



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Candidats possibles pour la matière noire

Françoise Combes



Observatoire  
de Paris

PSL



# Les diverses solutions

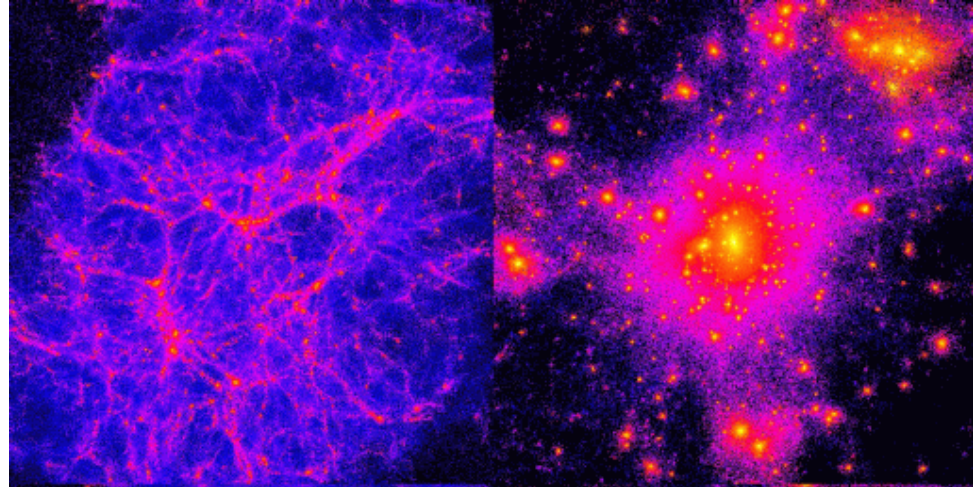
- Le cahier des charges: contraintes cosmologiques

Contraintes pour les galaxies, les amas

Contraintes quantiques, fermions, bosons

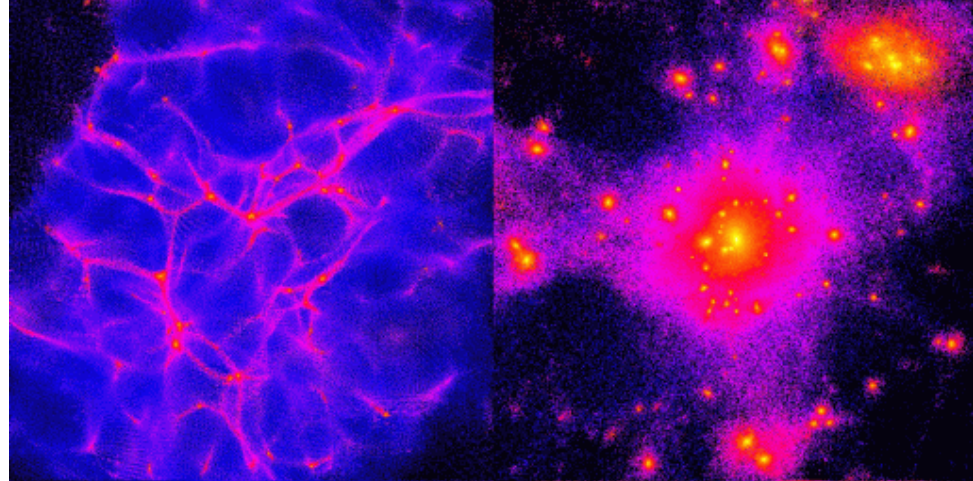
- Les WIMPS, neutralinos
- Les neutrinos stériles
- Les trous noirs primordiaux
- Les axions
  
- Détection directe et indirecte
  
- Gravité modifiée





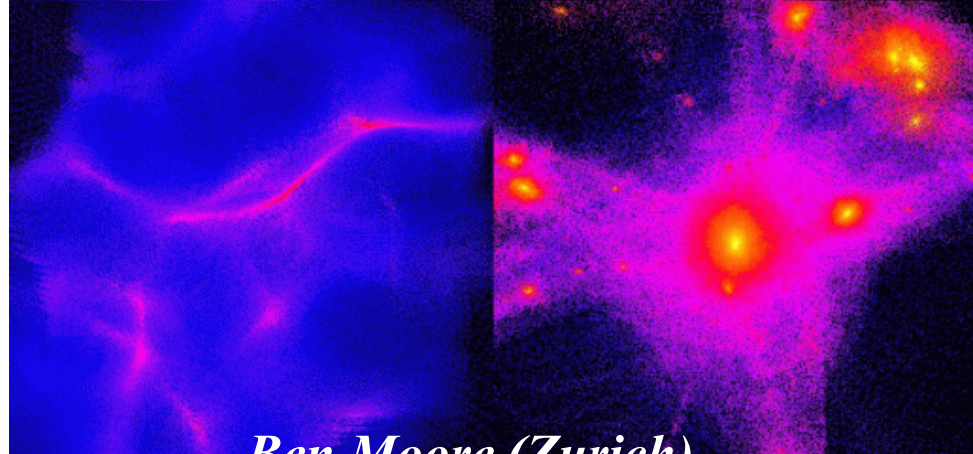
Matière noire **froide**  
(WIMPs)

Pour être compatible avec les grandes structures de la toile cosmique: la matière chaude est éliminée



Matière noire **tiède**  
(neutrinos stériles  
De masse qqkeV)

Matière tiède: contraintes de Masse



Matière noire **chaude**  
(neutrinos) relativiste au  
découplage (*Free streaming, FS*)

Matière froide: problème des satellites manquants à résoudre

$$M_{FS} = 4 \times 10^{15} \left( \frac{m_\nu}{30 \text{ eV}} \right)^{-2} M_\odot$$

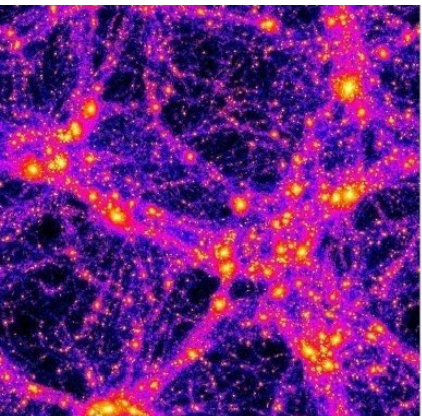
# Spectre de masse et matière noire

Découplage chimique  $\rightarrow$  plus d'annihilation  
Equilibre thermique par diffusion/collision  
Découplage thermique  $\rightarrow$  échelle de masse  
 $\rightarrow$  *Free Streaming*

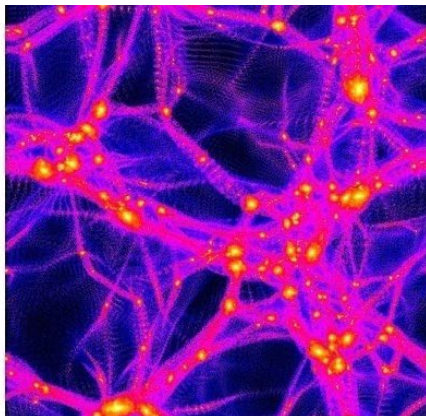
**Matière noire chaude:** les premières structures à se former sont les amas de galaxies, qui ensuite se fragmentent en galaxies  
 $\rightarrow$  Scénario « Top-down » **HDM**

**Matière noire froide:** les petites structures se forment d'abord  
 $\rightarrow$  Scénario « Bottom-up » **CDM**

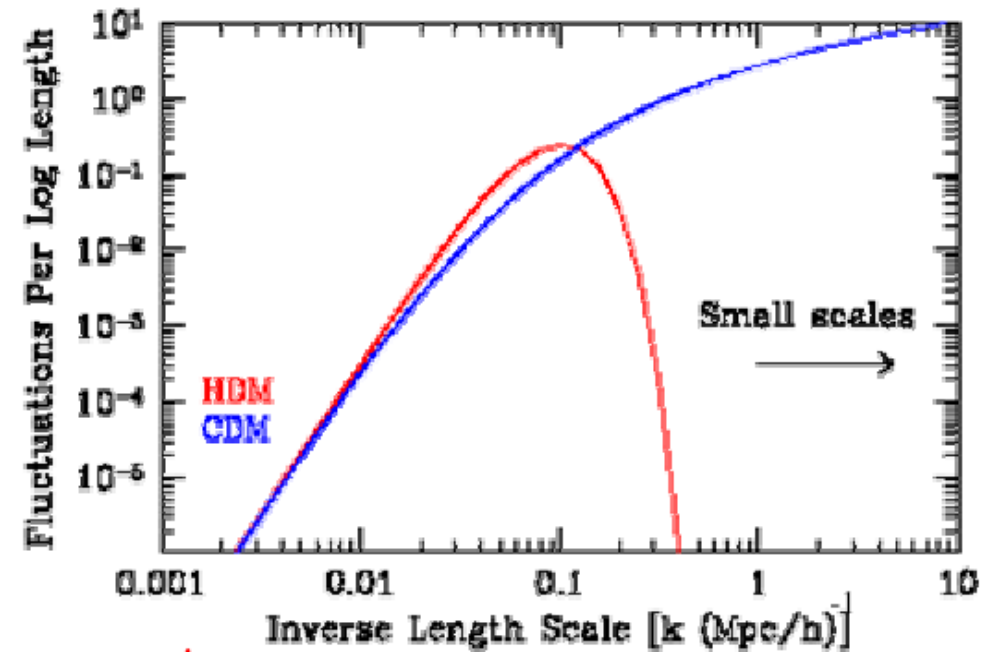
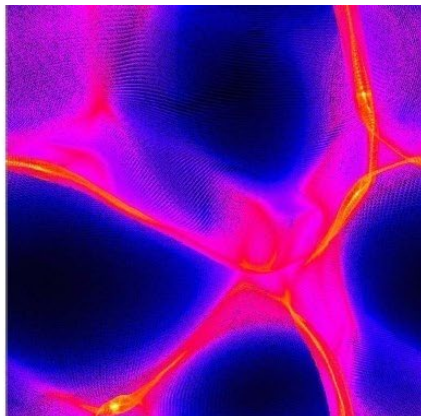
CDM



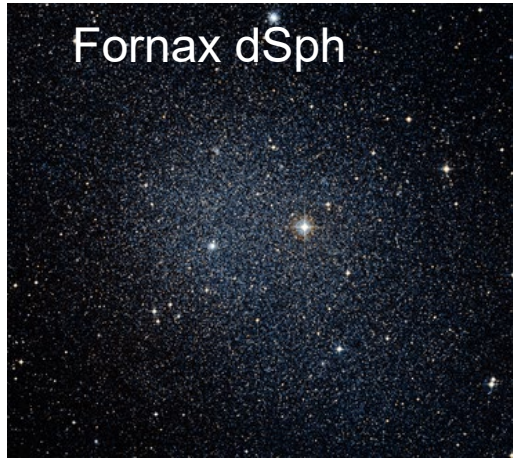
WDM



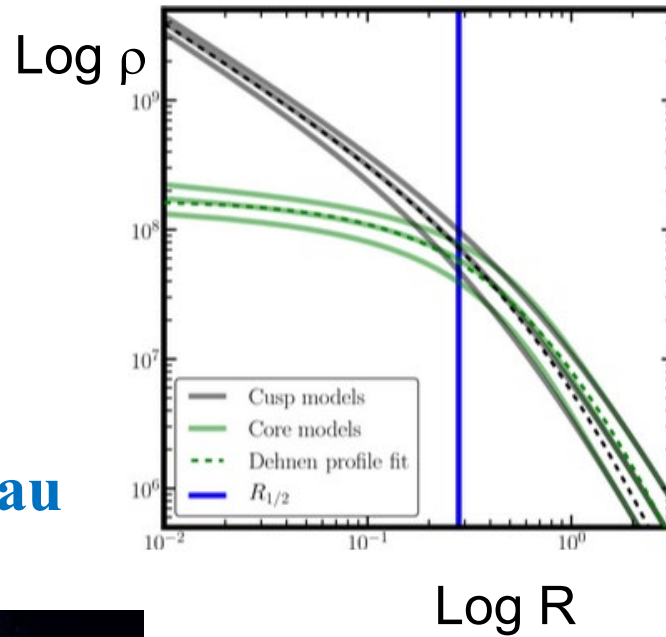
HDM



# Distribution: galaxies et amas de galaxies



Peu concentrée: plateau au centre des galaxies



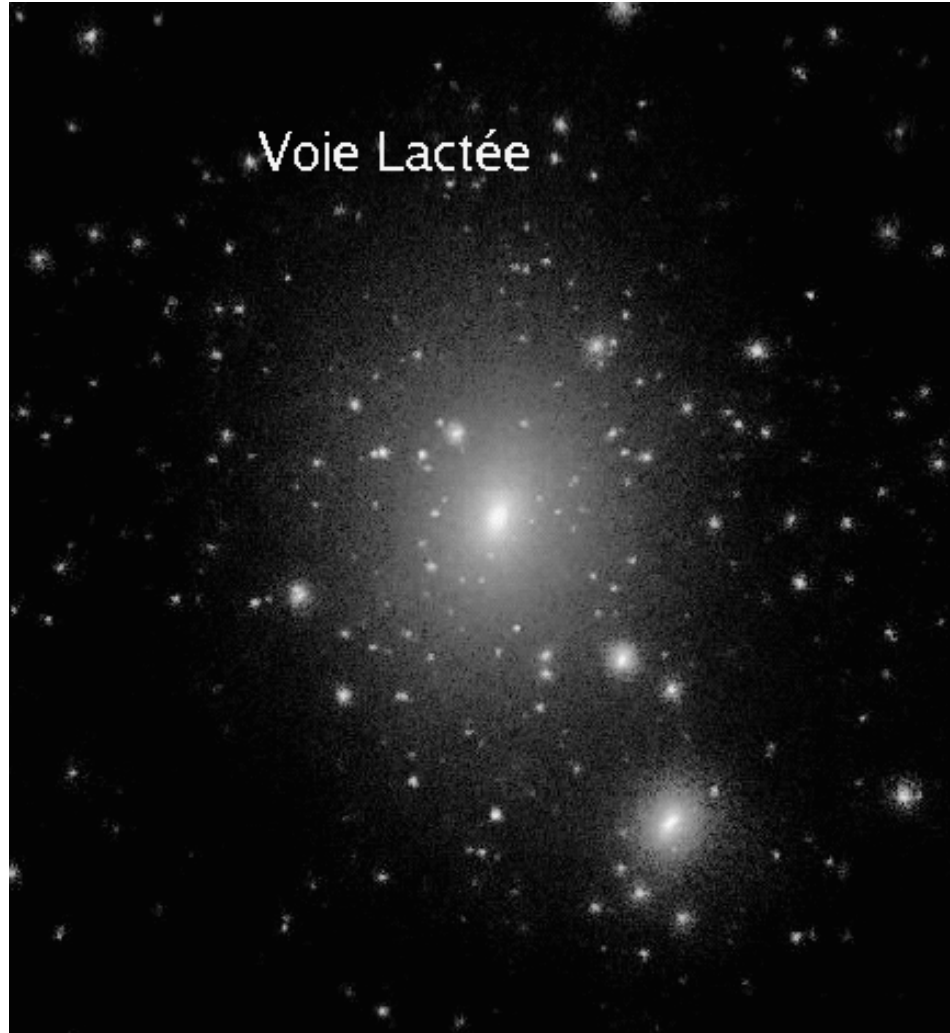
Très concentrée: cuspidé dans les amas de galaxies; profil NFW « universel »



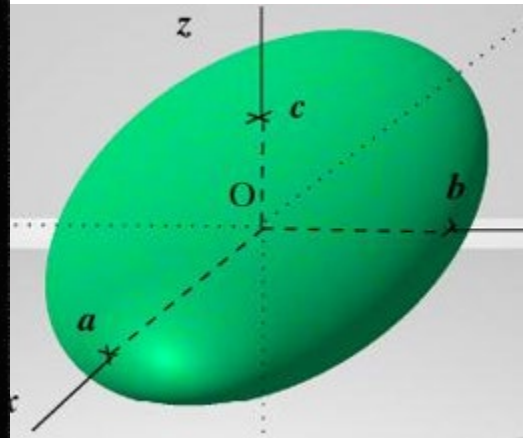
# Indépendance d'échelle (simulations)

300kpc , 200km/s,  $2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$

2Mpc, 1100 km/s,  $5 \cdot 10^{14} M_{\odot}$



Triaxialité: Les halos sont aplatis en moyenne 0.5 (Dubinski 1991-92)  
21% plus de densité?



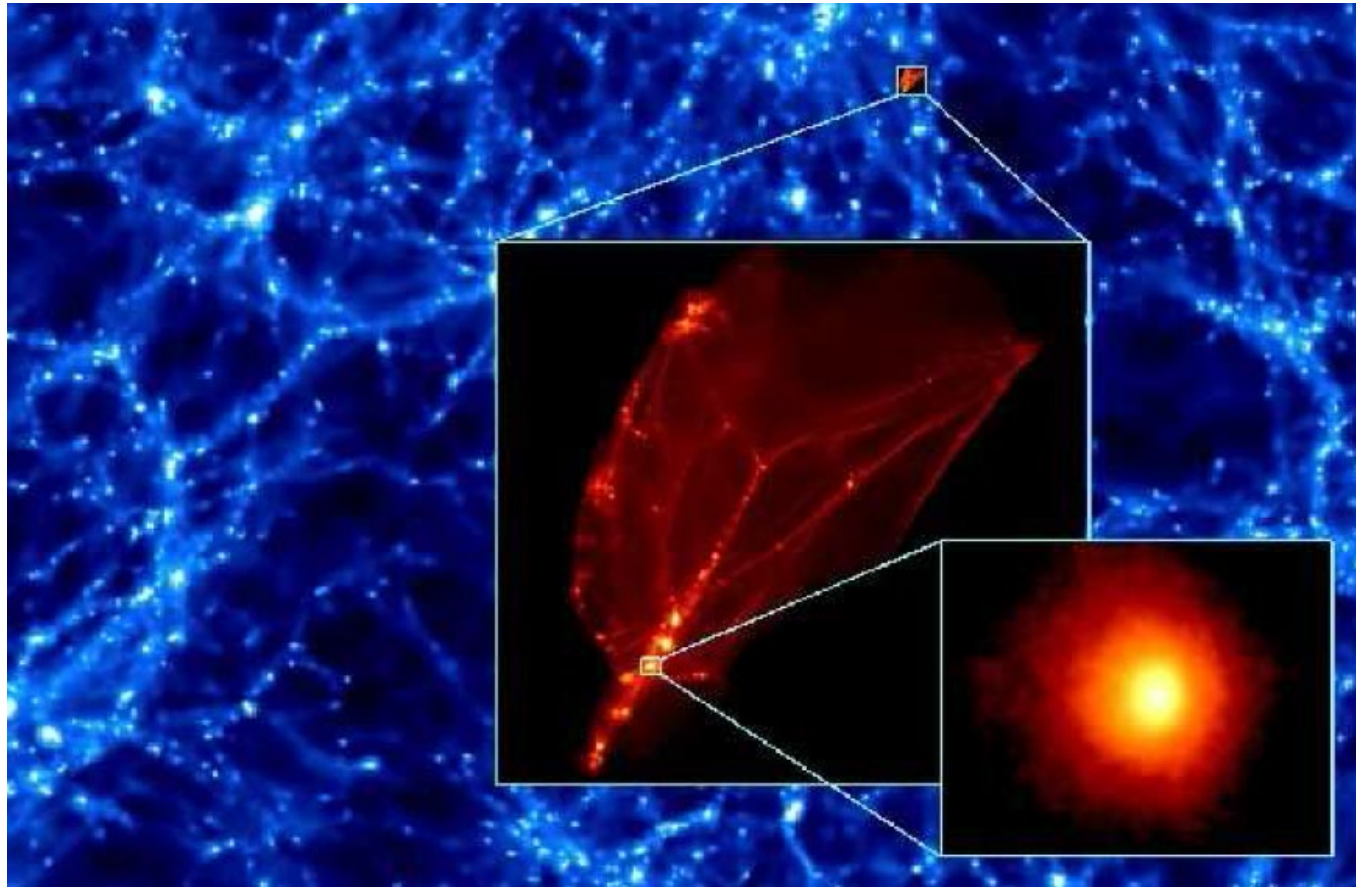
# Premières structures à se former

Zoom sur la première structure,  $z=26$ , taille du cube bleu 3kpc comobiles  
Cube rouge zoom x 100, particules de  $1.2 \cdot 10^{-10} M_{\odot} \equiv M_{\text{moon}}/300$

$z \sim 100$   
20 Myr  
Premiers  
collapses

$M = M_{\text{terre}}$   
Cut-off pour  
100Gev  
Neutralino

$10^{-6} M_{\odot}$



Dernier zoom x 100  
Taille 0.024pc

Masse ~Terre  
Halo cuspidé  
Densité régulière  
**Taille du système solaire**

**Subsistent dans le  
halo de la Voie lactée?**

# Formation des premières structures

A  $z=100$ ,  $t=20$  millions d'années, les structures plus denses,  
De qq masses terrestres ( $\sim 10^{-6} M_{\odot}$ ), commencent à s'effondrer

Ces structures sont stables, non détruites par les marées,  
Car leur densité moyenne est 10 fois supérieure à celle des halos  
galactiques

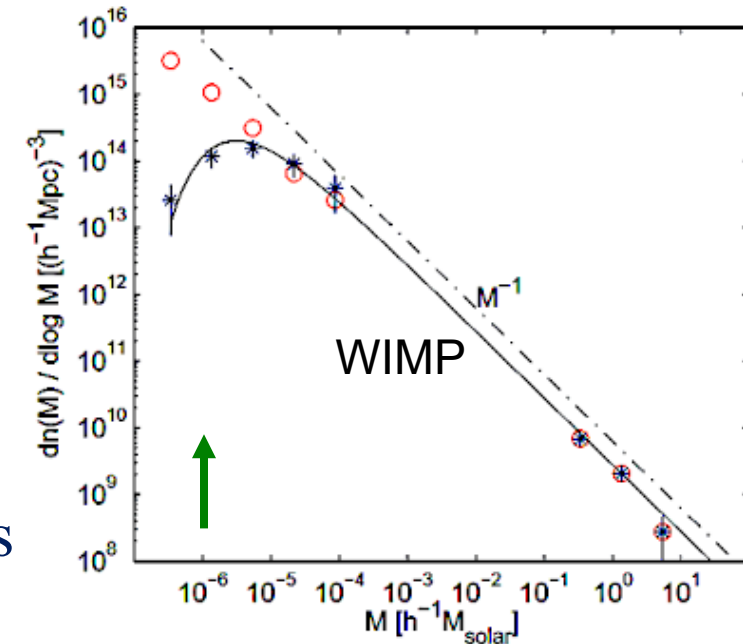
On s'attend à  $10^{15}$  telles structures dans la Voie lactée!

Une devrait passer dans le système solaire tous les qq  $10^3$  ans  
Rayonnement gamma? Pas dominé par ces petits fragments

→ Problème avec les micro-lentilles gravitationnelles (MACHOs, EROS)

Objets compacts de masse  $10^{-7} M_{\odot} < M < 5 M_{\odot}$  sont éliminés **< 10% du halo**

$10^{-6} M_{\odot}$  : rayon Einstein  $10^{-7} \text{pc}$  → pas de problème



Densité  $\delta\rho/\rho=200$   
 $\rho \propto (1+z)^3$   
 $z=100$ , facteur  $10^6$



# Limites du nombre de particules/cm<sup>3</sup>

Densité mesurée de matière noire:  $10^7 M_{\odot}$  pour  $R < 300 \text{pc}$

$$\rho_M \sim 1 M_{\odot} / \text{pc}^3 \sim 10^{-22} \text{ g/cm}^3$$

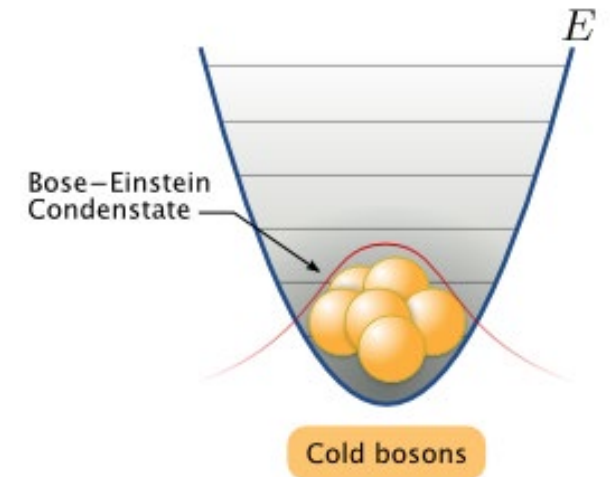
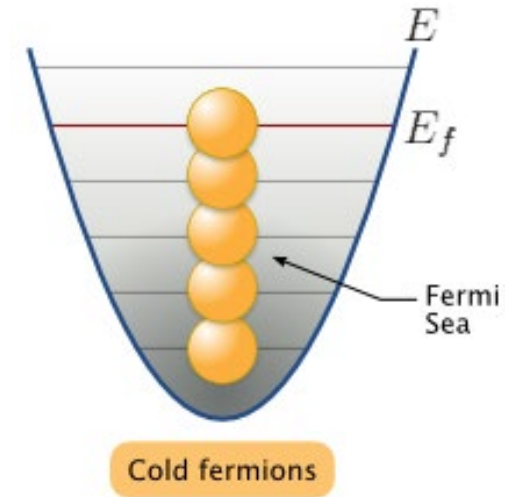
Pour des WIMPS de  $100 \text{GeV} \rightarrow 1 \text{ WIMP/cm}^3$

Pour des neutrinos de  $1 \text{ keV} \rightarrow 10^8 \text{ neutrinos/cm}^3$

Pour des axions de  $1 \mu\text{eV} \rightarrow 10^{17} \text{ axions/cm}^3$

Pour des axions de  $10^{-22} \text{ eV} \rightarrow 10^{33} \text{ axions/cm}^3$

Accumulation des bosons, pas des fermions



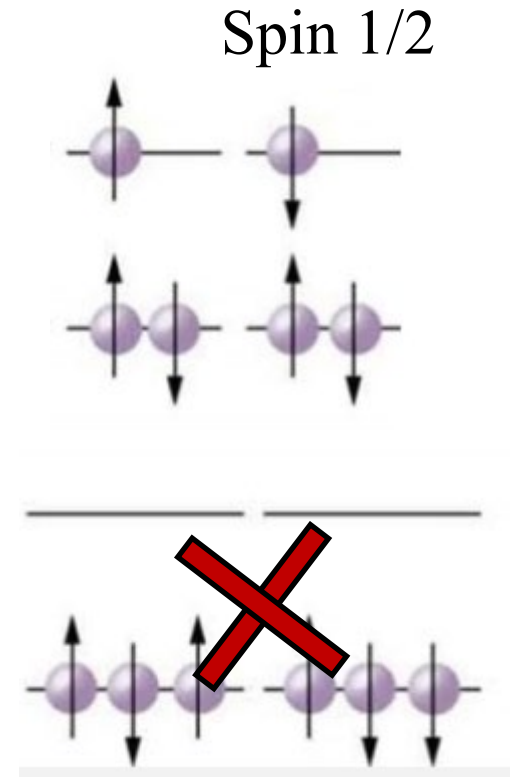
# Limite de Pauli pour des fermions

Si les particules de MN sont des fermions (comme les neutralinos)  
Ils obéissent à la statistique de Fermi-Dirac, si leur densité dépasse  
un certain seuil (la matière est alors **dégénérée**).

Pour une galaxie naine ( $M, R$ )  $V_{\text{ech}}^2 = 2GM/R$ , on peut empiler  
uniquement  $g$  (nbr de degrés de liberté) particules dans  $\Delta x = h/(mv)$   
Soit  $N/g \Delta x^3 = M/(gm) \Delta x^3 = 4/3 \pi R^3$ , volume de la galaxie  
Pour que  $v = h/(m \Delta x) < V_{\text{ech}}$ , il faut que  $m^4 > (4\pi g)^{-1} h^3 M^{-1/2} (GR)^{-3/2}$

Cette limite est de l'ordre de **0.1 keV** pour les plus petites galaxies

**→ La limite de la densité dans l'espace des phases prime toujours**  
(Tremaine & Gunn 1979)



# Limite de Tremaine-Gunn

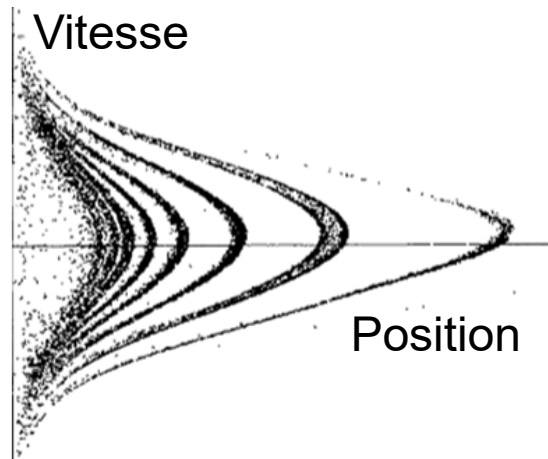
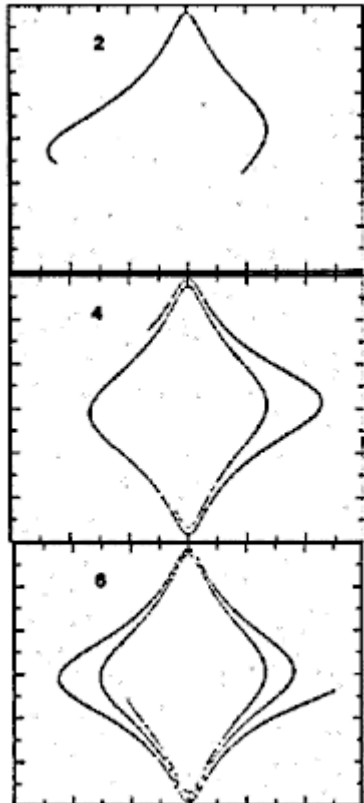
Limite basée sur le **théorème de Liouville** ( $df/dt = 0$ )

La densité  $f$  dans l'espace des phases  $(X, V)$  reste constante dans l'évolution d'un système non dissipatif

**Densité macroscopique moyennée  $\ll$  densité fine microscopique**

→  $N_{\text{part}} / \text{cm}^3$  limité

Pour  $\rho$  observé, il faut une **masse minimum  $m$**  des particules



Enroulement dans l'espace des phases (*Dupraz & Combes 87*)

Au découplage, les particules sont relativistes, la densité est

$$Q = N / \text{Vol} / \sigma^3$$

La masse minimum trouvée par Tremaine & Gunn (1979) était 1 keV. Aujourd'hui, **2-3 keV**

# Limites Tremaine-Gunn fermions/bosons

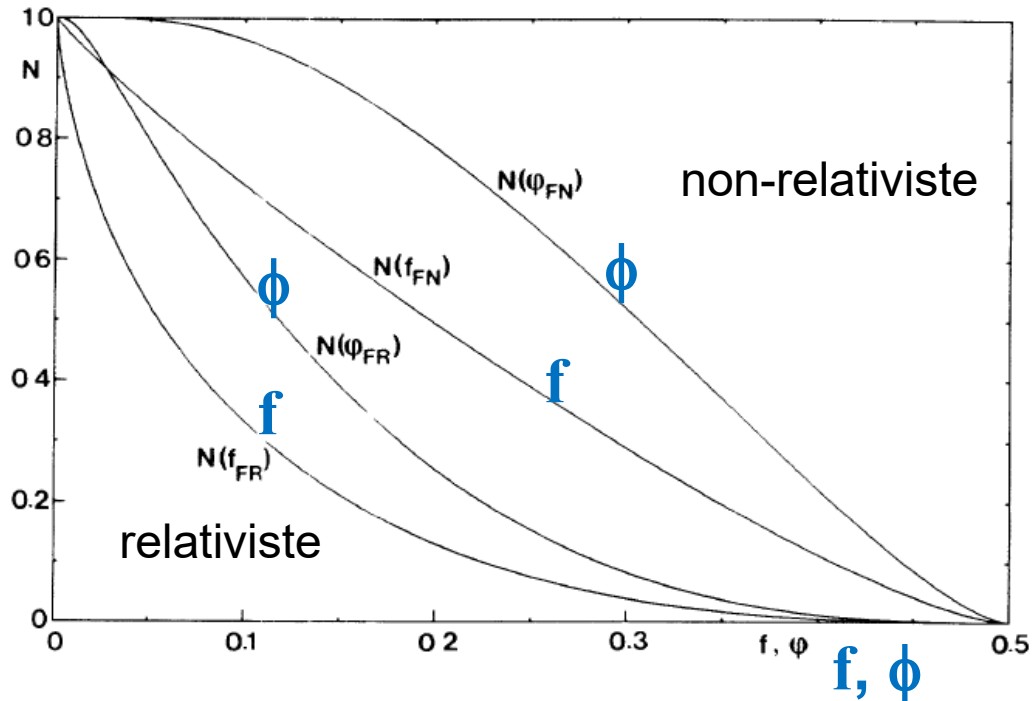
Pour les fermions, densité maximum

$$f_F(p) = 1/[\exp(E/kT) + 1]$$

Pour les bosons: pas de densité maximum

$$f_B = 1/[\exp(E/kT) - 1]$$

$N(>f)$   $N(>\phi)$



→ Diverge pour E petit  
 $E=pc$  (relativiste) ou  $p^2/2m$

Mais: la fraction ou  $f_b \gg 1$   
 $n$ 'est que 1-10%

On peut appliquer une limite semblable

$N(>f)$  distribution fine,  $N(>\phi)$  distribution « coarse » moyenne

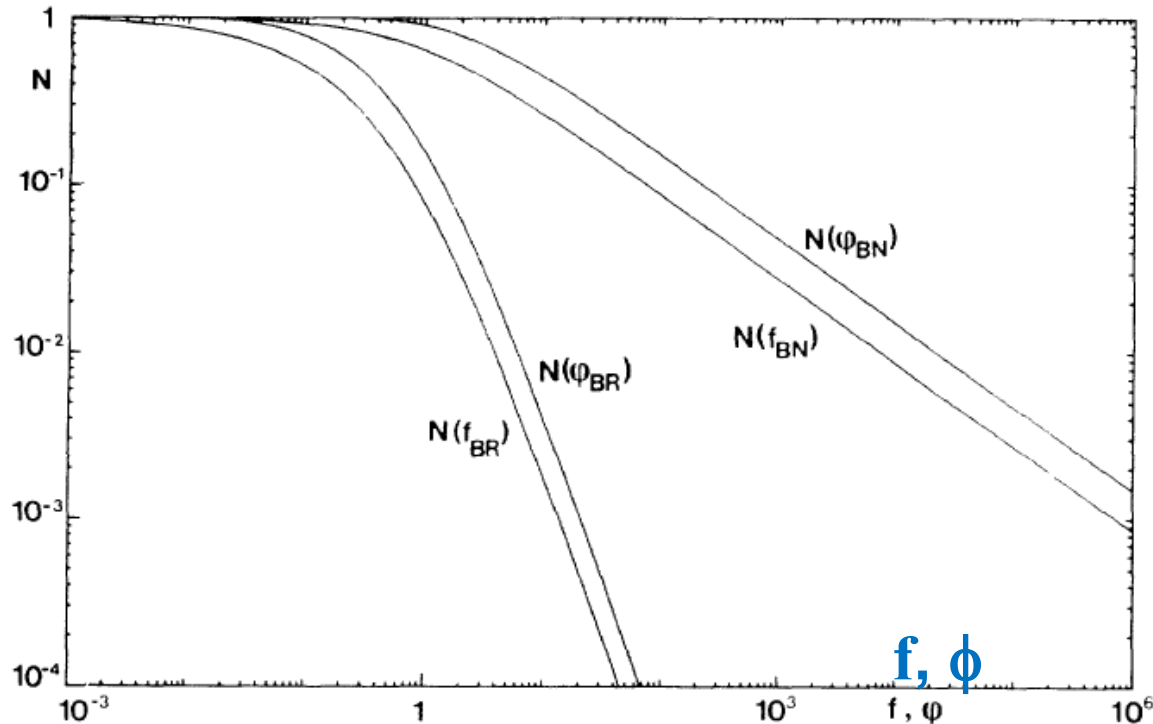
**Fermions**, Madsen 1990

# Limites pour les bosons

$$m_B > \left( \frac{9h^3}{2(2\pi)^{5/2} g \tau G \sigma r_c^2} \right)^{1/4}$$

$$= (38 \text{ eV}) \sigma_{100}^{-1/4} r_{10}^{-1/2} g^{-1/4} \tau^{-1/4}$$

$N(>f)$   
 $N(>\phi)$



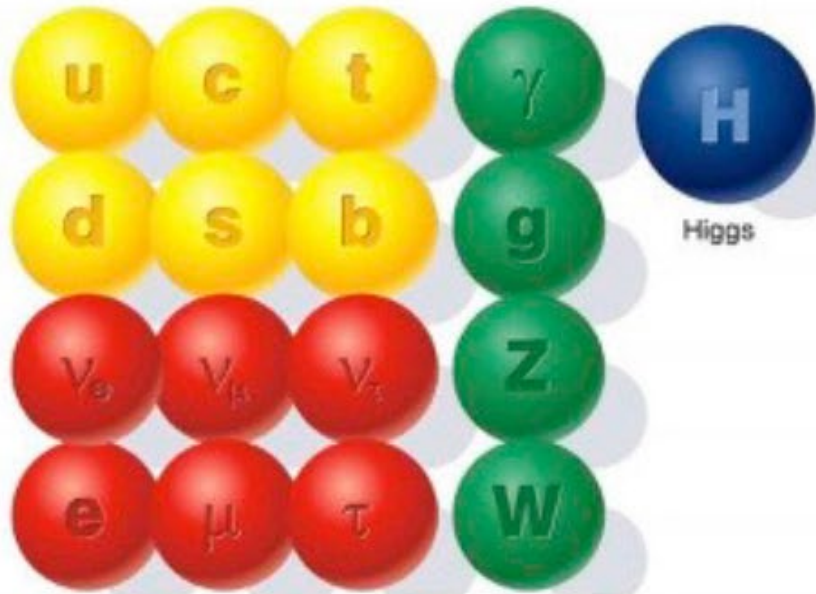
La limite est similaire  
à un facteur 2 près  
Mais n'est valable que  
statistiquement

Valable pour les bosons en  
équilibre thermique  
→ Pas les axions

$N(>f)$  distribution fine,  $N(>\phi)$  distribution « coarse » moyenne  
**Bosons, Madsen 1990**

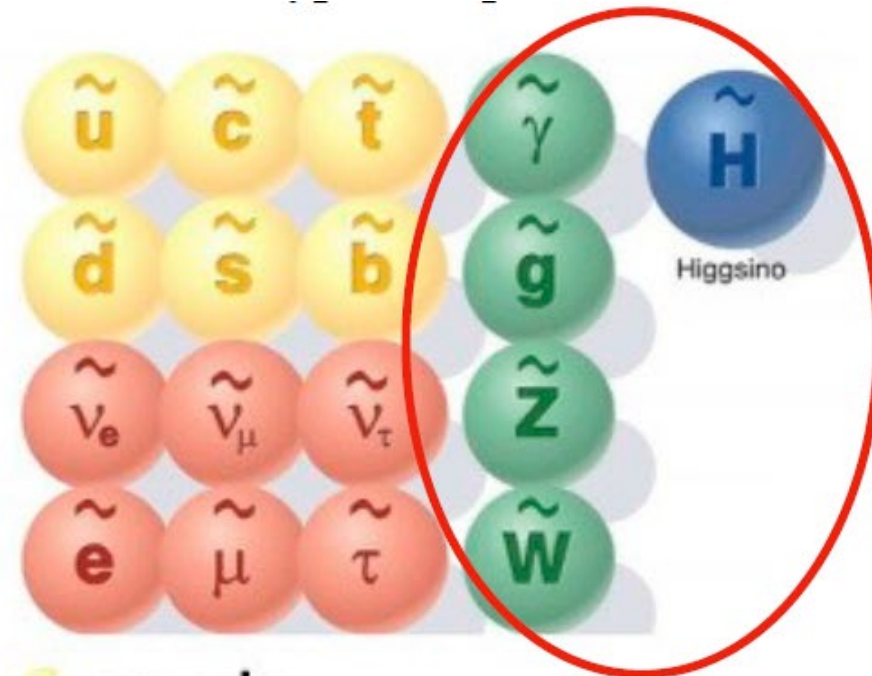
# Candidats: WIMPS supersymétrie

Particules connues  
Modèle standard



- quarks
- leptons
- force carriers

Particules hypothétiques  
**WIMP** Weakly Interacting  
Massive Particles



- squarks
- sleptons
- SUSY force carriers

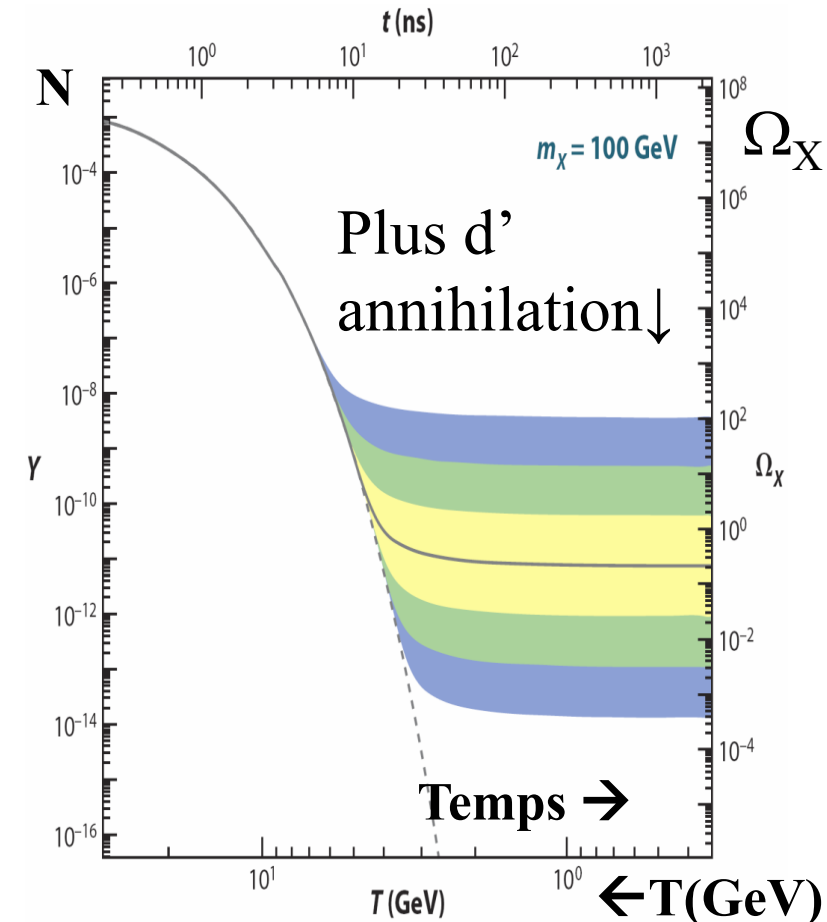
# Le miracle du WIMP

On obtient l'abondance requise de matière noire avec des particules de masse  $\sim 100 \text{ GeV}$ , interagissant avec la **force faible** section d'annihilation  $\langle \sigma v \rangle \sim 3 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$

Au début de l'Univers, l'abondance des particules est « gelée », se découplent lorsque  $t$  (interaction)  $\gg$  Age  $n \langle \sigma v \rangle \sim 1/t_{\text{hubble}}$

**Coincidence:** correspond à la particule la plus légère de la super-symétrie (neutralino)

**Dans le LHC: pas de super-symétrie, Pas de nouvelle particule!**



# Autres particules en dehors du modèle standard

	<p>masse → <math>\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>u</b></p> <p>up</p>	<p>masse → <math>\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>c</b></p> <p>charm</p>	<p>masse → <math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>t</b></p> <p>top</p>	<p>masse → <math>0</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1</math></p> <p><b>g</b></p> <p>gluon</p>	<p>masse → <math>\approx 126 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>0</math></p> <p><b>H</b></p> <p>boson de Higgs</p>	
QUARKS	<p>masse → <math>\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>d</b></p> <p>down</p>	<p>masse → <math>\approx 95 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>s</b></p> <p>strange</p>	<p>masse → <math>\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>b</b></p> <p>bottom</p>	<p>masse → <math>0</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1</math></p> <p><b><math>\gamma</math></b></p> <p>photon</p>		
	<p>masse → <math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>e</b></p> <p>électron</p>	<p>masse → <math>105.7 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\mu</math></b></p> <p>muon</p>	<p>masse → <math>1.777 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\tau</math></b></p> <p>tau</p>	<p>masse → <math>91.2 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1</math></p> <p><b><math>Z^0</math></b></p> <p>boson <math>Z^0</math></p>	BOSONS DE JAUGE	
	LEPTONS	<p>masse → <math>&lt; 2.2 \text{ eV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_e</math></b></p> <p>neutrino électronique</p>	<p>masse → <math>&lt; 0.17 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\mu</math></b></p> <p>neutrino muonique</p>	<p>masse → <math>&lt; 15.5 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\tau</math></b></p> <p>neutrino tauique</p>		<p>masse → <math>80.4 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>\pm 1</math></p> <p>spin → <math>1</math></p> <p><b><math>W^\pm</math></b></p> <p>boson <math>W^\pm</math></p>

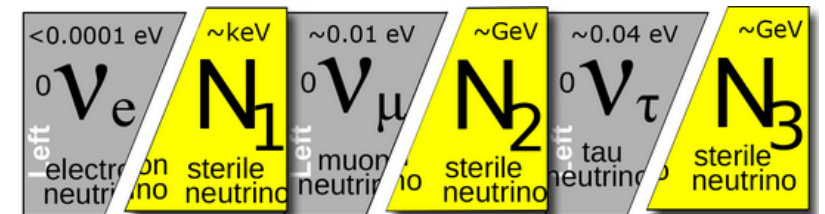
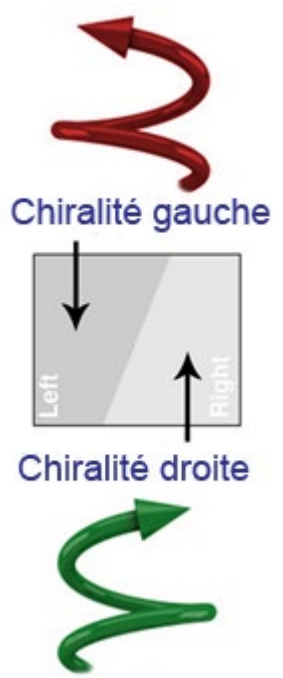
Venant du Big-Bang

$\sim 400 \text{ photons / cm}^3$

$\sim 300 \text{ neutrinos / cm}^3$

Après la recherche de WIMPS depuis 1985

Extension vers Les neutrinos Stériles ?





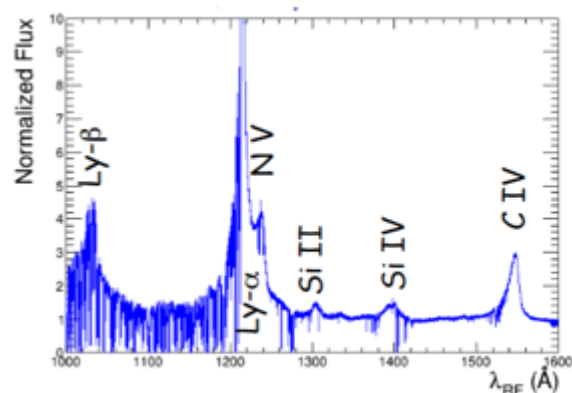
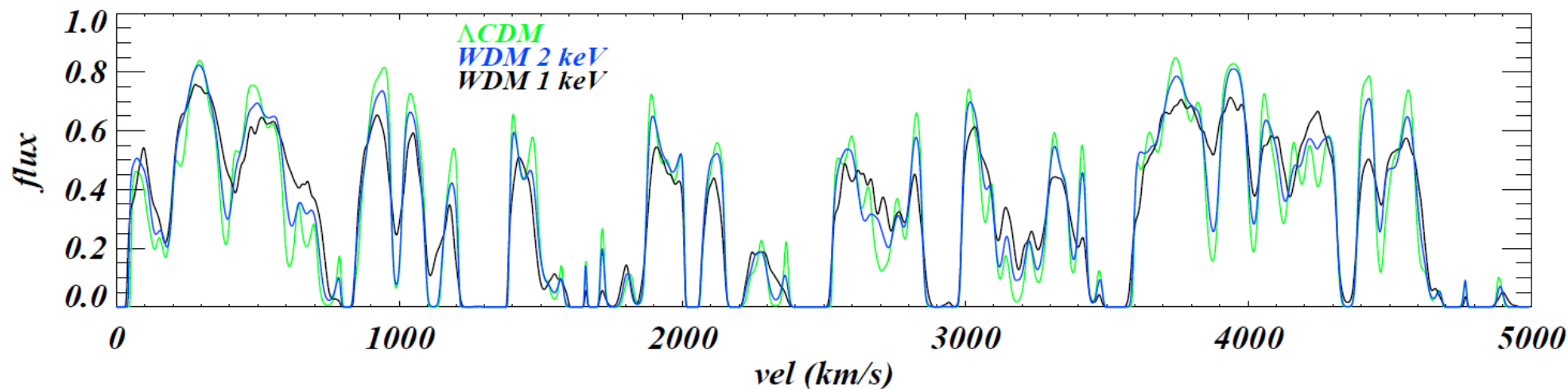
# Ly- $\alpha$ : contraintes sur $m(\text{tiède})$



furtif

25 quasars  $z > 4$ : spectres obtenus au Keck (*Viel et al 2013*)

Forêt Ly- $\alpha$  et comparaison avec les simulations  $m_{\text{WDM}} > 3.3 \text{ keV}$  ( $2\sigma$ )



$M_{\text{Ntiède}}$ ,  $m_{\text{X}} > 4.65 \text{ keV}$  reliques thermiques  
 $m_{\text{s}} > 29 \text{ keV}$  production non-résonante  
*Yeche et al (2017)*

# Limites sur les désintégrations, $X, \gamma$

$$\nu_s \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + \gamma$$

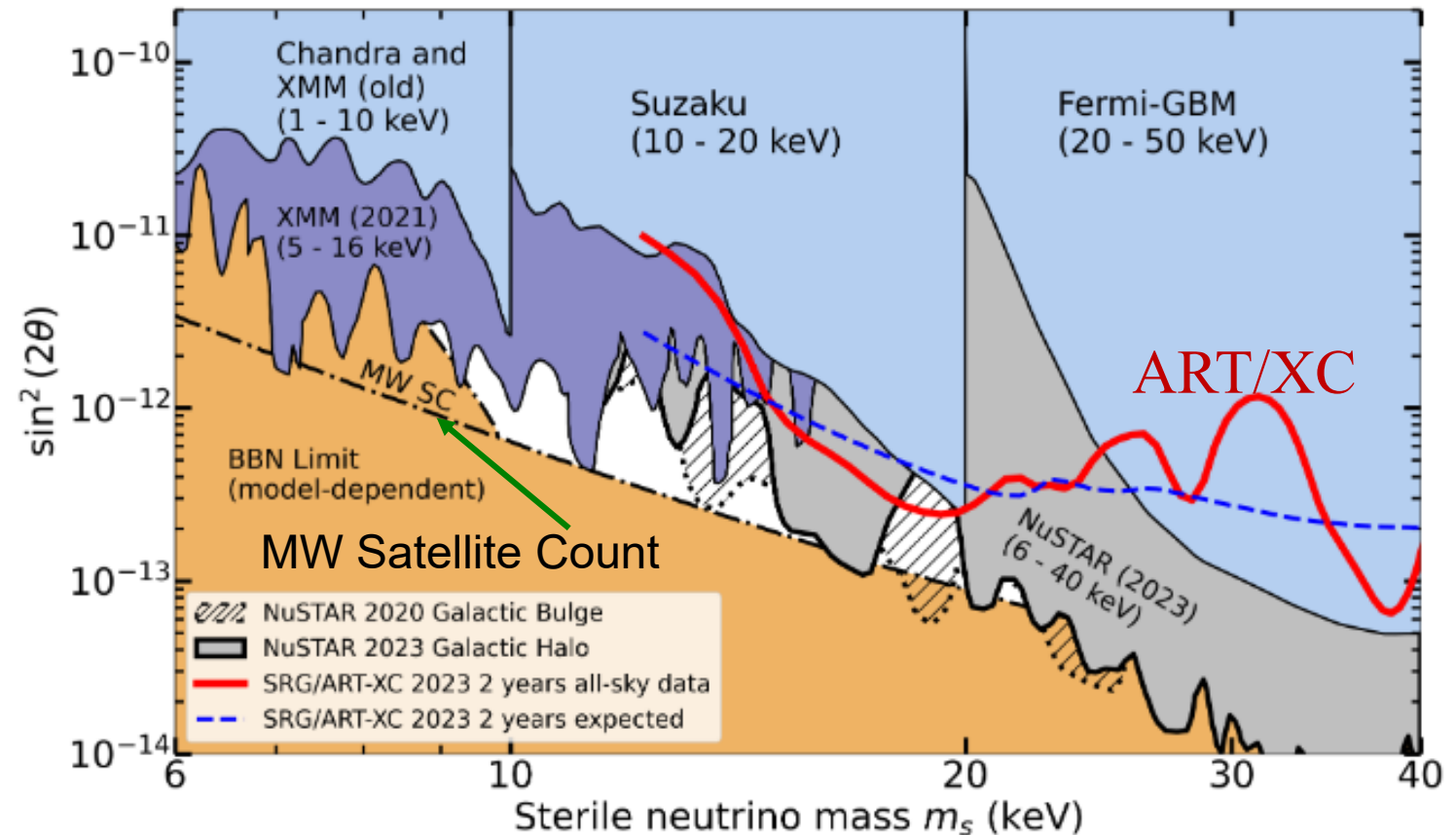
- Le neutrino stérile devrait se désintégrer en neutrinos et photons  $E = m_s/2$
- Taux de désintégration

$$\Gamma_\gamma \propto \sin^2 2\theta m_s^5$$

Détecteur KATRIN: pas de neutrinos stériles 40eV-18keV  
 $m(\nu_e) < 0.8\text{eV}$  (2024)

MiniBoone (FermiLab)  
 pas d'oscillation  $\nu_s \rightarrow \nu_e$   
 ou masse ultra-légère

Uniquement régions blanches permises



# Trous noirs primordiaux (TNP) et matière noire?

$$R_S = 2GM/c^2 = 3(M/M_\odot) \text{ km} \quad \rightarrow \quad \rho_S = 10^{18}(M/M_\odot)^{-2} \text{ g/cm}^3$$

Au début de l'Univers: densité cosmologique  $\rho \sim 10^6(t/s)^{-2} \text{ g/cm}^3$

→ Masse de l'horizon à leur formation  $M_{\text{hor}}(t) \sim ct$

$M_{\text{PBH}} \sim c^3t/G = 10^{15} \text{ g à } 10^{-23} \text{ s (évaporation aujourd'hui)}$

$1 M_\odot = 2 \cdot 10^{33} \text{ g à } 10^{-5} \text{ s (maximum)}$

La formation de ces trous noirs requiert de fortes inhomogénéités  
**Inflation**, et localement une région en effondrement

*e.g. Carr et al 2010, 2016*



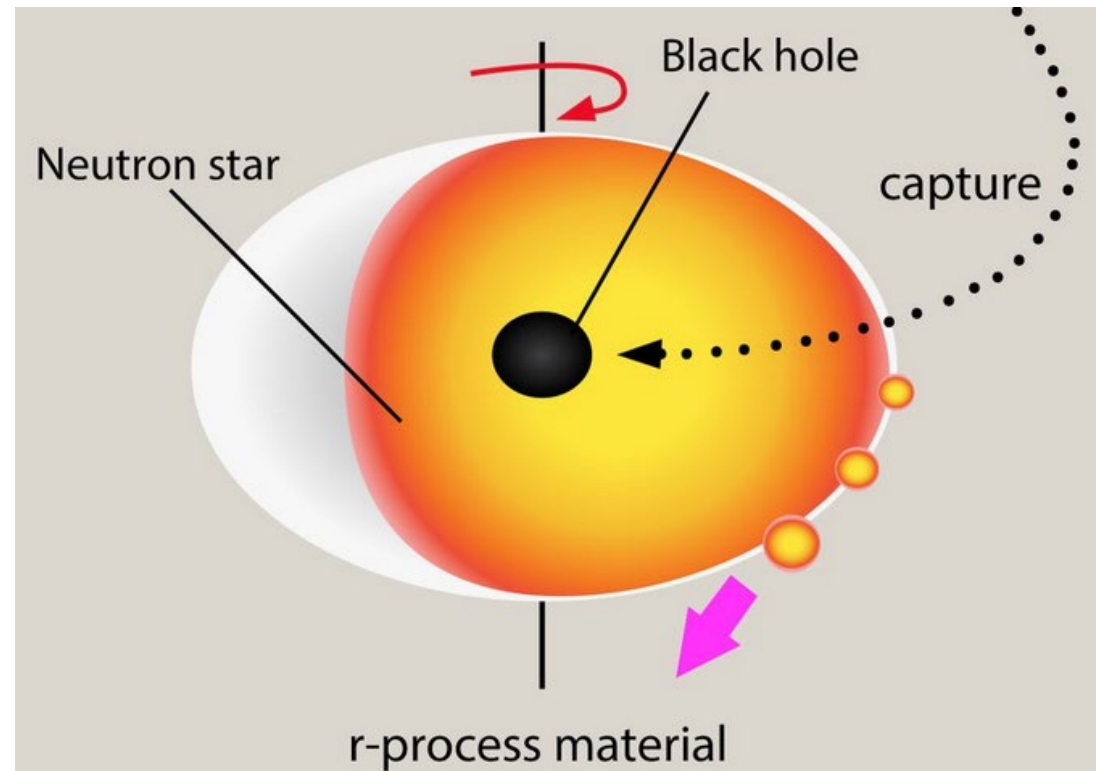
# Exclusion d'une dernière fenêtre pour les "TNP"

Une grande partie des masses possibles de ces trous noirs est éliminée comme candidat à la matière noire par les micro-lentilles gravitationnelles

Rencontre entre une étoile à neutron et le trou noir

→ Destruction des étoiles à neutron

Incompatible avec le nombre de pulsars observés



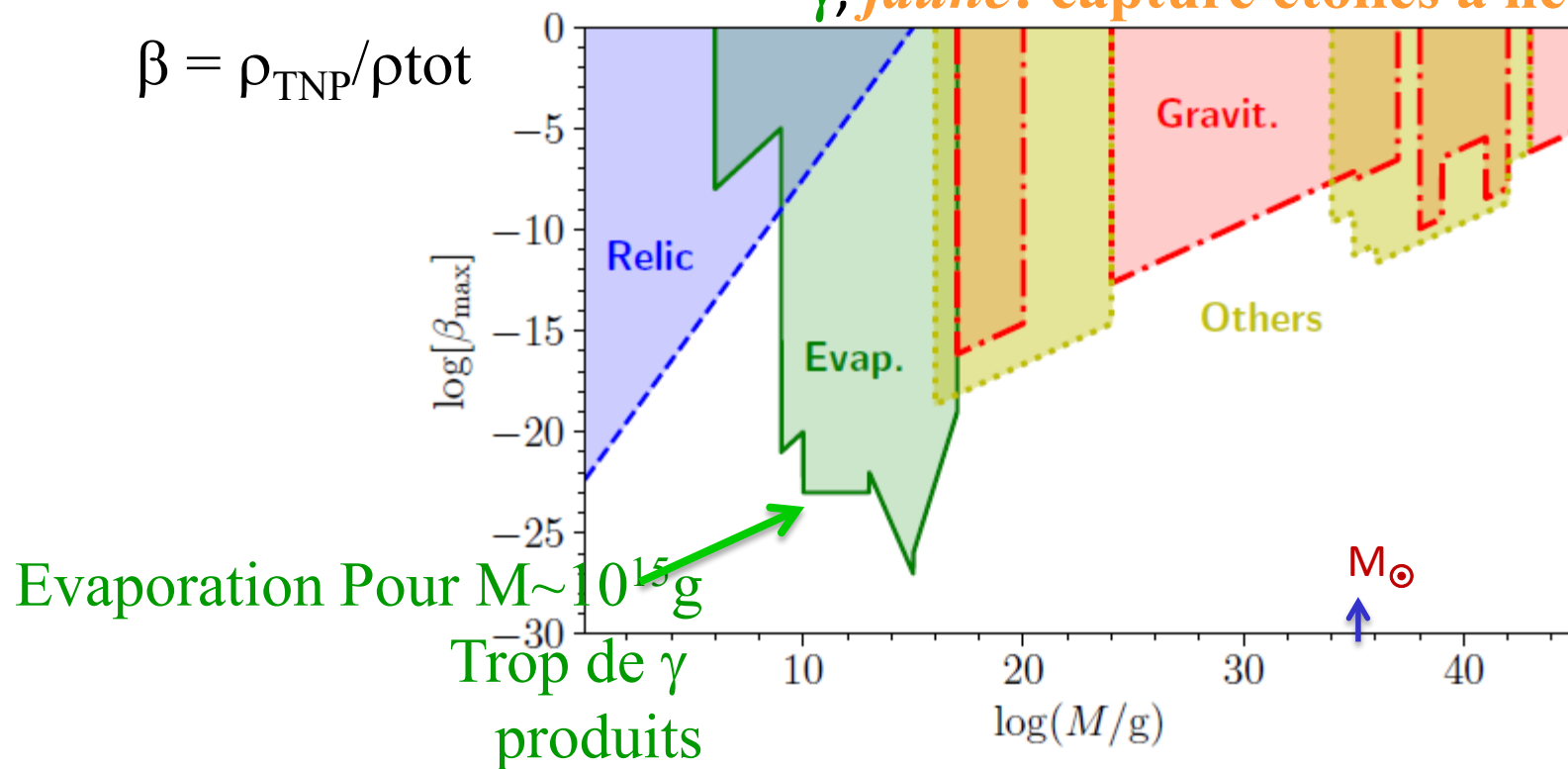
*Cotner & Kusenko 2017*

*Pani & Loeb 2014*

# Trous noirs primordiaux

$\gamma$ , *jaune*: capture étoiles à neutrons

$$\beta = \rho_{\text{TNP}}/\rho_{\text{tot}}$$



*Gutierrez et al 2017*

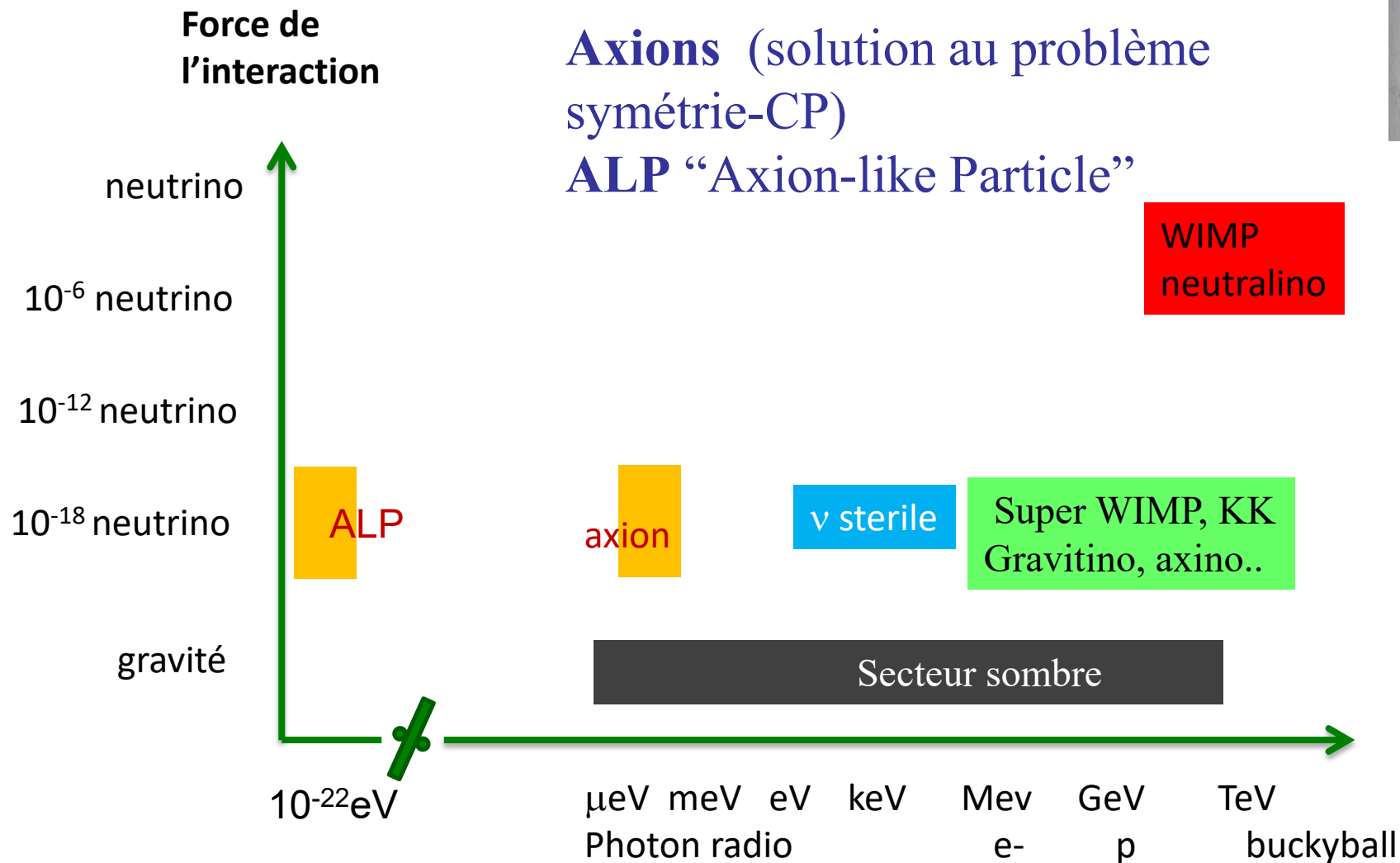
Comme les TNP forment en ère radiative, ils peuvent être considérés comme matière noire non-baryonique

Mais leur masse est limitée par les expériences MACHOS, EROS

New limits  $10M_{\odot} < M < 1000 M_{\odot}$  *Blaineau et al 2022*

# Autres particules, autres interactions

Domaine de masse > 34 ordres de grandeur



**Axions** (solution au problème symétrie-CP)

**ALP** "Axion-like Particle"



CERN-LHC  
14 TeV

# FDM: "Fuzzy dark matter"

Cuspides dans les amas de galaxies, pas dans les galaxies  
Dans les galaxies naines, **coeurs de ~1kpc**

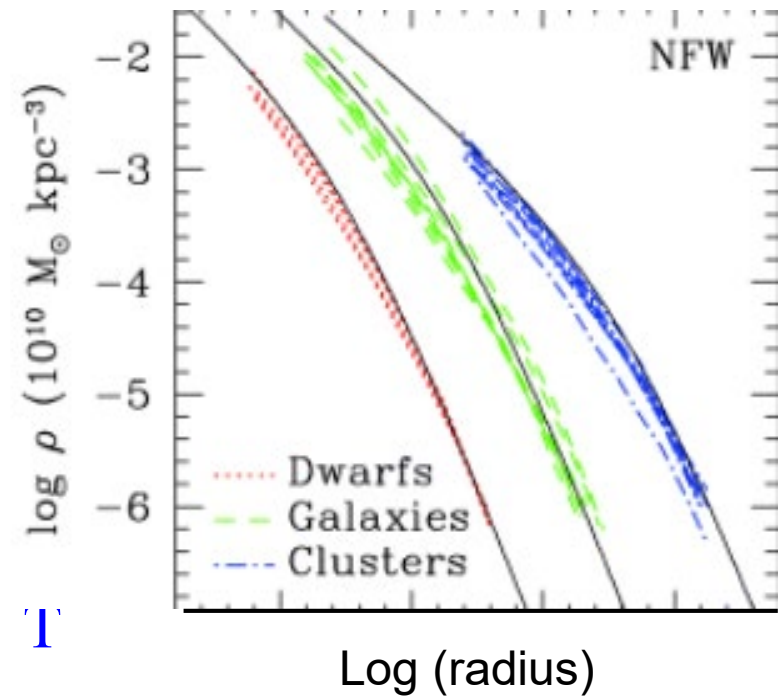
Bosons engendrés par des processus non-thermiques → axions  
(ALP, Marsh 2016) particules froides, qui peuvent se condenser

**BEC "Bose-Einstein condensate"**, état macroscopique à basse T

- masse finie, très petite,  $\lambda$  de Broglie,  $\lambda_{dB} = h/m_a v$   
→  $\lambda_{dB} = 1-2 \text{ kpc}$

- En fait  $\lambda_{dB} \sim 1-2 \text{ kpc}$  pour  $m_a = 10^{-22} \text{ eV}$ , et  $v \sim 10 \text{ km/s}$

Pour masses  $m_a = 10^{-22} \text{ eV}$ , la pression quantique **empêche la formation de structures en-dessous de  $M_{cut} = 3 \cdot 10^8 m_{22}^{-3/2} M_{\odot}$**  (Hui et al 2017)



# Une longue histoire

Depuis 40 ans!

*Baldeschi, Gelmini, Ruffini (1983)*

Matière noire des halos faite de

fermions de  $m=10^{-3}$  eV,

ou bosons de  $m=10^{-24}$ eV

Relation masse-taille pour équilibre

Pour  $M \sim 10^{12} M_{\odot}$   $R \sim 30$  kpc

*Sin (1994)* courbes de rotation avec des pseudo-bosons Nambu-Goldstone

*Hu et al (2000)*, sont-ils self-interacting (SI) ou non?

Champ scalaire (Scalar Field) SFDM  $\rightarrow$  SI-SFDM

*Böhmer & Harko (2007)*

*Hui et al (2017)* revisitent le problème:  $m > 10^{-21}$  eV



$$mvR \sim h, v^2 = GM/R$$

$$MR = 9.9 \hbar^2 / Gm^2$$



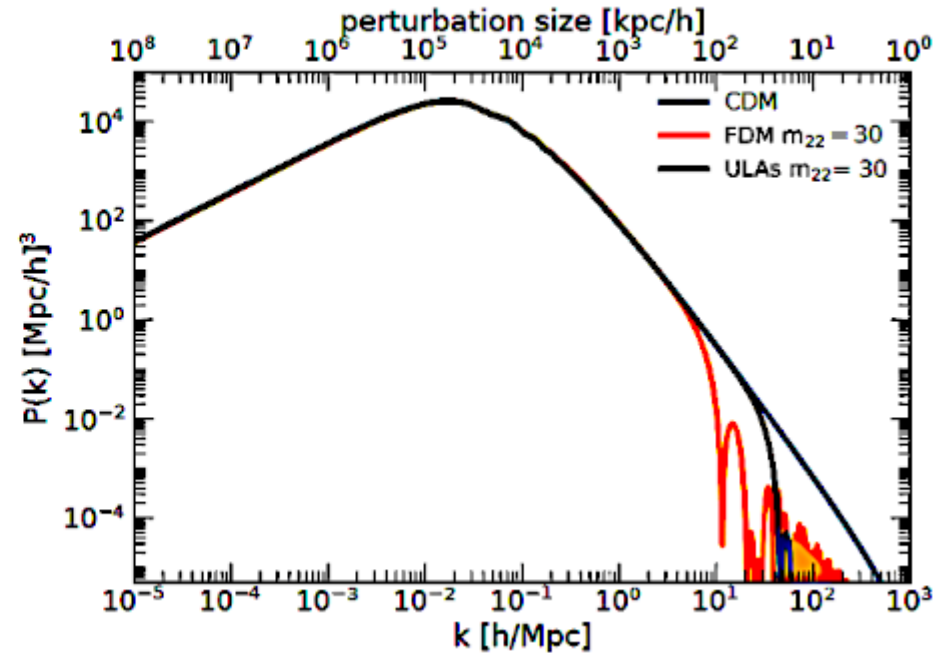
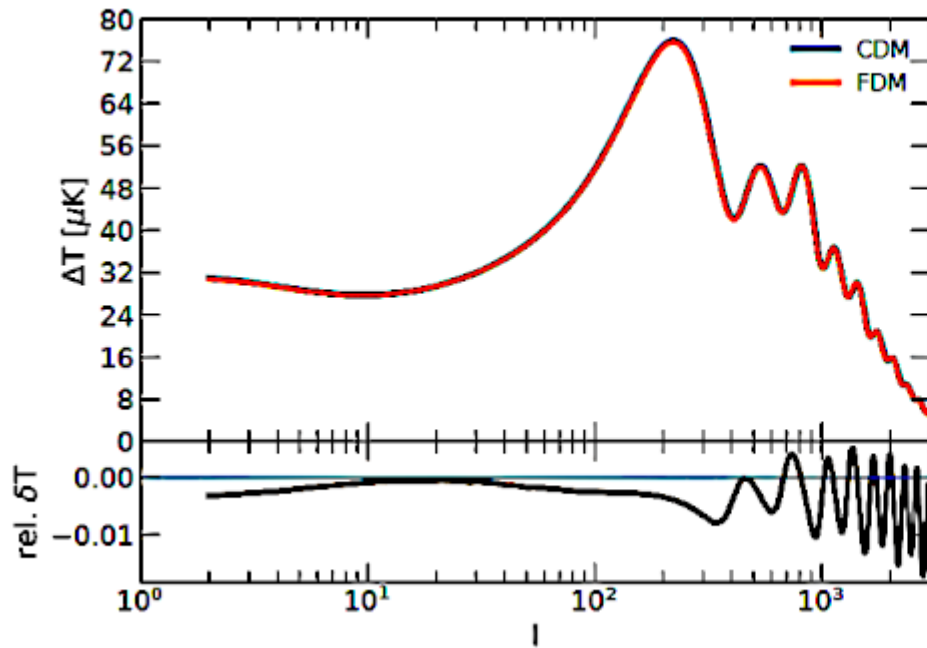
# Spectre de fluctuations

Les anisotropies de température sont indistinguables de  $\Lambda$ CDM

*Foidl & Rindler-Daller 2022*

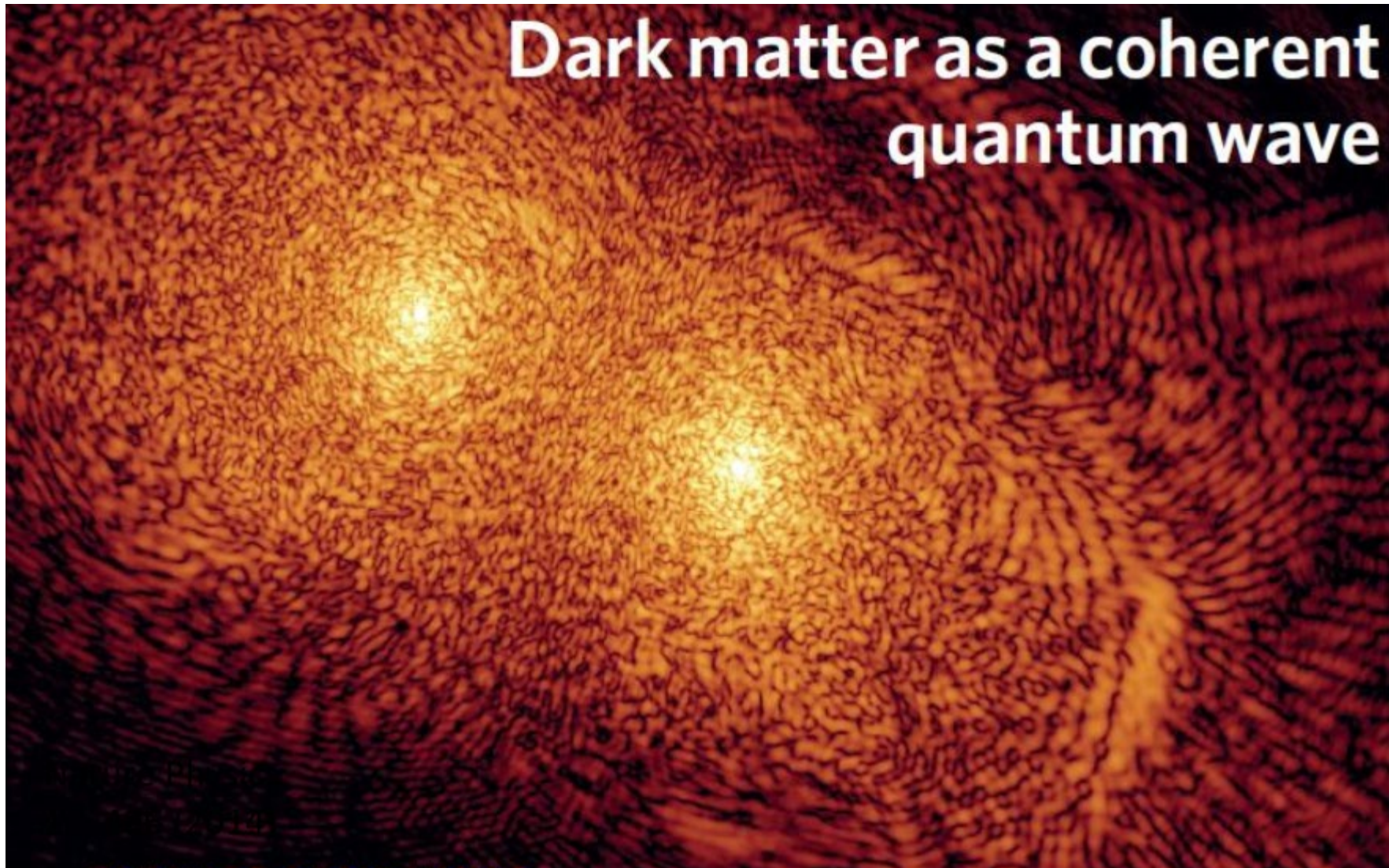
Scalar-field DM (SFDM sans self-interaction, ou FDM)

Ou axions Ultra-legers (QCD)



# Simulations AMR: eq. Schrödinger- Poisson

Coeur= soliton, Halo= aspect grumeleux + ondulatoire (Schive +2014)



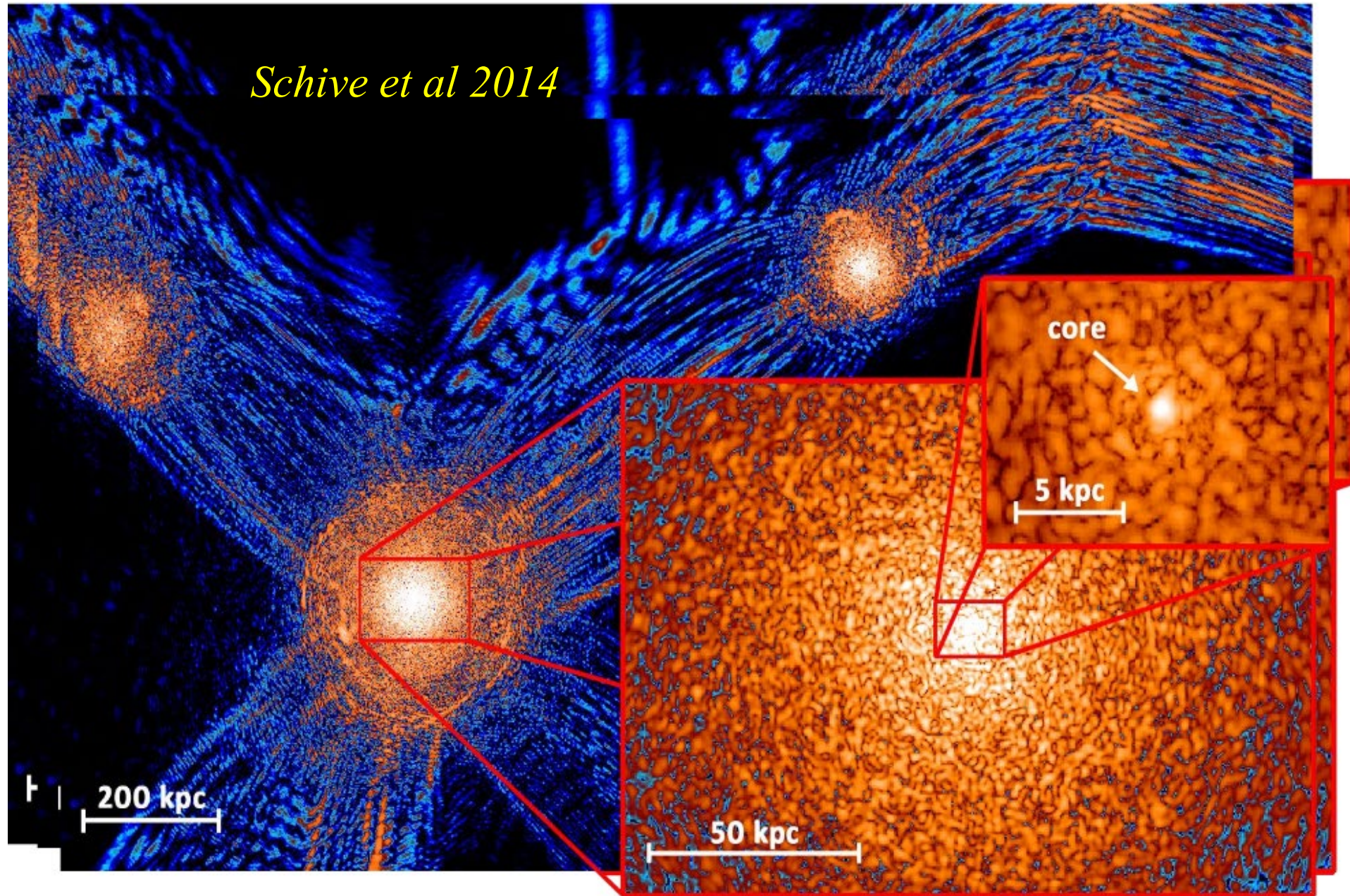
Formalisme de **Madelung** pour la mécanique quantique

→ Pression quantique pour  $x < \lambda_{\text{deBroglie}}$

Code/particules Traitant un fluide (SPH)

Ou bien sur grille RAMSES- SCALAR

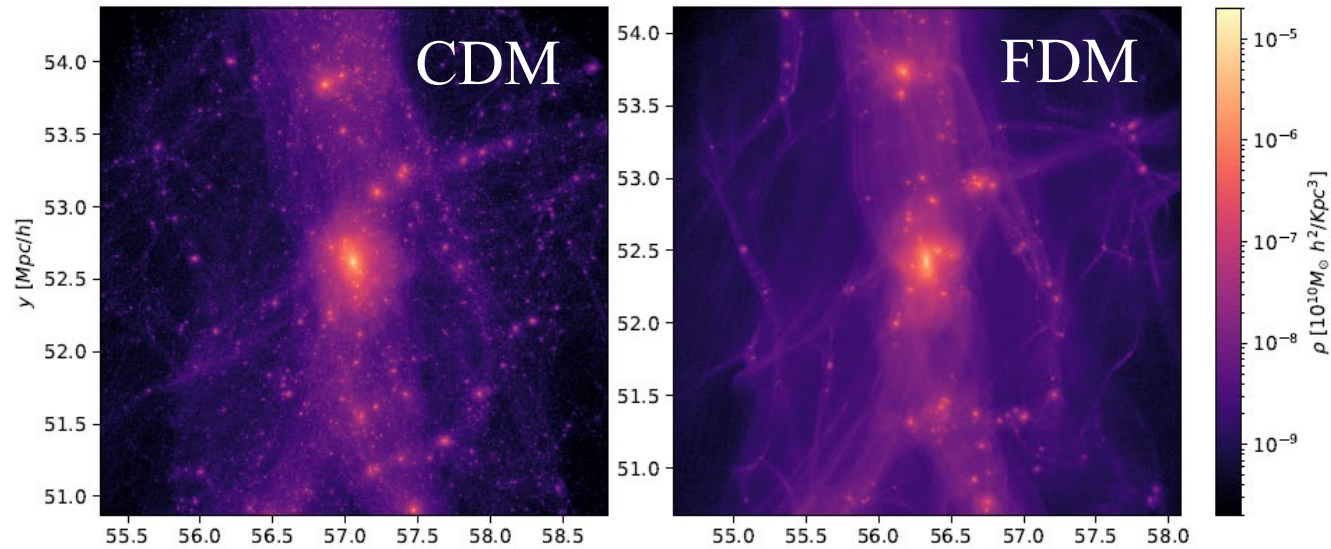
# Interferences quantiques: 9 ordres de grandeur



# Voie lactée: Aquarius, satellites

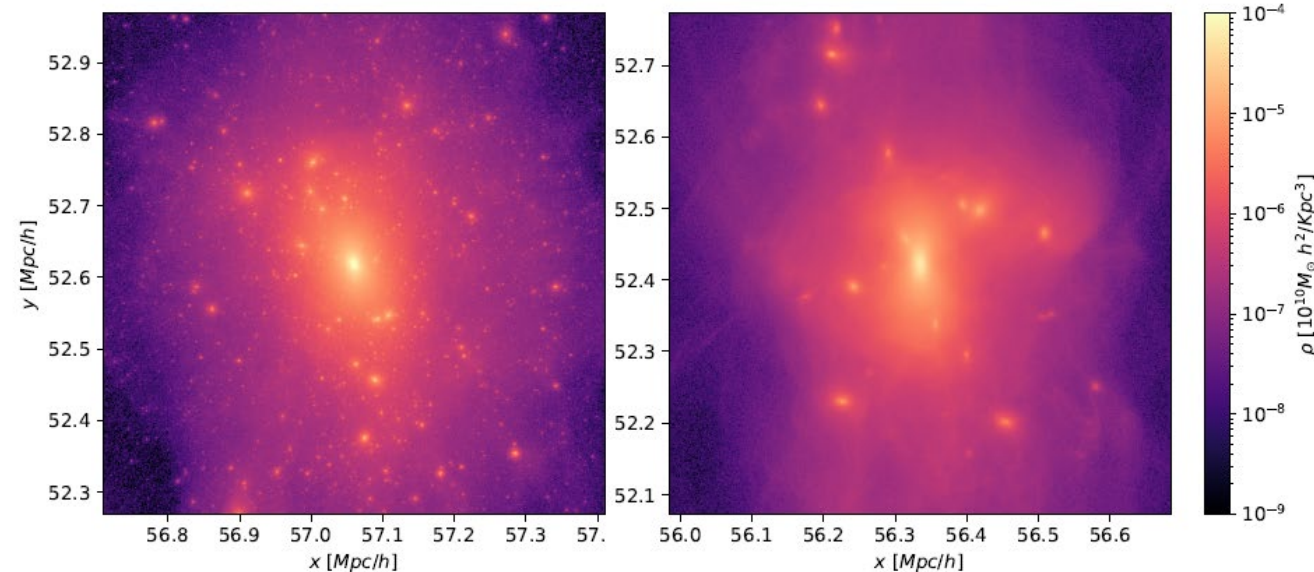
Nori et al 2023 AX-GADGET, compare avec CDM

Lois d'échelle attendues  $\rho_c \sim R_c^{-4}$  alors que observations  $\rho_c \sim R_c^{-1}$



$$\Sigma = 150 M_{\odot}/\text{pc}^2$$

Donato et al 2009



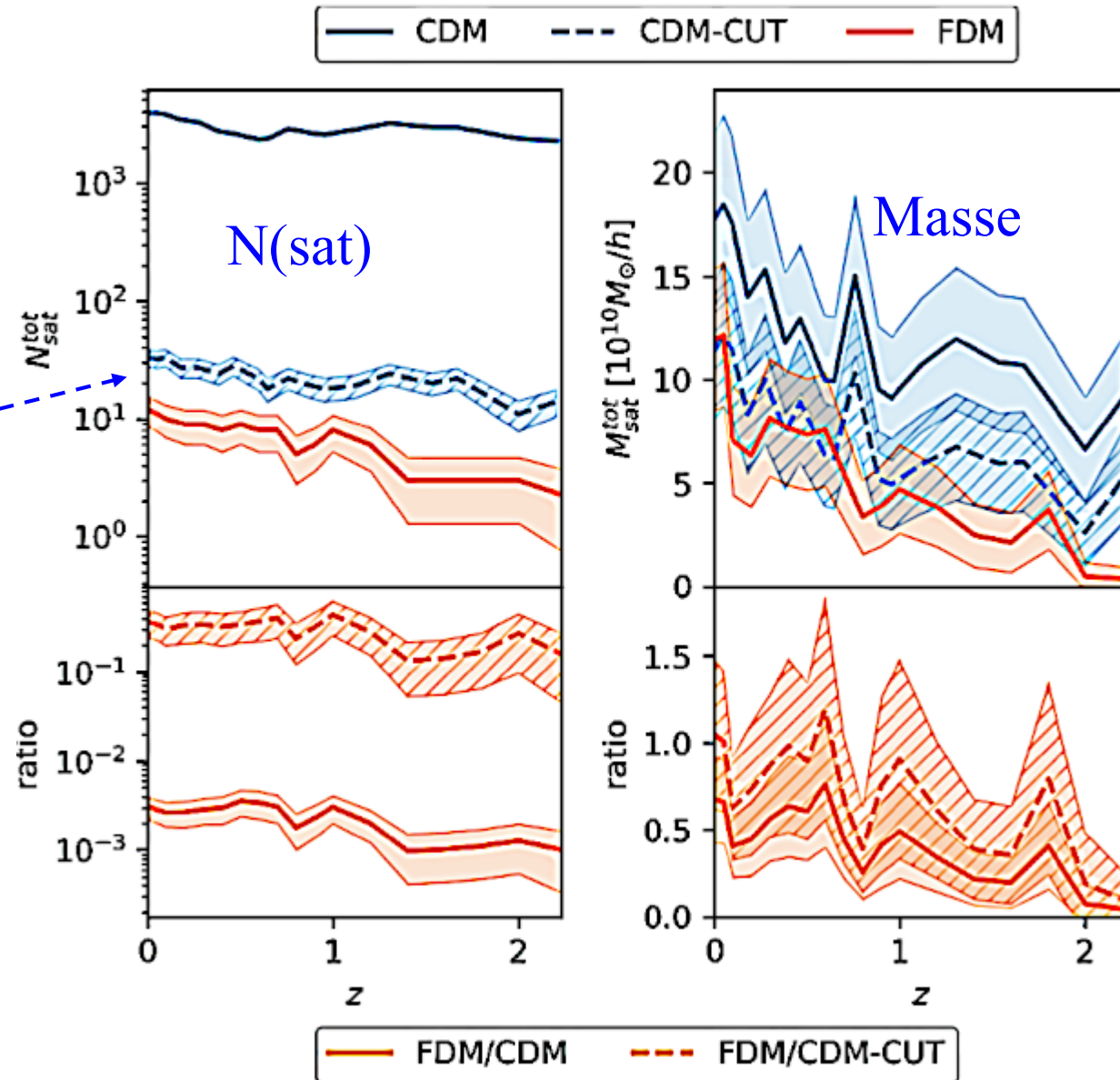
Zoom x 5

# Voie lactée: Aquarius, satellites

*Nori et al 2023*

Comparaison avec CDM  
Et aussi quand  
 $M_{\text{sat}} > M_{\text{cut}}$  seulement

(CDM-CUT)

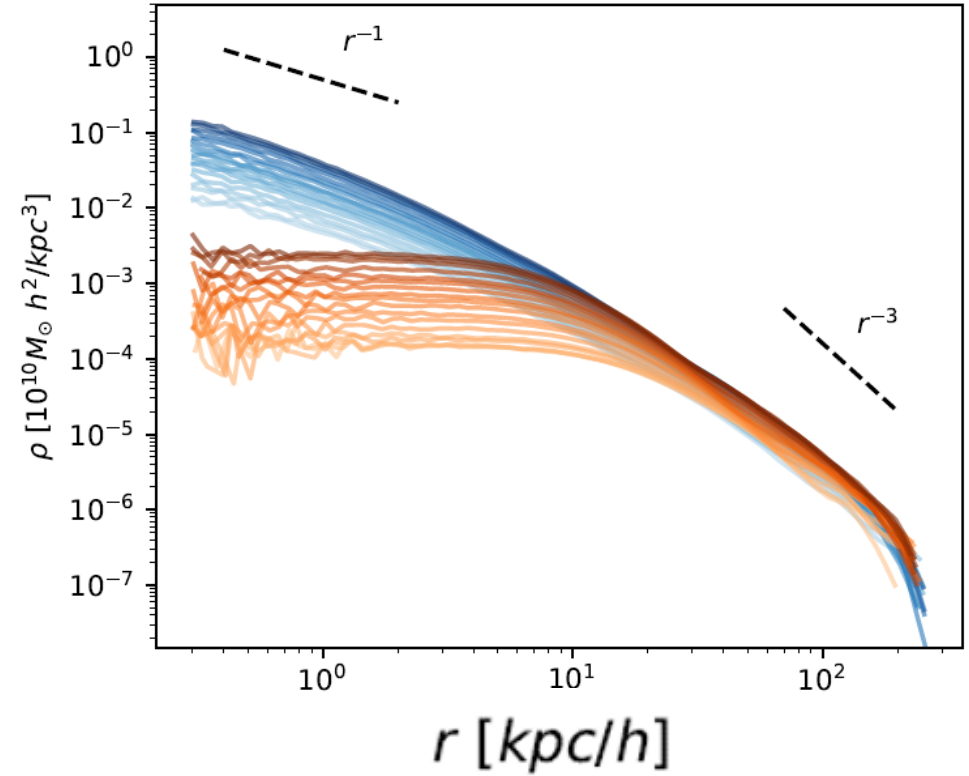
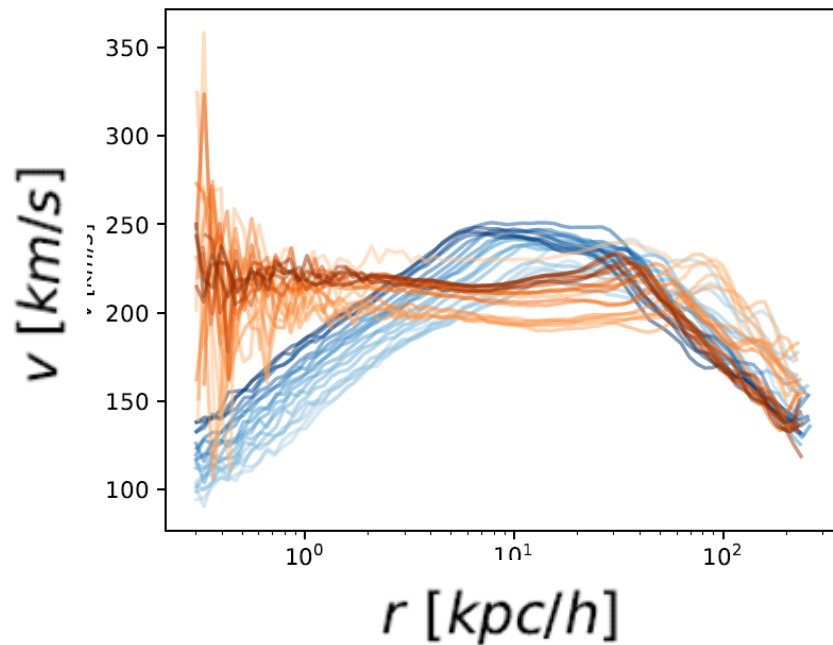


# Evolution avec le redshift

*Nori et al 2023*

$z=4$  à  $z=0$ ,  
Des courbes légères puis  
Plus sombres

CDM: bleu  
FDM: orange



Même si les courbes de densité s'aplatissent en CDM  
L'équilibre asymptotique  
n'est pas atteint à  $z=0$

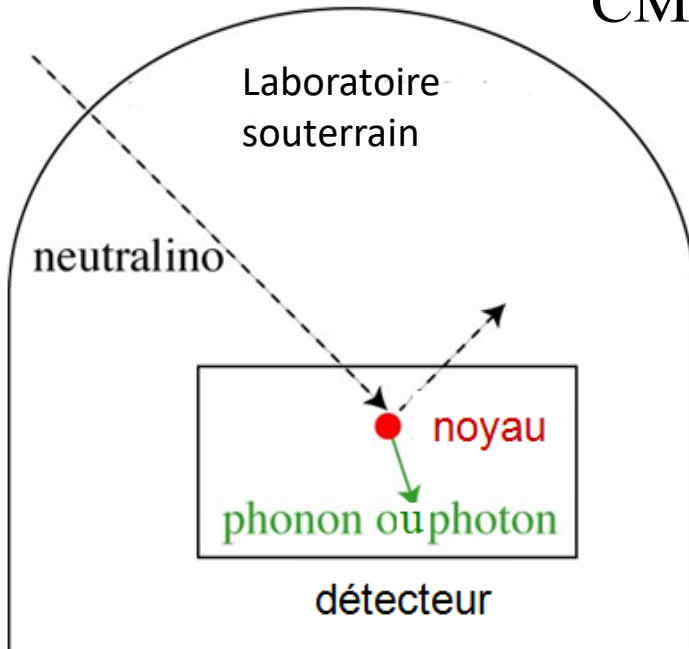
# Recherches directes

Particules formées dans les accélérateurs puissants? (LHC, 14TeV, 7000p)

Recherche **directe**: CDMS-II, Edelweiss, DAMA, GENIUS, etc



CMS, Edelweiss, ZEPLIN, DAMA, HDMS, CRESST



Les particules supersymétriques, si elles existent  $m > 2000 M_{\text{protons}}$

**DAMA: fluctuation annuelle**

**→ Pas de détection convaincante**

# Détection directe des WIMPS

- **WIMPS:** pourraient avoir une section efficace de diffusion élastique avec les noyaux, et on essaie de mesurer le recul
- Très difficile: bcp d'autres particules/processus interagissent aussi avec les noyaux → fausses détections

Dans les  $10^{30}$  baryons d'un  $1\text{m}^3$  de détecteur, on s'attend à trouver quelques événements par jour, des  $10^{13}$  WIMPS qui traversent

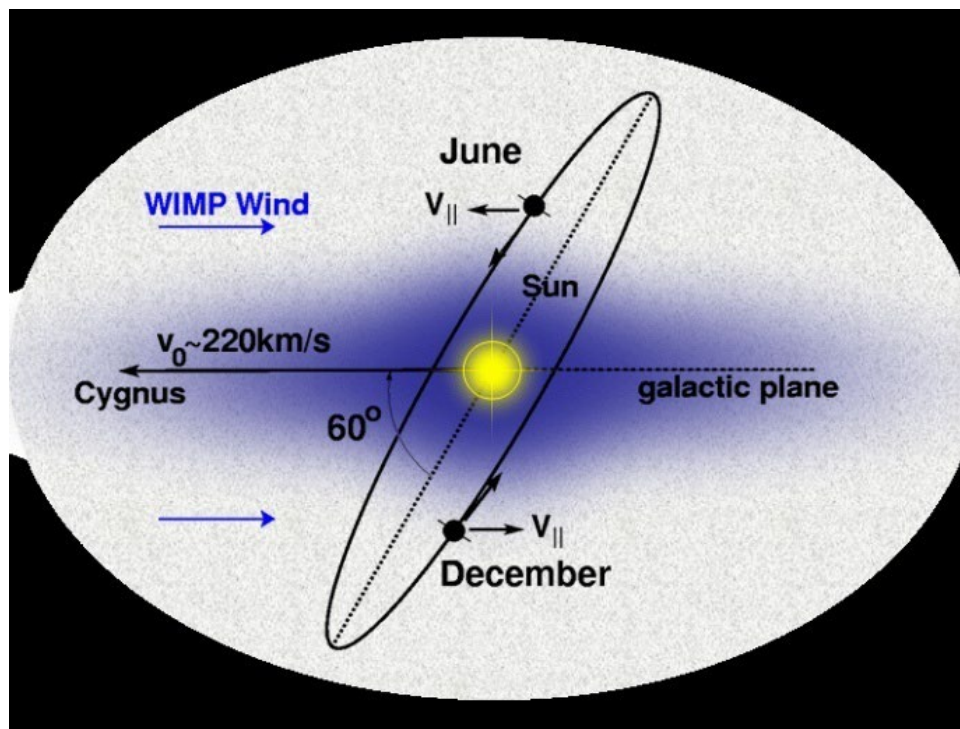
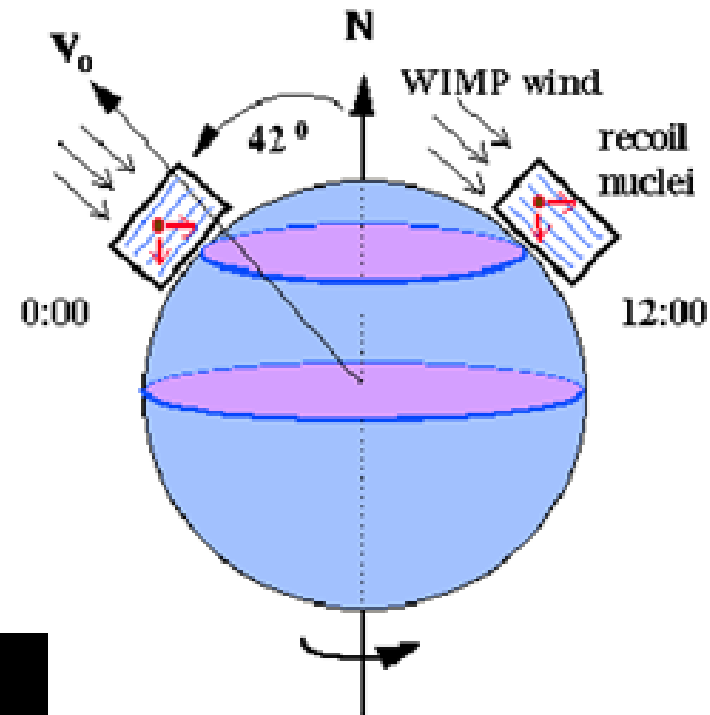
- Réduire le bruit

→ tunnels profonds

(e.g. Gran Sasso, Sanford Dakota du Sud)

- **Recherche d'une signature saisonnière**

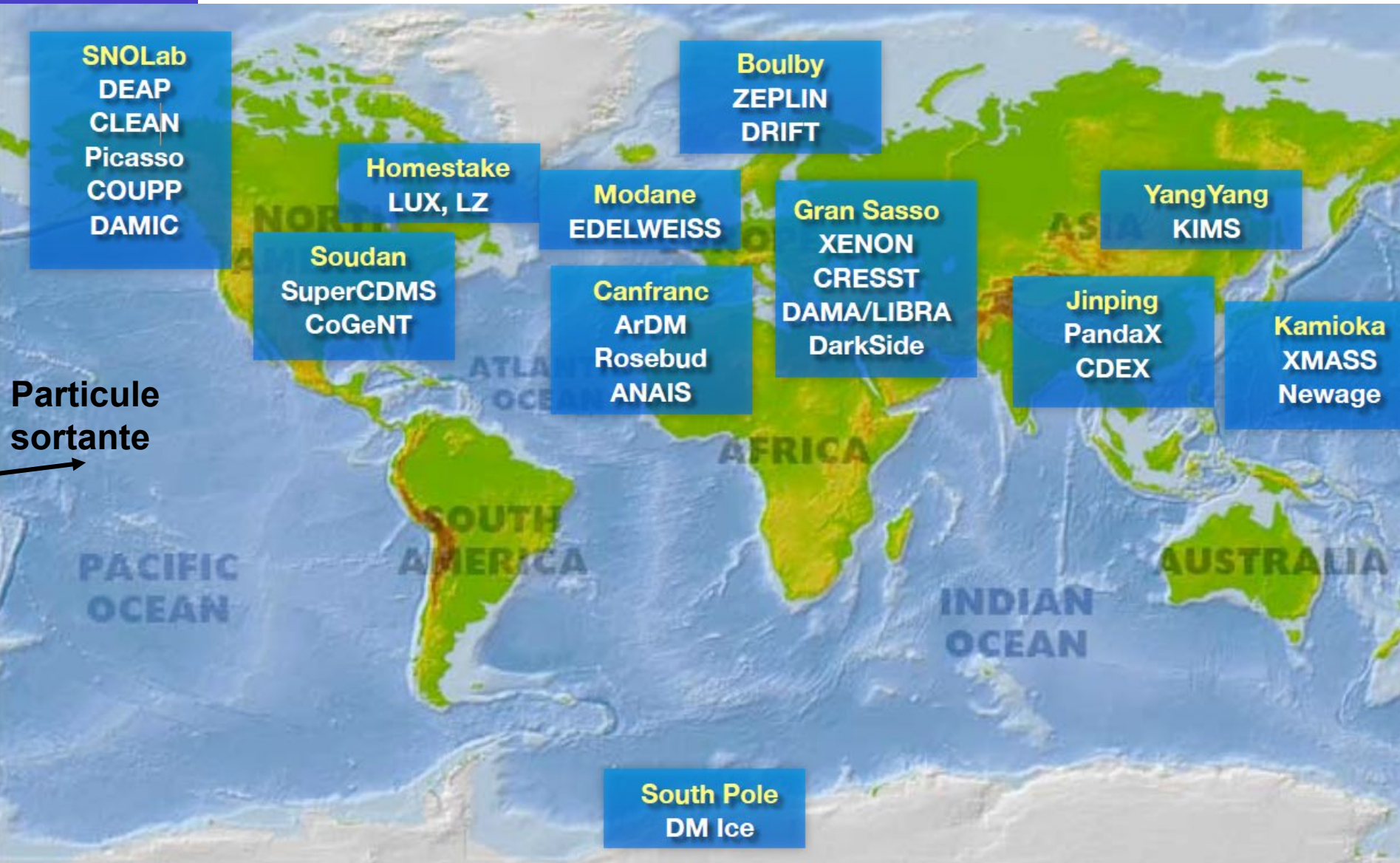
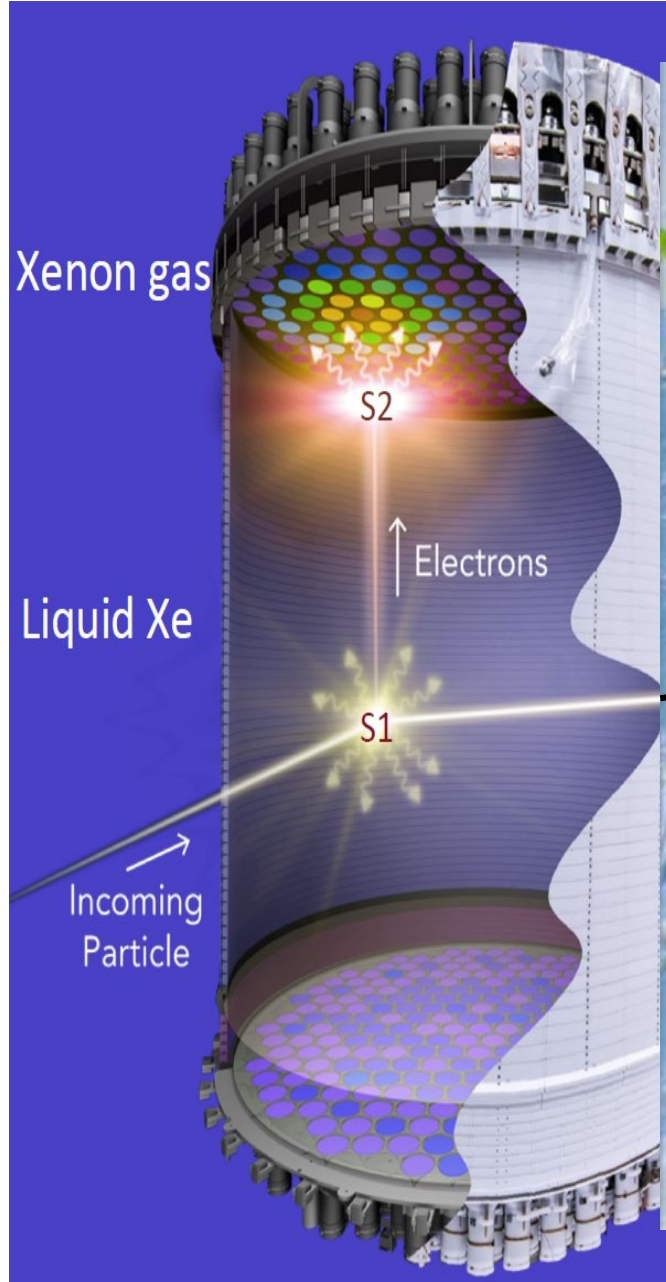
( $v \sim 30\text{km/s} + 0.5\text{km/s jour}$   
 $\sim 100\,000\text{km/h}$ )



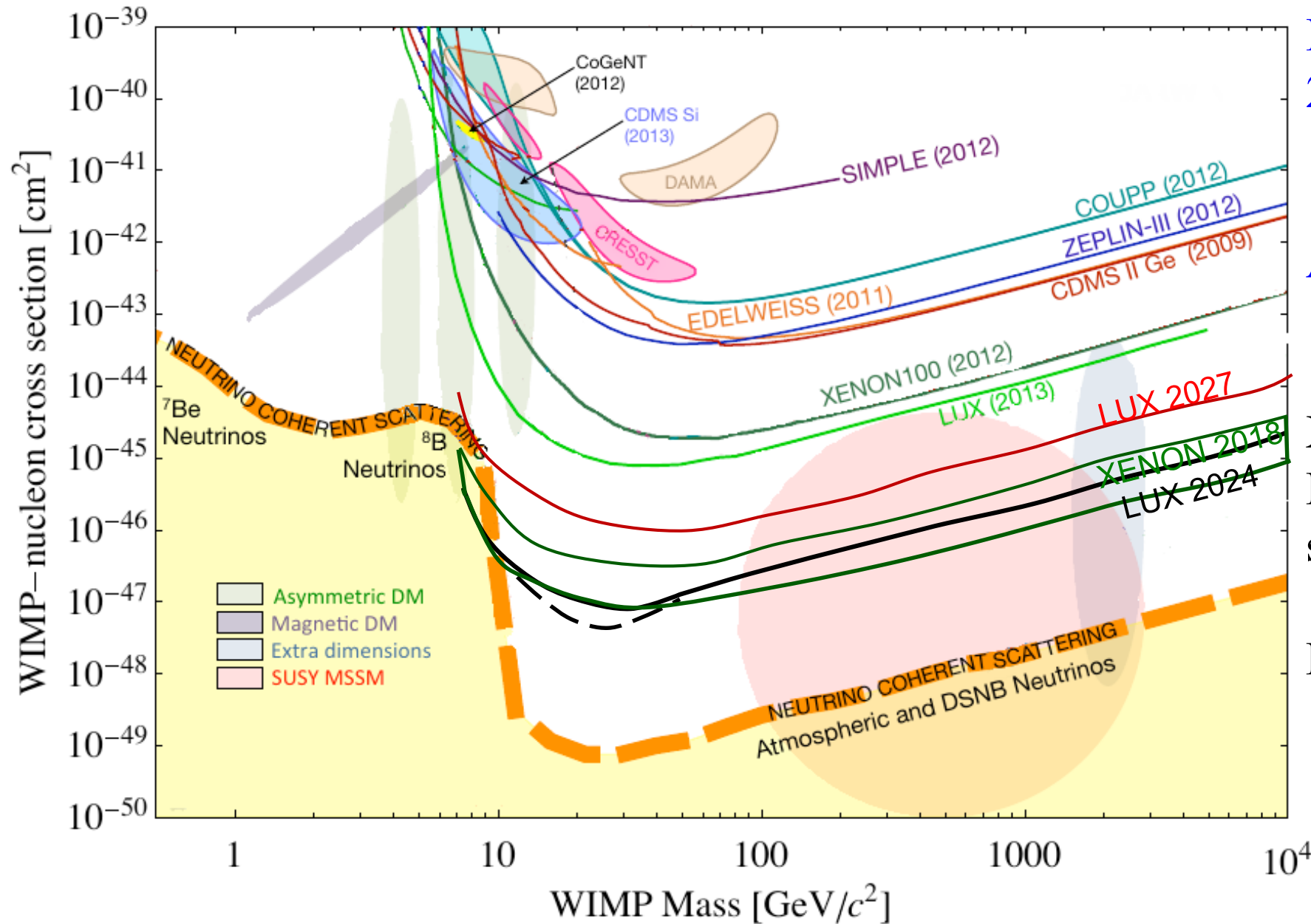


Lux-Zeplin: scintillations, 10t Xenon liquide, -100K, 2 bars

Dans le monde entier



# Limites de détection



LUX-ZEPLIN Aug 2024  
280 jours 2022-23  
10 tonnes Xenon liquide

Aucun WIMP  $> 9 \text{ GeV}/c^2$

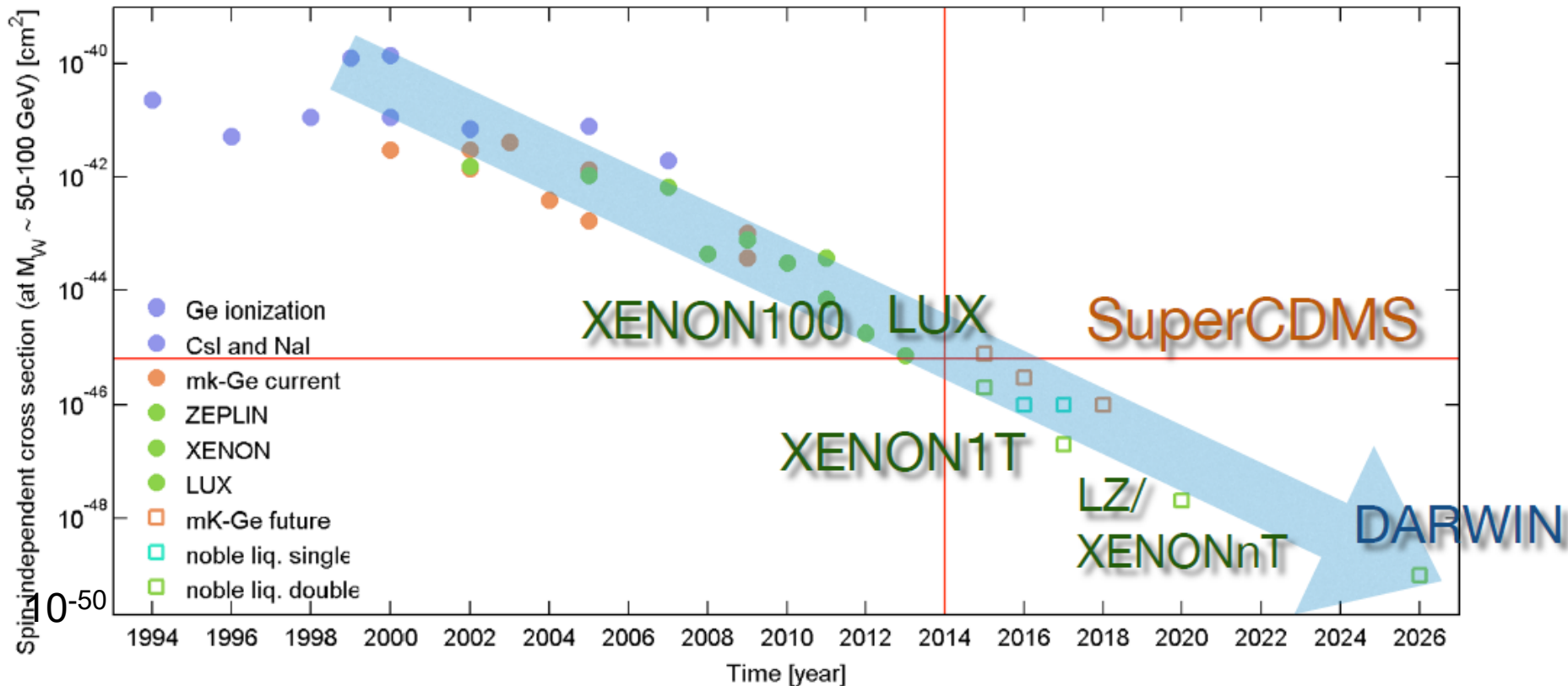
XENON 6 tonnes  
Détection des neutrinos solaires

Kamiokande  
1000t eau

# Extrapolation dans le temps

Environ un gain d'un facteur 10 *tous les 2 ans*

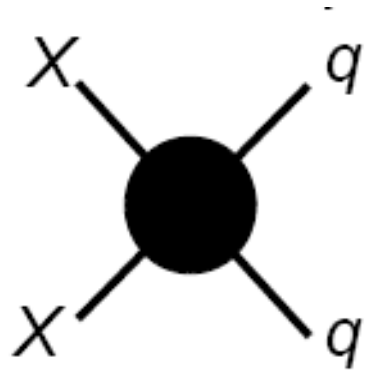
Détection peut-être en 2026...



# Annihilation: recherche indirecte

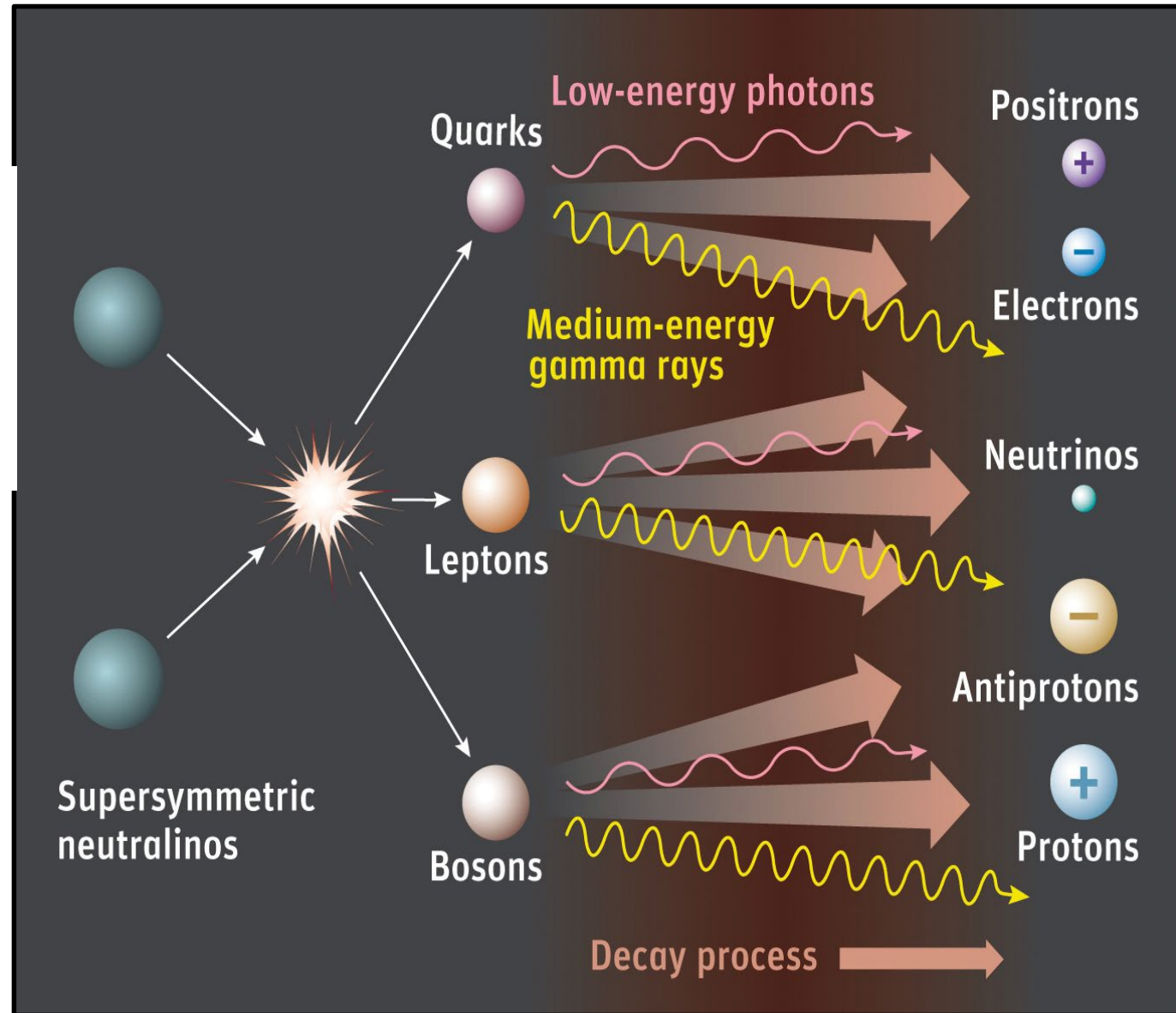
- L'annihilation des neutralinos peut produire des

- Photons
- Neutrinos
- Positrons
- Antiprotons
- Antideuteron



- La densité relique nous conduit aux taux d'annihilation

$$\langle \sigma_A v \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3/\text{s}$$



# Recherches indirectes

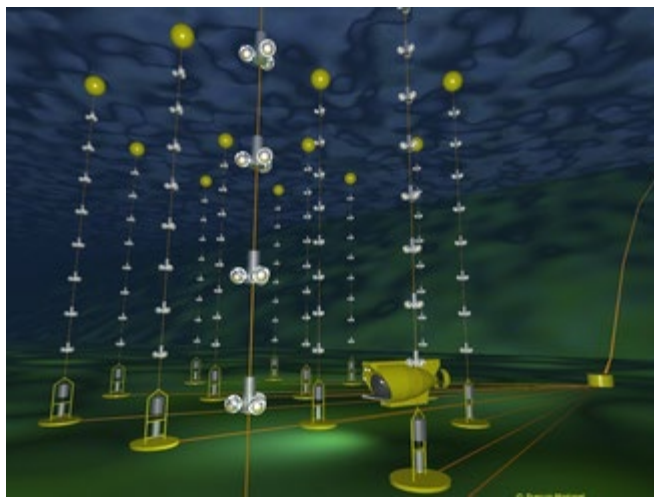
Rayons gamma de l'annihilation (Egret, FERMI, Magic)

Neutrinos (SuperK, AMANDA, ICECUBE, Antares, etc)

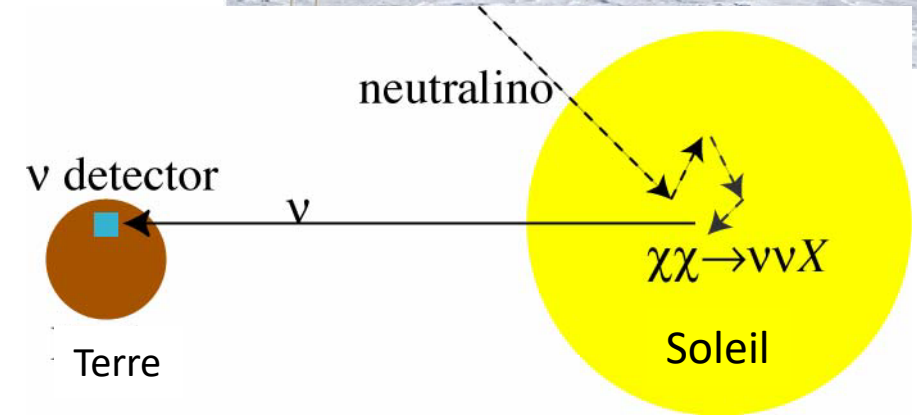
*Amanda, Pole Sud*



*Antares, Méditerranée*



IceCube

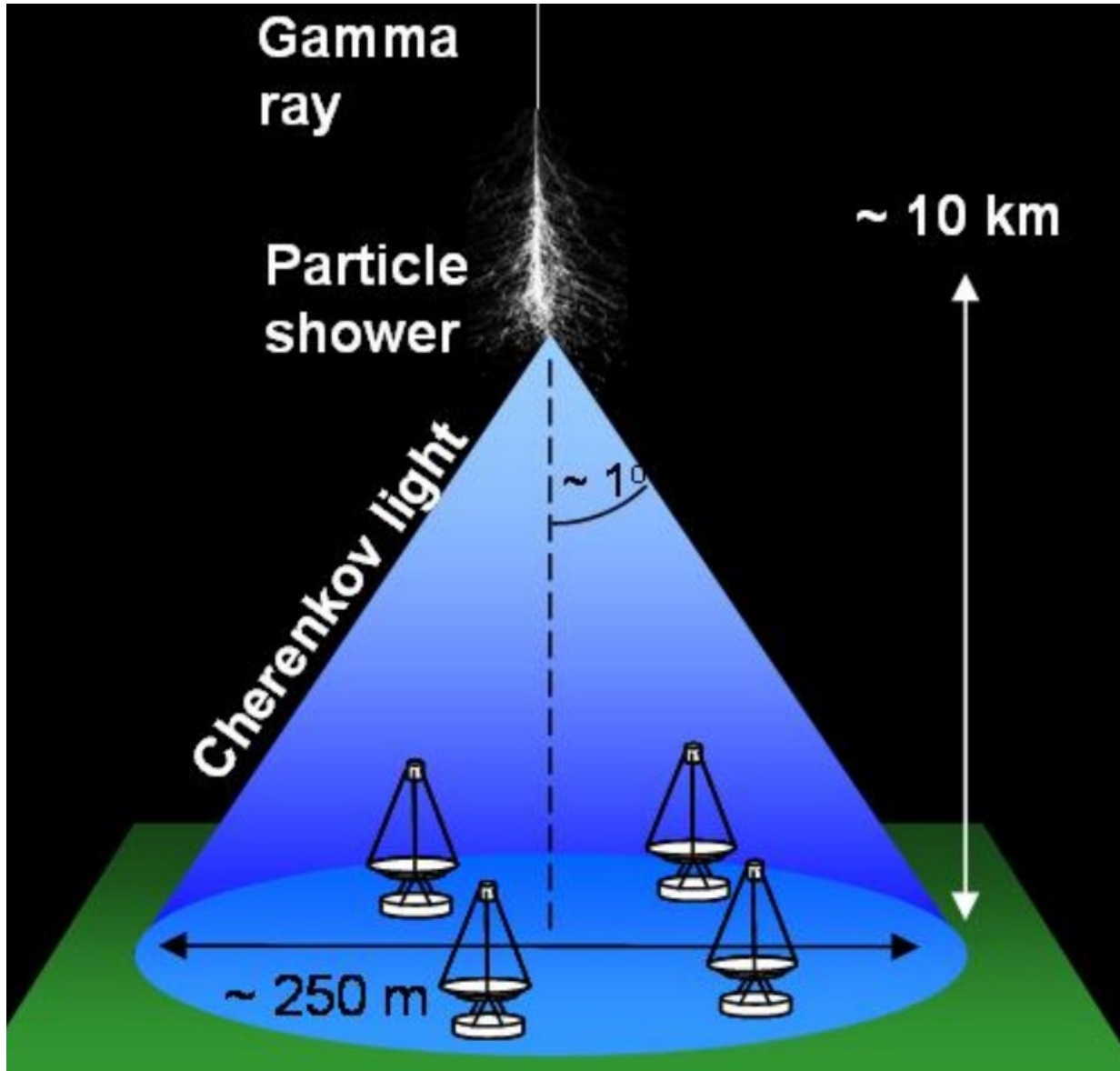


*HESS  
Namibie  
Rayons  $\gamma$*



→ Pas de détection convaincante

Le photon gamma interagit avec l'atmosphère → particules chargées  
Gerbes de particules, relativistes, qui émettent une lumière **Tcherenkov**



**HESS**, et futur **CTA**  
au Chili

$V > v_{\text{lum}}(\text{milieu})$   
→ Onde de choc

Lumière émise pendant  
qq nano secondes

CCD sensible à des  
Impulsions

**Atmosphère utilisée  
comme calorimètre**



# Flux d'annihilation

Le neutralino est sa propre anti-particule

$dn/dt = \langle \sigma v \rangle n^2 \rightarrow$  Rayons gamma émis

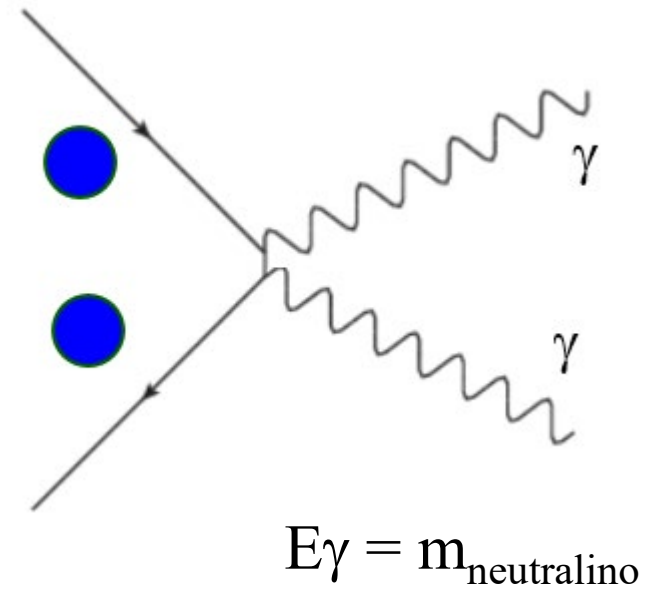
$$\text{Flux (E)} = dn/dE \left( \langle \sigma v \rangle / 8\pi m^2 \right) \int \rho^2 dl$$

Flux maximum au centre des galaxies, où les simulations prédisent une cuspide  $\rho \sim 1/r$

Est-ce que les flux des sous-halos est détectable?

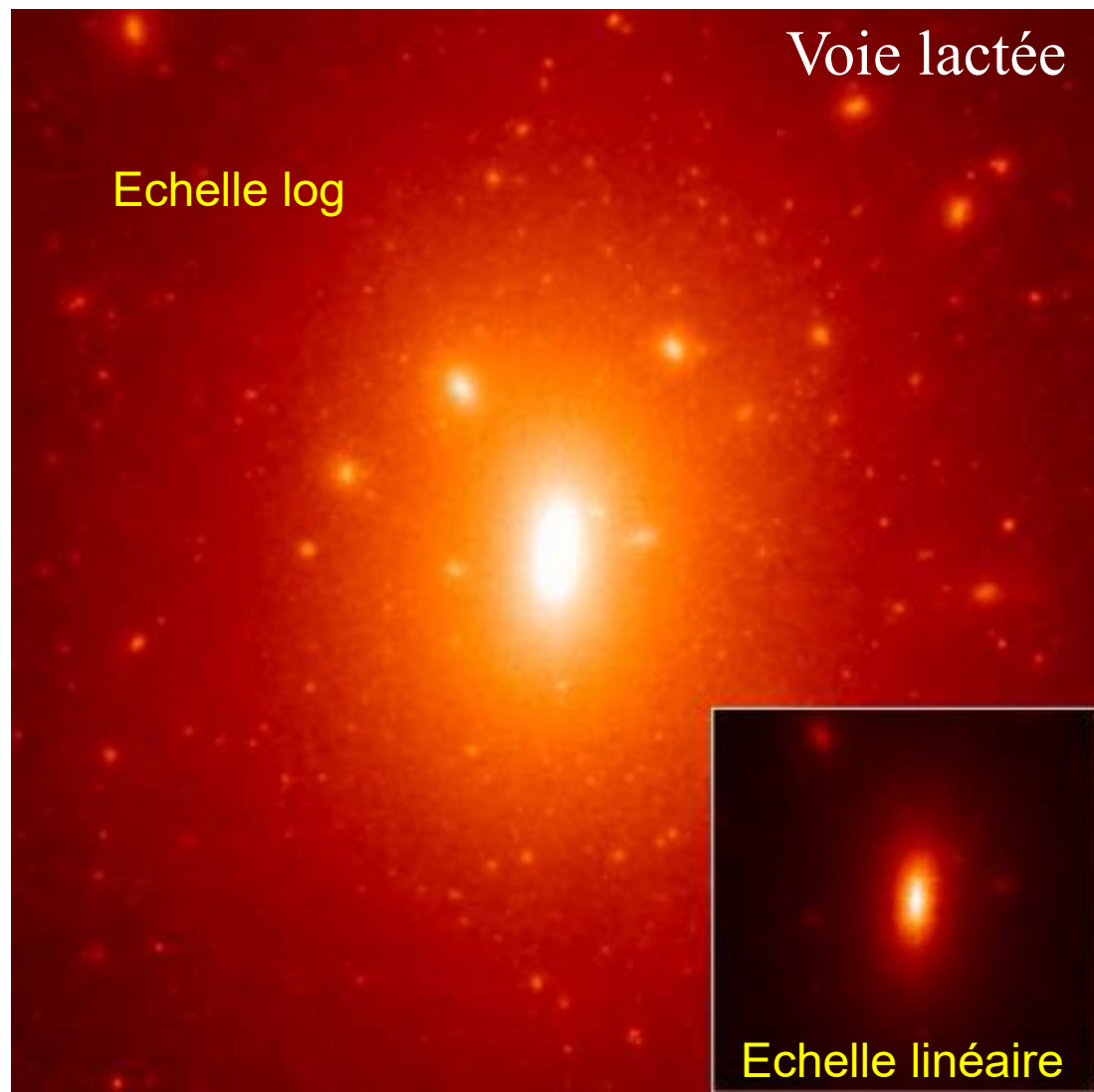
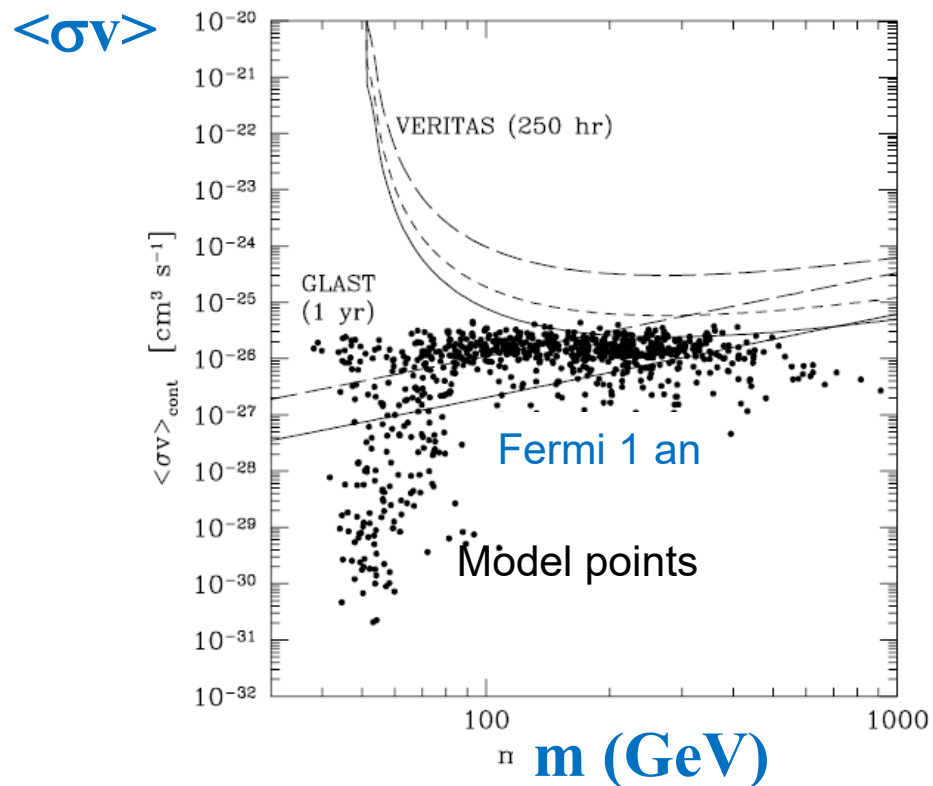
Simulations numériques (Stoehr et al 2003, Pieri et al 2009)

$\rightarrow$  Les centres des satellites devraient être 10-1000 fois inférieurs



# Prédictions du Flux d'annihilation

Image pondérée par la densité → Flux de gamma

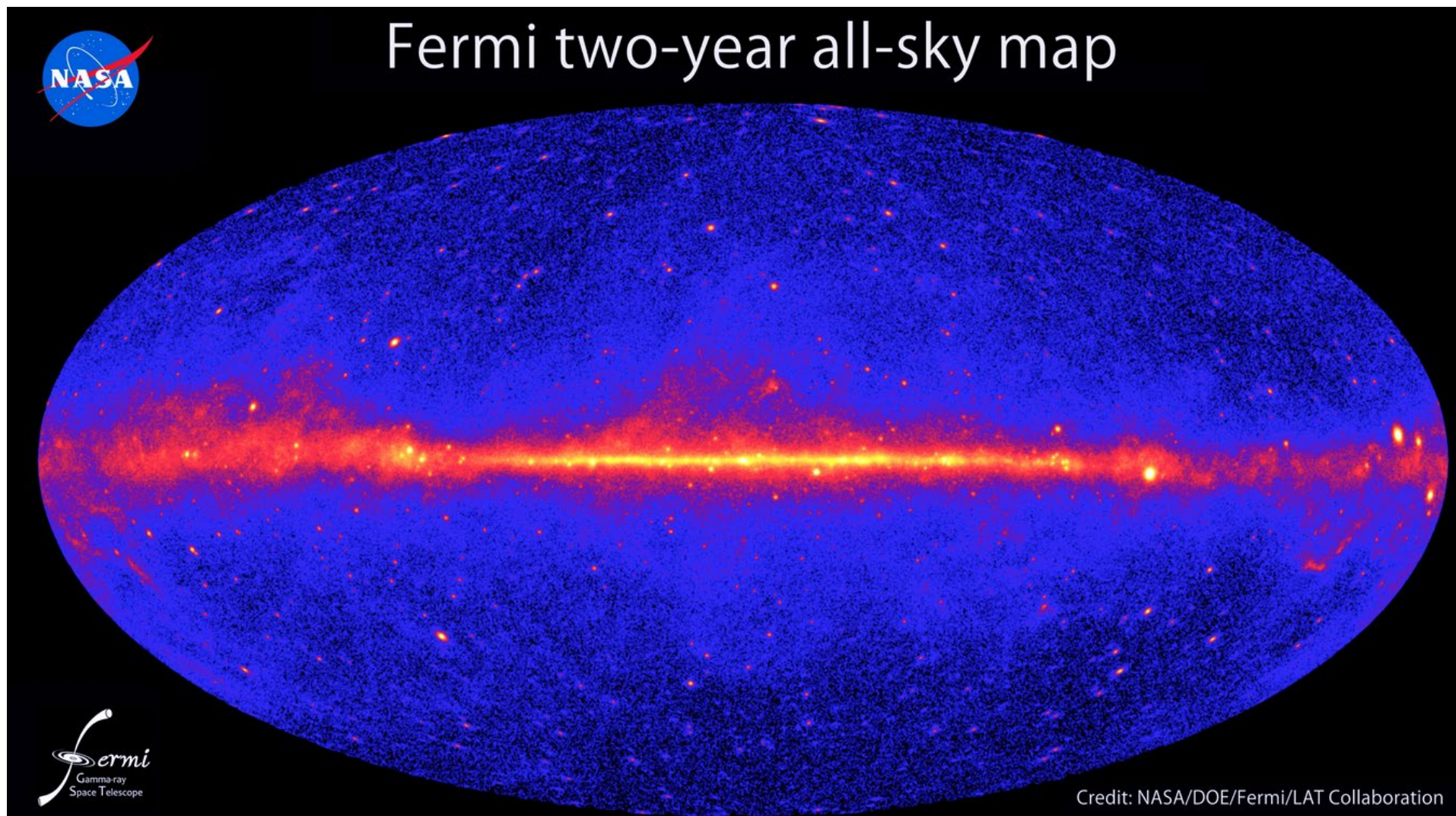


Limites de détection  $3\sigma$   
Particules MSSM (minimal SUSY)

*Stoehr et al (2003)*



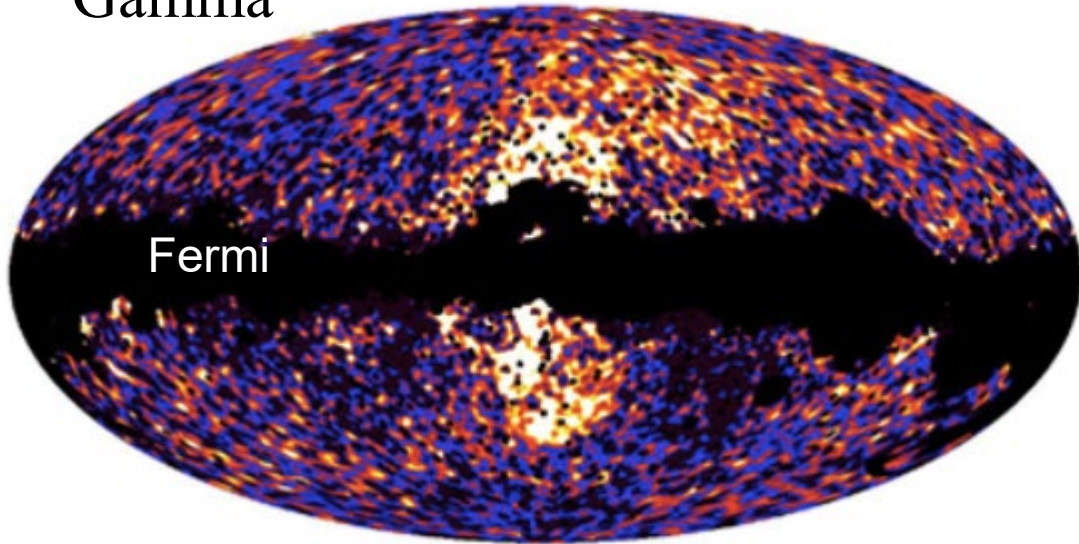
# Résultats de Fermi



**Trous noirs, AGN, jets, Gamma-ray bursts, novae et super-novae +  
Eruptions solaires, pulsars, origine des rayons cosmiques 10keV-300GeV**

# Problème du centre galactique

Gamma



Nature de l'émission  $\gamma$

Plasma thermique? Synchrotron AGN?  
ou Flux d'annihilation?

Emission cm et mm

WMAP (*Finkbeiner 2014*)

Synchrotron des e- dans B

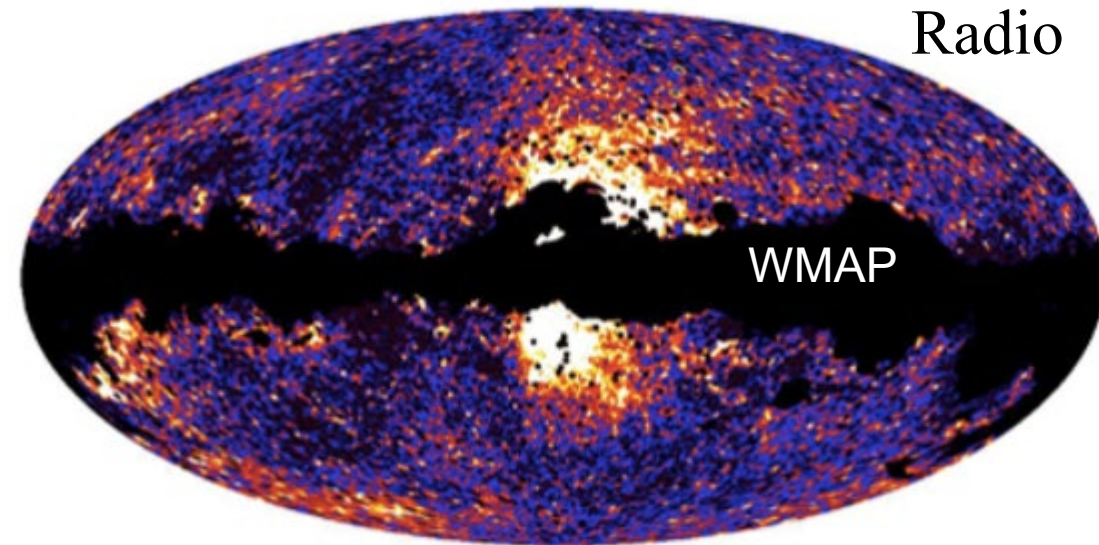
Enormément de sources (SNe, pulsars)

Possibles dans le centre des

Galaxies *Su et al 2010*

→ Les meilleures sources possibles  
sont le centre des **galaxies naines dSph**  
dominées par la DM, mais sans baryons

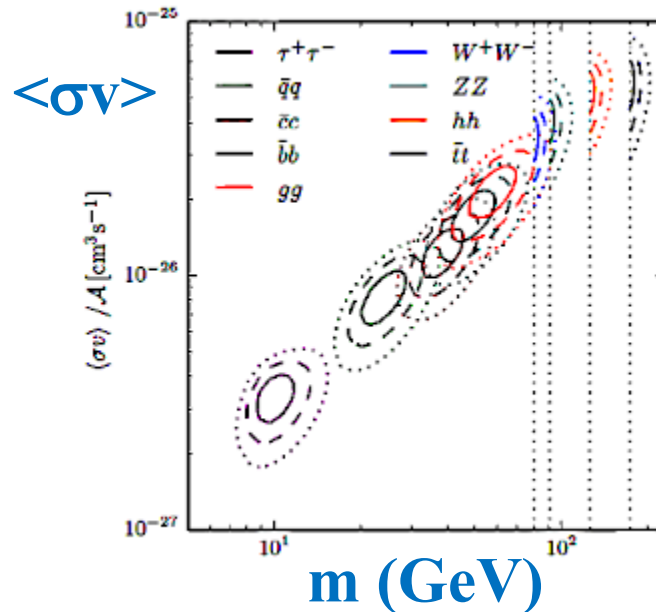
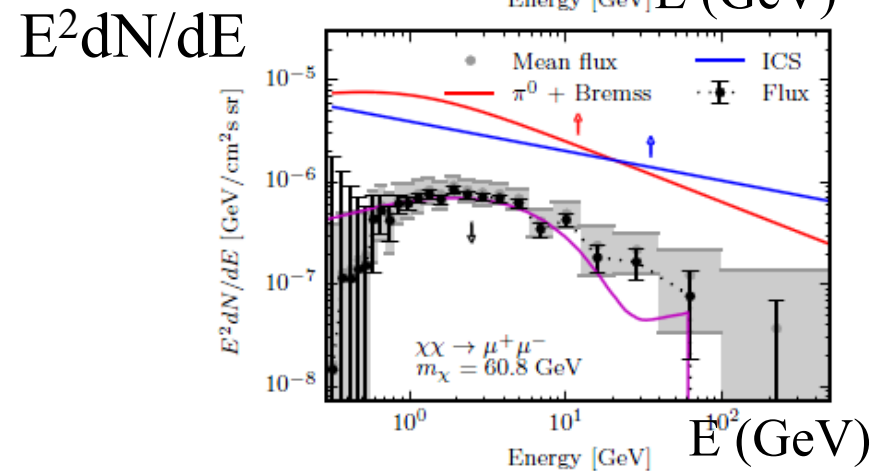
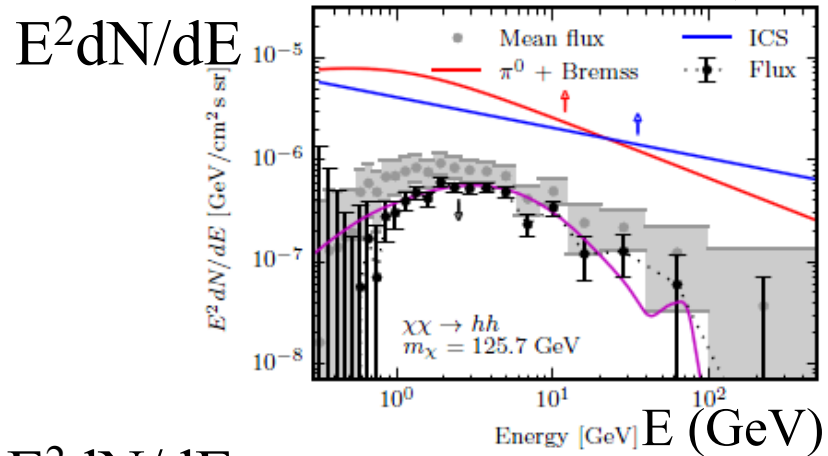
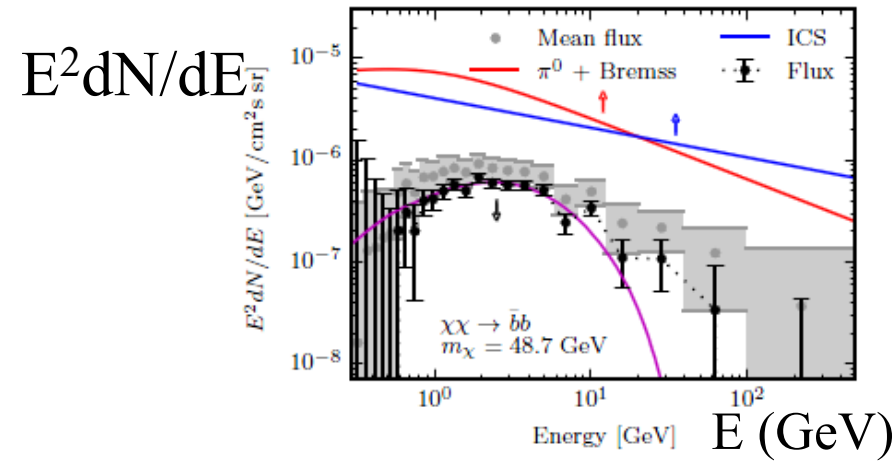
Radio



# Excès à 2 GeV

Emission astro de fond: free-free (thermique),  
 Rayons cosmiques + nucléons  $\rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma$   
 Compton inverse (IC)  
 (assez diffus pour ressembler à la matière noire MN)

Une modélisation de ces fonds astronomiques pourrait  
 donner lieu à l'excès à 2 GeV



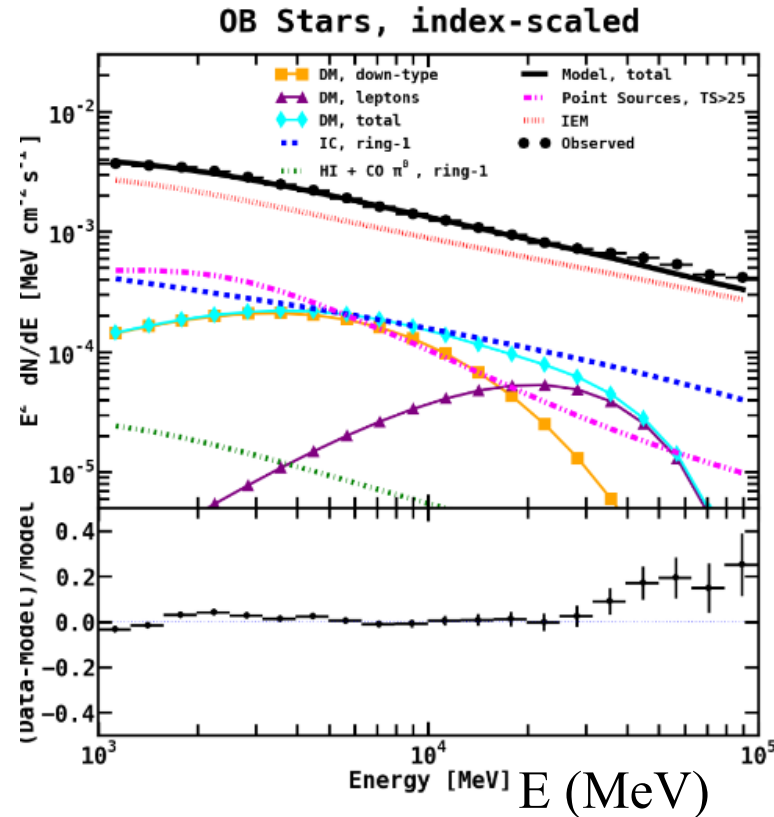
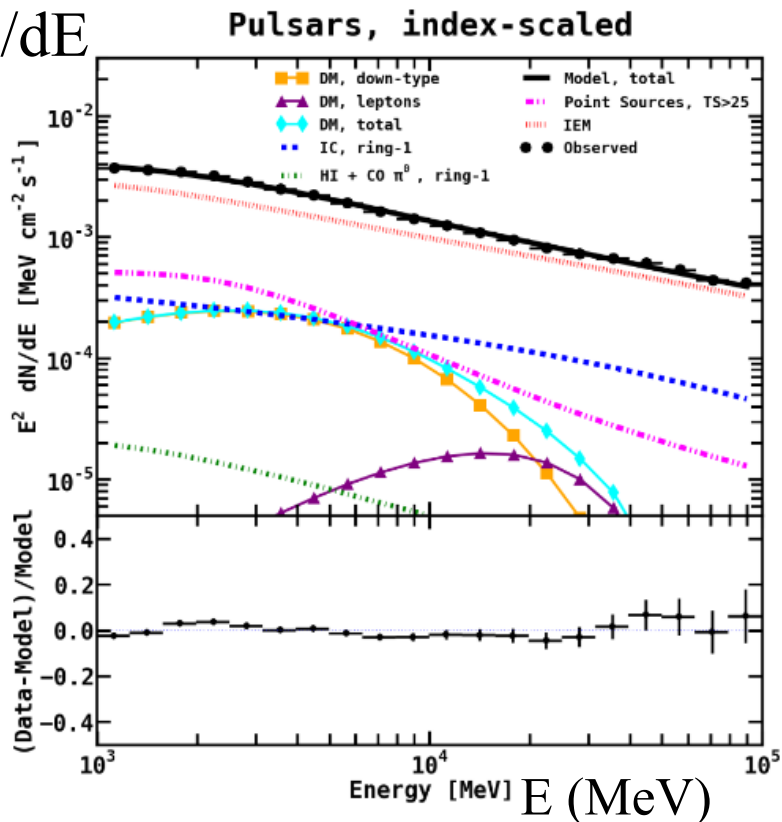
Si MN, alors  
 $M \sim 50$  GeV  
 Avec une grande  
 Variabilité  
 (45-120 GeV)

# Reste-t-il place pour la matière noire?

La nature de l'émission: excitation hadronique (collision p-p) insuffisante  
 Nécessaire d'avoir un jet de plasma venant du centre, mélangeant processus hadronique et leptonique, (*Cheng K. et al 2014*)

Si on exclut les sources astrophysiques, excès d'émission diffuse au GeV  
 Mais il faut supposer un cusp de NFW

$E^2 dN/dE$



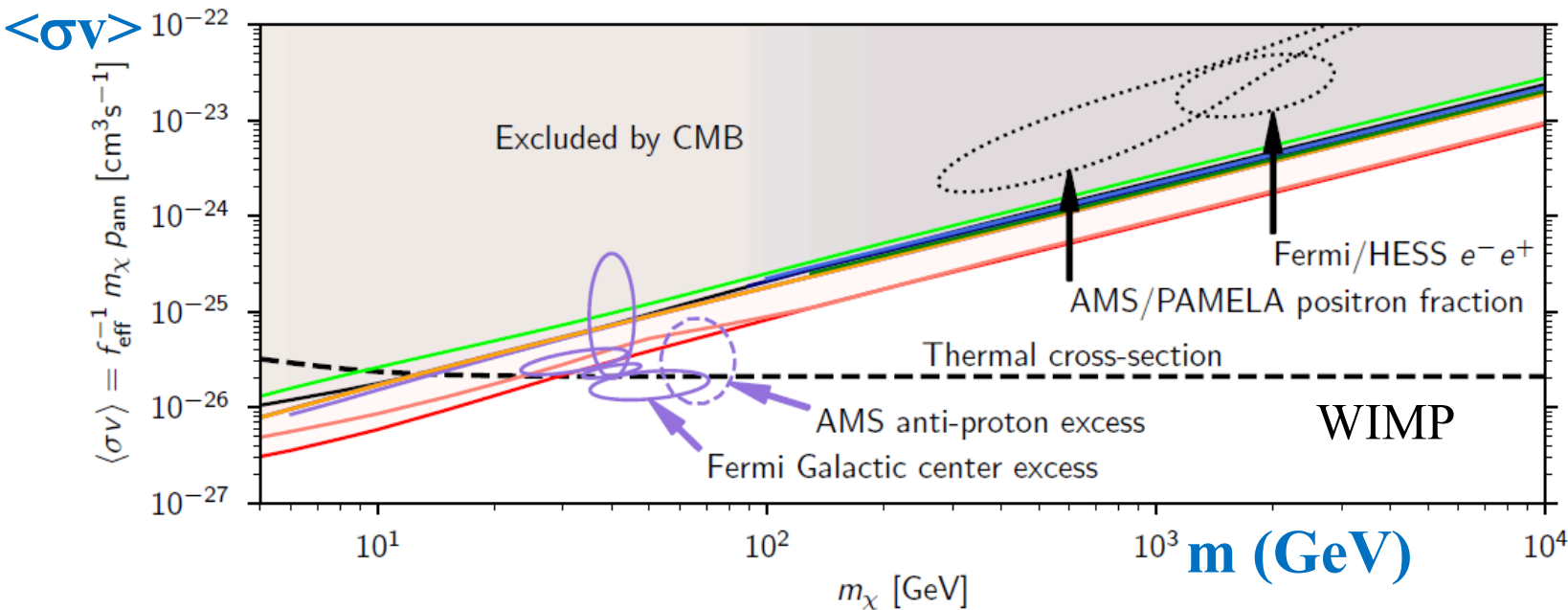
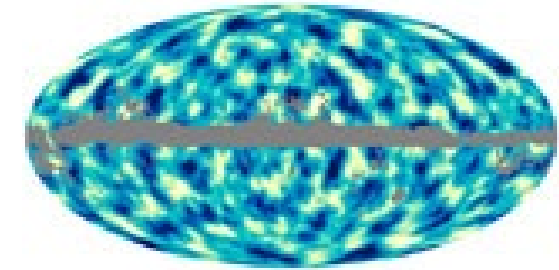
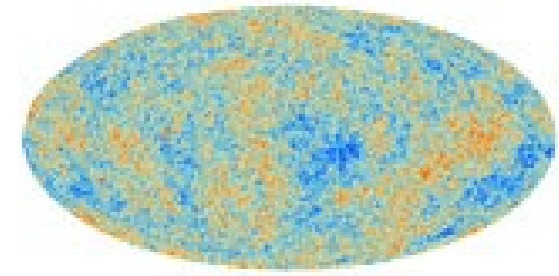
M= 50-190 GeV  
 Interaction vectorielle  
 déjà éliminé par Lux  
 Reste scalaire

*Karwin et al 2017*

# Planck – MN- Polarisation

Résultats Planck de 2018 (Collaboration Planck, 2020, cosmo parameters)

Carte de la matière noire, obtenue par effet de lentille gravitationnelle



- $e^+e^-$
- $\mu^+\mu^-$
- $\tau^+\tau^-$
- $q\bar{q}$
- $c\bar{c}$
- $b\bar{b}$
- $t\bar{t}$
- $W^+W^-$
- $Z^0Z^0$
- $gg$
- $\gamma\gamma$
- $hh$

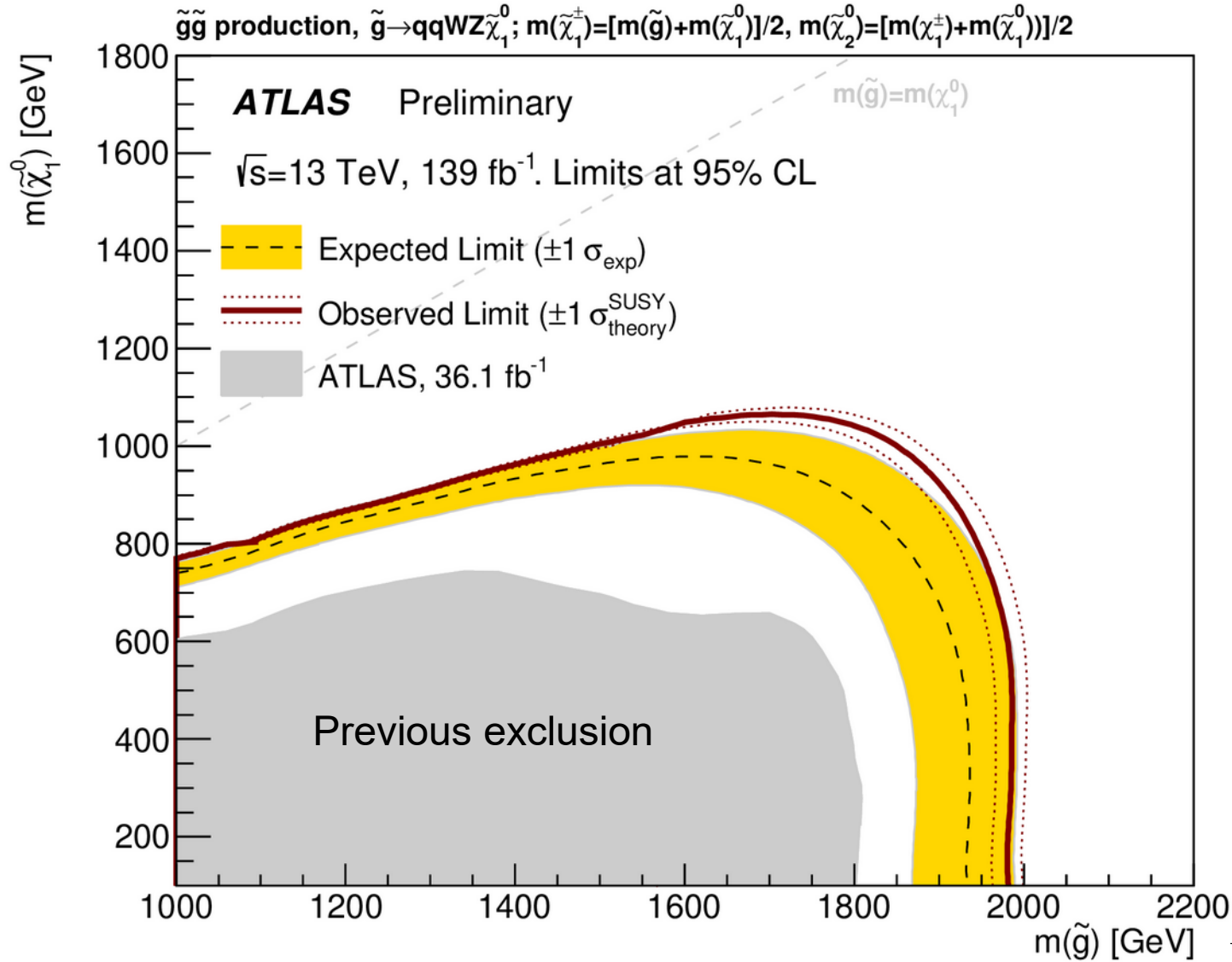
$$p_{\text{ann}} < 3.2 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^3/\text{s} / \text{GeV}$$

Contraintes sur l'énergie émise par l'annihilation de la matière noire: permet d'exclure l'interprétation de l'excès de positrons de Fermi, AMS-02, PAMELA ...

Contrainte sur les neutrinos primordiaux (interagissant avec les photons par la gravité) Ils sont  $N_\nu = 3$  *(conforme au modèle standard)*

# Contraintes du CERN

Toujours pas de particules SUSY au LHC, lors de collision p+p



**En jaune**  
**Zone d'exclusion**  
**2024**

Limites sur gluino  $g$ ,  
Neutralino  $\chi$   
et s-top quark

Masses de qqTeV, loin de l'idéal  
pour résoudre le pb de hiérarchie

Masse du gluino

# Gravité modifiée: MOND

*Milgrom 1983*

40ans!

- Très bons fits des courbes de rotation
- Relation Tully-Fischer baryonique
- $\rho_0 r_0 = \Sigma_0 \sim 150 M_\odot / \text{pc}^2$

**Nouveau** Aether Scalar Tensor,  
pour reproduire l'Univers jeune  
Binaires d'étoiles: débat  
Et dans le système solaire?

## Problèmes dans les amas de galaxies

- $g > a_0$ , masse manquante
- Naines dans Coma, ne ressentent pas l'effet du champ extérieur (EFE)



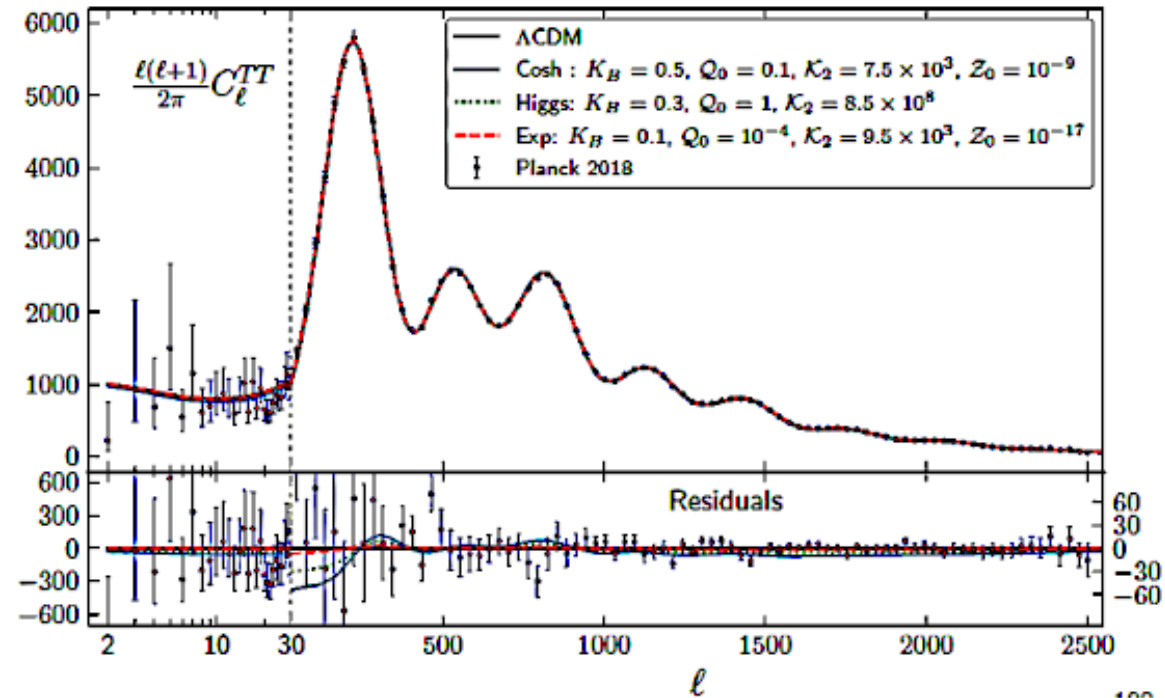
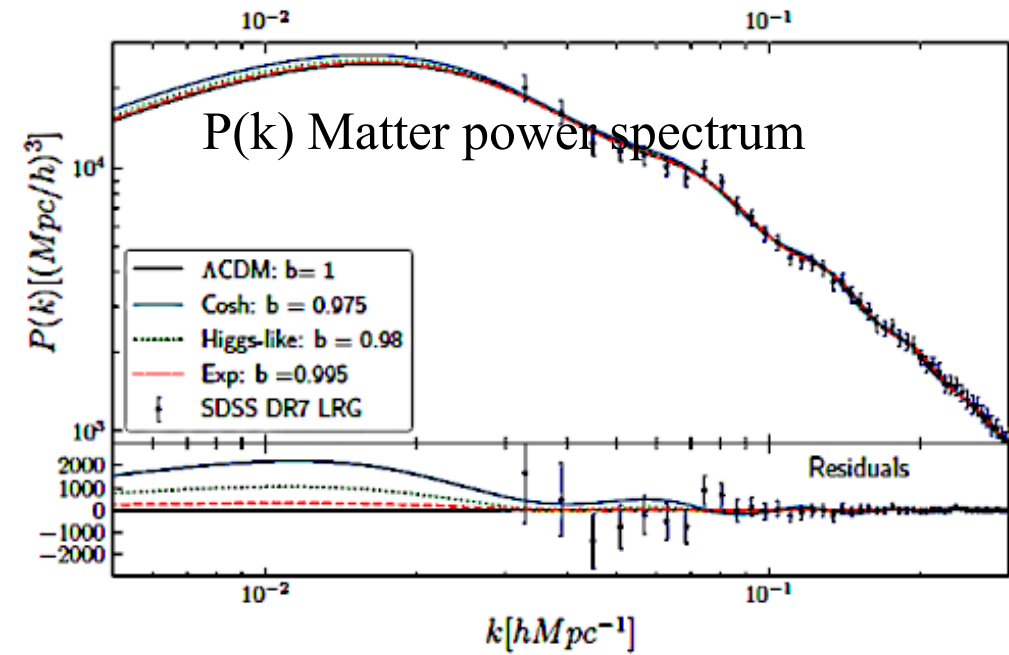
# Aether Scalaire Tenseur (AeST)

AeST introduit par Skordis & Zlosnik (2021)

Garde le « unit-time-like » champ vectoriel TeVeS  
 → reproduit les lentilles gravitationnelles  
 mais seulement un tenseur, →  $c_{\text{GW}} = c$

Fluctuations acoustiques et  
 spectre de puissance reproduits

Champ scalaire: pas de masse  
 Modifie le champ des baryons





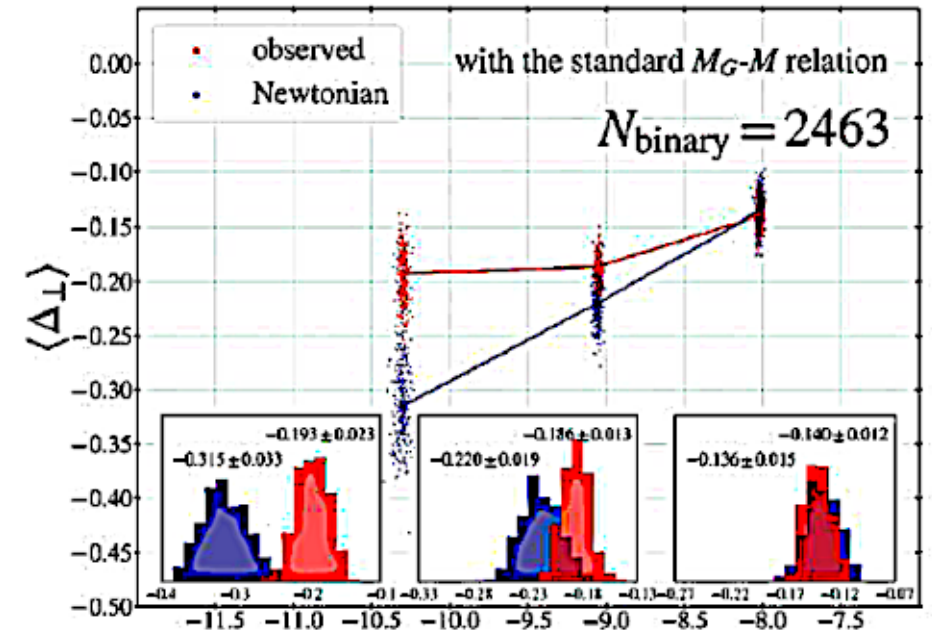
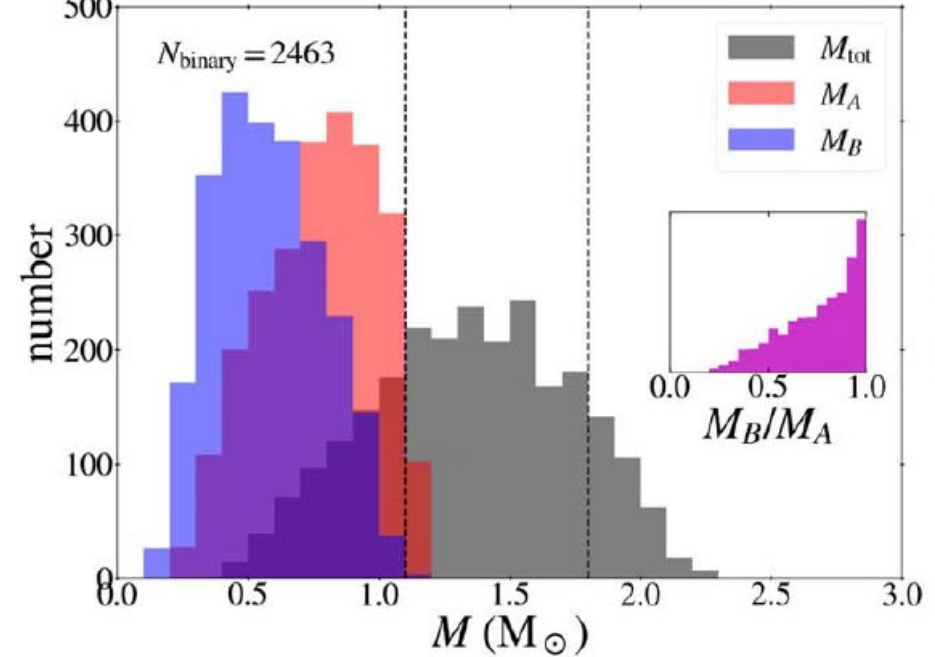
# Binaires d'étoiles: large séparation

*Chae 2024* Pures binaires, de GAIA DR3, vérifient Newton pour des séparations  $< 2$  kAU

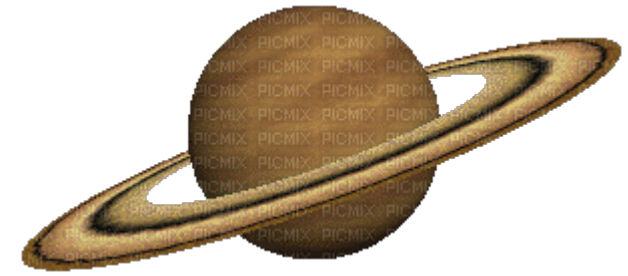
Pour  $\text{sep} > 2\text{kAU}$ , régime MOND  
Statistique 2463 pures binaires, avec  
Parallaxes, mouvements propres V-Radial  
 $\rightarrow g_{\text{obs}}/g_{\text{N}} = 1.49$  pour  $a < 10^{-10}$  m/s<sup>2</sup>

*Hernandez 2024*  
450 Pures binaires, encore plus sélectionnées  
 $\rightarrow$  MOND favorisé

*Pittordis & Sutherland 2023*  
Seulement  $g_{\text{N}}$  faible, pas de calibrations possibles avec Newton  
Sep = 7 -20 kAU, triples, EFE..  
 $\rightarrow$  GR favorisé



# Systeme solaire: plus de consistance!



*Fienga et al 2024*

Les modifications de la gravité peuvent impacter tout le processus de modélisation – le système de coordonnées, les équations du mouvement de la lumière comme de la matière

→ Impact sur l'analyse des observations vs ephémerides  
Pas de garantie que les paramètres des ephémerides (masses, conditions initiales, formes etc.) soient les mêmes dans une autre théorie: peut-être que les **résidus seraient moindres qu'en GR?**  
Tous les paramètres sont inter-connectés (PPN, aplatissement du Soleil, etc)

*Blanchet & Novak 2011*

Précession de Saturne, pb ? A moins que la transition N–MON $\Delta$  soit rapide. Mais tous les PPN doivent être refaits, et inclus dans la métrique, pour minimizer les résidus → Moins de contraintes

*Hees et al 2014*

# Courbes de rotation: crochets Anneaux Collisionnels

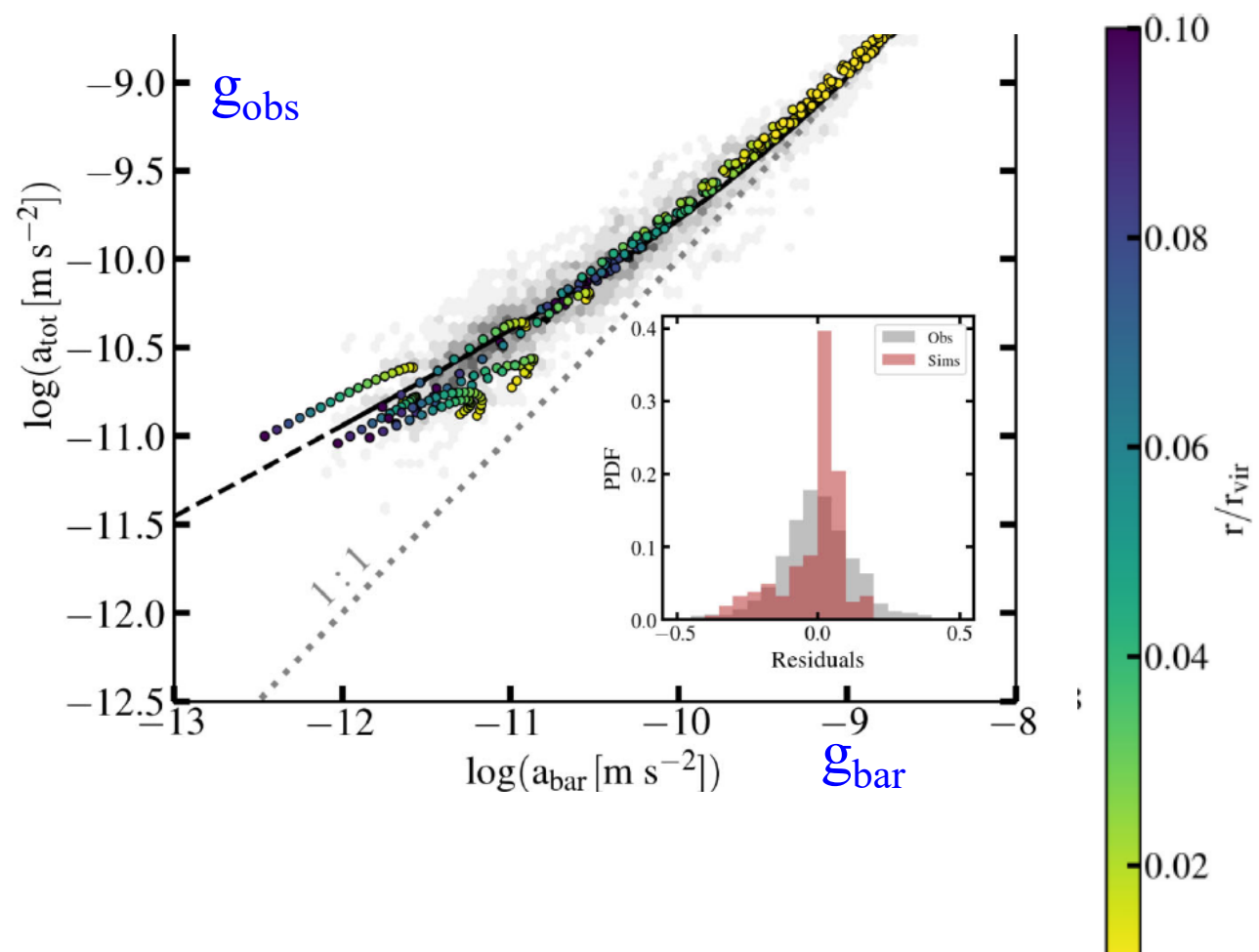
*Mercado et al 2024*

FIRE-2 simulations zoom

Galaxies avec des **crochets** dans CR

Elimine l'Inertie modifiée (MI)

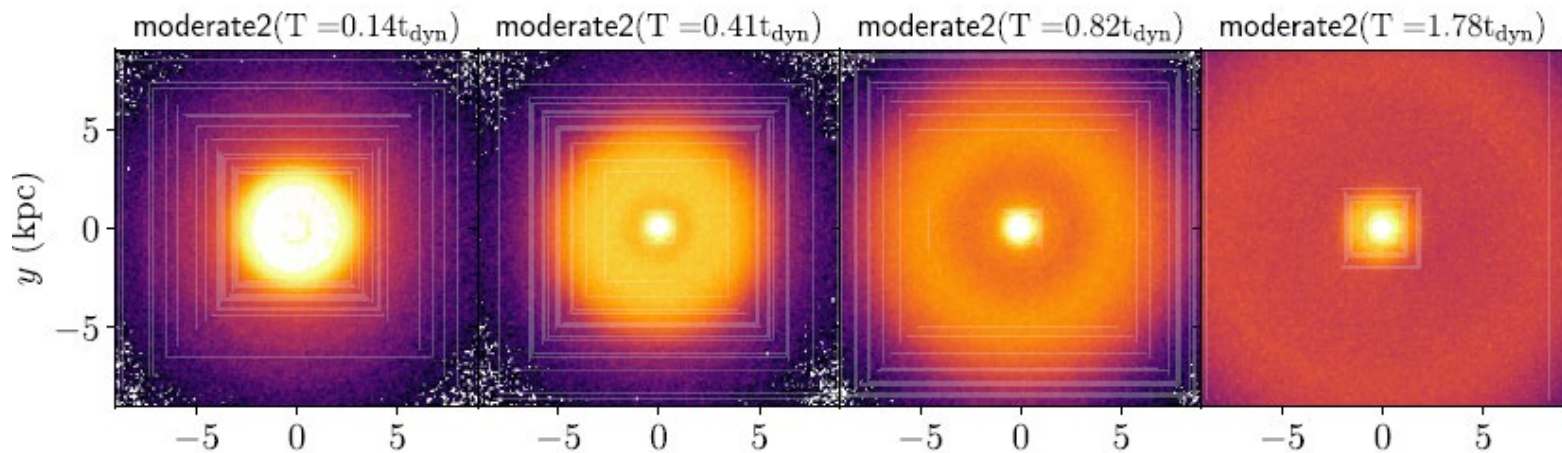
Mais pas la gravité modifiée



*Ma & Wu 2024*

Anneaux collisionnels

Pendant la **collision**, moins de  
matière noire  $\rightarrow$  moins d'effet

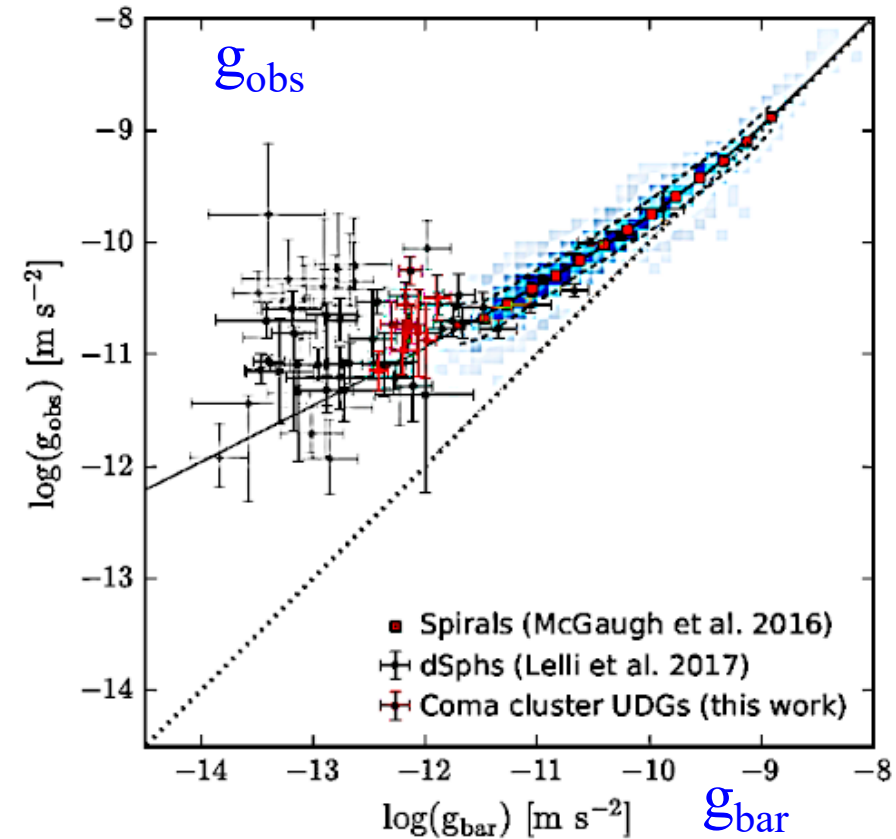
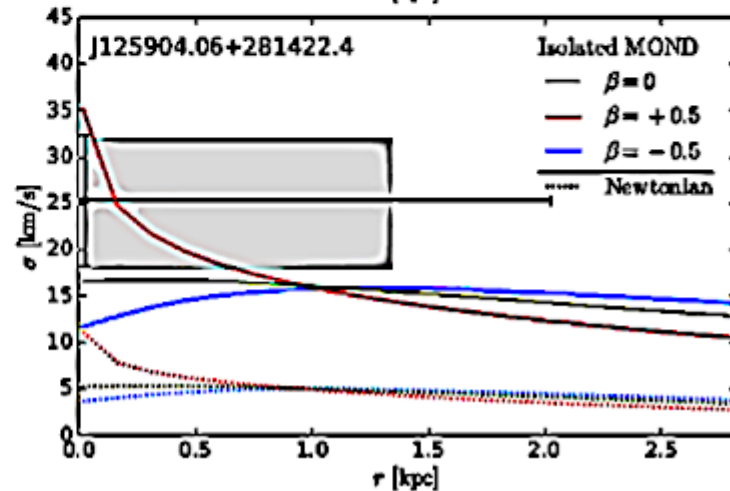
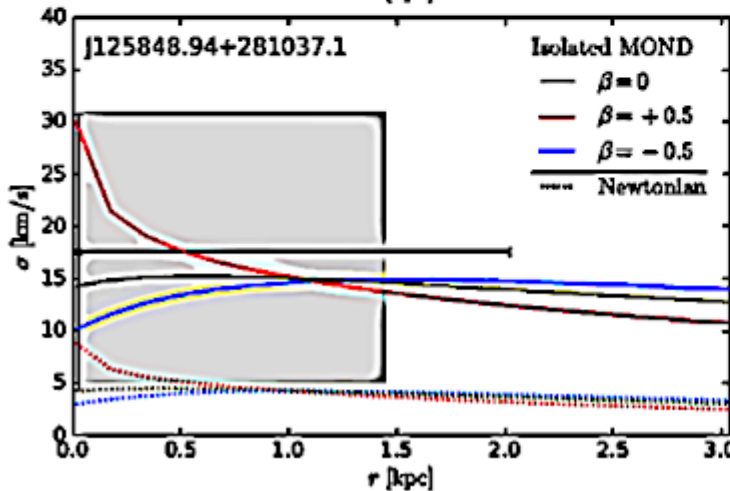
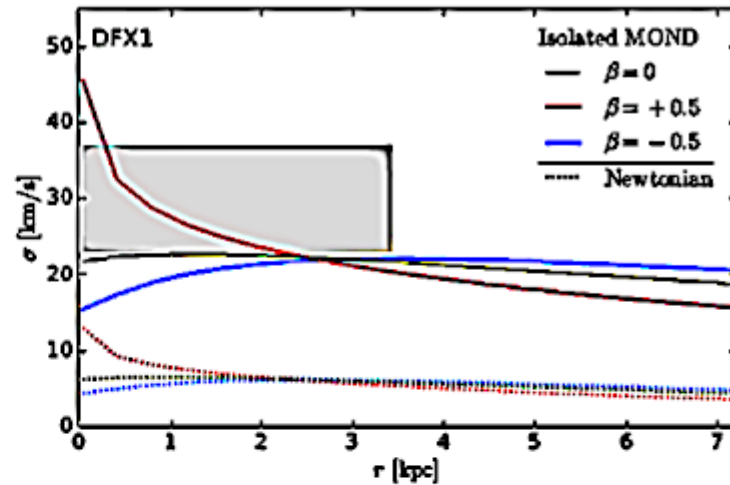
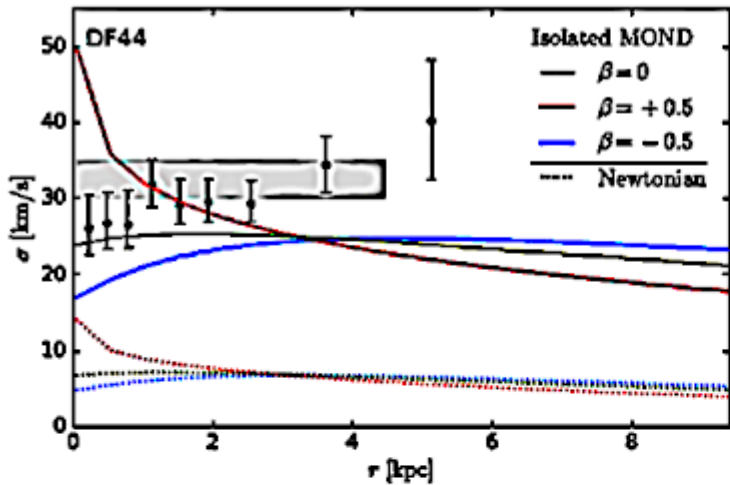


# Problèmes dans les amas de galaxies

Courbes de rotation des UDG dans l'amas de Coma

Verifient la RAR, mais sans EFE

Screening of the EFE?



$\beta=0$

$\beta=+0.5$  radial

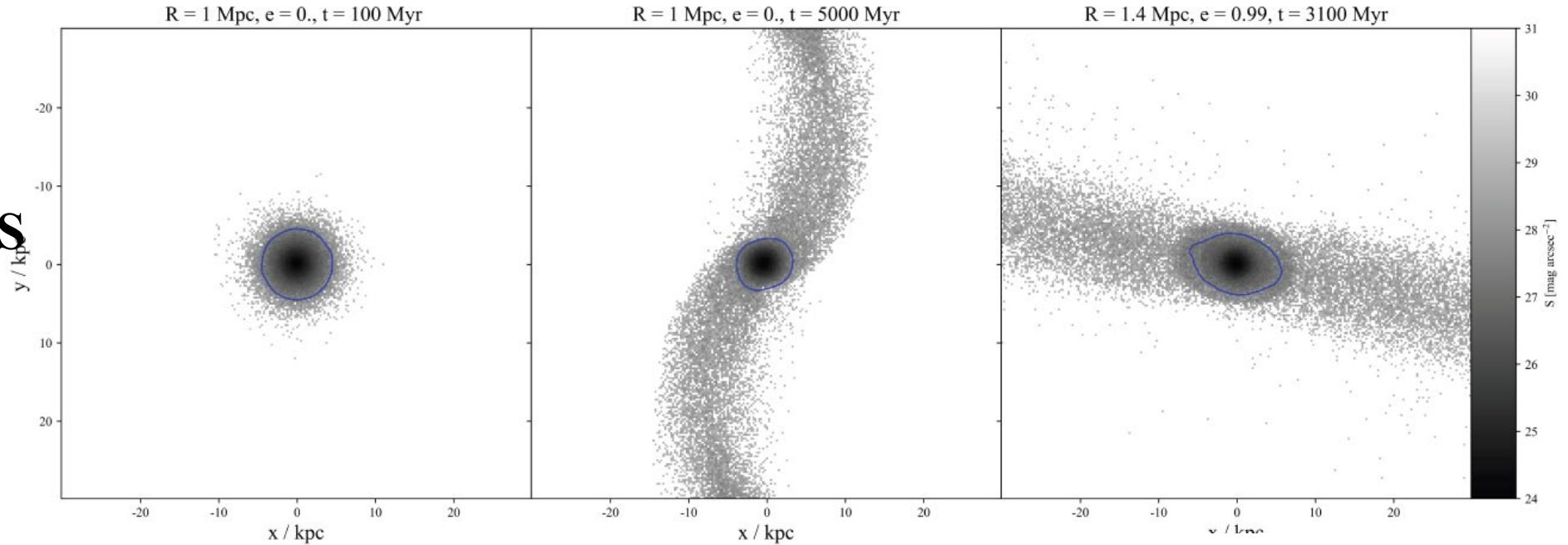
$\beta=-0.5$  tangential

*Freundlich et al 2022*

# UDG, simulations avec MOND

*Nagesh et al 2024*

**Phantom de RAMSES**  
UDG dans Coma

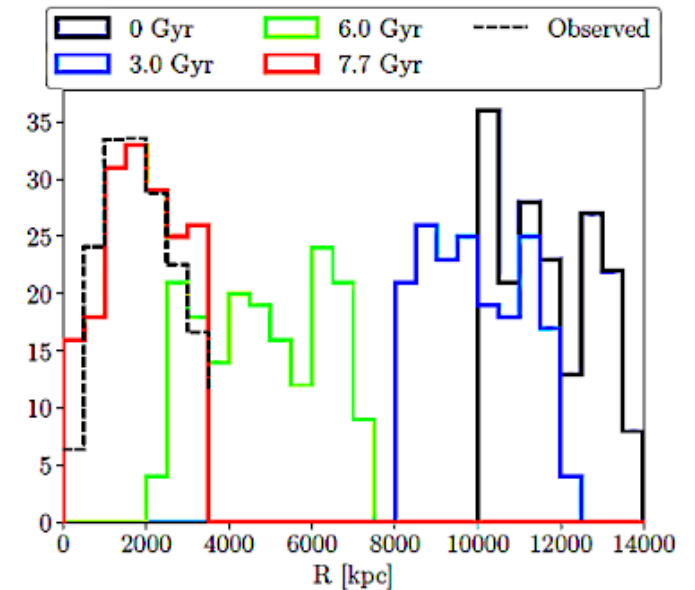


**Interactions de marée:** insuffisantes pour augmenter  $\sigma$ ,  
pour compenser l' EFE

Mais si les UDG sont dans leur première chute sur l'amas,  
elles peuvent garder  $\sigma$  élevée, et ne pas être détruites

Jusqu'à leur premier péricentre

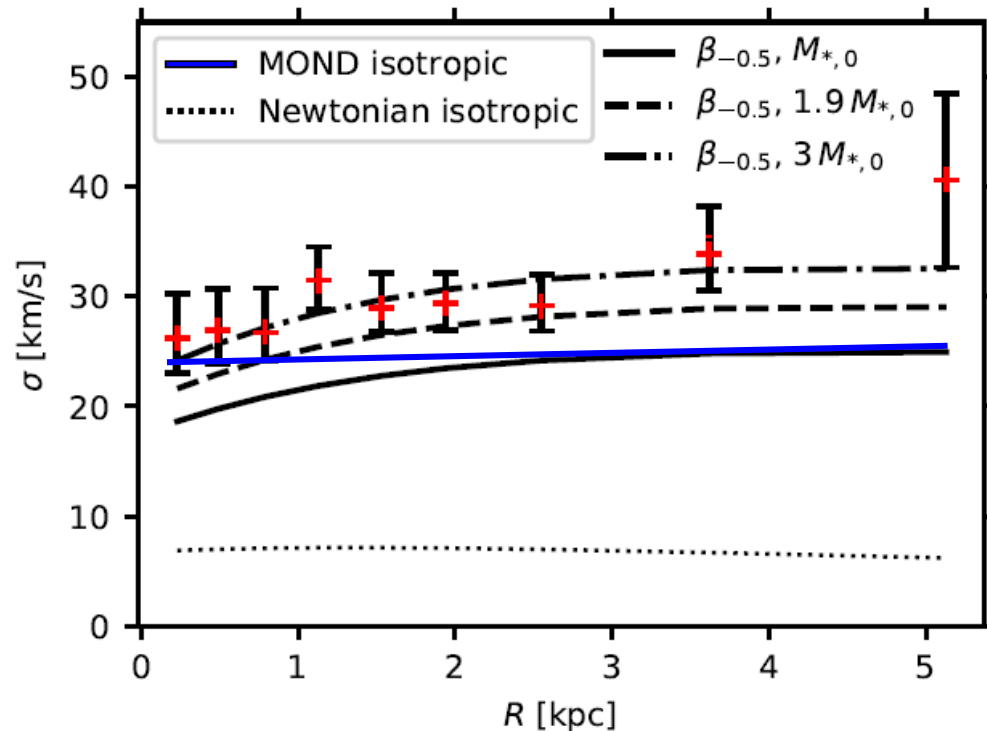
Hors d'équilibre pendant 8 Gyr



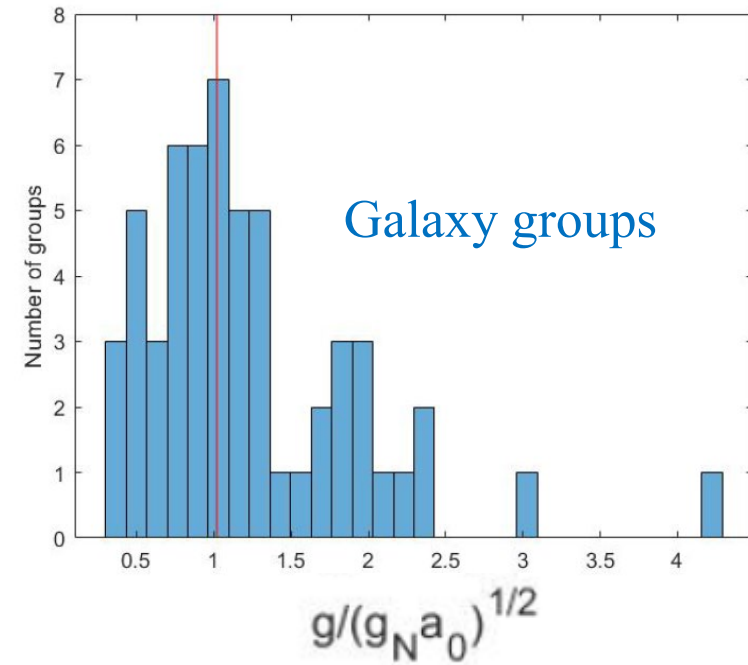
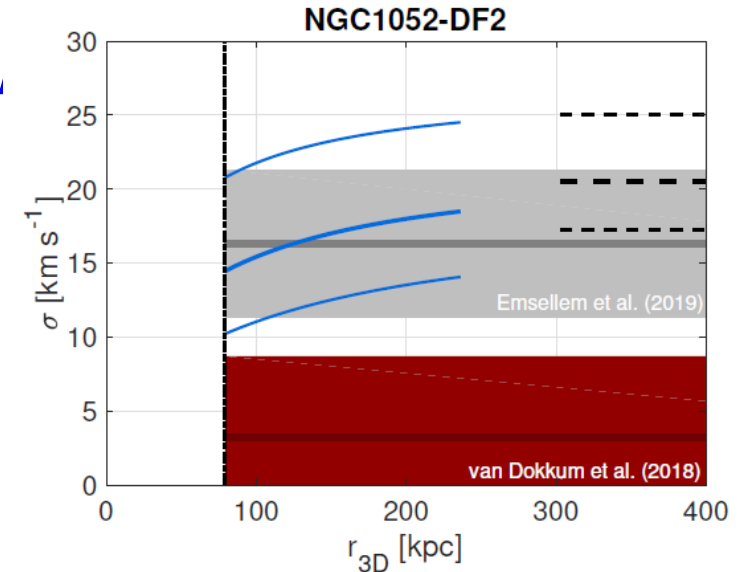
# UDG (Ultra-Diffuse Galaxies), dans les groupes

Régime MOND profond, pour UDG (*Famaey et al 2018, Müller et al 2018, Bilek+ 2019*) et groupes (*Milgrom 2018, 2019*)

Effet d'un Champ Externe (EFE): peut réduire le contenu apparent  $t_{\text{virial}}$  à comparer à  $t_{\text{EFE}}$  variation



*Dragonfly 44 Bilek et al 2019*



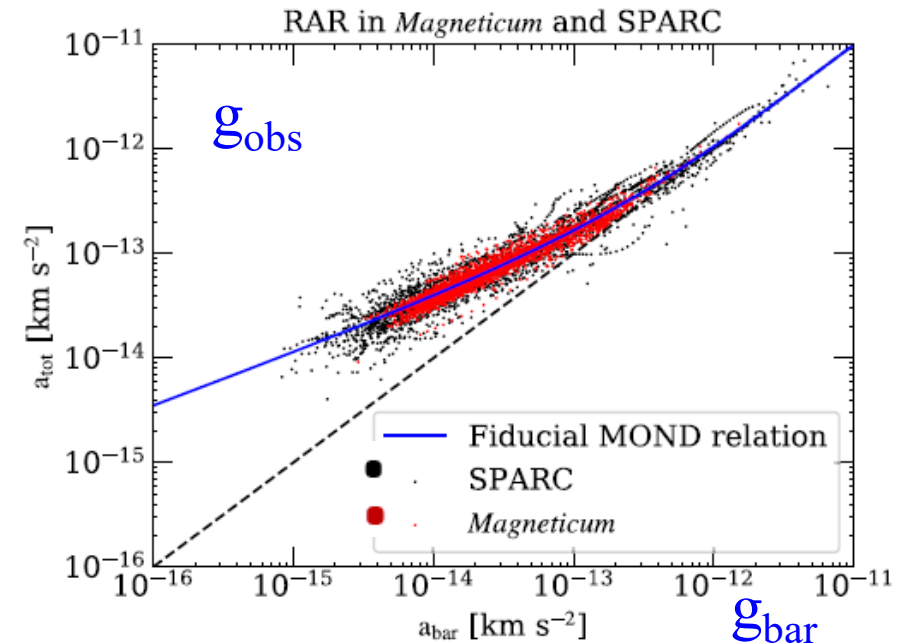
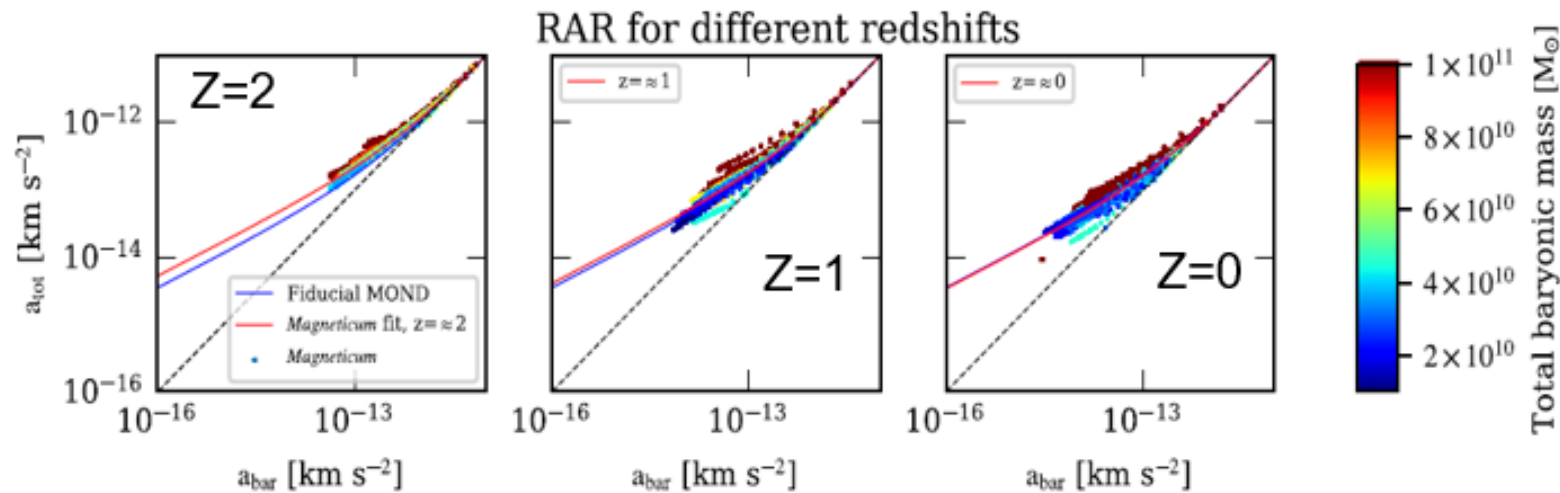
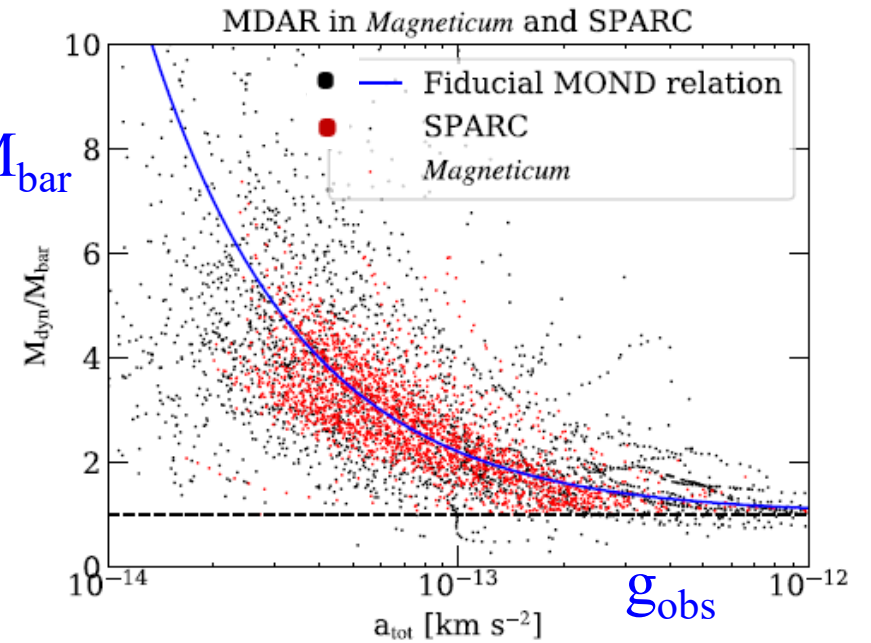
# $\Lambda$ CDM simulations cosmologiques

Sorties MAGNETICUM  
à des redshifts variés

*Mayer et al 2023*

$a_0 \ 10^{-10} \text{ m/s}^2$  à  $z=0 \rightarrow 3$  fois moins à  $z=3$

$M_{\text{dyn}}/M_{\text{bar}}$



# Conclusion: Candidats Matière noire

La recherche est menée en collaboration avec les physiciens des particules

Les **WIMPS**, neutralinos, interaction faible

Les neutrinos stériles

Les trous noirs primordiaux, candidats éliminés?

Les **axions**  $m > 10^{-21}$  eV

Détection directe et indirecte: **limites supérieures**

## Gravité modifiée

Fits des courbes de rotation, Tully-Fisher

Problèmes dans les amas de galaxies

