

# *Pistes théoriques pour le problème de la matière sombre*

**Julien LAVALLE**  
CNRS

**LUPM Theory Group**  
(Univ. Montpellier & CNRS – France)

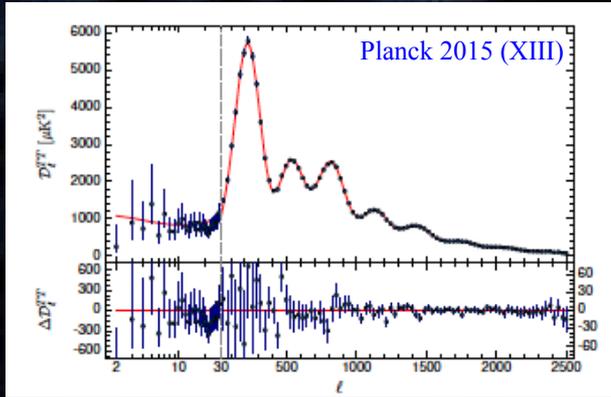
*OCEVU Summer Camp L2*  
*Toulouse, 14 June 2016*



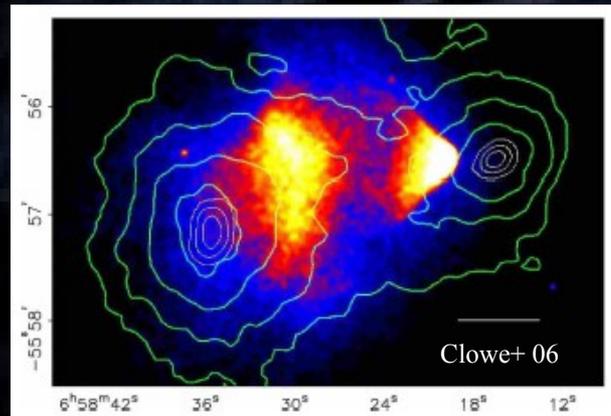
# Menu

- \* Les deux grandes pistes théoriques
- \* La solution “matière” : quelles propriétés ? Sont-elles conformes à celles de la matière ordinaire ?
- \* Quelques concepts utiles
- \* Production de matière sombre dans l'univers primordial : classification
- \* Les candidats interagissant faiblement (WIMPs), et stratégies de découverte associées
- \* Perspectives

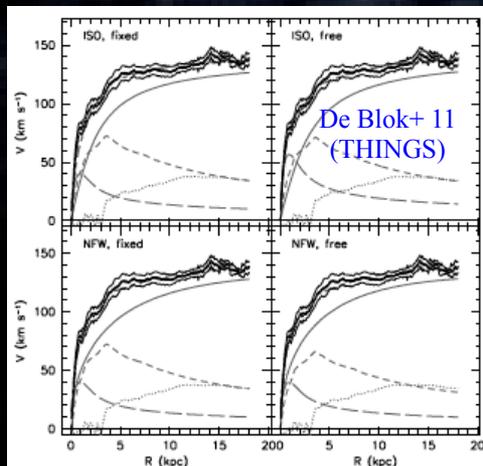
# Pistes théoriques Principales



L'échelle cosmologique

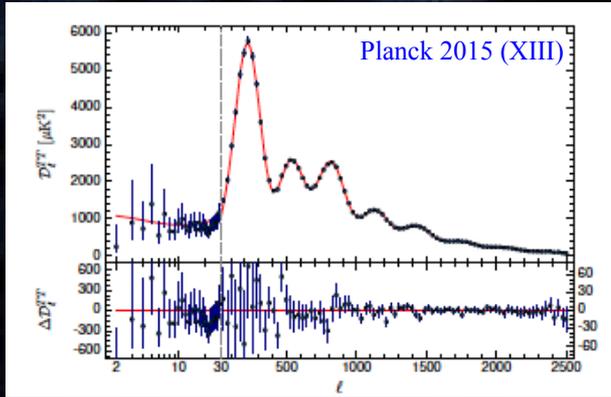


L'échelle des amas de galaxies

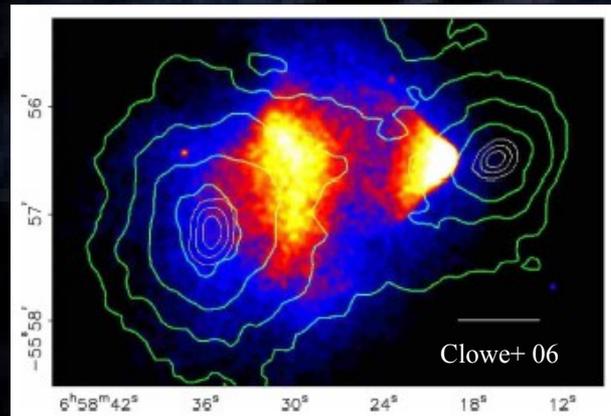


L'échelle des galaxies

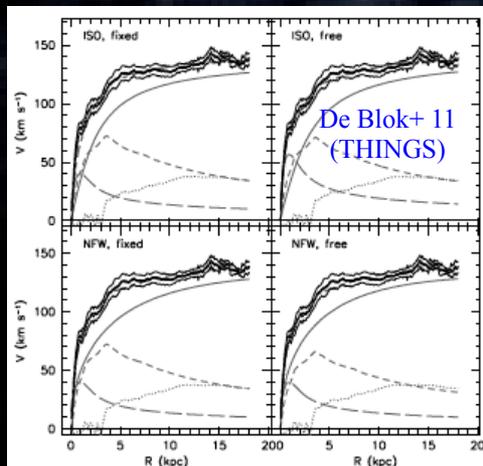
# Pistes théoriques Principales



L'échelle cosmologique



L'échelle des amas de galaxies

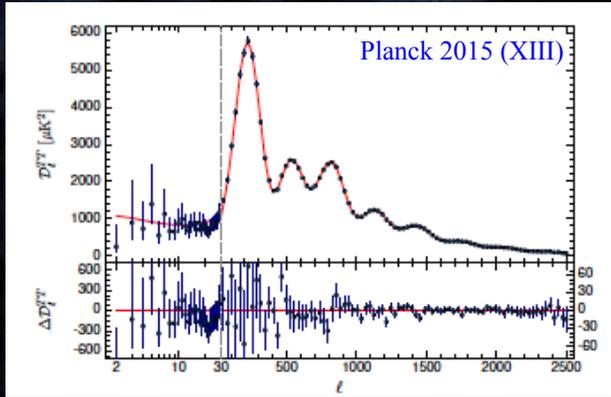


L'échelle des galaxies

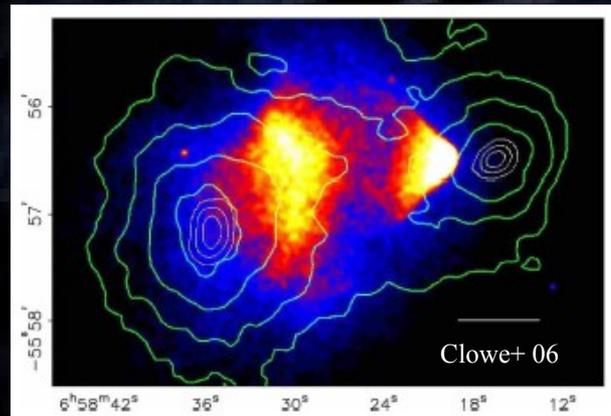
Effets purement gravitationnels  
=> Problème dit de “masse cachée”

=> **2 voies historiques**  
(cf. Anomalies des orbites planétaires  
au XIX<sup>ème</sup> siècle :  
Uranus (→ Neptune)  
Mercure (→ relativité générale))

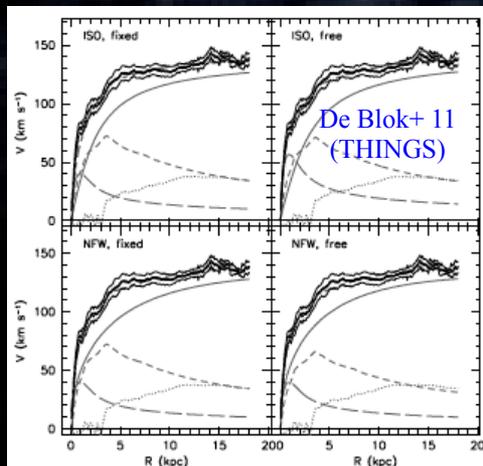
# Pistes théoriques Principales



L'échelle cosmologique



L'échelle des amas de galaxies



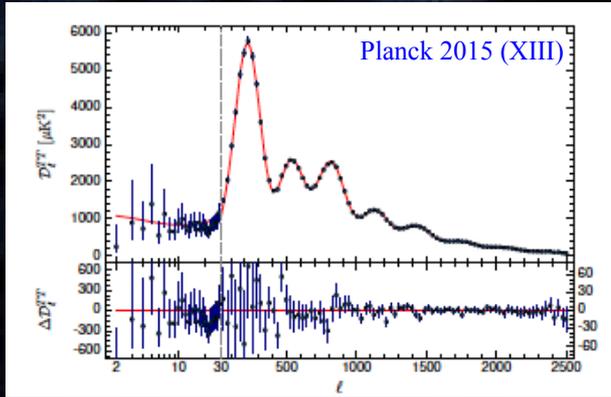
L'échelle des galaxies

**Matière invisible**

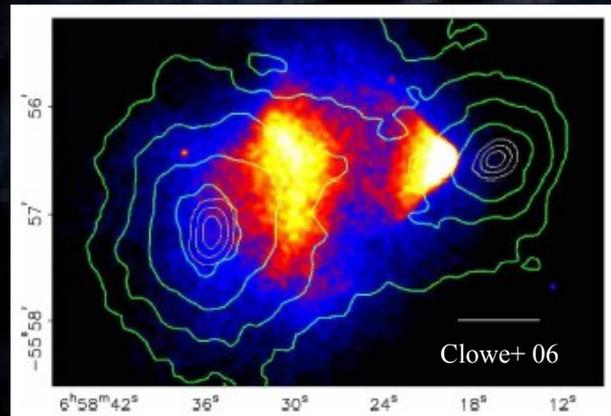
Effets purement gravitationnels  
=> Problème dit de "masse cachée"

=> **2 voies historiques**  
(cf. Anomalies des orbites planétaires  
au XIX<sup>ème</sup> siècle :  
Uranus ( $\rightarrow$  Neptune)  
Mercure ( $\rightarrow$  relativité générale))

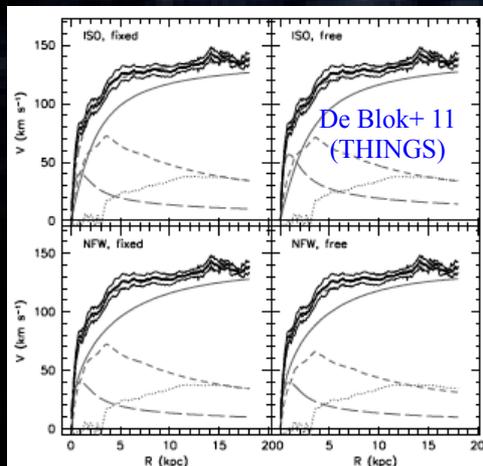
# Pistes théoriques Principales



L'échelle cosmologique



L'échelle des amas de galaxies



L'échelle des galaxies

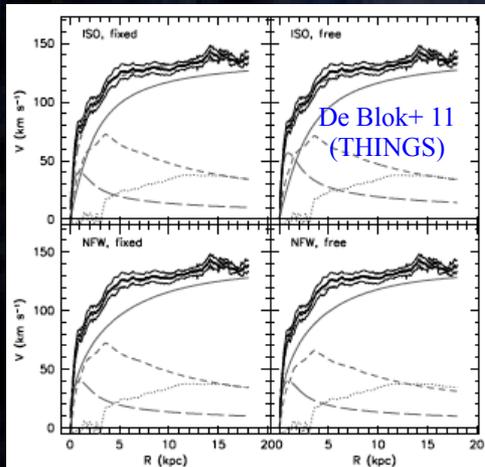
**Matière invisible**

Effets purement gravitationnels  
=> Problème dit de "masse cachée"

=> **2 voies historiques**  
(cf. Anomalies des orbites planétaires  
au XIX<sup>ème</sup> siècle :  
Uranus (→ Neptune)  
Mercure (→ relativité générale))

**Modification  
de la gravité**

# Modification de la gravité



Comment résoudre le problème des courbes de vitesses plates ?

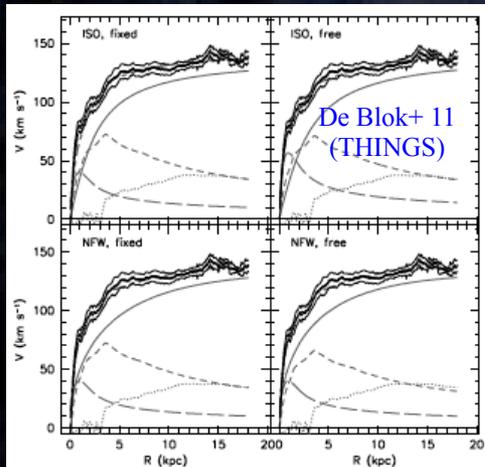
2ième loi de Newton (mvt circulaire uniforme)

$$\|\vec{a}\| = a_{\perp} = \frac{v_c(r)}{r} = \frac{G M(r)}{r^2}$$

Décroissance képlérienne des vitesses

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{G M(r)}{r}} \sim 1/\sqrt{r}$$

# Modification de la gravité



Comment résoudre le problème des courbes de vitesses plates ?

2ième loi de Newton (mvt circulaire uniforme)

$$||\vec{a}|| = a_{\perp} = \frac{v_c(r)}{r} = \frac{G M(r)}{r^2}$$



Décroissance képlérienne des vitesses

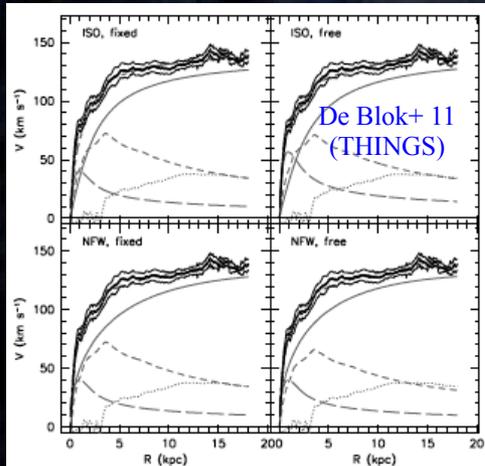
$$v_c(r) = \sqrt{\frac{G M(r)}{r}} \sim 1/\sqrt{r}$$

Nouvel ansatz pour la 2ième loi

$$\vec{\tilde{a}} = \frac{\vec{a}}{(1 + a_0/a)}$$

(Milgrom '83)

# Modification de la gravité



Comment résoudre le problème des courbes de vitesses plates ?

2ième loi de Newton (mvt circulaire uniforme)

$$||\vec{a}|| = a_{\perp} = \frac{v_c(r)}{r} = \frac{G M(r)}{r^2}$$

Décroissance képlérienne des vitesses

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{G M(r)}{r}} \sim 1/\sqrt{r}$$

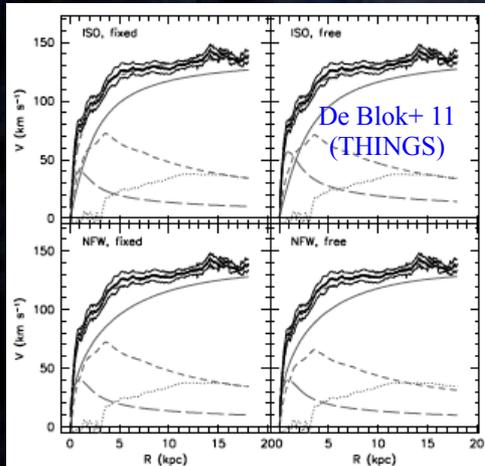
$$\vec{\tilde{a}} \xrightarrow{a_0 \ll a} \vec{a} \Rightarrow \text{Gravité newtonienne en champ fort}$$

Nouvel ansatz pour la 2ième loi

$$\vec{\tilde{a}} = \frac{\vec{a}}{(1 + a_0/a)}$$

(Milgrom '83)

# Modification de la gravité



Comment résoudre le problème des courbes de vitesses plates ?

2ième loi de Newton (mvt circulaire uniforme)

$$\|\vec{a}\| = a_{\perp} = \frac{v_c(r)}{r} = \frac{G M(r)}{r^2}$$

Décroissance képlérienne des vitesses

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{G M(r)}{r}} \sim 1/\sqrt{r}$$

$$\vec{a} \xrightarrow{a_0 \ll a} \vec{a} \Rightarrow \text{Gravité newtonienne en champ fort}$$

Nouvel ansatz pour la 2ième loi

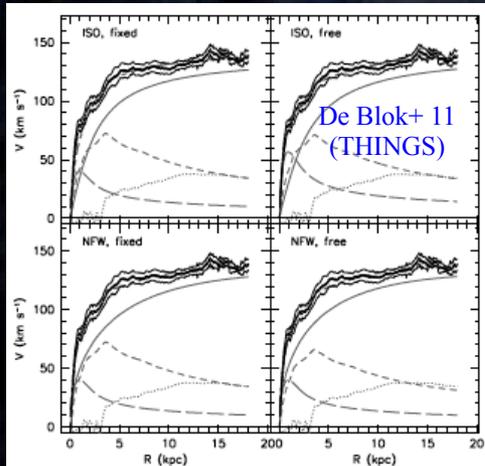
$$\vec{\tilde{a}} = \frac{\vec{a}}{(1 + a_0/a)}$$

(Milgrom '83)

$$\vec{\tilde{a}} \xrightarrow{a_0 \gg a} \frac{a}{a_0} \times \vec{a}$$

$$\|\vec{\tilde{a}}\| = \frac{a^2}{a_0} = \frac{v_c^4(r)}{a_0 r^2} = \frac{G M(r)}{r^2}$$

# Modification de la gravité



Comment résoudre le problème des courbes de vitesses plates ?

2ième loi de Newton (mvt circulaire uniforme)

$$\|\vec{a}\| = a_{\perp} = \frac{v_c(r)}{r} = \frac{G M(r)}{r^2}$$

Décroissance képlérienne des vitesses

$$v_c(r) = \sqrt{\frac{G M(r)}{r}} \sim 1/\sqrt{r}$$

$\vec{a} \xrightarrow{a_0 \ll a} \vec{a}$   $\Rightarrow$  Gravité newtonienne en champ fort

Nouvel ansatz pour la 2ième loi

$$\vec{\tilde{a}} = \frac{\vec{a}}{(1 + a_0/a)}$$

(Milgrom '83)

$\vec{\tilde{a}} \xrightarrow{a_0 \gg a} \frac{a}{a_0} \times \vec{a}$   $\Rightarrow$  Gravité modifiée en champ faible

$$v_c(r) \xrightarrow{a_0 \gg a} \{a_0 G M(r)\}^{1/4} \sim \text{constant}$$

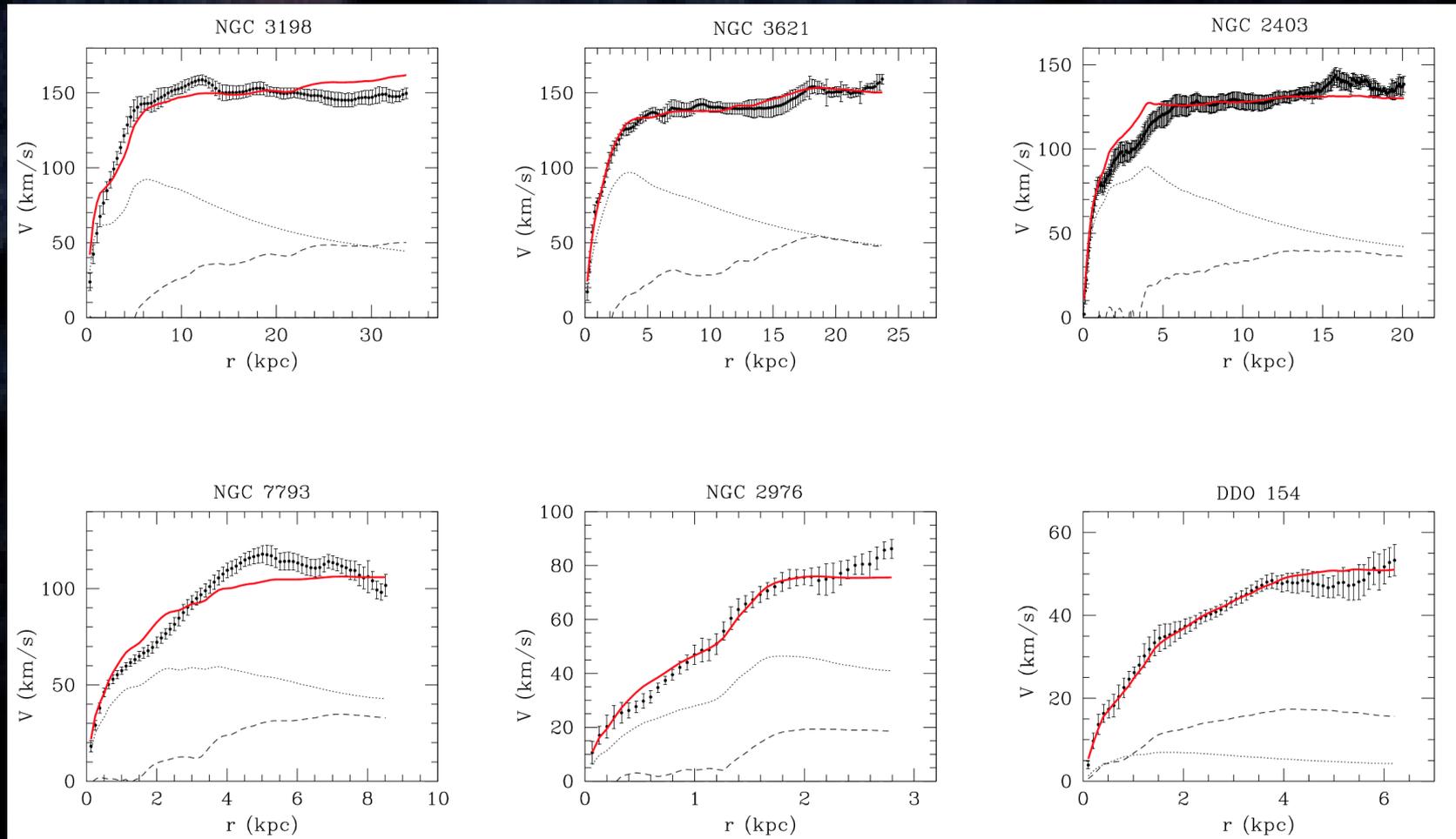
$\Rightarrow$  Courbe de vitesse plate  
+ relation empirique Tully-Fisher

# Les difficultés théoriques de cette voie

#### Succès

- Courbes de rotation des galaxies à partir de la masse lumineuse seulement
- Relation dite de Tully-Fisher

Gentile+ '11



$$a_0 = 1.22 \times 10^{-8} \text{ cm/s}^2$$

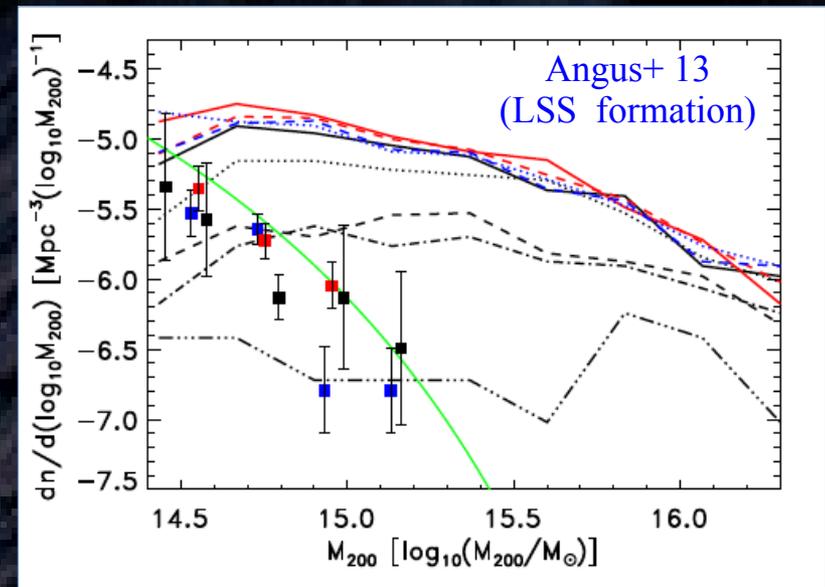
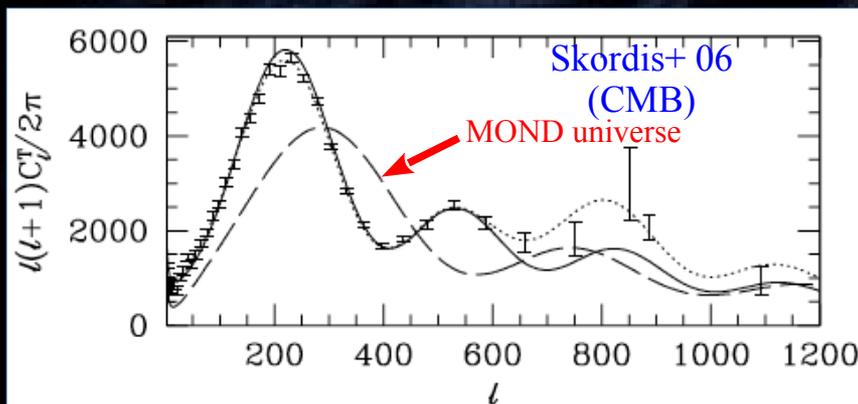
# Les difficultés théoriques de cette voie

## #### Succès

- Courbes de rotation des galaxies à partir de la masse lumineuse seulement
- Relation dite de Tully-Fisher

## #### Difficultés et problèmes

- Forme co-variantisée très difficile à dériver (notamment effet de lentille gravitationnelle)
    - \* Théorie TeVeS (tenseur-vecteur-scalaire) par Bekenstein '04
  - Ne permet généralement pas d'expliquer
    - \* la dynamique des amas de galaxies
    - \* les pics du fond diffus
    - \* la formation des structures
- ⇒ de manière générique, **nécessite l'ajout d'une forme ... de matière sombre**  
⇒ ne résoud donc pas le problème de manière minimaliste.



# Les difficultés théoriques de cette voie

## #### Succès

- Courbes de rotation des galaxies à partir de la masse lumineuse seulement
- Relation dite de Tully-Fisher

## #### Difficultés et problèmes

- Forme co-variantisée très difficile à dériver (notamment effet de lentille gravitationnelle)
  - \* Théorie TeVeS (tenseur-vecteur-scalaire) par Bekenstein '04
- Ne permet généralement pas d'expliquer
  - \* la dynamique des amas de galaxies
  - \* les pics du fond diffus
  - \* la formation des structures
- => de manière générique, **nécessite l'ajout d'une forme ... de matière sombre**
- => ne résoud donc pas le problème de manière minimaliste.

## #### Statut actuel des théories de gravité modifiée

- Très étudiées d'un point de vue formel (N dimensions, AdS/CFT, etc.)
- Versions  $f(R)$  + “gravité massive” + théories bi-métriques pour la cosmologie, mais dans le contexte du problème de l'énergie sombre
- Parmi les seules propositions auto-cohérentes pour la matière sombre
  - \* théorie bi-métrique de Luc Blanchet et al '15  
(mais repose sur l'ajout de nouveaux champs de matière sombre ...).

# Matière sombre *chaude/froide*

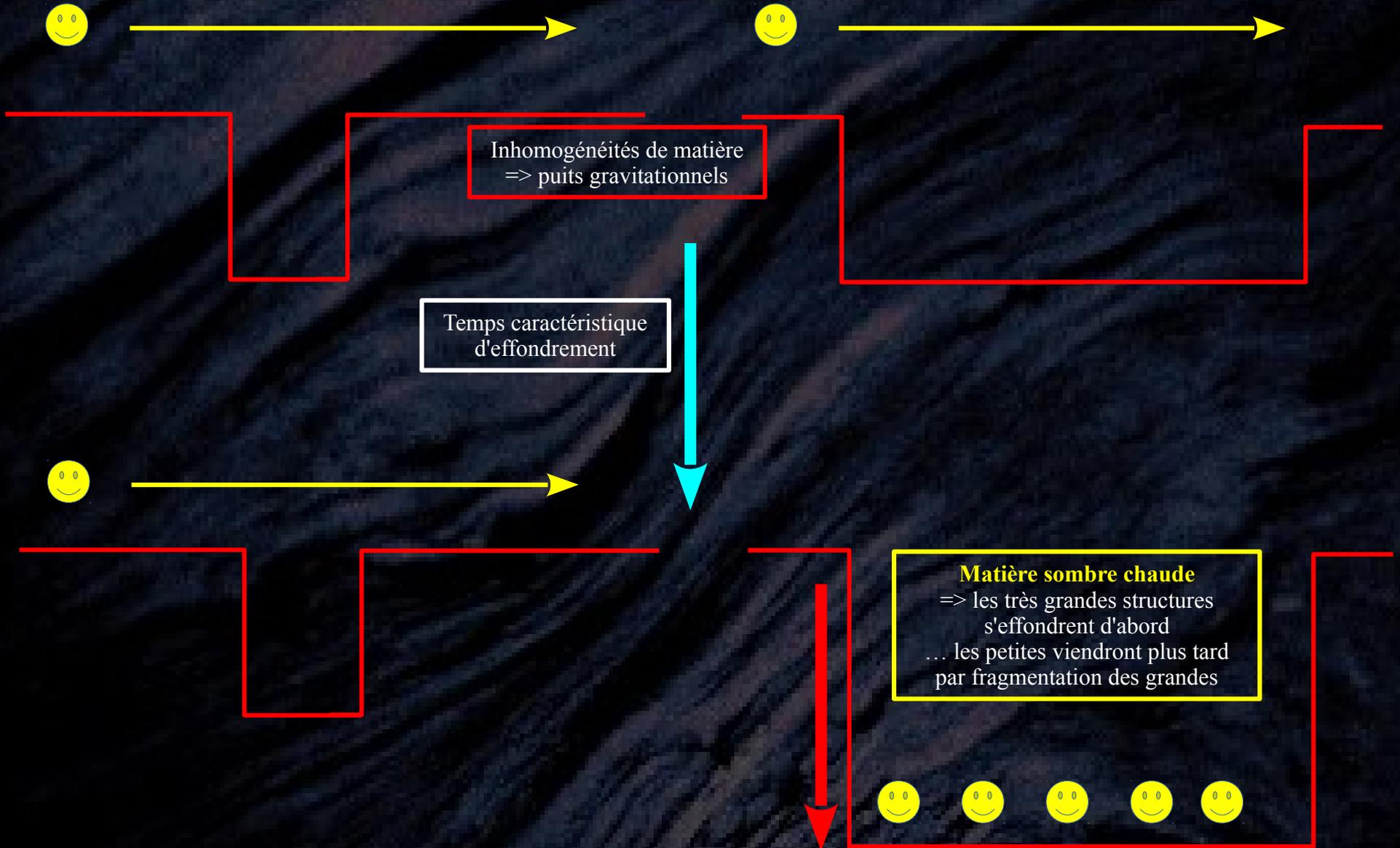
Hypothèse : particules massives libres  
**Chaud**e =>  $p \gg m$  au moment de la croissance des structures  
**Froid**e =>  $p \ll m$  au moment de la croissance des structures



Inhomogénéités de matière  
=> puits gravitationnels

# Matière sombre *chaude*/froide

Hypothèse : particules massives libres  
**Chaque** =>  $p \gg m$  au moment de la croissance des structures  
**Froide** =>  $p \ll m$  au moment de la croissance des structures



# Matière sombre *chaude*/froide

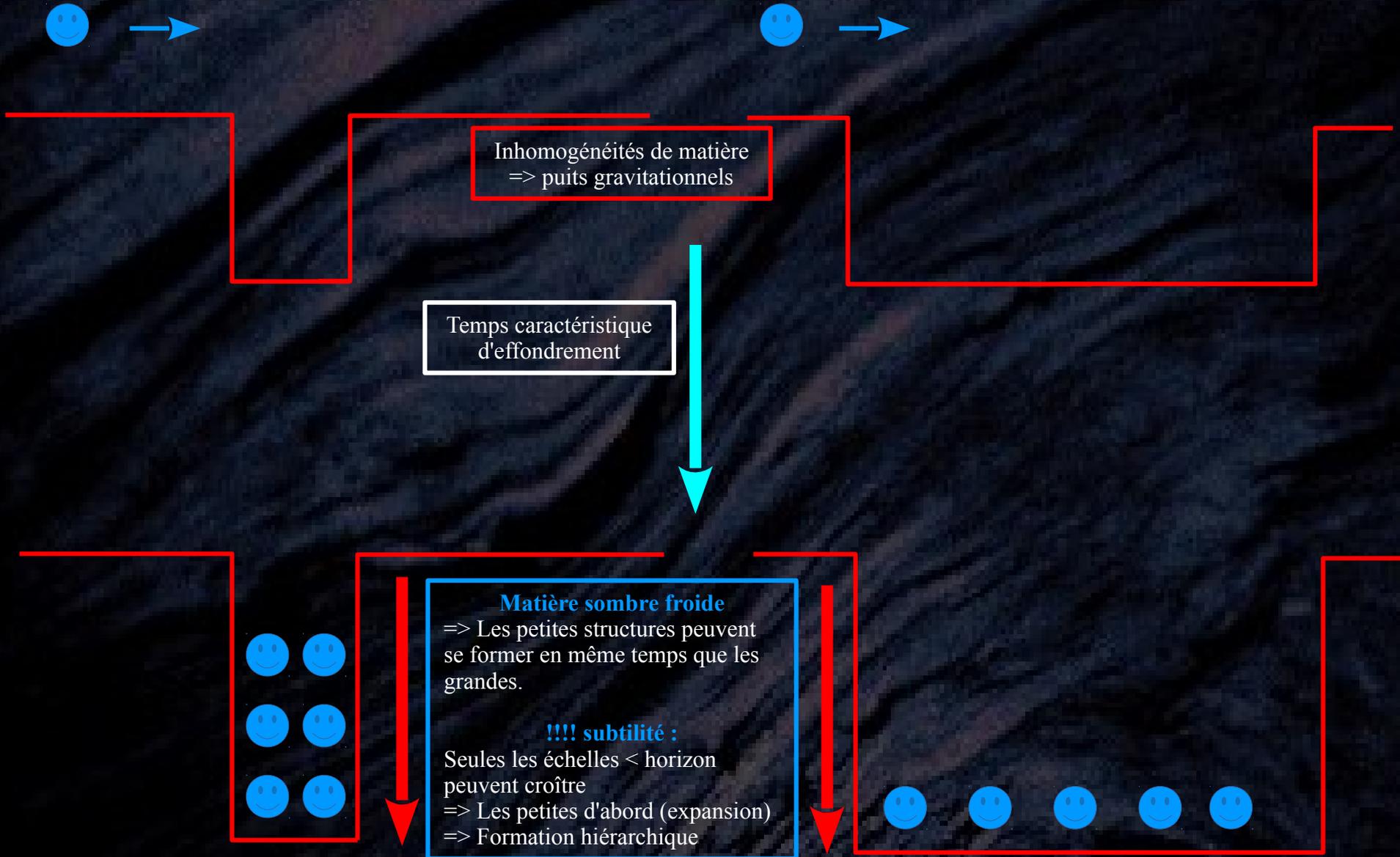
Hypothèse : particules massives libres  
**Chaud**e =>  $p \gg m$  au moment de la croissance des structures  
**Froide** =>  $p \ll m$  au moment de la croissance des structures



Inhomogénéités de matière  
=> puits gravitationnels

# Matière sombre *chaude*/froide

Hypothèse : particules massives libres  
**Chaud** =>  $p \gg m$  au moment de la croissance des structures  
**Froide** =>  $p \ll m$  au moment de la croissance des structures



# *Matière sombre **chaude**/froide*

**Les observations indiquent que la matière sombre doit être froide, ou quasi-froide :**

- \* L'âge des galaxies (formées quelques  $10^8$  années après le Big Bang)
- \* La taille des galaxies naines
- \* Les pics du CMB

**La théorie préfère également la matière sombre froide (dans le cadre de la relativité générale) :**

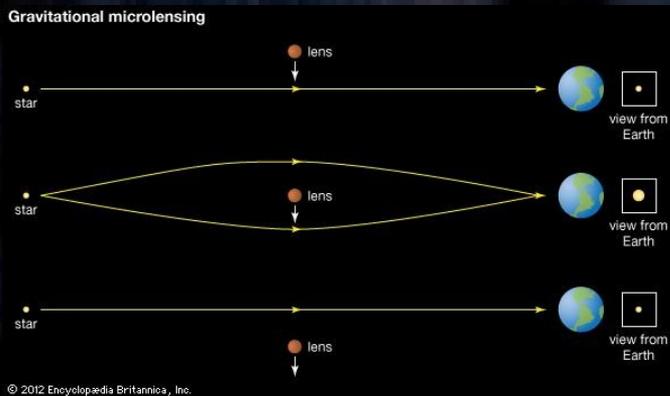
- \* Interprétation des pics du CMB dans un scénario cosmologique
- \* Théorie de la formation des structures à partir de la croissance des perturbations primordiales

# Même matière sombre à toutes les échelles ?

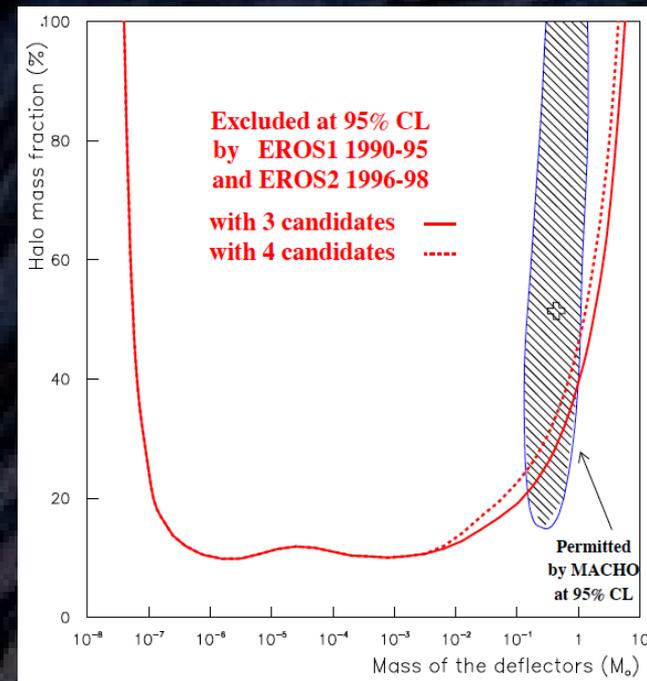
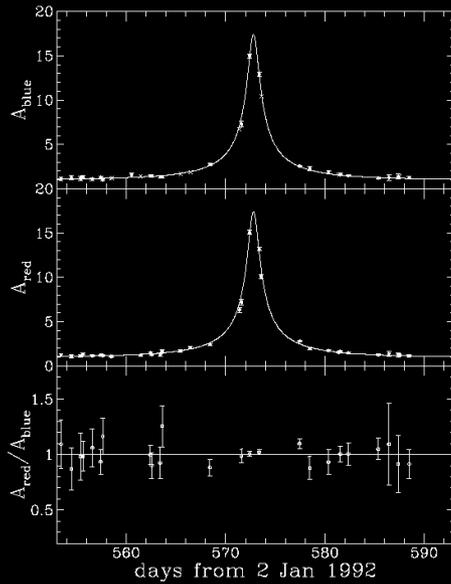
Environ  $\frac{1}{4}$  de la matière sombre se trouve dans les galaxies :

→ pourrait-il s'agir de débris d'étoiles, naines brunes, ou autres corps compacts ?

\* Microlentilles gravitationnelles

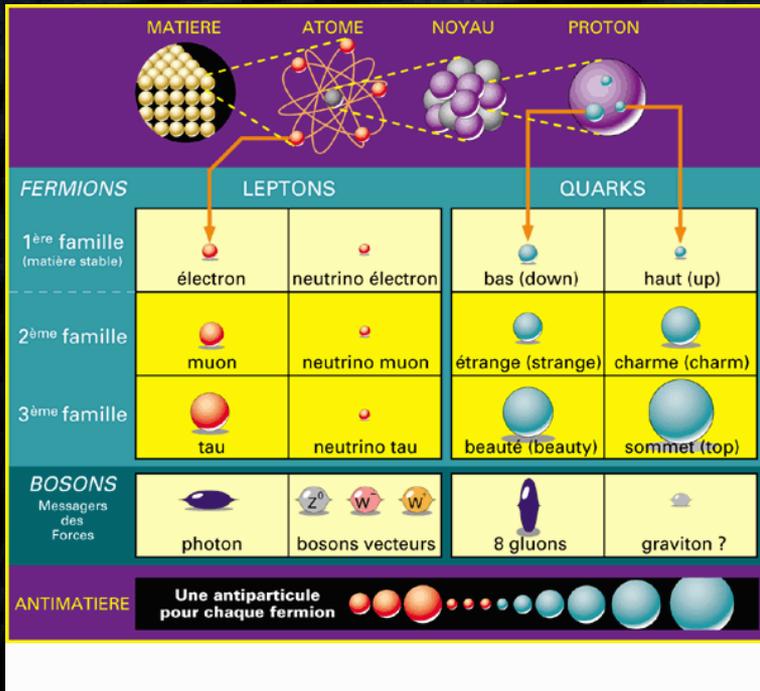


Event 1



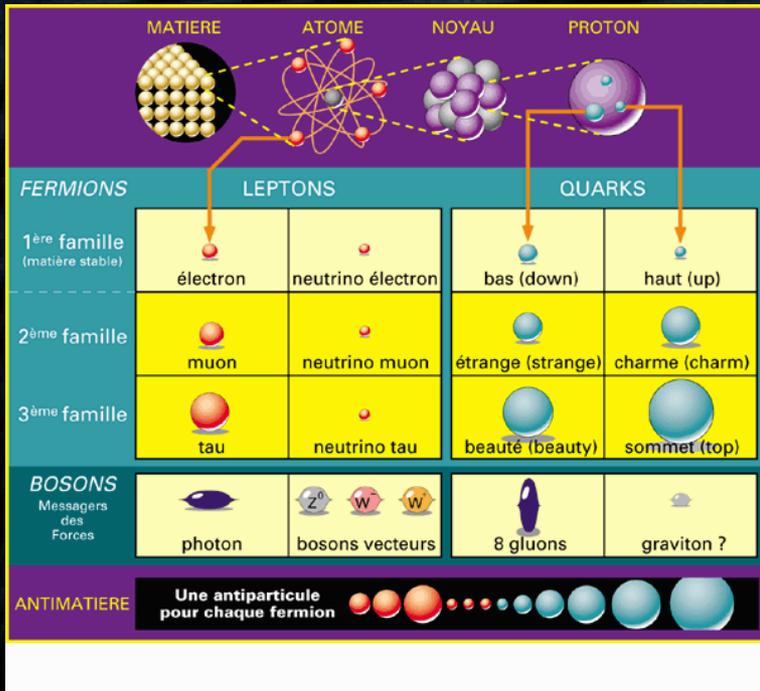
EROS Collab. '00

# Quelles particules de matière sombre ?



Existe-t-il des particules du modèle standard qui pourraient jouer le rôle de la matière sombre ?  
Ou des éléments complexes issus du modèle standard ?  
(atomes, molécules, etc.) ?

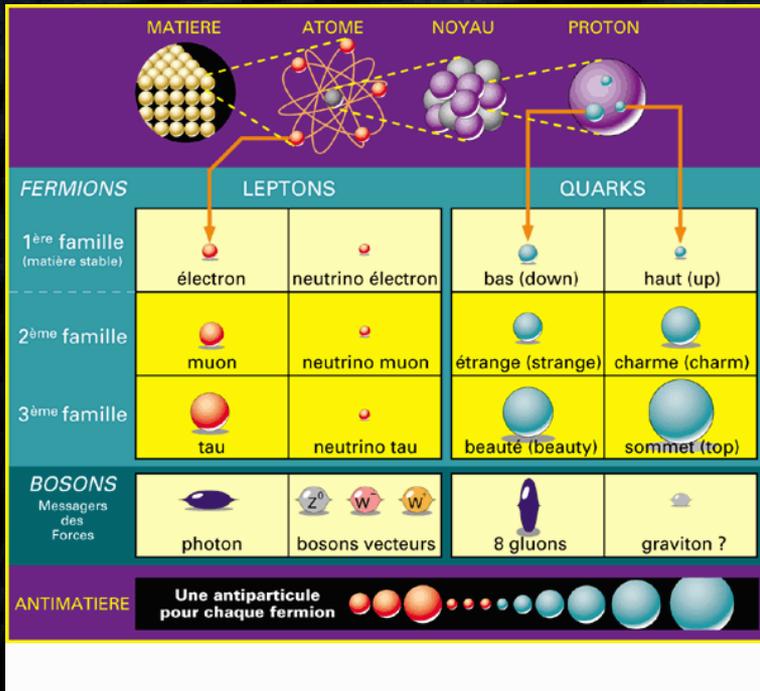
# Quelles particules de matière sombre ?



Existe-t-il des particules du modèle standard qui pourraient jouer le rôle de la matière sombre ?  
Ou des éléments complexes issus du modèle standard ? (atomes, molécules, etc.) ?

Les **neutrinos** ont des propriétés intéressantes (massifs, électriquement neutres, interagissant faiblement avec la matière ordinaire) ... mais seraient de la matière noire chaude (très légers et produits thermiquement).

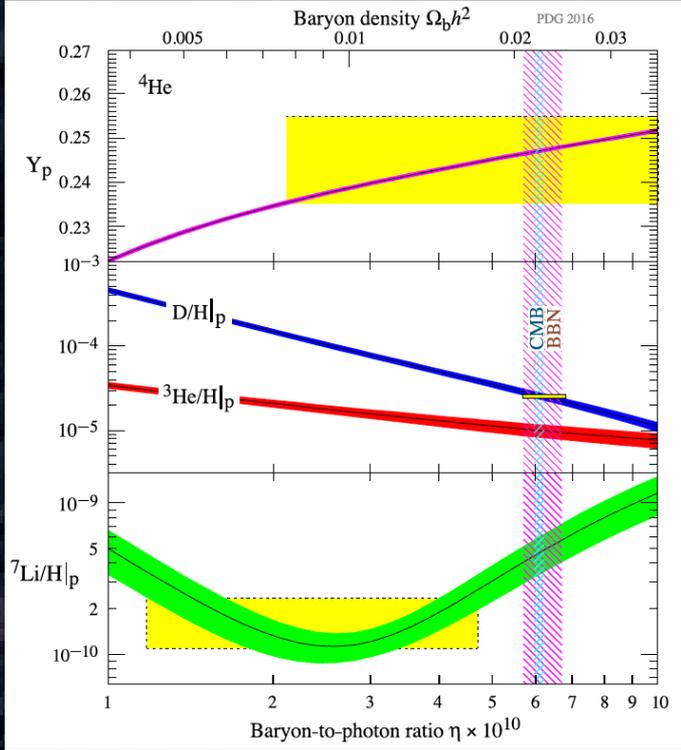
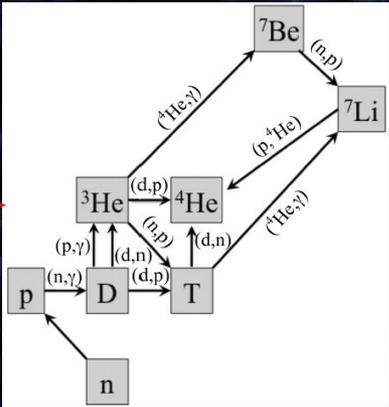
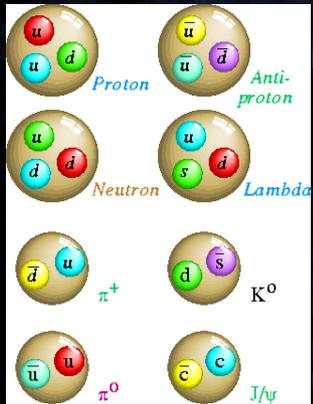
# Quelles particules de matière sombre ?



Existe-t-il des particules du modèle standard qui pourraient jouer le rôle de la matière sombre ?  
Ou des éléments complexes issus du modèle standard ? (atomes, molécules, etc.) ?

Les **neutrinos** ont des propriétés intéressantes (massifs, électriquement neutres, interagissant faiblement avec la matière ordinaire) ... mais seraient de la matière noire chaude (très légers et produits thermiquement).

Thermodynamique dans un univers en expansion + physique des particules / nucléaire  
=> on peut prédire les abondance des éléments légers (**nucléosynthèse primordiale**)



Particle Data Group 2016

## **Conclusion intermédiaire importante :**

**→ Si la matière sombre est faite de particules, ce ne sont pas des particules du modèle standard.**

## **Conclusion intermédiaire importante :**

→ **Si la matière sombre est faite de particules, ce ne sont pas des particules du modèle standard.**

## **Possibilités :**

→ **trous noirs primordiaux (physique de l'inflation) → quasiment exclus**

→ **nouvelles particules (physique des particules au-delà du modèle standard)**

## **Conclusion intermédiaire importante :**

→ **Si la matière sombre est faite de particules, ce ne sont pas des particules du modèle standard.**

## **Possibilités :**

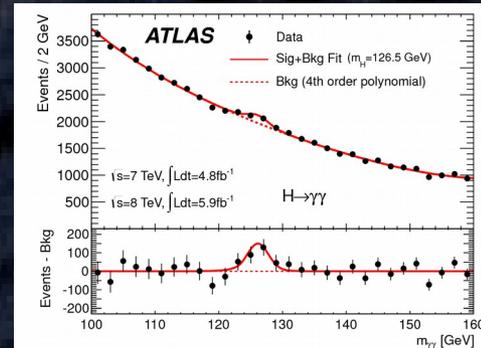
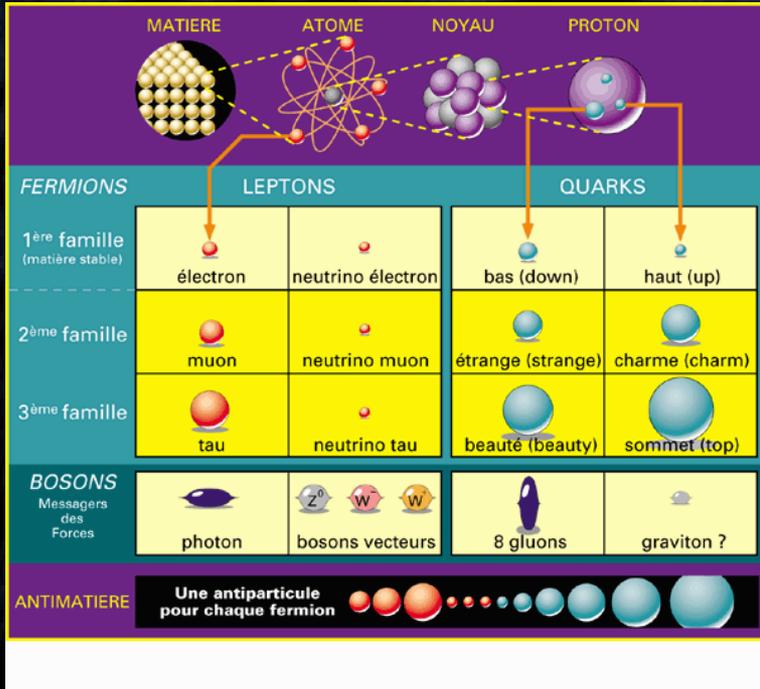
→ **trous noirs primordiaux (physique de l'inflation) → quasiment exclus**

→ **nouvelles particules (physique des particules au-delà du modèle standard)**

### ***Propriétés requises pour une particule de matière sombre :***

- \* massive**
- \* stable (ou de durée de vie  $>$  âge de l'univers)**
- \* électriquement neutre (ou quasi-neutre  $\Rightarrow$  charge  $\ll 1$ )**
- \* interagissant très faiblement avec la matière ordinaire**
- \* (quasi-)froide au moment de la formation des structures**

# Vers de la nouvelle physique ?



Le boson de Higgs vu dans ATLAS

**Le modèle standard de la physique des particules :**

- \* **matière** = fermions (leptons + quarks)
- \* **forces/interactions** = (bosons vecteurs : photons, W, Z, gluons)
- \* **masses des particules** = boson de Brout-Engler-Higgs

=> théorie développée entre 1963-1970  
=> validée expérimentalement avec une grande précision!  
(entre 1980 et 2012 !)  
=> décrit parfaitement tous les phénomènes subatomiques connus

**Mais quelques défauts !**

- \* Ne permet pas d'expliquer l'asymétrie matière-antimatière
- \* N'inclut pas la gravité (gravité quantique)
- \* Problèmes d'ajustements fins, eg : violation de CP-fort, hiérarchie de masses
- \* Stabilité du secteur de Higgs
- \* etc.

=> On pense que le MS est une théorie effective de "basse énergie"

# Physique des particules au-delà du modèle standard

*Le problème de hiérarchie (stabilité du secteur de Higgs)*

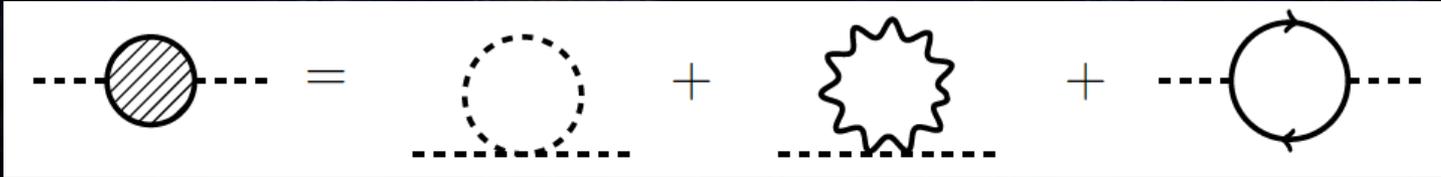


$$\delta m_H^2 = \frac{\Lambda^2}{32\pi^2} \left[ 6\lambda + \frac{1}{4} (9g^2 + 3g'^2) - y_t^2 \right]$$

*Si l'on introduit une nouvelle échelle d'énergie (théorie plus complète), le secteur de Higgs devient instable => ajustement très fin des paramètres.  
=> Les théoriciens n'aiment pas trop les théories instables (cf trous noirs en RG)  
=> Comment résoudre ce problème ?*

# Physique des particules au-delà du modèle standard

## Le problème de hiérarchie (stabilité du secteur de Higgs)



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

*Si l'on introduit une nouvelle échelle d'énergie (théorie plus complète), le secteur de Higgs devient instable => ajustement très fin des paramètres.  
=> Les théoriciens n'aiment pas trop les théories instables (cf trous noirs en RG)  
=> Comment résoudre ce problème ?*

*Parmi les propositions :*

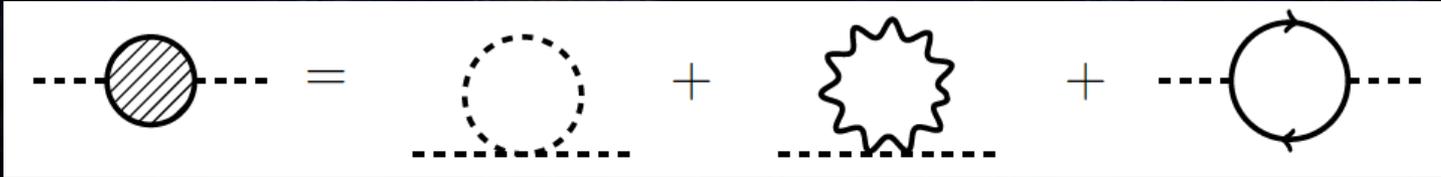
- \* nouvelles symétries entre bosons et fermions = **supersymétrie***
- \* on "dilue" les échelles d'énergie = **dimensions supplémentaires***  
*(Ces deux notions sont utilisées simultanément en théorie des cordes)*

*=> Nouvelles particules*

- +++ Imposer la stabilité du proton => nombre quantique conservé*
  - => nouvelle particule la plus légère est stable !*
  - => ex : le neutralino supersymétrique*  
*(améliore l'unification des interactions)*

# Physique des particules au-delà du modèle standard

## Le problème de hiérarchie (stabilité du secteur de Higgs)



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

Si l'on introduit une nouvelle échelle d'énergie (théorie plus complète), le secteur de Higgs devient instable  $\Rightarrow$  ajustement très fin des paramètres.  
 $\Rightarrow$  Les théoriciens n'aiment pas trop les théories instables (cf trous noirs en RG)  
 $\Rightarrow$  Comment résoudre ce problème ?

Parmi les propositions :

- \* nouvelles symétries entre bosons et fermions = **supersymétrie**
  - \* on "dilue" les échelles d'énergie = **dimensions supplémentaires**
- (Ces deux notions sont utilisées simultanément en théorie des cordes)

$\Rightarrow$  Nouvelles particules

- +++ Imposer la stabilité du proton  $\Rightarrow$  nombre quantique conservé
- $\Rightarrow$  nouvelle particule la plus légère est stable !
- $\Rightarrow$  ex : le neutralino supersymétrique (améliore l'unification des interactions)

!!! Le LHC pose des contraintes telles que les paramètres permettant de résoudre le problème de hiérarchie sont en tension avec l'expérience (unification reste améliorée).

# Physique des particules au-delà du modèle standard

## La masse des neutrinos et l'asymétrie matière-antimatière



$$\mathcal{L} = \mu \left( \frac{\phi}{v} \right) \bar{\nu}_L \nu_R + M \nu_R \nu_R + \text{h.c.}$$

$$\begin{pmatrix} m_{\nu L} & m_D \\ m_D & m_{\nu R} \end{pmatrix}$$

*Neutrinos droits/stériles :*

- \* *asymétries leptoniques transmises au secteur baryonique ( $\geq 2$  neutrinos droits)*
- \* *Si 3 neutrinos droits, possibilités d'avoir le plus léger méta-stable*

*$\Rightarrow$  si  $m \sim 10\text{-}50 \text{ keV}$ , le neutrino droit est un bon candidat à la matière noire*

*Il existe des motivations théoriques  
indépendantes à l'existence de  
nouvelles particules.*

*Certaines peuvent jouer le rôle de la  
matière sombre.*

# *Particules massives interagissant faiblement : les WIMPs*

- \* Comment sont-ils/elles produit/e/s dans l'univers primordial ?**
- \* Comment leur abondance cosmologique est-elle fixée ?**
- \* Comment valider/exclure cette hypothèse ?**

# Préambule : les concepts principaux

$$\tau \equiv \frac{1}{\Gamma}$$

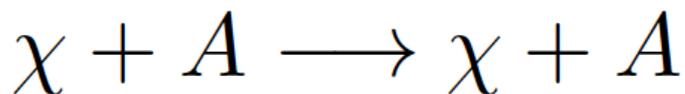
Temps caractéristique pour un processus

$$\tau_A \gg \tau_B$$

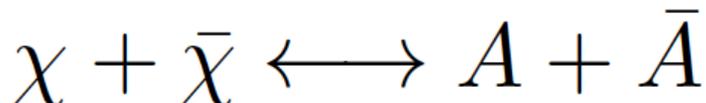
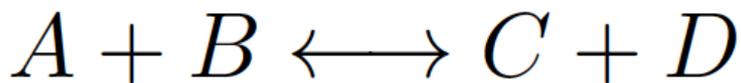
Processus B domine la dynamique du système aux petites échelles de temps

$$\sigma \equiv \frac{\Gamma}{n v}$$

Section efficace : surface effective pour une interaction



Equilibre thermique :  $\tau_{\chi A}$  petit devant le temps dynamique du système



Equilibre chimique :  $\tau_{ABCB}$  petit devant le temps dynamique du système  
=> équilibre thermique entre A, B, C et D

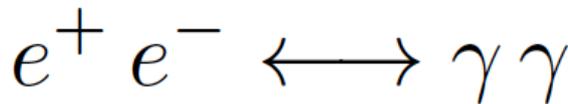
# *Préambule : les concepts principaux*

$$H \equiv \frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{8\pi G}{3} \rho_{\text{tot}}} = \frac{1}{M_P} \sqrt{\frac{8\pi}{3} \rho_{\text{tot}}}$$

Taux d'expansion de l'univers  
(une des équations de Friedmann)

$$E = m c^2$$

- \* L'énergie est conservée dans un processus élémentaire (diffusion).
- \* Les nombres quantiques sont conservés.
- \* Le nombre des particules n'est pas conservé.



# Chronologie



$10^{-43}$  s /  $10^{19}$  GeV

Singularité Big Bang ?

$10^{-35}$  s /  $10^{16}$  GeV

Inflation / grande unification ?

$10^{-12}$  s /  $10^2$  GeV

Brisure électrofaible

$10^{-6}$  s / 100 MeV

Transition quark-hadrons

10 s / 1 MeV

Découplage des neutrinos

10 min / 100 keV

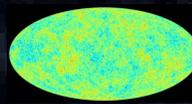
Fin de la nucléosynthèse

50 ans / 10-100 eV

Transition radiation/matière

$380 \cdot 10^3$  ans / 1 eV

Découplage photons/matière



# Chronologie

$10^{-43}$  s /  $10^{19}$  GeV

Singularité Big Bang ?

$10^{-35}$  s /  $10^{16}$  GeV

Inflation / grande unification ?

$10^{-12}$  s /  $10^2$  GeV

Brisure électrofaible

$10^{-6}$  s / 100 MeV

Transition quark-hadrons

10 s / 1 MeV

Découplage des neutrinos

10 min / 100 keV

Fin de la nucléosynthèse

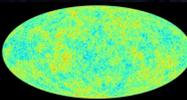
50 ans / 10-100 eV

Transition radiation/matière

Croissance des premières structures  
(matière sombre)

$380 \cdot 10^3$  ans / 1 eV

Découplage photons/matière



# Chronologie



$10^{-43}$  s /  $10^{19}$  GeV  
Singolarité Big Bang ?

$10^{-35}$  s /  $10^{16}$  GeV  
Inflation / grande unification ?

$10^{-12}$  s /  $10^2$  GeV  
Brisure électrofaible

$10^{-6}$  s / 100 MeV  
Transition quark-hadrons

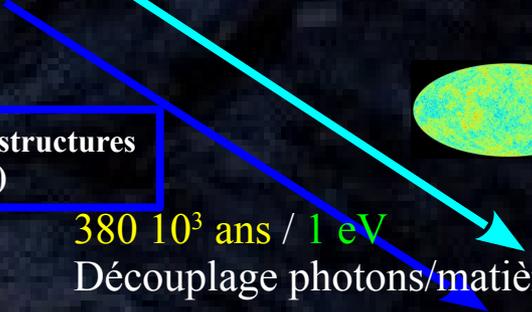
10 s / 1 MeV  
Découplage des neutrinos

10 min / 100 keV  
Fin de la nucléosynthèse



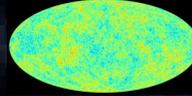
Synthèse des atomes légers primordiaux  
(nucléosynthèse primordiale)

50 ans / 10-100 eV  
Transition radiation/matière

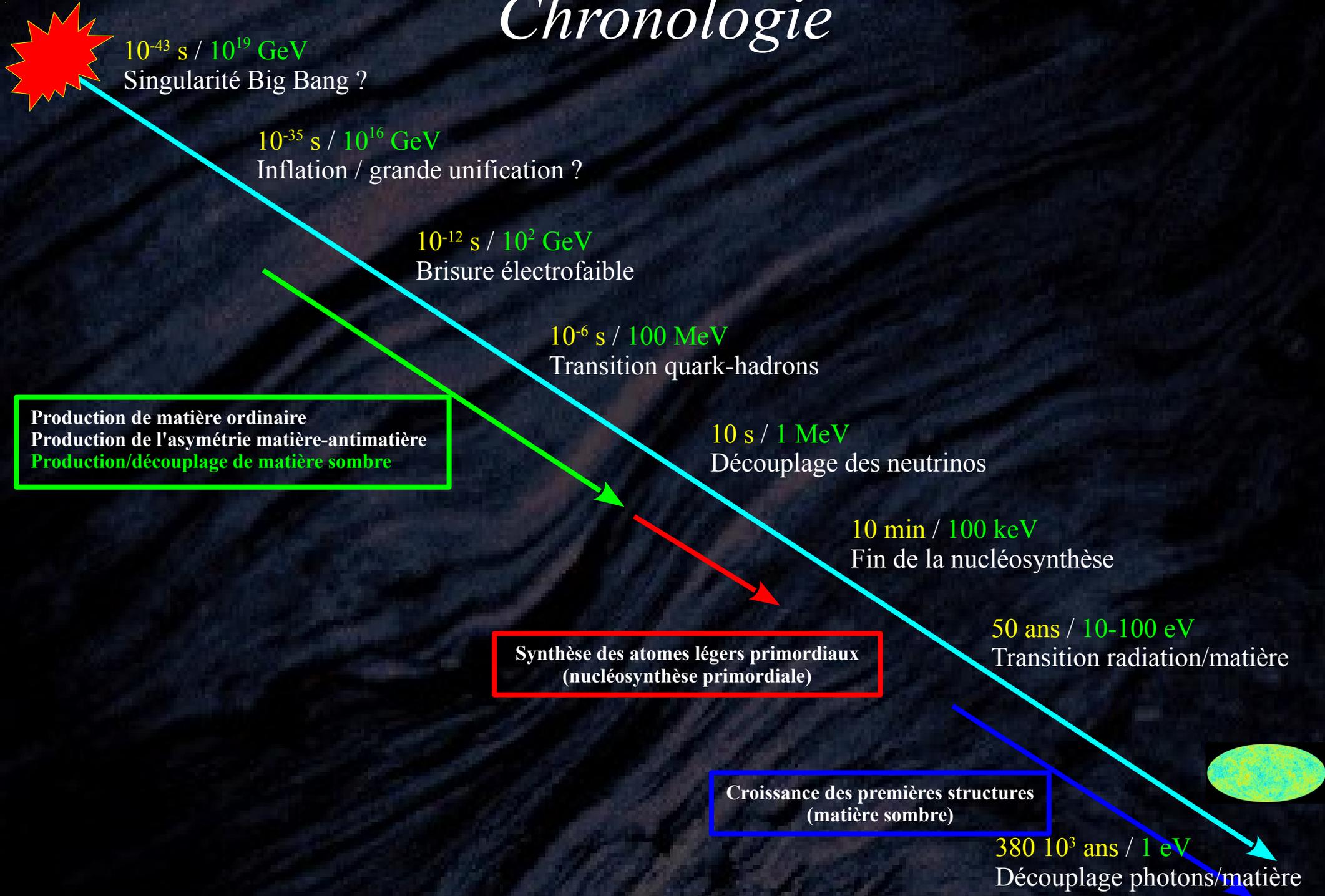


Croissance des premières structures  
(matière sombre)

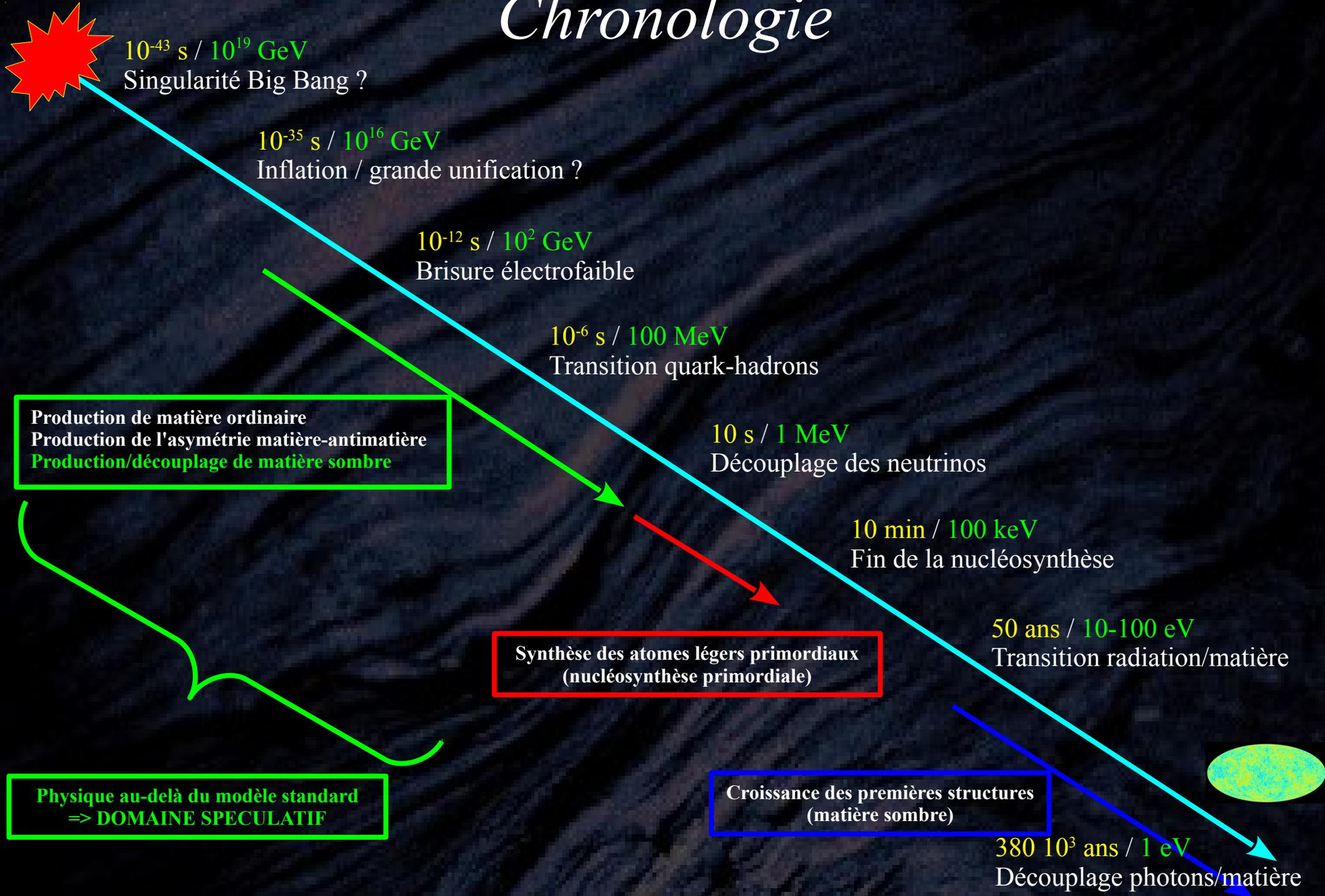
$380 \cdot 10^3$  ans / 1 eV  
Découplage photons/matière



# Chronologie

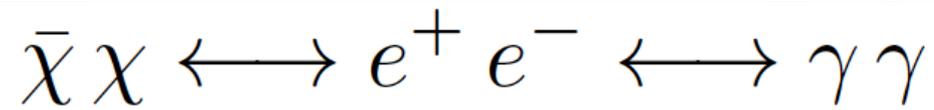


# Chronologie



# *Production de matière sombre dans l'univers primordial*

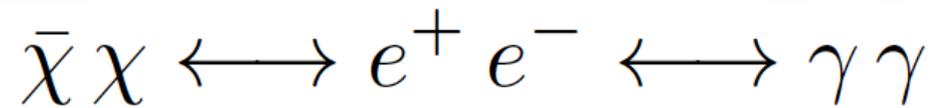
$$T > m_\chi$$



On peut supposer (presque indifféremment)  
une symétrie matière-antimatière pour la matière sombre.

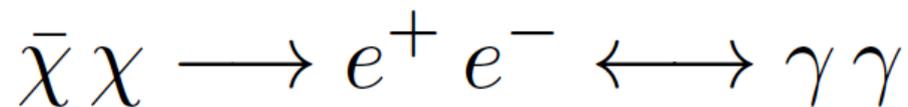
# *Production de matière sombre dans l'univers primordial*

$$T > m_\chi$$



On peut supposer (presque indifféremment) une symétrie matière-antimatière pour la matière sombre.

$$T < m_\chi$$

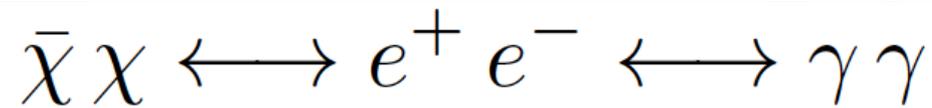


$$\Gamma_{\text{ann}} = \langle \sigma v \rangle_{\text{ann}} n_\chi$$

$$\Gamma_{\text{ann}} > H$$

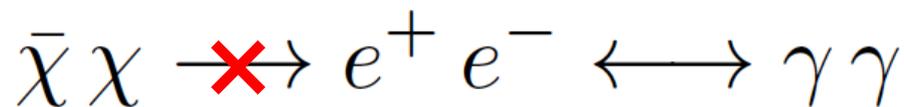
# *Production de matière sombre dans l'univers primordial*

$$T > m_\chi$$



On peut supposer (presque indifféremment)  
une symétrie matière-antimatière pour la matière sombre.

$$T < m_\chi$$

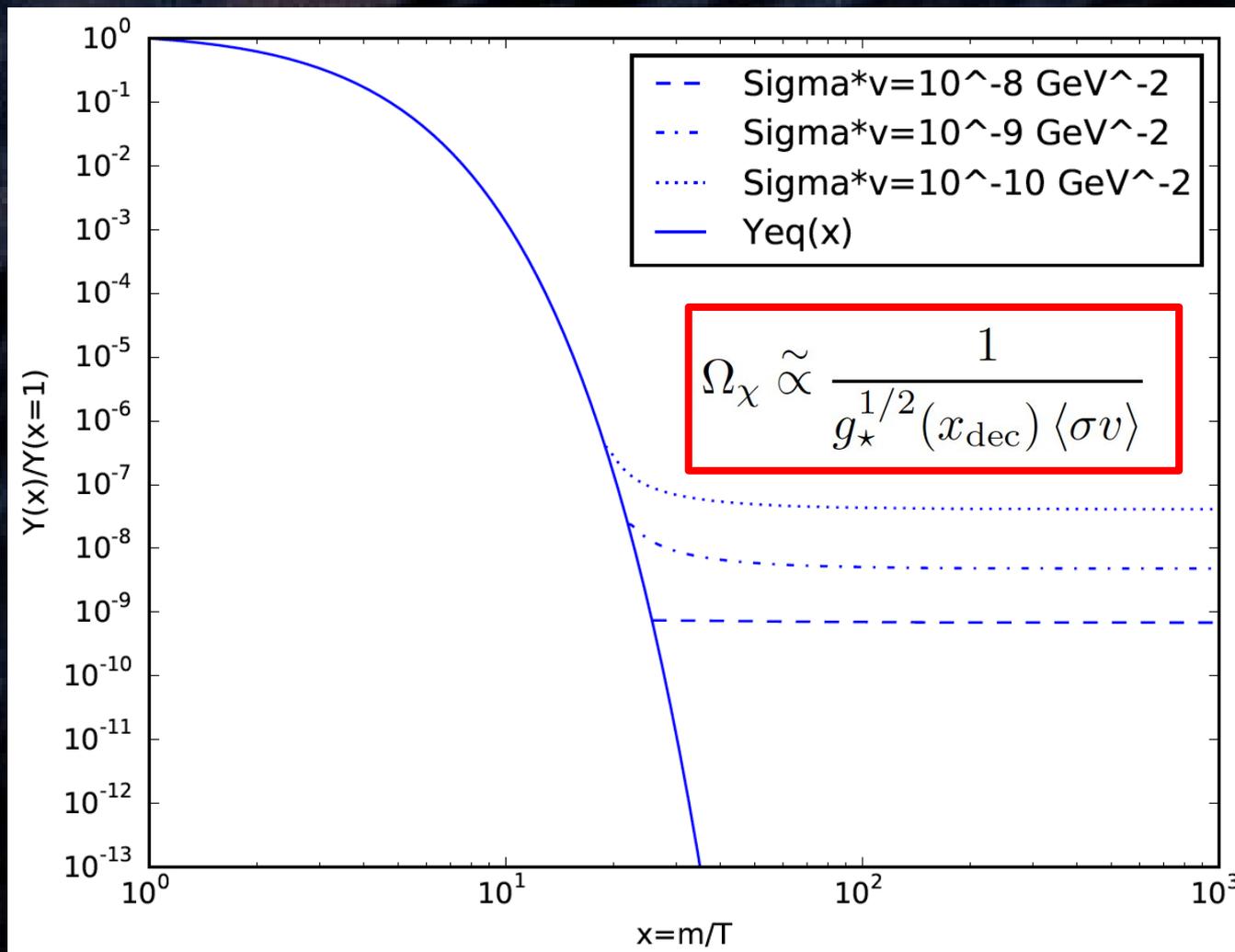


$$\Gamma_{\text{ann}} = \langle \sigma v \rangle_{\text{ann}} n_\chi$$

$$\Gamma_{\text{ann}} < H$$

# Production de matière sombre dans l'univers primordial

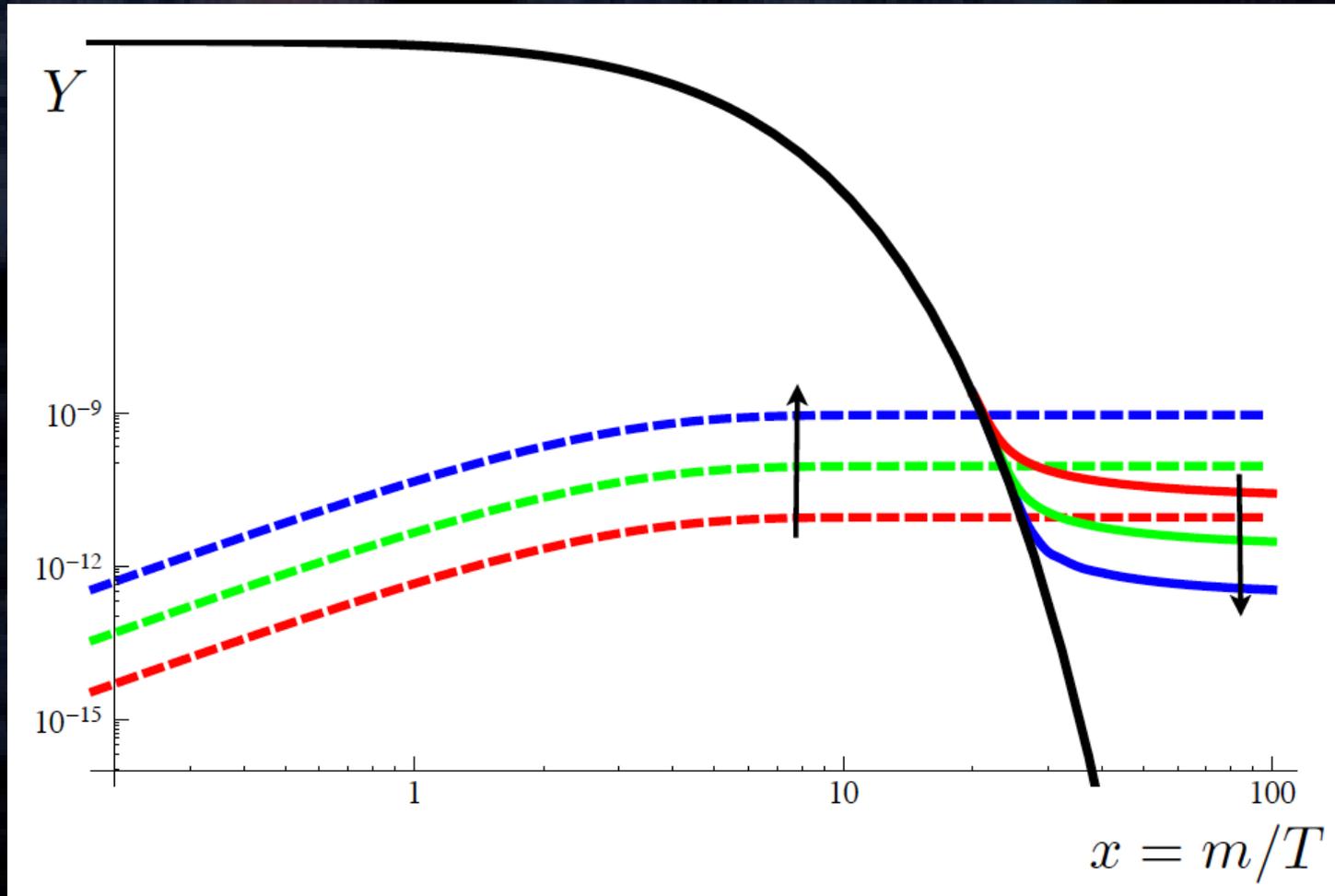
Camille André, stagiaire M1 2016



Découplage chimique  
*Freeze out*

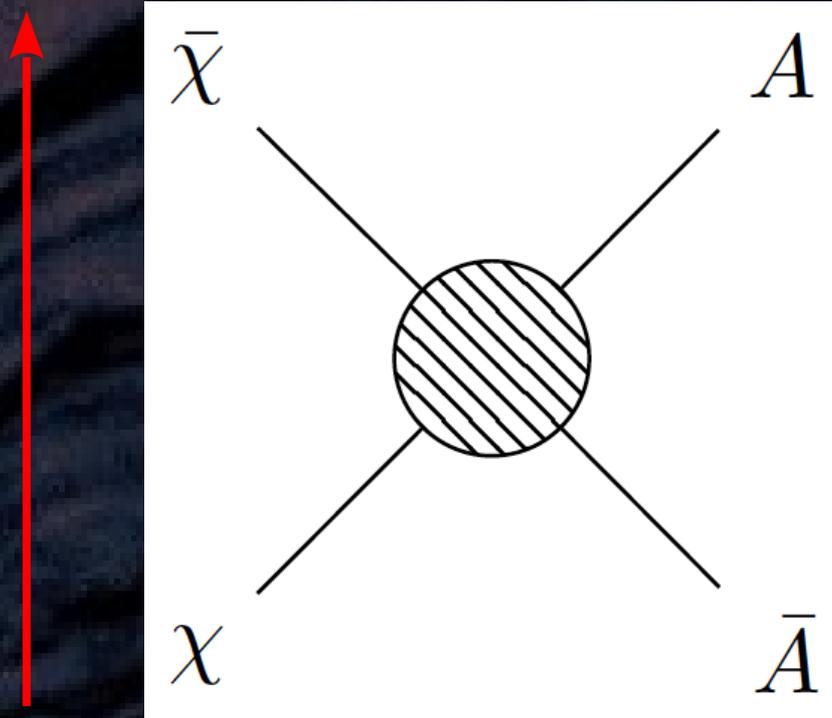
# Production de matière sombre dans l'univers primordial

Hall+ '10



Découplage chimique (par le haut)  
*Freeze in*

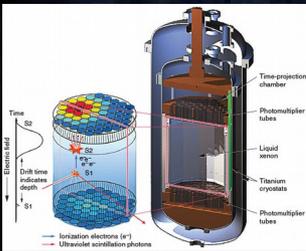
# Détecter les WIMPs



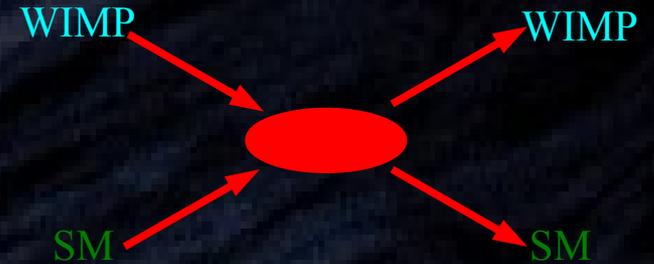
# Détecter les WIMPs

**Direct detection rate** – WIMP-matter scattering

$$\frac{d\Gamma_{\chi-N}}{dE_r}(E_r, t) = \frac{\sigma_{\chi-N} F^2(E_r)}{2 \mu_r^2} \frac{\rho_{\odot}}{m_{\chi}} \int_{v > v_{\min}} d^3\vec{v} \frac{f(\vec{v}, t)}{v}$$



**Scattering**  
(→ kinetic decoupling in early universe)

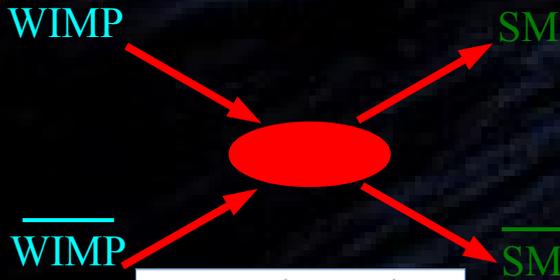


$$\Gamma_{\text{scat}} = \langle \sigma_{\text{scat}} v \rangle n_{\text{plasma}}$$

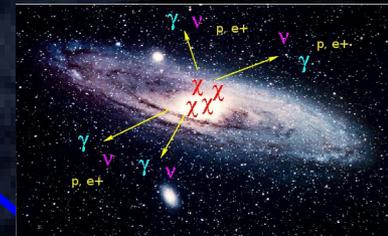
**Annihilation vs. scattering**  
=> constraints from cosmological abundance + minimal scale for DM structures (subhalos)

**Dark matter profile + phase space (+ cosmic-ray transport)**  
=> constrained by Milky Way-mass model (full gravitational potential DM + baryons)

**Annihilation**  
(→ chemical decoupling in early universe)



$$\Gamma_{\text{ann}} = \langle \sigma_{\text{ann}} v \rangle n_{\chi}$$



**Indirect detection rate** (e.g. gamma rays) – WIMP annihilation

$$\frac{d\phi_{\gamma}^{\text{ann.}}}{dE} = \frac{\delta \langle \sigma v \rangle}{4 \pi} \frac{dN_{\gamma}}{dE} \int_{\text{res.}} d\Omega \int_{\text{l.o.s}} dl \left[ \frac{\rho(r)}{m_{\chi}} \right]^2$$

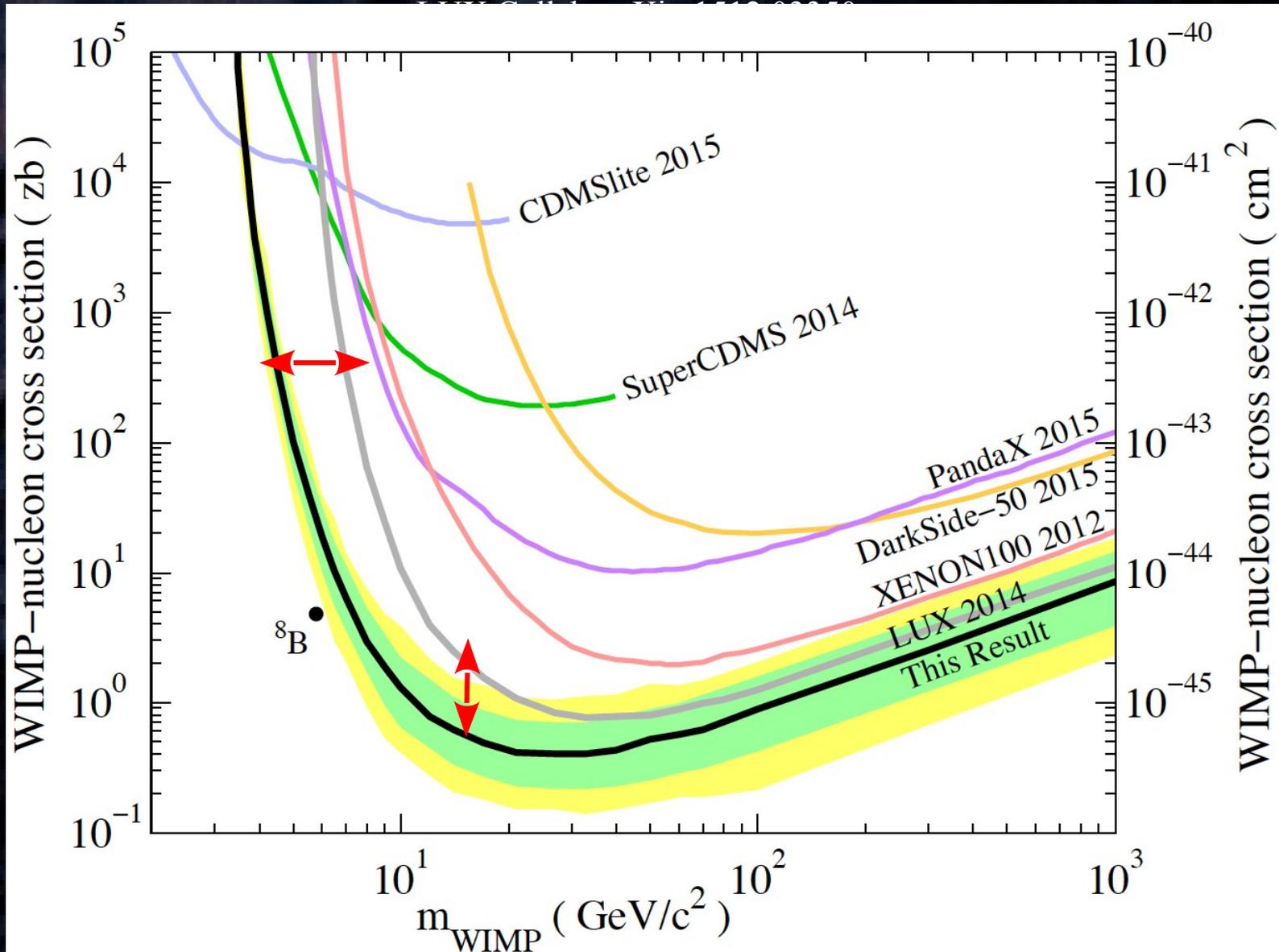
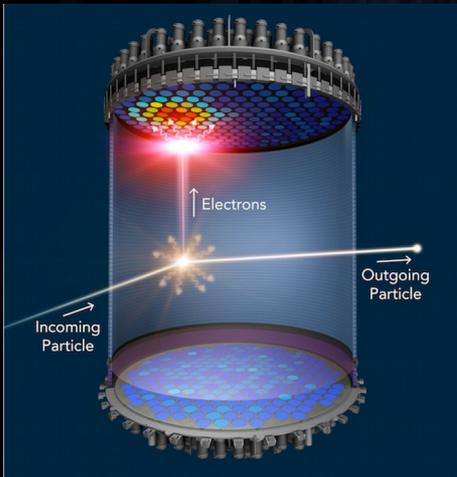
# Détecter les WIMPs

## Latest LUX results:

(same data as 2014, improved analysis)

- \* Dual-phase xenon (S1,S2)
- \*  $1.4 \times 10^4$  kg.day
- \* improved calibration
- \* improved efficiency
- \* increased fiducial volume
- \* threshold  $3 \rightarrow 1.1$  keV!

**=> the sub-zepto-barn era!**



# Détecter les WIMPs

## Latest CRESST results:

(same data as 2012, improved analysis)

- \* Ca(20)W(74)O(8)
- \* 52 kg.day
- \* threshold 0.6  $\rightarrow$  0.3 keV!

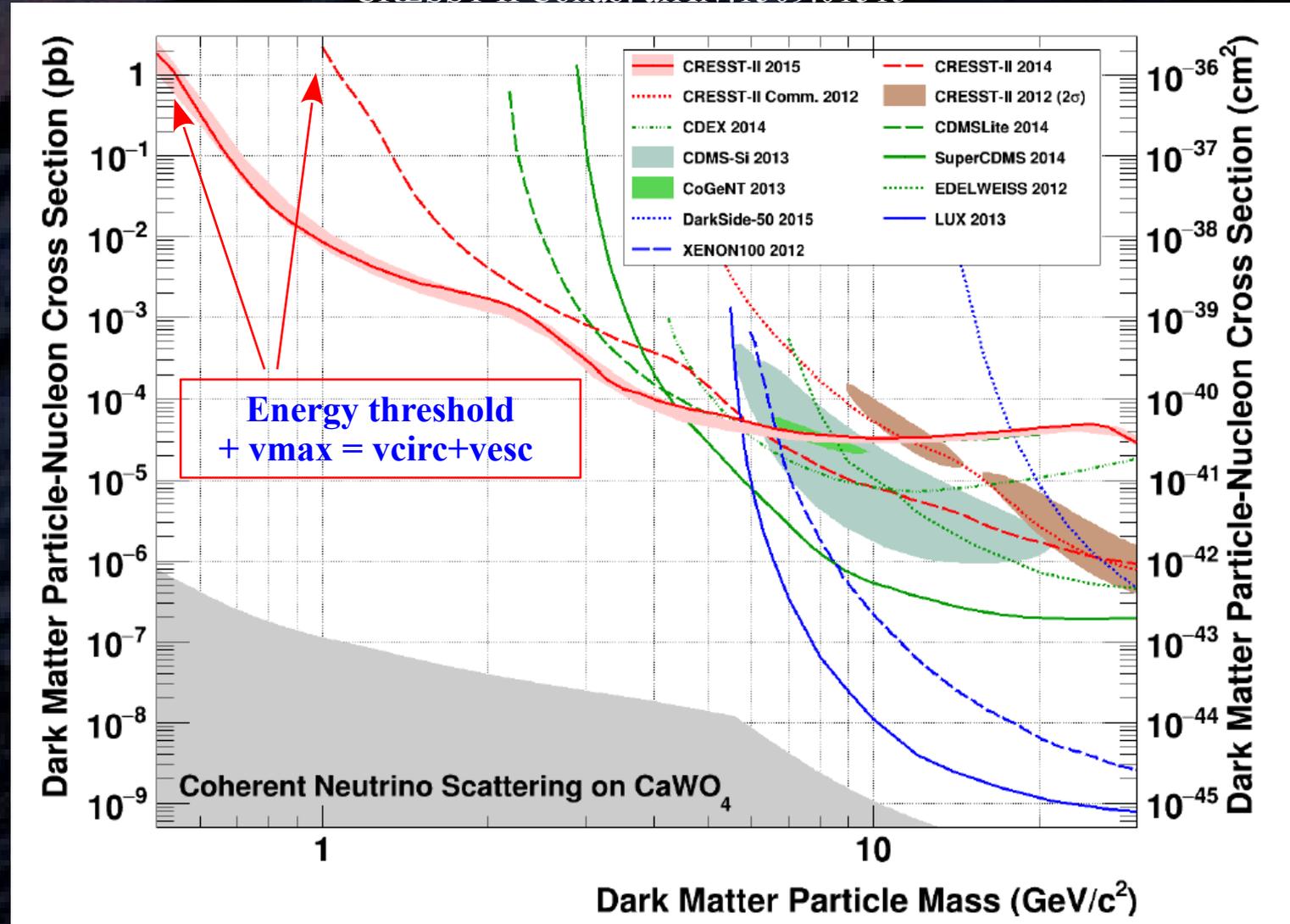
$\Rightarrow$  the sub-GeV era!

Limits assume “standard halo model” (SHM):

- \* local DM of 0.3 GeV/cm<sup>3</sup>
- \*  $v_{\text{sun}} = 220$  km/s
- \*  $v_{\text{esc}} = 544$  km/s
- \* truncated Maxwellian  $f(v)$

$\rightarrow$  indicative limits  
(to be taken with care)

CRESST-II Collab. arXiv:1509.01515



# Détecter les WIMPs

## Latest CRESST results:

(same data as 2012, improved analysis)

- \* Ca(20)W(74)O(8)
- \* 52 kg.day
- \* threshold 0.6  $\rightarrow$  0.3 keV!

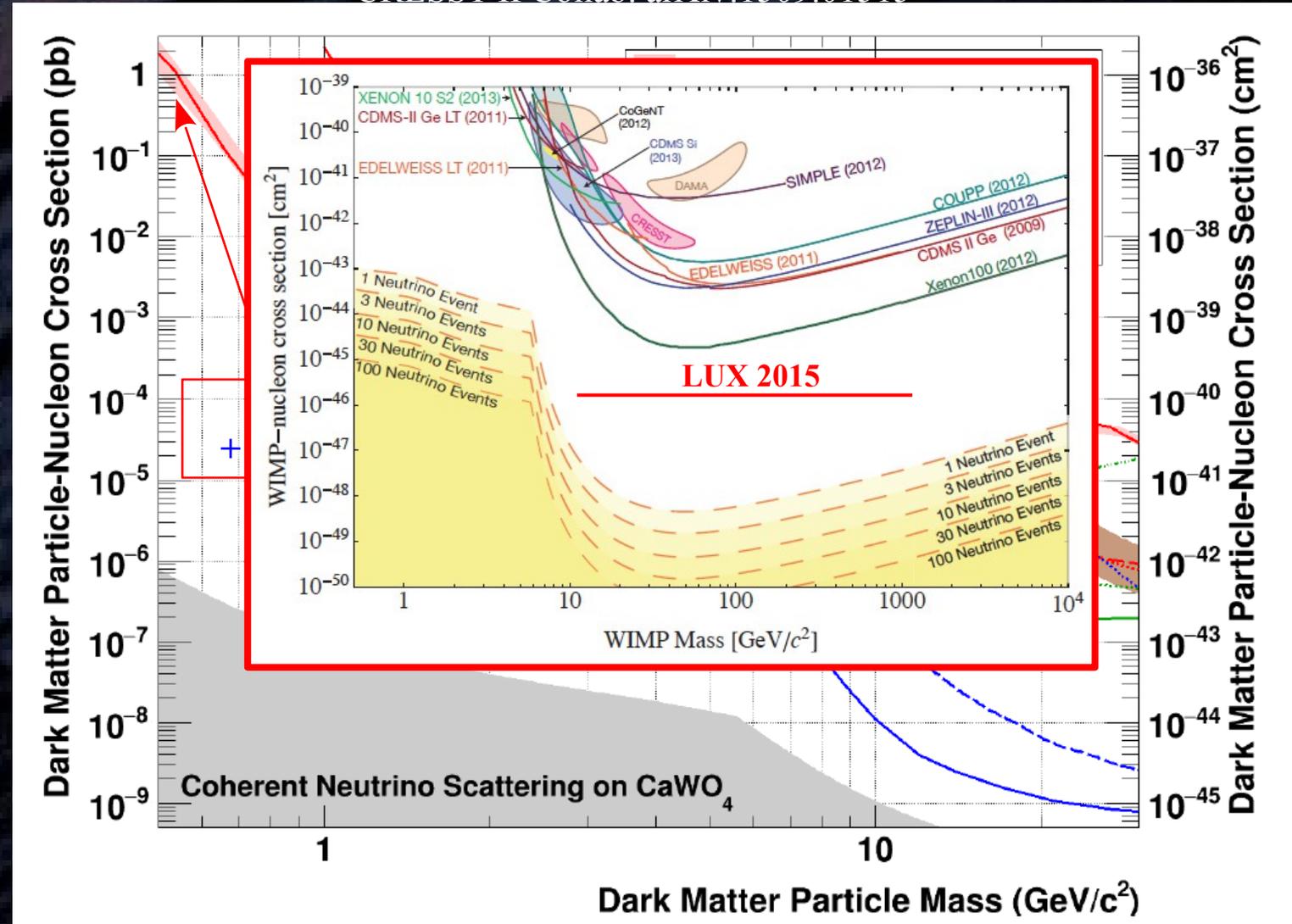
$\Rightarrow$  the sub-GeV era!

Limits assume “standard halo model” (SHM):

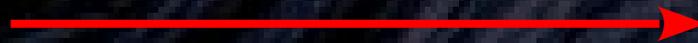
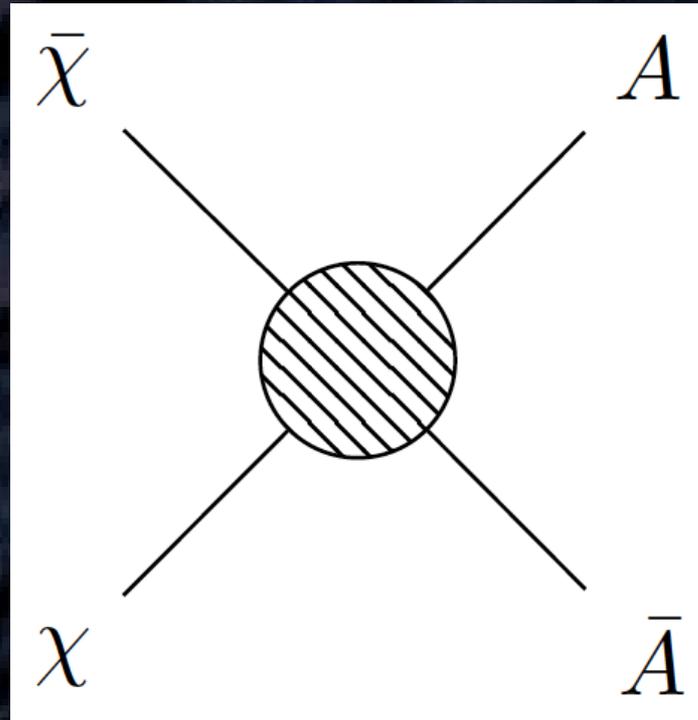
- \* local DM of 0.3 GeV/cm<sup>3</sup>
- \*  $v_{\text{sun}} = 220$  km/s
- \*  $v_{\text{esc}} = 544$  km/s
- \* truncated Maxwellian  $f(v)$

$\rightarrow$  indicative limits (to be taken with care)

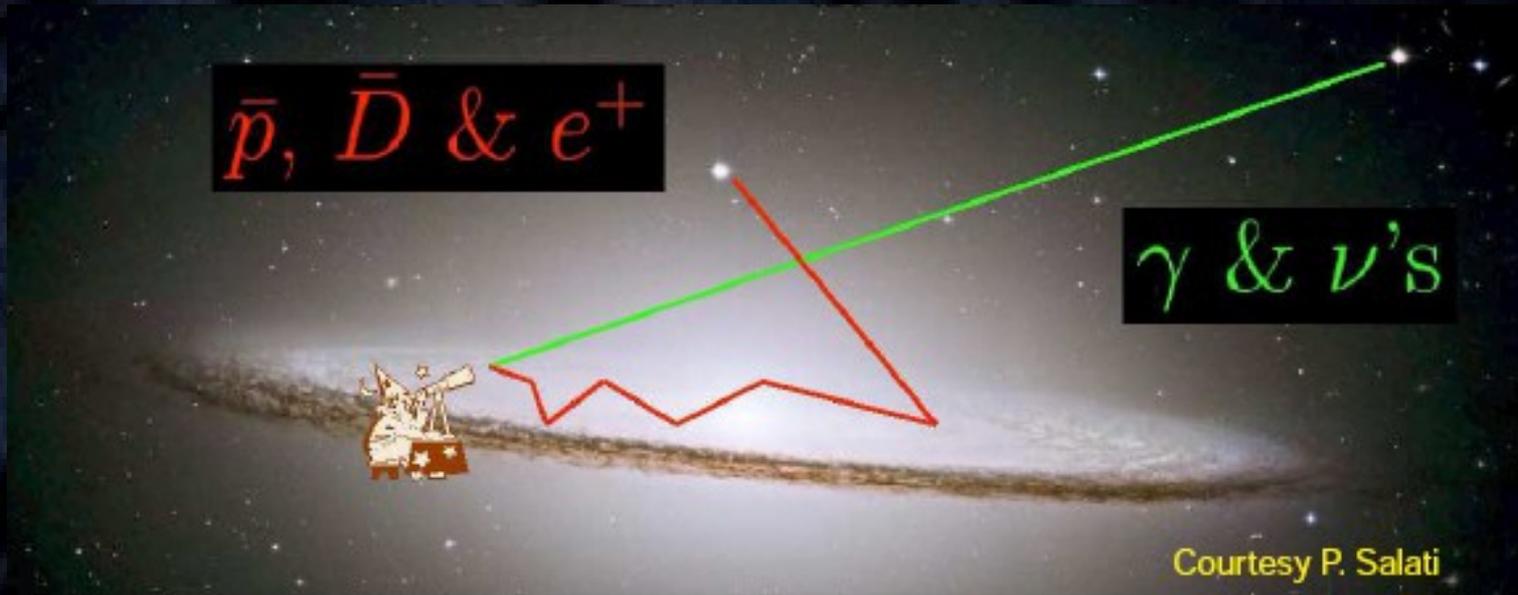
CRESST-II Collab. arXiv:1509.01515



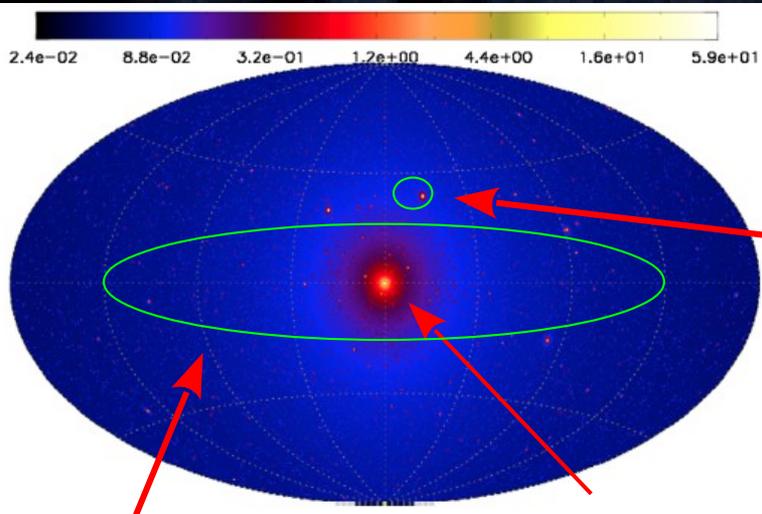
# Détecter les WIMPs



# Détecer les WIMPs



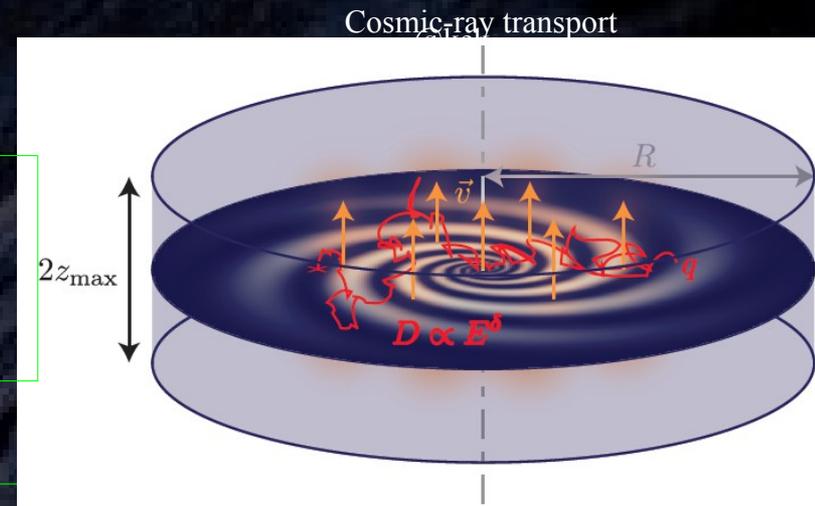
Pieri, JL+ 11



**Big DM subhalos**  
 \* known Dwarf Spheroidal Galaxies (~20) – no other HE astrophysical processes expected there.

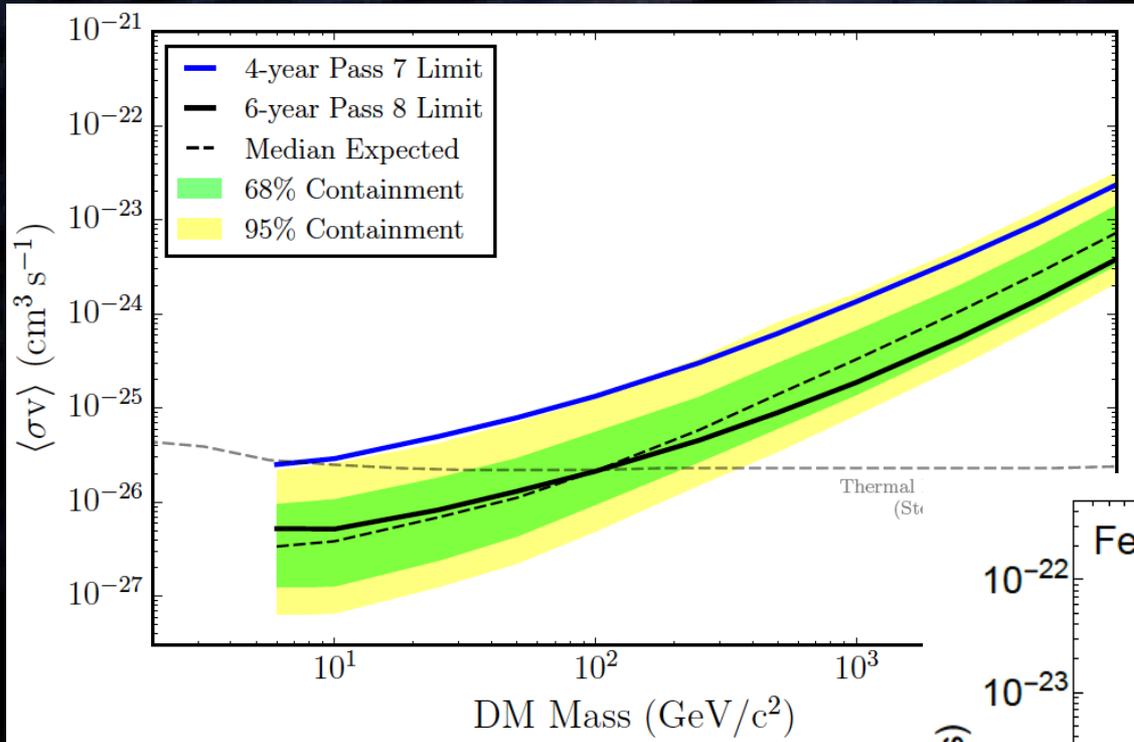
**Diffuse gamma-ray emission**  
 => check spectral/spatial properties wrt background

**Galactic Center**  
 \* Closest/Largest expected annihilation rate  
 \* Large theoretical uncertainties (background not controlled)



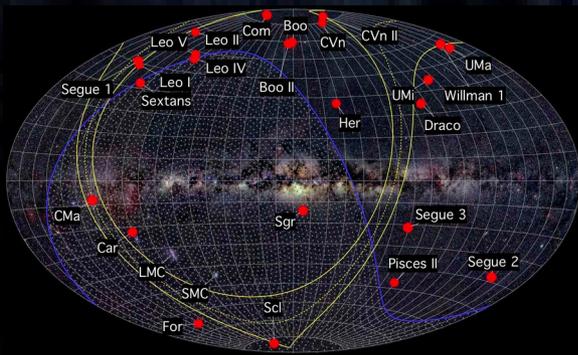
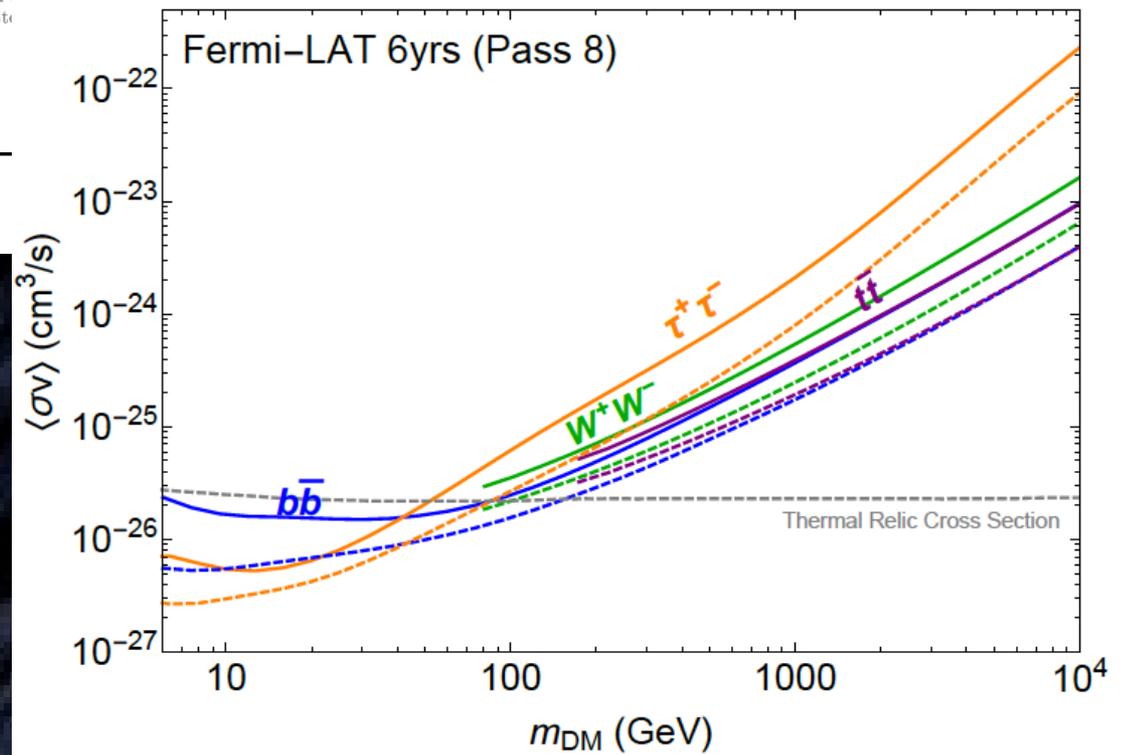
Mertsch PhD thesis 10

# Détecter les WIMPs



$$\langle\sigma v\rangle \approx \underbrace{\overbrace{a}^{\text{in galaxies}} + b/\{x \equiv m_\chi/T\}}_{\text{relic density}} + \mathcal{O}(x^{-2})$$

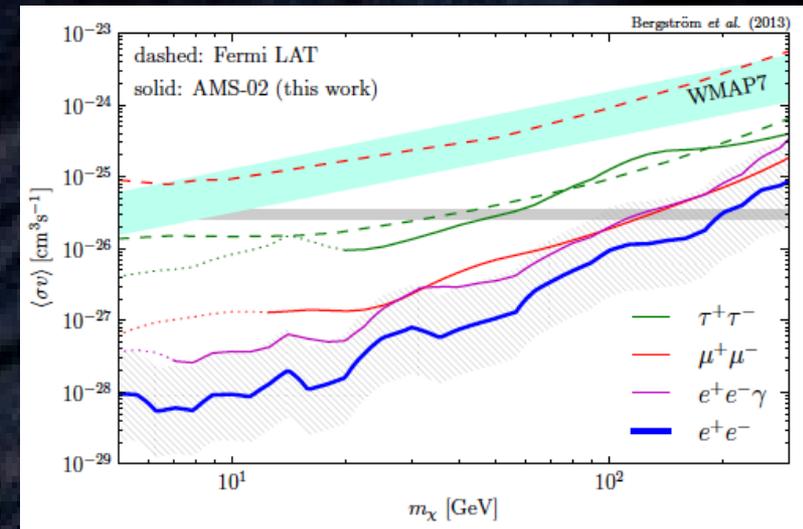
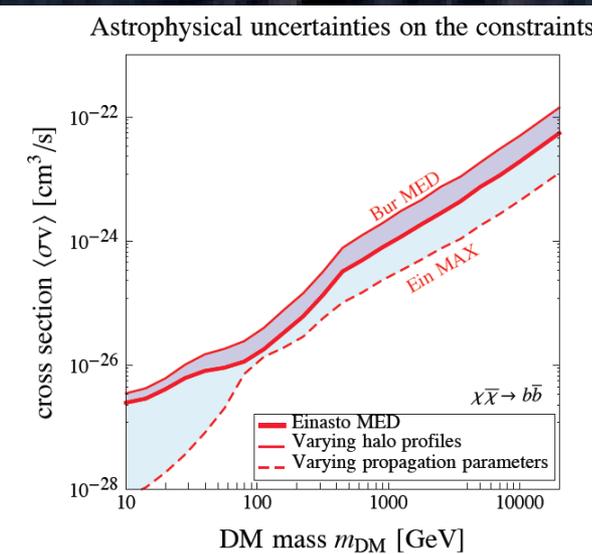
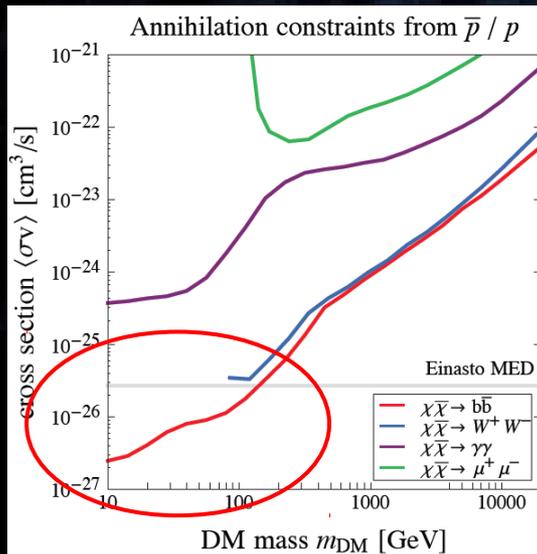
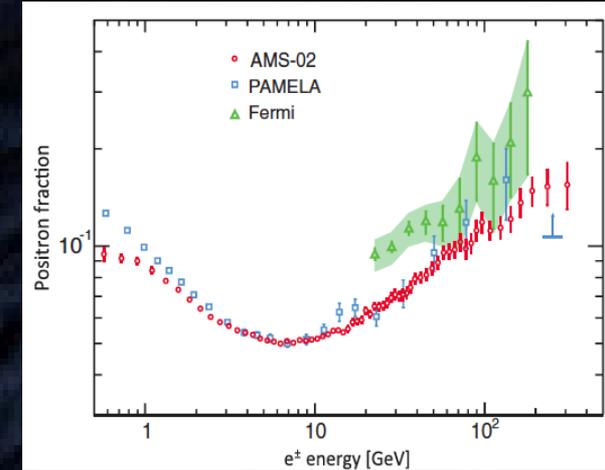
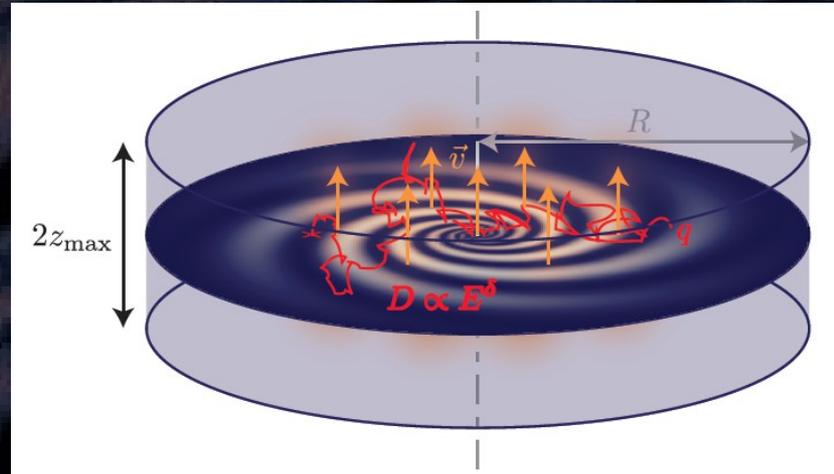
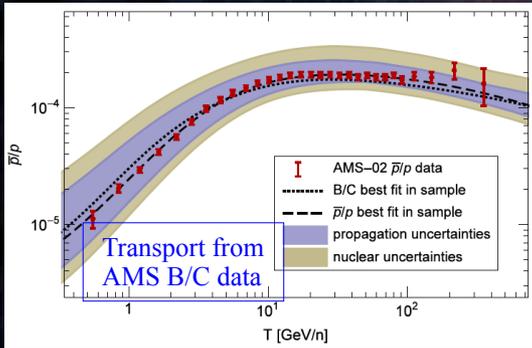
Fermi Collab. '15 vs Hayashi+ '16



# Détecter les WIMPs

Cosmic-ray transport

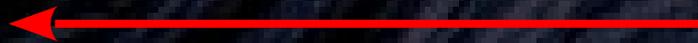
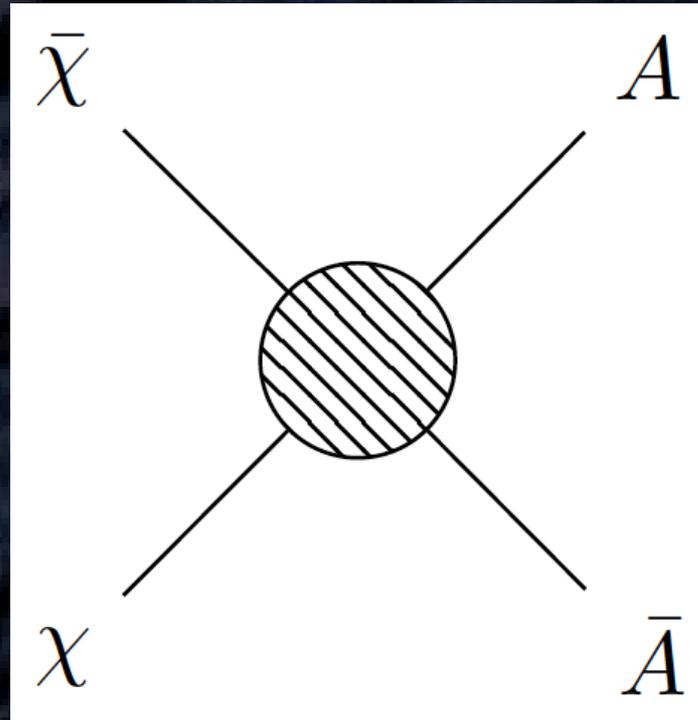
Kapl, Reinert & Winkler 15  
Transport parameters from prelim.  
B/C AMS-02



# Conclusions

- \* **La gravité modifiée nécessite également une forme de matière sombre.**
- \* **La physique des particules au-delà du modèle standard motive des candidats indépendamment du problème de la matière sombre.**
- \* **La cosmologie + formation des structures apportent des contraintes sur leurs propriétés.**
- \* **Les expériences en cours ont atteint depuis très récemment la sensibilité nécessaire pour tester les théories les plus motivées.**
  - => **Le LHC est l'expérience phare pour la recherche de nouvelle physique.**
  - => **Forte complémentarité avec les recherches directes/indirectes.**
- \* **Les principaux candidats pourraient être découverts d'ici 10 ans grâce aux expériences dédiées, e.g. : WIMPs, neutrinos stériles, axions.**
- \* **Certains candidats ne sont pas observables directement : difficile à mettre en évidence => statut théorique délicat.**
- \* **Les développements théoriques / phénoménologiques sont fascinants ... mais c'est toujours l'expérience qui tranche en physique.**

# Détecter les WIMPs

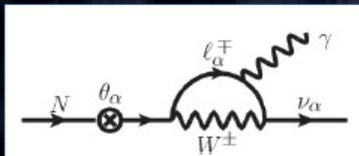


# Sterile neutrino (W)DM

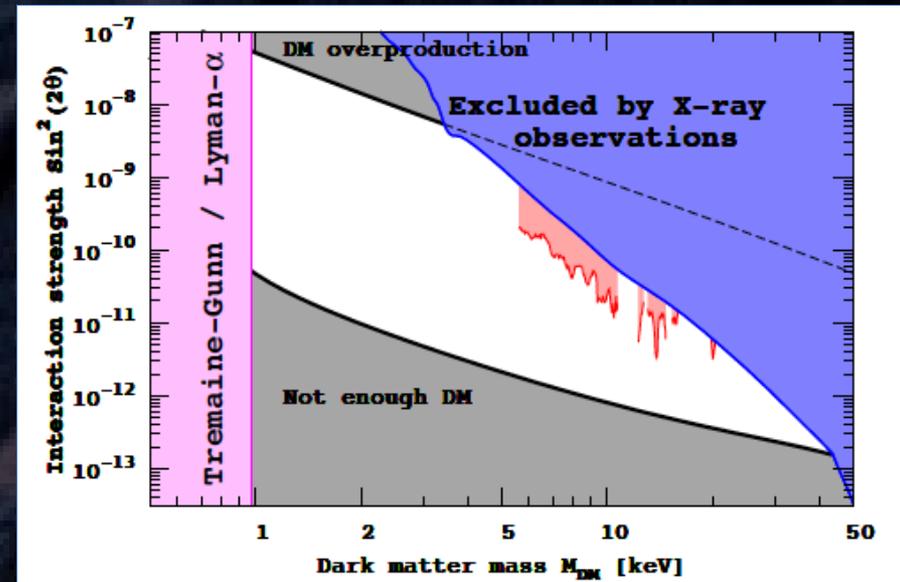
Sterile neutrino DM  
 e.g. Dodelson & Widrow 94,  
 Shi & Fuller 99,  
 Shaposhnikov+06

- Neutrino masses (see-saw)
- Leptogenesis
- DM candidates (more or less warm)
- keV mass range (!= thermal mass)

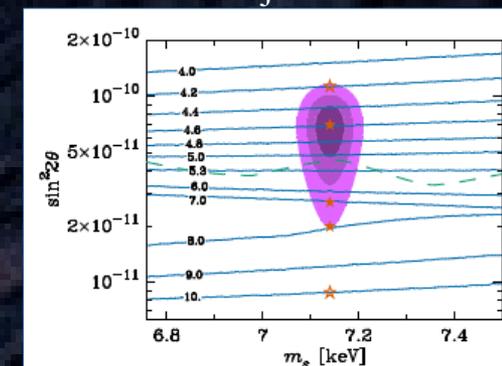
$$\mathcal{L} \supset \mu \left[ \frac{\phi}{v} \right] \bar{\nu}_l \nu_r + M \nu_r \nu_r + \text{h.c.}$$



Boyarsky+ 13



Abazajian 14



## Aspects relevant to cosmology:

- \* suppress power on small scales (free-streaming scale larger than CDM)
- viable? (e.g. Schneider 15)
- \* current limits on thermal masses  $> 1.7$  keV

## Detection (main):

- \* neutrino experiments (double \$\beta\$ decay)
- \* decays to X-ray line: hints @ 3.5 keV (Bulbul+14, Boyarsky+14)
- 7 keV consistent with thermal mass of 2 keV (e.g. Abazajian 14)
- hot debate, could be systematics (cf. Jeltema & Profumo)

# Axions

(+ axion-like particles + dark/hidden photons = WISPs)

Peccei-Quinn, Wilczek, Weinberg, Kim, Shifman, Vainshtein, Zakharov, Dine, Fishler, Srednicki, Sikivie – 70'-80'

(Very) weakly interacting slim particles

→ solves the strong CP problem (BSM physics required)

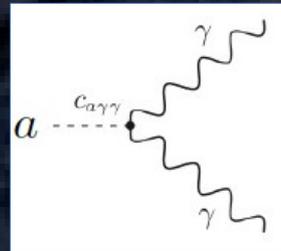
→ CDM candidate (not necessarily DM!)

→  $\mu\text{eV}$ - $\text{meV}$  mass range

$$\mathcal{L} \supset \frac{\alpha_s}{8\pi} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a,\mu\nu}$$

$$m_a \approx 0.6 \text{ meV} \times \left[ \frac{10^{10} \text{ GeV}}{f_a} \right]$$

$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -\frac{1}{4} \left\{ g_{a\gamma} \equiv \frac{\alpha_s}{2\pi f_a} C_{a\gamma} \right\} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$



Aspects relevant to cosmology:

- \* non-thermal remnants => expected ultra-cold DM
- minimal mass scale  $\sim 10^{-12}$  Msun subhalos
- detailed structure formation under study

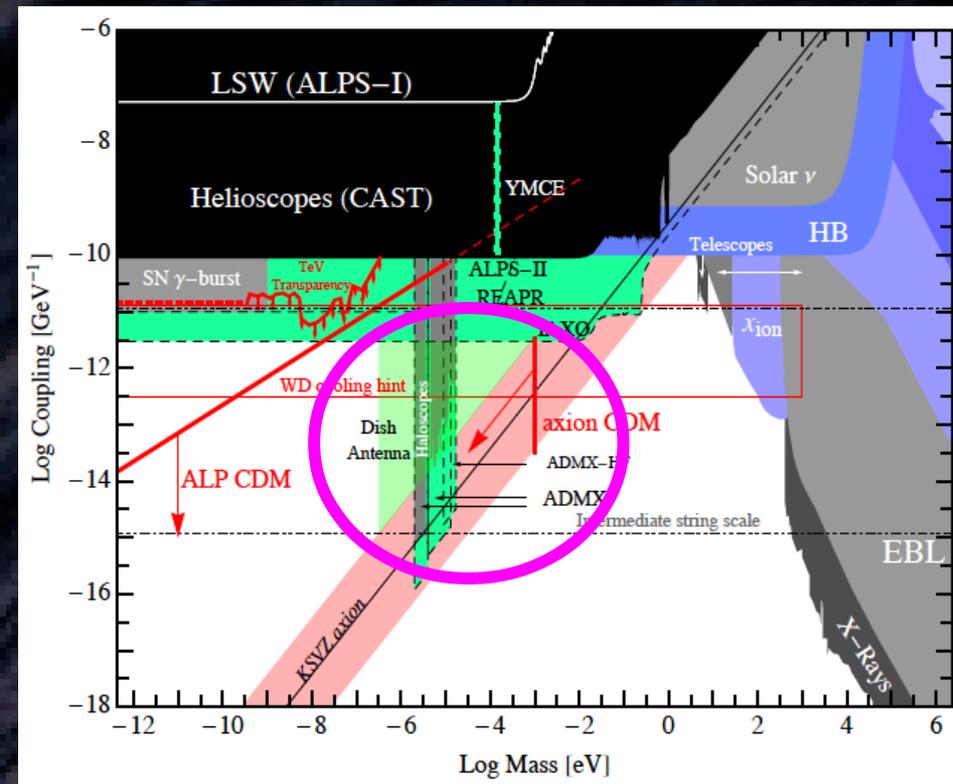
Detection (main):

- \* from interactions with photons: conversion
- e.g. ADMX (ongoing): conversion of DM axions into photons

Extra:

- \* Axion-like particles (ALPs), arising in string-inspired theories => relaxed axion mass range
- \* Hidden photons: kinetic mixing with photons from broken U(1) in some BSM extensions =>

Essig+12



Capela+ '14

