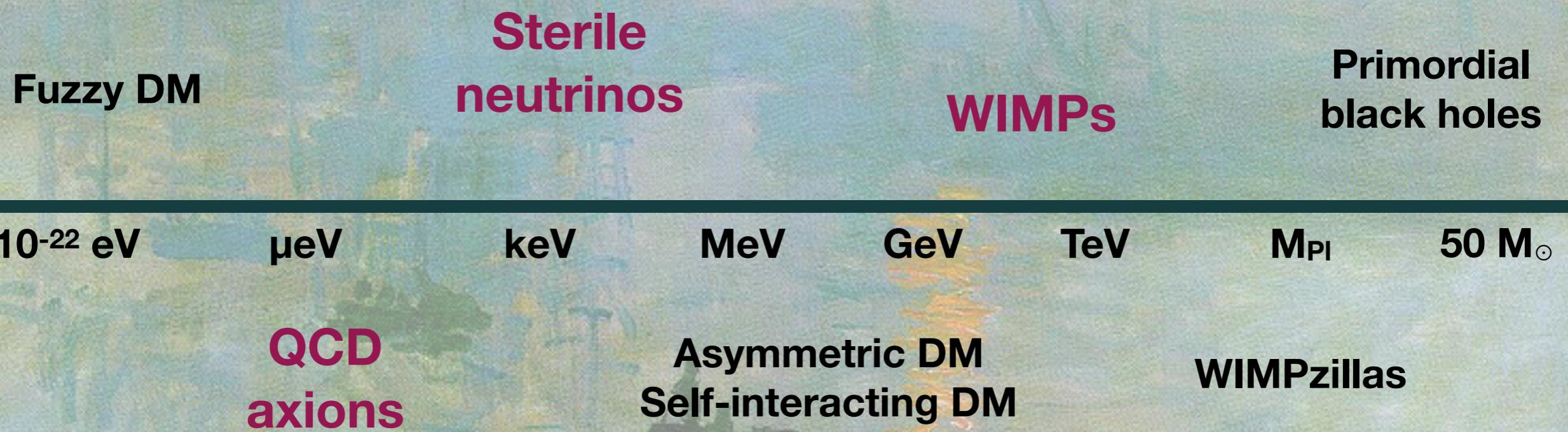
Non: trop légers \Rightarrow relique

"chaude" (relativiste dans l'Univers primordial)

La nature microphysique de la matière noire est complètement inconnue, en 2022.

Modèles "populaires" de matière noire, ~ 2015 ...





Plan

Rappel sur l'histoire de notre Univers

I. La matière noire : un ingrédient nécessaire

- Galaxies et amas de galaxies
- Cosmologie à "grande échelle"

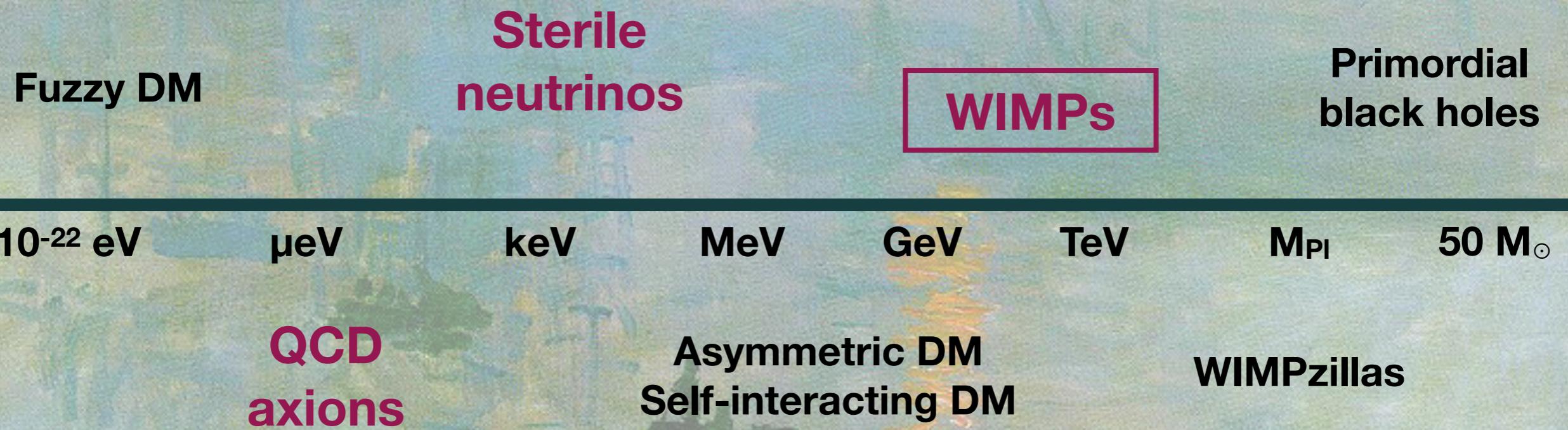
II. Quelles sont les propriétés et la nature de la matière noire ?

- Un exemple : que nous disent les observations sur sa masse ?
- Hypothèses théoriques sur la nature de la matière noire

III. Un exemple : tester le scénario "WIMP"

- Détection directe : l'expérience XENON1t
- Détection indirecte : observations du satellite FERMI

IV. Un autre exemple : les neutrinos stériles



Le modèle des WIMPs

Weakly Interacting Massive Particle

Scénario le plus "populaire" / testé dans les 1990's - 2020's

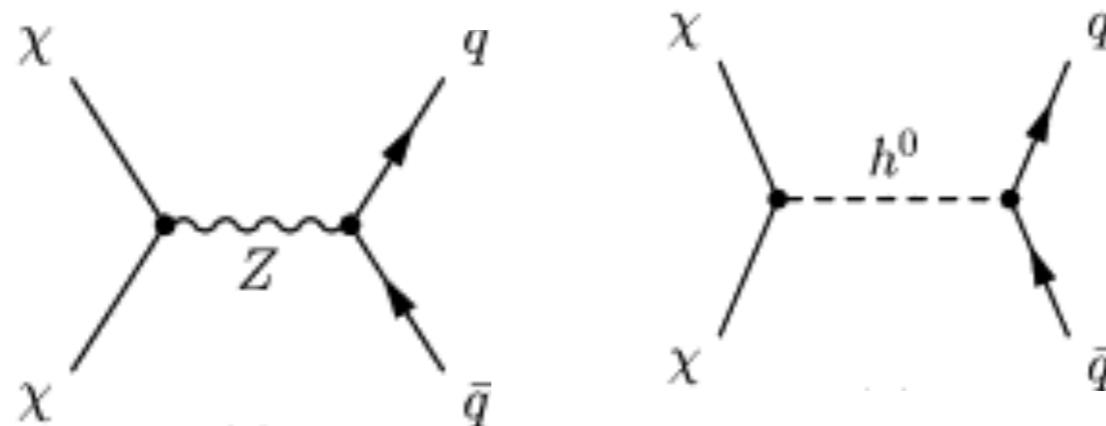
Suppose une "nouvelle physique" à l'échelle électrofaible :

Résout le problème de "hiérarchie"/"naturalité", eg. supersymétrie ou dimensions supplémentaires

Une nouvelle particule stable χ :

Masse ~ "échelle électrofaible" ~ 10 GeV - 1 TeV (W, Z, et Higgs ~ 100 GeV)

Interagit avec les particules du Modèle Standard via des couplages "faibles" :

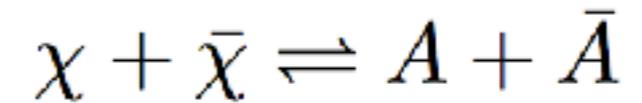
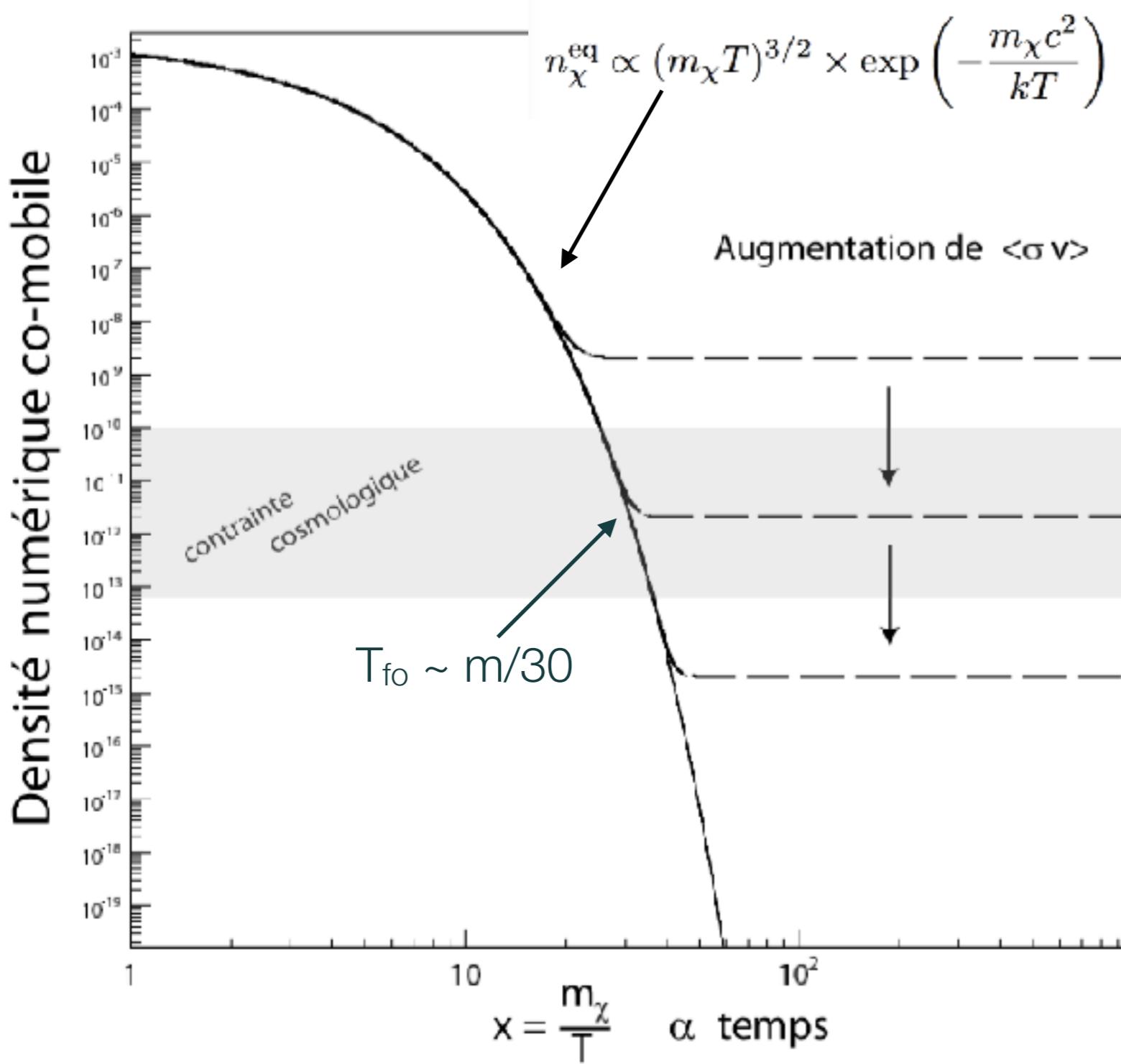


exemple processus d'annihilation

Calcul densité "relique" WIMP du plasma primordial :
→ **Correspond grossièrement à la densité mesurée**
("miracle WIMP")

$$\Omega \simeq 0.26 \times \left(\frac{1pb \cdot c}{\sigma_{\text{ann}} v_{\text{rel}}} \right)$$

Le miracle WIMP - plus en détails..



Initialement à l'équilibre thermique

Expansion => gel du processus d'annihilation
« freeze-out » :

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

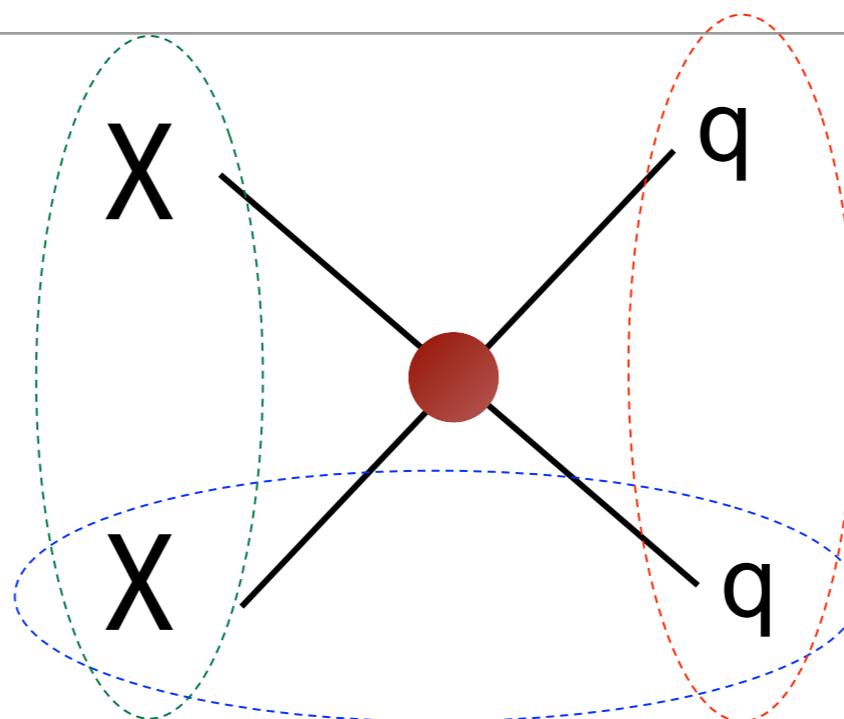
$H \sim T^2$ (Friedmann)

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

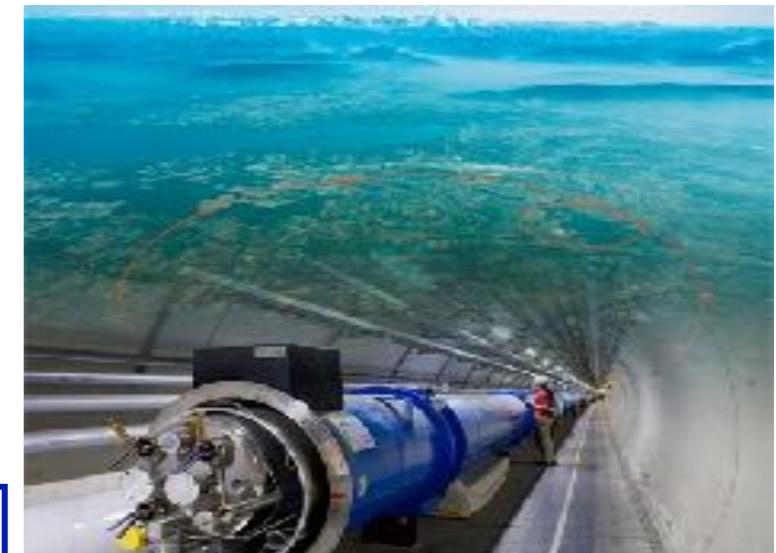
$$\Omega_\chi h^2 = \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma v \rangle}$$

Le scénario WIMP est testable

Détection indirecte



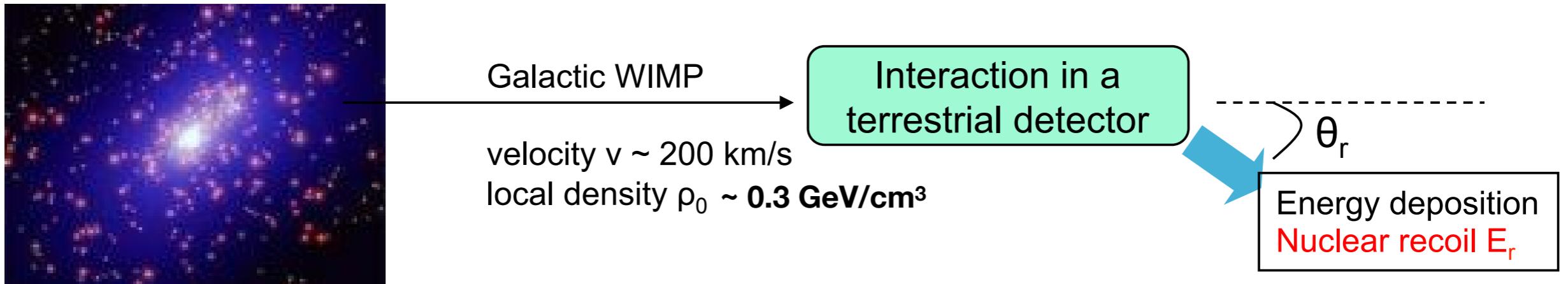
Collisionneurs



Détection directe



Détection directe des WIMPs



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

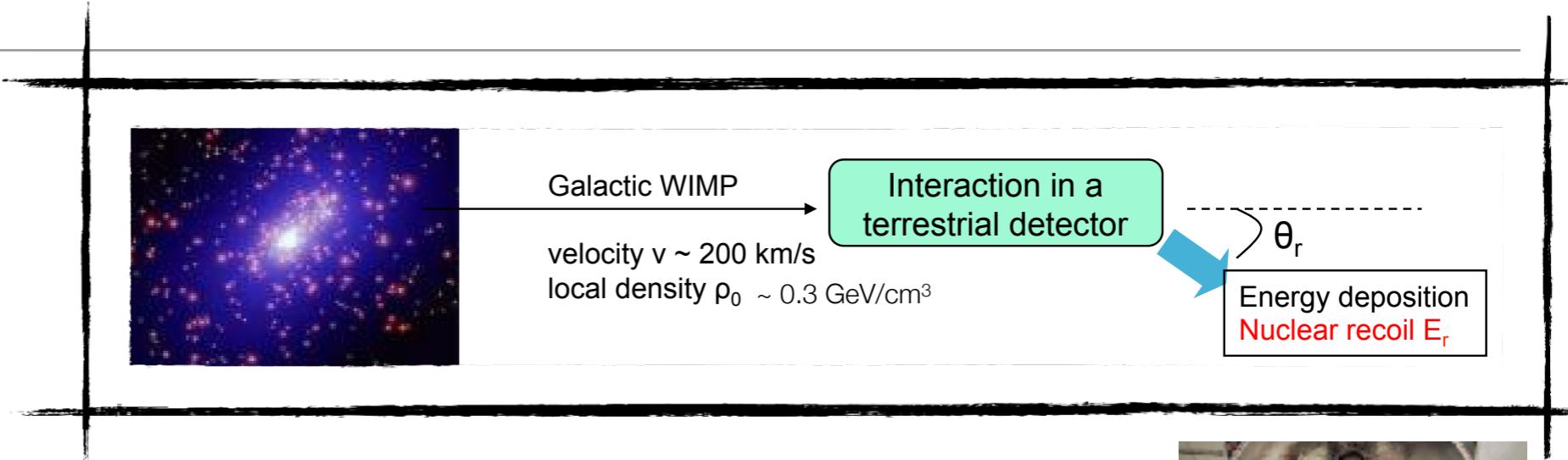
$$\text{Taux}(/ \text{kg/s}) \sim \frac{1}{m_N} \frac{\rho_{\text{local}}}{m_X} \sigma v$$

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

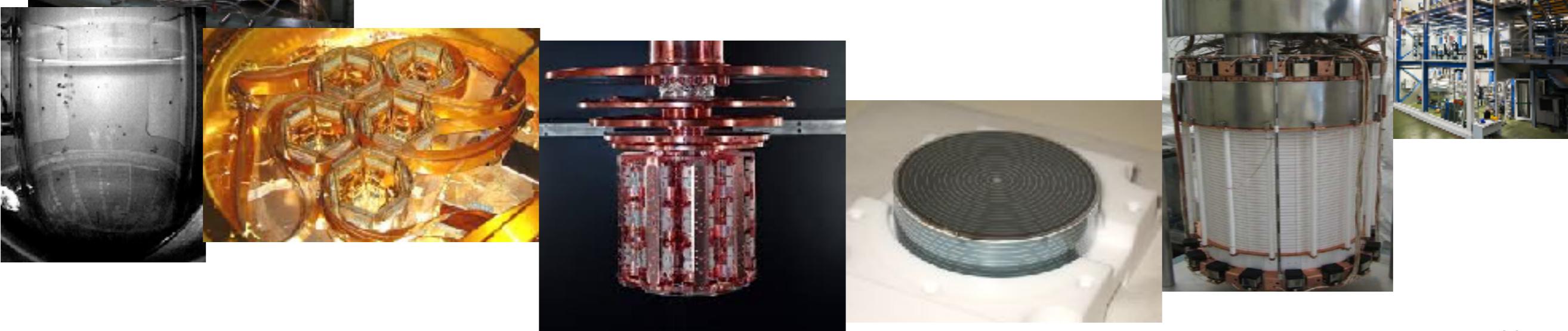
=> DéTECTEURS spécifiques :

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

Détection directe des WIMPs



Infrastructures souterraines, blindées :
tunnels, mines, ...
(protection contre les rayons cosmiques)
DéTECTEURS dédiés pour identifier les dépôts d'énergie de recul nucléaire :
beaucoup de technologies testées !



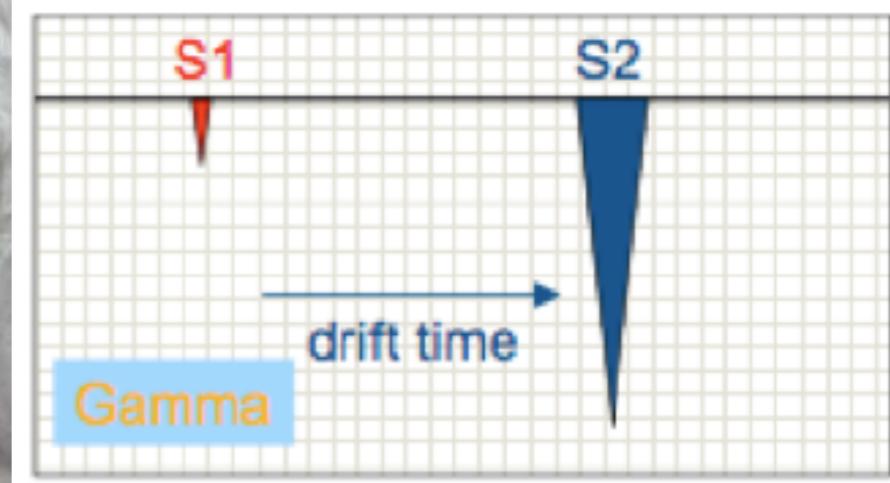
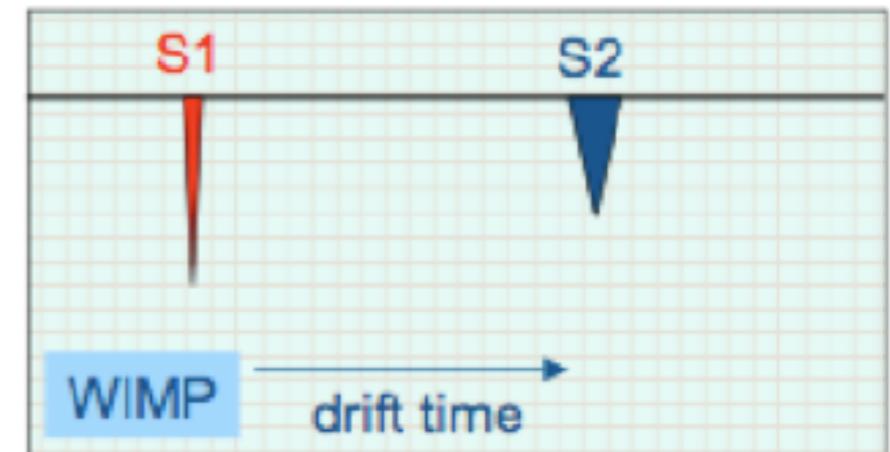
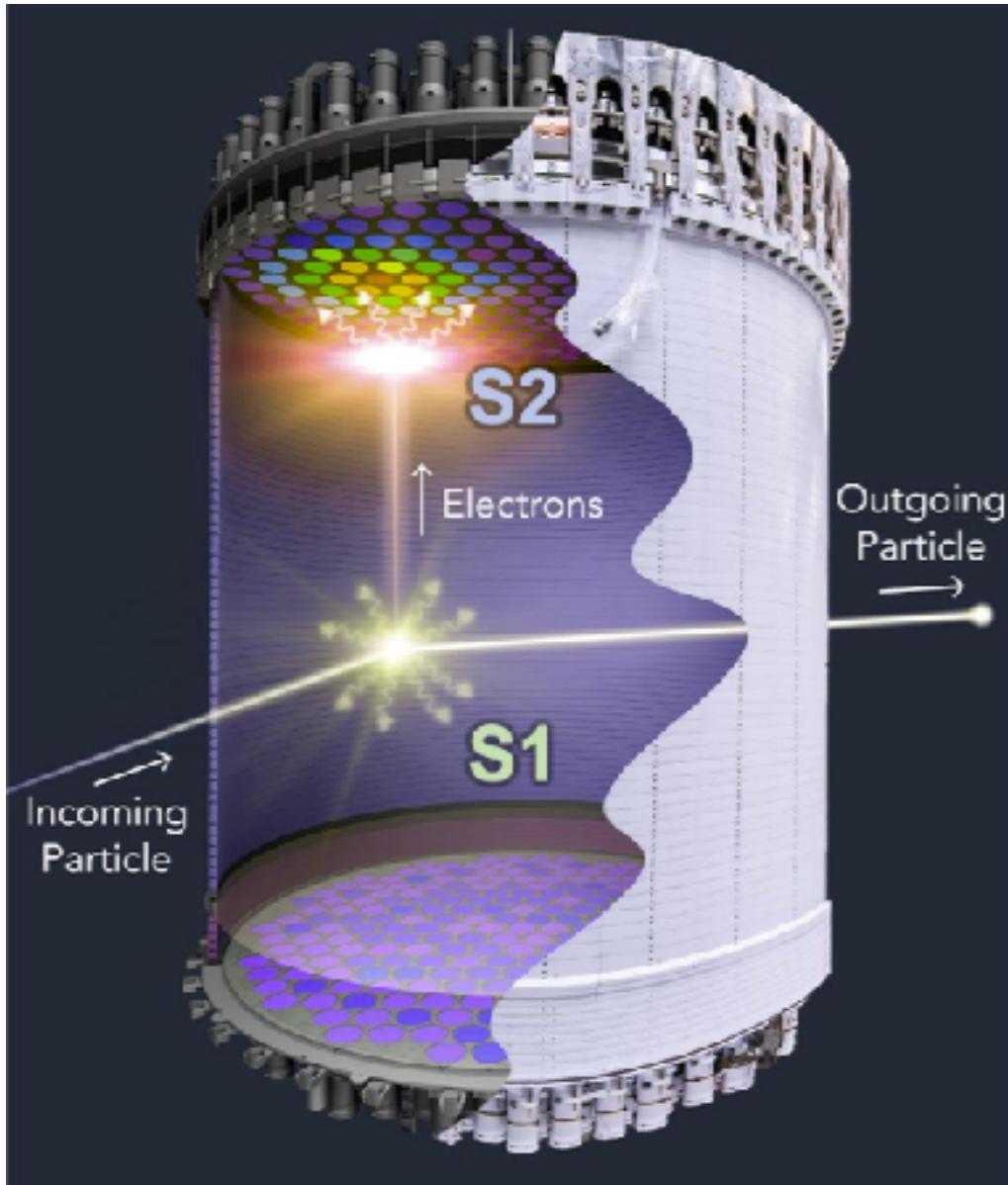
DéTECTEURS de WIMPs Xenon double phase

Xenon liquide à 165 K

PMT = photomultiplicateur (déTECTEUR UV ultra-sensible)

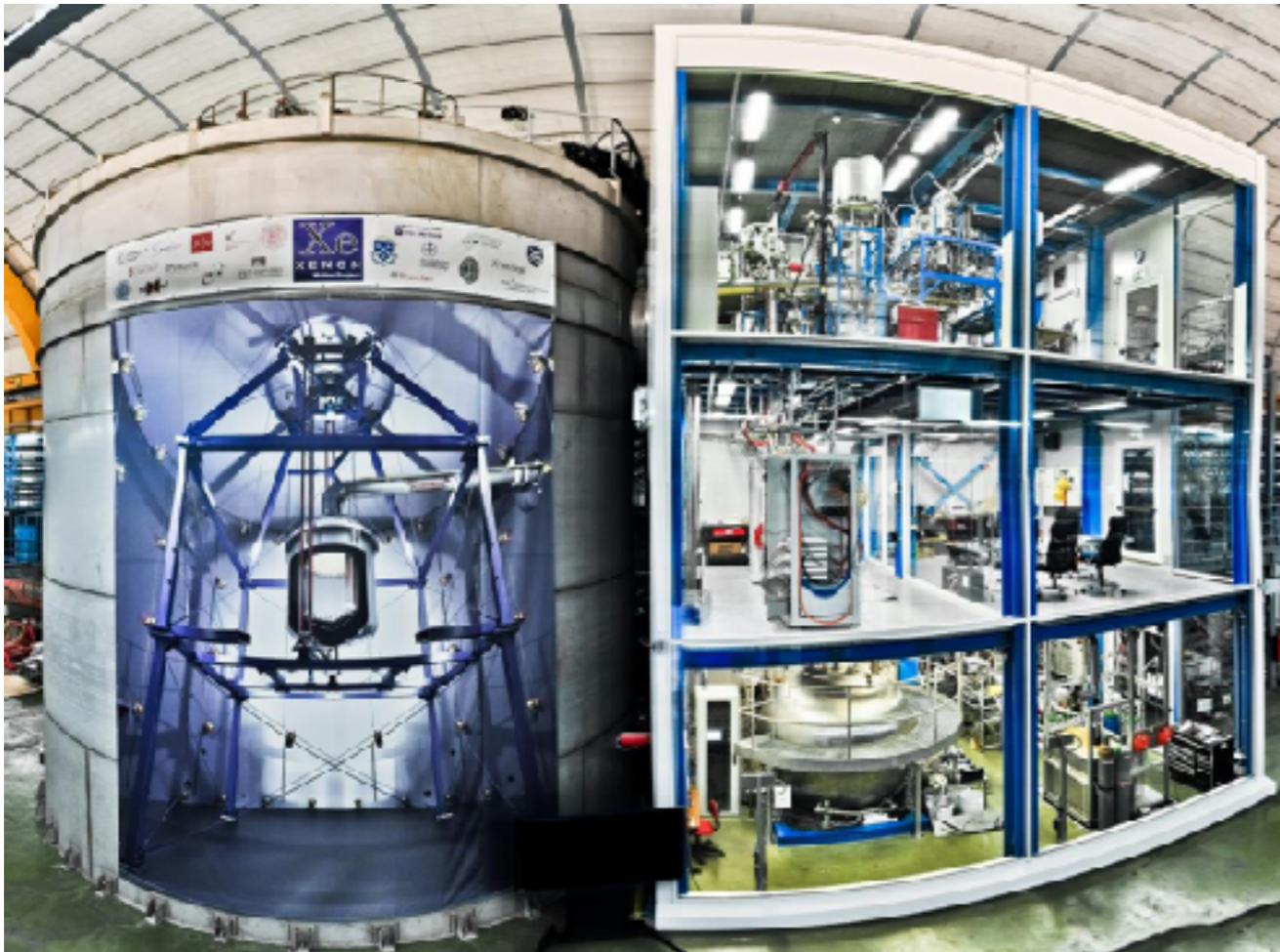
« S1 » : lumière directe, scintillation

« S2 » : lumière émise quand les électrons entrent en phase gazeuse, ionisation

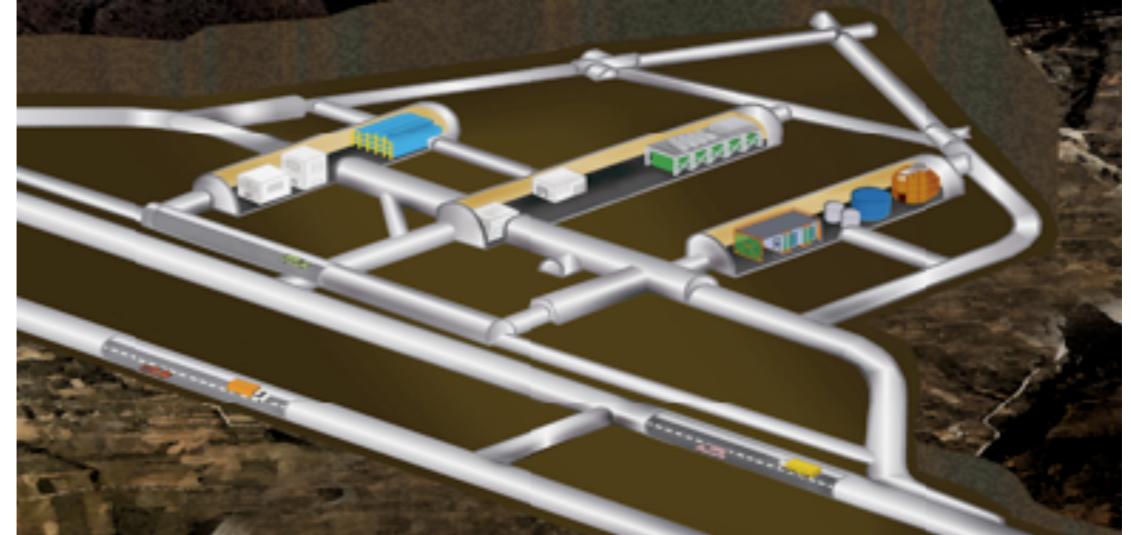


$$(S2/S1)_{\text{wimp}} \ll (S2/S1)_{\text{gamma}}$$

L'expérience XENON1t, au laboratoire du Gran Sasso (Italie)



début 2000s	première R&D
2007	première démonstration technique (XENON10)
2008-2012	expérience à petite échelle XENON100
2014	construction de XENON1t
fin 2016	premier "science run"
fin 2018	résultats d'un an de prise de données
2020	construction upgrade détecteur ...



Exemple de résultats : XENON1t, 2018

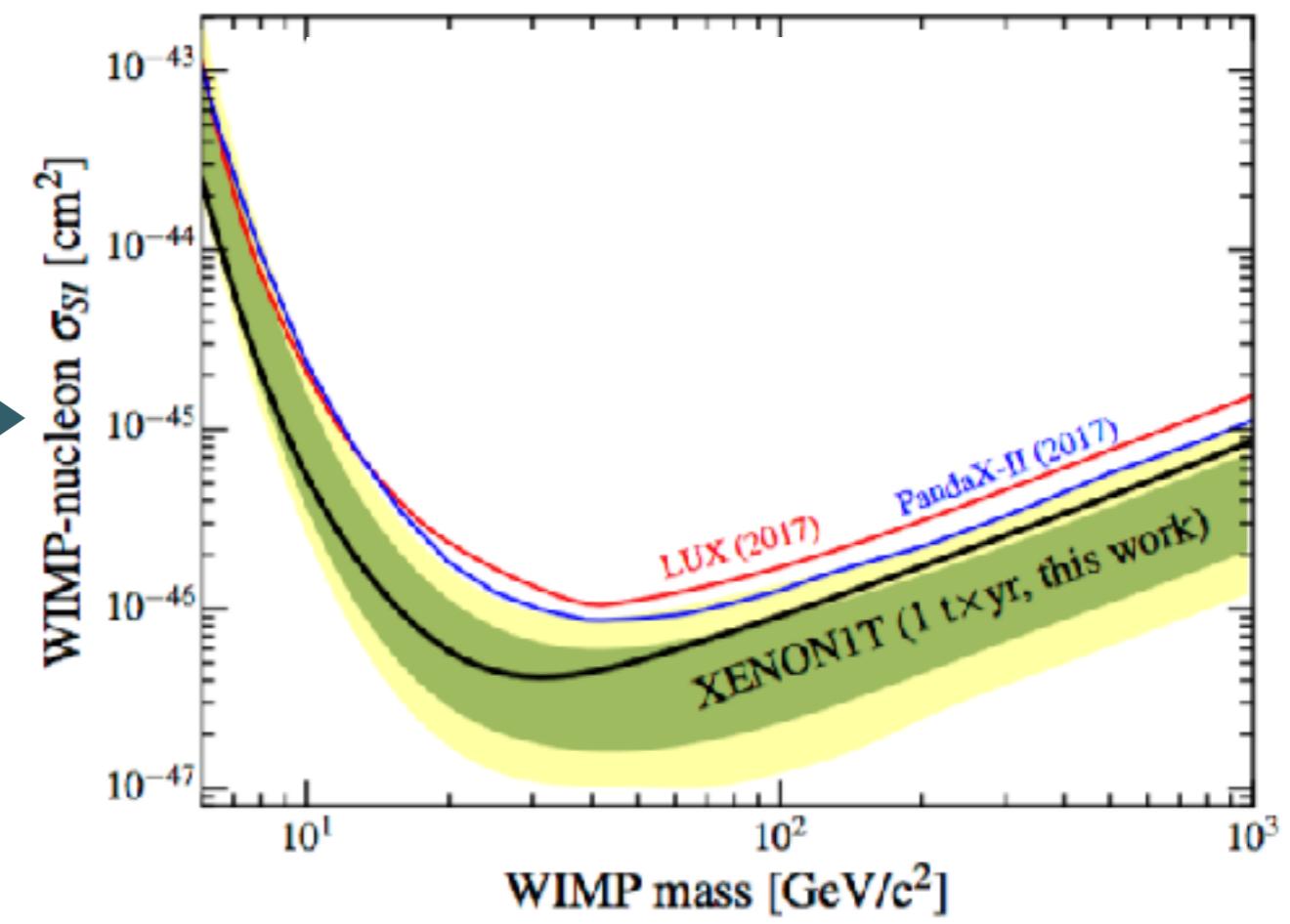
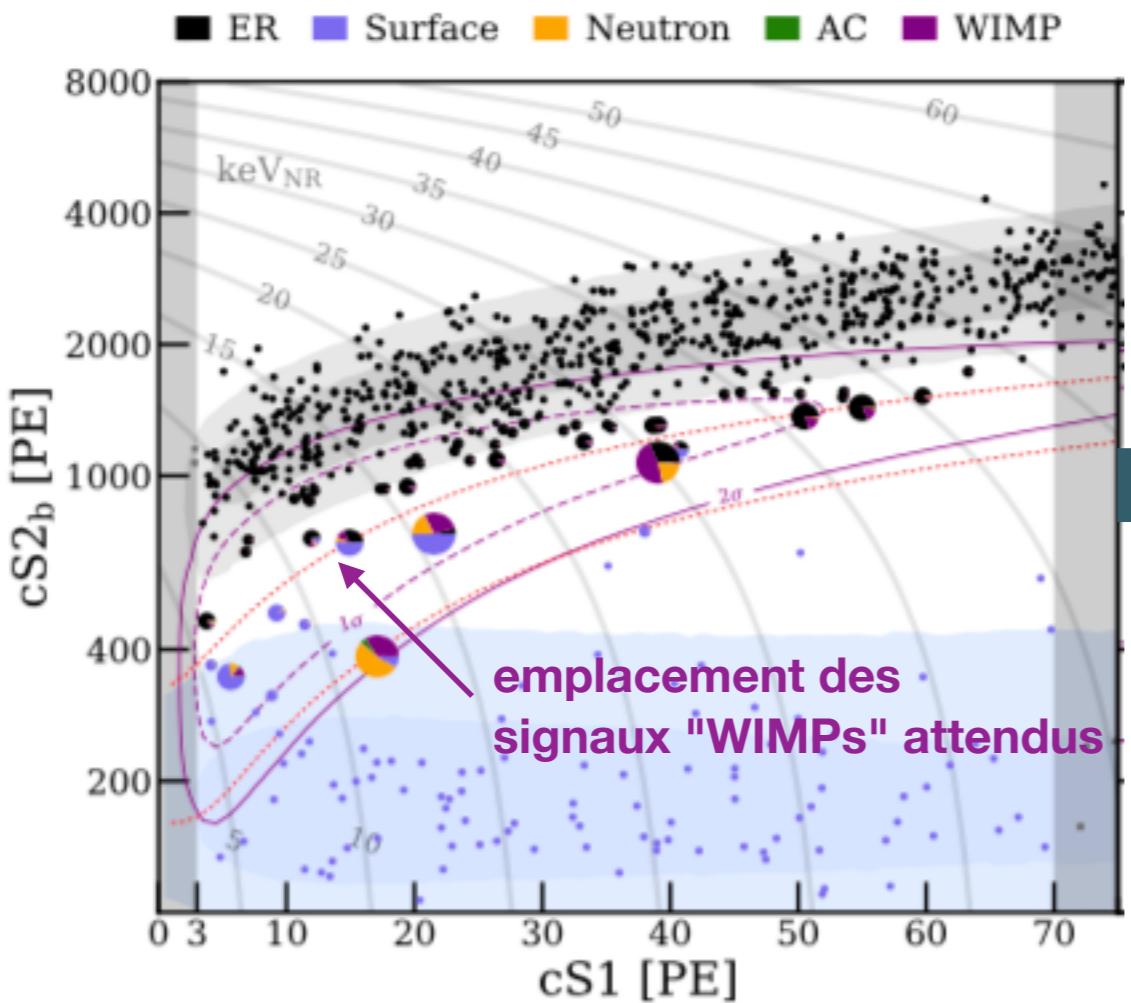
1 an de prise de données

Beaucoup d'interactions enregistrées ..

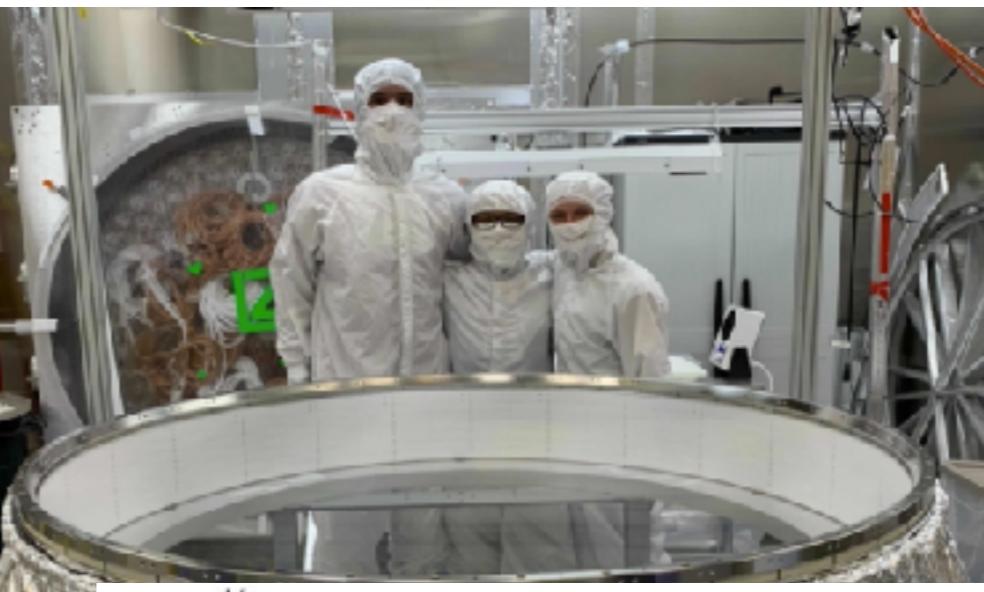
.. mais propriétés compatibles avec les bruits de fond connus (radioactivité)

Procédure statistique ("analyse en likelihood"):

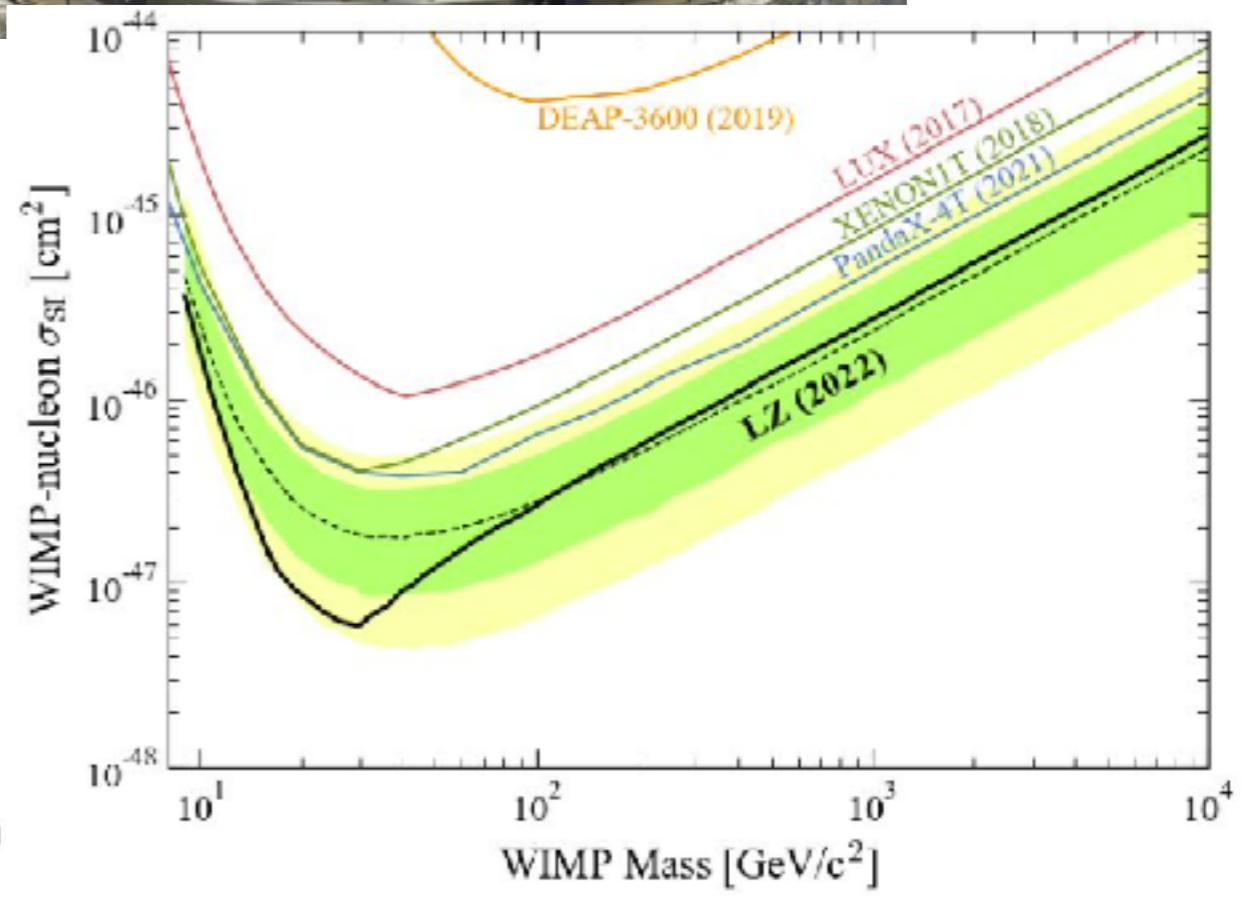
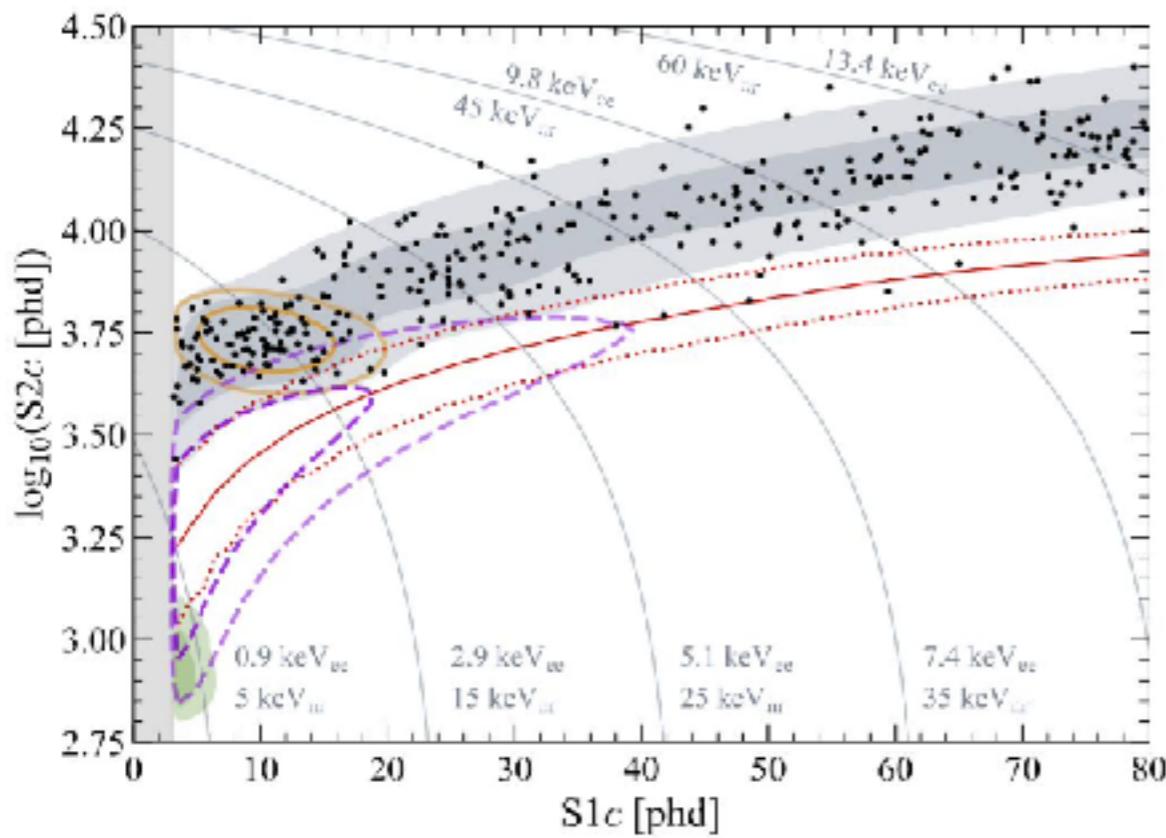
→ **limite supérieure sur l'interaction WIMP-noyau** (section efficace)



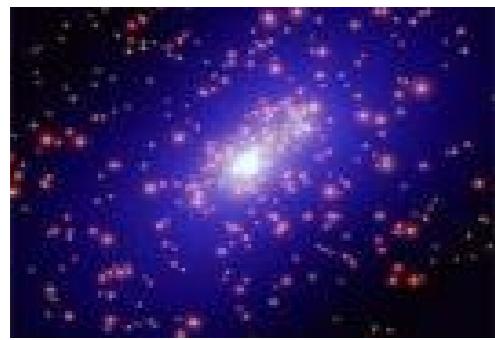
La concurrence : nouveaux résultats LZ (USA)



07/07/2022



Détection indirecte des WIMPs



} régions denses en DM :
 $\chi \chi \rightarrow \gamma, p, e\dots$

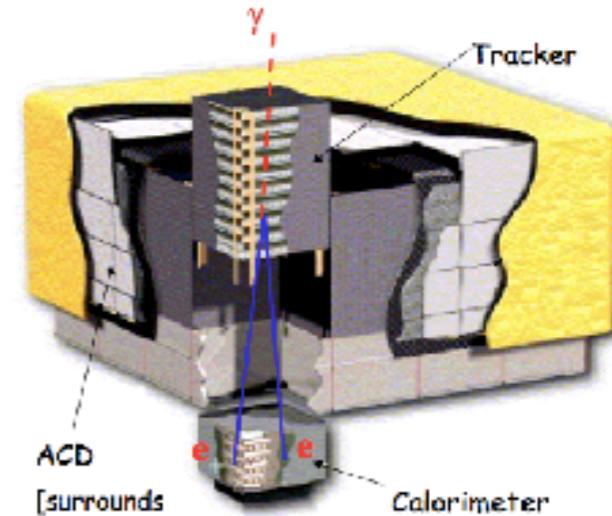
particules de haute énergie,
détectables :

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

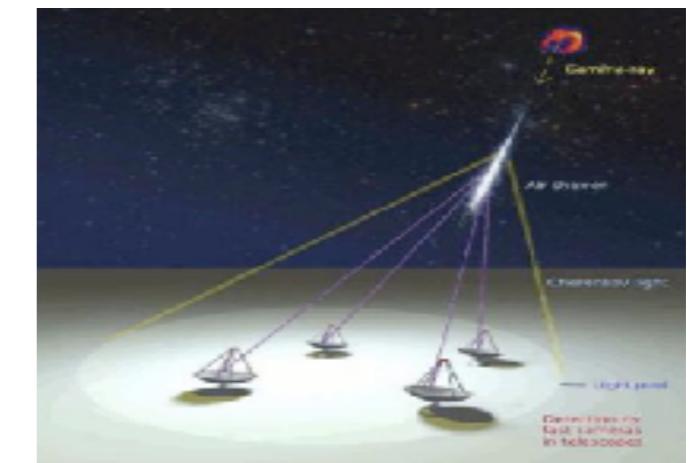
section efficace
d'annihilation

physique des
particules

astrophysique

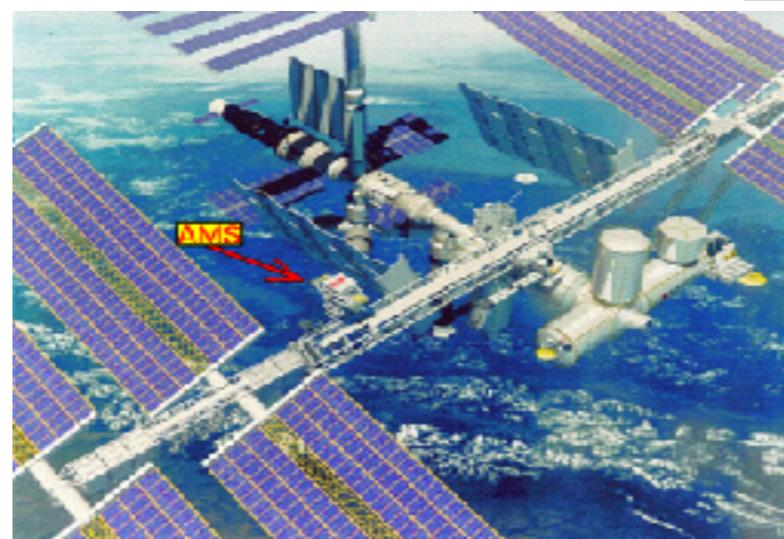
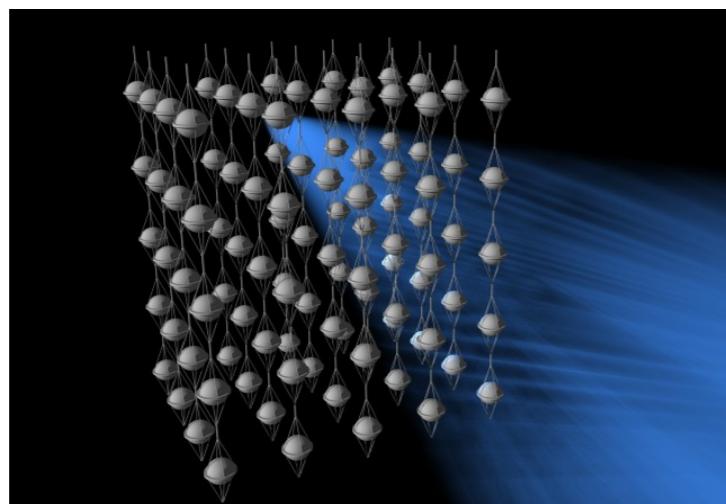


satellite
Fermi



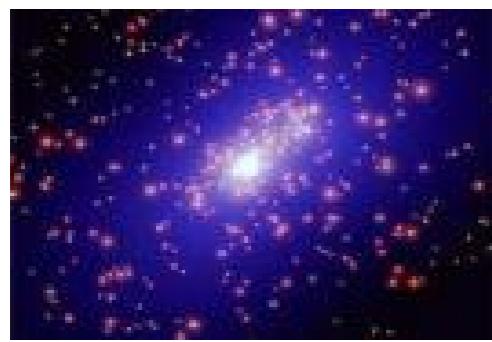
HESS / CTA
(rayons gamma)

Antares /
IceCube
(neutrinos)



AMS
(rayons cosmiques)

Détection indirecte des WIMPs

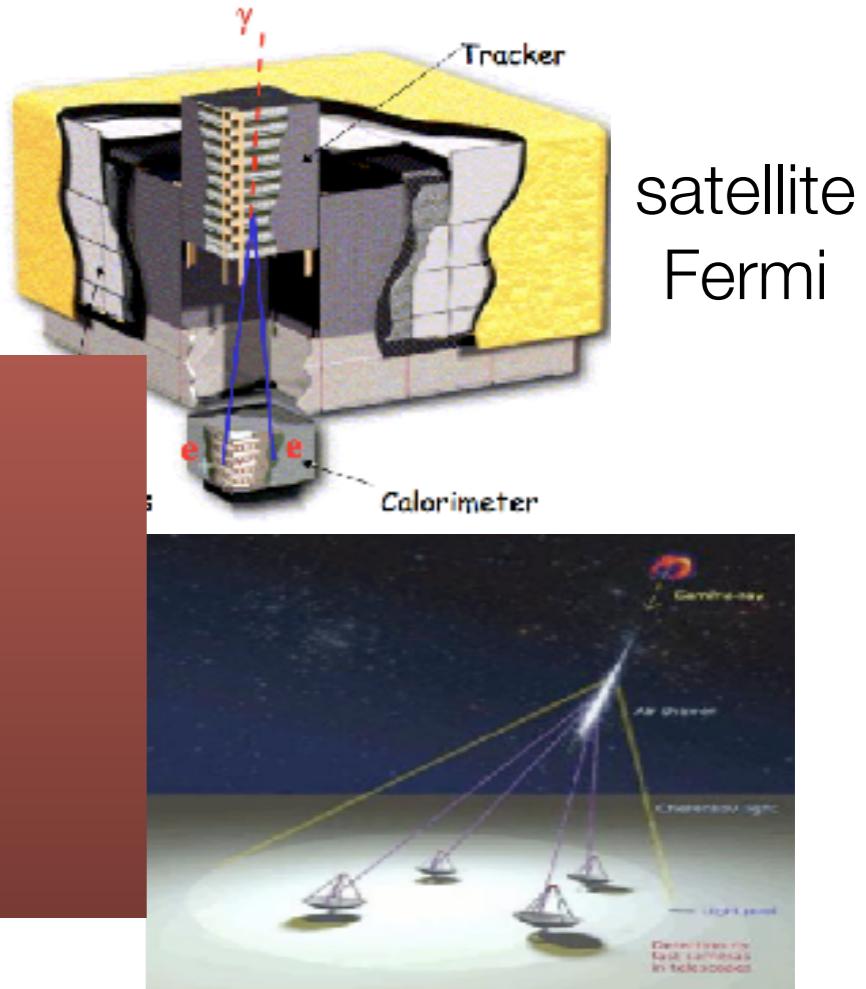


} régions denses en DM :
 $\chi \chi \rightarrow \gamma, p, e\dots$
particules de haute énergie.

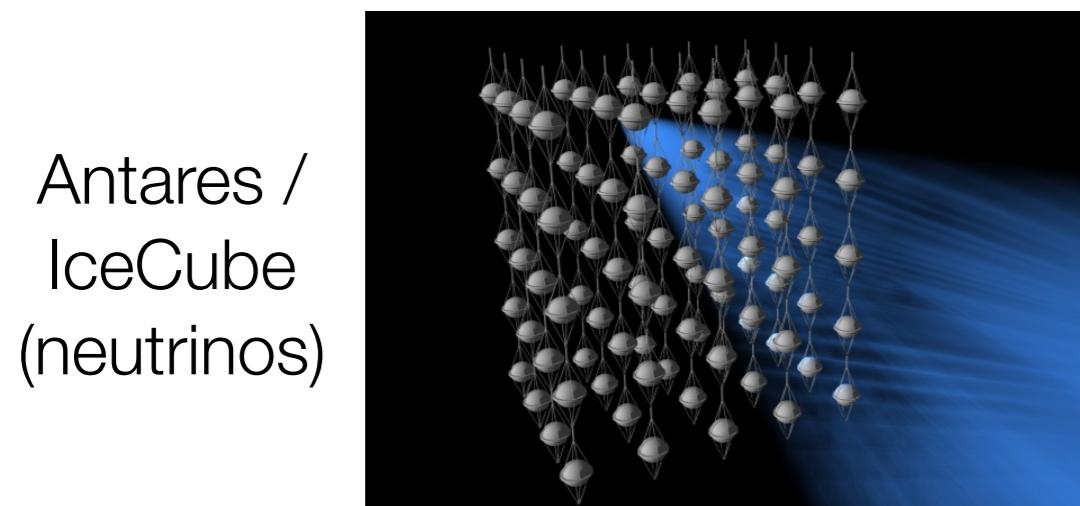
flux prédit : $\Phi_i(\psi, E) =$

section efficace
d'annihilation

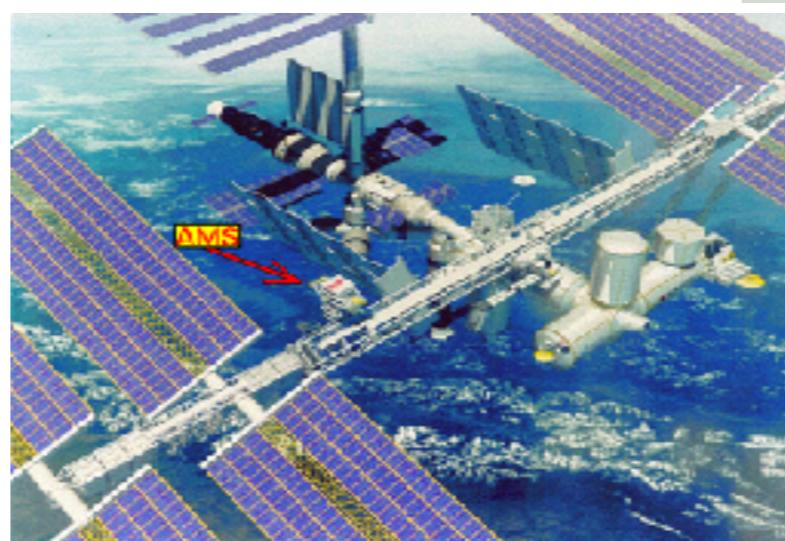
Instruments des astroparticules



satellite
Fermi



Antares /
IceCube
(neutrinos)



AMS
(rayons cosmiques)

HESS / CTA
(rayons gamma)

Détection indirecte des WIMPs : un exemple

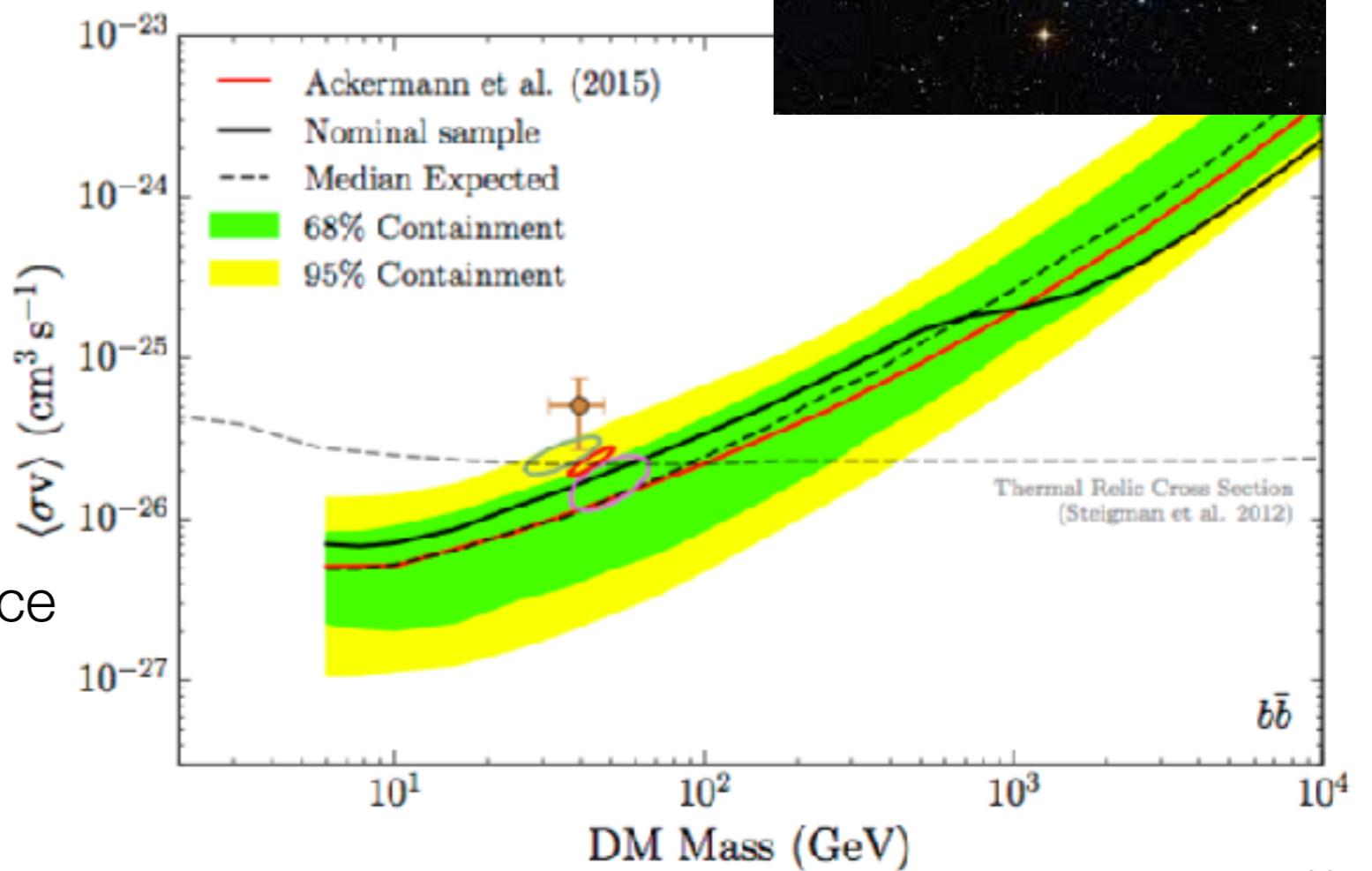
- Satellite Fermi :
pas de flux de photons au GeV observé : $\phi \lesssim 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

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

« J-factor » (astro) :

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

→ Contrainte sur la section efficace
d'annihilation des WIMPs :



Les WIMPs : bilan provisoire

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

Plan

Rappel sur l'histoire de notre Univers

I. La matière noire : un ingrédient nécessaire

- Galaxies et amas de galaxies
- Cosmologie à "grande échelle"

II. Quelles sont les propriétés et la nature de la matière noire ?

- Un exemple : que nous disent les observations sur sa masse ?
- Hypothèses théoriques sur la nature de la matière noire

III. Un exemple : tester le scénario "WIMP"

- Détection directe : l'expérience XENON1t
- Détection indirecte : observations du satellite FERMI

IV. Un autre exemple : les neutrinos stériles

Fuzzy DM

Sterile
neutrinos

WIMPs

Primordial
black holes

10^{-22} eV

μeV

keV

MeV

GeV

TeV

M_{Pl}

$50 M_{\odot}$

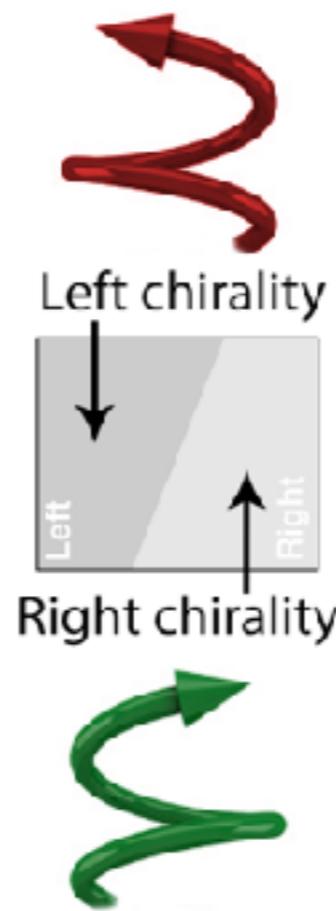
QCD
axions

Asymmetric DM
Self-interacting DM

WIMPzillas

Neutrinos stériles

Quarks	u 2.4 MeV $\frac{2}{3}$ Left up Right	c 1.27 GeV $\frac{2}{3}$ Left charm Right	t 171.2 GeV $\frac{2}{3}$ Left top Right
d 4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ Left down Right	s 104 MeV $-\frac{1}{3}$ Left strange Right	b 4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ Left bottom Right	
ν_e $<0.0001 \text{ eV}$ Left electron neutrino Right	N_1 $\sim \text{keV}$ sterile neutrino	ν_μ $\sim 0.01 \text{ eV}$ Left muon neutrino Right	N_2 $\sim \text{GeV}$ sterile neutrino
ν_τ $\sim 0.04 \text{ eV}$ Left tau neutrino Right	N_3 $\sim \text{GeV}$ sterile neutrino		
e 0.511 MeV -1 Left electron Right	μ 105.7 MeV -1 Left muon Right	τ 1.777 GeV -1 Left tau Right	

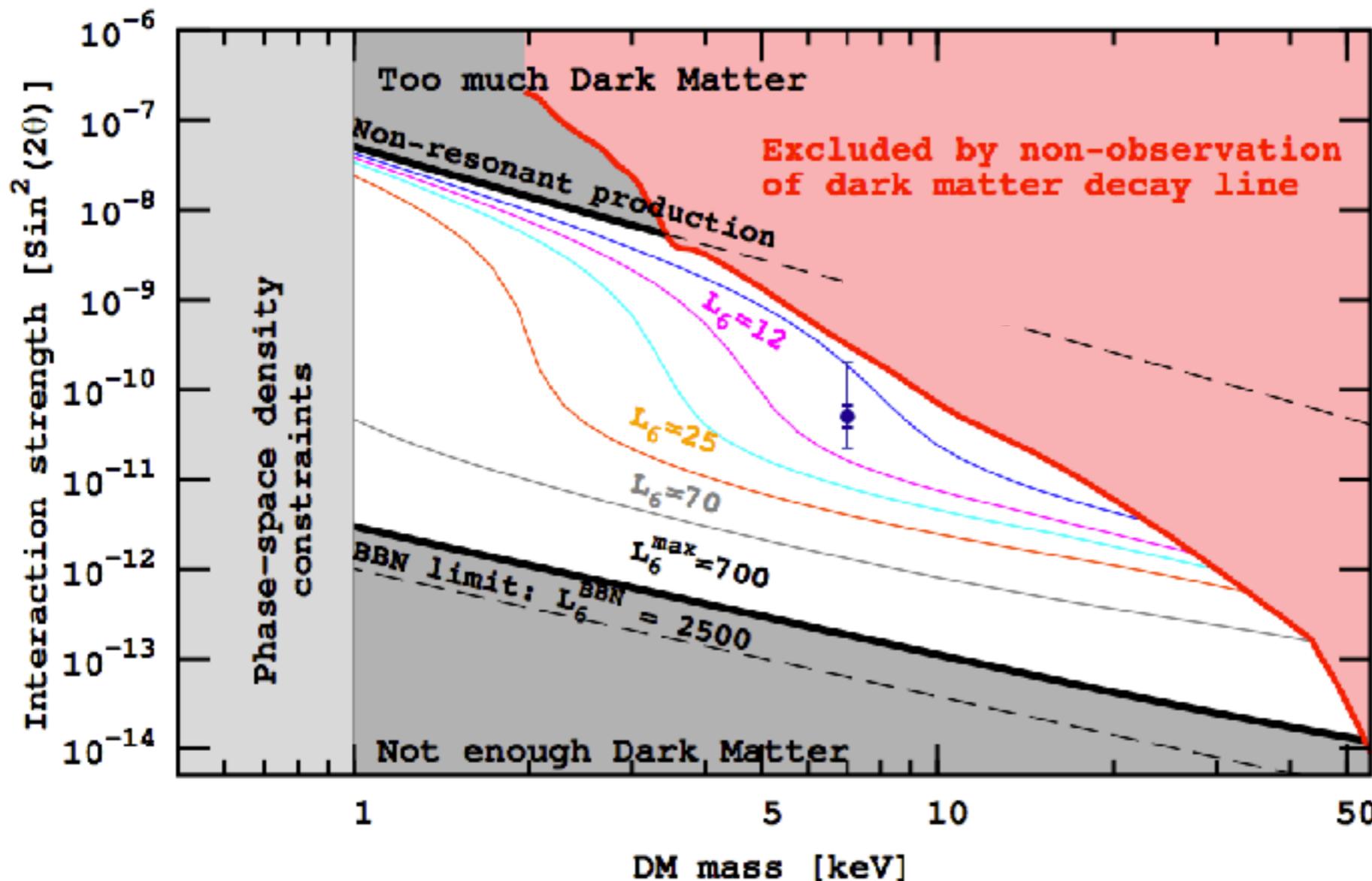


Contrepartie hypothétique "droite" des neutrinos du modèle standard ("gauches", actifs)

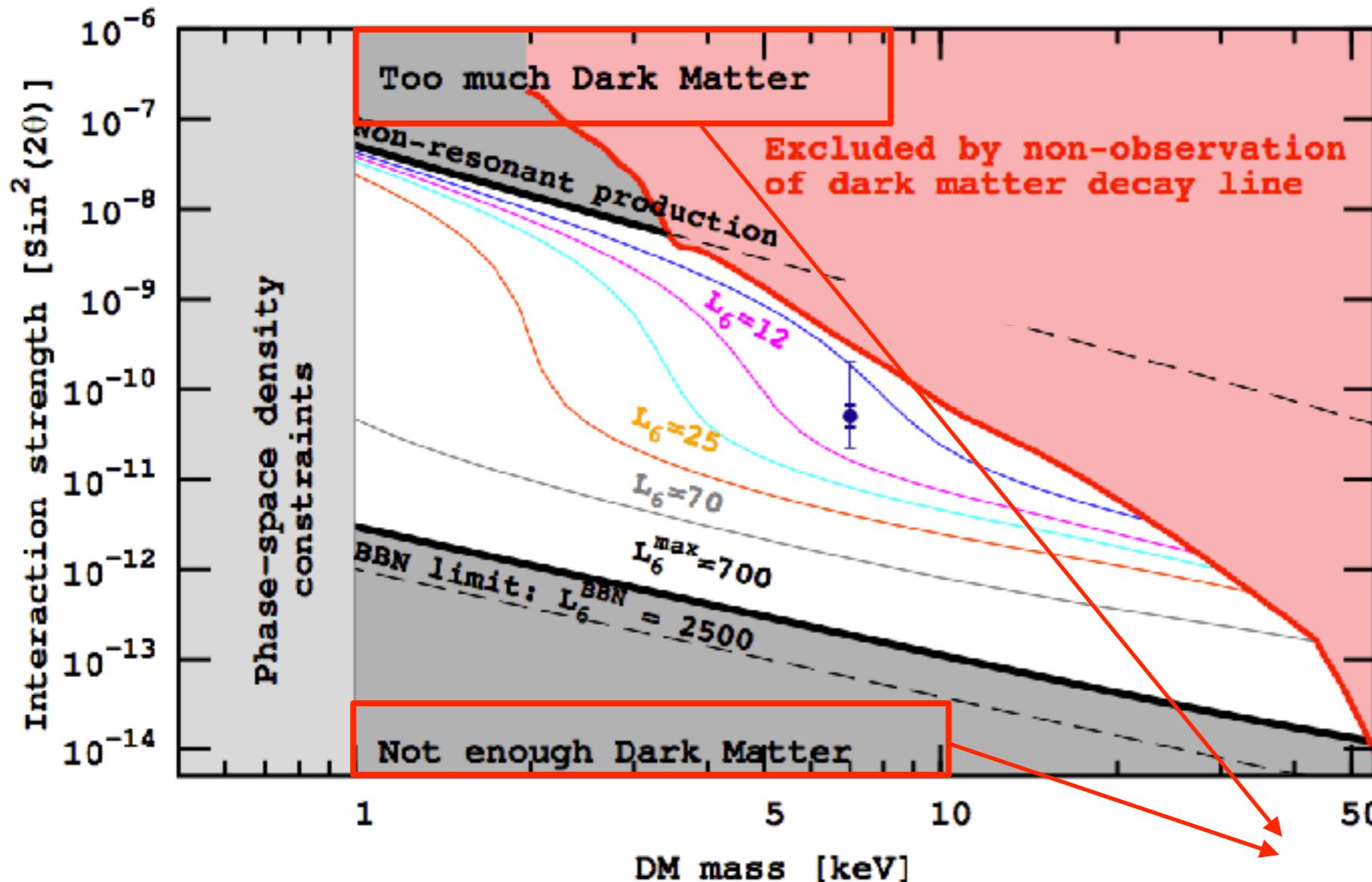
- Pas de couplage direct aux bosons de jauge du modèle standard ("stériles")
- "Mélange" (quantique) avec les neutrinos actifs : paramétré par un "angle de mélange" Θ
- Masses inconnues

Il y a une (petite) fenêtre dans l'espace des paramètres (masse, Θ) pour que N_1 constitue la matière noire

Neutrinos stériles au keV

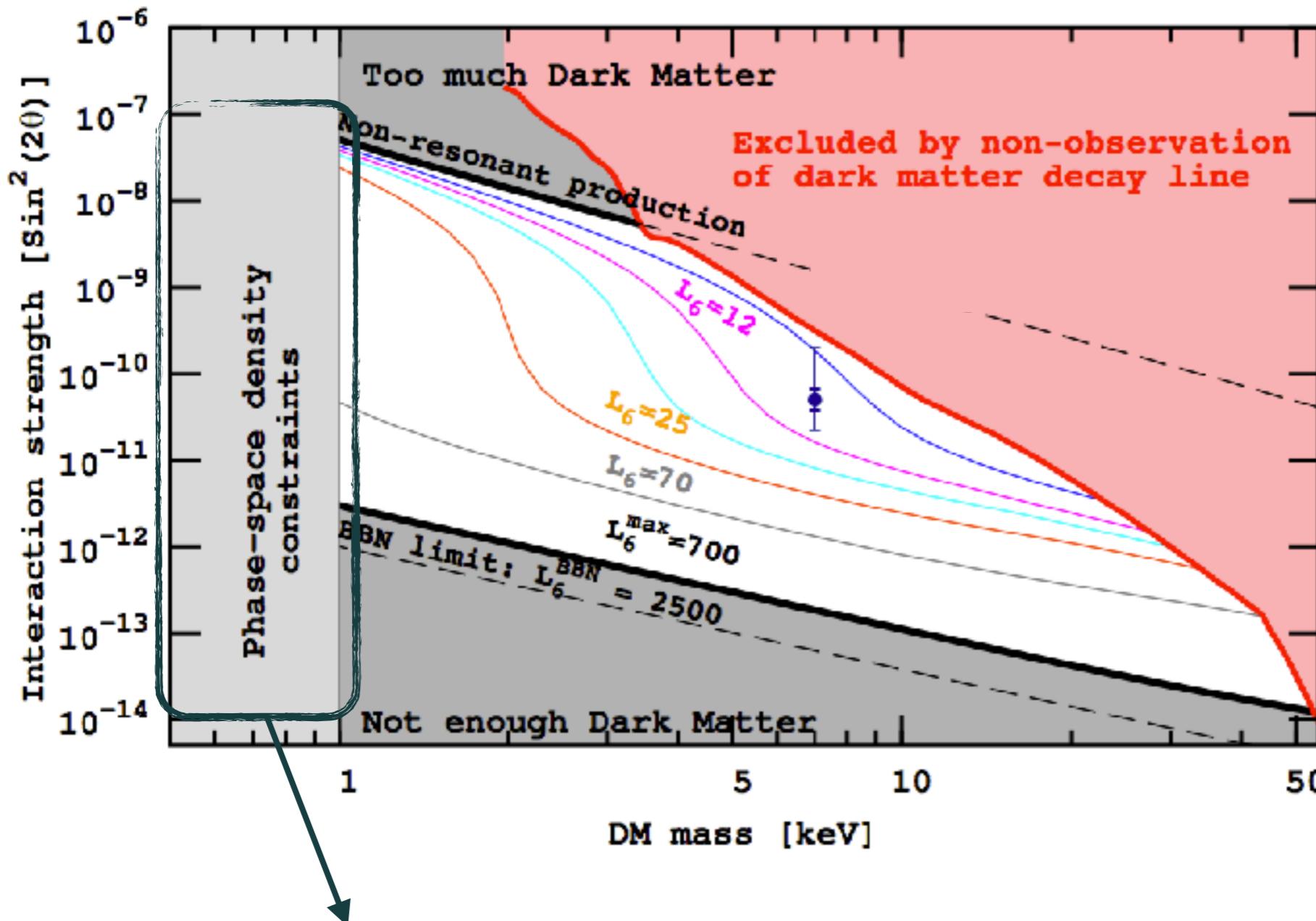


Neutrinos stériles au keV



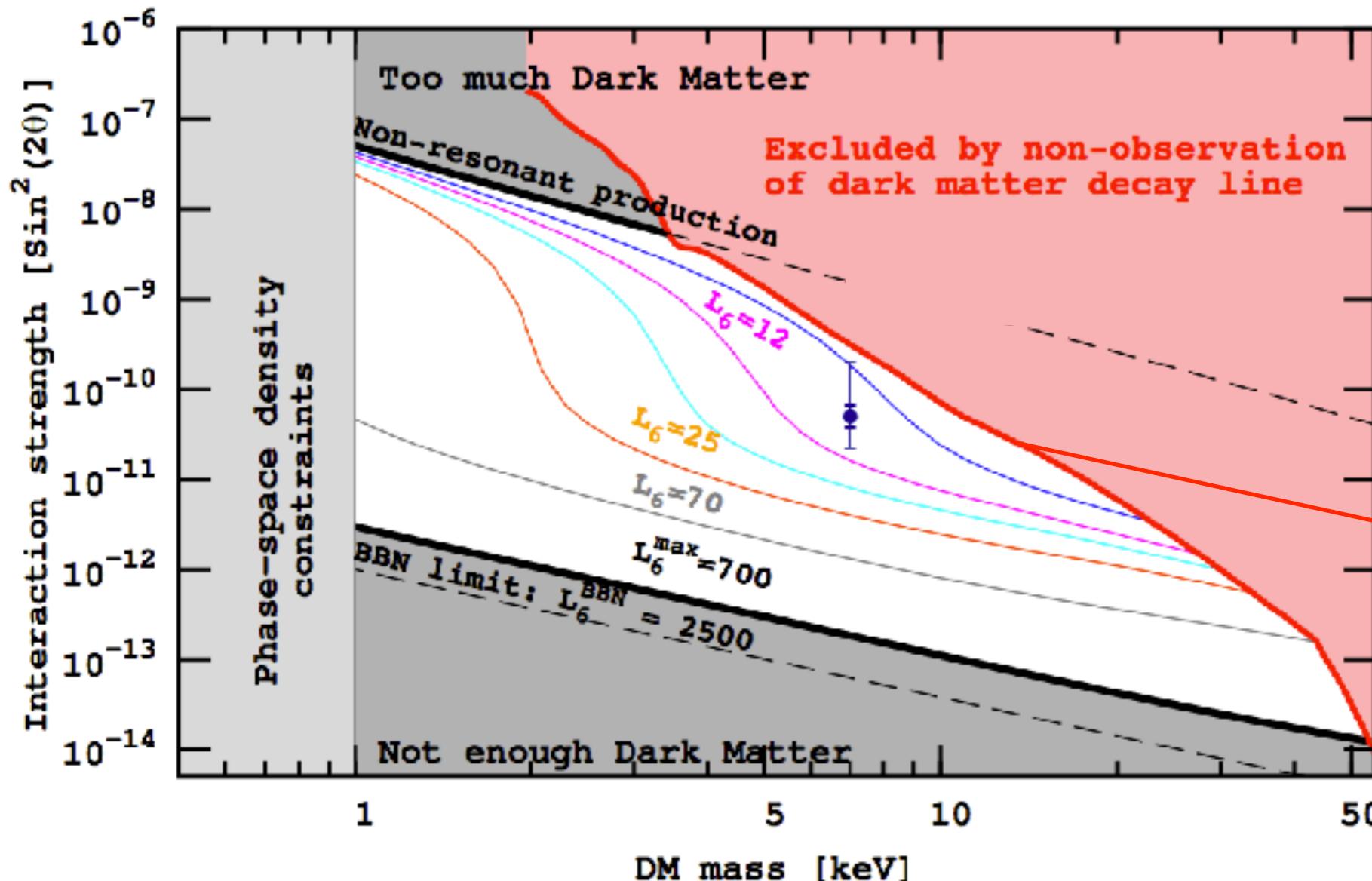
la densité relique des neutrinos stérile augmente avec Θ

Neutrinos stériles au keV



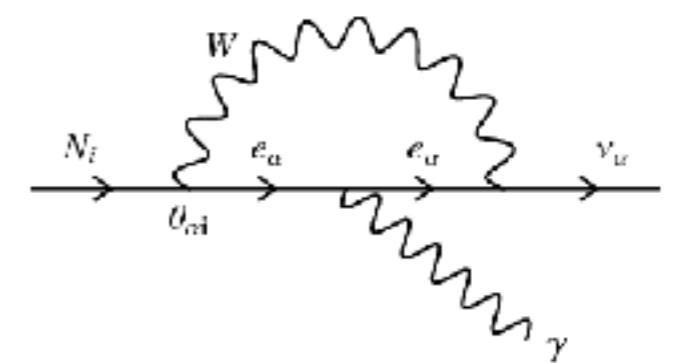
Les neutrinos (stériles) sont des fermions

Neutrinos stériles au keV

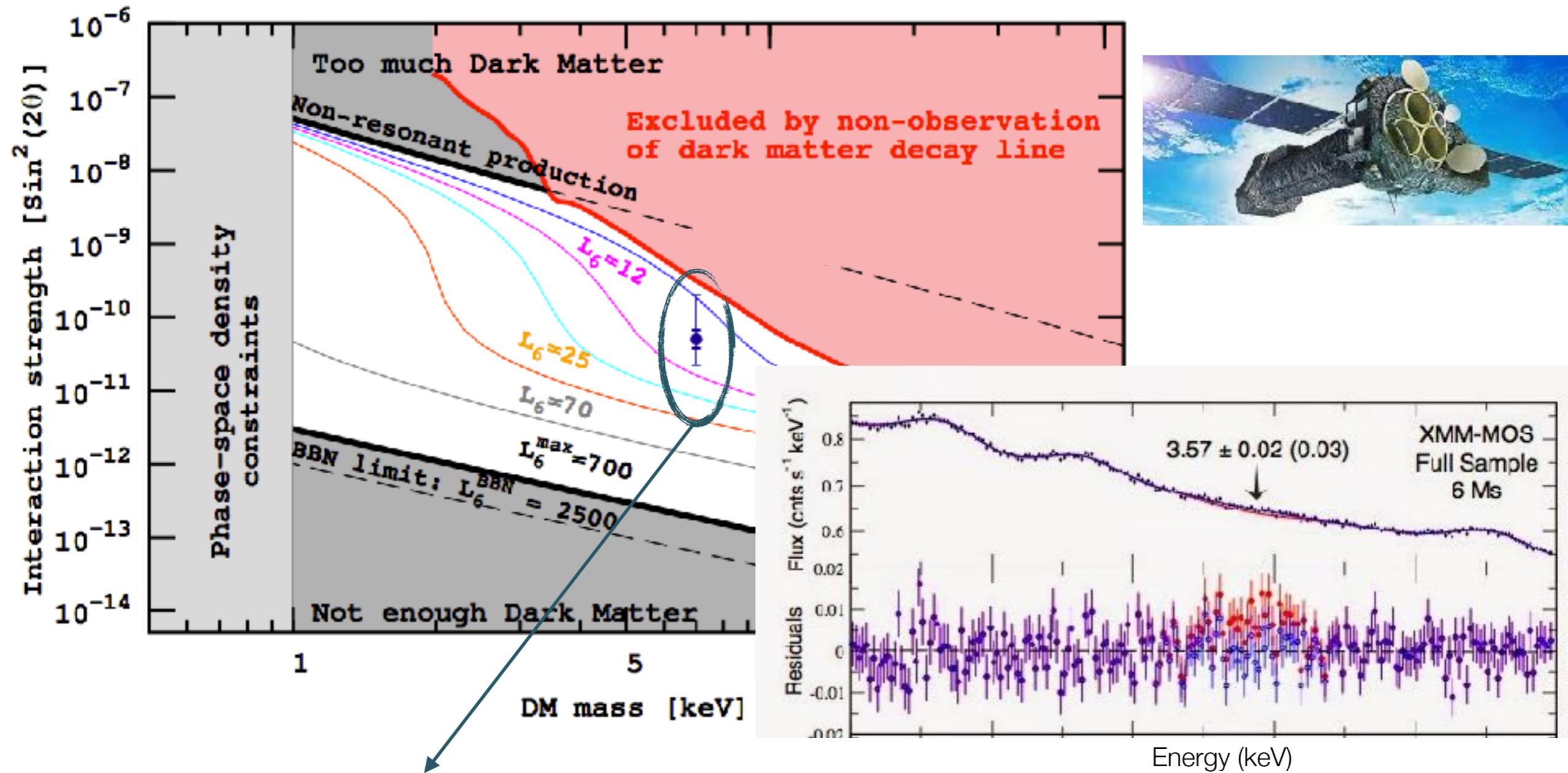


Emission X de régions denses en matière noire

Processus de désintégration : photon d'énergie $E_x = m_N/2$



Neutrinos stériles au keV



Indications d'une émission X @ 3.5 keV dans certains objets astrophysique
Neutrino stérile de 7 keV ??
Très controversé

Merci de votre attention !

Extraordinary observations in cosmology over the past decades

- We know a lot about the history of our Universe !
- All points towards the existence of dark matter

The fundamental nature of "dark matter", as a physical object, is a complete mystery

Many hypotheses ... many searches ...

Several detection claims: eg. the 7 keV sterile neutrino, but also others
... But none of these hints is confirmed so far. The mystery remains.

Researchers "best guess" 90s-2000s : WIMPs (new electroweak physics)

Extensive searches: accelerators (LHC), direct, indirect searches → Scenario was not confirmed

What should we do now ? Some of current research paths:

- Search for **QCD axions**: "second best guess" from particle physics since the 80s
- Test the **primordial black hole** hypothesis (also very constrained)
- Search for **modified gravity** ?