

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
4 juillet 2024



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 t

interface cosmologie /
physique des particules /
astroparticules

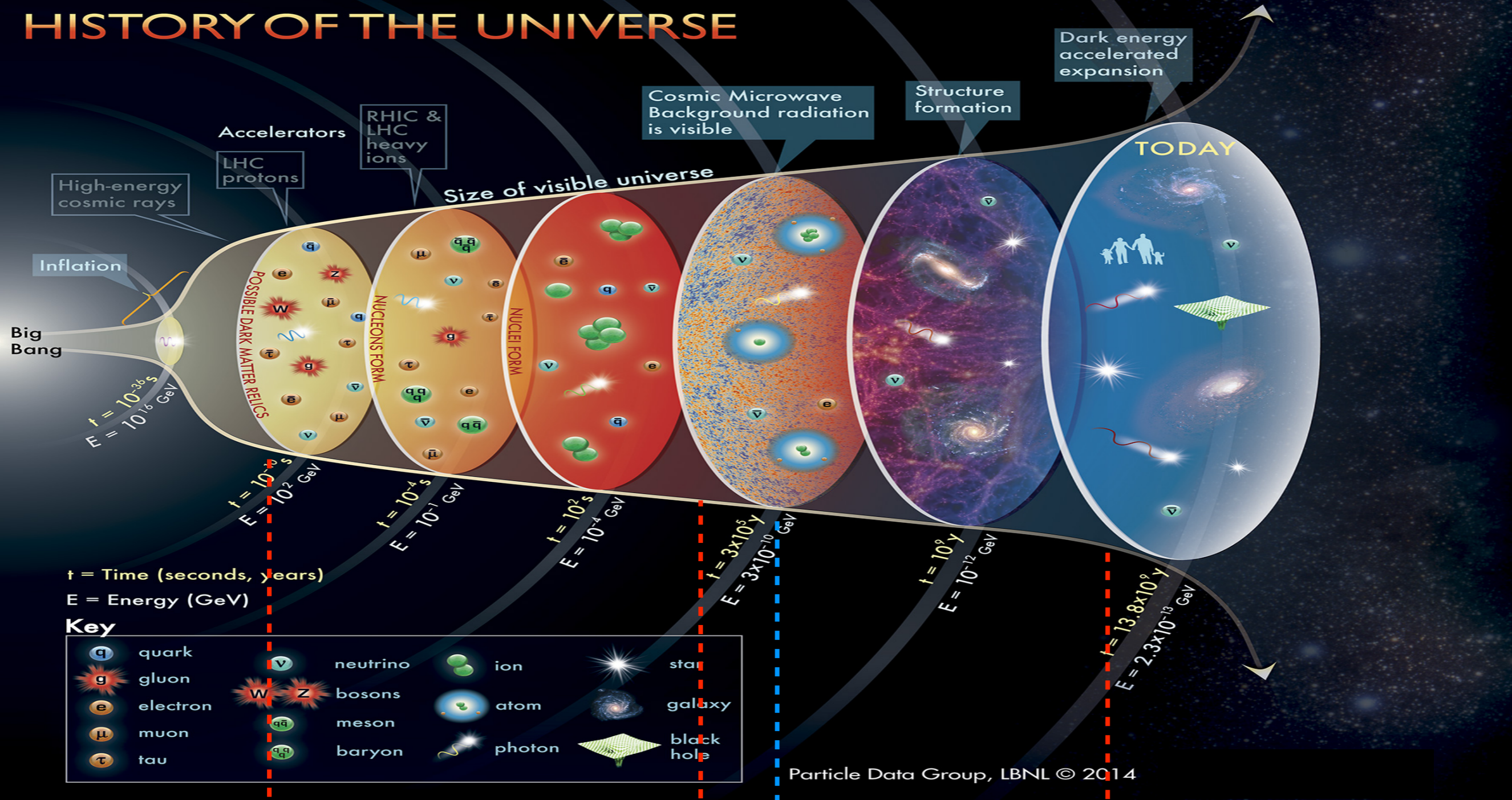
III. Un exemple

- Détection dire

- Détection indirecte : observations du satellite FERMI

IV. Un autre exemple : les neutrinos stériles

HISTORY OF THE UNIVERSE

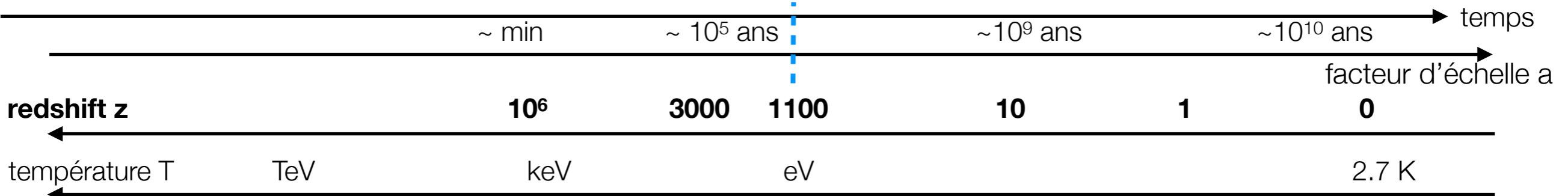


physique
inconnue

radiation domine
plasma primordial

matière domine :
formation des structures

énergie noire



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 ?

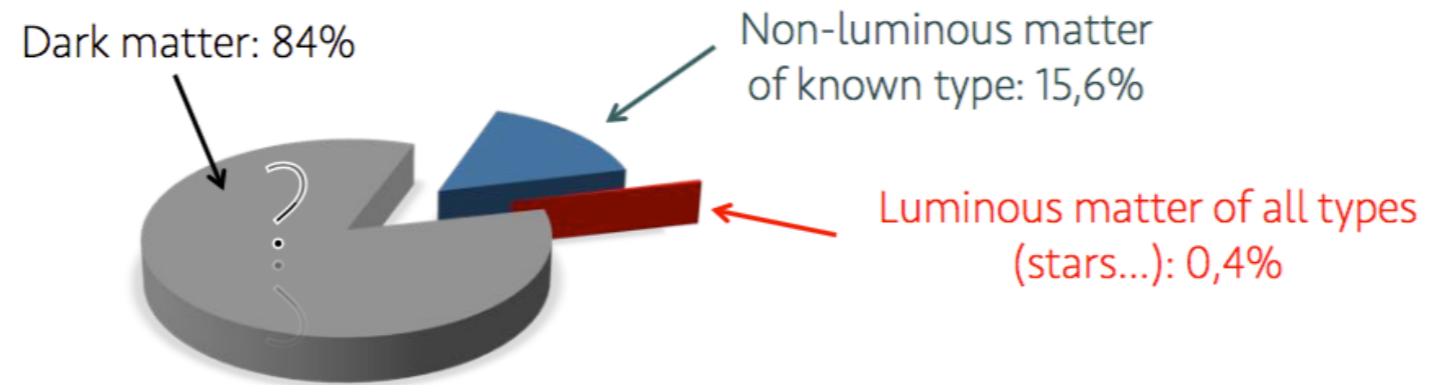
- Un exemple : que nous disent les observations sur sa masse ?
- Hypothèses théoriques sur la nature de la matière noire

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) Dynamique globale de l'Univers

équations de Friedmann + mesures de distance dans l'Univers

c) Formation des grandes structures

oscillations acoustiques des baryons (BAO)

fluctuations de densité de matière à grande échelle

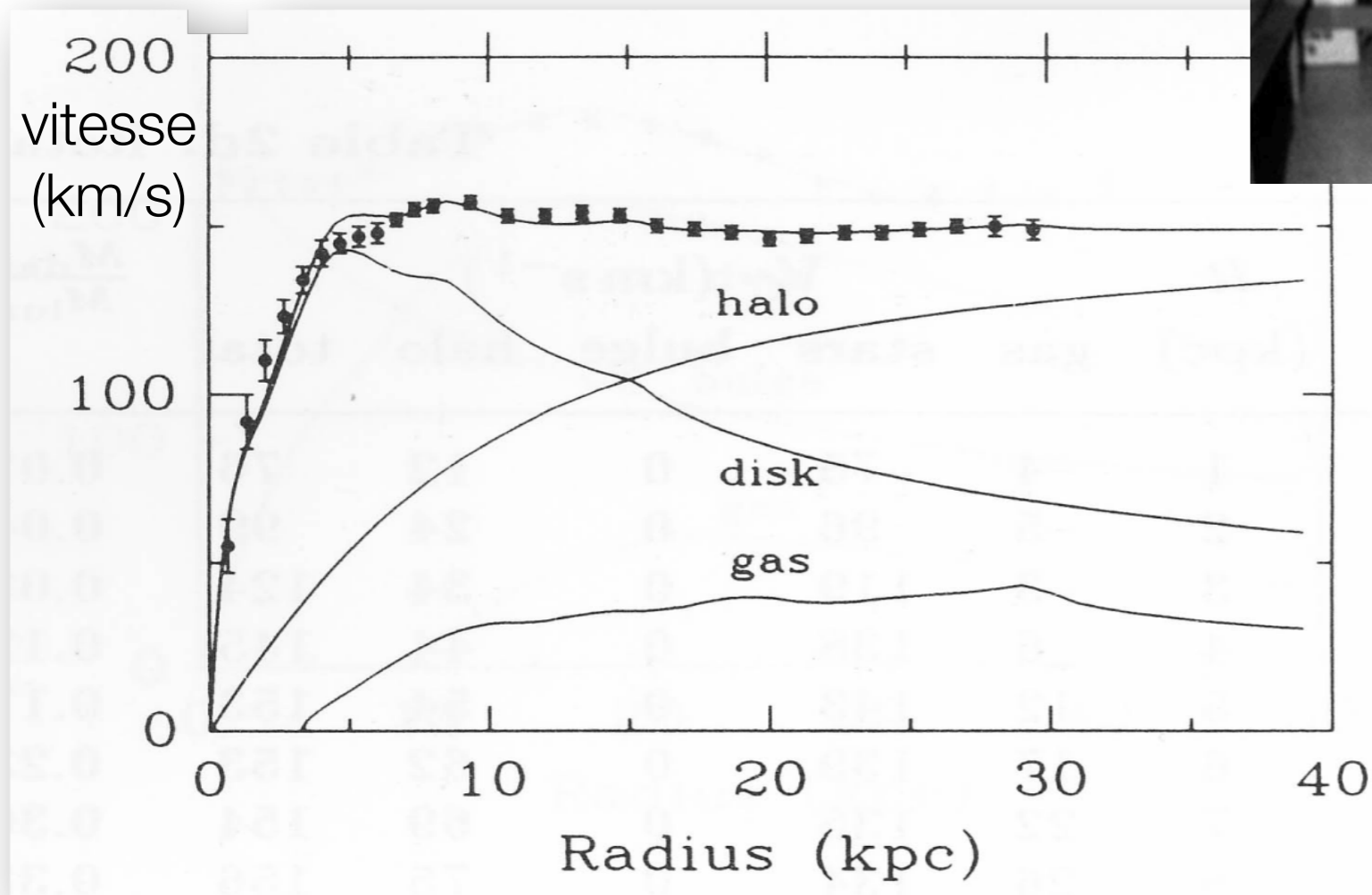
observations: CMB + distribution à grande échelle des galaxies

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

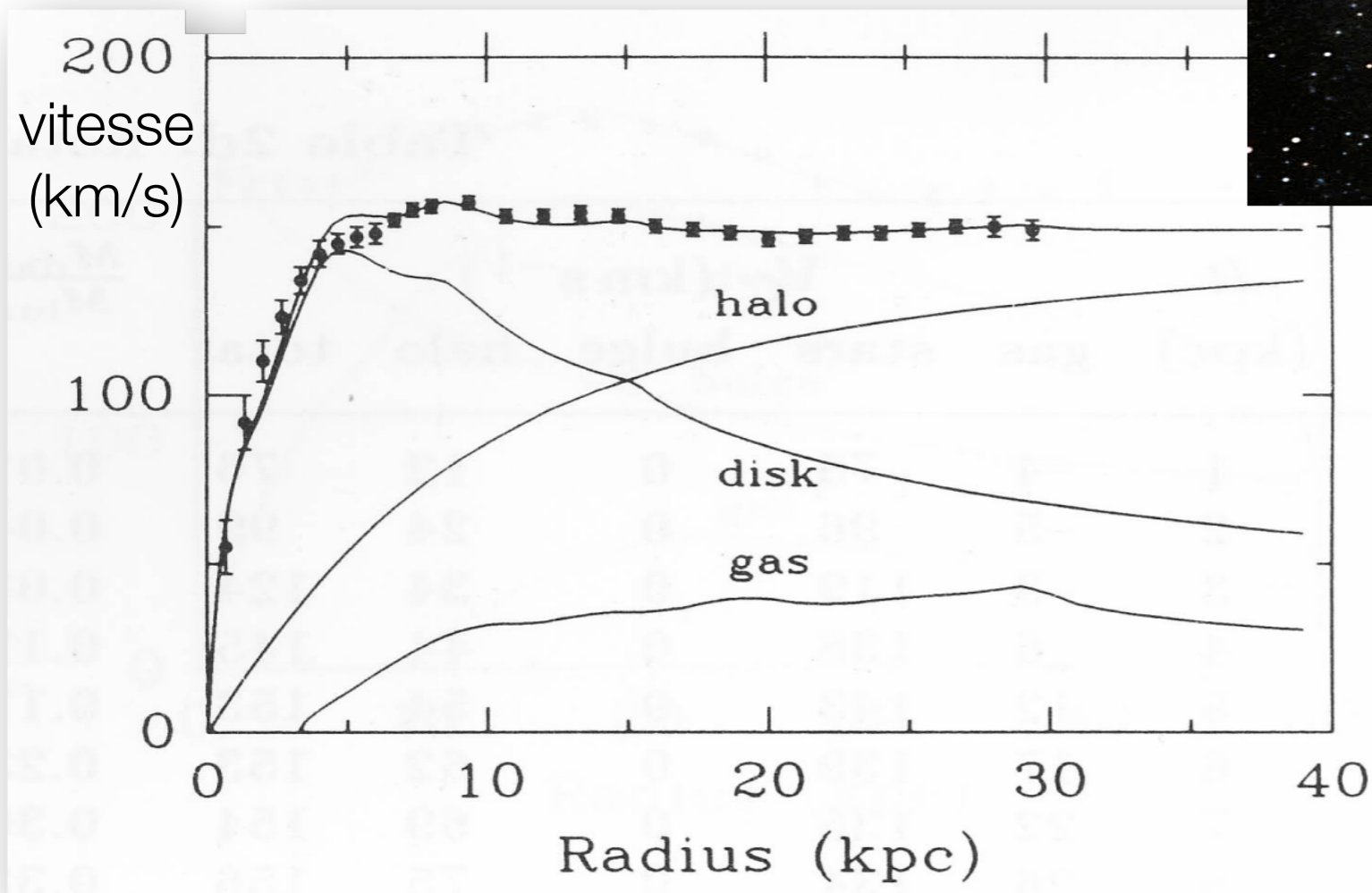
Difficulté: une galaxie est un système complexe, dur à modéliser et à mesurer

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)

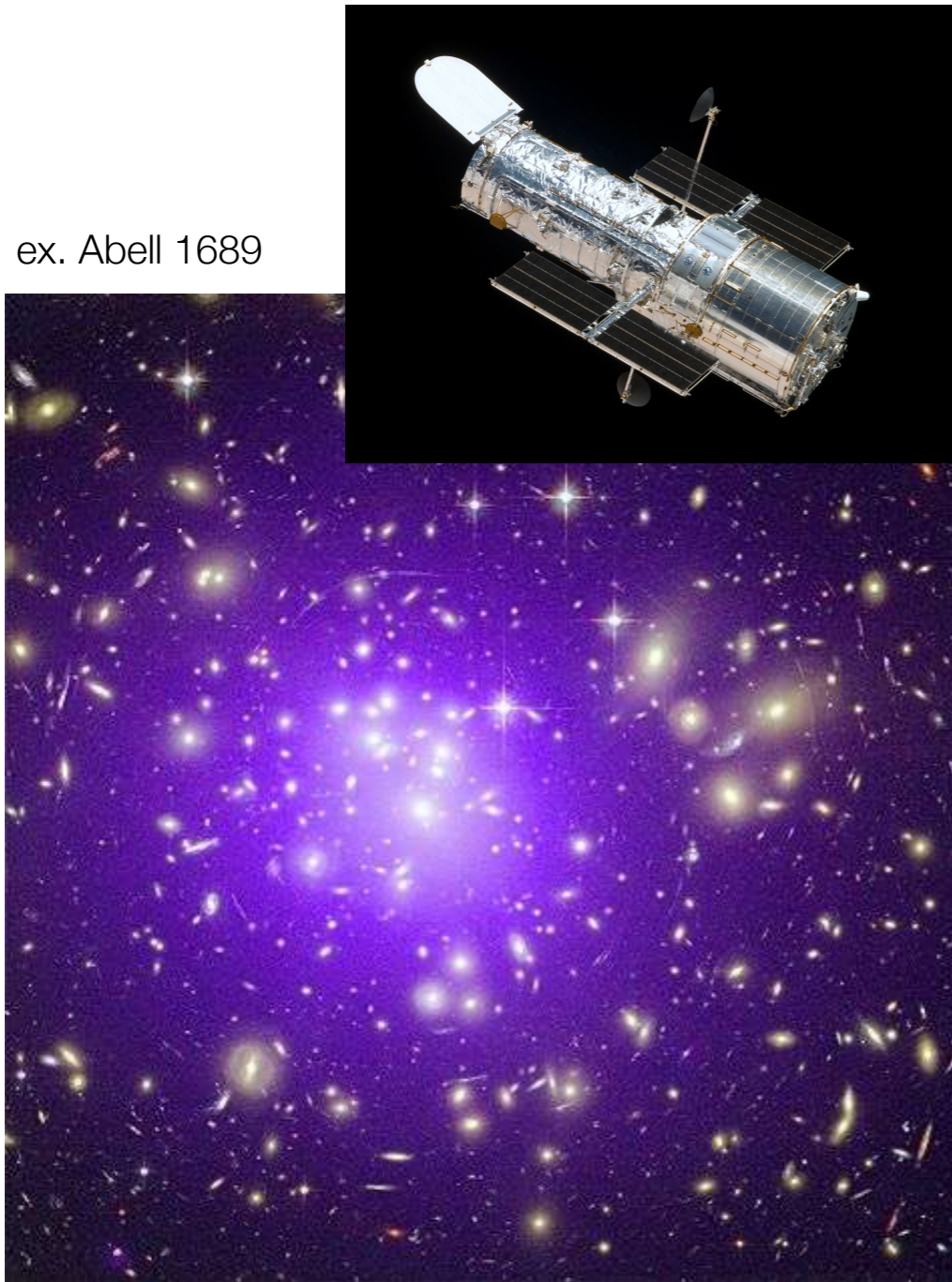


- ou bien introduire un halo sphérique de "matière noire"
- ou bien modifier la loi de Newton

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

a) La matière noire dans les amas de galaxies

ex. Abell 1689



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

=> Si hypothèse d'équilibre
$$\langle v^2 \rangle \sim \frac{GM}{R}$$

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

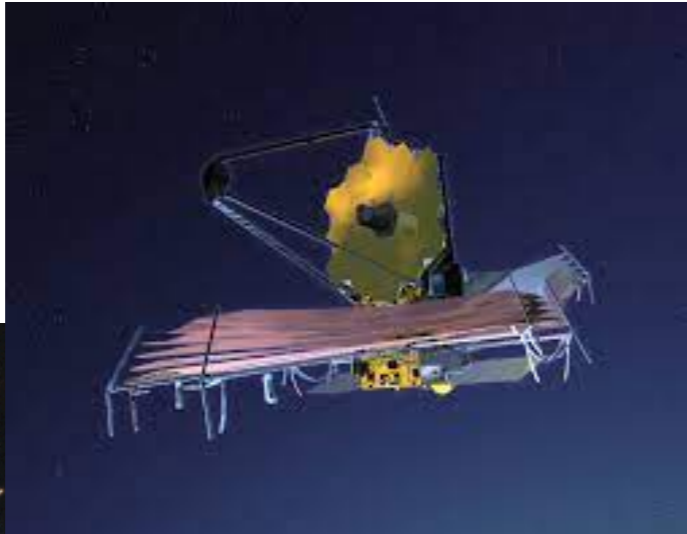
Autre mesure (meilleure !) : lentillage de galaxies en arrière-plan

Mesure masse du gaz : émission X

$$\mathbf{M_{gaz} \sim 10\% \times M_{totale}}$$

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

=> Si hypothèse d'équilibre
$$\langle v^2 \rangle \sim \frac{GM}{R}$$

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

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

Mesure masse du gaz : émission X

$$\mathbf{M_{gaz} \sim 10\% \times M_{totale}}$$

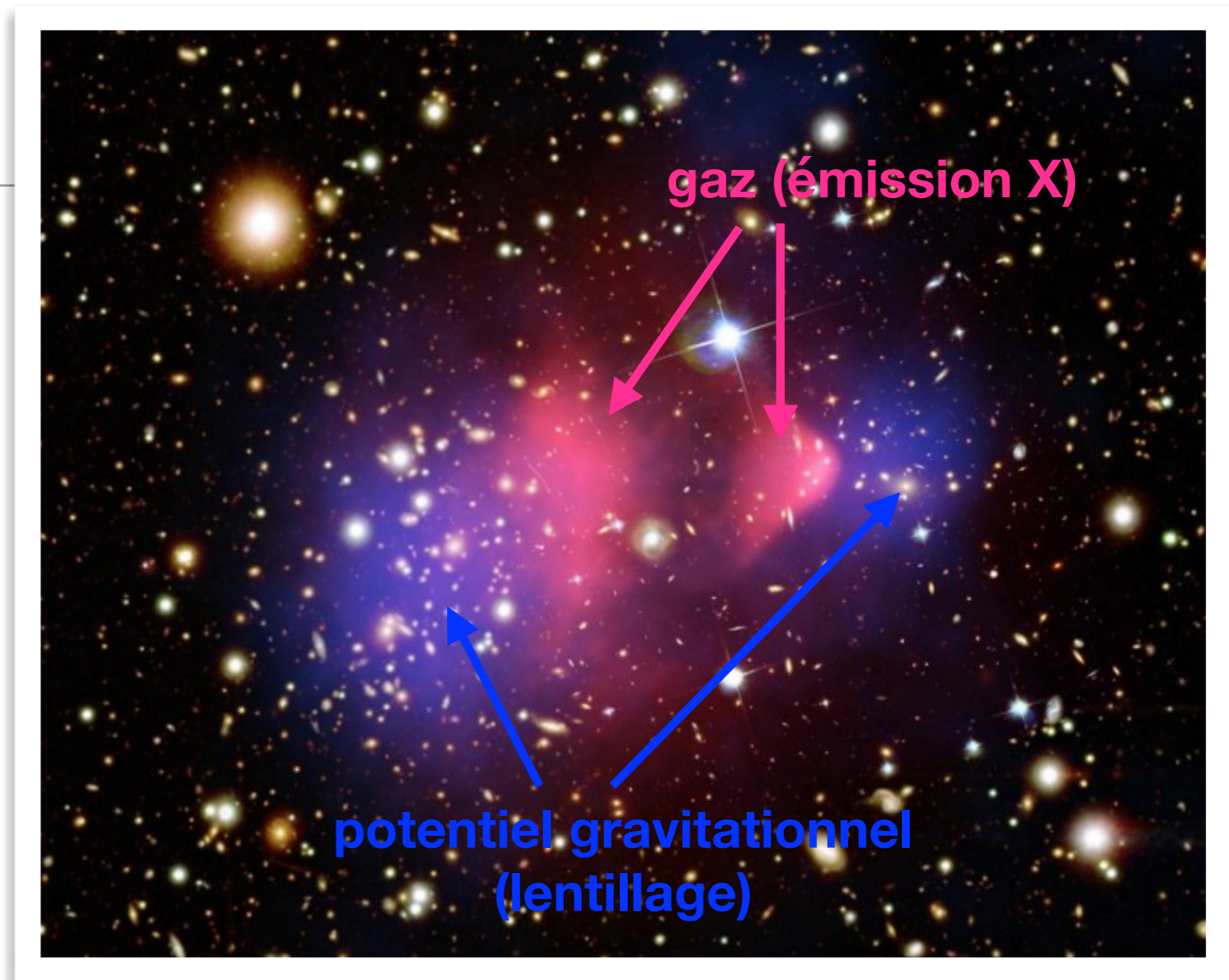
a) Le Bullet cluster

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

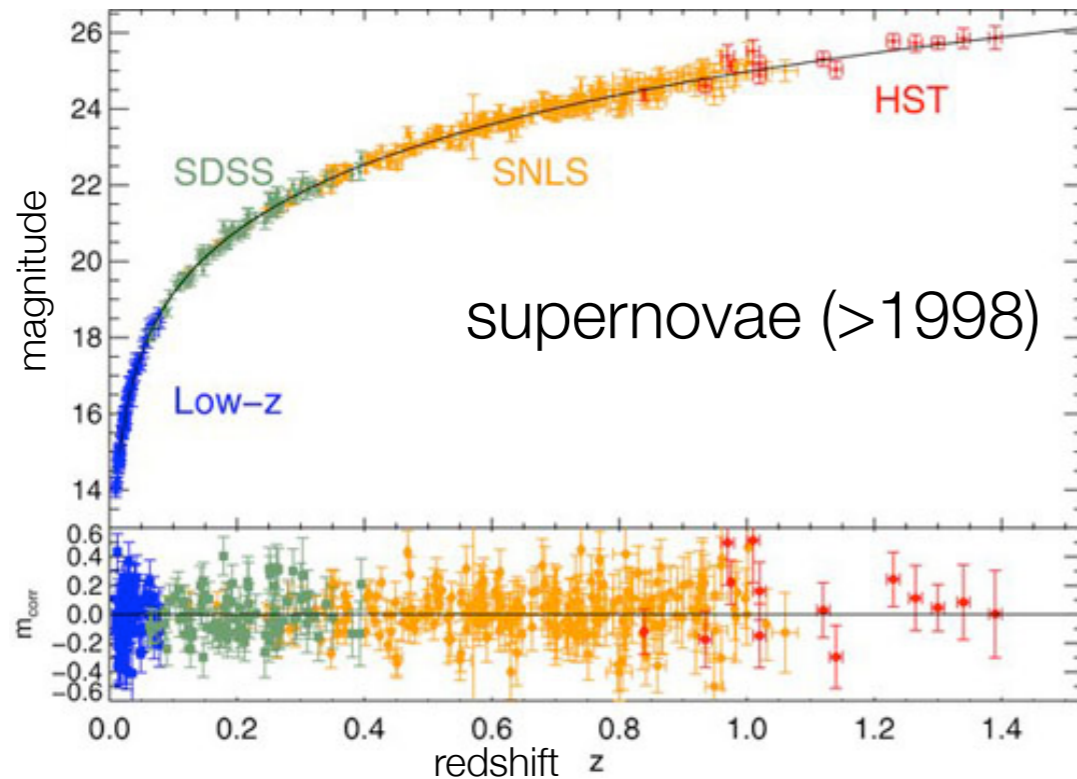
nb d'interactions = $\sigma \times R \times \text{densité} < 1$

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

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

b) Dynamique globale de l'Univers

Mesures de distances



Supernovae, CMB, BAO

Utilisent les équations de Friedmann

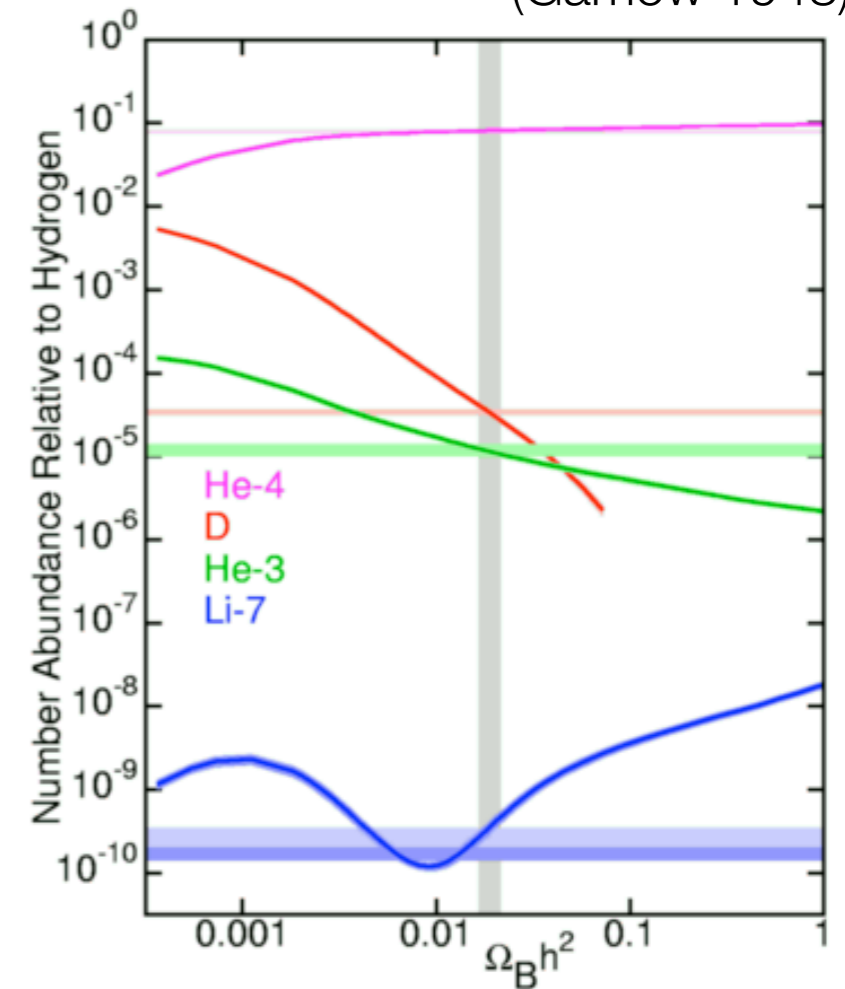
- L'Univers est plat
- Composantes : $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$

Λ : énergie noire

M: matière totale (fluide non-relativiste)

Nucléosynthèse primordiale

(Gamow 1948)

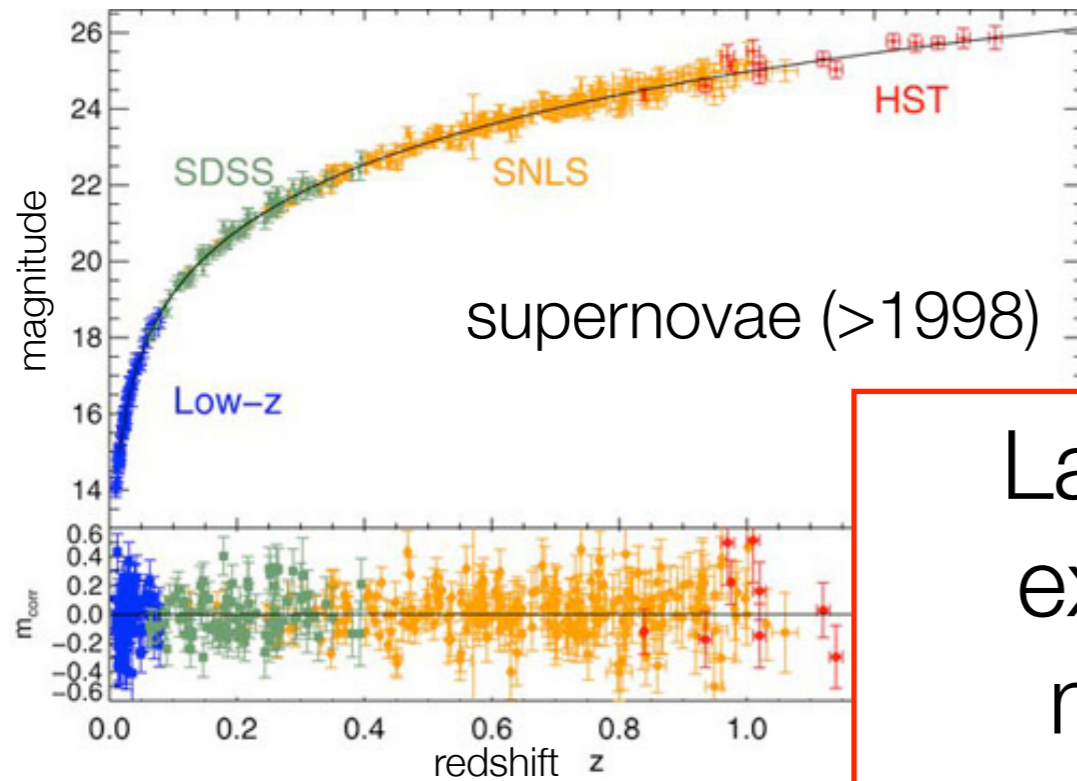


B: baryons = "matière ordinaire"
Prédictions dépendent de Ω_B

Observations : $\Omega_B = 0.04$

b) Dynamique globale de l'Univers

Mesures de distances



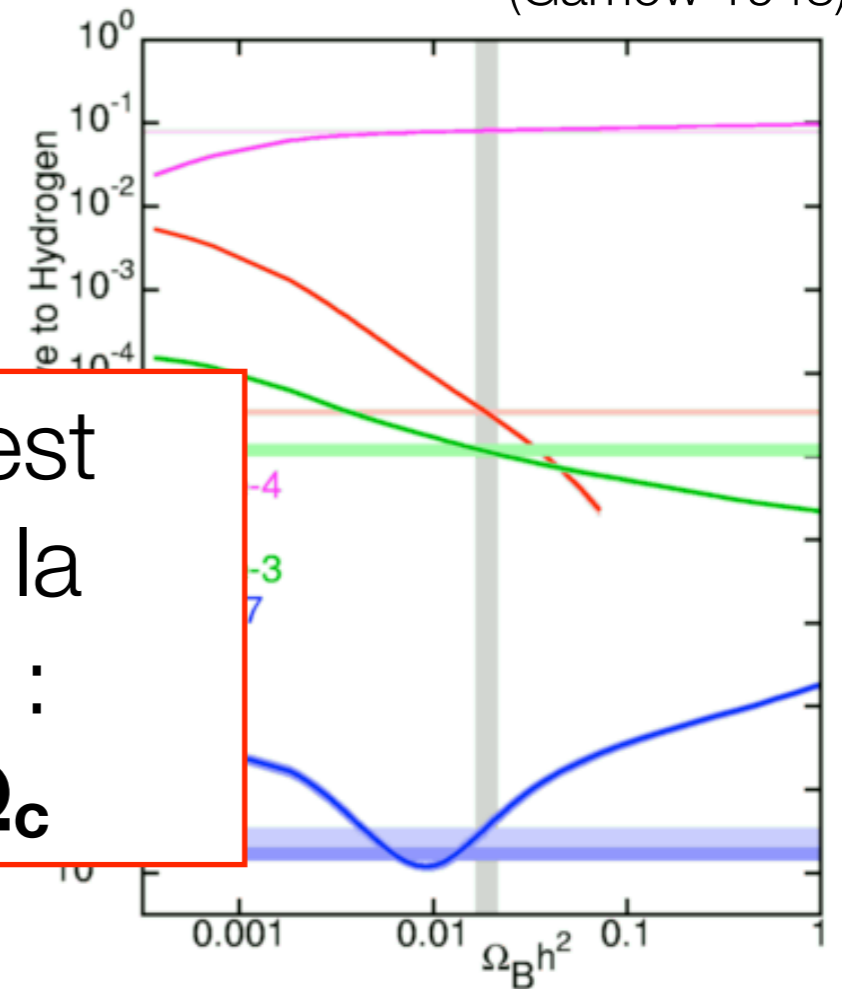
Supernovae, CMB, BAO
Utilisent les équations de Friedmann

- 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

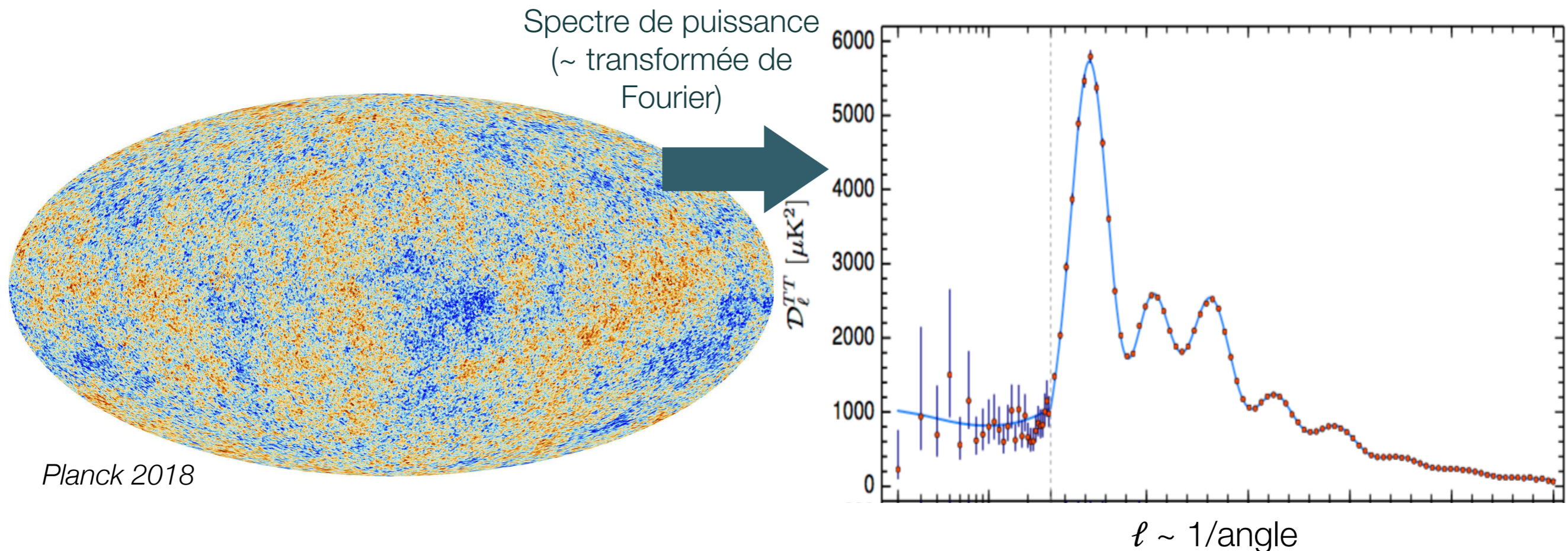
Observations : $\Omega_B = 0.04$

c) 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)

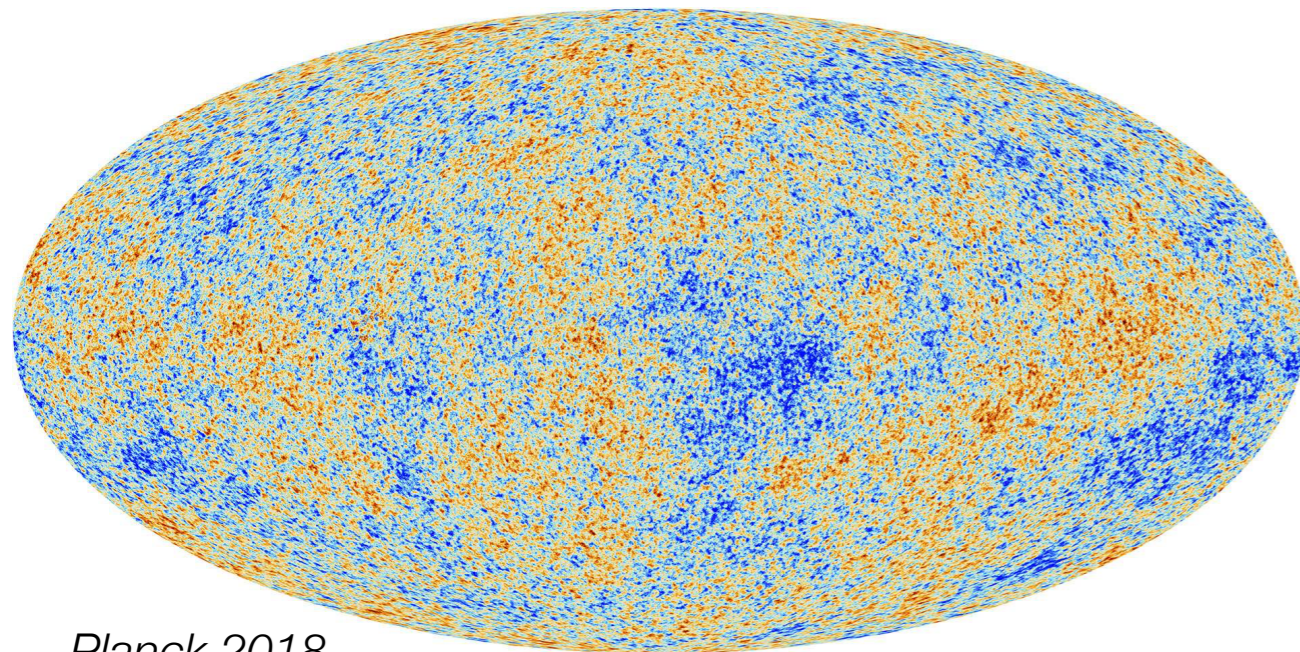
**"oscillations": gravitation (matière noire surtout) vs pression (photons)
visible dans les fluctuations de température du CMB @ échelle ~ degré**



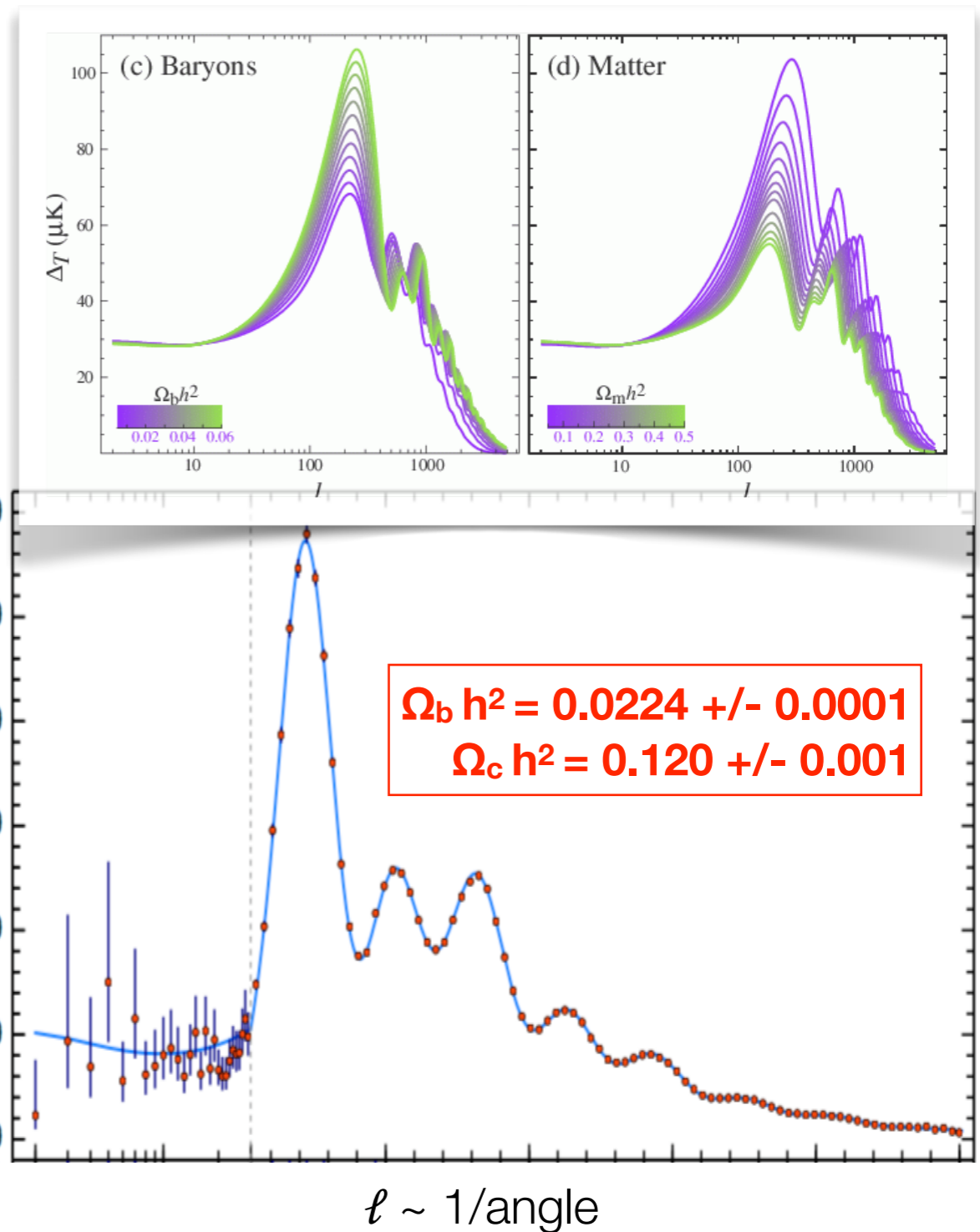
c) Les BAO (oscillations acoustiques de baryons)

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

Mesure précise des densités de masse de matière noire et matière ordinaire



Planck 2018



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 $\sim 10\text{-}50$ 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 !

$$m_{DM} \gtrsim 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

Quelle est la masse de la matière noire ?

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

- "Petites" galaxies (kpc)
- Beaucoup de matière noire (vitesses $\sim 10-50$ 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 $\Delta x \cdot \Delta p \sim h$:

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

La densité en masse est \sim connue, la densité en nombre est contrainte \rightarrow **$m_{\text{DM}} \gtrsim 0.5 - 1 \text{ keV}/c^2$** si fermion



Quelle est la masse de la matière noire ?

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

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

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

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



Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)				
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
	charge	2/3	2/3	2/3	0	0
	spin	1/2	1/2	1/2	1	0
		u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		-1/3	-1/3	-1/3	0	
		1/2	1/2	1/2	1	
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		1/2	1/2	1/2	1	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	±1	
		1/2	1/2	1/2	1	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

Matière noire :

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

→ **Neutrinos ? (années 80)**

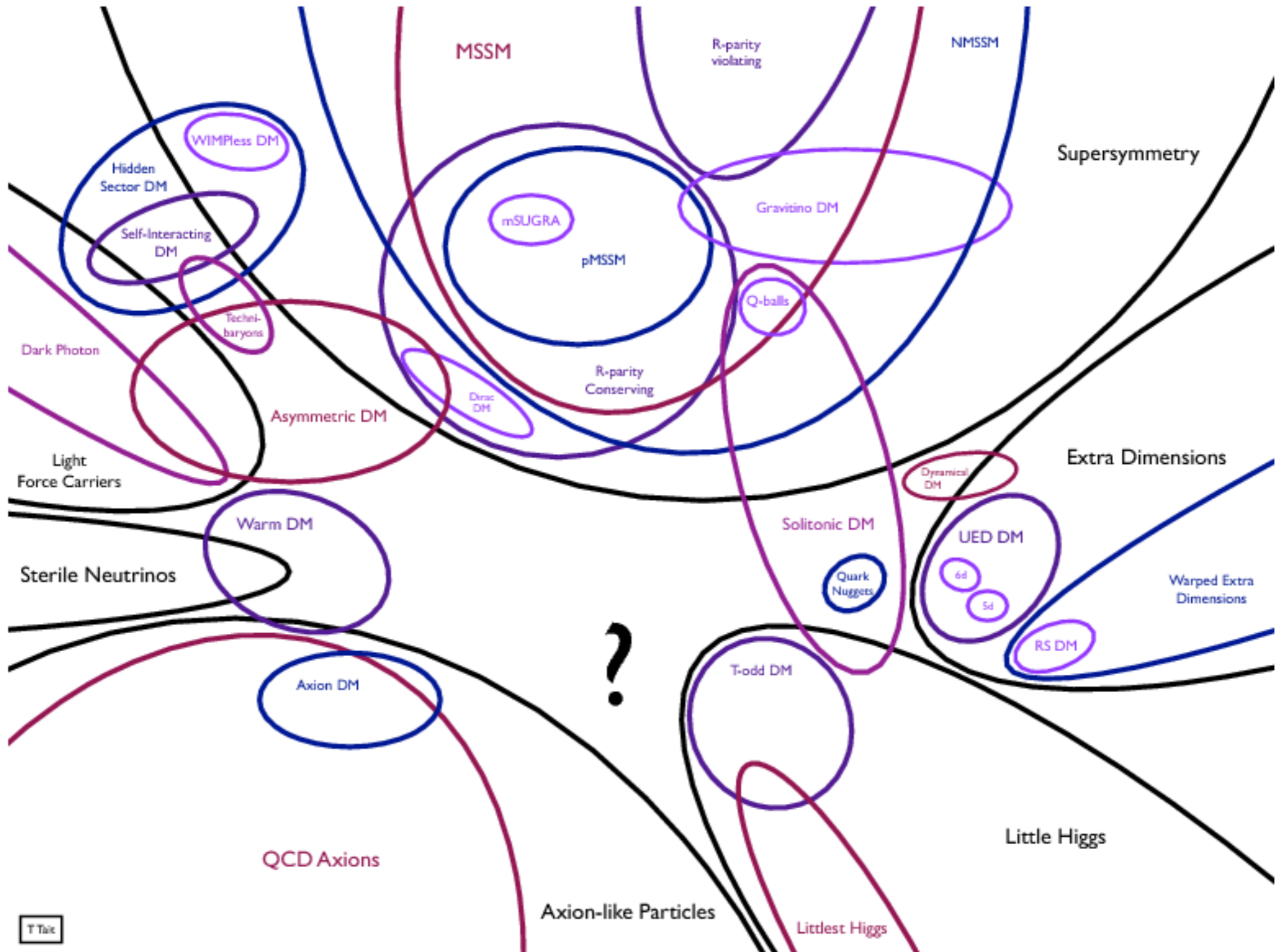
Non: trop légers ⇒ relique

"chaude" (relativiste dans l'Univers primordial)

La nature microphysique de la matière noire est complètement inconnue, en 2024.

eV: mass unit

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



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

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

Le modèle des WIMPs

Weakly Interacting Massive Particle

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

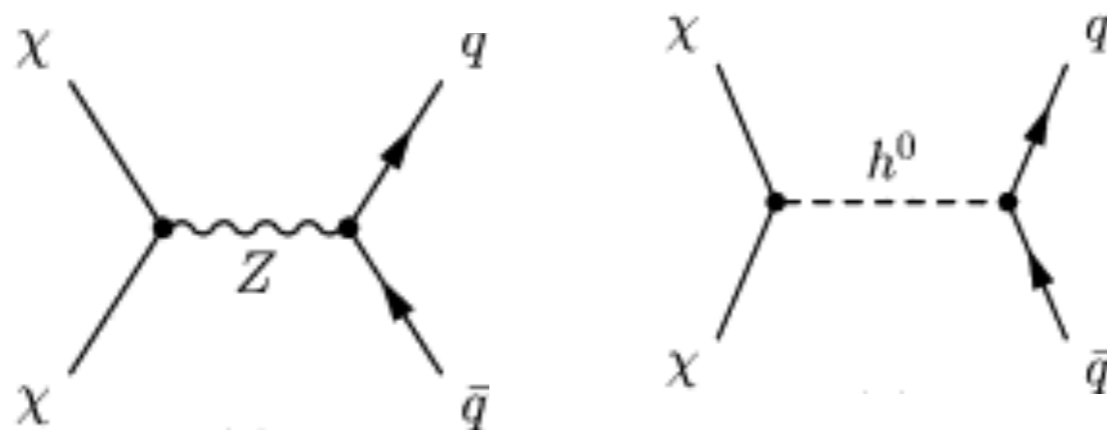
Suppose une "nouvelle physique" à l'échelle de l'interaction électrofaible :

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" :



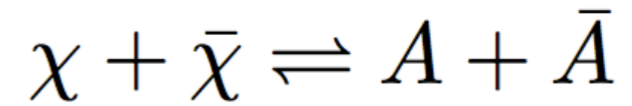
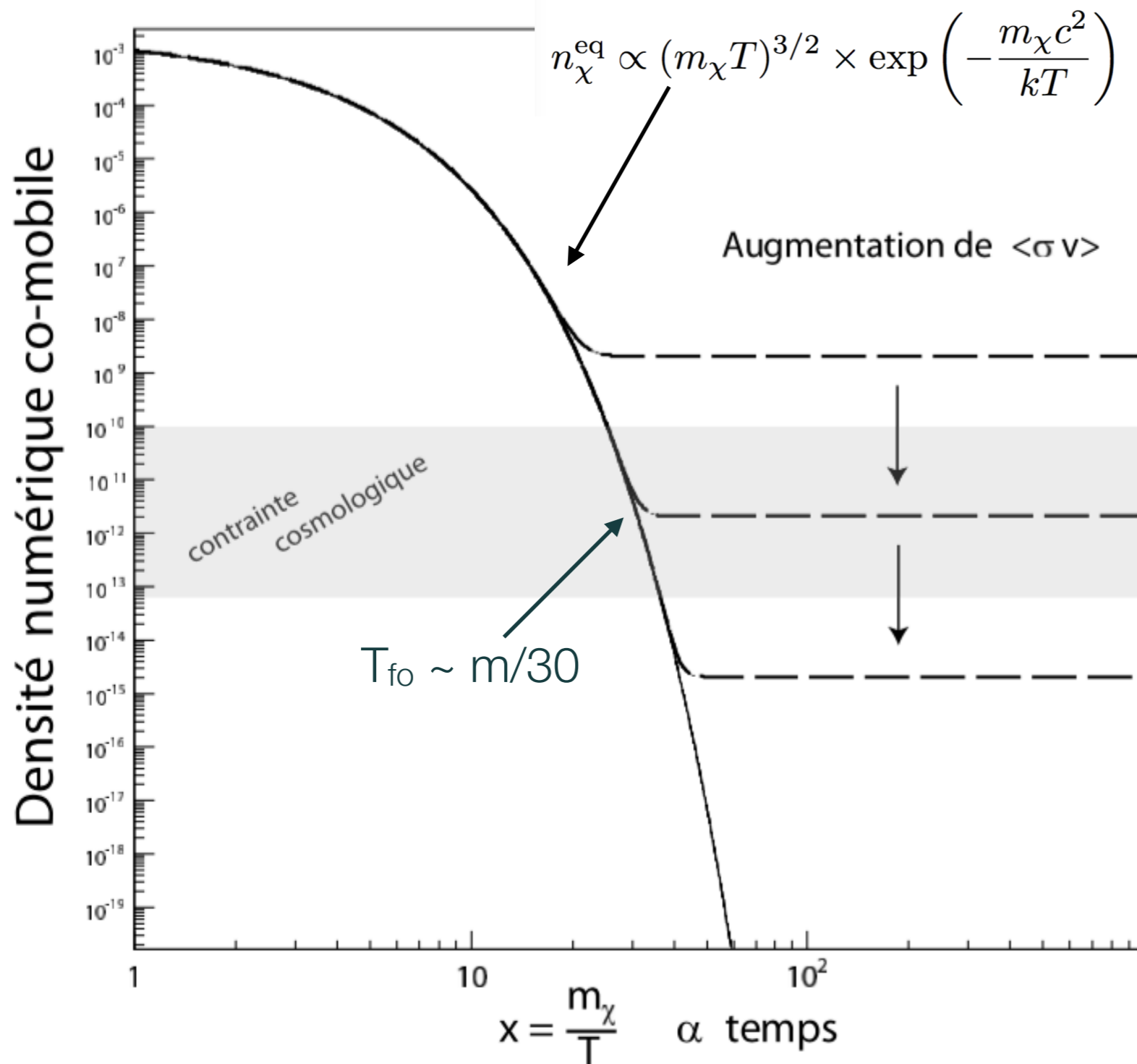
*exemple processus d'annihilation
 $q = \text{un quark}$*

Calcul densité relique WIMP du plasma primordial :

→ **Correspond grossièrement à la densité mesurée**
("miracle WIMP")

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

Le miracle WIMP - plus en détails..



Initialement à l'équilibre thermique

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

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

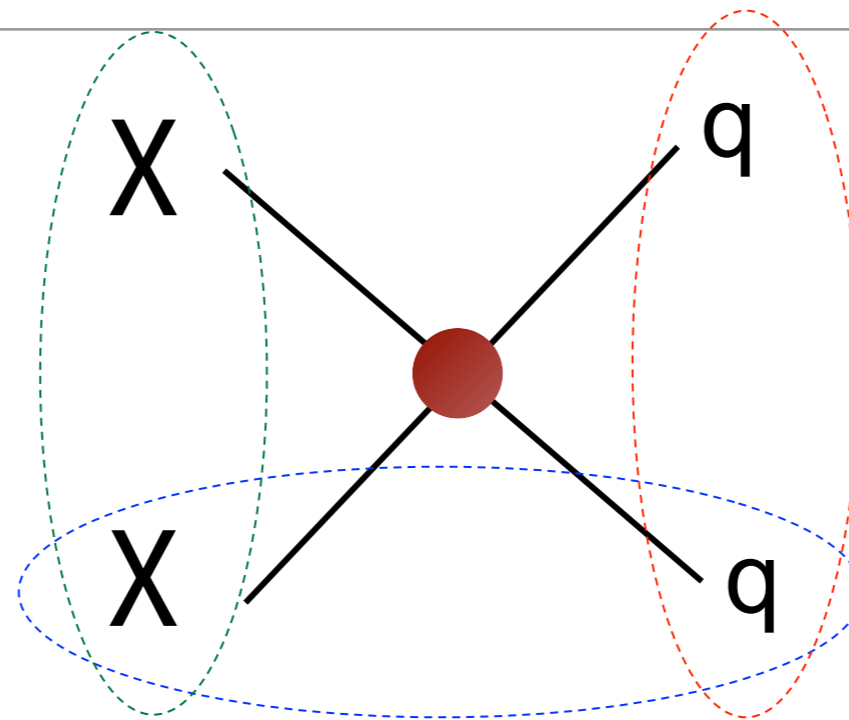
$H \sim T^2$ (Friedmann)

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

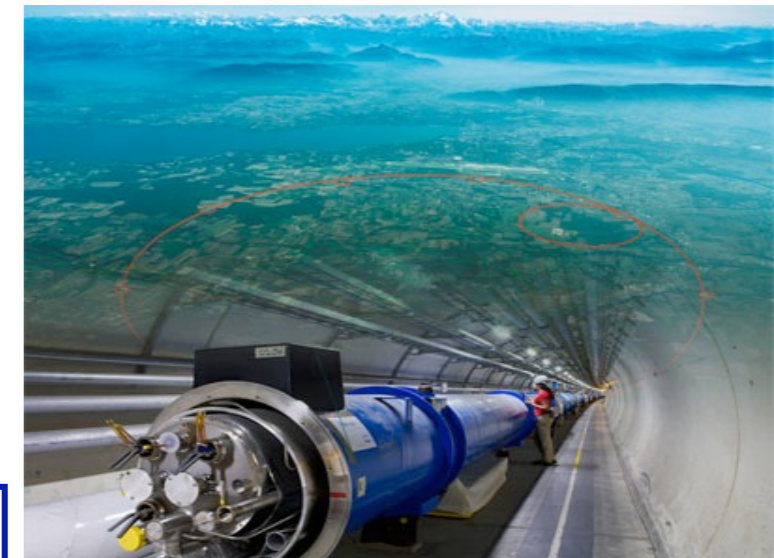
$$\Omega_{\chi} h^2 = \frac{3 \times 10^{-27} \text{ cm}^3/\text{s}}{\langle \sigma v \rangle}$$

Le scénario WIMP est testable

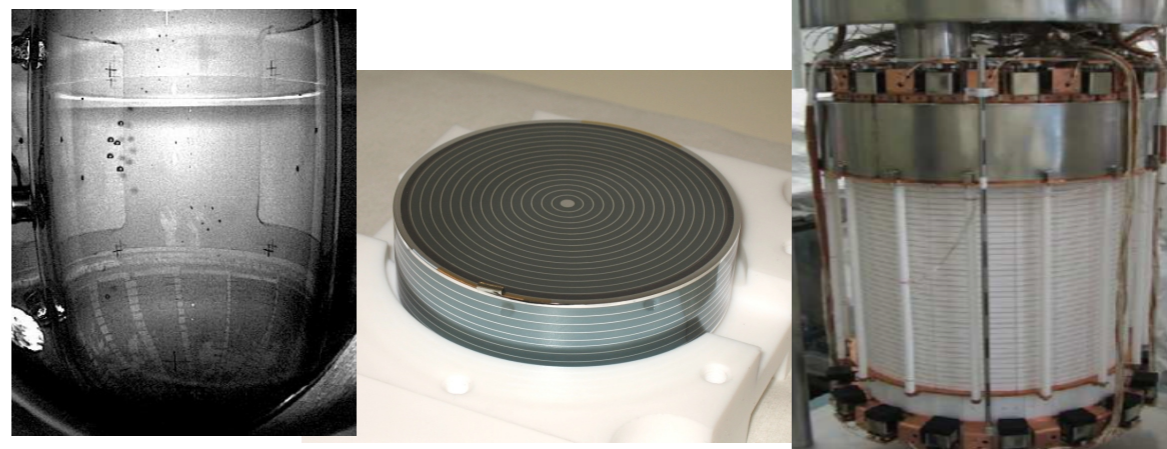
Détection indirecte



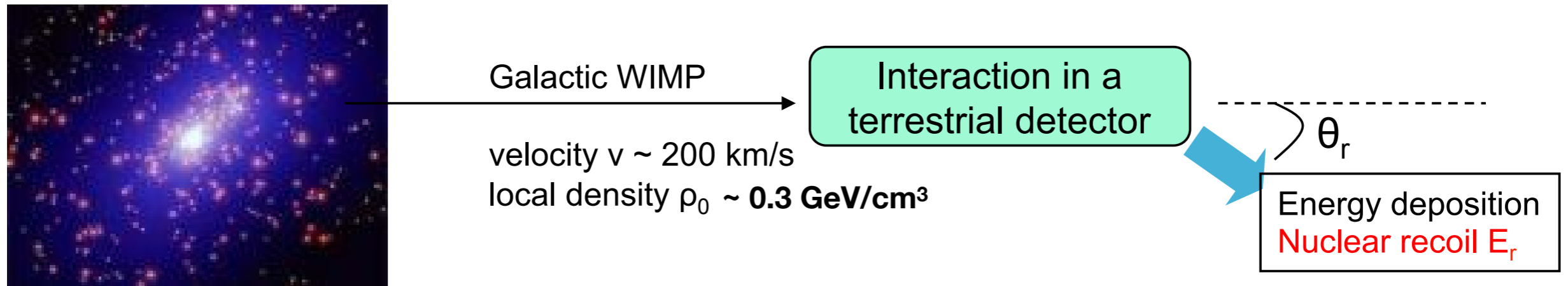
Collisionneurs



Détection directe



Détection directe des WIMPs



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

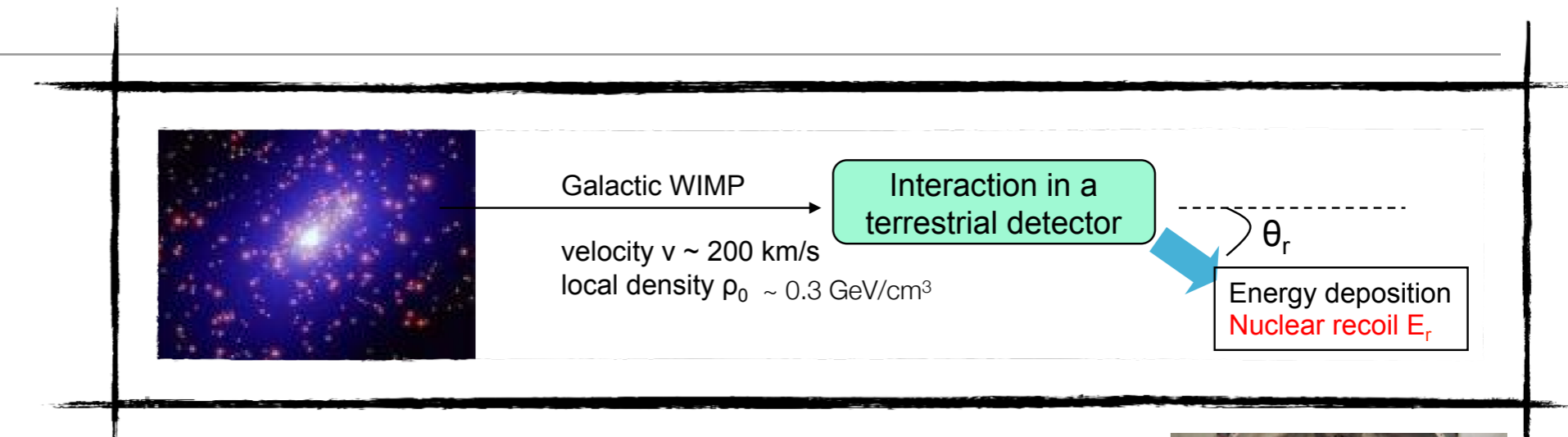
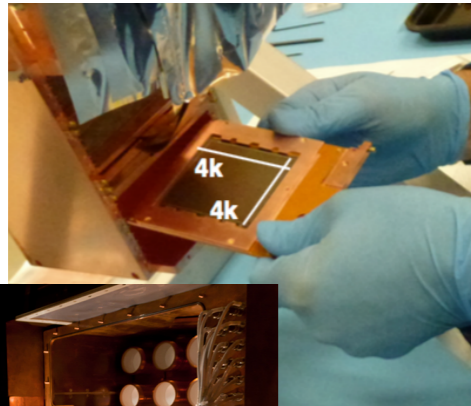
$$\text{Taux (/kg/s)} \sim \frac{1}{m_N} \frac{\rho_{\text{local}}}{m_\chi} \sigma v \quad \sim 1 \text{ interaction / tonne / jour}$$

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

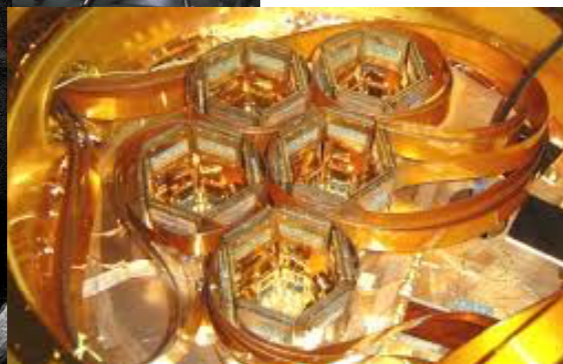
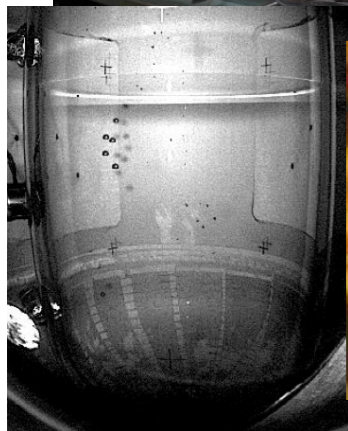
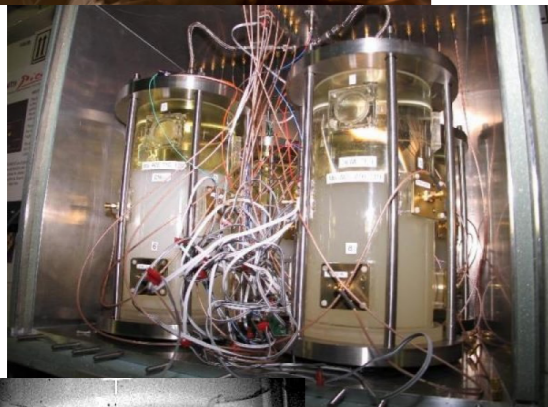
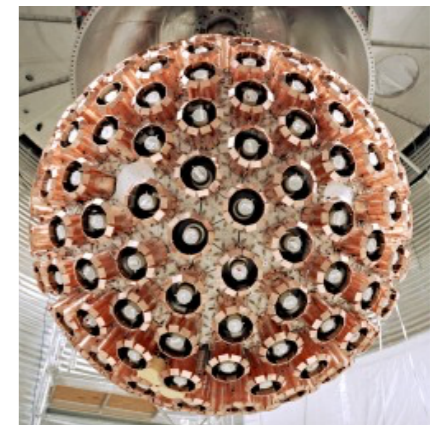
=> Détecteurs spécifiques :

- 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 !



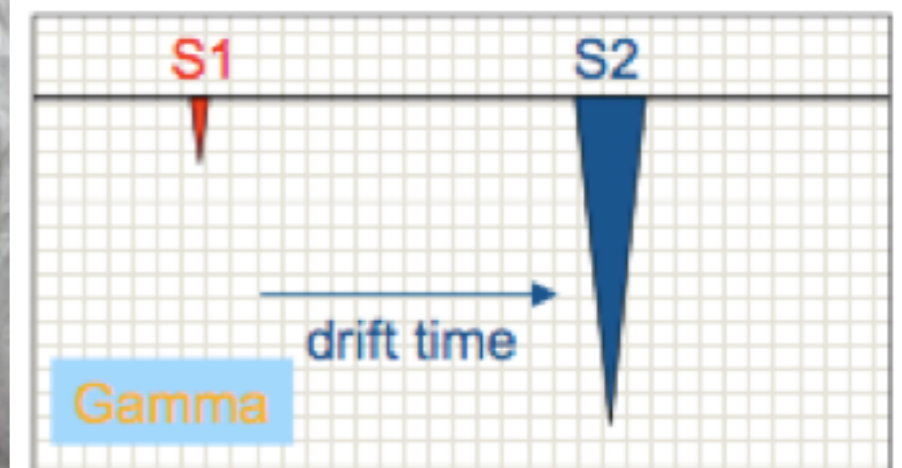
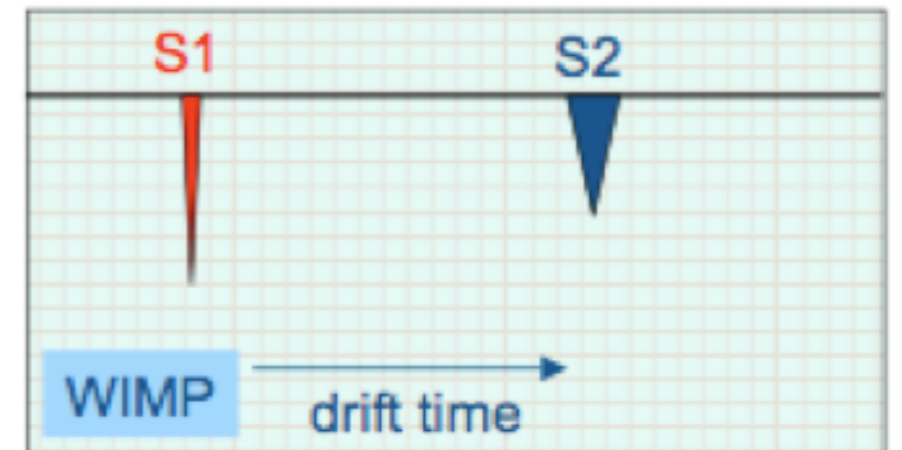
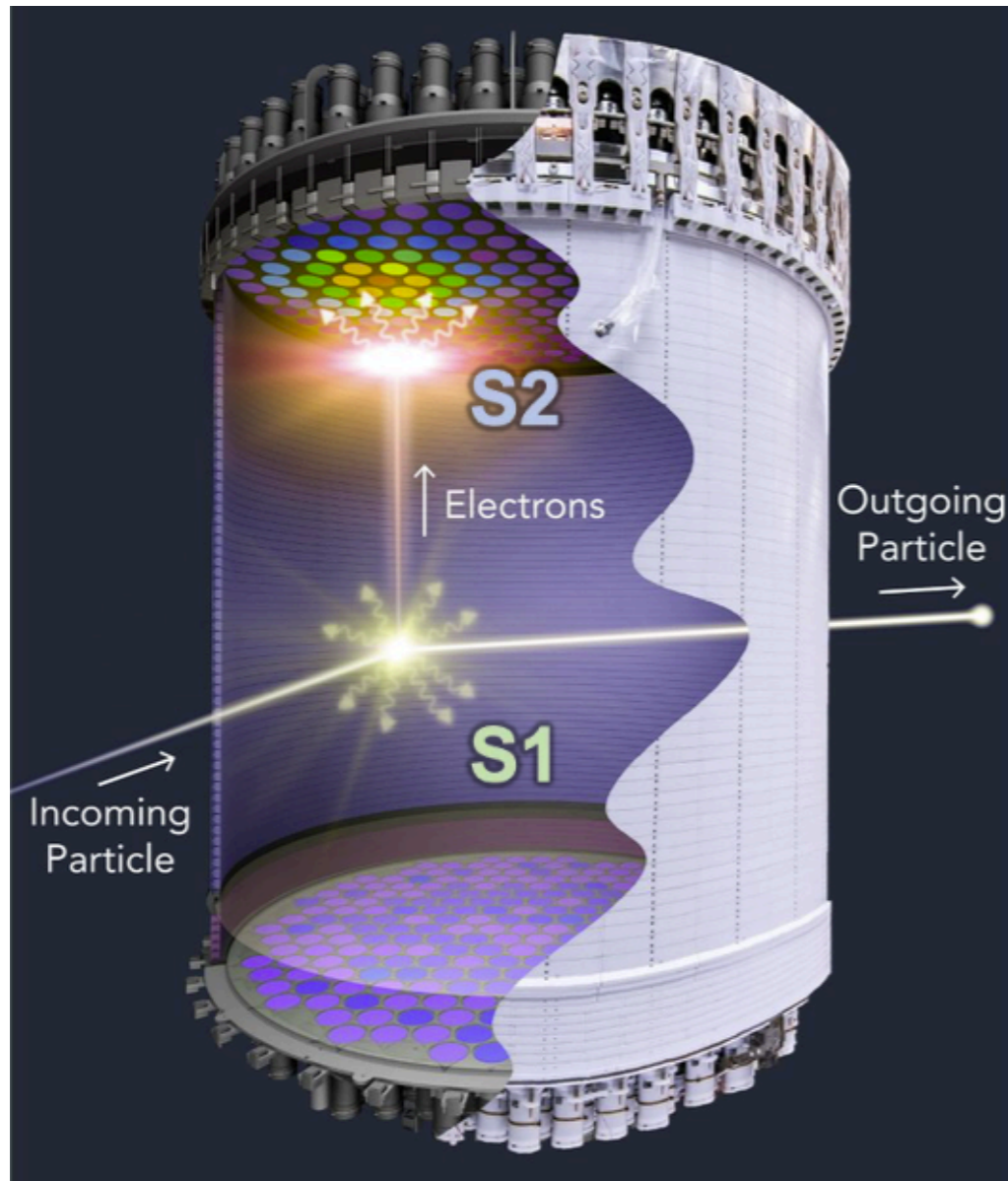
Détecteurs de WIMPs Xénon double phase

Xénon liquide à 165 K

PMT = photomultiplicateur (détecteur UV ultra-sensible)

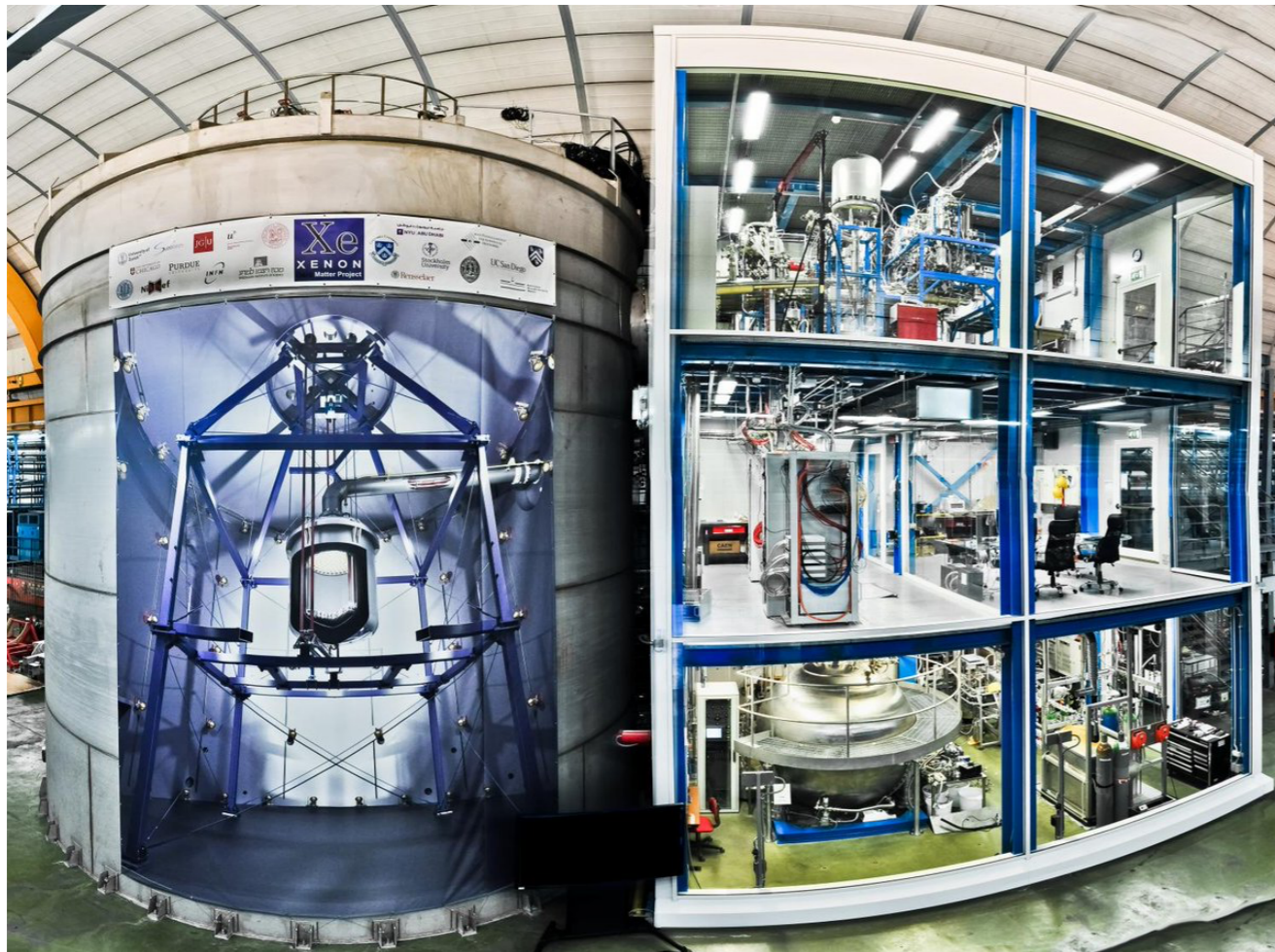
« S1 » : lumière directe, scintillation

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

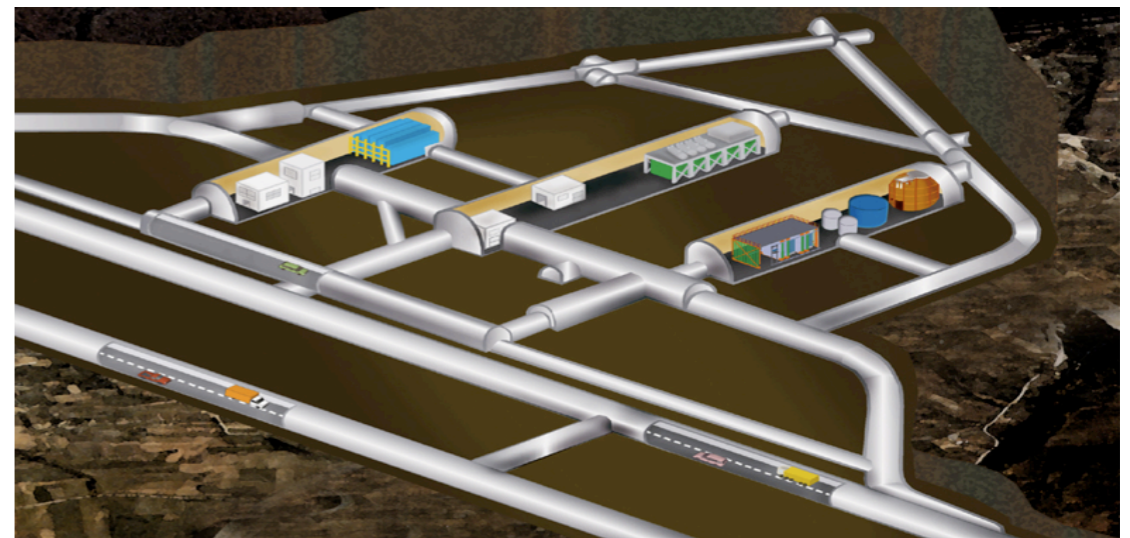


$$(S2/S1)_{wimp} \ll (S2/S1)_{gamma}$$

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
2014-2018	expérience XENON1t
2020	construction de l'upgrade XENONnT
2023	premiers résultats XENONnT



Exemple de résultats : XENONnt, 2023

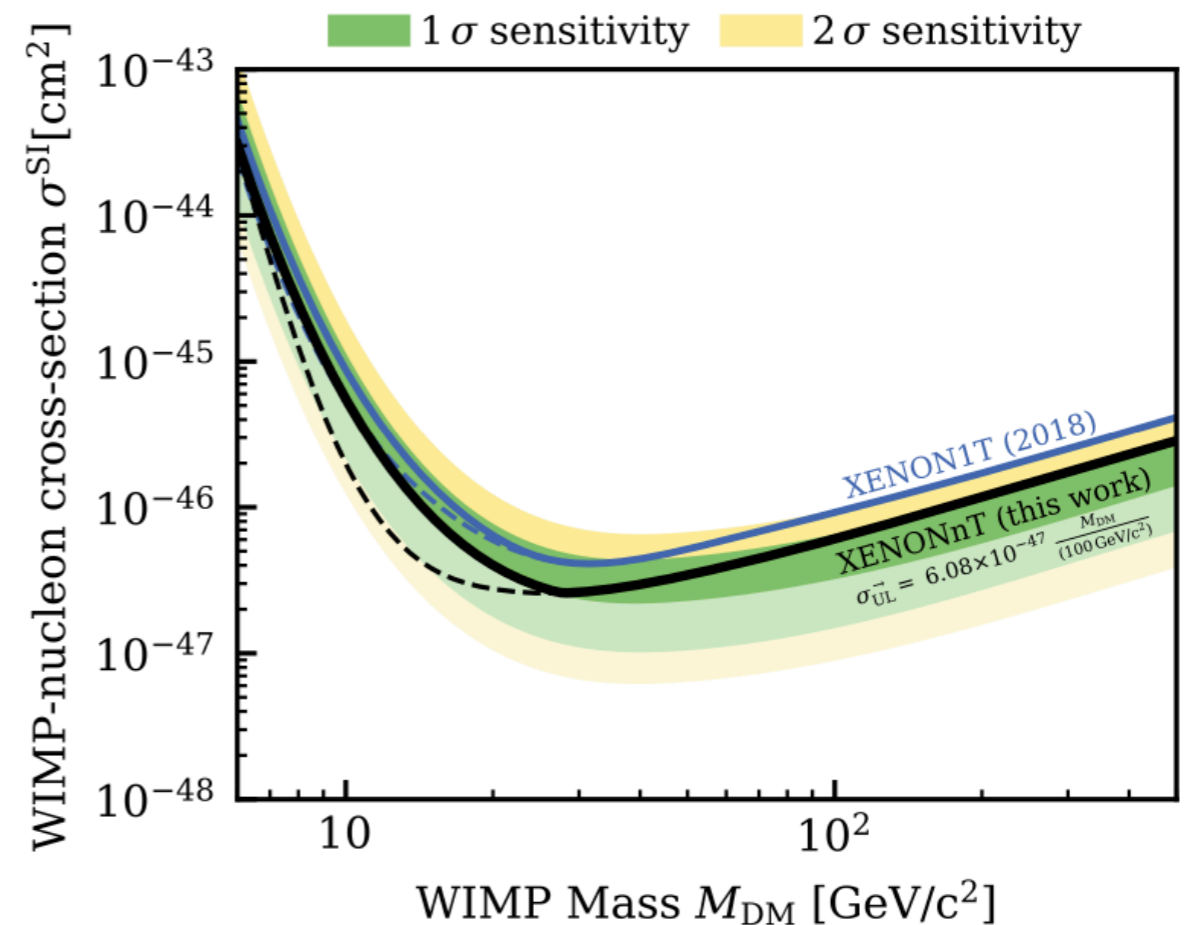
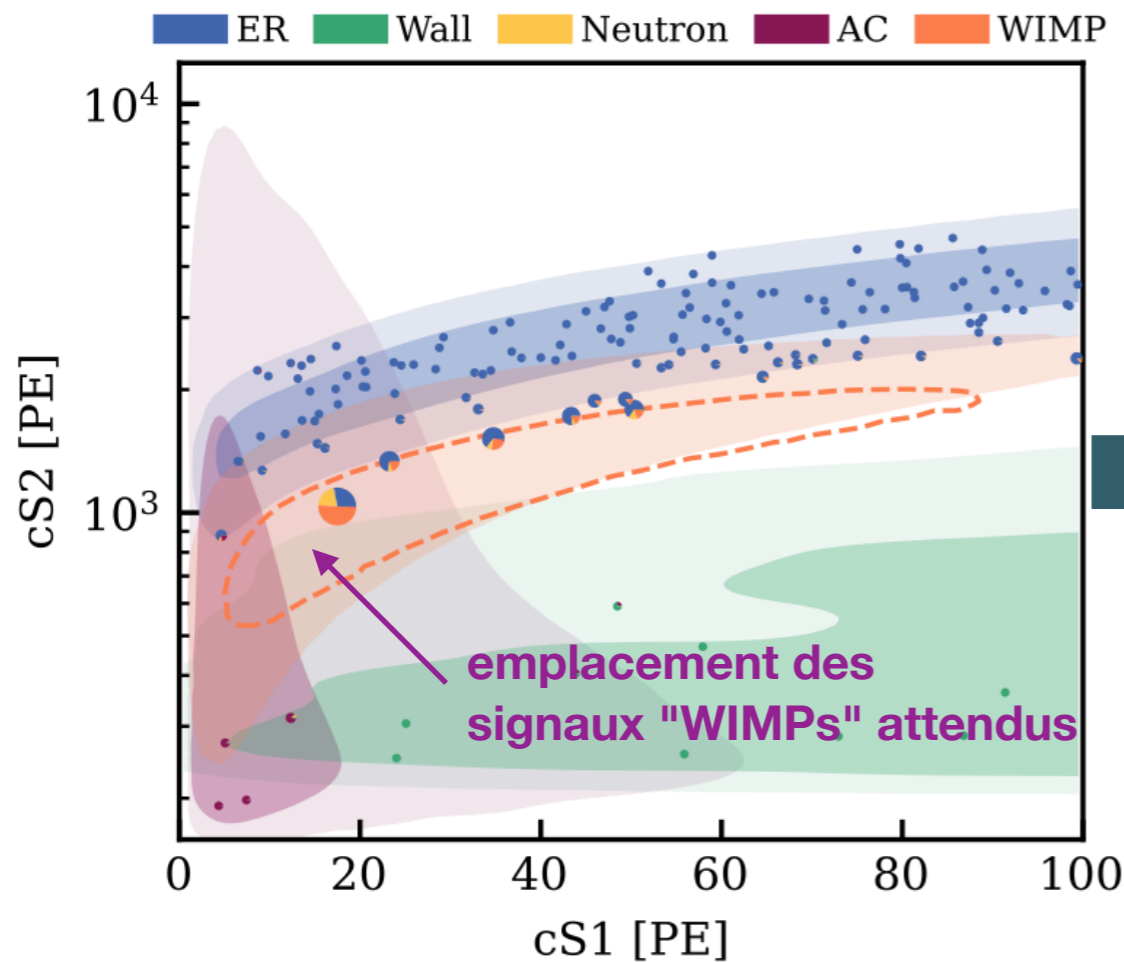
3 mois de prise de données

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)



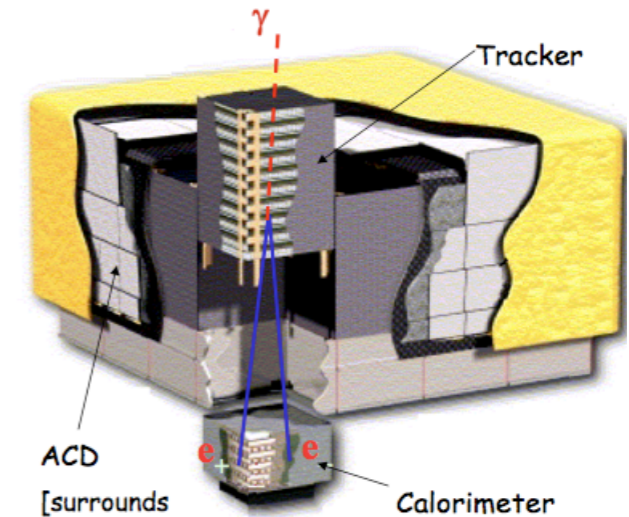
Détection indirecte des WIMPs



régions denses en DM :

$$\chi \chi \rightarrow \underbrace{\gamma, p, e \dots}$$

particules de haute énergie,
détectables :



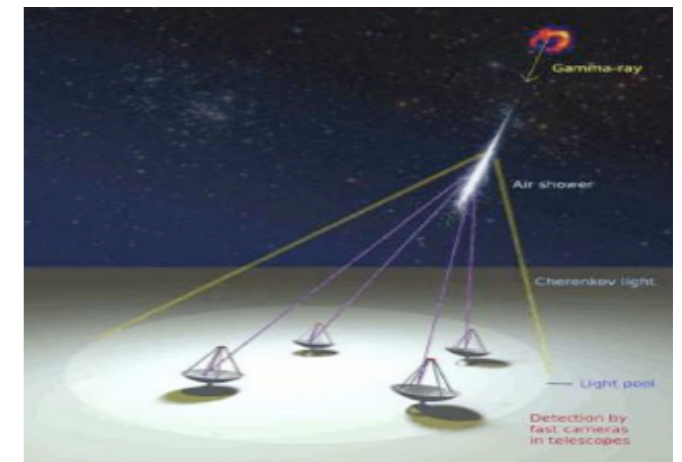
satellite
Fermi

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

section efficace
d'annihilation

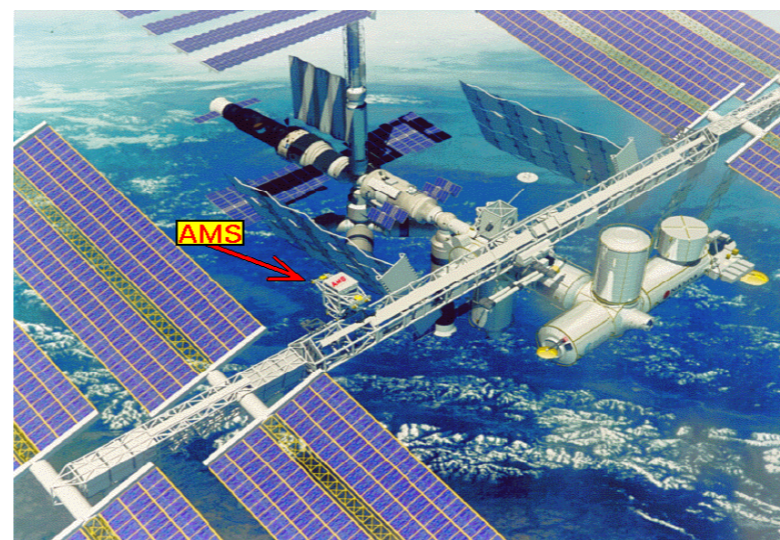
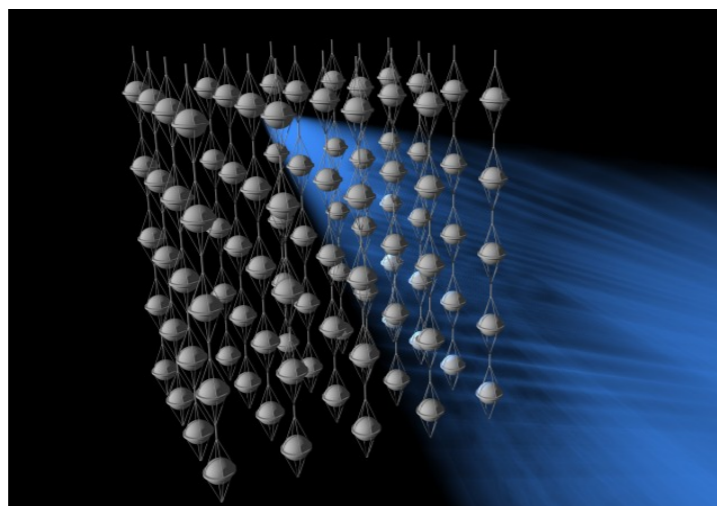
physique des
particules

astrophysique



HESS / CTA
(rayons gamma)

KM3Net /
IceCube
(neutrinos)

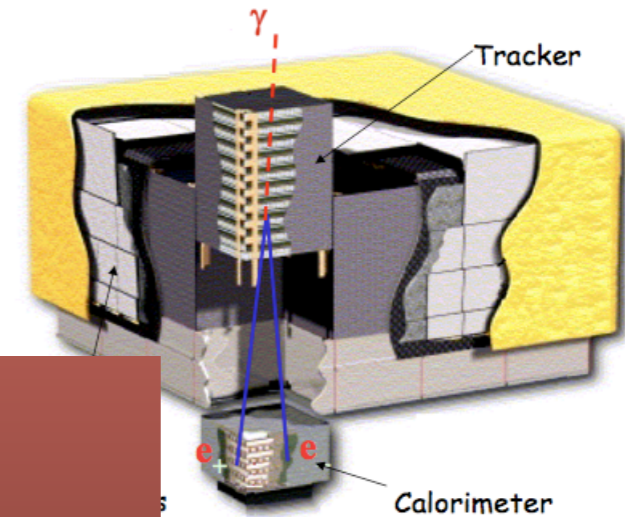


AMS
(rayons cosmiques)

Détection indirecte des WIMPs



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

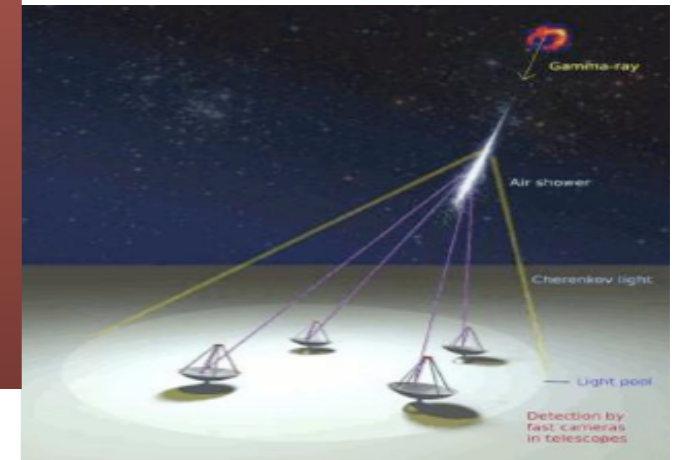


satellite
Fermi

flux prédit : $\Phi_i(\psi, E) =$

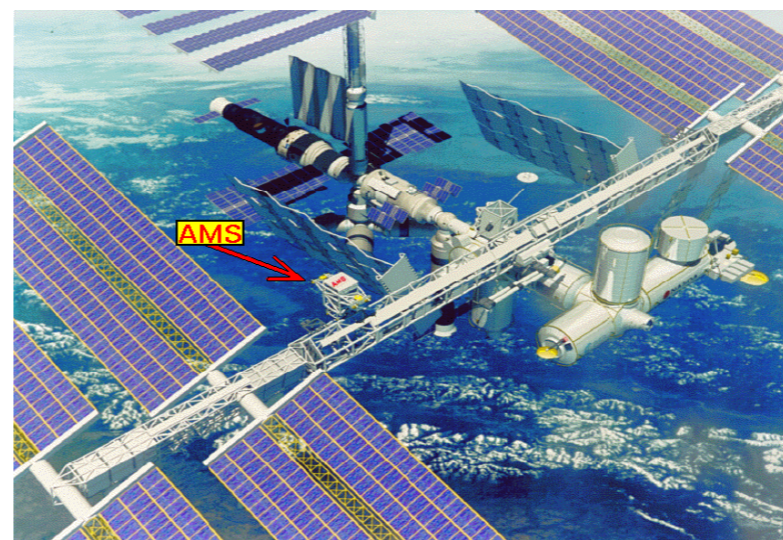
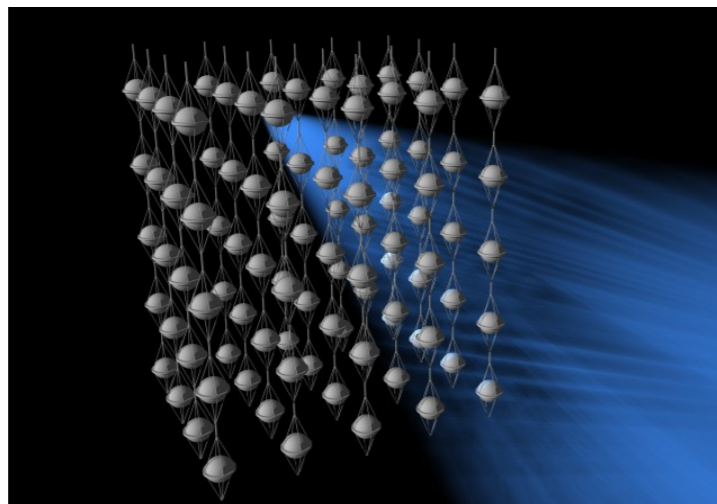
section efficace
d'annihilation

Instrumentes des astroparticules



HESS / CTA
(rayons gamma)

Antares /
IceCube
(neutrinos)



AMS
(rayons cosmiques)

Détection indirecte des WIMPs : un exemple

- Satellite Fermi :

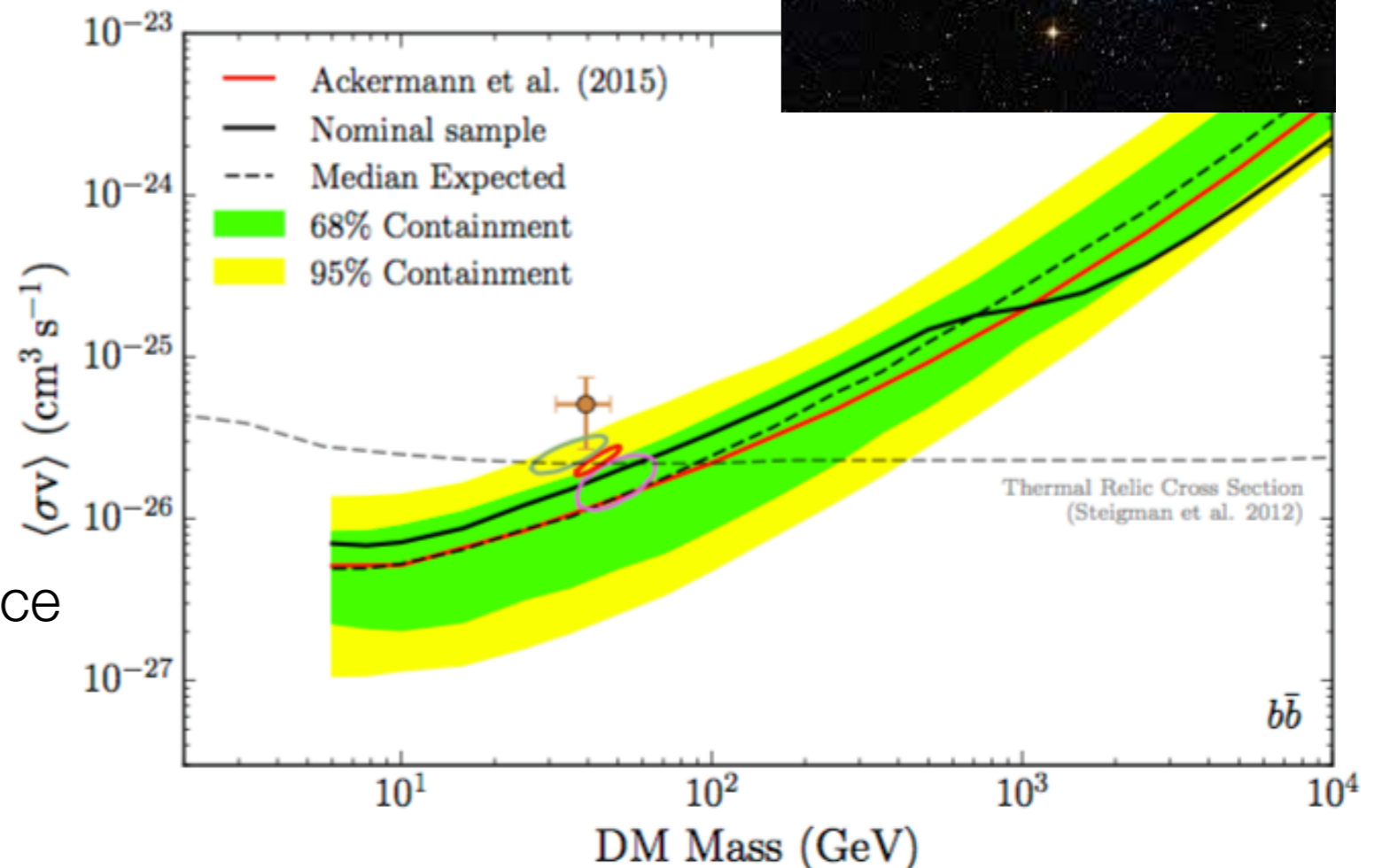
pas de flux de photons au GeV observé : $\Phi \approx 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

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

« 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}

$50 M_{\odot}$

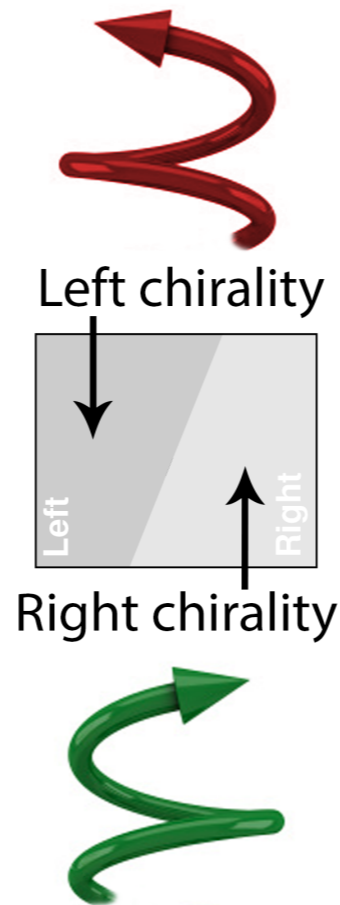
**QCD
axions**

Asymmetric DM
Self-interacting DM

WIMPzillas

Neutrinos stériles

	<p>2.4 MeV</p> <p>$\frac{2}{3}$</p> <p>u</p> <p>up</p> <p>Left Right</p>	<p>1.27 GeV</p> <p>$\frac{2}{3}$</p> <p>c</p> <p>charm</p> <p>Left Right</p>	<p>171.2 GeV</p> <p>$\frac{2}{3}$</p> <p>t</p> <p>top</p> <p>Left Right</p>
Quarks	<p>4.8 MeV</p> <p>$-\frac{1}{3}$</p> <p>d</p> <p>down</p> <p>Left Right</p>	<p>104 MeV</p> <p>$-\frac{1}{3}$</p> <p>s</p> <p>strange</p> <p>Left Right</p>	<p>4.2 GeV</p> <p>$-\frac{1}{3}$</p> <p>b</p> <p>bottom</p> <p>Left Right</p>
	<p><0.0001 eV</p> <p>0</p> <p>ν_e</p> <p>electron neutrino</p> <p>Left Right</p>	<p>~keV</p> <p>N_1</p> <p>sterile neutrino</p>	<p>~0.01 eV</p> <p>0</p> <p>ν_μ</p> <p>muon neutrino</p> <p>Left Right</p>
		<p>~GeV</p> <p>N_2</p> <p>sterile neutrino</p>	<p>~0.04 eV</p> <p>0</p> <p>ν_τ</p> <p>tau neutrino</p> <p>Left Right</p>
		<p>~GeV</p> <p>N_3</p> <p>sterile neutrino</p>	
Leptons	<p>0.511 MeV</p> <p>-1</p> <p>e</p> <p>electron</p> <p>Left Right</p>	<p>105.7 MeV</p> <p>-1</p> <p>μ</p> <p>muon</p> <p>Left Right</p>	<p>1.777 GeV</p> <p>-1</p> <p>τ</p> <p>tau</p> <p>Left Right</p>

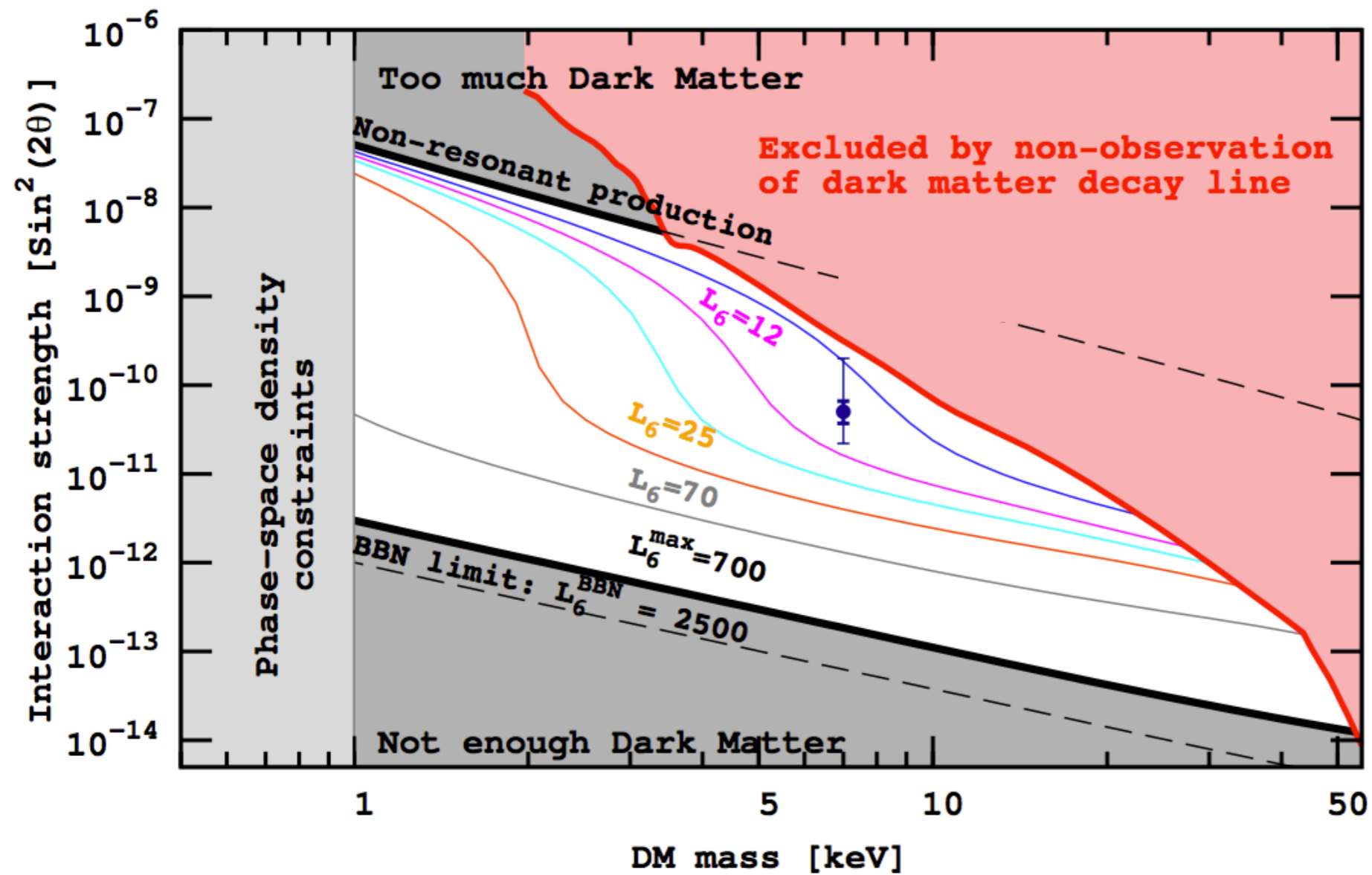


Contrepartie hypothétique "droite" des neutrinos du modèle standard ("gauches", actifs)

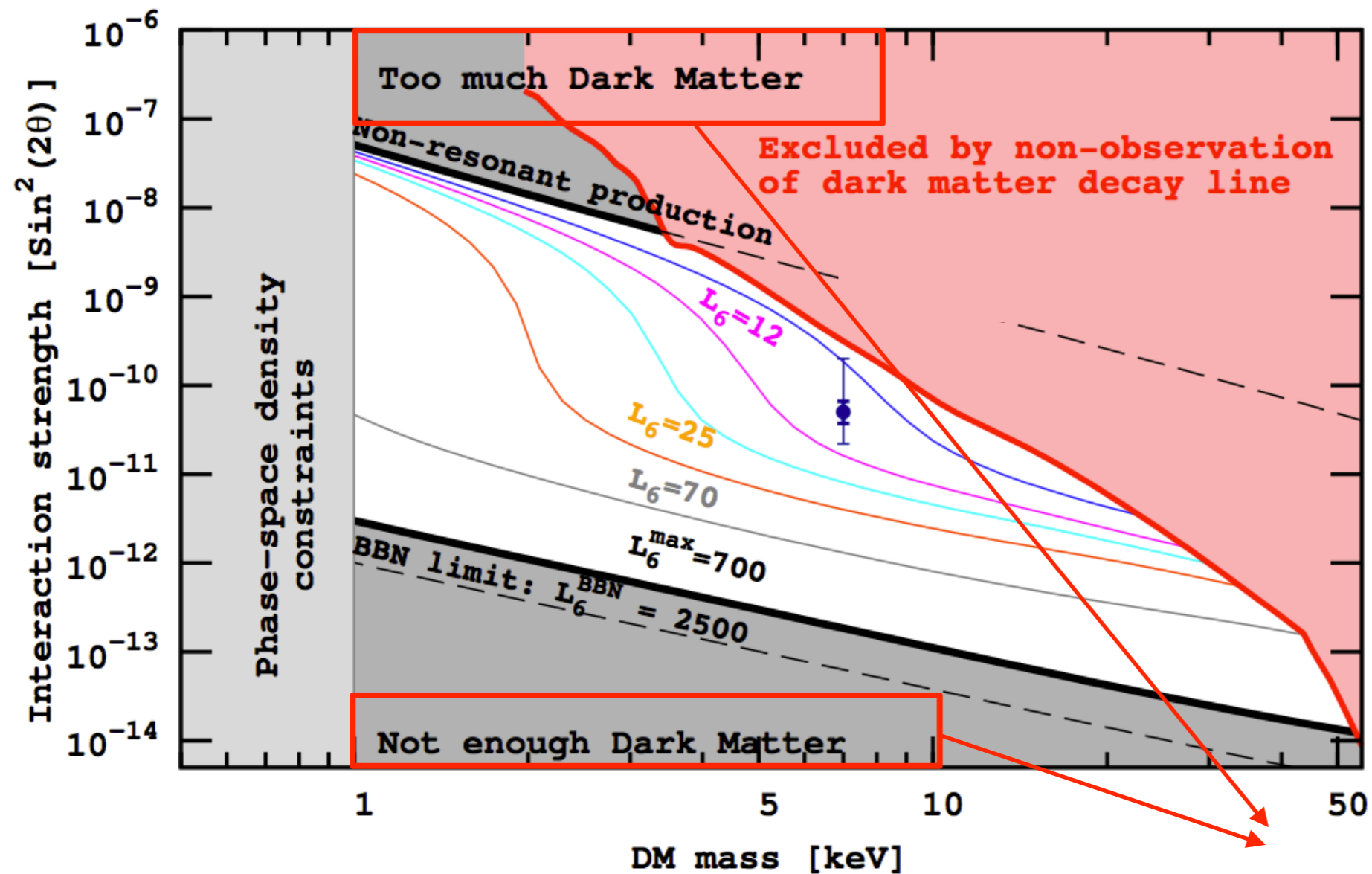
- Pas de couplage direct aux bosons de jauge du modèle standard ("stériles")
- "Mélange" (quantique) avec les neutrinos actifs : paramétré par un "angle de mélange" θ
- Masses inconnues

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

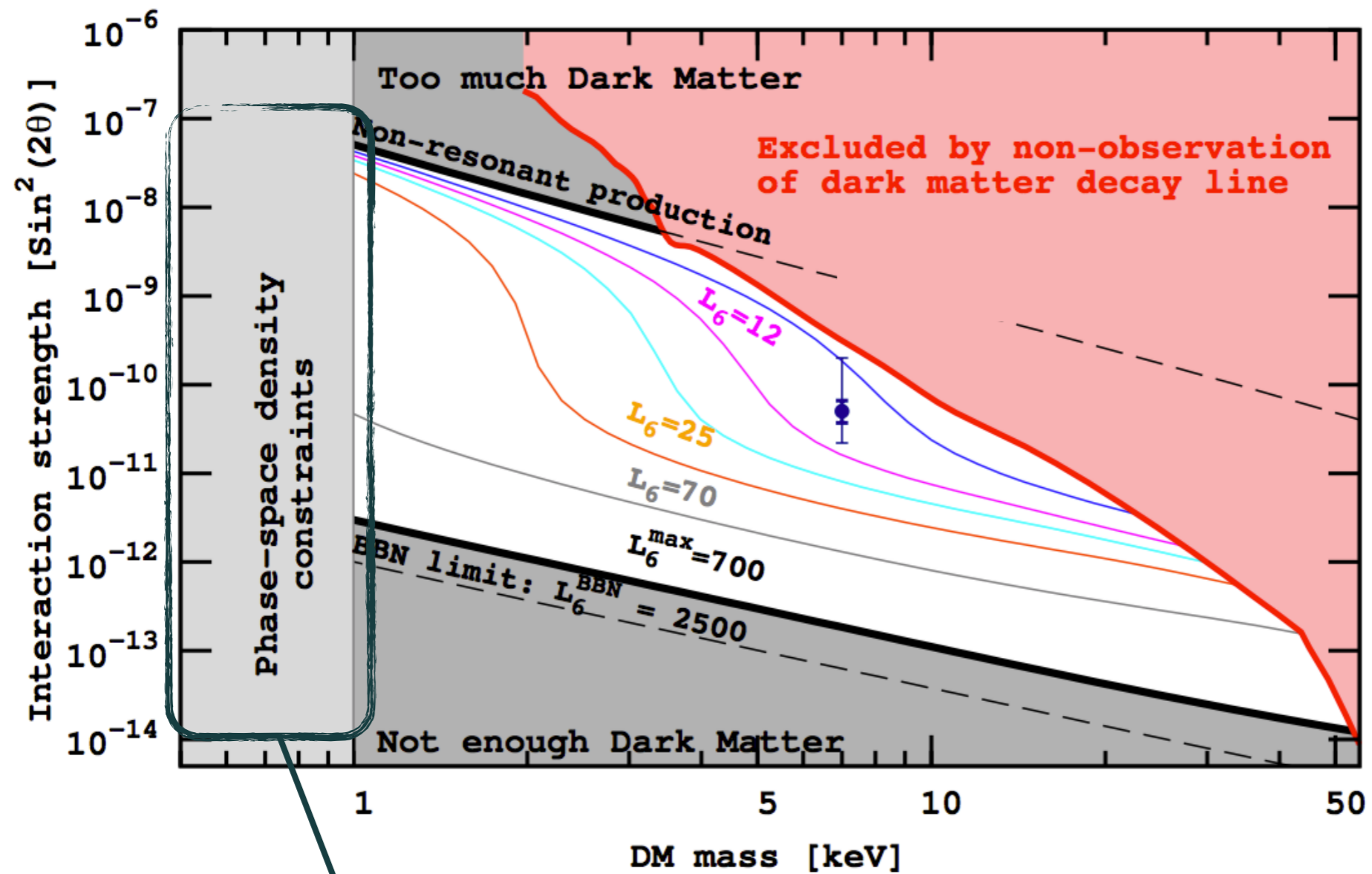


Neutrinos stériles au keV



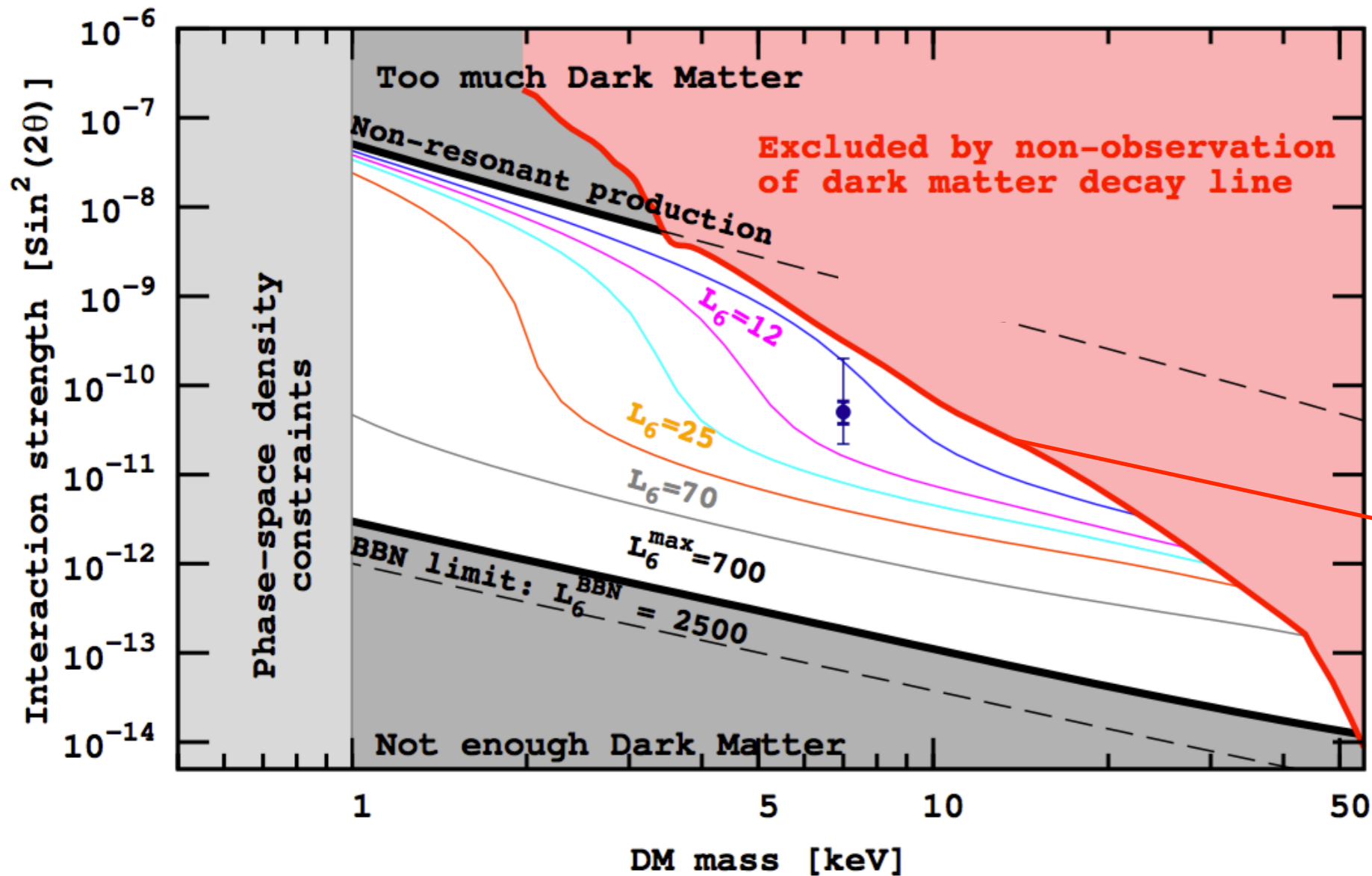
la densité relique des neutrinos stérile augmente avec θ

Neutrinos stériles au keV



Les neutrinos (stériles) sont des fermions

Neutrinos stériles au keV

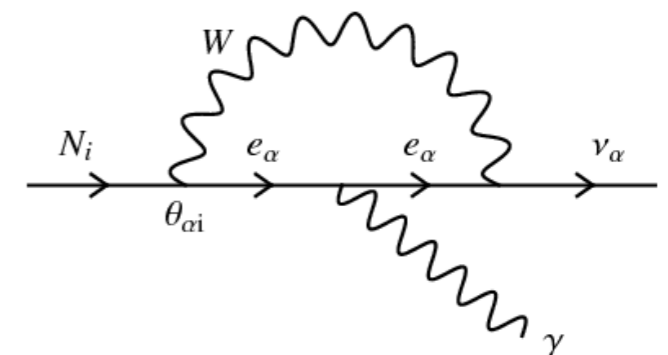


XMM-Newton

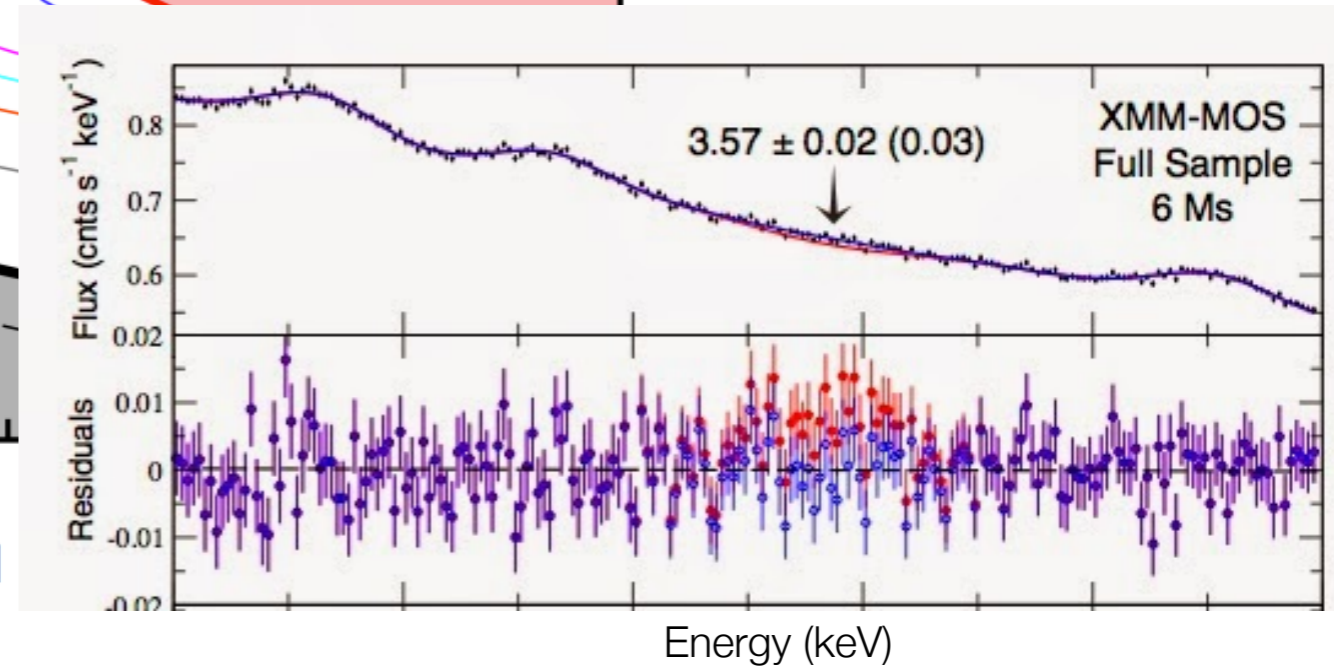
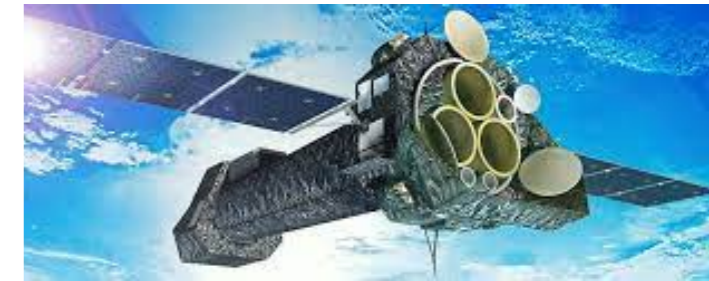
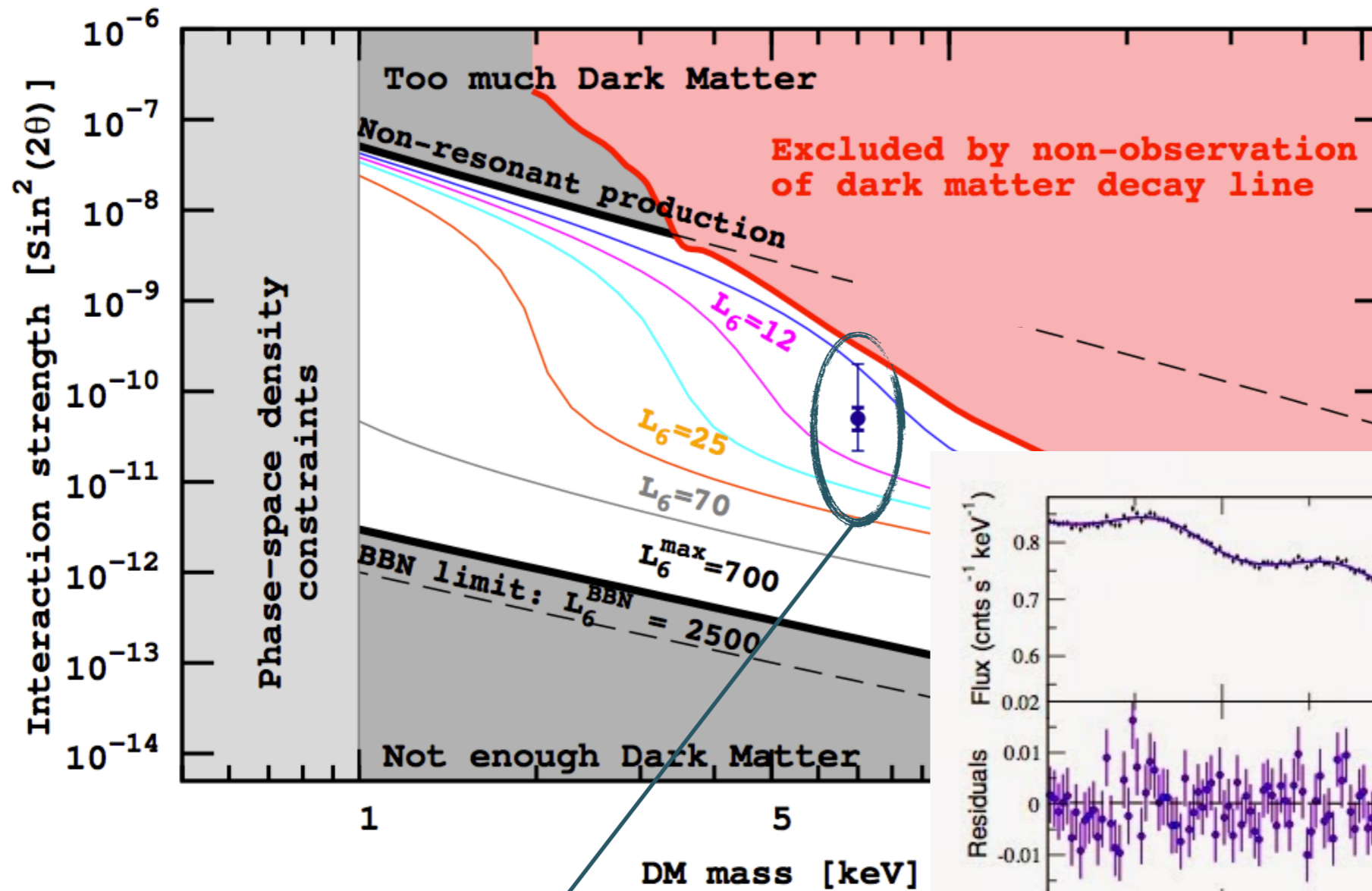


Emission X de régions denses en matière noire

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

... 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** ?