

*Candidats à la matière noire
et
Recherches indirectes*

Julien Lavalle
CNRS – LUPM – Montpellier

*Séminaire du Pr. Françoise Combes
Collège de France, 9 décembre 2024*



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Quelques hommages (et compléments au cours de Françoise)



Sociologie de la recherche / des arts :
Pr. Pierre-Michel Menger
(dé/construction du talent/génie)

Les tensions au Moyen-Orient :
Pr. Henry Laurens
(les tensions en cosmologie)



Peste noire et interdisciplinarité :
Pr. Patrick Boucheron
(interdisciplinarité et matière noire)

L'émergence des mythes occidentaux :
Pr. Thomas Römer
(LCDM : mythe ou réalité ?)



Un immense merci pour enrichir autant mes
séances de jogging, bricolage, jardinage, etc.
On peut se nourrir des savoirs du temps et
apprendre en toutes circonstances !

Plan de l'exposé

*** La matière noire froide :**

- Mise en contexte
- Résumé des approches théoriques et candidats
- Le sens de “froide” et la matière noire dite thermique : une approche minimale
- Exemple de matière noire non-thermique

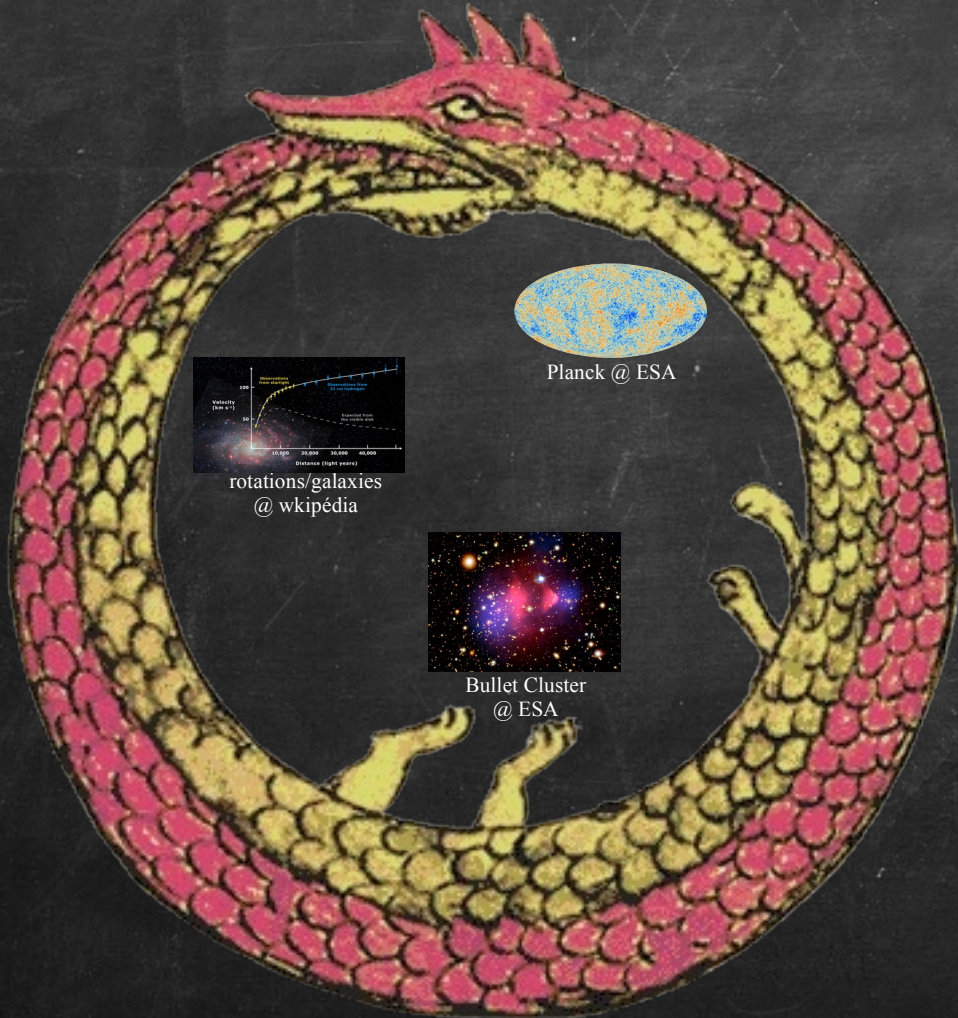
*** Recherches indirectes**

- gamma
- antimatière cosmique
- bilan

*** Un éléphant dans la pièce ? Cohabitation avec des trous noirs primordiaux**

*** Perspectives**

Un univers de matière noire froide



Succès du modèle *Λ*CDM

- * La MN assure la croissance des perturbations cosmologiques, dont les propriétés initiales dérivent de l'inflation (voir exposé V. Vennin).
- * À partir de conditions initiales linéaires, on explique la formation des structures (galaxies, etc.) très élégamment (simulations cosmologiques).
- * **Modèle prédictif** : par ex., fonction de masse, structures aux petites échelles dénuées d'étoiles, etc.

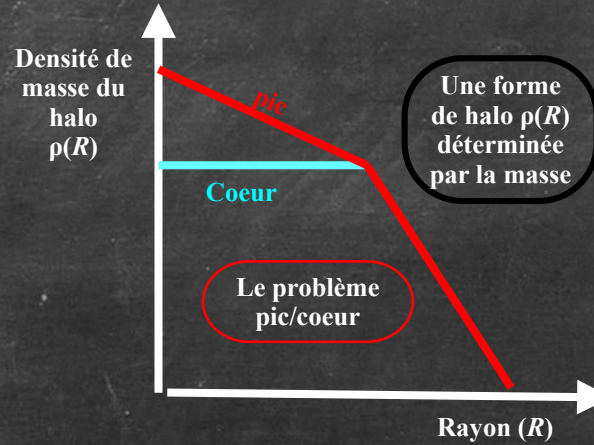
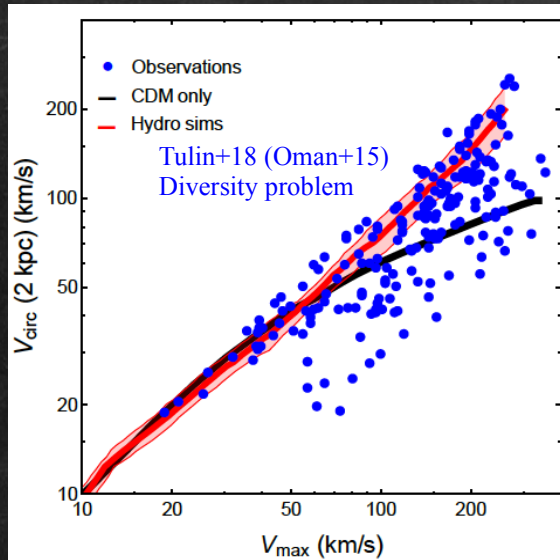
Structures : un modèle à 1 paramètre

- * Les propriétés d'une structure sont déterminées par sa masse (masse de viriel, m_{200}) – densité centrale en $1/r$ (NFW).
- * **Variance déterministe** induite par celle prédite dans les âges de formation.
- * **Grandes incertitudes aux petites échelles** dues au baryons (physique non-linéaire dissipative complexe).

Les écueils potentiels (ou la revanche des baryons)

Problème de diversité

Pour des halos de masse donnée (v_{\max}), la distribution de MN varie trop au centre (v_{circ})

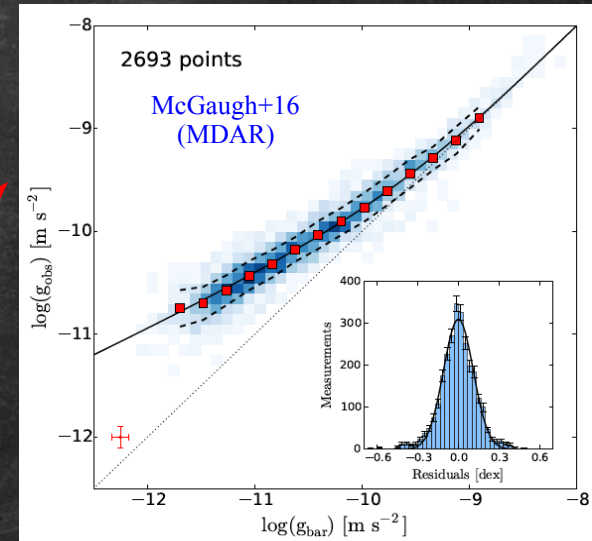
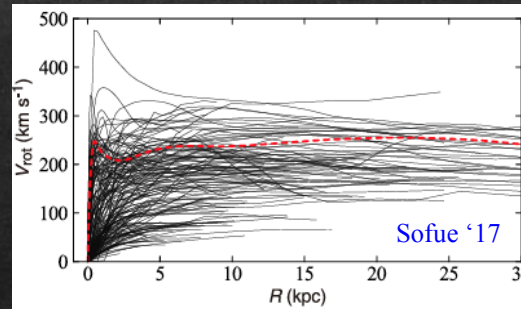


Problème de régularité

Accélération totale très fortement corrélée à celle induite par les baryons.

(NB: MOND)

2 projections possibles des courbes de rotation

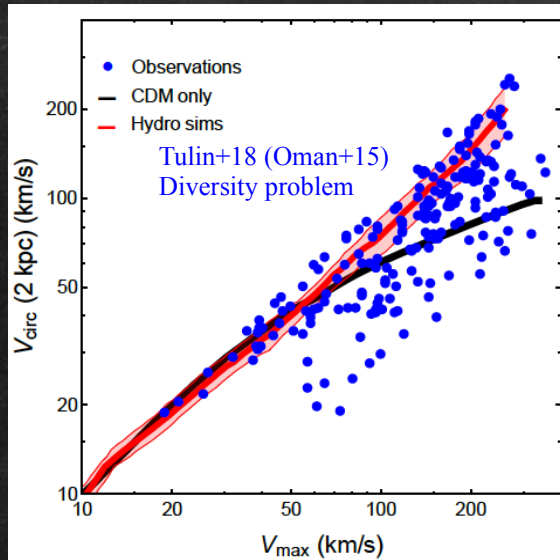


Problème pics-coeurs (*cusps / cores*) ↔ Problème de diversité/régularité

Les écueils potentiels (ou la revanche des baryons)

Problème de diversité

Pour des halos de masse donnée (v_{\max}), la distribution de MN varie trop au centre (v_{circ})

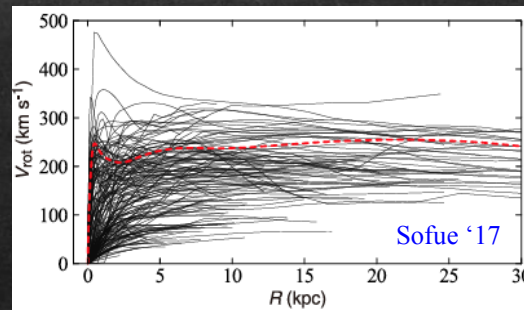


Problèmes aux petites échelles

- Grandes incertitudes dues aux baryons (problèmes de complexité et de résolution spatiale/temporelle dans les simulations)

- Indications de propriétés spécifiques de la matière noire ? (e.g. auto-interactions, scalaires ultra-légers).

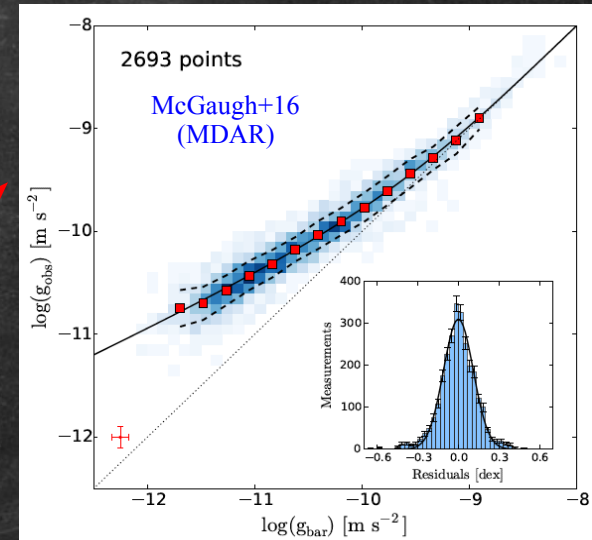
2 projections possibles des courbes de rotation



Problème de régularité

Accélération totale très fortement corrélée à celle induite par les baryons.

(NB: MOND)




Problème pics-cœurs (*cusps / cores*) ↔ Problème de diversité/régularité

Les approches et candidats en physique des particules

2 approches complémentaires

*** Haut vers le bas**
“MN comme conséquence”



* Pallier des défauts du modèle standard

- Asymétrie matière-antimatière incomprise
- Problème dit de CP fort
- Stabilité du secteur de Higgs (hiérarchie EF)
- Métastabilité du vide EF
- Hiérarchies de saveurs (masses)
- Unification des interactions (esthétique + hiérarchie)
- Gravité quantique (cordes ?)
- etc.

+++ Résoud simultanément plusieurs problèmes disjoints
- - - “Solution” MN parfois caractérisée par un espace de paramètres très étendu (e.g. supersymétrie)

* Motivations en cosmologie

- champs scalaires (parce qu’on aime bien ça)
- inflation non-minimale (trous noirs primordiaux)

*** Bas vers le haut**
“MN comme objectif”



* Auto-cohérence du modèle

- +++ Étude fine des mécanismes de production
- +++ Minimiser le nombre de paramètres => caractère prédictif (testabilité)
- - - Formulation ad hoc

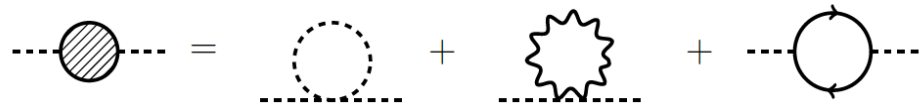
Les approches et candidats en physique des particules

2 approches complémentaires

* Haut vers le bas
“MN comme conséquence”

* Bas vers le haut
“MN comme objectif”

Hiérarchie électrofaible (EF), et le tournant du LHC



$$\delta m_H^2 = \frac{\Lambda^2}{32\pi^2} \left[6\lambda + \frac{1}{4} (9g^2 + 3g'^2) - y_t^2 \right]$$

(e.g. Csaki & Tanedo '16)

- * Masse du Higgs très sensible aux corrections quantiques.
→ (ajustement fin des paramètres dans extensions du MS)
- * Signe des corrections différent pour boson/fermion
- * e.g. **Supersymétrie** => bosons ↔ fermions se compensent si $m_f \sim m_b$
- * Contrainte : désintégration des superpartenaires / stabilité du proton :
→ **symétrie discrète supplémentaire** (R-parité, etc.)
=> Particule susy la plus légère stable
- MN** : neutralino, sneutrino, gravitino, etc.

* **Auto-cohérence du modèle**

- +++ Étude fine des mécanismes de production
- +++ Minimiser le nombre de paramètres => caractère prédictif (testabilité)
- - - Formulation ad hoc

Les approches et candidats en physique des particules

2 approches complémentaires

* Haut vers le bas
“MN comme conséquence”

* Bas vers le haut
“MN comme objectif”

Hierarchie électrofaible (EF), et le tournant du LHC



$$\delta m_H^2 = \frac{\Lambda^2}{32\pi^2} \left[6\lambda + \frac{1}{4} (9g^2 + 3g'^2) - y_t^2 \right]$$

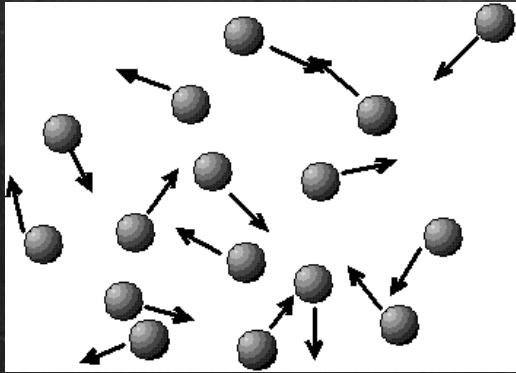
(e.g. Csaki & Tanedo '16)

- * Masse du Higgs très sensible aux corrections quantiques.
→ (ajustement fin des paramètres dans extensions du MS)
- * Signe des corrections différent pour boson/fermion
- * e.g. **Supersymétrie** => bosons ↔ fermions se compensent si $m_{\tilde{r}} \sim m_b$
- * Contrainte : désintégration des superpartenaires / stabilité du proton :
→ **symétrie discrète supplémentaire** (R-parité, etc.)
=> Particule susy la plus légère stable
MN : neutralino, sneutrino, gravitino, etc.

+ axion QCD et dérivés
+ neutrino droit (stérile)
+ autres (e.g. cordes, relaxions ...)
[La supersymétrie n'est pas exclue
comme concept]

Matière noire froide : pourquoi “froide”, et comment ?

Agitation thermique d'un gaz :
Notion de température pour
l'équilibre thermique



Abus de langage :
On dit “froid”, mais on veut en réalité dire “lent”.

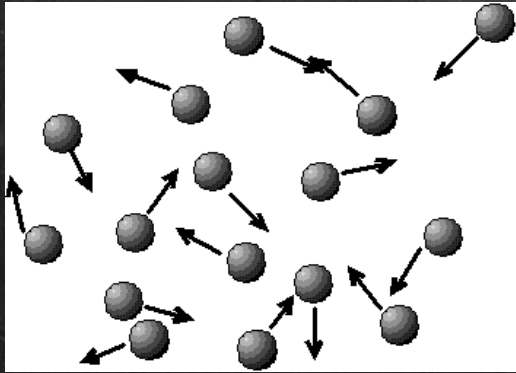
$$T = \frac{m_\chi \langle v^2 \rangle}{3} \longrightarrow \langle v^2 \rangle = 3 \frac{T}{m_\chi}$$

T : température du plasma (photons) durant le contact thermique

Plus massive \Rightarrow plus lente (barbarisme : plus froide)

Matière noire froide : pourquoi “froide”, et comment ?

Agitation thermique d'un gaz :
Notion de température pour
l'équilibre thermique



Abus de langage :

On dit “froid”, mais on veut en réalité dire “lent”.

$$\langle T \rangle = \frac{m_\chi \langle v^2 \rangle}{3} \longrightarrow \langle v^2 \rangle = 3 \frac{\langle T \rangle}{m_\chi}$$

T : température du plasma (photons) durant le contact thermique

Plus massive \Rightarrow plus lente (barbarisme : plus froide)

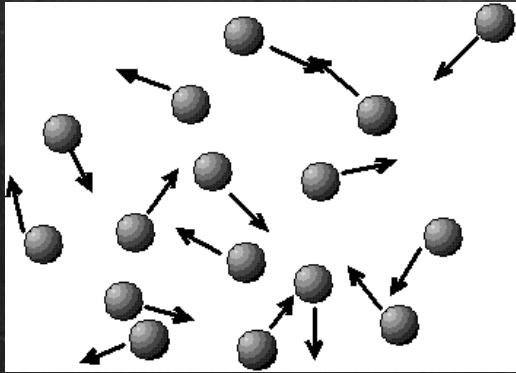
$$\langle v^2 \rangle \propto T \propto 1/a$$

découplage thermique

$$\langle v^2 \rangle \propto 1/a^2$$

Matière noire froide : pourquoi “froide”, et comment ?

Agitation thermique d'un gaz :
Notion de température pour
l'équilibre thermique



Abus de langage :

On dit “froid”, mais on veut en réalité dire “lent”.

$$\langle T \rangle = \frac{m_\chi \langle v^2 \rangle}{3} \longrightarrow \langle v^2 \rangle = 3 \frac{\langle T \rangle}{m_\chi}$$

T : température du plasma (photons) durant le contact thermique

Plus massive \Rightarrow plus lente (barbarisme : plus froide)

$$\langle v^2 \rangle \propto T \propto 1/a \xrightarrow{\text{découplage thermique}} \langle v^2 \rangle \propto 1/a^2$$

Vitesse x Temps caractéristique = distance caractéristique

$$\lambda_{\text{fs}} \approx v_{\text{kd}} (a_{\text{kd}} / a_{\text{eq}}) / H_{\text{eq}}$$

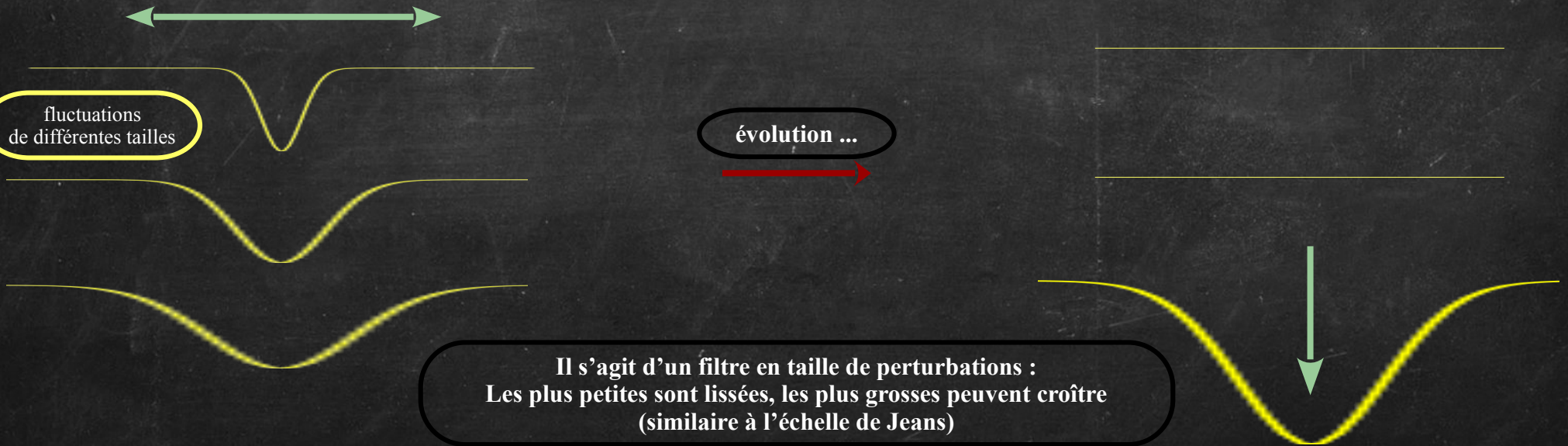
Diminue quand la masse de la particule augmente (fermion ou boson).

Matière noire froide : pourquoi “froide”, et comment ?

Vitesse x Temps caractéristique = distance caractéristique

$$\lambda_{fs} \approx v_{kd} (a_{kd} / a_{eq}) / H_{eq}$$

Diminue quand la masse de la particule augmente (fermion ou boson).

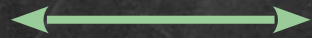


Matière noire froide : pourquoi “froide”, et comment ?

Vitesse x Temps caractéristique = distance caractéristique

$$\lambda_{fs} \approx v_{kd} (a_{kd} / a_{eq}) / H_{eq}$$

Diminue quand la masse de la particule augmente (fermion ou boson).



fluctuations
de différentes tailles

évolution ...

Il s'agit d'un filtre en taille de perturbations :
Les plus petites sont lissées, les plus grosses peuvent croître
(similaire à l'échelle de Jeans)

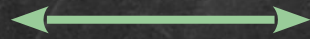


Matière noire froide : pourquoi "froide", et comment ?

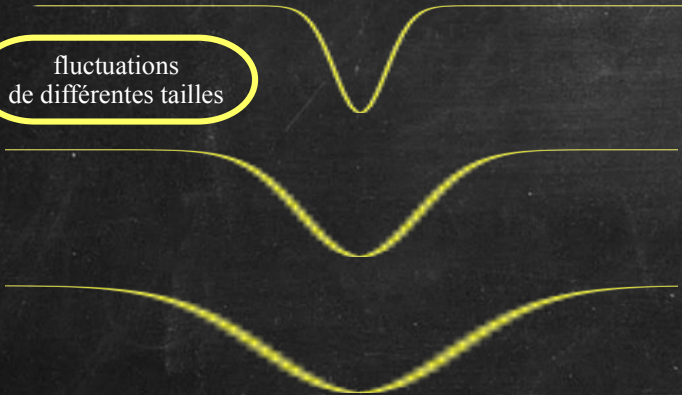
Vitesse x Temps caractéristique = distance caractéristique

$$\lambda_{fs} \approx v_{kd} (a_{kd} / a_{eq}) / H_{eq}$$

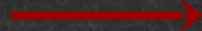
Diminue quand la masse de la particule augmente (fermion ou boson).



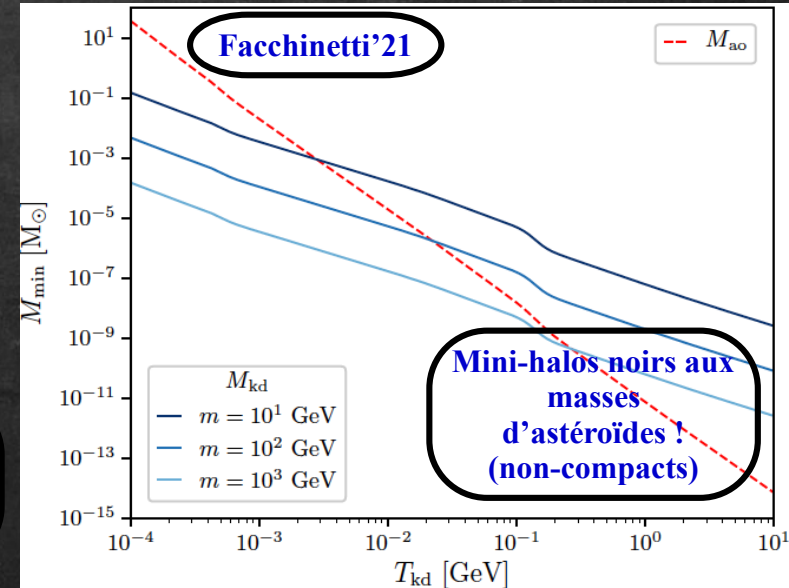
fluctuations de différentes tailles



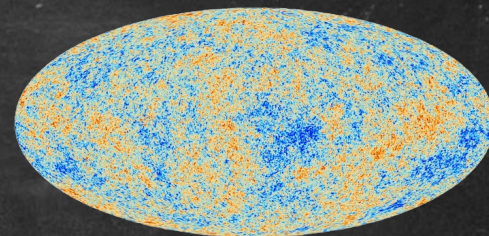
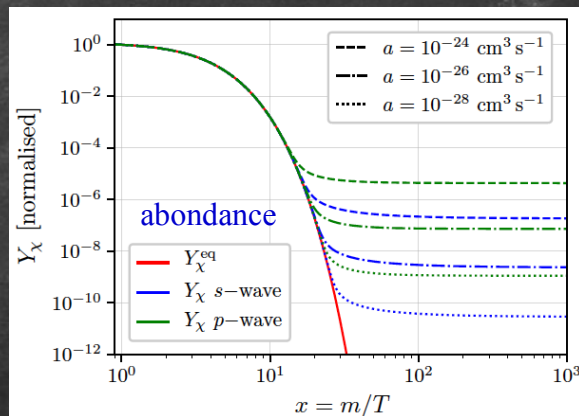
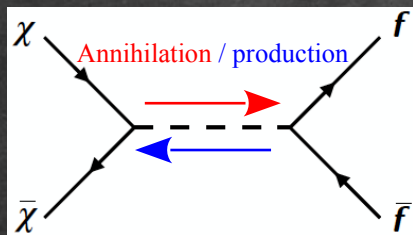
évolution ...



Masse particule > keV
pour former les plus petites
galaxies observées
(matière noire thermique)

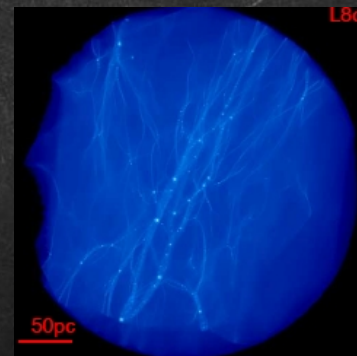
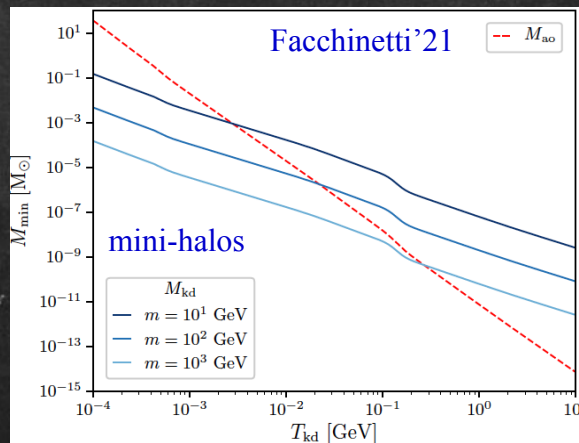
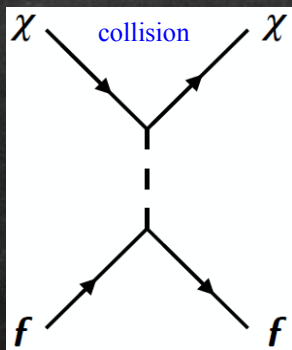


Production thermique dans l'univers primordial et implications pour les recherches



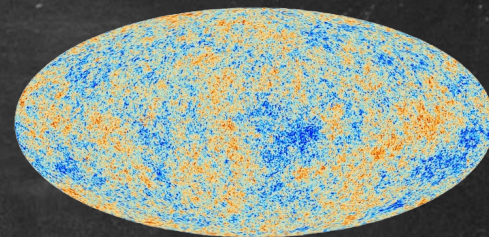
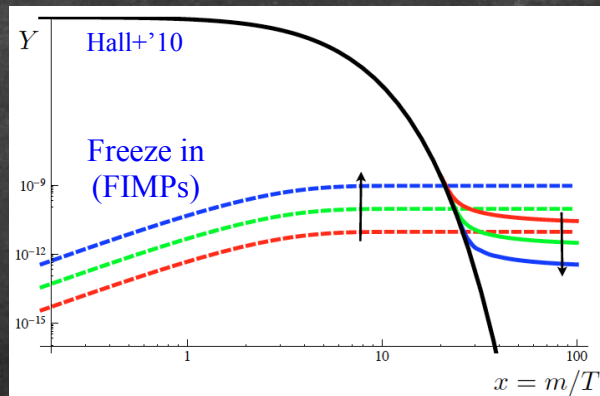
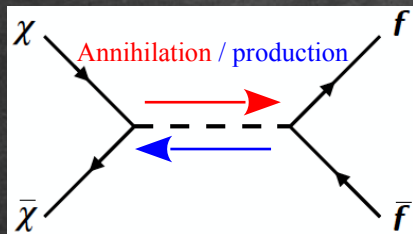
Planck @ ESA

$$\mathcal{L} \supset \frac{\lambda_\chi}{2} \phi \bar{\chi} \chi + \frac{\lambda_f}{2} \phi \bar{f} f$$



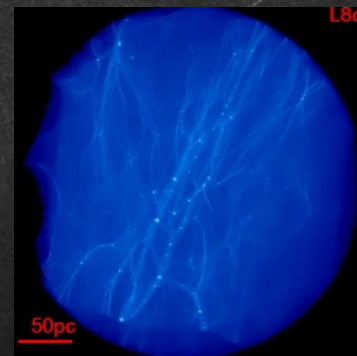
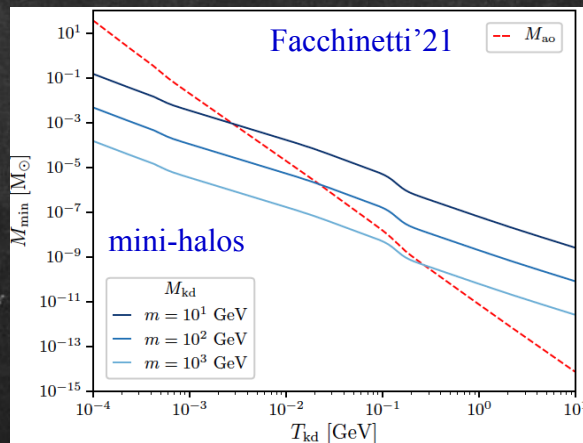
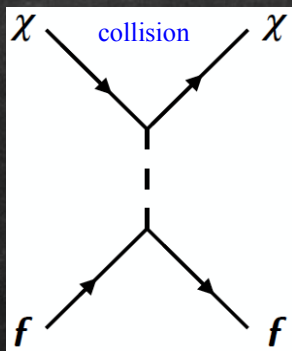
Wang+'20

Production thermique dans l'univers primordial et implications pour les recherches



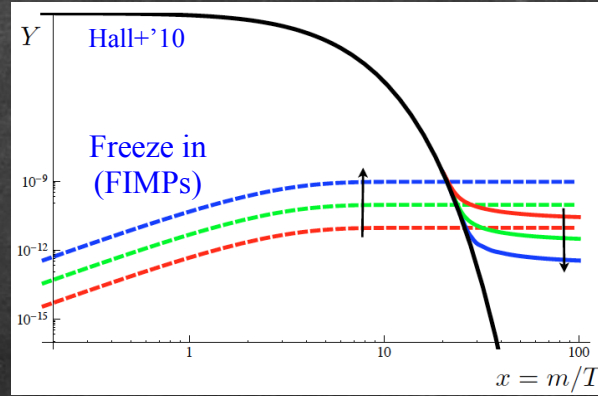
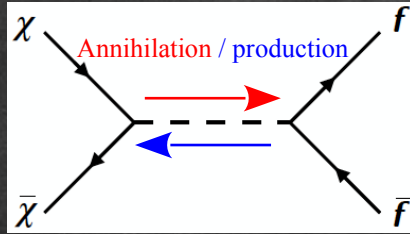
Planck @ ESA

$$\mathcal{L} \supset \frac{\lambda_\chi}{2} \phi \bar{\chi} \chi + \frac{\lambda_f}{2} \phi \bar{f} f$$



Wang+'20

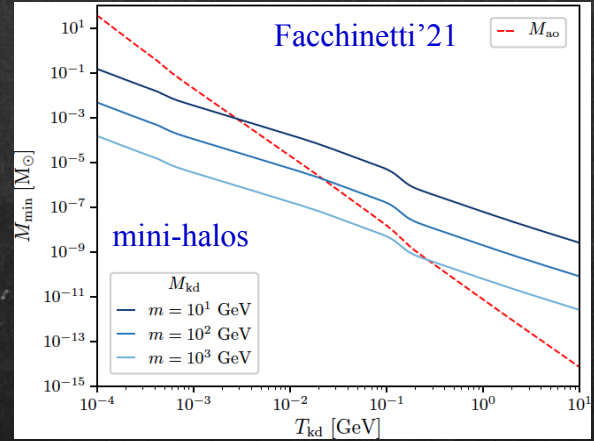
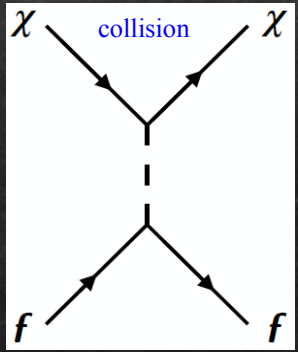
Production thermique dans l'univers primordial et implications pour les recherches



Recherches indirectes :
Traces d'annihilation/désintégration en zones denses en MN.

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

$$\mathcal{L} \supset \frac{\lambda_\chi}{2} \phi \bar{\chi} \chi + \frac{\lambda_f}{2} \phi \bar{f} f$$



Recherches directes et capture :
Expériences terrestres + impact sur l'évolution stellaire

Bestiaire (incomplet) de la matière noire thermique

WIMPs :

- section efficace d'interaction "faible" (pas nécessairement l'interaction faible standard).
- => Par construction, pas d'asymétrie MN-antiMN (annihilation comme régulatrice d'abondance).
- => Si interaction faible standard, on parle de matière noire minimale

[e.g. Chardonnet+'92, Cirelli+'06, etc.]

FIMPs :

- interaction très très faible (jamais en équilibre thermodynamique avec le plasma primordial)

→ par ex., les neutrinos stériles

[e.g. Dodelson&Widrow'94, McDonald'01, Hall+'10]

Matière noire asymétrique :

- asymétrie MN-antiMN (annihilation plus efficace pour supprimer l'antiMN)

[Nussinov'85, Petraki+'10-'20]

Etc.

Heavy triplet neutrinos as a new dark-matter option

Pascal Chardonnet ^{a,b}, Pierre Fayet ^c and Pierre Salati ^{a,b,1}

^a *Laboratoire de Physique Théorique ENSLAPP, B.P. 110, 74941 Annecy-le-Vieux Cedex, France*

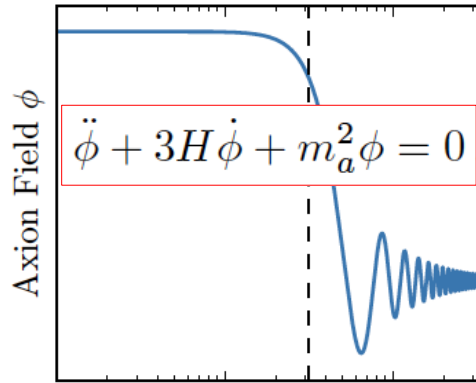
^b *Université de Savoie, B.P. 1104, 73011 Chambéry Cedex, France*

^c *Laboratoire de Physique Théorique de l'Ecole Normale Supérieure ², 24 rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05, France*

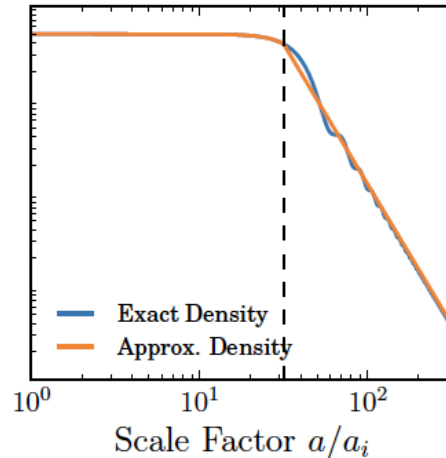
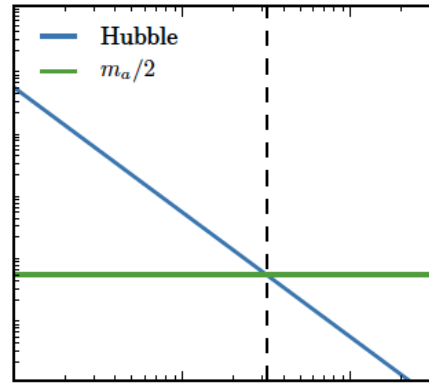
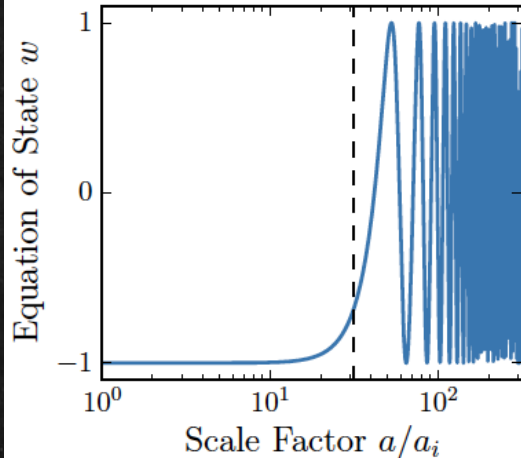
Received 20 March 1992

NUCLEAR
PHYSICS B

Matière noire non-termique : exemple de l'axion



[Marsh'16]



Axions ou de type axionique

[Peccei-Quinn, Wilceck, Weinberg, etc., Sikivie]

[1 μeV – 1 meV] => légers mais très froids !

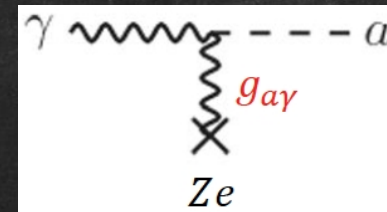
Problème CP fort

(désalignement ou défauts topologiques)

$$\ddot{\delta}_a + 2H\dot{\delta}_a + (k^2 c_{s,\text{eff}}^2/a^2 - 4\pi G\rho_a)\delta_a = 0$$

$$c_{s,\text{eff}}^2 \approx \frac{k^2}{4m_a^2 a^2}$$

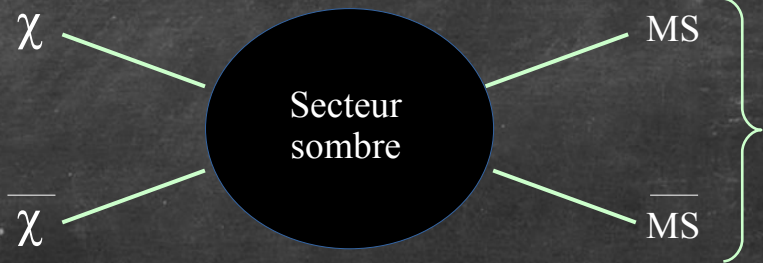
L'échelle de coupure en masse des structures n'est pas fixée par les interactions, mais par la masse de l'axion (longueur d'onde de de Broglie)



Le couplage principal pour la détection est le couplage aux photons – ne joue qu'un rôle négligeable dans la production.

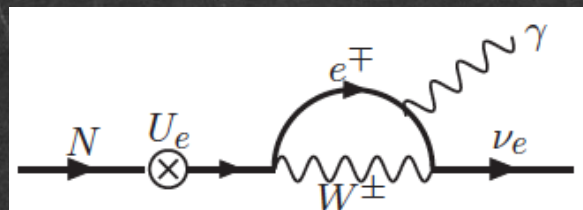
Candidats et signatures indirectes

MN thermique (hors neutrinos)
 [production très simple]
 [1 keV – 100 TeV]
 WIMPs, FIMPs, asymétrique, etc.



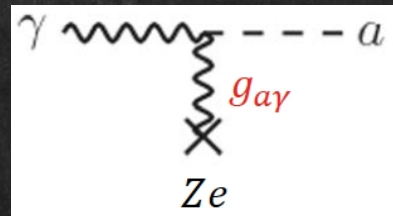
- photons (MeV-TeV)
- neutrinos (keV-TeV)
- antimatière cosmique
- radio+X (émission secondaire)

Neutrinos stériles
 [asymétrie matière-antimatière – lien indirect]
 [1 – 50 keV]
 (production par mélange aux neutrinos actifs)



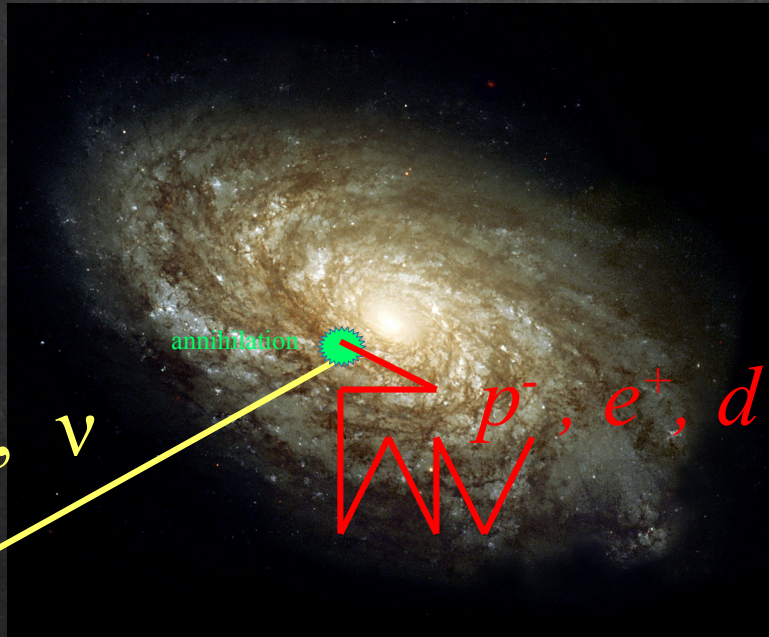
- raie X (1-50 keV)

Axions (QCD)
 [Pb de CP fort]
 [1 μeV – 1 meV]
 [← → pour axions non-QCD]

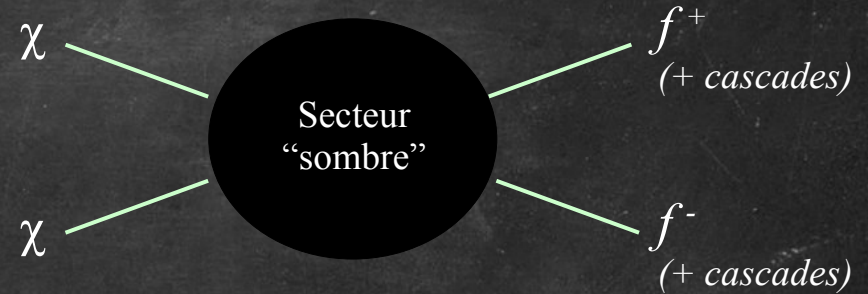


- conversion axion ↔ photon
 dans champs magnétiques
 (e.g. blazars ou SN)
 [Calore+’20-’21]

Recherche indirecte de WIMPs



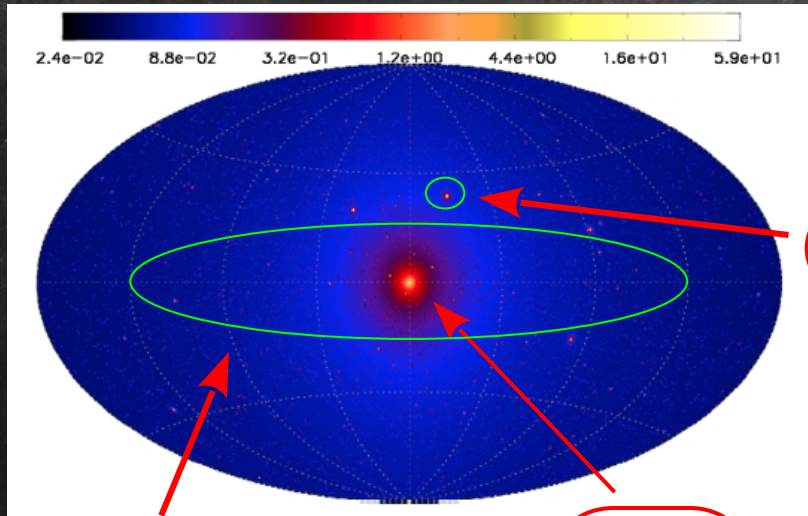
HST @ NASA



Recherches de traces d'annihilations
(i) à la recombinaison (excellente précision)
(ii) dans le rayonnement gamma, neutrino, ou d'antimatière cosmique, en direction de cibles concentrées (galaxies) – plus sensibles aux incertitudes astrophysiques.

Recherche indirecte (WIMPs) : les cibles gamma

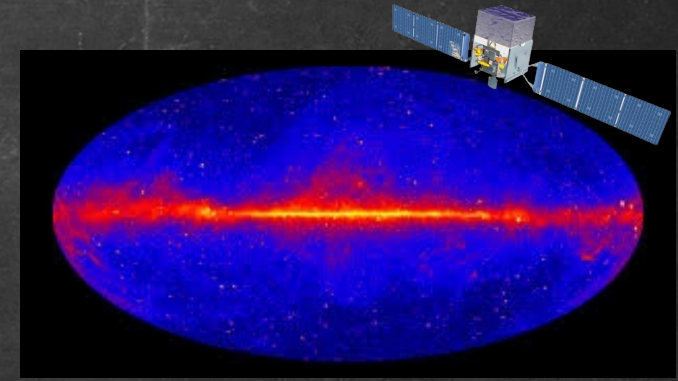
Pieri, JL+ '11



Grosses sous-structures (galaxies naines satellites)

Émission diffuse

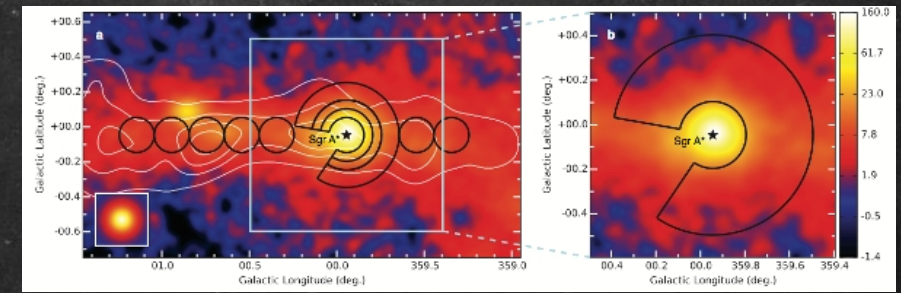
Centre galactique



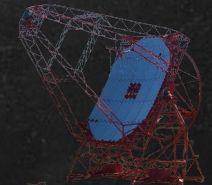
Carte du ciel Fermi-LAT @ NASA (12 ans)

Mode opératoire :

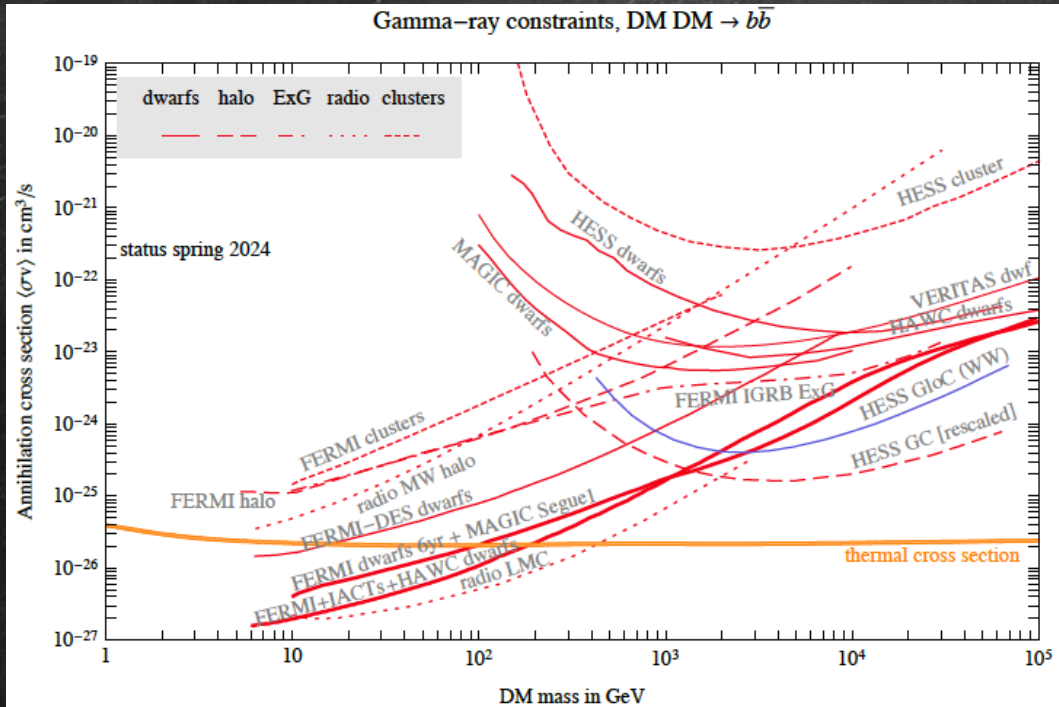
- Bien modéliser le/s halo/s de MN (incertitudes)
- Comprendre les avants-plans (origine astrophysique)
- Maximiser signal/bruit => galaxies naines
- Limites si fond astrophysique non-maîtrisé



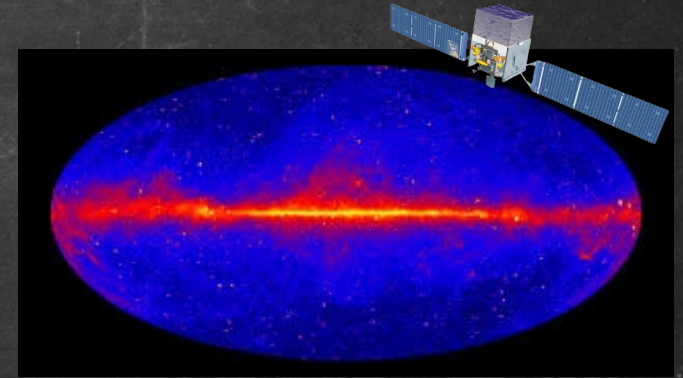
Centre galactique observé par HESS @ Collab. HESS-II



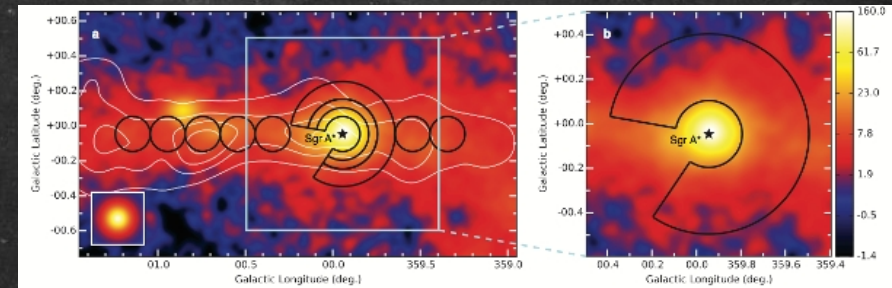
Recherche indirecte (WIMPs) : bilan gamma



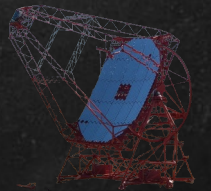
Cirelli+'24



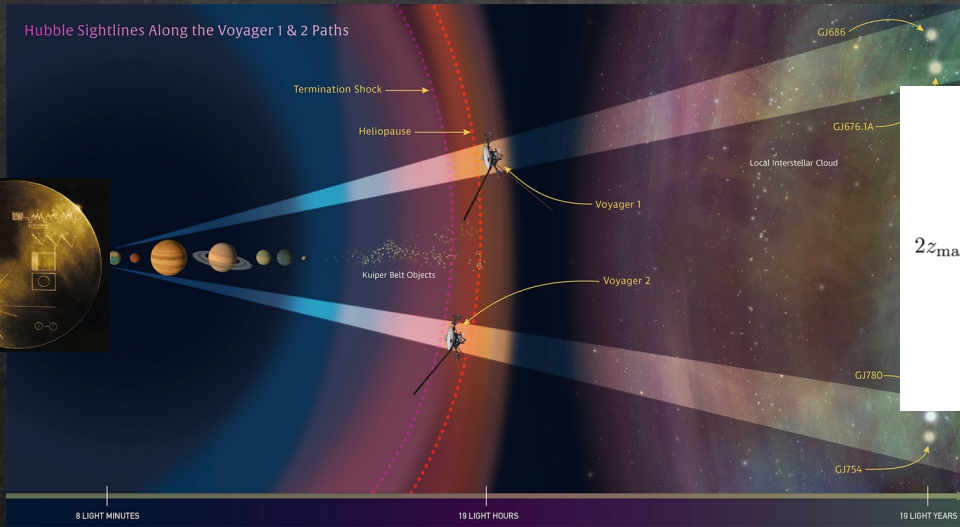
Carte du ciel Fermi-LAT @ NASA (12 ans)



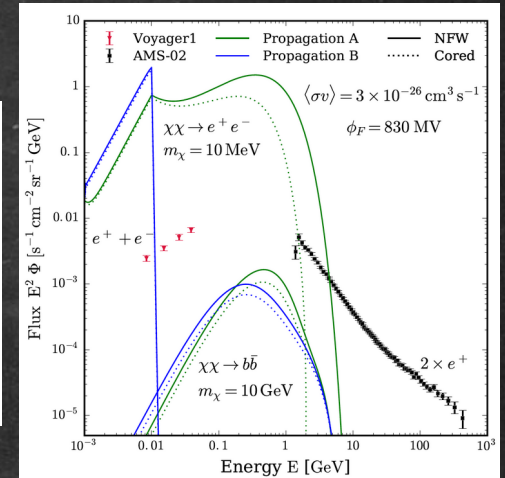
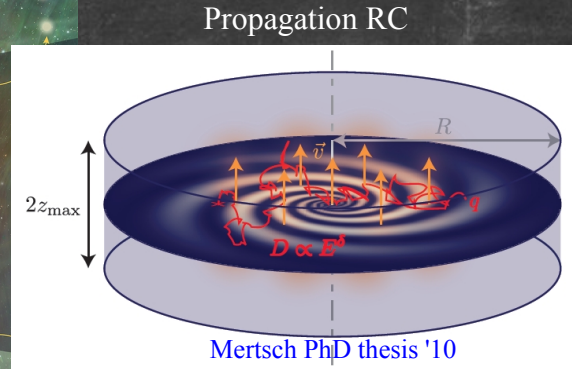
Centre galactique observé par HESS
@ Collab. HESS-II



Recherche indirecte (WIMPs) : antimatière cosmique

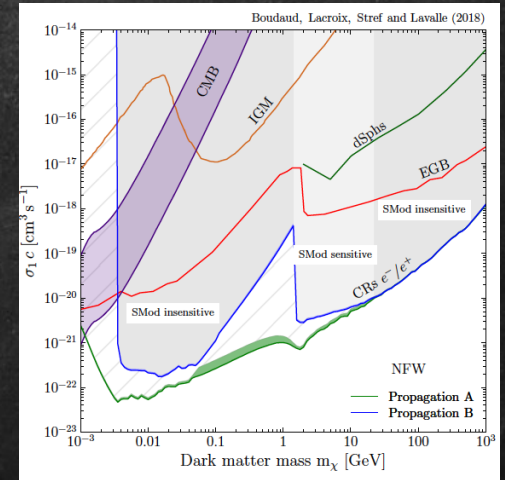


Voyager 1 & 2



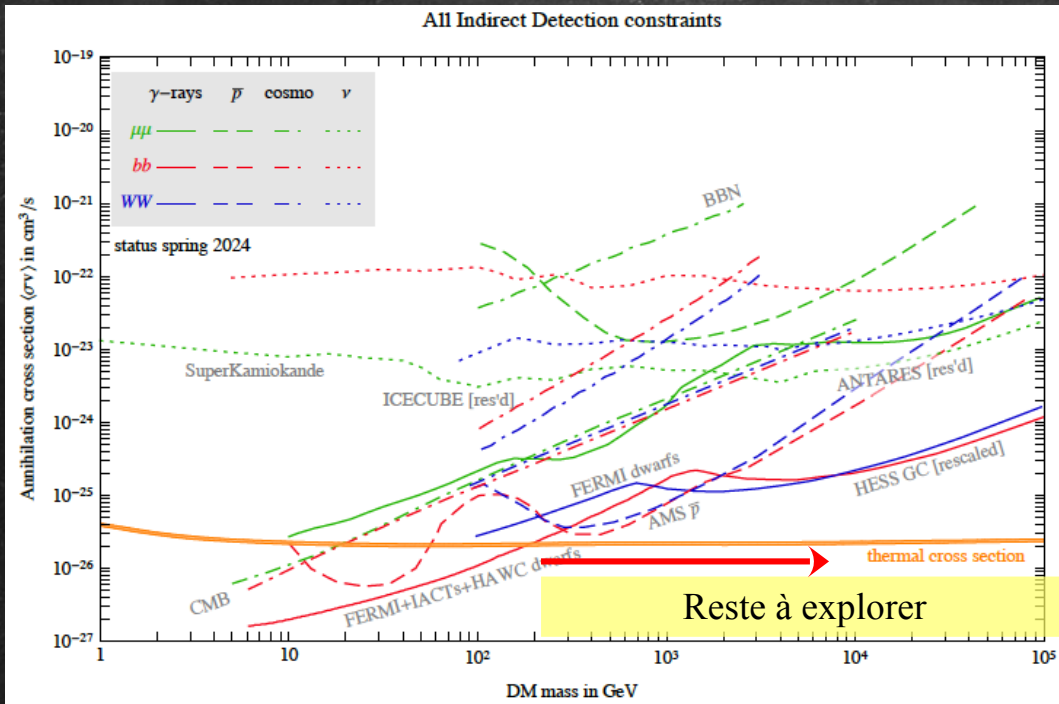
AMS-02 @ ISS / NASA

Voyager 1 a franchi l'héliopause en 2012 !
 => Les rayons cosmiques de basse énergie ne sont plus écartés par les vents magnétiques solaires.
 => Données e+e- au MeV + AMS-02 au-delà
 => Complémentaire au fond diffus (recombinaison) à basse masse

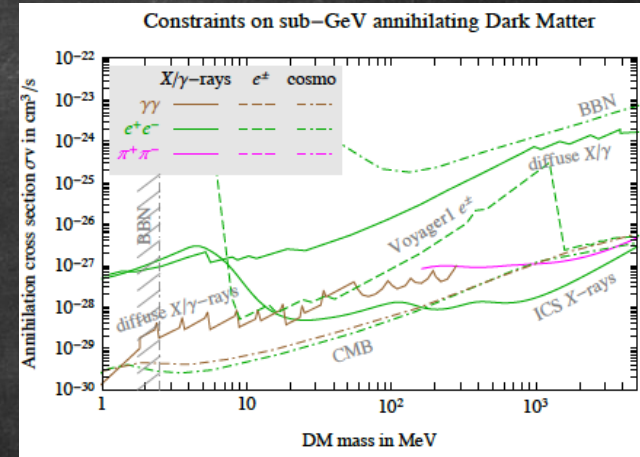


Boudaud+17

Recherche indirecte (WIMPs) : bilan intégré



Cirelli+'24



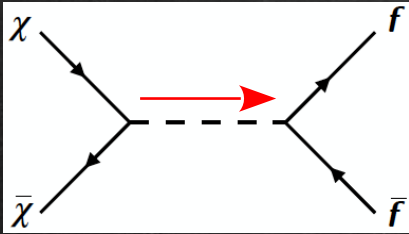
Bilan pour les WIMPs :

- Aucun signal pour l'heure (discussion au centre galactique)
- Limites jusqu'à ~ 50 GeV (incertitudes astrophysiques)
- Programme de recherche expérimental/observationnel actif
- Neutrinos : capture solaire / complémentarité avec recherches directes.

- Zone > 50 GeV à explorer (jusqu'à > 10 TeV)
- CTA attendu pour l'exploration à haute énergie
- Théorie : réduction des incertitudes (signal + fonds) + minihalos

Complémentarité des recherches directes / indirectes

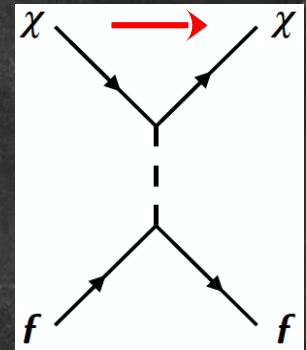
Annihilation



Complémentarité :

- Dépendance en vitesse différente selon le processus (univers primordial \neq aujourd'hui)
- Signatures dépendant explicitement de la vitesse supprimées par caractère non-relativiste de la MN
- Sensibles à différents médiateurs d'interactions
- Pas mutuellement exclusif.

diffusion



Axions QCD : recherches indirectes incertaines

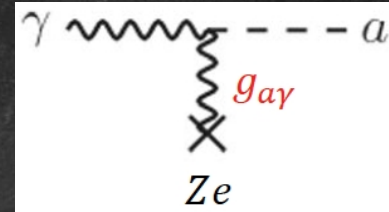
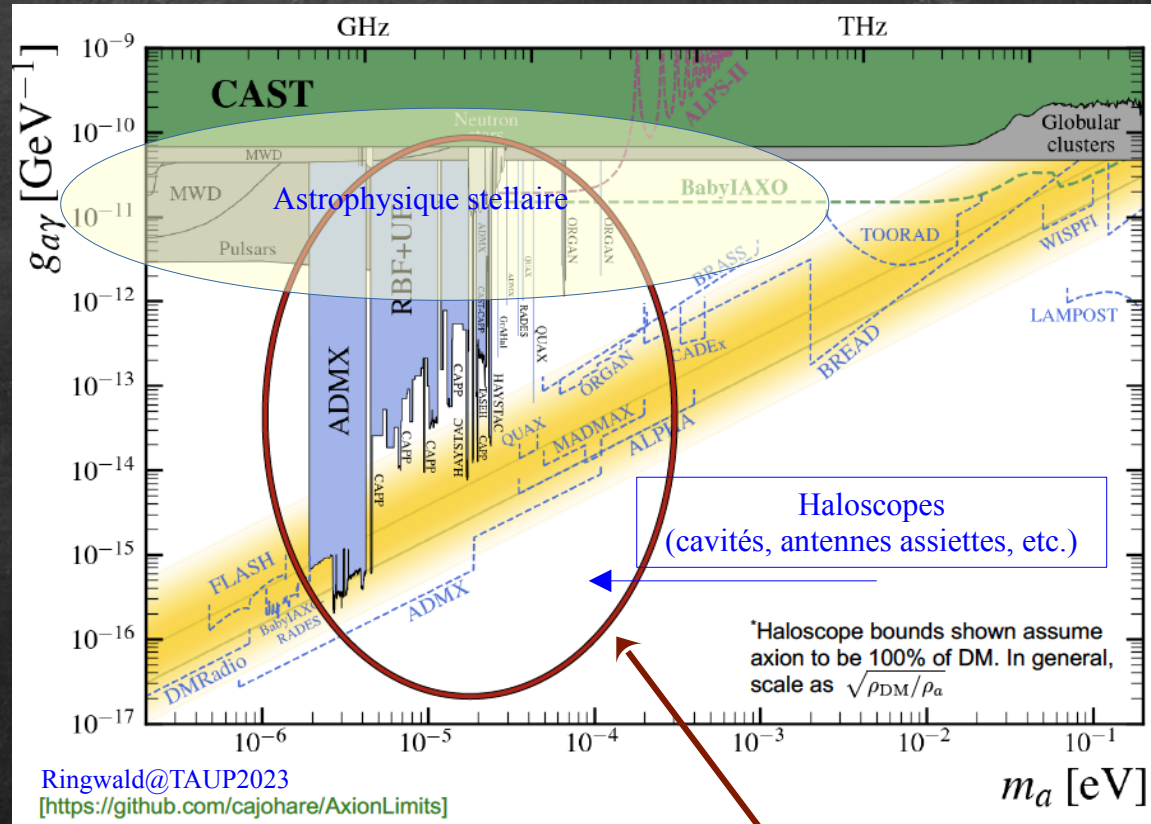
Recherches axion-MN essentiellement directes (haloscopes).

Spécificité du scénario post-inflation:

Mini-amas/étoiles d'axions

Raie radio interaction soliton / étoile à neutrons

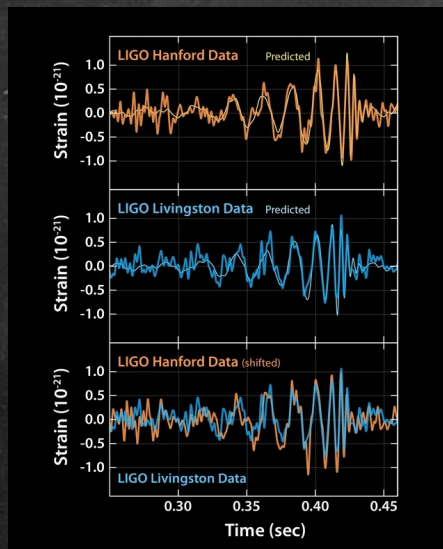
[e.g. Pshirkov&Popov '09, Witte+'23]



Zone pertinente pour l'axion QCD comme candidat à la MN

Un éléphant dans la pièce

LIGO+VIRGO '15-16



Did LIGO detect dark matter?

Simeon Bird,* Ilias Cholis, Julian B. Muñoz, Yacine Ali-Haïmoud, Marc Kamionkowski, Ely D. Kovetz, Alvise Raccanelli, and Adam G. Riess¹

¹*Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University,
3400 N. Charles St., Baltimore, MD 21218, USA*

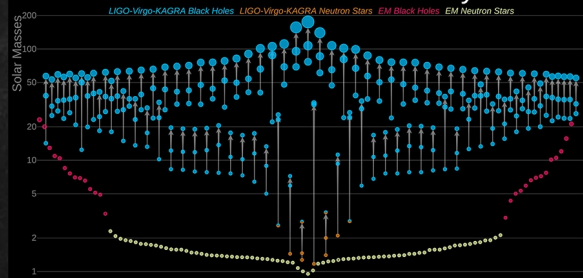
arXiv:1603.00464 (PRL)

Primordial Black Hole Scenario for the Gravitational-Wave Event GW150914

Misao Sasaki,¹ Teruaki Suyama,² Takahiro Tanaka,^{3,1} and Shuichiro Yokoyama⁴

arXiv:1603.08338 (PRL)

Masses in the Stellar Graveyard



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

LIGO/VIRGO/KAGRA (O3)

arXiv:2111.03606 – 2111.03634

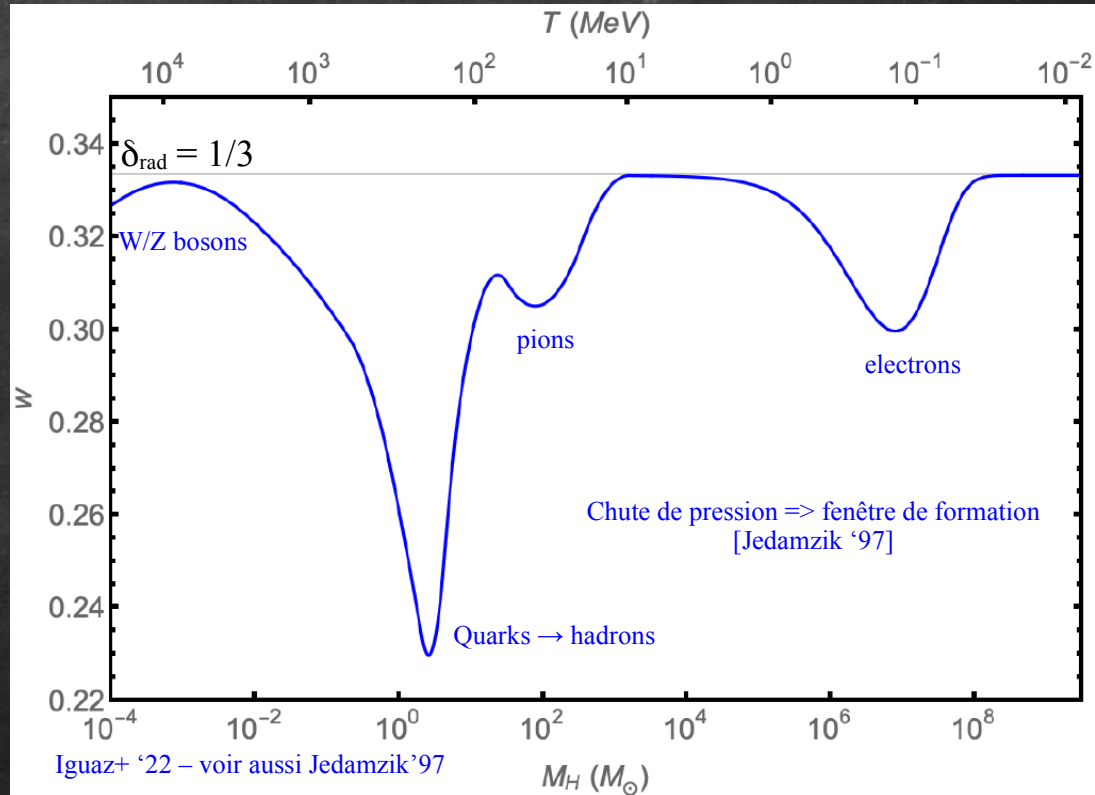
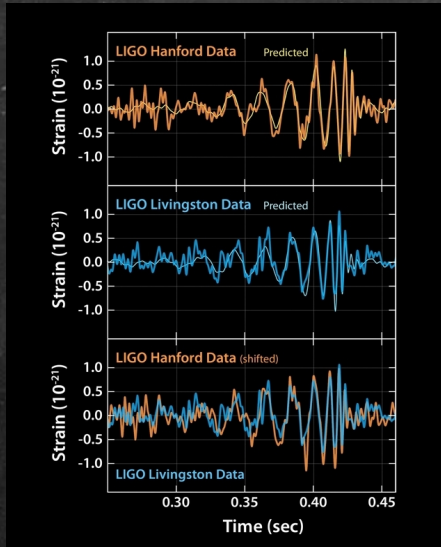
The clustering of massive Primordial Black Holes as Dark Matter: measuring their mass distribution with Advanced LIGO

Sébastien Clesse^{1,*} and Juan García-Bellido^{2,†}

arXiv:1603.05234 (PDU)

Un éléphant dans la pièce

LIGO+VIRGO '15-16

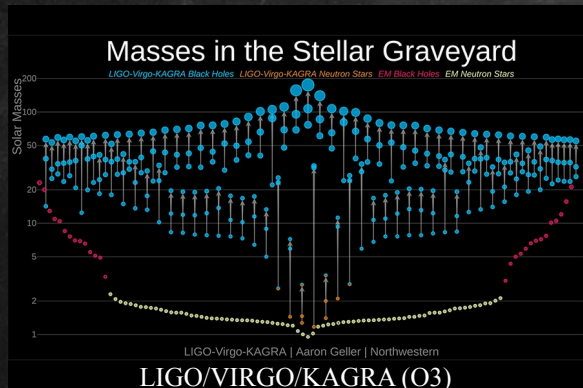


Iguaz+ '22 – voir aussi Jedamzik'97

[Zeldovich, Novikov, Hawking, Carr]

$$\delta \geq \delta_c \sim w = \frac{p}{\rho} = \frac{1}{3}$$

$$M_H \sim 10^{15} \text{ g} \left(\frac{t}{10^{-23} \text{ s}} \right)$$

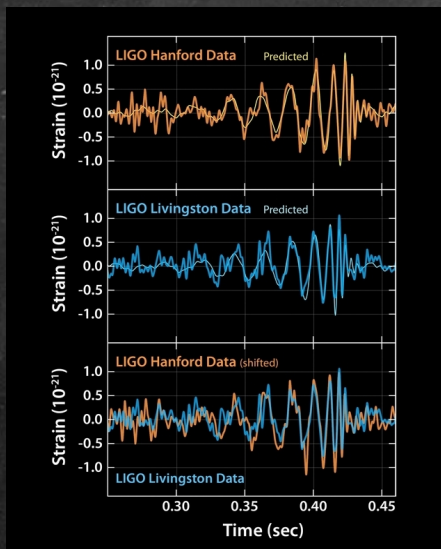


LIGO/VIRGO/KAGRA (O3)

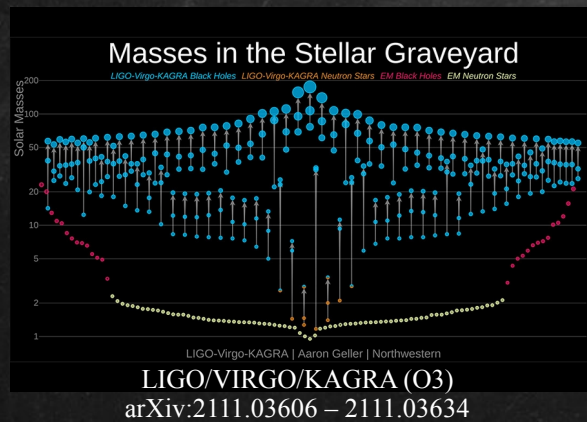
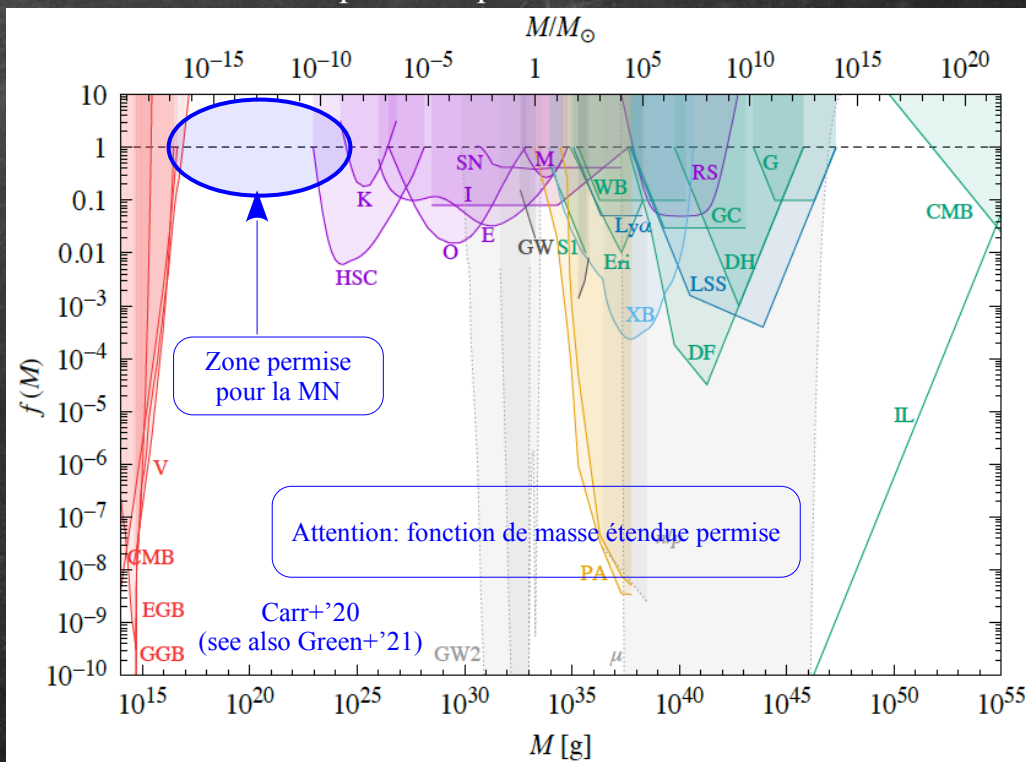
arXiv:2111.03606 – 2111.03634

Un éléphant dans la pièce

LIGO+VIRGO '15-16



Un espace des paramètres très contraint



Regain d'intérêt pour les trous noirs primordiaux

- Très contraints, possiblement composante de MN sous-dominante
- Signature très claire : événement OG < 1 masse solaire
- Effet sur les autres candidats ?

Capture de MN par des trous noirs primordiaux

Ère de radiation

Égalité

Ère de matière

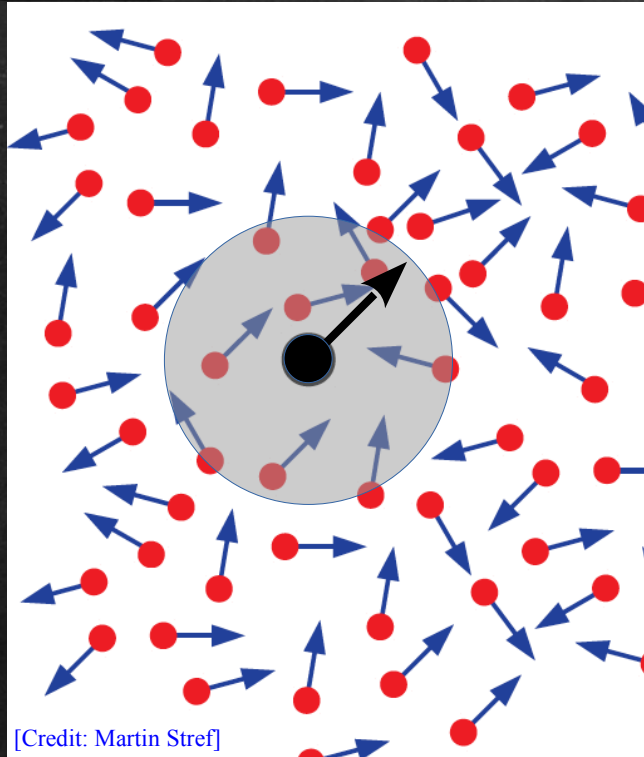
Découplage chimique

Collisions avec plasma chaud

Découplage cinétique

Particules libres (sans collision)

Accrétion secondaire



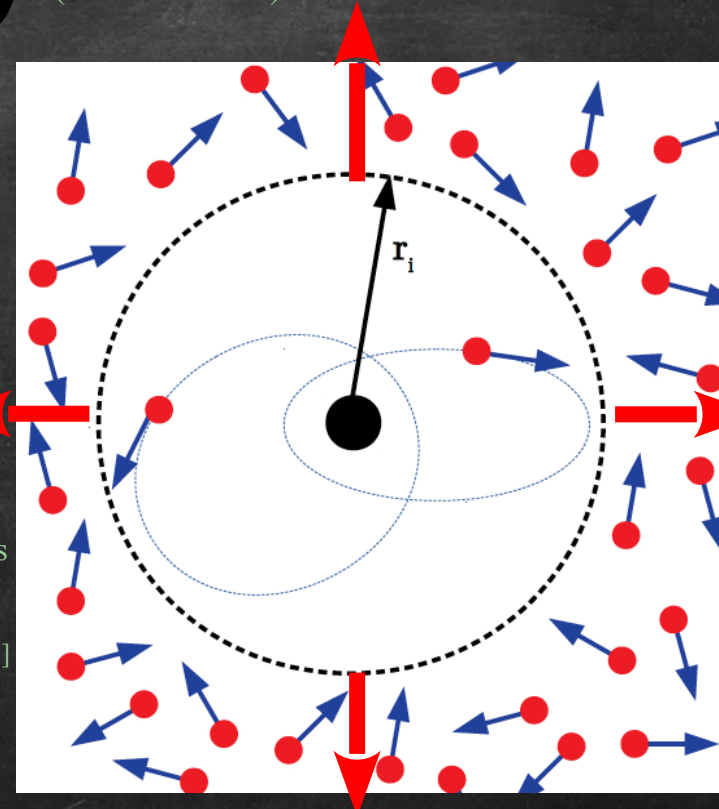
Rayon d'influence croît avec le temps

- Formation de pics ultra-denses
- Nouvelles sources de MN

[Lacki & Beacom '10, Eroshenko '16]

[Credit: Martin Stref]

Les particules rebondissent et ne voient pas le trou noir

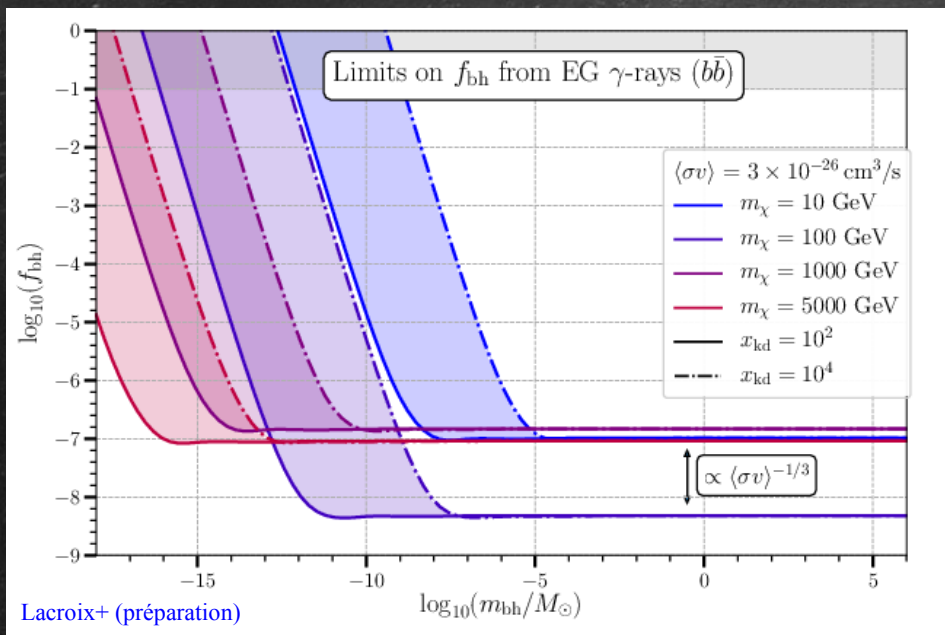


Nouvelle source d'annihilation

Les particules libres peuvent tomber en chute libre vers le trou noir

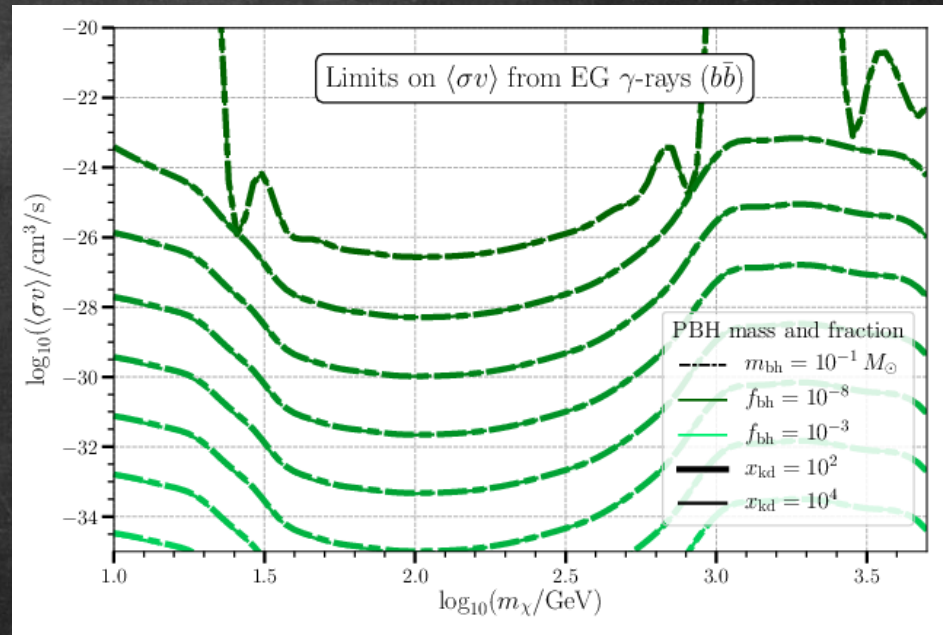
Capture de MN par des trous noirs primordiaux

Contraintes sur la fraction de TNPx
(si les WIMPs sont découverts)



[voir aussi Boucenna+'18, Carr+'21, Gines+'22, etc.]

Contraintes sur les WIMPs
(si des TNPx sont découverts ($f \ll 1$))



Les trous noirs primordiaux cohabitent très mal avec certains candidats à la MN, même s'ils sont complètement sous-dominants.

Interactions MN/trous noirs aussi explorées pour OGs.

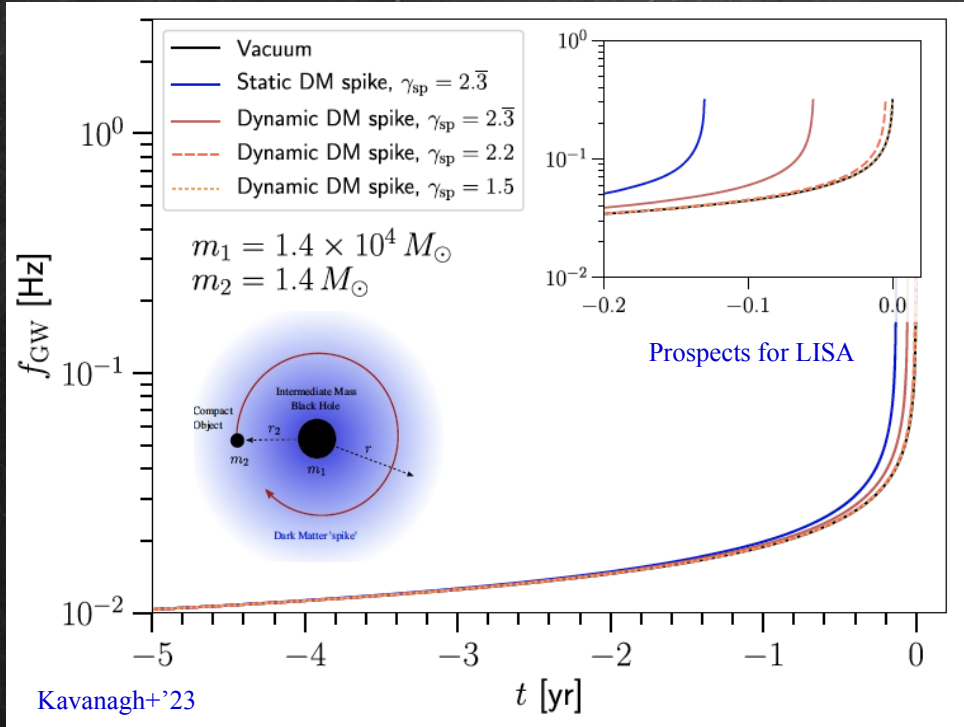
Perspectives

- Matière noire froide : scénario très prédictif (propriétés des structures), et testé avec beaucoup de succès. [Attention : structures = matière noire + perturbations/inflation].
- Questions aux petites échelles (baryons, matière noire, ou autre chose ?).
- Plusieurs candidats en physique des particules au-delà du modèle standard, avec parfois des motivations théoriques fortes et indépendantes (e.g. axions).
- Mécanismes de production : conséquences pour les propriétés des structures + signatures observationnelles.
- Le WIMP, candidat le plus économique en terme de production + falsifiable : recherche active (gamma, etc.), et espace permis possiblement exploré d'ici 2030-2040 [CTA au TeV]
- Les progrès technologiques récents permettent de commencer à explorer l'hypothèse axionique [e.g. MadMax].
- Impact des trous noirs [primordiaux] (ondes gravitationnelles + cohabitation houleuse).
- Recherche des sous-structures de matière noire : astrométrie (Gaia), réseaux de pulsars (ePTA).

Suppléments

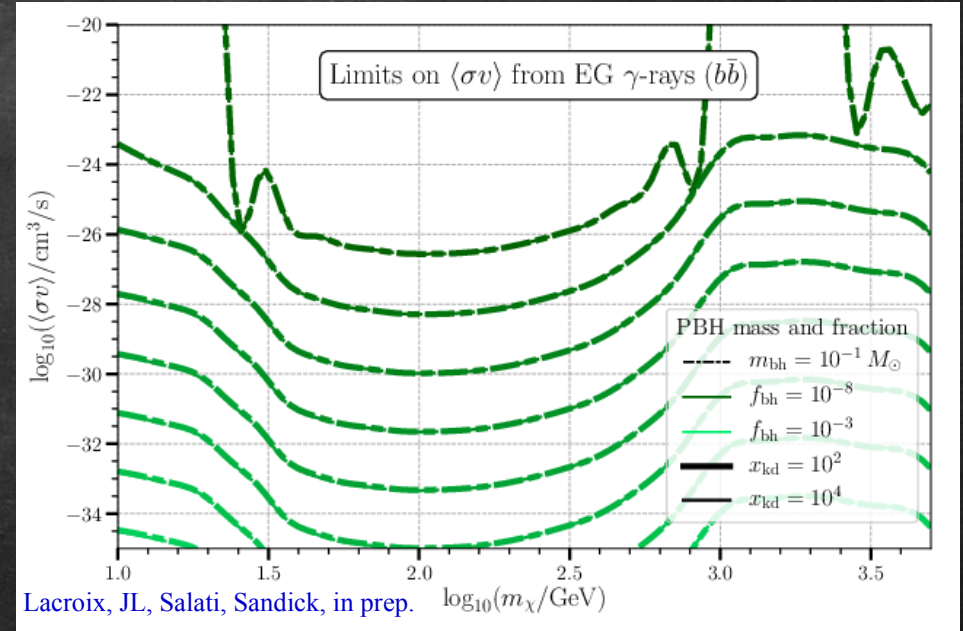
Coexistence of particle/wave DM and (P)BHs

DM impact on inspiral: dynamical friction shortens coalescences time [Eda+ '13]



Q: Impact of 3rd body + baryons + degeneracies?

DM accumulates as dense spikes around PBHs in radiation-dominated universe [Dokuchaev+ '03, Ricotti '07, Mck+ '07, Eroshenko '16]



=> small fraction of PBHs may have dramatic impact on s-wave annihilation WIMP scenario!

[See also Eroshenko '16, Boucenna+ '18, Carr+ '21, Boudaud+ '21, Gines+ '22]

Solutions baryoniques aux petites échelles

The formation of cores in galaxies across cosmic time - the existence of cores is not in tension with the Λ CDM paradigm

R. A. Jackson,^{1,2,3*} S. Kaviraj,² S. K. Yi,³ S. Peirani,^{4,5} Y. Dubois,⁵ G. Martin,^{6,7,8}
J. E. G. Devriendt,⁹ A. Slyz,⁹ C. Pichon,^{5,10} M. Volonteri,⁵ T. Kimm³ and K. Kraljic¹¹

The Mass-Discrepancy Acceleration Relation: A Natural Outcome of Galaxy Formation in Cold Dark Matter Halos

Aaron D. Ludlow,* Alejandro Benítez-Llambay, Matthieu Schaller, Tom Theuns, Carlos S. Frenk, and Richard Bower

Joop Schaye Robert A. Crain

Julio F. Navarro,[†] Azadeh Fattahi, and Kyle A. Oman

MIND THE GAP: IS THE TOO BIG TO FAIL PROBLEM RESOLVED?

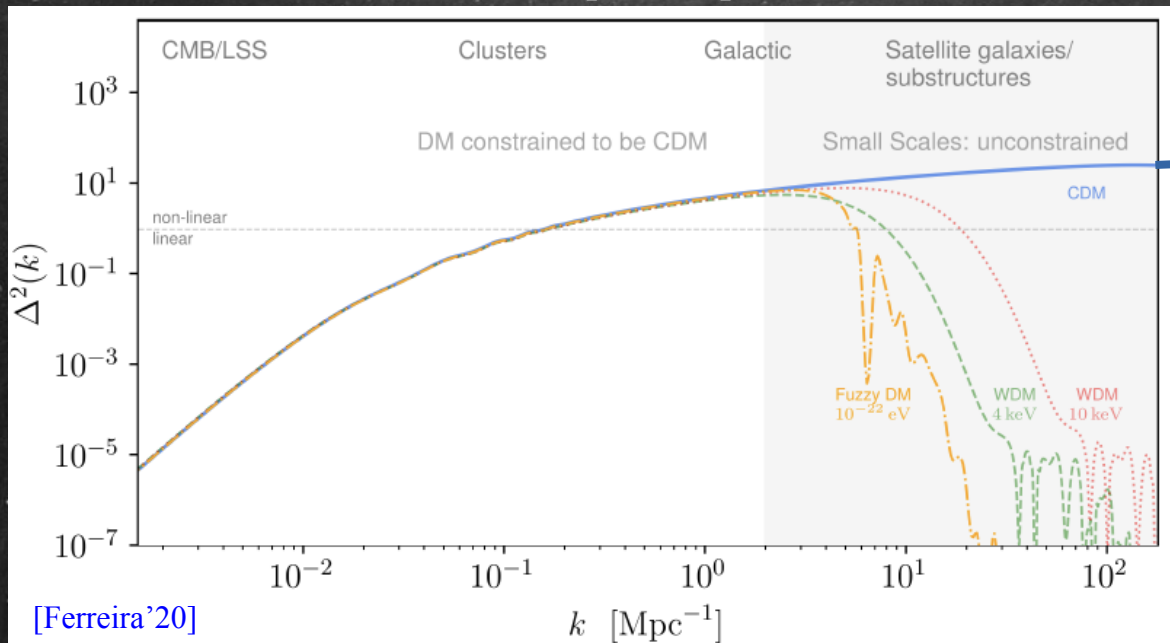
JEREMIAH P. OSTRIKER^{1,2}, ENA CHOI¹, ANTHONY CHOW¹, KUNDAN GUHA¹

Une question demeure : une configuration peut-elle résoudre tous les problèmes à la fois ?

Setting scales in cosmological structures

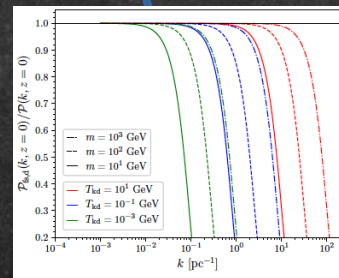
1: before structure formation

Linear matter power spectrum



WIMPs

QCD axions



WDM

Fuzzy DM

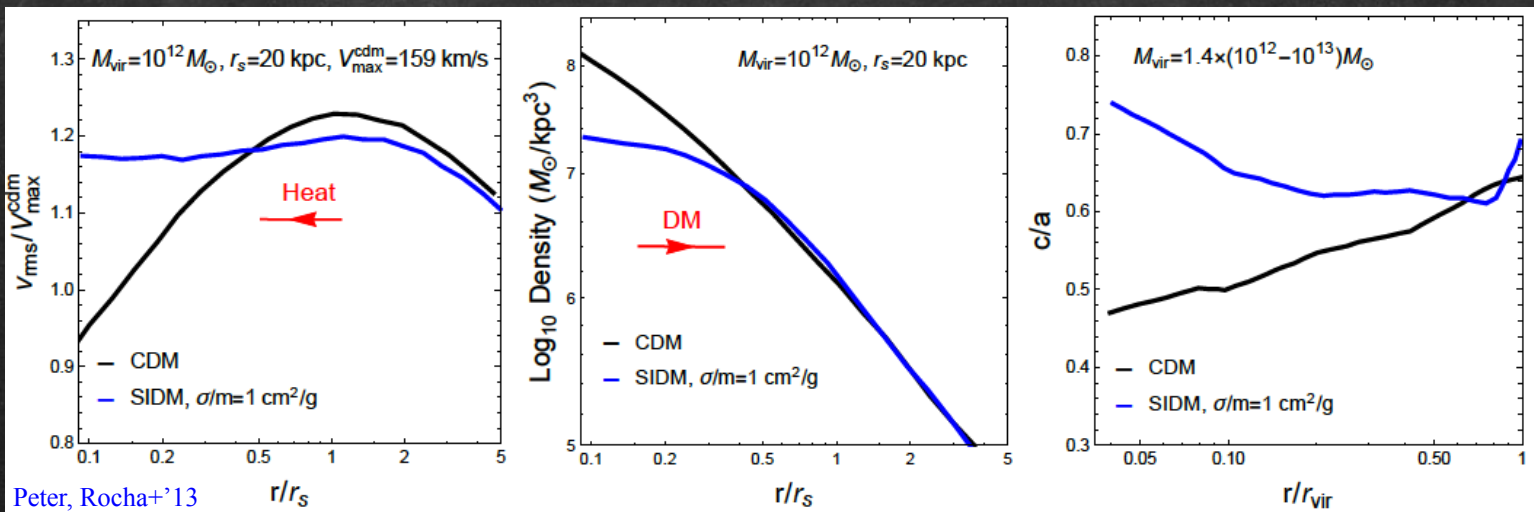
Setting scales in structures 2: after structure formation

On small
scales

Cusps are flattened



Self-interacting DM
[e.g. Tulin&Yu'18, Adhikari+'22]



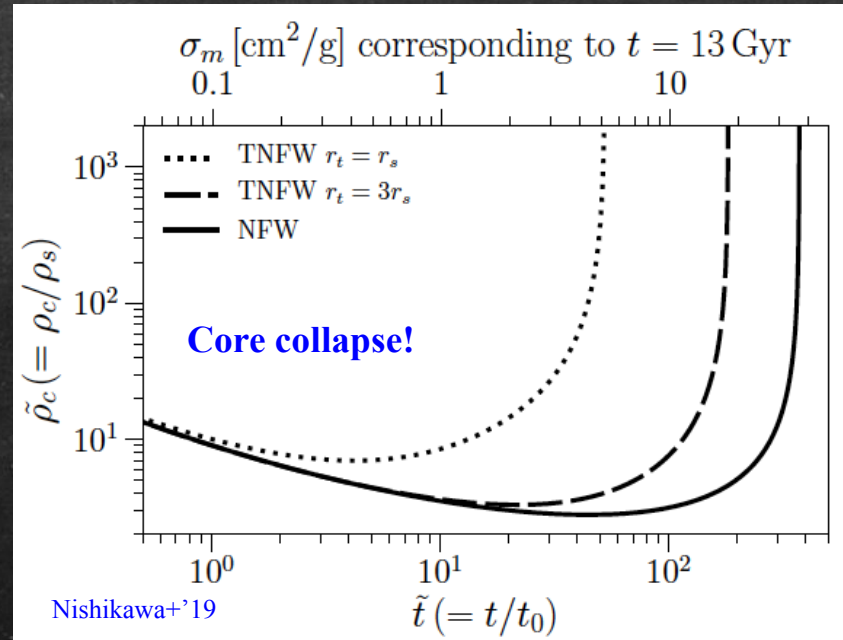
$$R_{\text{scat}} = \sigma v_{\text{rel}} \rho_{\text{dm}} / m \approx 0.1 \text{ Gyr}^{-1} \times \left(\frac{\rho_{\text{dm}}}{0.1 M_{\odot}/\text{pc}^3} \right) \left(\frac{v_{\text{rel}}}{50 \text{ km/s}} \right) \left(\frac{\sigma/m}{1 \text{ cm}^2/\text{g}} \right)$$

Setting scales in structures 2: after structure formation

Self-interacting DM
[e.g. Tulin&Yu'18, Adhikari+'22]

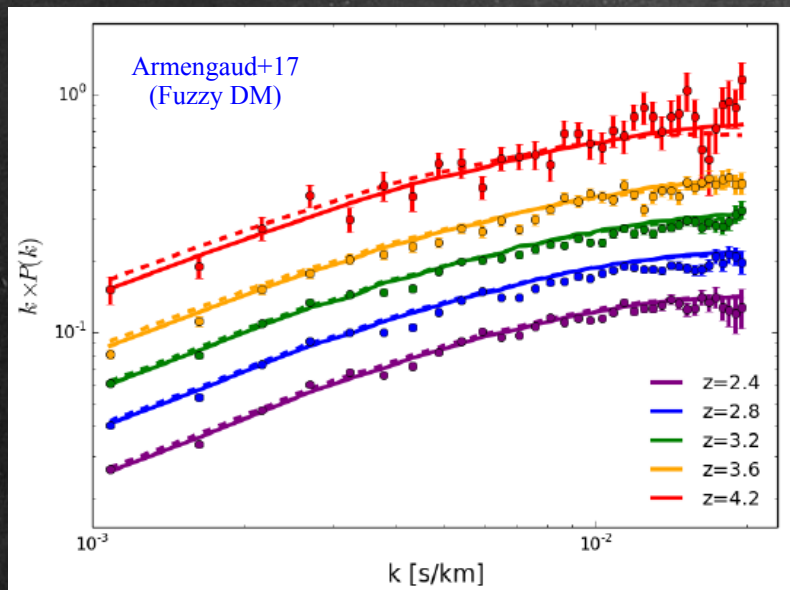


Gravothermal
catastrophe
possible



Seeds for
SMBH
formation?

Some constraints (ULDM & SIDM)



Excluded: $m_a < 2.3 \times 10^{-21}$ eV at 95 % CL

- Many constraints, for example:
- Lyman-alpha power spectrum
 - Rotation curves
 - Dynamics/survival of dwarf galaxies
 - Counting of satellites
 - Cluster collisions (SIDM)
 - Stability / core collapse
 - Etc.

