

Leçon 3:

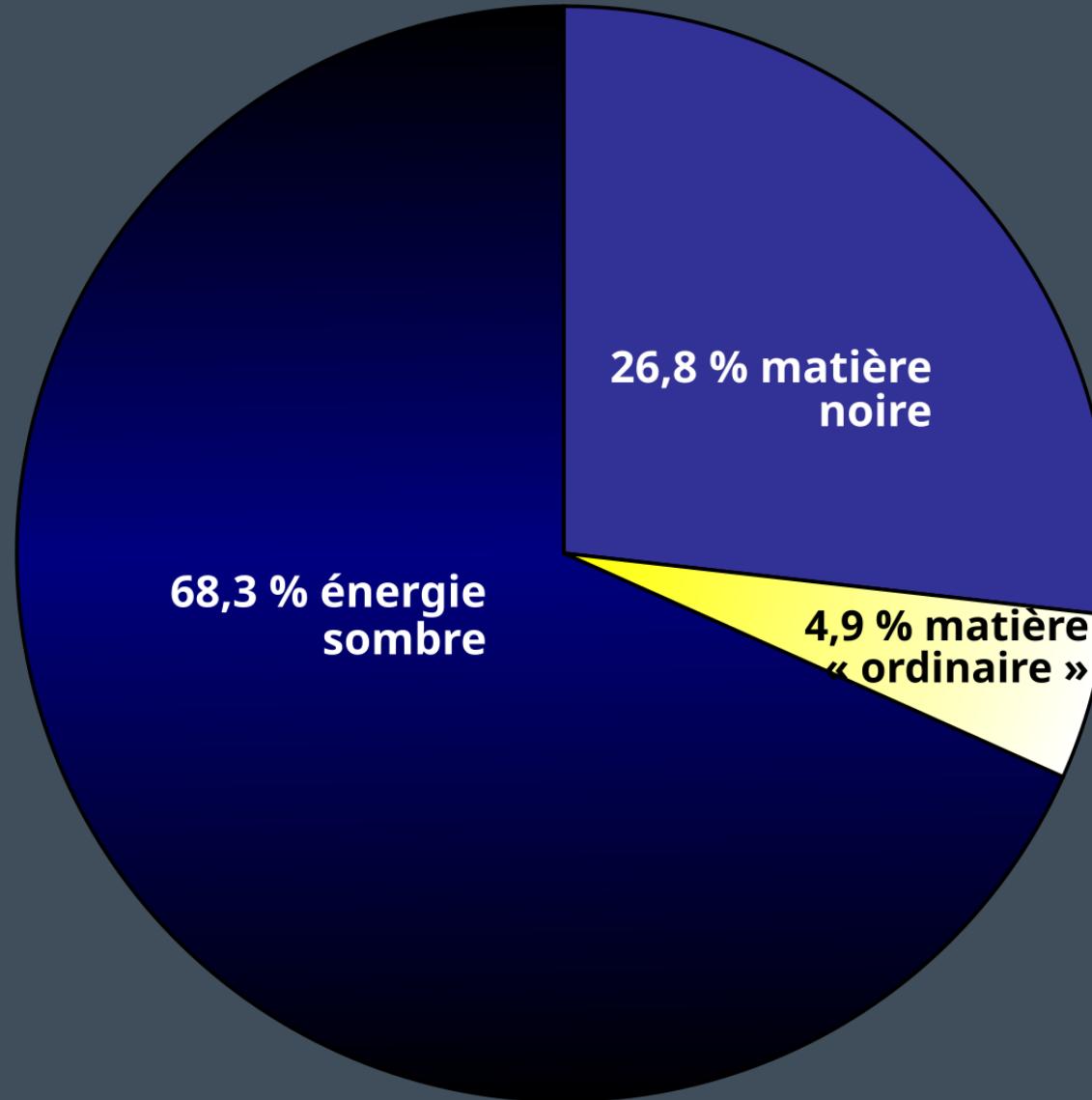
Tests et études modernes de la matière noire

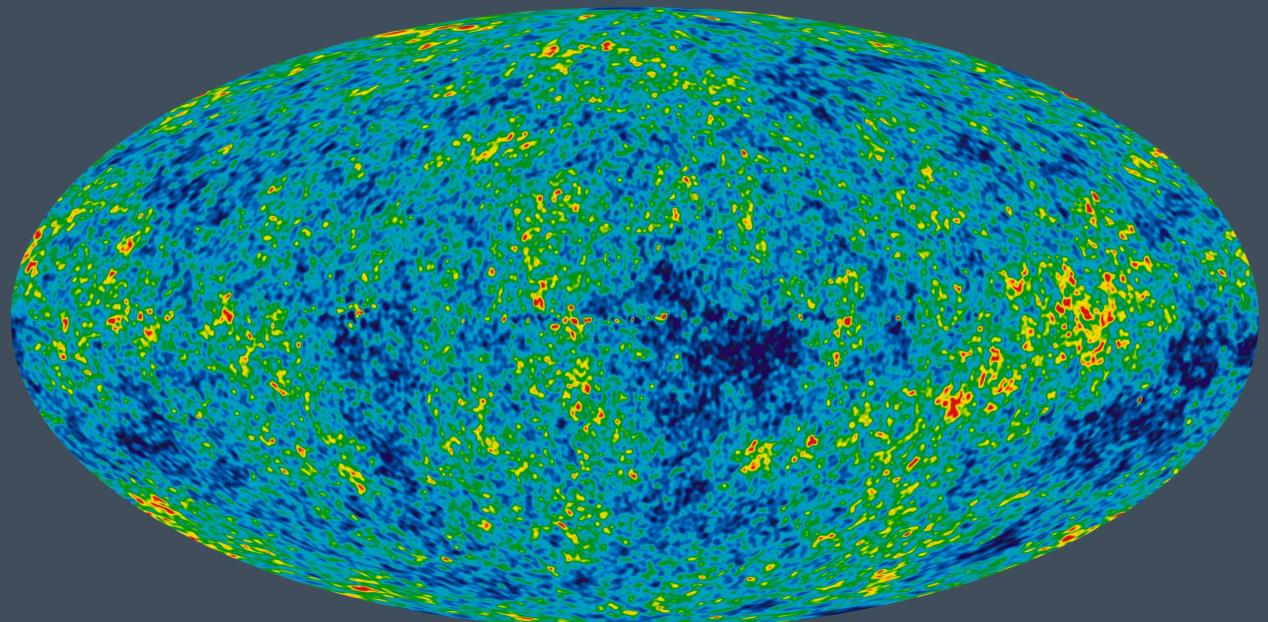
Nicolas Esser

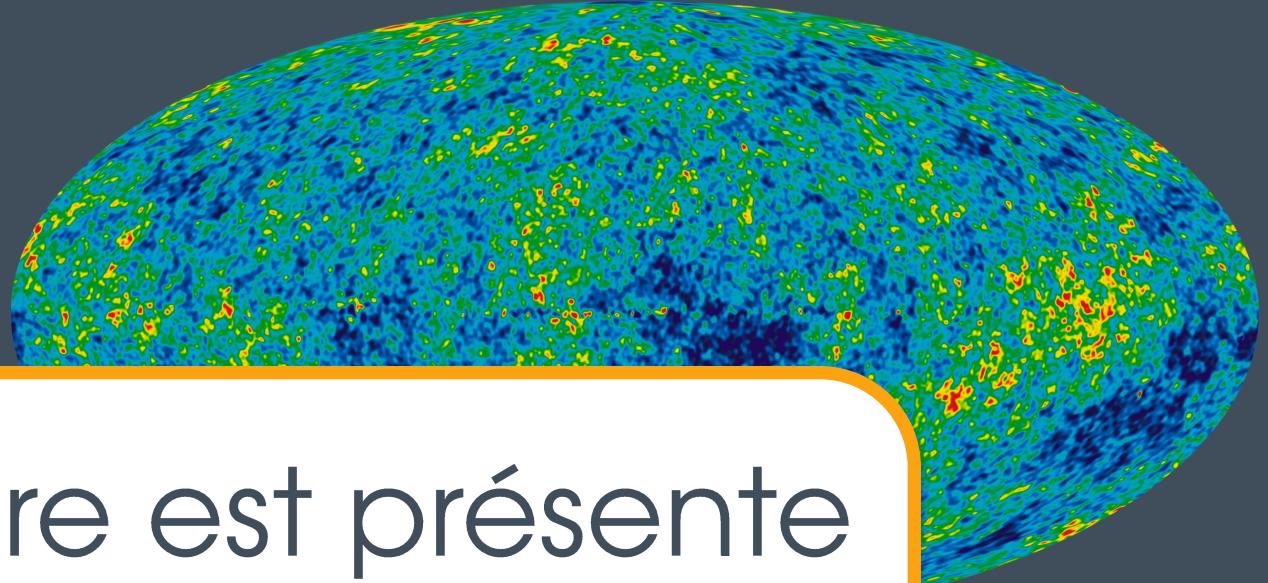
Plan du cours

- 14/01 - Historique et approche observationnelle de la matière noire
- 21/01 - Approche théorique de la matière noire et principaux candidats
- 04/02 - Tests et études modernes de la matière noire: des collisionneurs de particules aux simulations cosmologiques
- 11/02 - Trous noirs primordiaux et matière noire à l'échelle subgalactique

Récapitulatif des cours précédents







La matière noire est présente
à différentes échelles et à
différentes époques !



Propriétés de la matière noire

- La matière noire n'émet pas de lumière, elle **n'interagit que par la gravité** (ou, du moins, très faiblement) par les autres interactions fondamentales).
- La matière noire existait au début de l'Univers, et existe encore aujourd'hui, elle a une longue durée de vie et est donc **stable**.

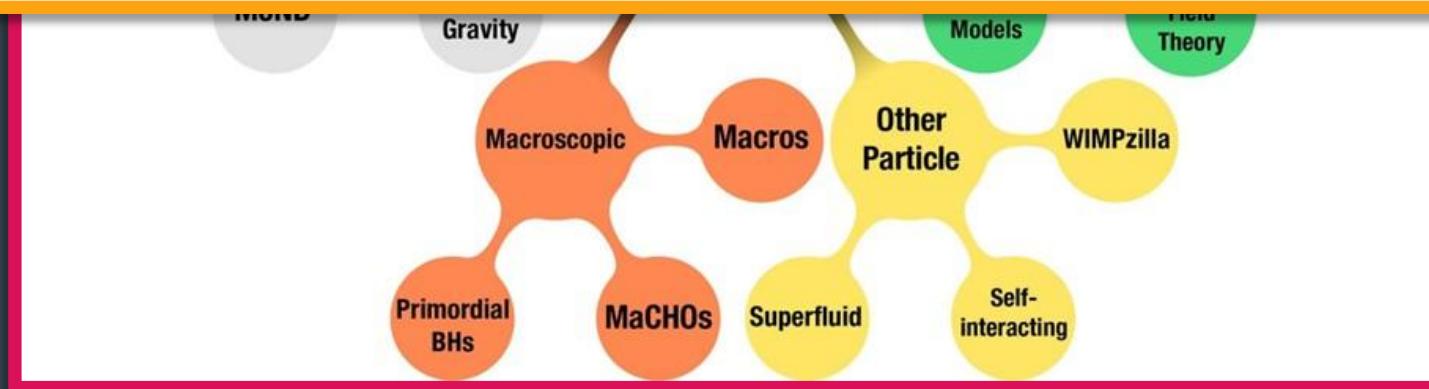
Candidats possibles



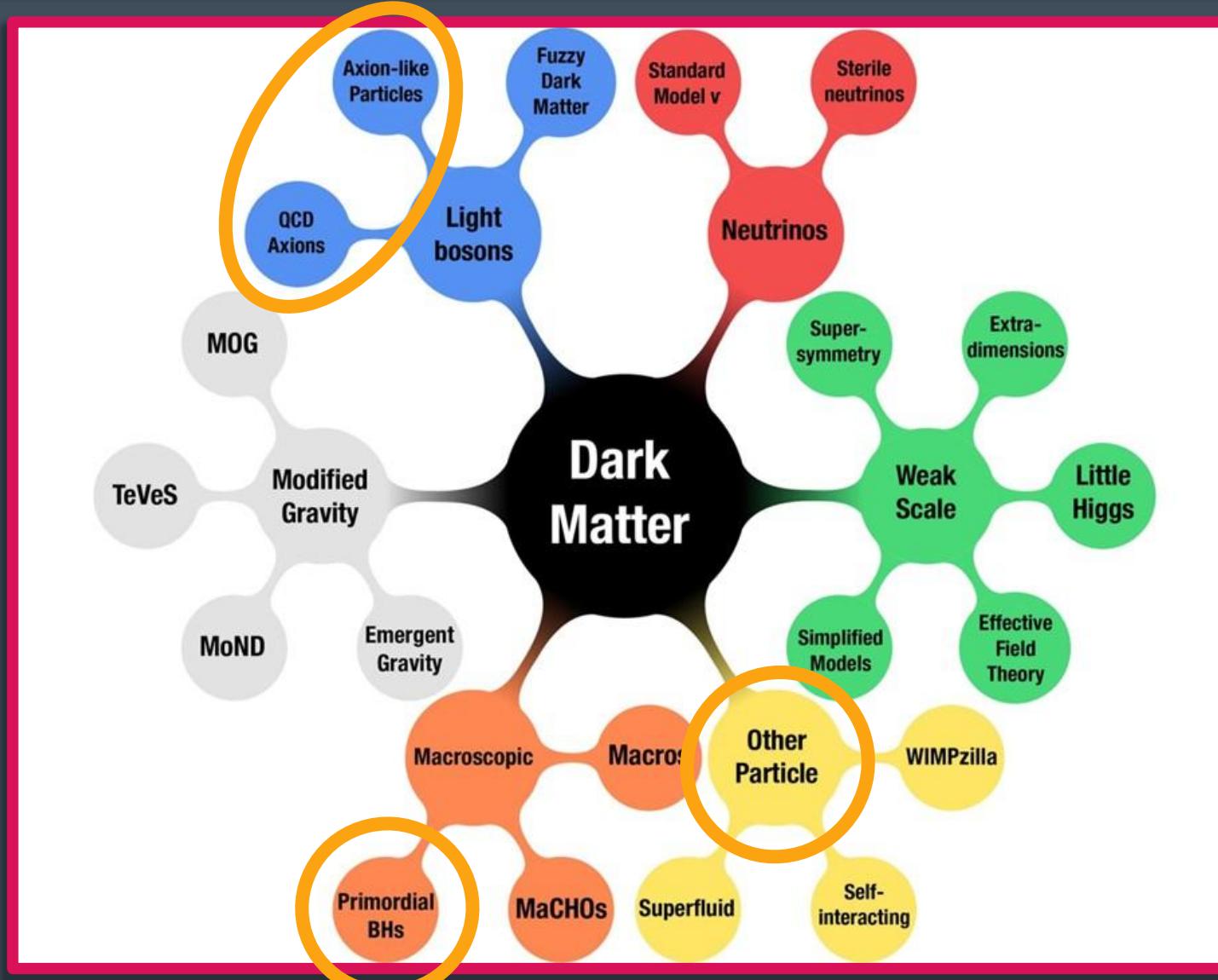
Candidats possibles



Il en existe des centaines !

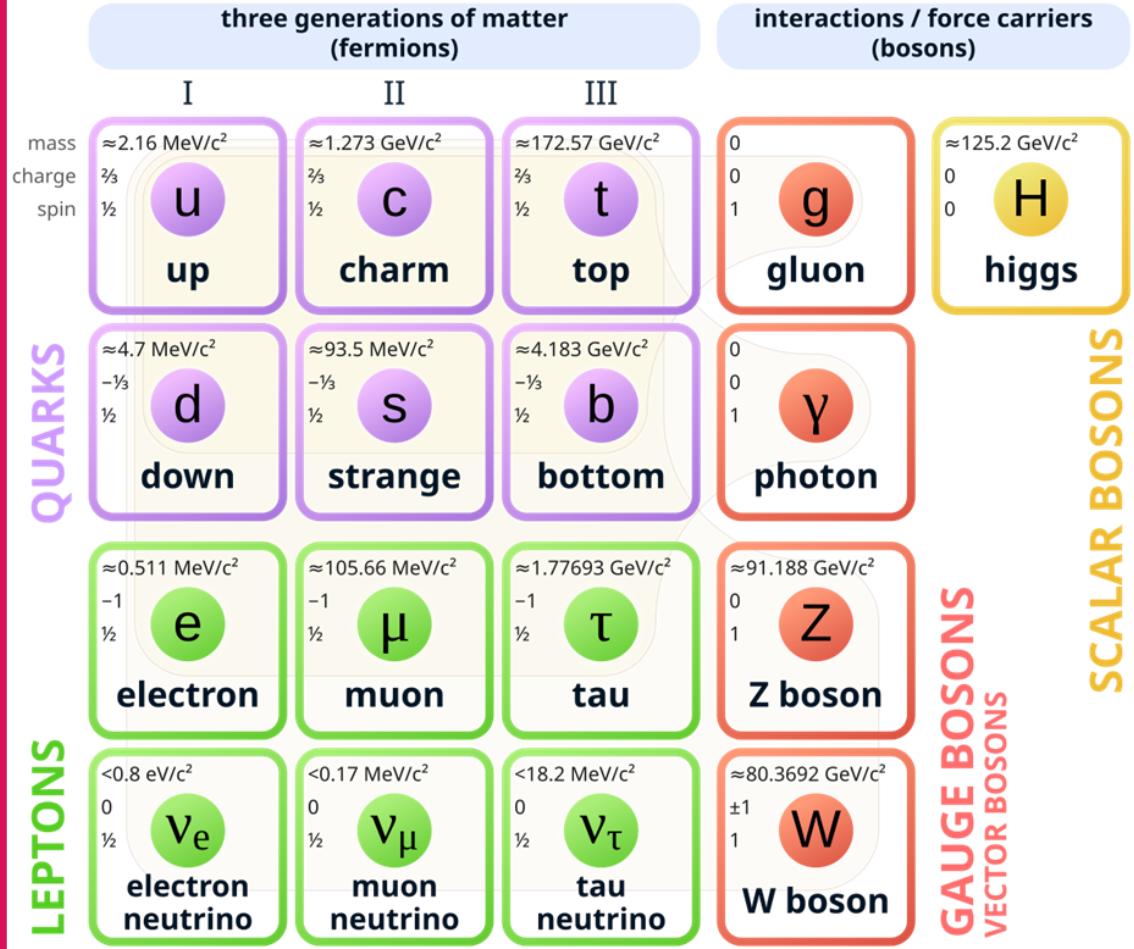


Candidats possibles



Matière noire particule

Standard Model of Elementary Particles



Candidats possibles: WIMP et Axion



WIMP

Particule **très massive**
 $> 10 \text{ GeV} \simeq 10^{-26} \text{ kg} \simeq 10 m_p$



Axion

Particule **très légère**
 $< 1 \text{ eV} = 10^{-36} \text{ kg} \simeq 10^{-9} m_p$

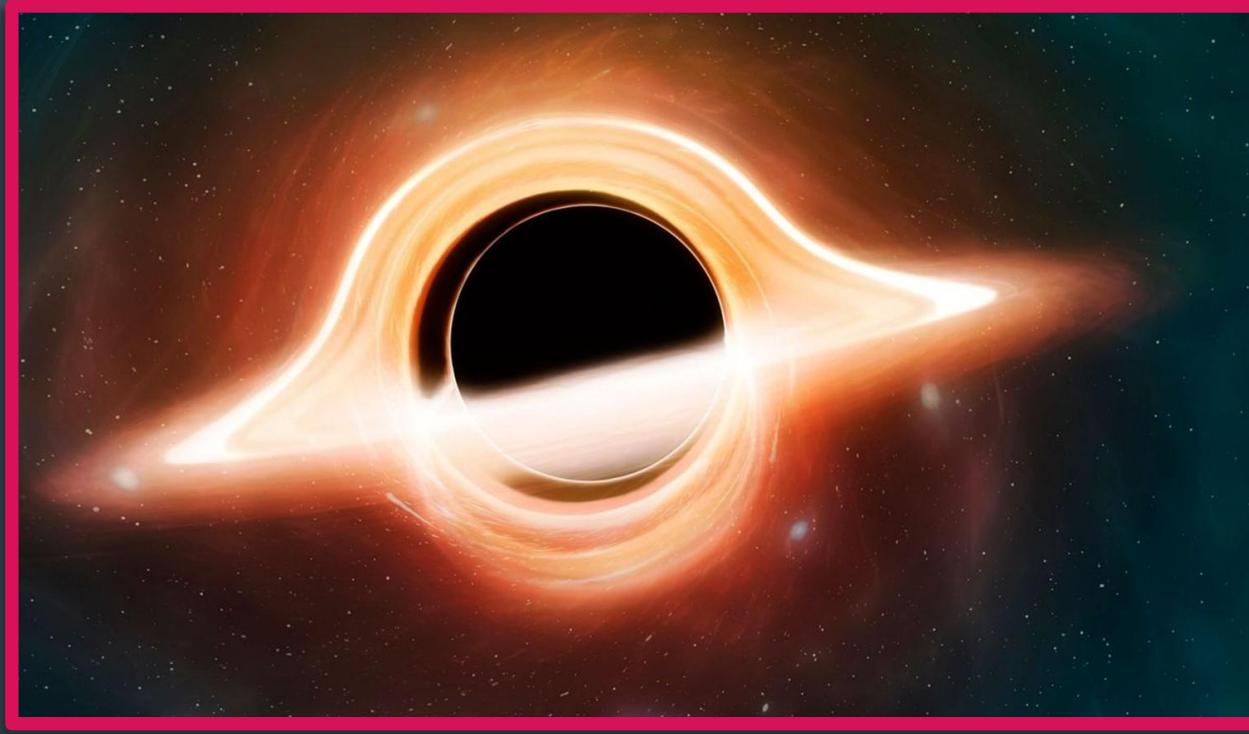
Candidats possibles: WIMP et Axion

2 paramètres: masse
et couplage

Particule **très massive**
 $> 10 \text{ GeV} \simeq 10^{-26} \text{ kg} \simeq 10 m_p$

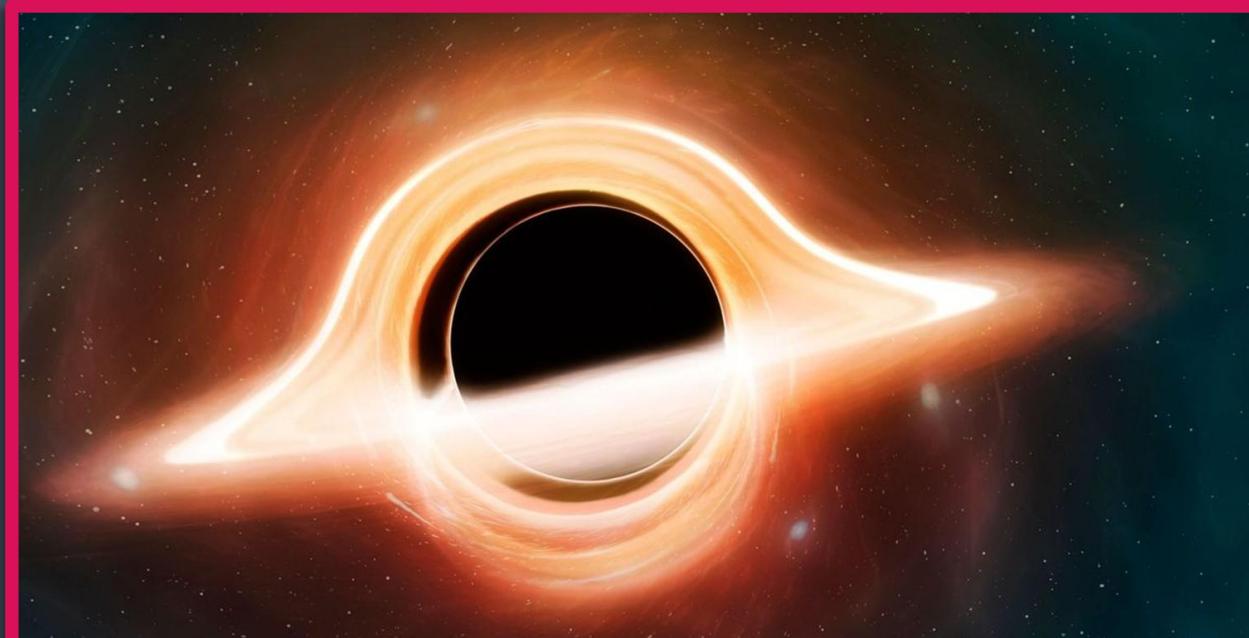
Particule **très légère**
 $< 1 \text{ eV} = 10^{-36} \text{ kg} \simeq 10^{-9} m_p$

Candidat possible: trou noir primordial



Trous noirs formés au
début de l'Univers !

Candidat possible: trou noir primordial



1 paramètre: masse

Leçon 3:

Tests et études modernes de la matière noire

Nicolas Esser

Plan de la leçon

Comment teste-t-on les candidats à la matière noire?

- Phénoménologie, (non-)observation et contraintes
- Matière noire particule: détection directe, détection indirecte et production aux collisionneurs
- Les simulations cosmologiques
- Conclusions

Phénoménologie,
(non-)observation et
contraintes

Phénoménologie

Phénoménologie

=

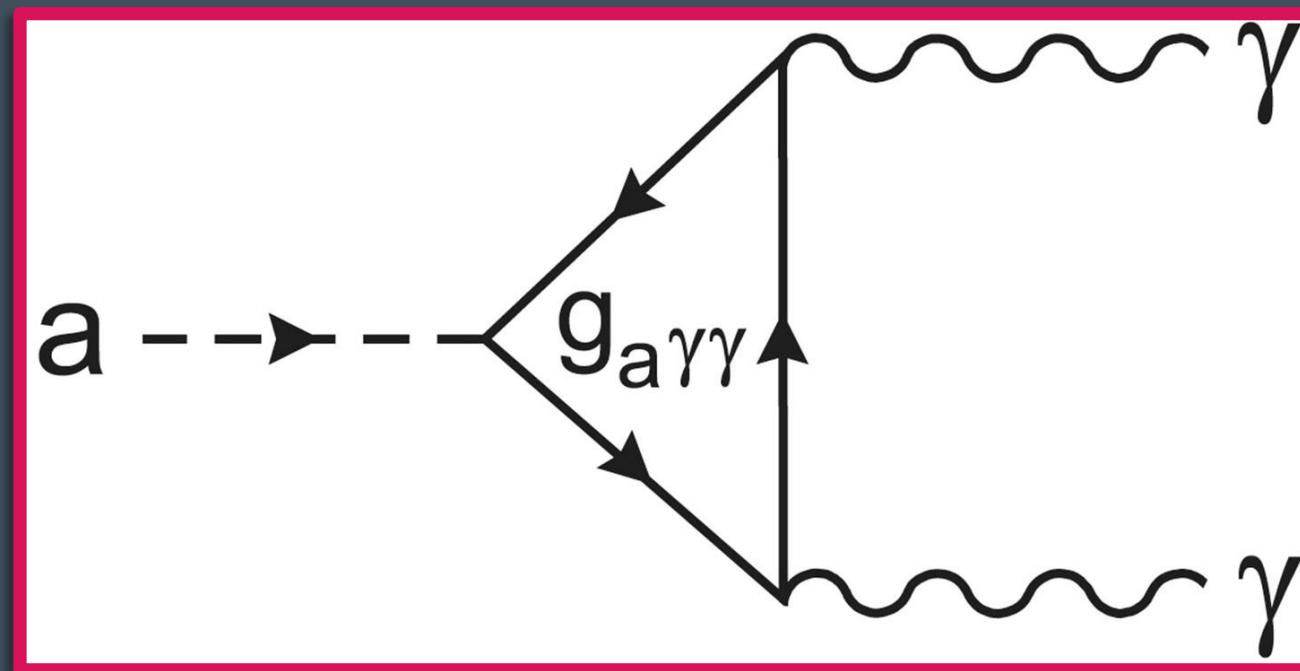
Etude des phénomènes
(effets) dus à la matière noire

Phénoménologie

Chaque candidat a ses propres caractéristiques, et potentiellement des effets différents sur l'Univers... on veut tester ces effets.

Phénoménologie

- Exemple: axion + champ magnétique = photon
- On prédit (par la théorie) un phénomène:



Phénoménologie

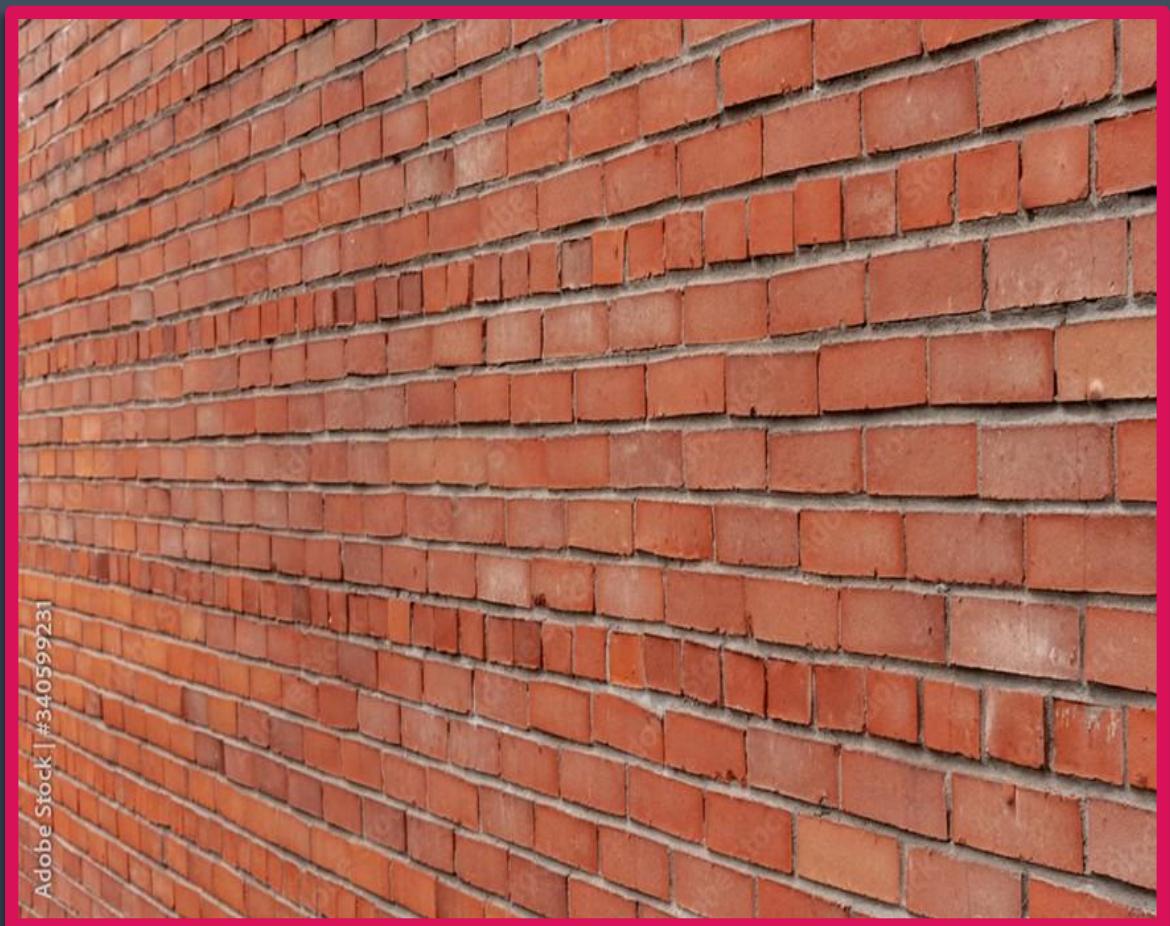
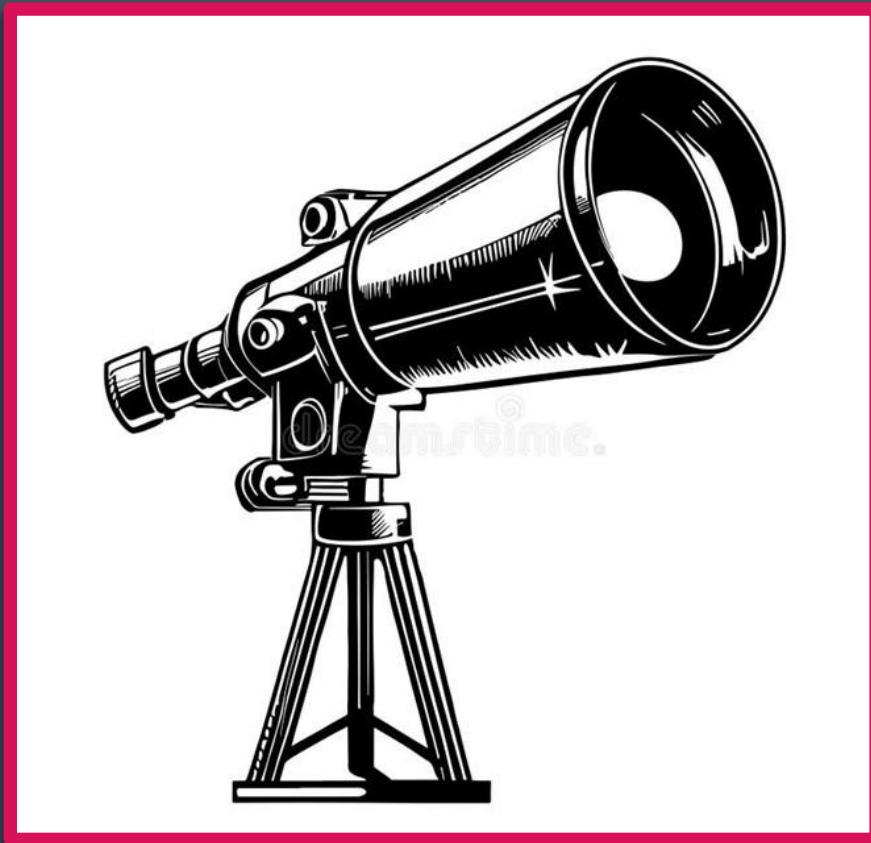
- On prédit à quelle fréquence ce phénomène devrait avoir lieu dans des conditions d'expérience

Dépend de m et g !

- Soit on réutilise une expérience existante, soit (si suffisamment de motivation théorique) on en construit une nouvelle... (\$\$\$)

Phénoménologie

- Exemple: axion + champ magnétique = photon



Adobe Stock | #340599231

Phénoménologie

- Exemple: axion + champ magnétique = photon

CERN Axion
Solar
Telescope
(CAST)



Phénoménologie

Observation ?

Phénoménologie

Observation ?



On a trouvé la
matière noire!

Phénoménologie

Observation ?



On a trouvé la matière noire!

Implications:

- Gloire
- Richesse
- Beauté
- Prix Nobel

Phénoménologie

Observation ?



On a trouvé la matière noire!

Implications:

- Gloire
- Richesse (?)
- Beauté (?)
- Prix Nobel

Phénoménologie

Observation ?



On a trouvé la matière noire!

Implications:

Satisfaction d'avoir (enfin) mieux compris notre Univers !

-PRIX NOBEL

Phénoménologie

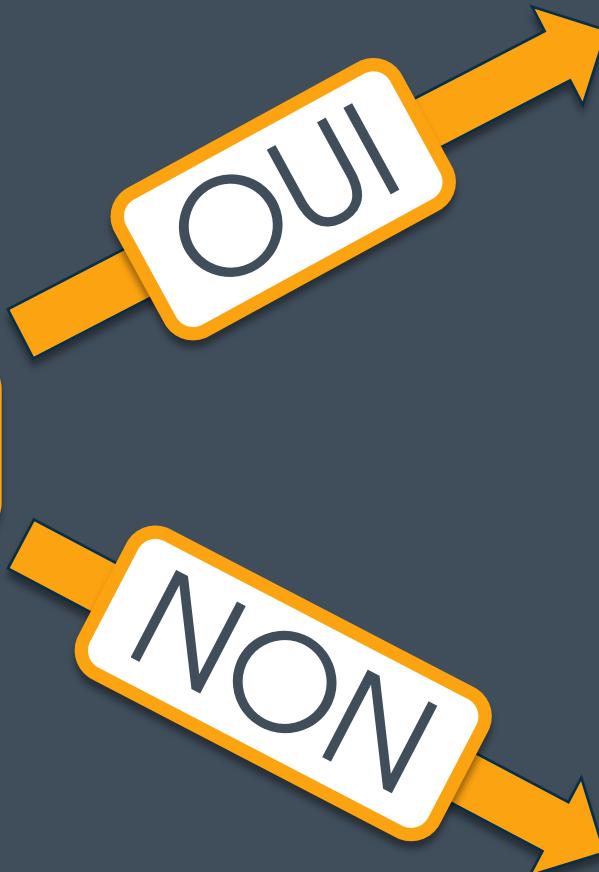
Observation ?



On a trouvé la
matière noire!

Phénoménologie

Observation ?



On a trouvé la matière noire!

On a pas (encore) trouvé la matière noire

Phénoménologie

On a trouvé la

Contraintes !



(encore) trouve
la matière noire

Phénoménologie

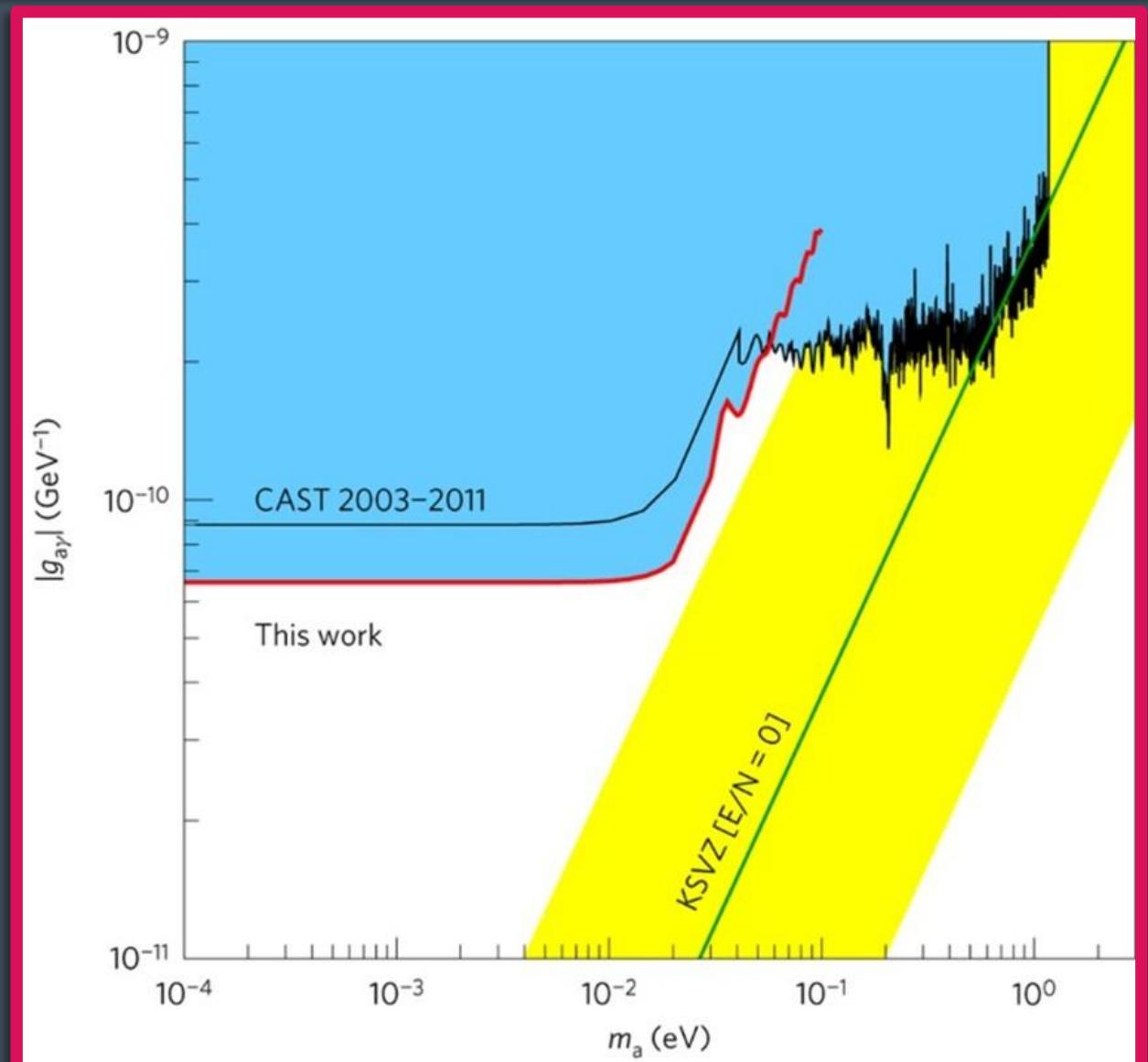
Constraintes !

(moins excitant)

On a trouvé la

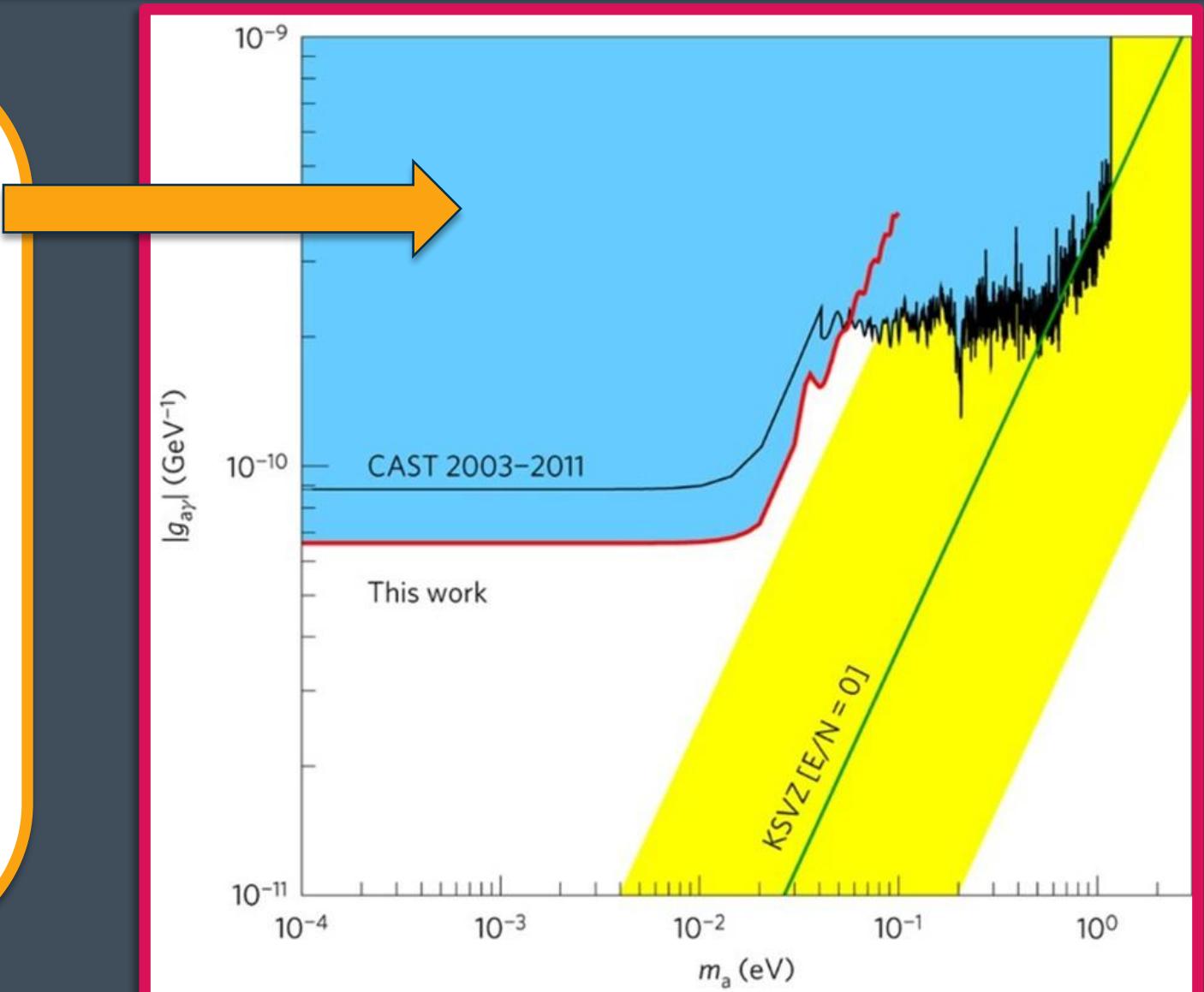
(encore) trouve
la matière noire

Contraintes



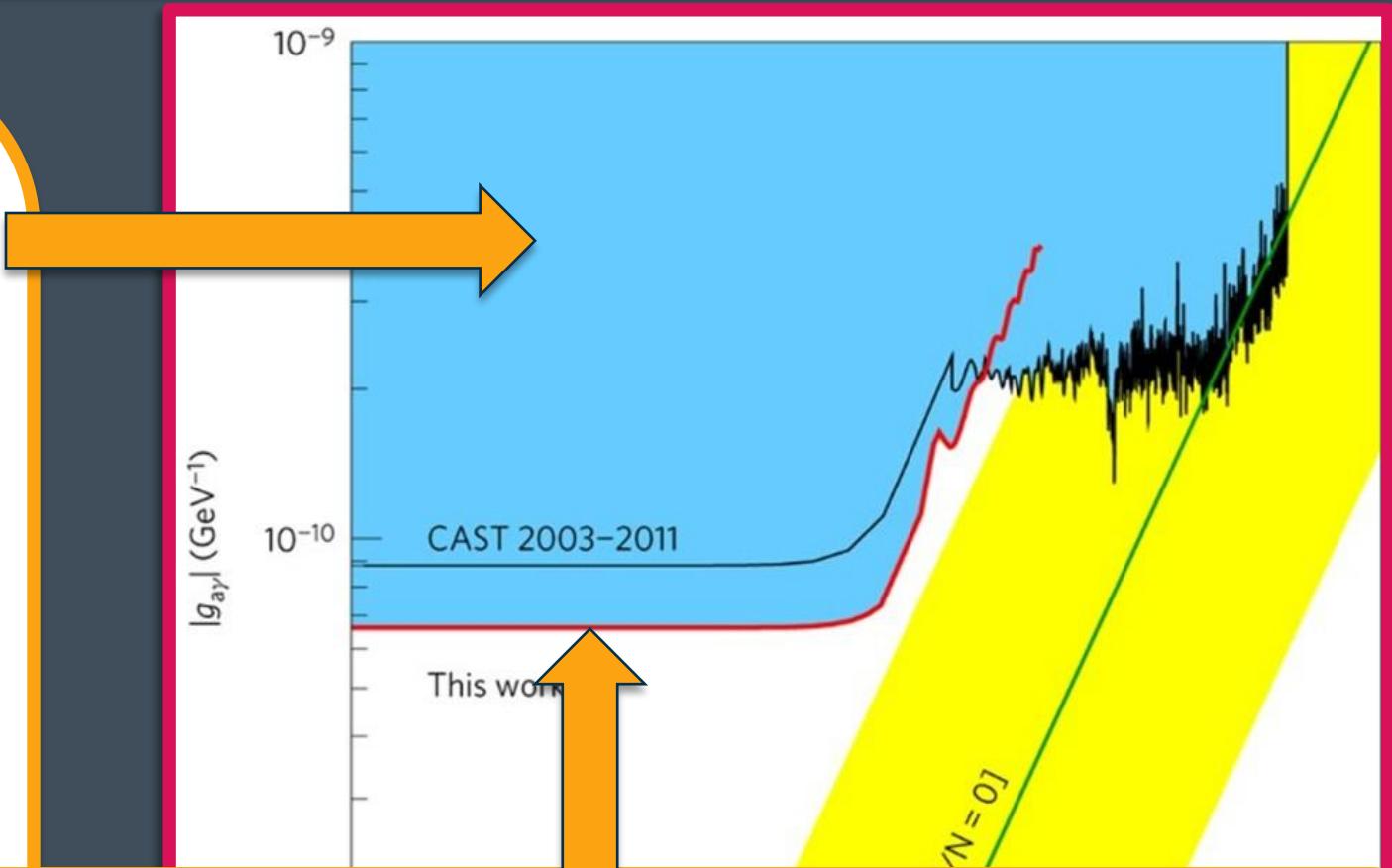
Contraintes

La matière noire
ne peut pas être
faite d'axions
avec une
combinaison g
et m dans cette
zone !



Contraintes

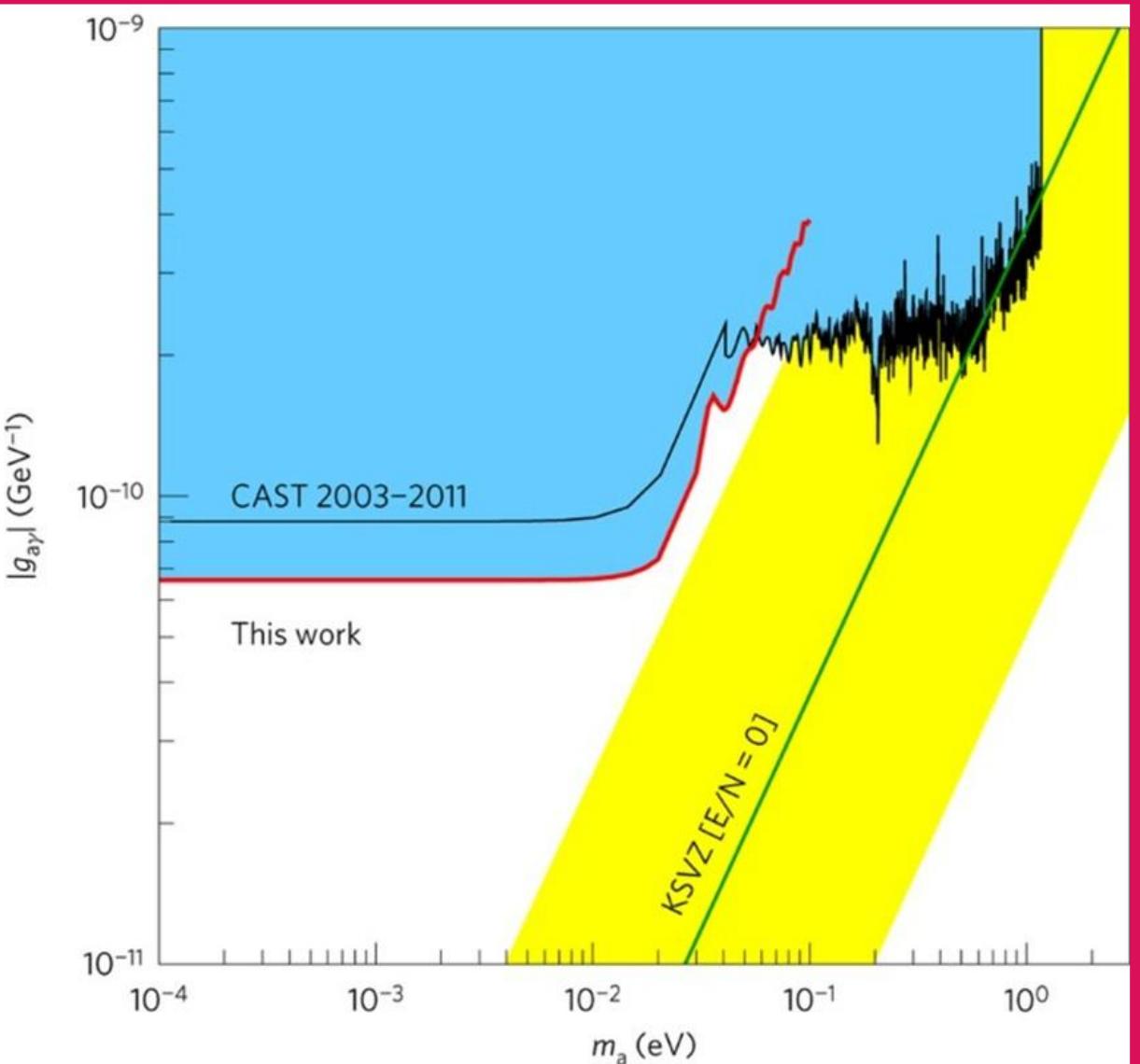
La matière noire
ne peut pas être
faite d'axions
avec une
combinaison g
et m dans cette
zone



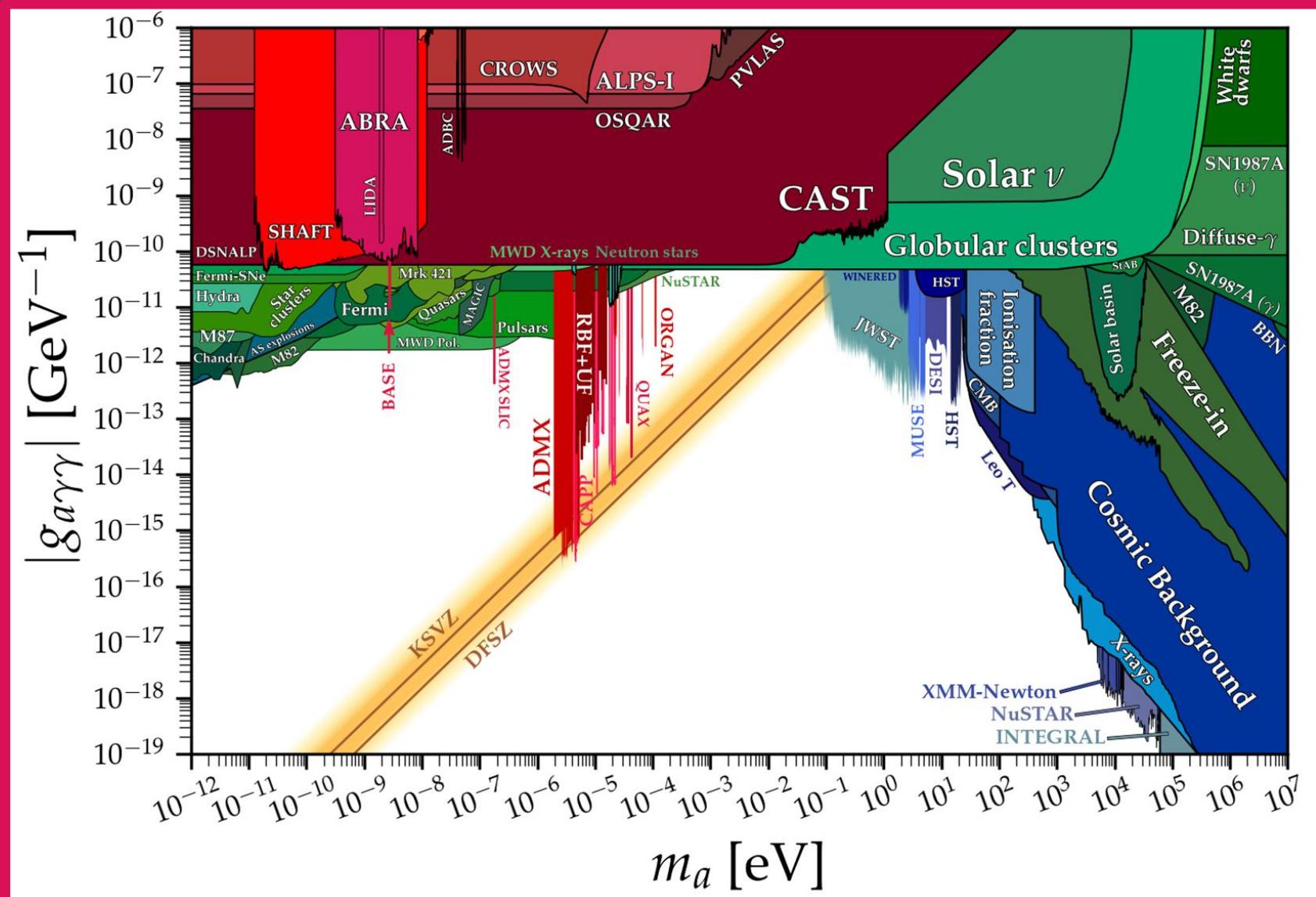
On a prédit au moins 1 signal
entre 2003 et 2011, et on a rien vu

Contraintes

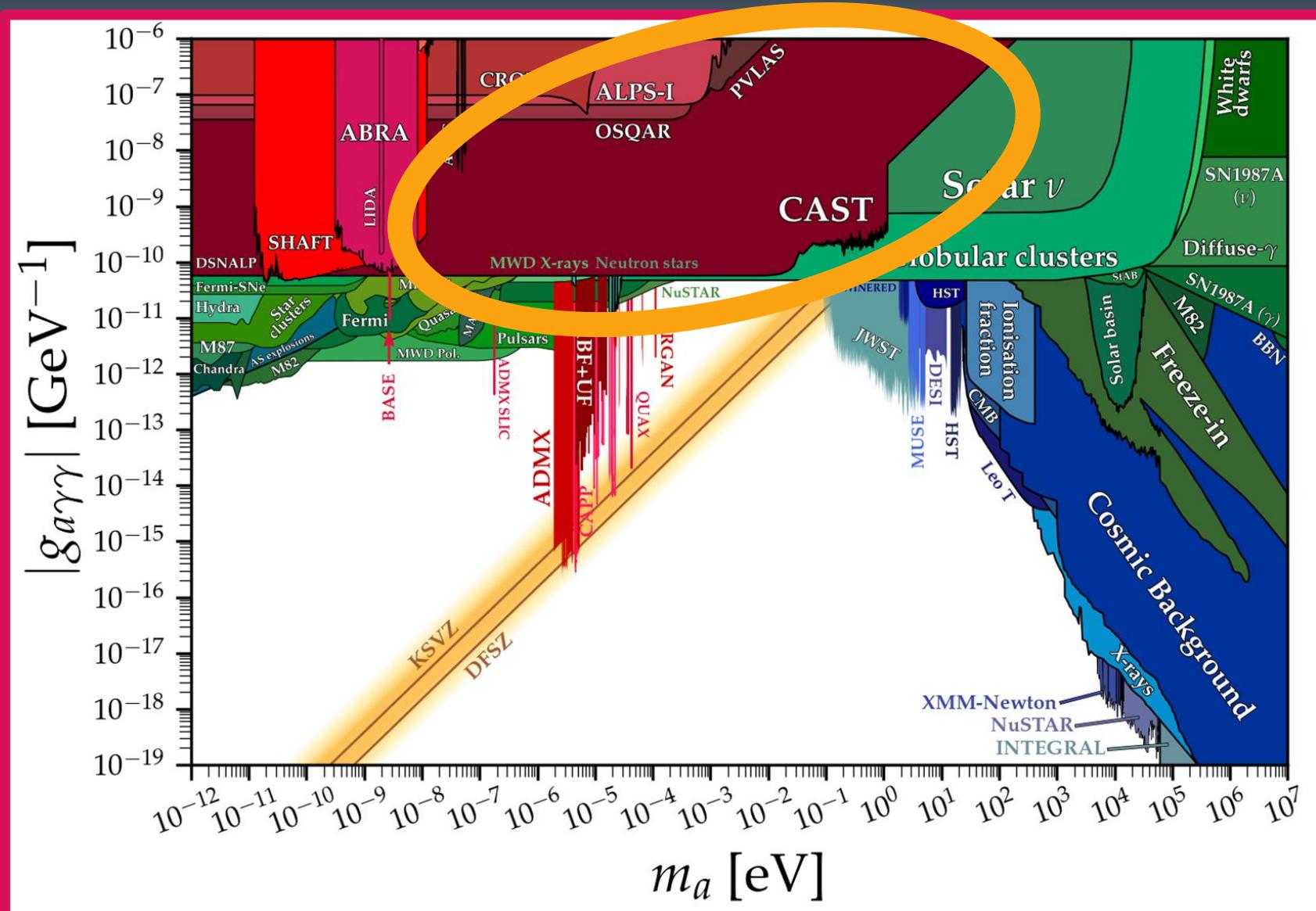
Une expérience:
des années de
travail de plusieurs
physiciens



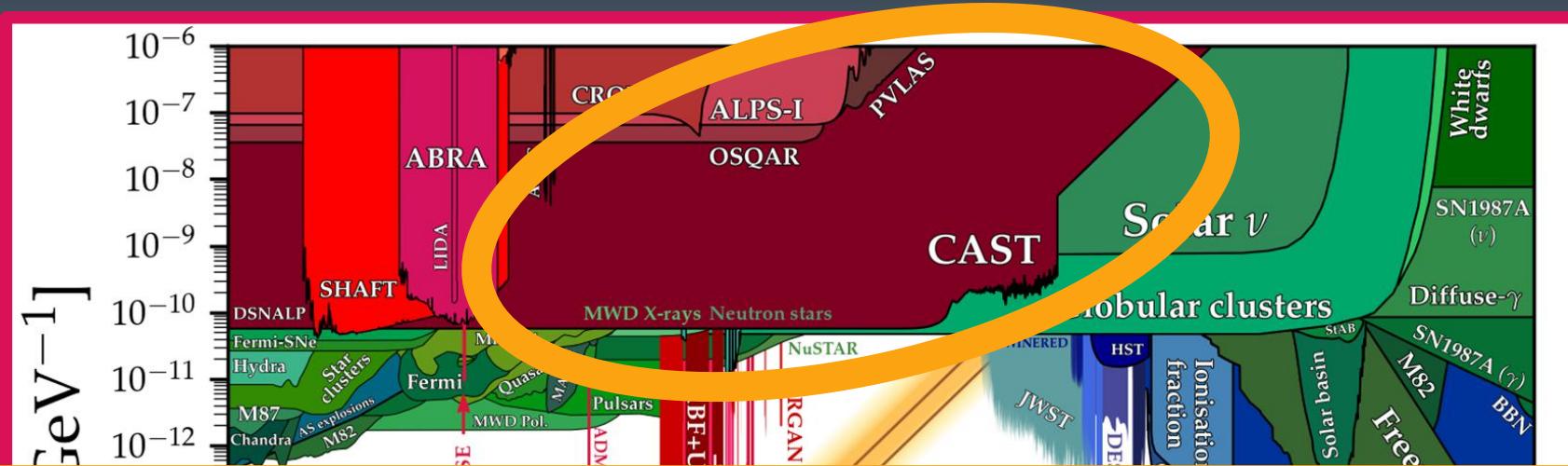
Contraintes: axion



Contraintes: axion



Contraintes: axion

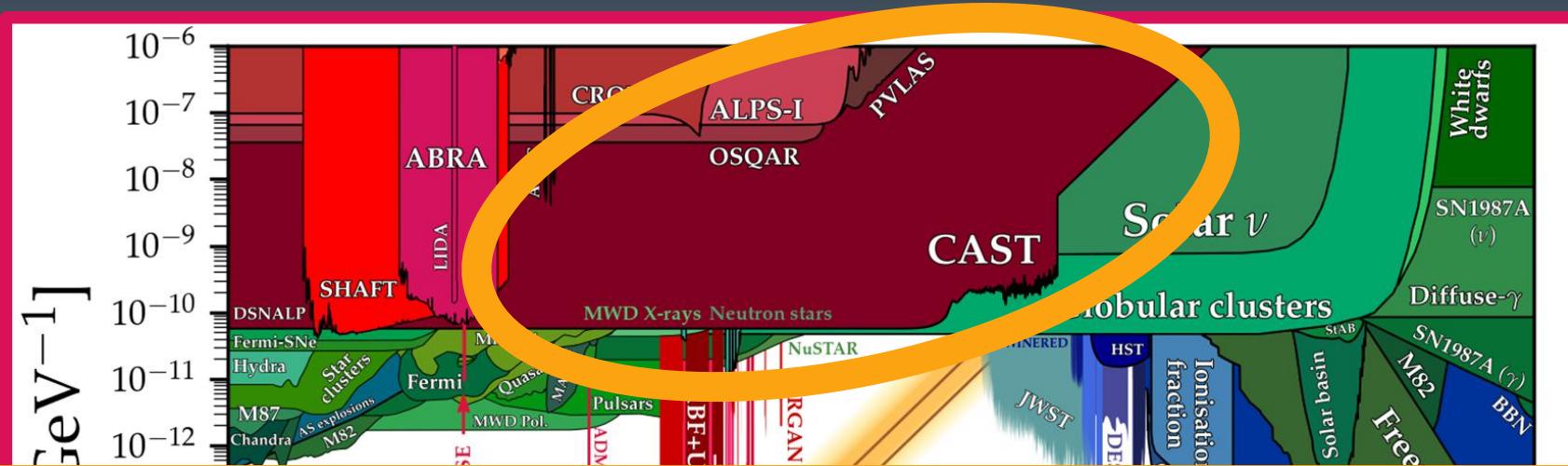


Il existe des dizaines
d'expériences pour de
nombreux candidats.

$$10^{-11} \quad 10^{-10} \quad 10^{-9} \quad 10^{-8} \quad 10^{-7} \quad 10^{-6} \quad 10^{-5} \quad 10^{-4} \quad 10^{-3} \quad 10^{-2} \quad 10^{-1} \quad 10^0 \quad 10^1 \quad 10^2 \quad 10^3 \quad 10^4 \quad 10^5 \quad 10^6$$

m_a [eV]

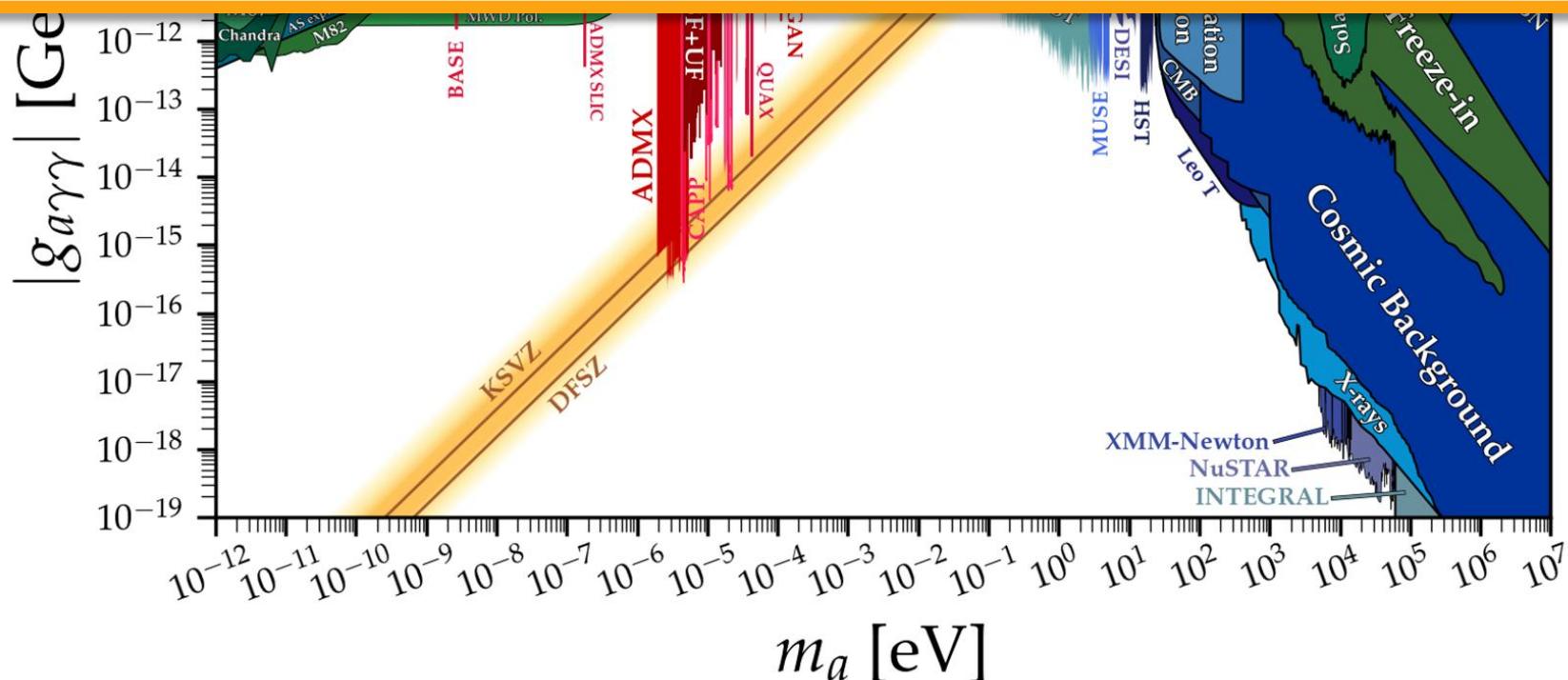
Contraintes: axion



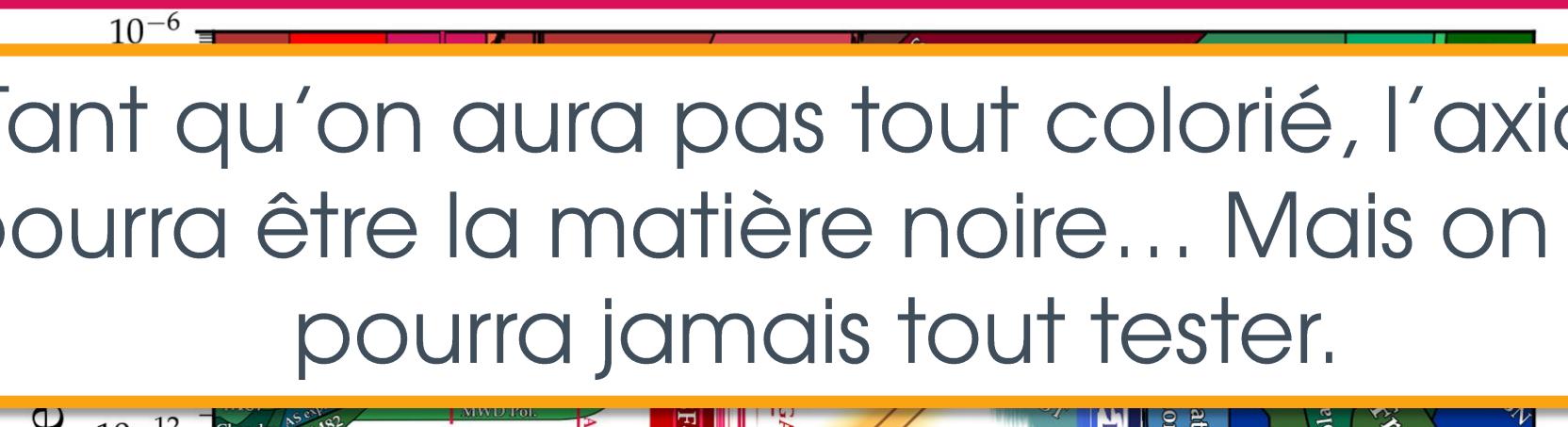
Conclusion: il faut
beaucoup travailler...

Contraintes: axion

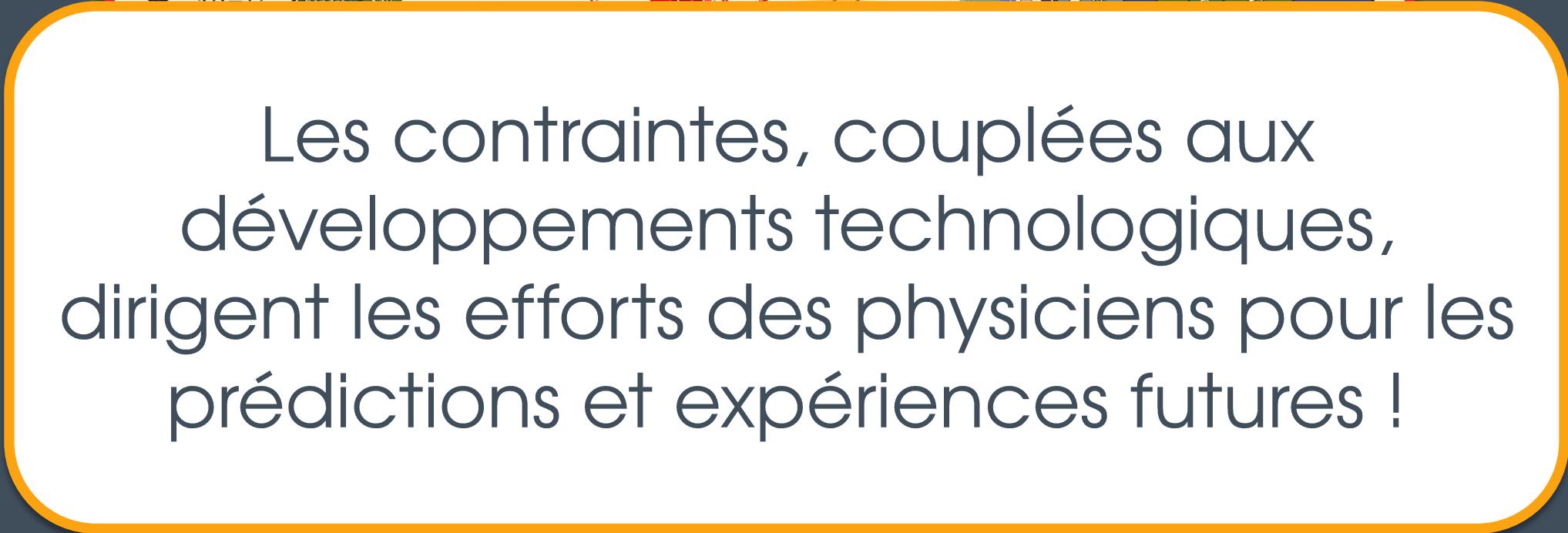
Tant qu'on aura pas tout colorié, l'axion pourra être la matière noire... Mais on ne pourra jamais tout tester.



Contraintes: axion

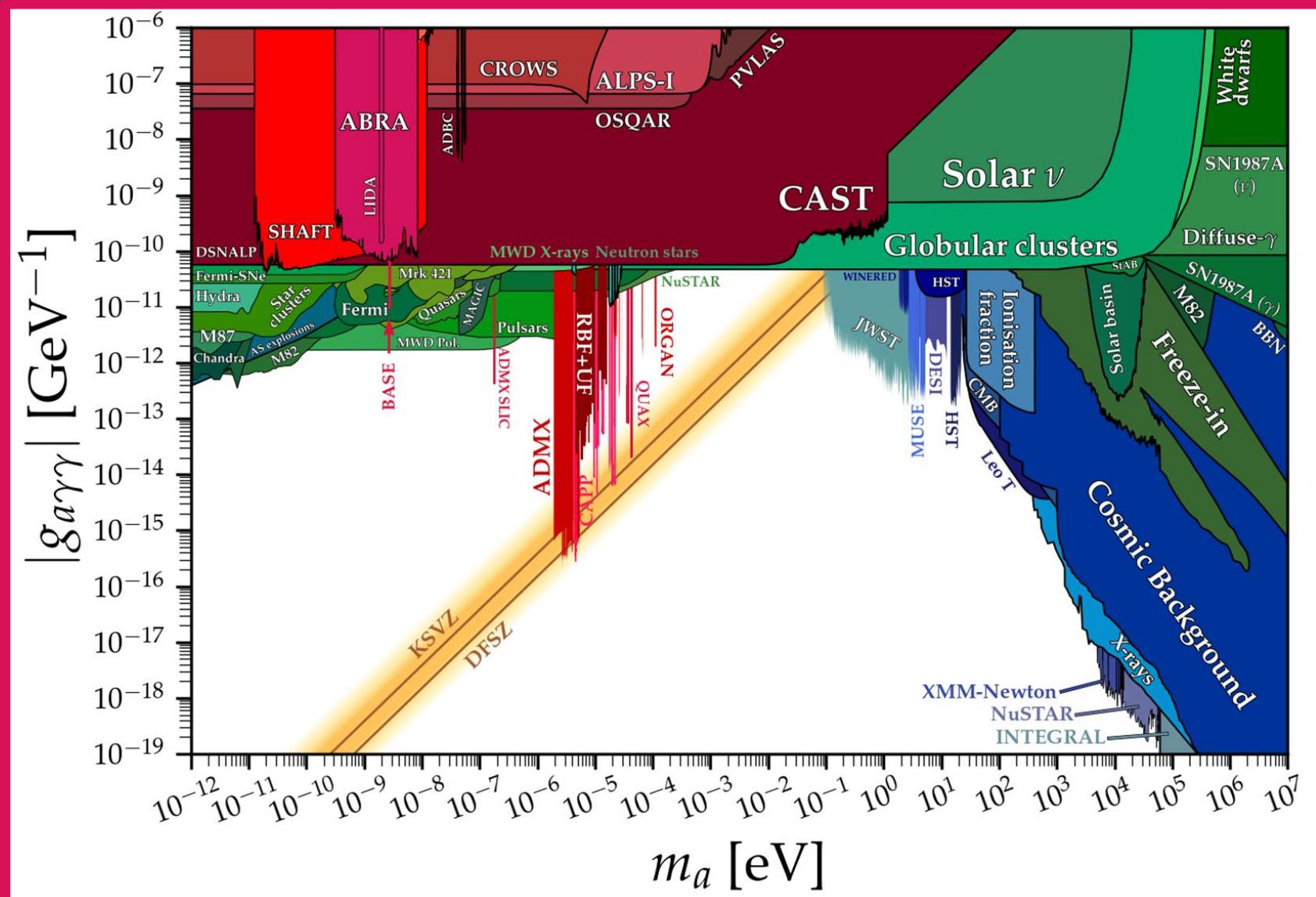


Tant qu'on aura pas tout colorié, l'axion pourra être la matière noire... Mais on ne pourra jamais tout tester.

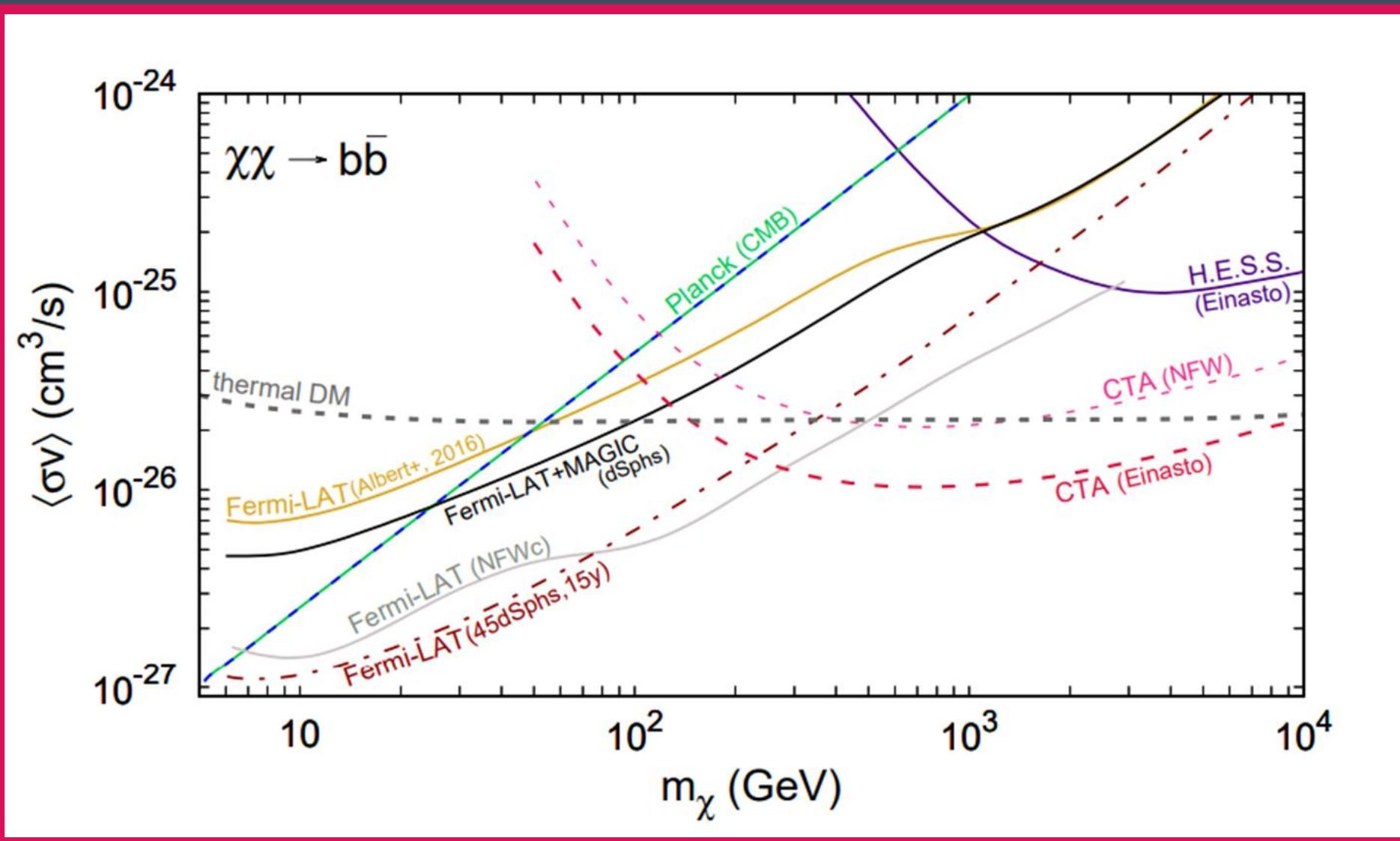


Les contraintes, couplées aux développements technologiques, dirigent les efforts des physiciens pour les prédictions et expériences futures !

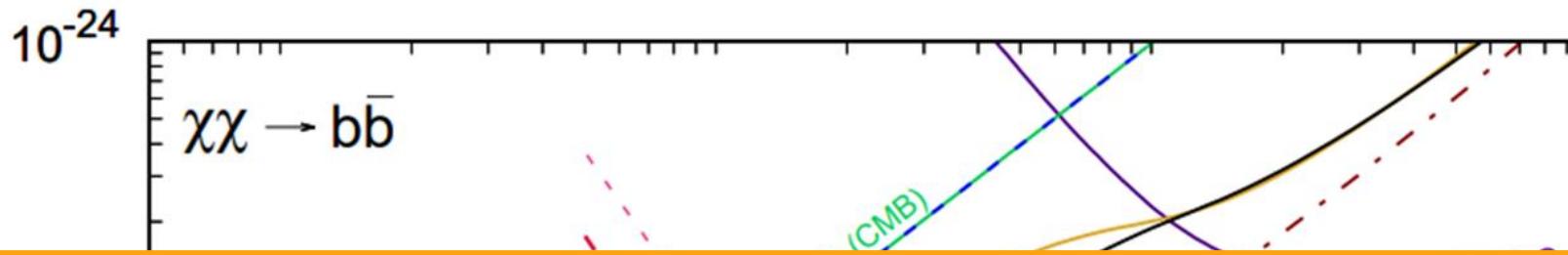
Contraintes: axion



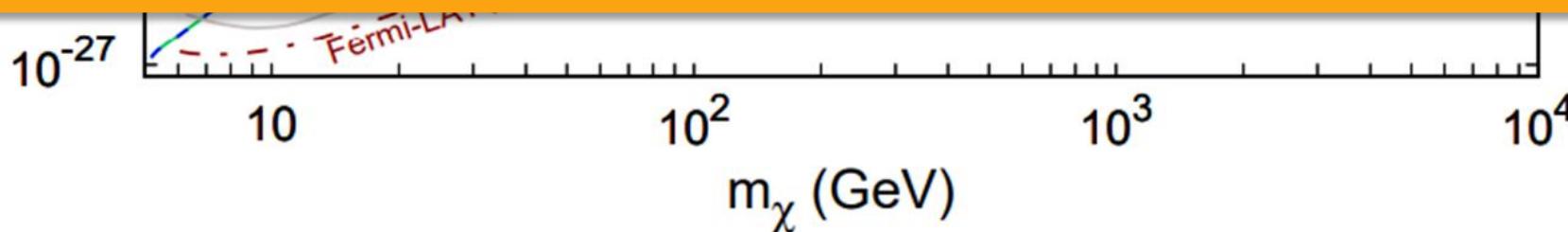
Contraintes: WIMP



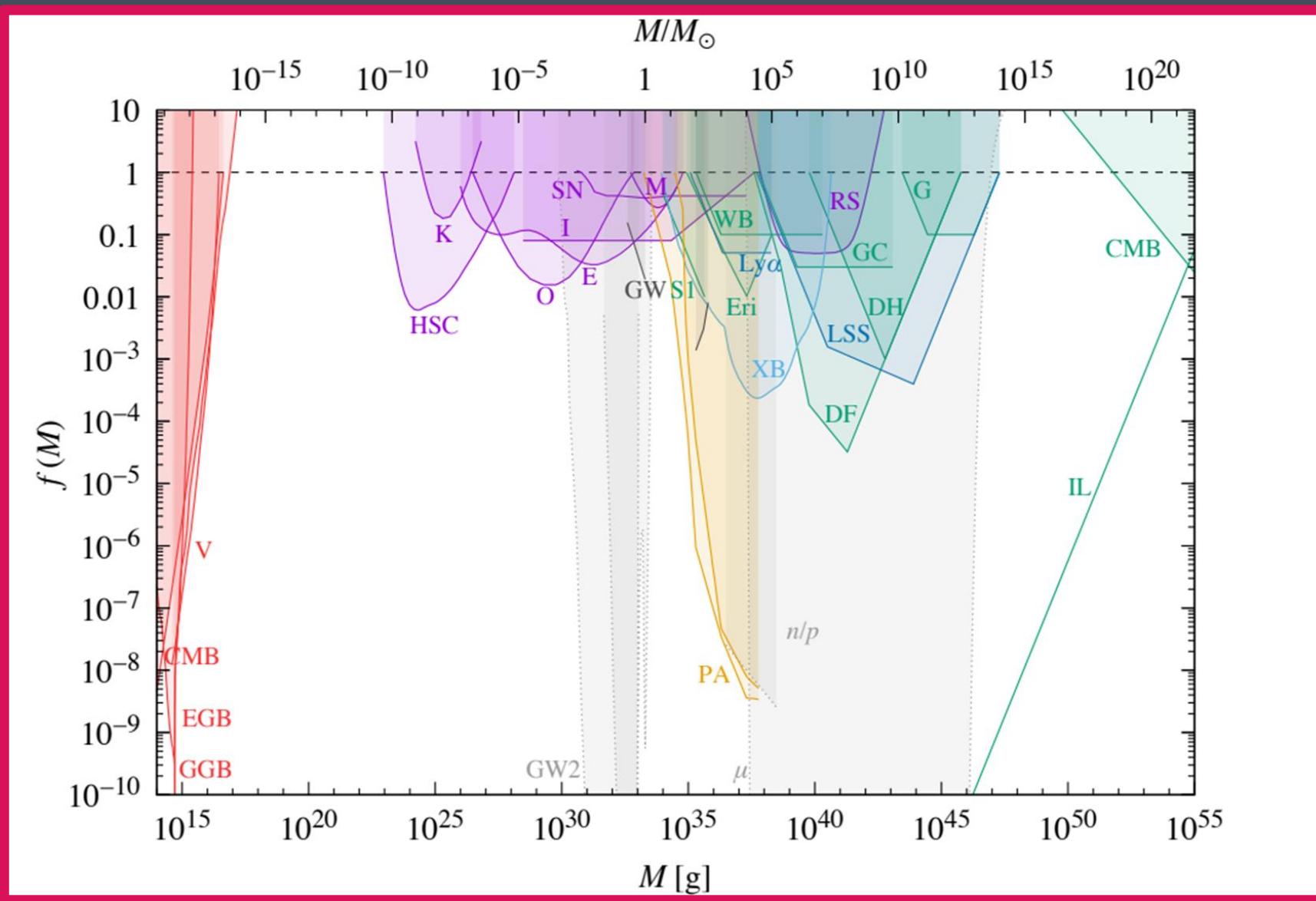
Contraintes: WIMP



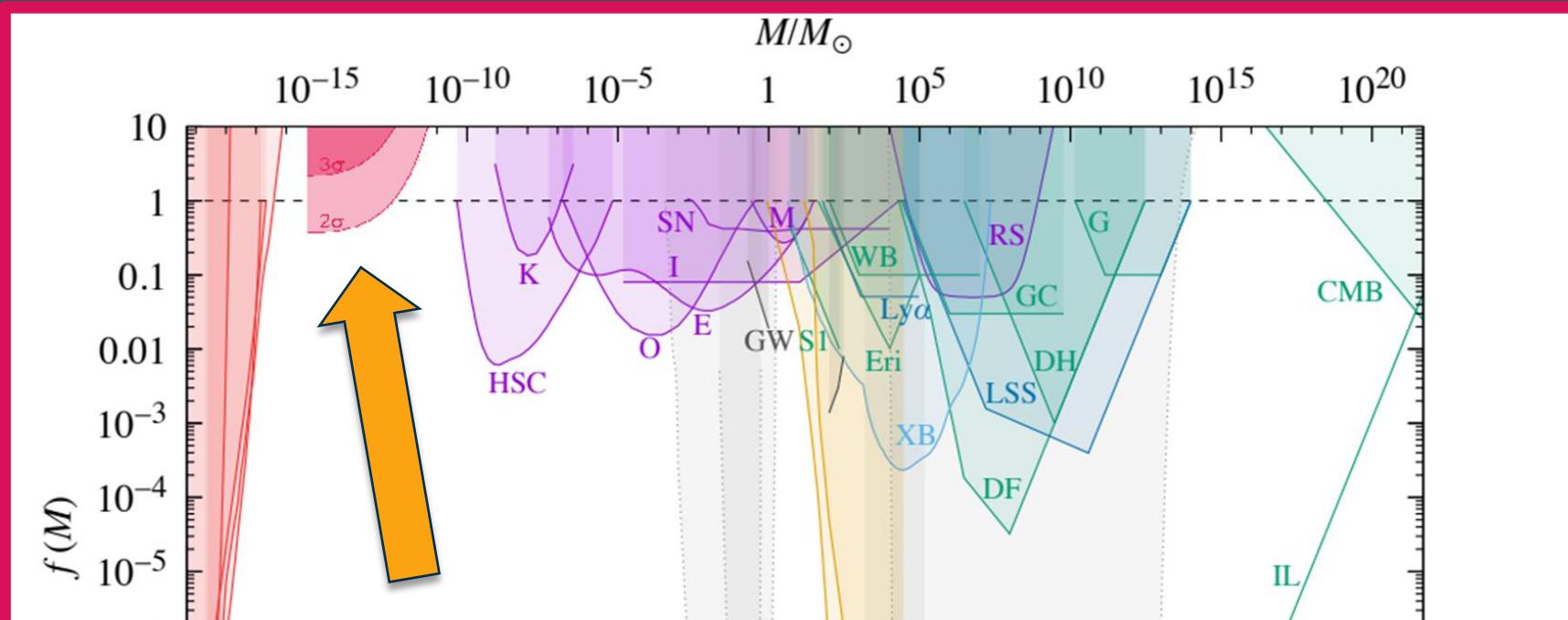
(Il en existe beaucoup d'autres pour les WIMPs)



Contraintes: trous noirs primordiaux

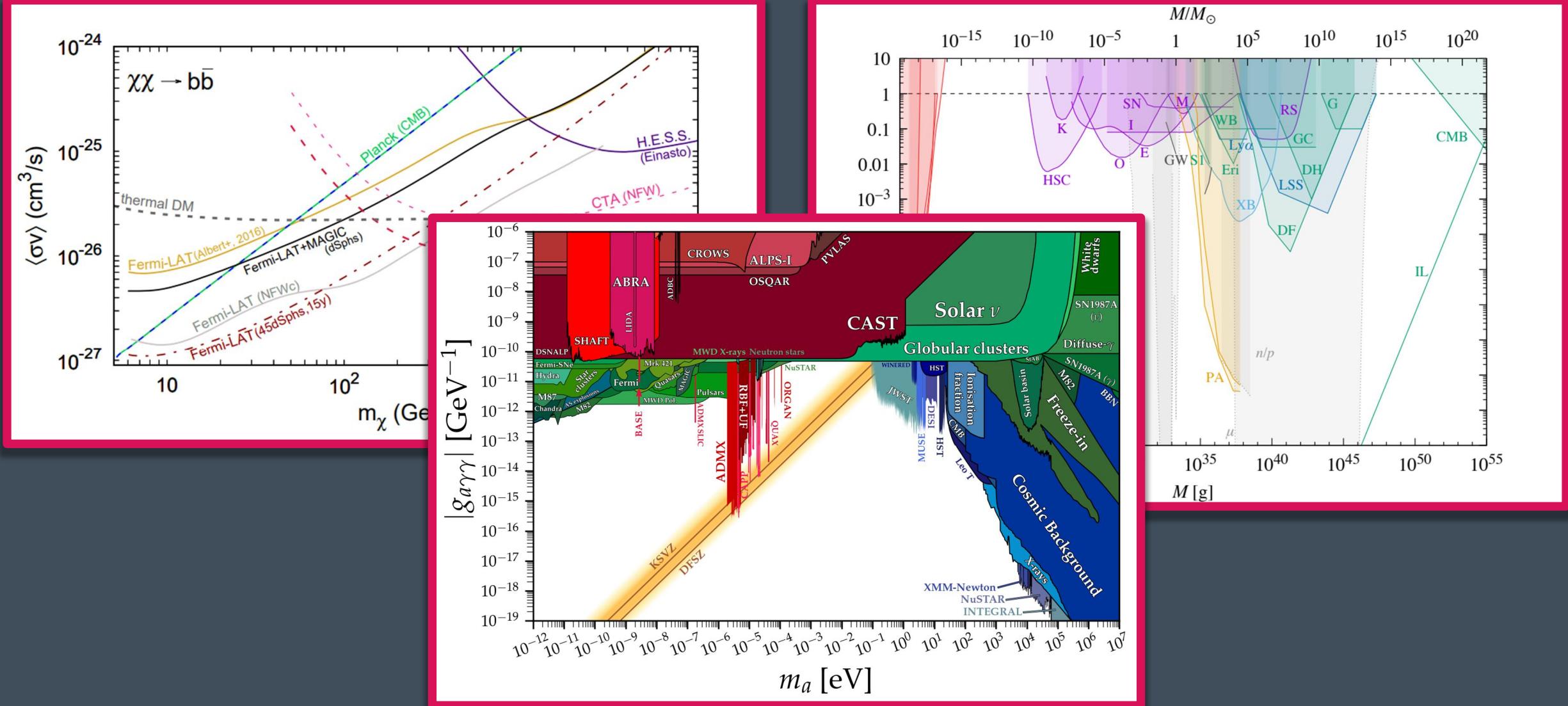


Contraintes: trous noirs primordiaux

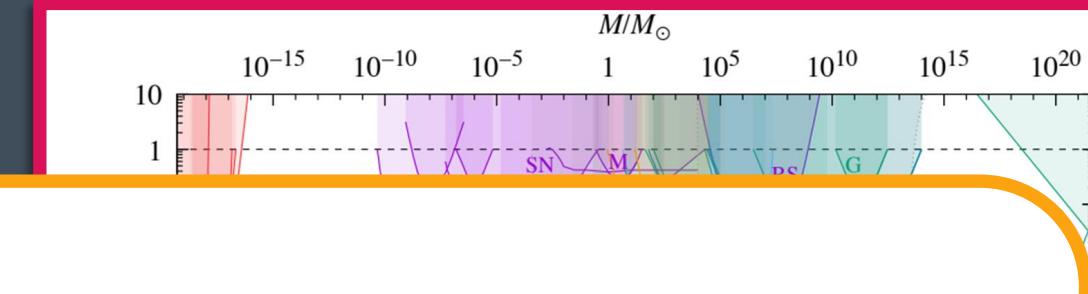


4 ans de thèse. Et on est pas
encore certains.

Contraintes

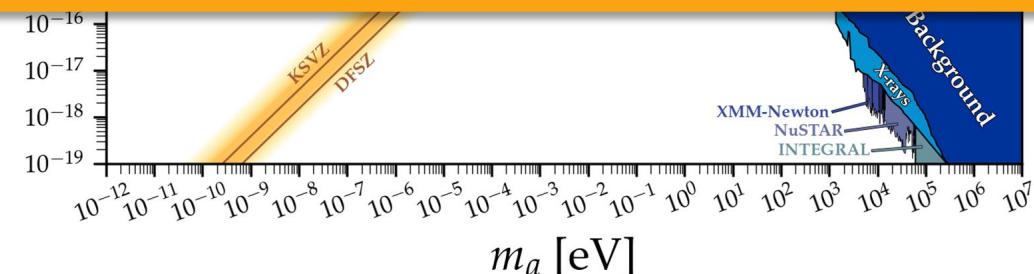


Contraintes



Quels sont les grands types d'expériences?

55



Détection directe,
détection indirecte et
production aux
collisionneurs

Détection directe,

détection indirecte

Matière noire particule

production aux

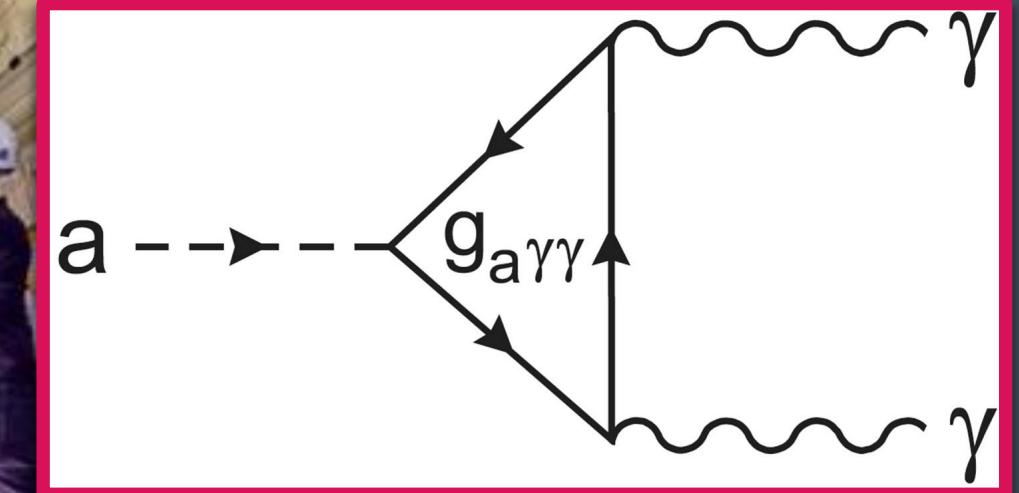
collisionneurs

Détection directe

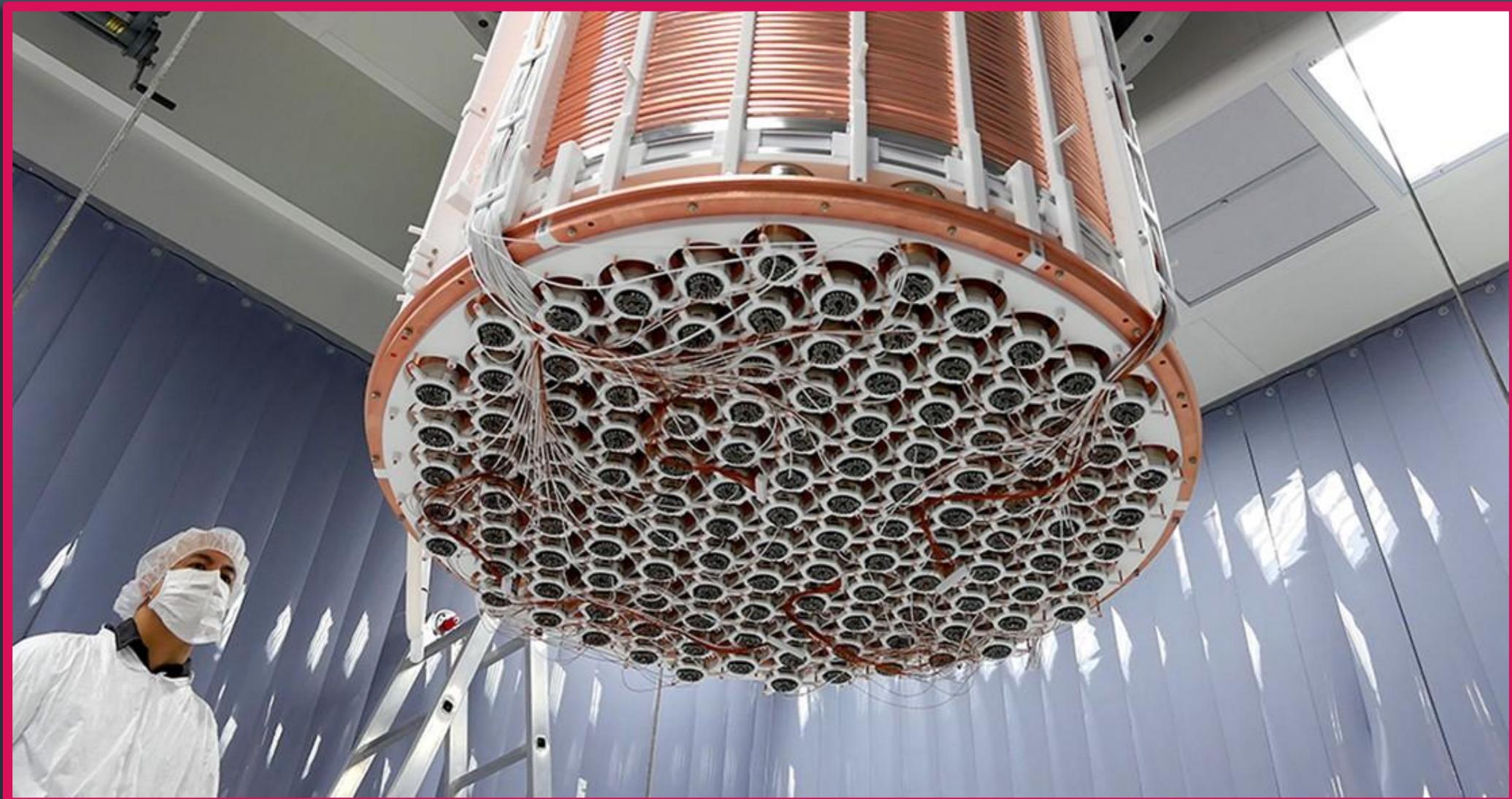
Détection directe

La matière noire
interagit directement
avec l'expérience

CAST (depuis 2002)



XENON1T (depuis 2002)



XENONIT

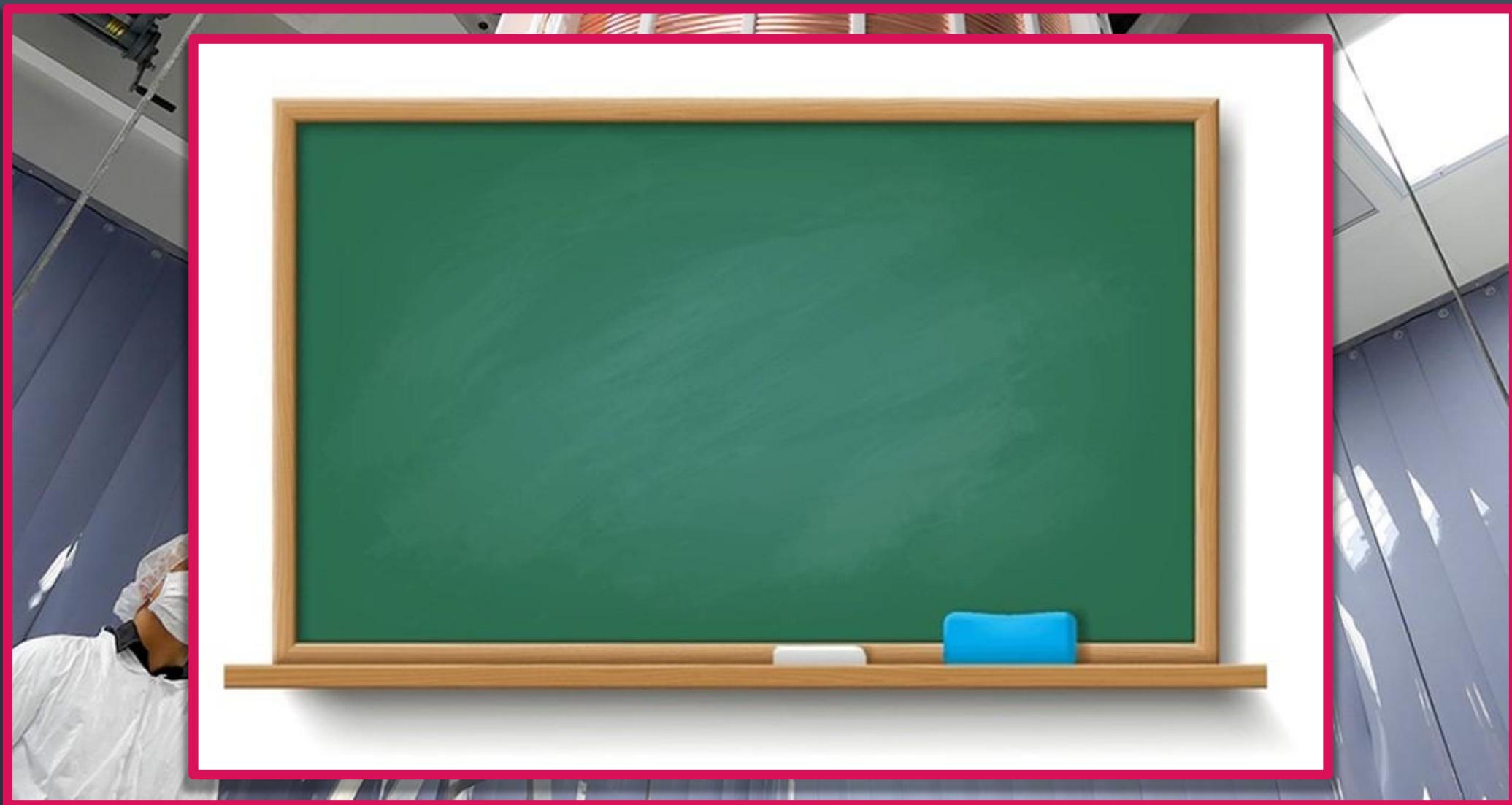
Tableau périodique des éléments chimiques

| Groupe → | I A | II A | III A | IV A | V A | VI A | VII A | VIII | IB | II B | III B | IV B | V B | VI B | VII B | VIII A | | | | | |
|-----------|--|-------------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Période ↓ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | |
| | Hydrogène H 1,007975 | Béryllium Be 9,0121831 | Lithium Li 6,9395 | Magnésium Mg 24,3055 | Potassium K 39,0983 (1) | Calcium Ca 40,078 (4) | Scandium Sc 44,955908 (5) | Titanium Ti 47,867 (1) | Vanadium V 50,9415 (1) | Chrome Cr 51,9961 (6) | Manganèse Mn 54,938044 | Fer Fe 55,845 (2) | Cobalt Co 58,933194 | Nickel Ni 58,6934 (4) | Cuivre Cu 63,546 (3) | Zinc Zn 65,38 (2) | Gallium Ga 69,723 (1) | Germanium Ge 72,630 (8) | Arsenic As 74,921595 | Sélénium Se 78,971 (8) | Hélium He 4,002602 |
| | ← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa) | ← numéro atomique | ← symbole chimique | ← masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable] [CAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015] | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

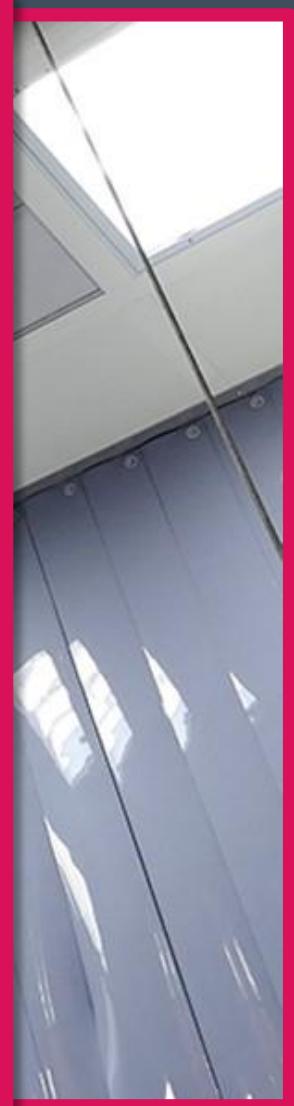
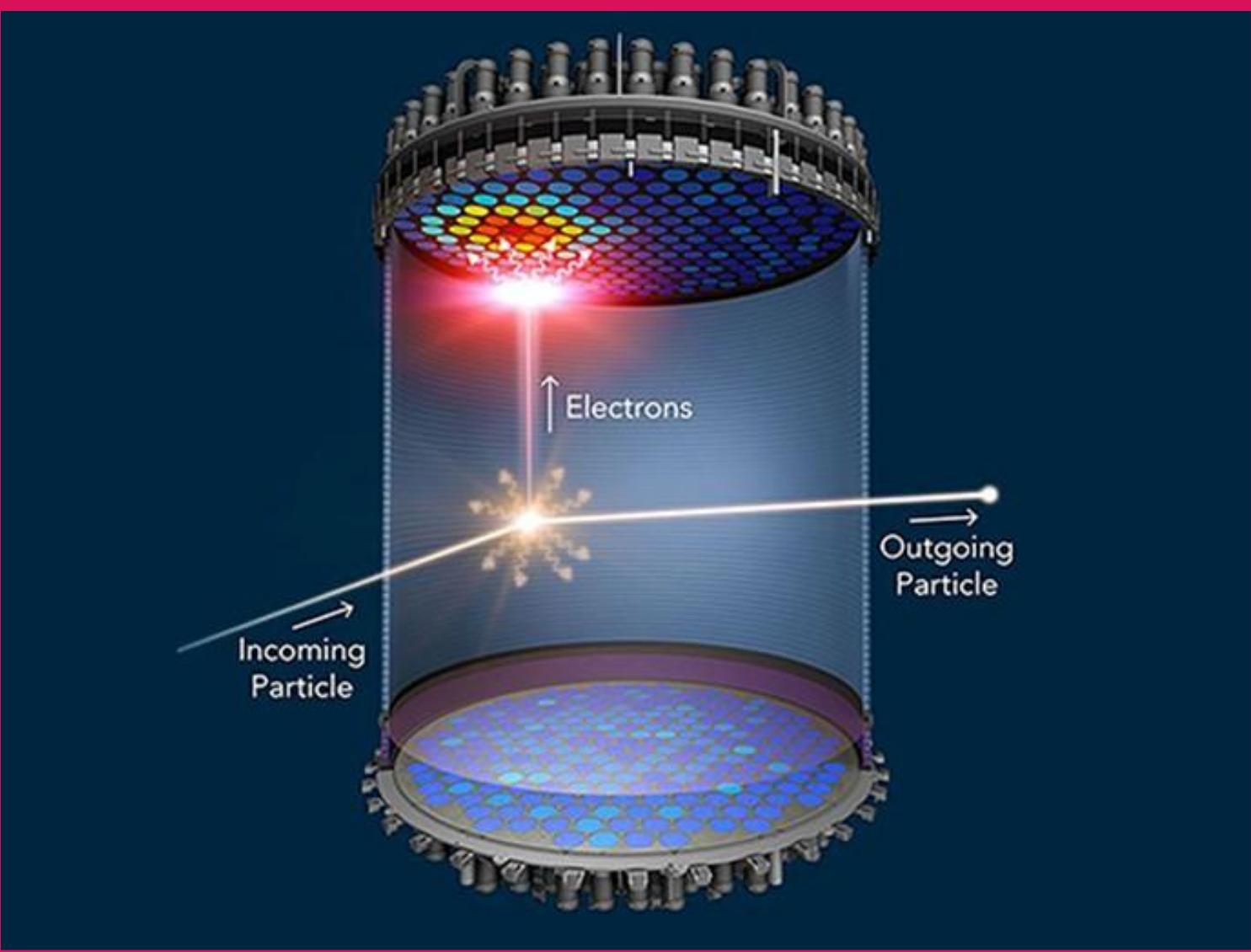
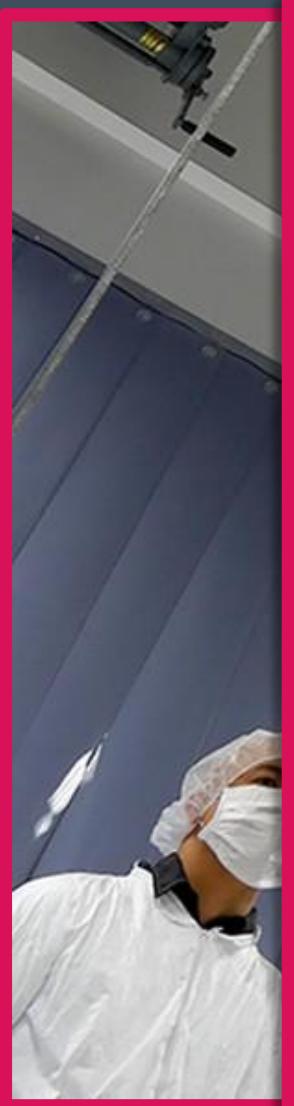
Métaux

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------------|-------------|-----------|----------------------|----------------|-------------|-------------------|-----------|------------|-------------|------------|----------------------------------|-------------|
| Alcalins | Alcalino-terreux | Lanthanides | Actinides | Métaux de transition | Métaux pauvres | Métalloïdes | Autres non-métaux | Halogènes | Gaz nobles | Non classés | primordial | désintégration d'autres éléments | synthétique |
|----------|------------------|-------------|-----------|----------------------|----------------|-------------|-------------------|-----------|------------|-------------|------------|----------------------------------|-------------|

XENON1T



XENON1T

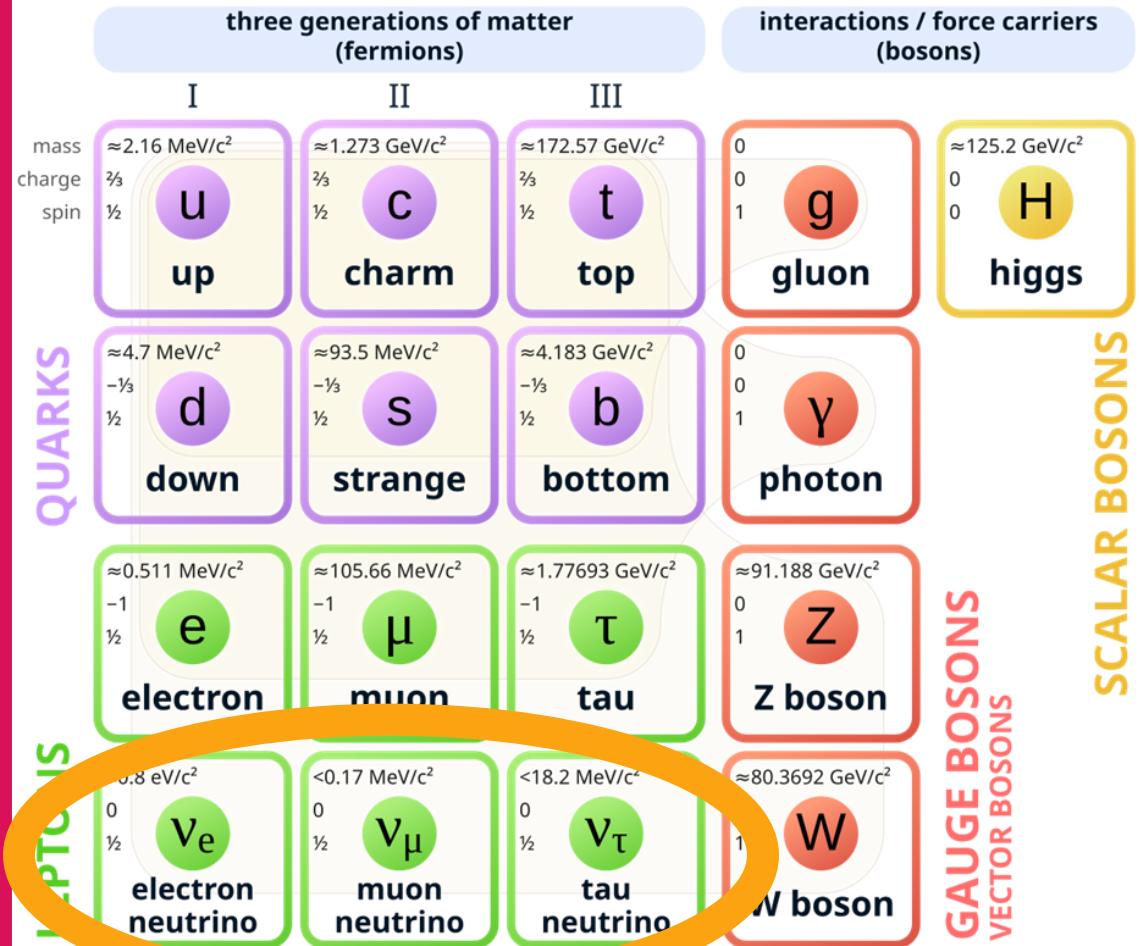


XENON1T

Pourquoi d'autres particules ne pourraient pas créer de signal ?

XENON1T

Standard Model of Elementary Particles

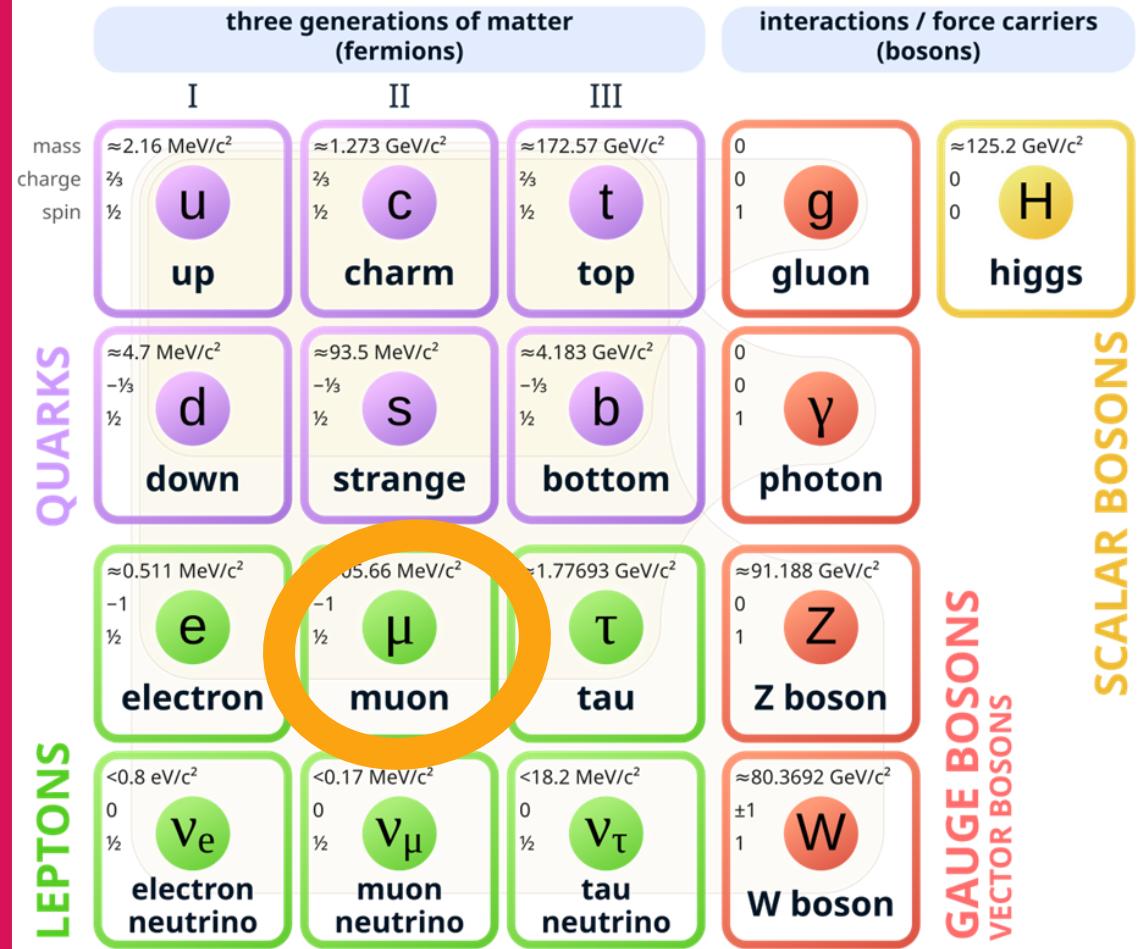


Neutrinos: 10^{15} par mètre carré par seconde

Mais n'interagissent quasiment pas (interaction faible); une immense majorité traverse la Terre sans rien faire

XENON1T

Standard Model of Elementary Particles

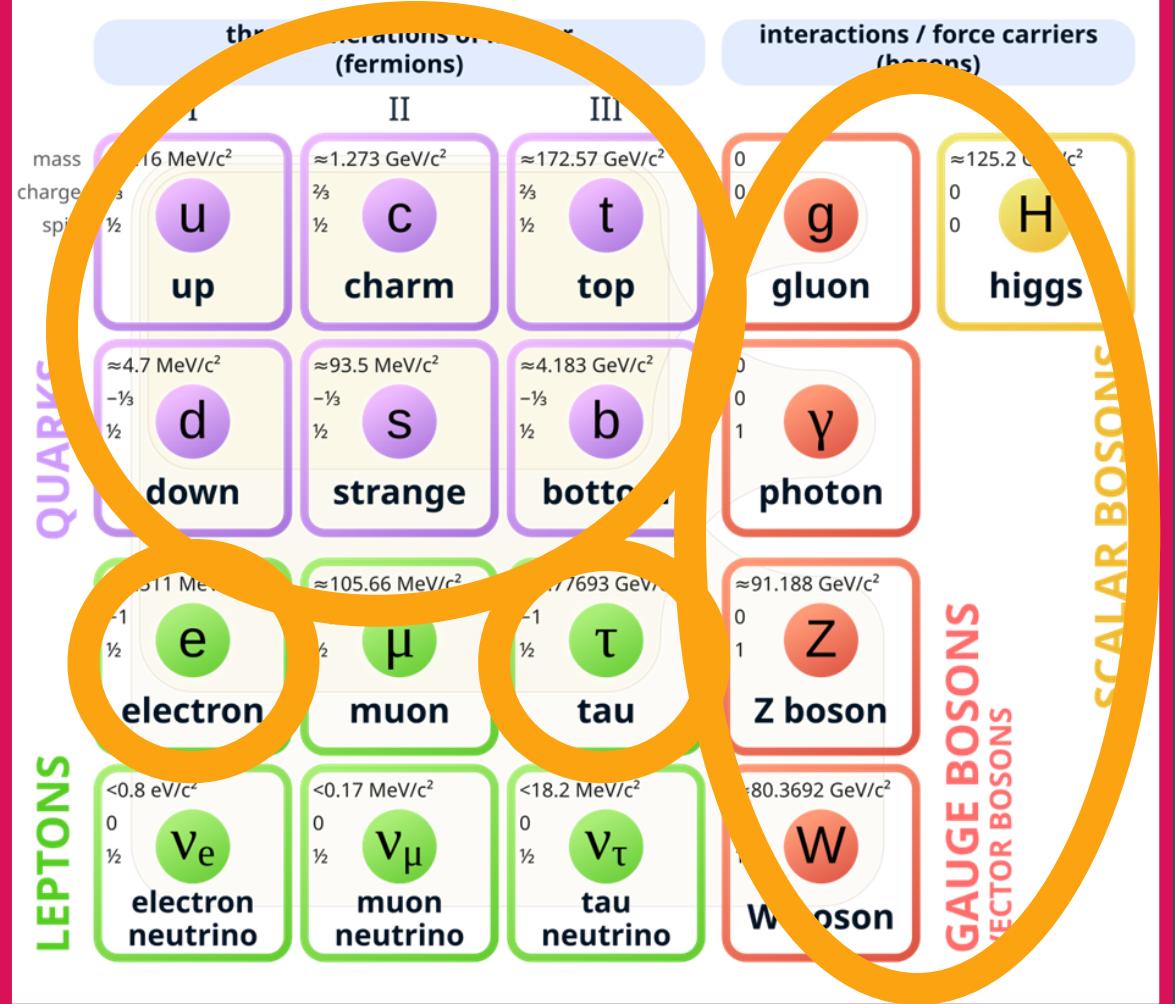


Muons: 10000 par mètre carré par seconde

Ont une charge électrique (interaction électromagnétique).
Problème!

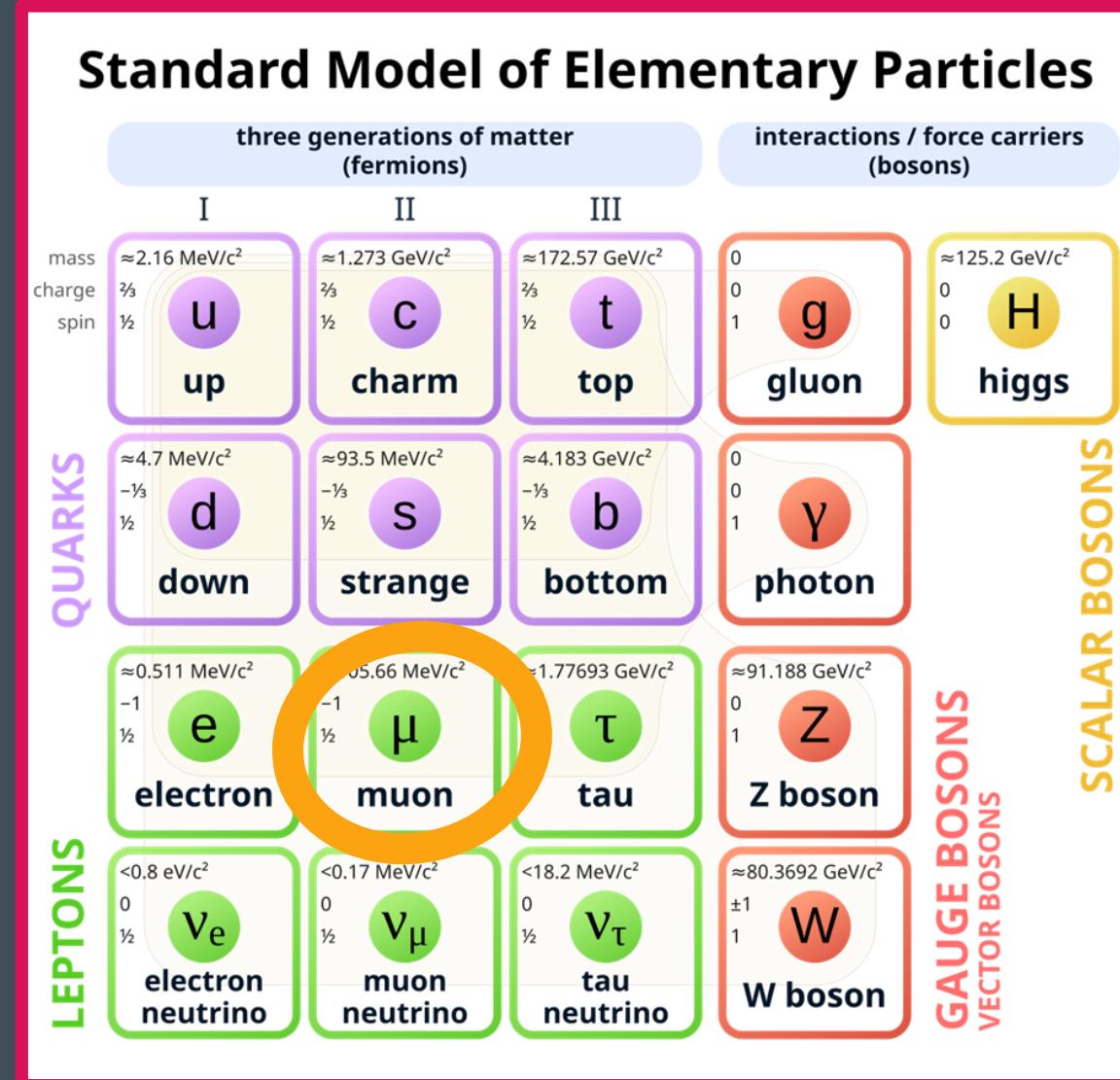
XENON1T

Standard Model of Elementary Particles



Le reste: pas de problème...

XENON1T



XENON1T



XENON1T



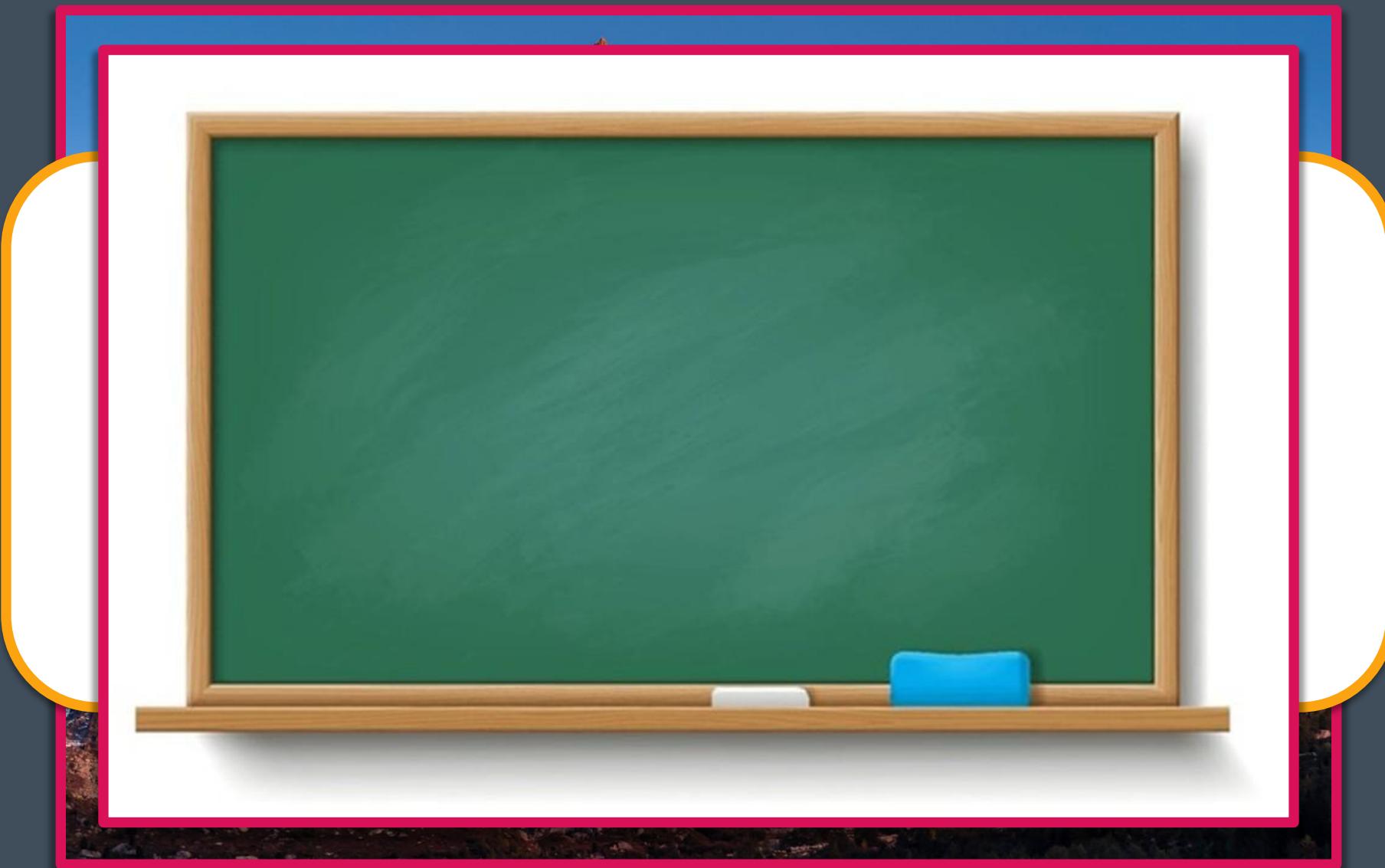
XENON1T



Malgré tout:
quelques muons
passent !



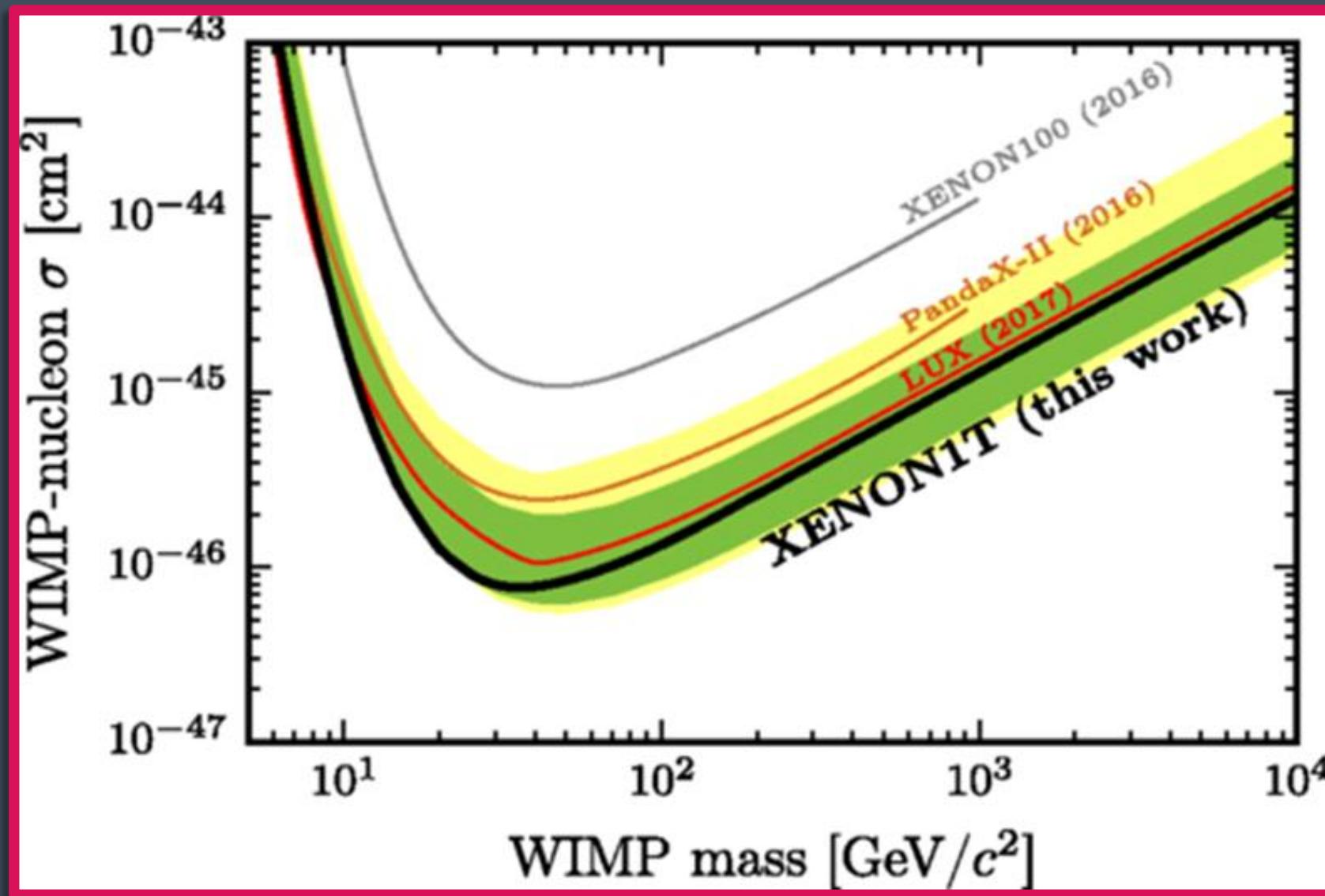
XENON1T



XENON1T

La matière noire interagit tellement faiblement qu'on utilise 3 niveaux de protection pour essayer de l'isoler des autres particules !

XENON1T: contraintes



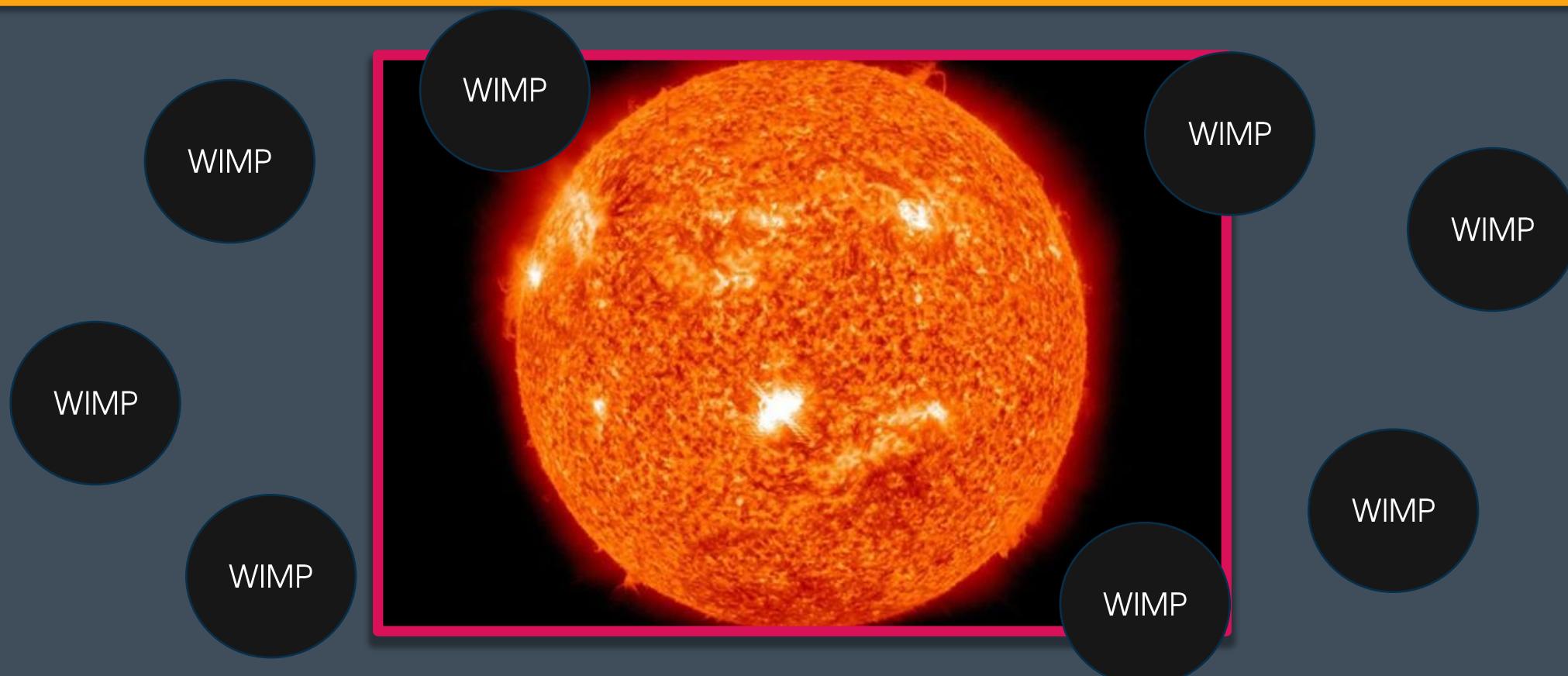
Détection indirecte

Détection indirecte

La matière noire interagit hors de l'expérience (dans l'espace) et **créé des particules avec une trace particulière que l'on détecte.**

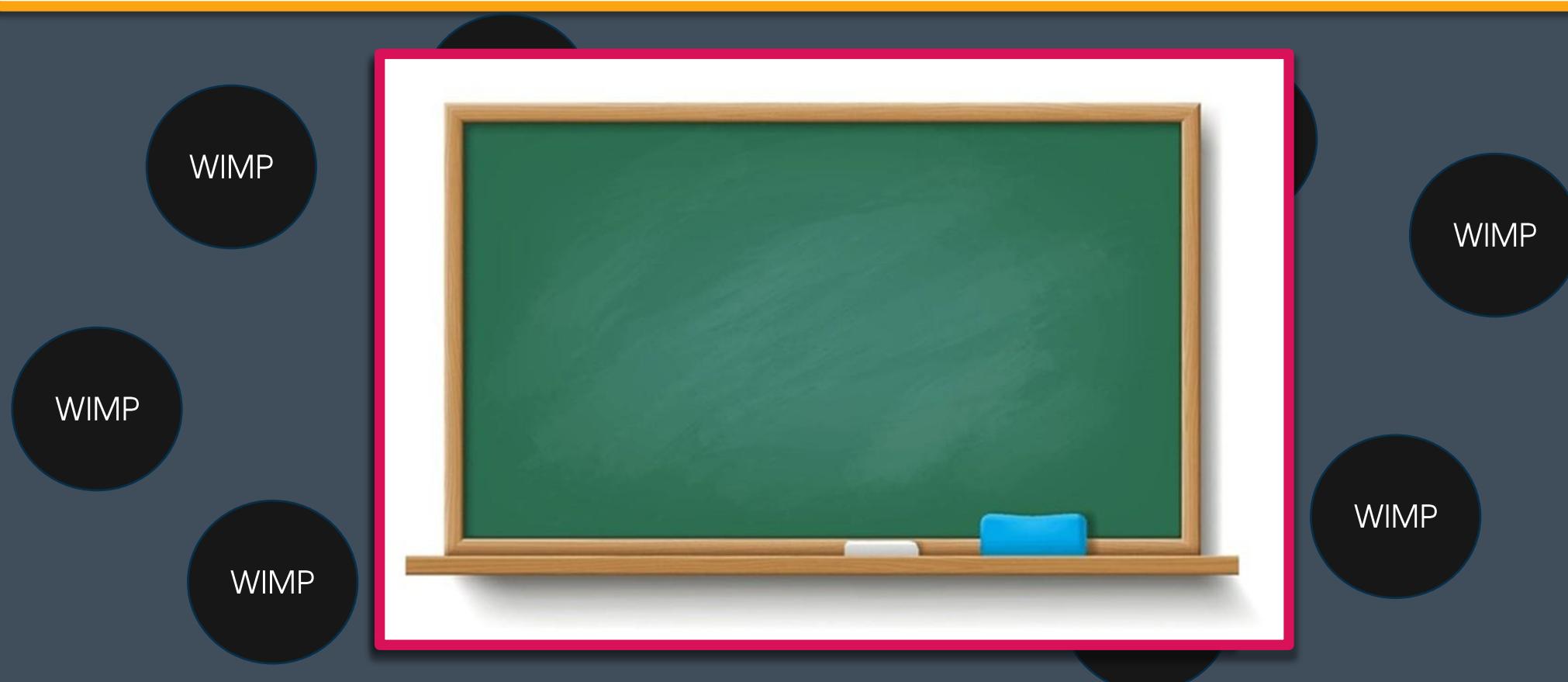
Détection indirecte

Exemple: capture de WIMPs par le soleil



Capture de WIMPs par le soleil

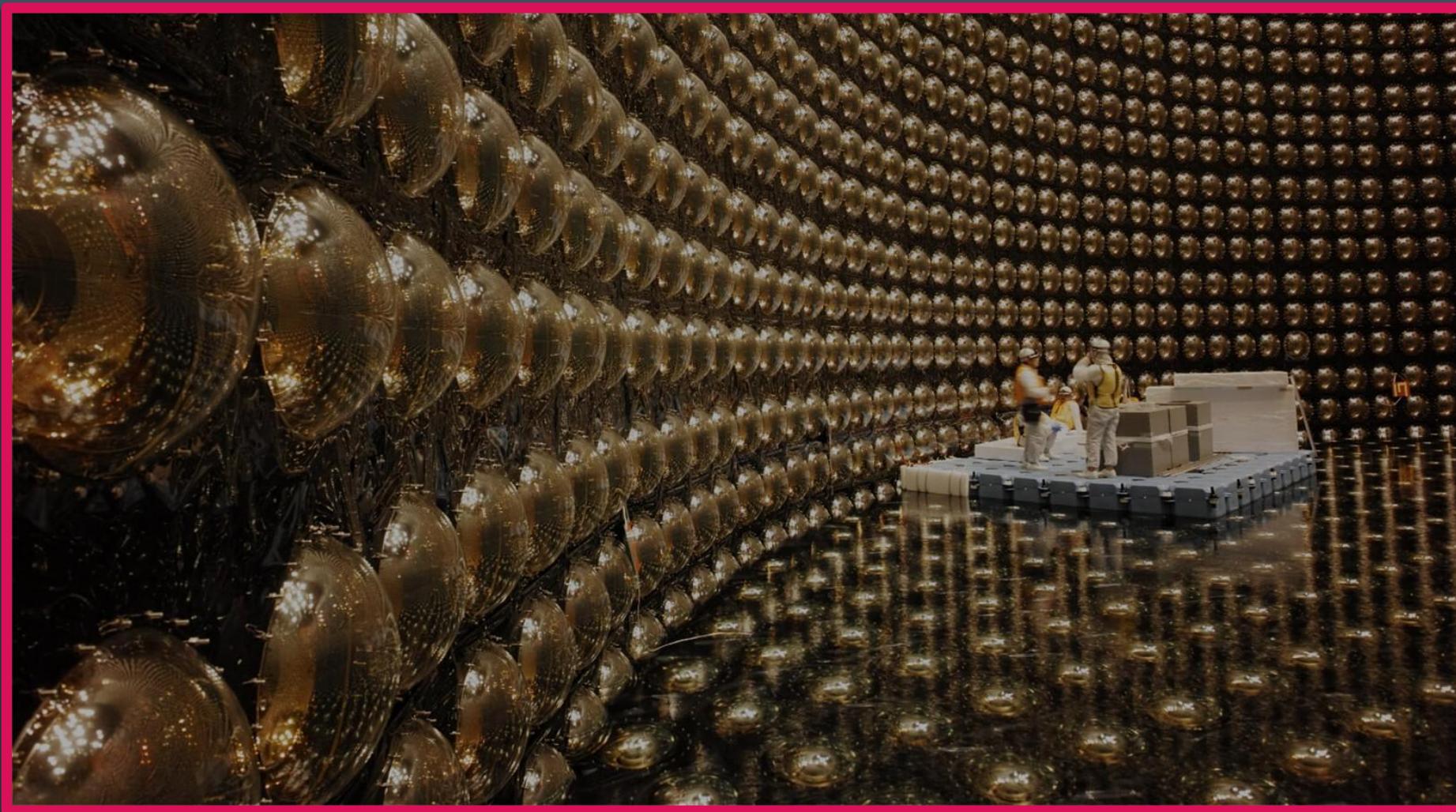
Exemple: capture de WIMPs par le soleil



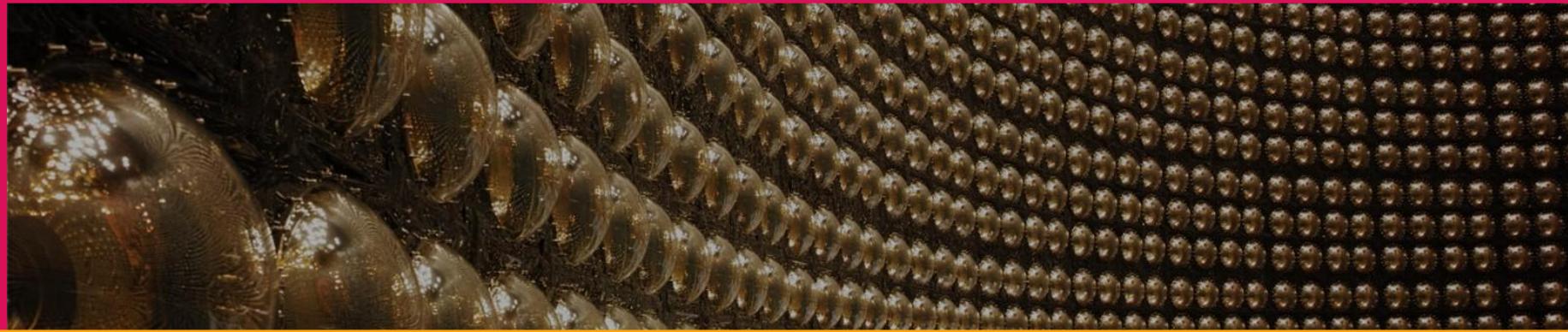
Capture de WIMPs par le soleil

- Le soleil capture des WIMPs, qui s'accumulent en son cœur.
- Ces WIMPs finissent par interagir les uns avec les autres, émettant des neutrinos de haute énergie.
- **Trace particulière:** excès de neutrinos de haute énergie ET venant du soleil.

Super-Kamiokande (depuis 1996)



Super-Kamiokande



Détecteur de neutrinos



Super-Kamiokande



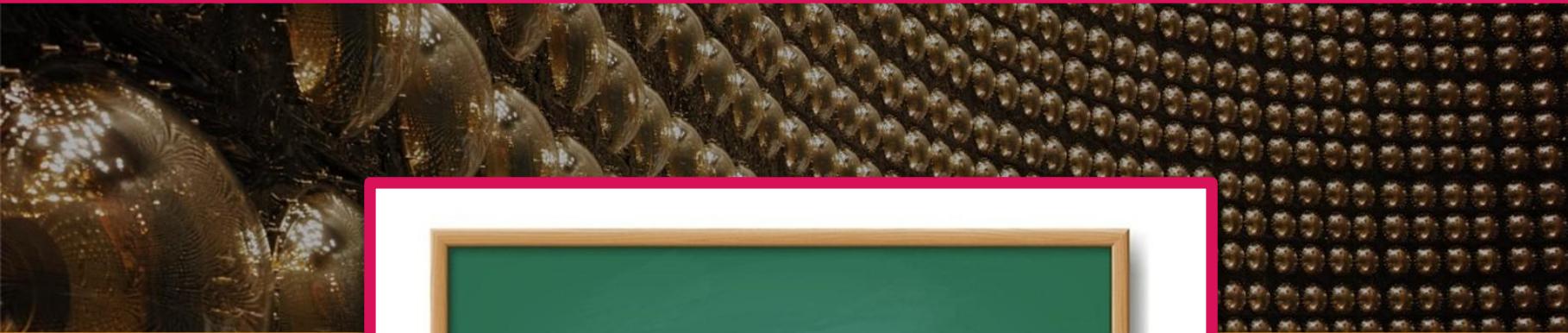
Détec



utrinos



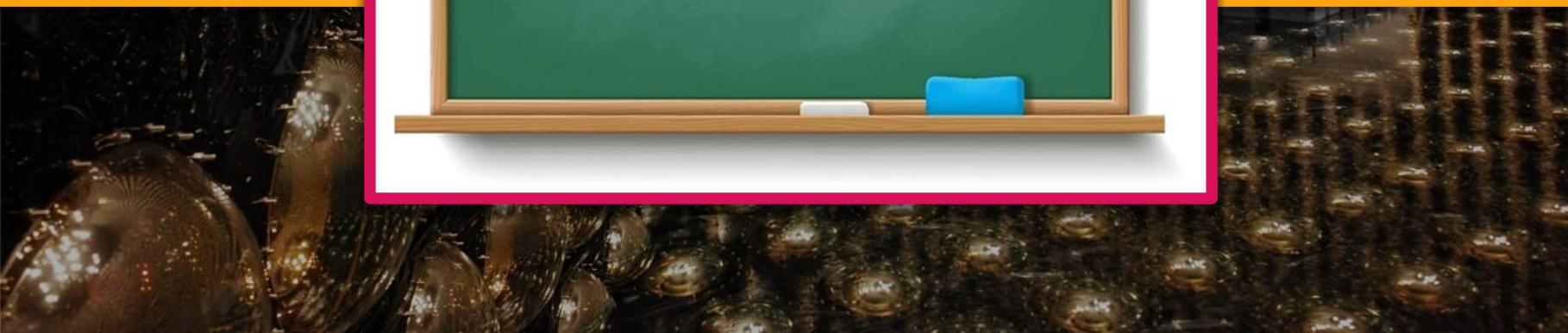
Super-Kamiokande



Déte



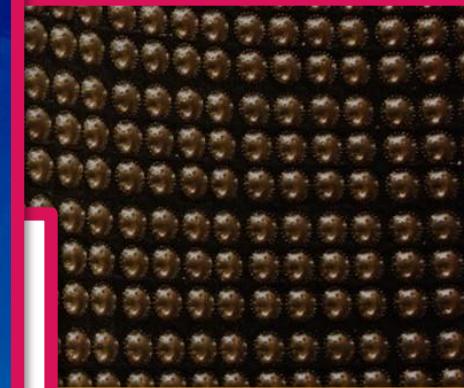
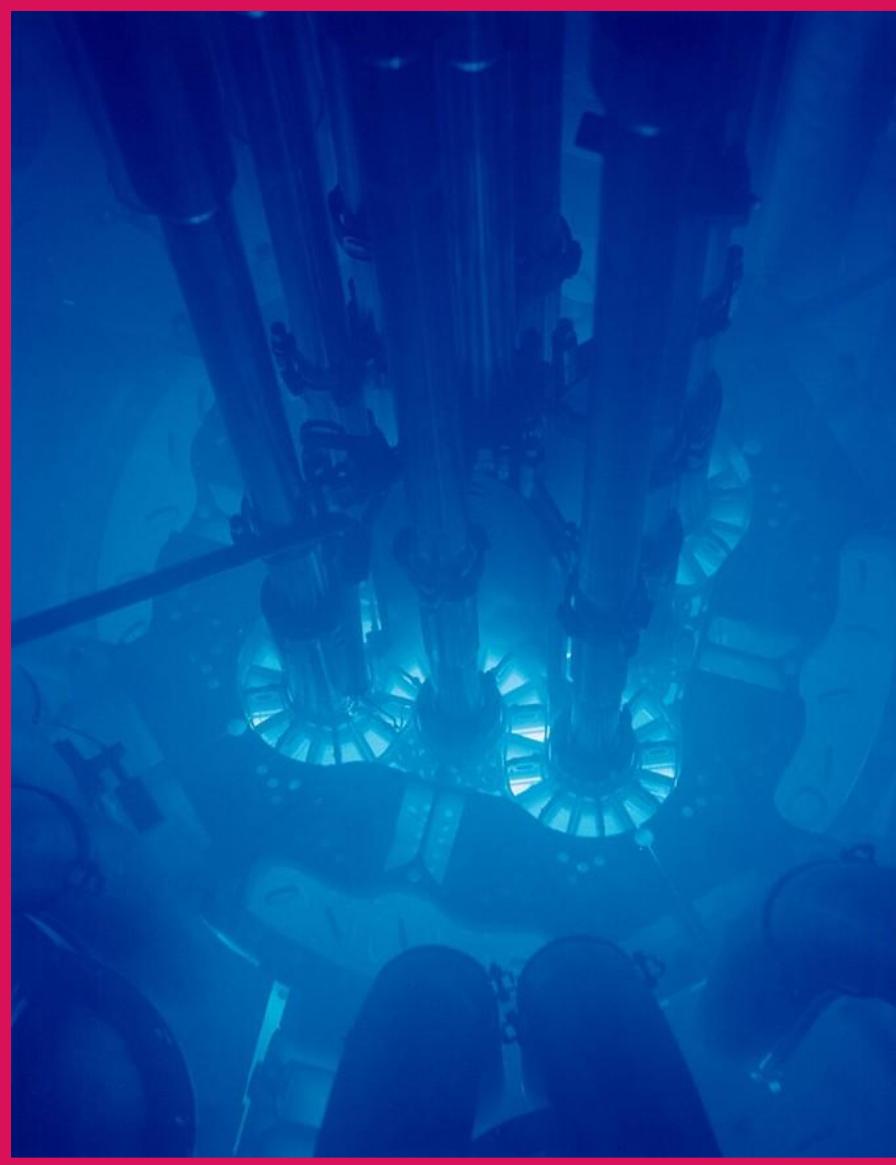
rinos



Super-Kamiokande



Détecteur



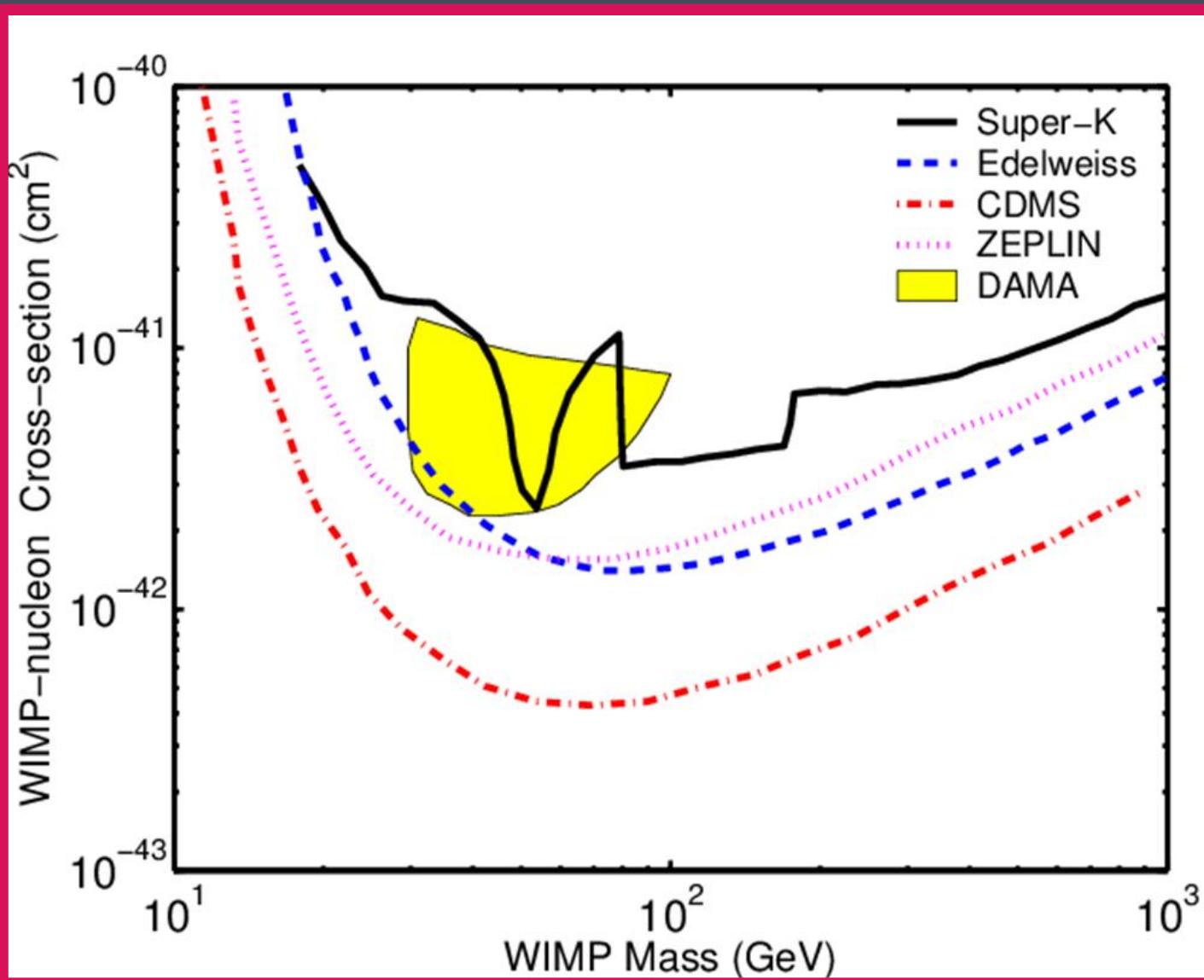
neutrinos



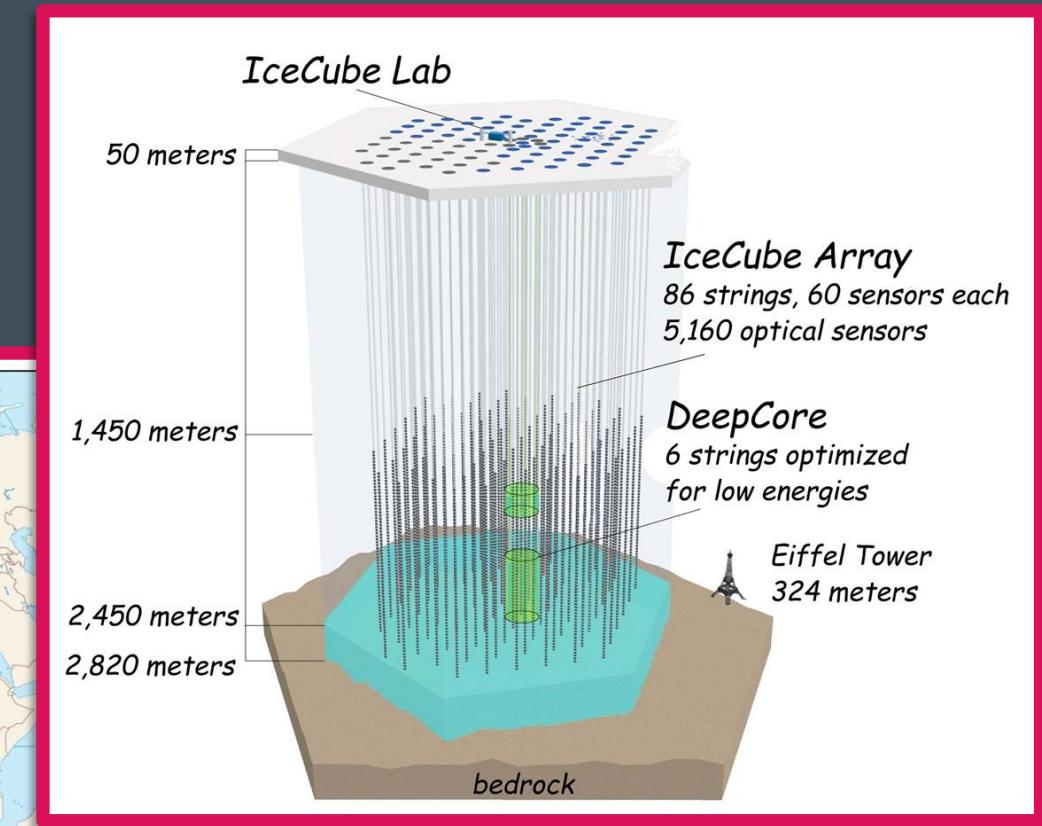
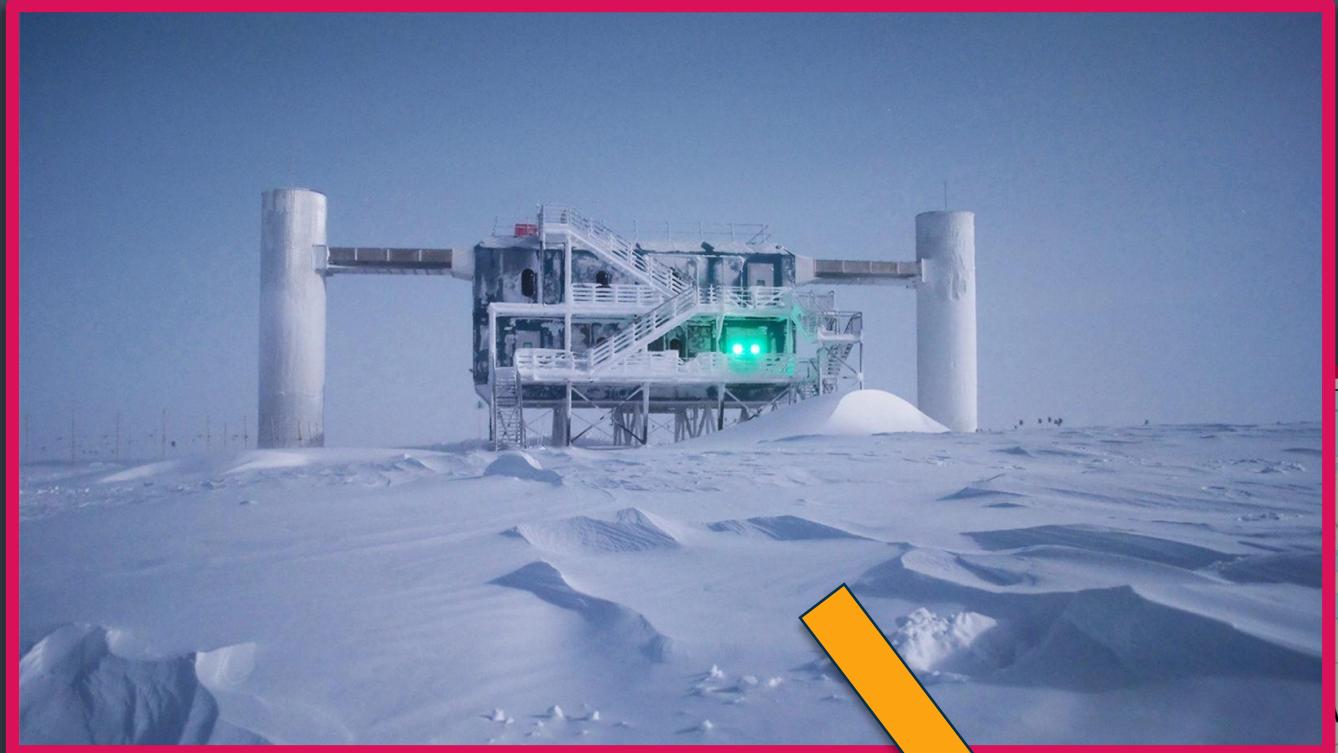
Super-Kamiokande

On y a vu de nombreux neutrinos. Mais pas de trace de la matière noire.

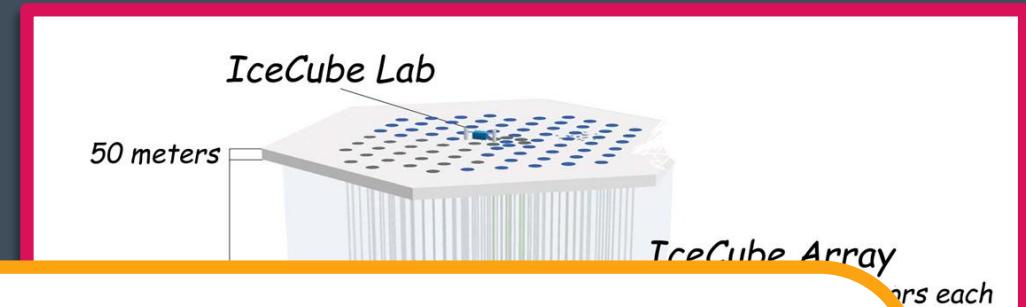
Super-Kamiokande



IceCube



IceCube



L'ULB participe à
IceCube!



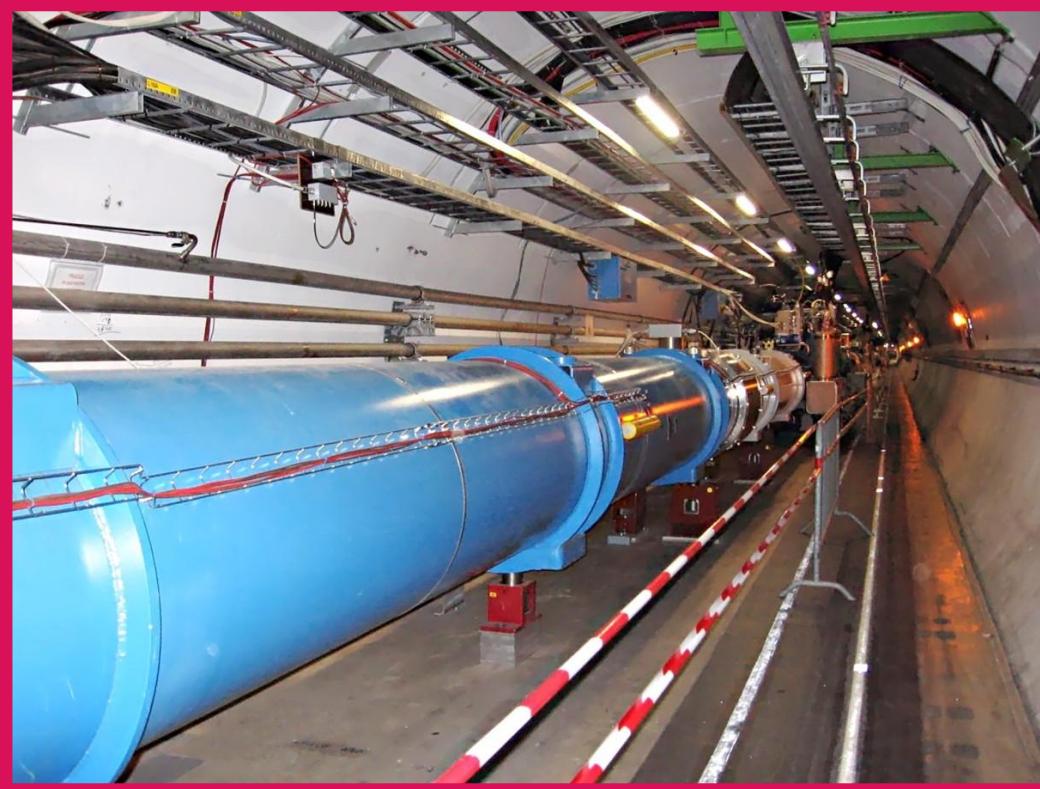
Détection aux collisionneurs

Détection aux collisionneurs

La matière noire est produite en
collisionnant des particules du
modèle standard

Détection aux collisionneurs

Exemple: le grand collisionneur de hadrons (LHC) (depuis 2010)



27km de circonférence !

Grand collisionneurs de hadrons

- On accélère des protons à très grande vitesse.
- On les fait se撞ionner.
- $E = mc^2$: la masse est une forme d'énergie. On convertit de l'énergie cinétique en énergie de masse.
- On crée (beaucoup) de particules !

Grand collisionneurs de hadrons

Comment accélère-t-on les protons?

Grand collisionneurs de hadrons

Comment accélère-t-on les protons?

Avec des aimants (très) puissants...

Grand collisionneurs de hadrons

Force de Lorentz: $F = qvB$

Loi de Newton: $F = ma$

Accélération centrifuge: $a = v^2/R$

Grand collisionneurs de hadrons

Force de Lorentz: $F = qvB$

Loi de Newton: $F = ma$

Accélération centrifuge: $a = \gamma v^2/R$

Correction relativiste: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$

Grand collisionneurs de hadrons

Acc

Co



$$\sigma^2 / R$$

$$\sigma^2 / c^2$$

Grand collisionneurs de hadrons

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$B = 8 \text{ T}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$R = 5 \text{ km}$$

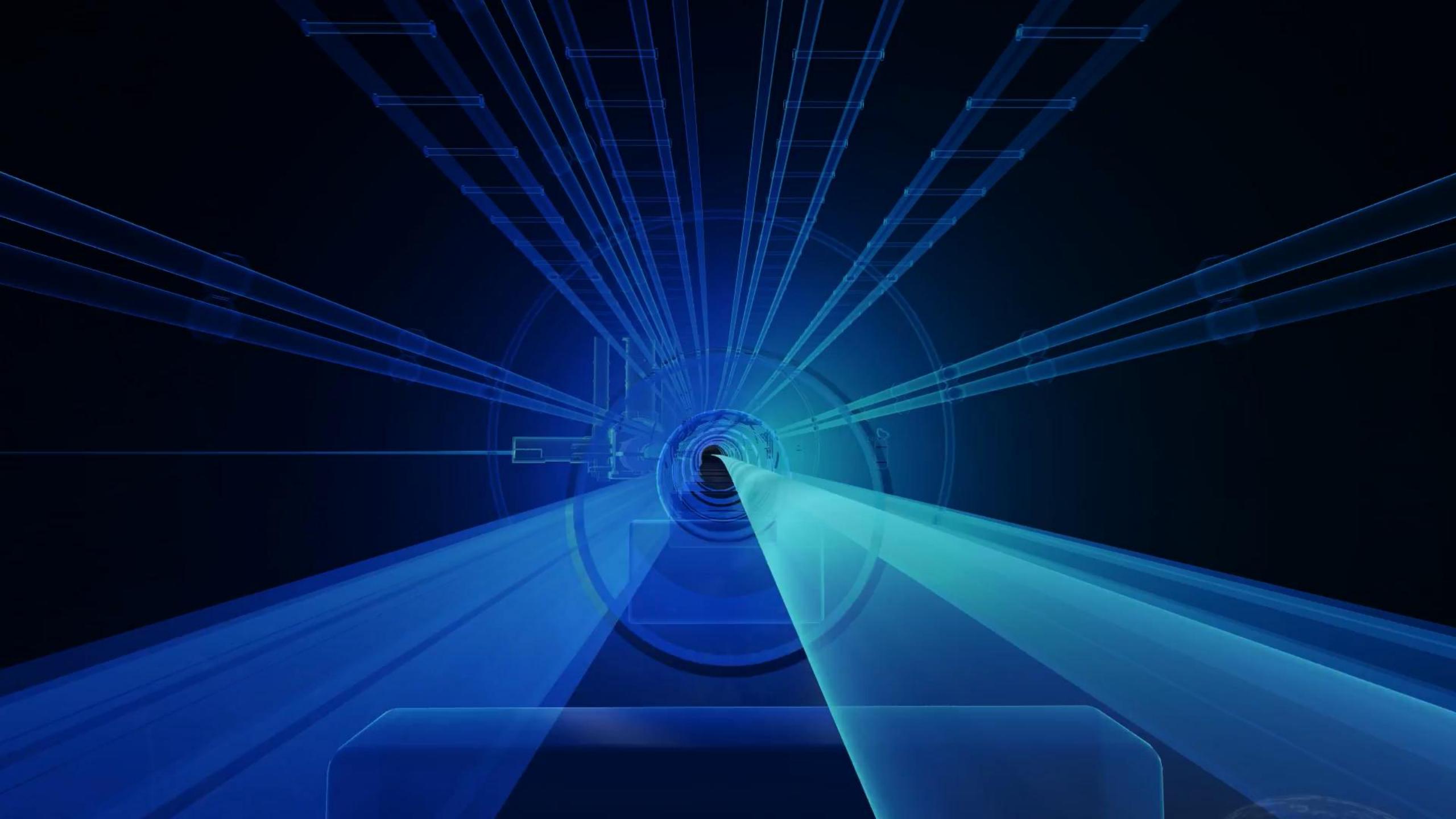
Grand collisionneurs de hadrons

$$v = 0.99999999 \times c$$

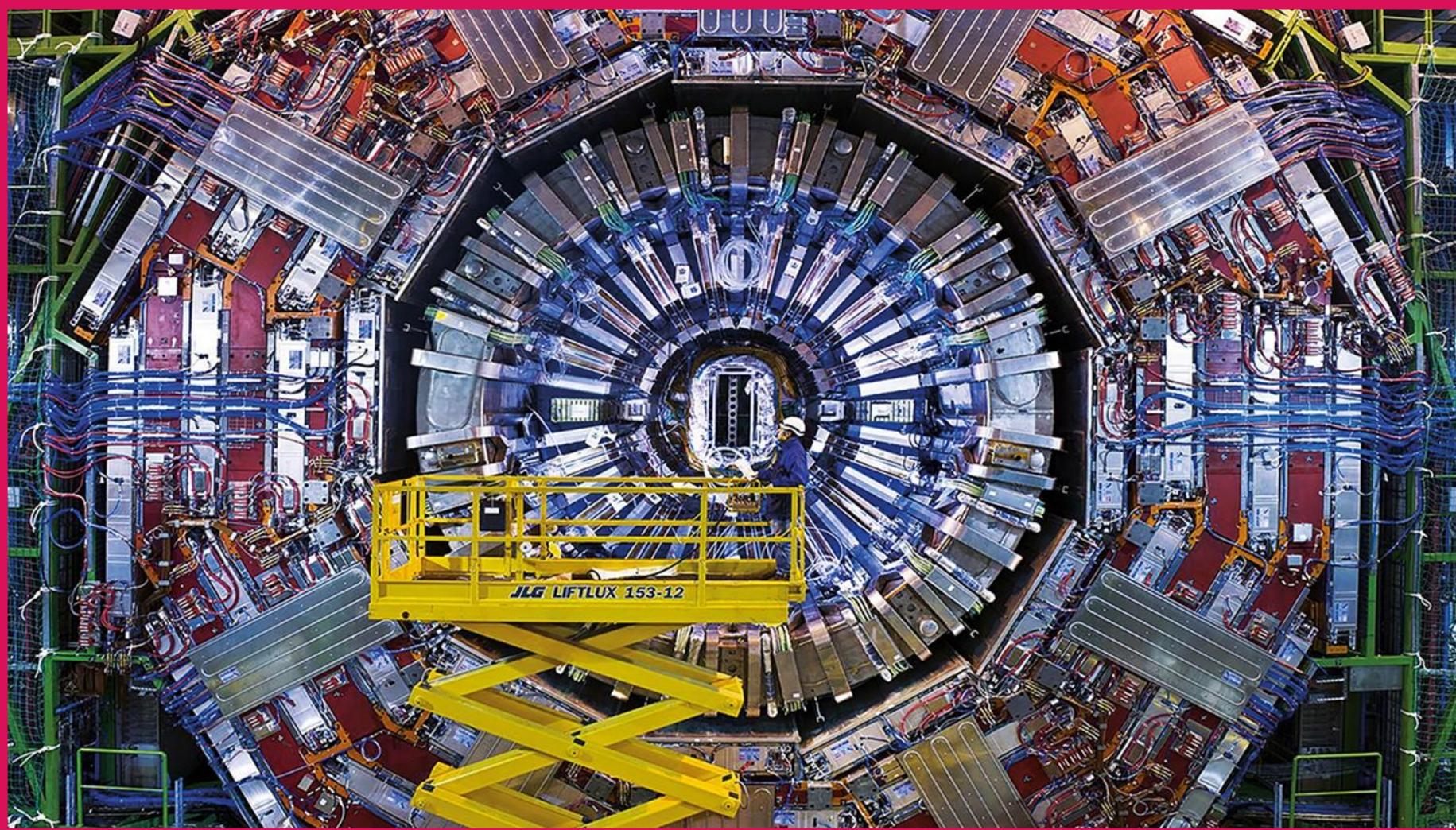
Magnet frigo: ~ 0.001 T

Aimants du LHC: ~ 8 T

Boucle de 27km: 11000 fois par seconde.



Détecteur CMS



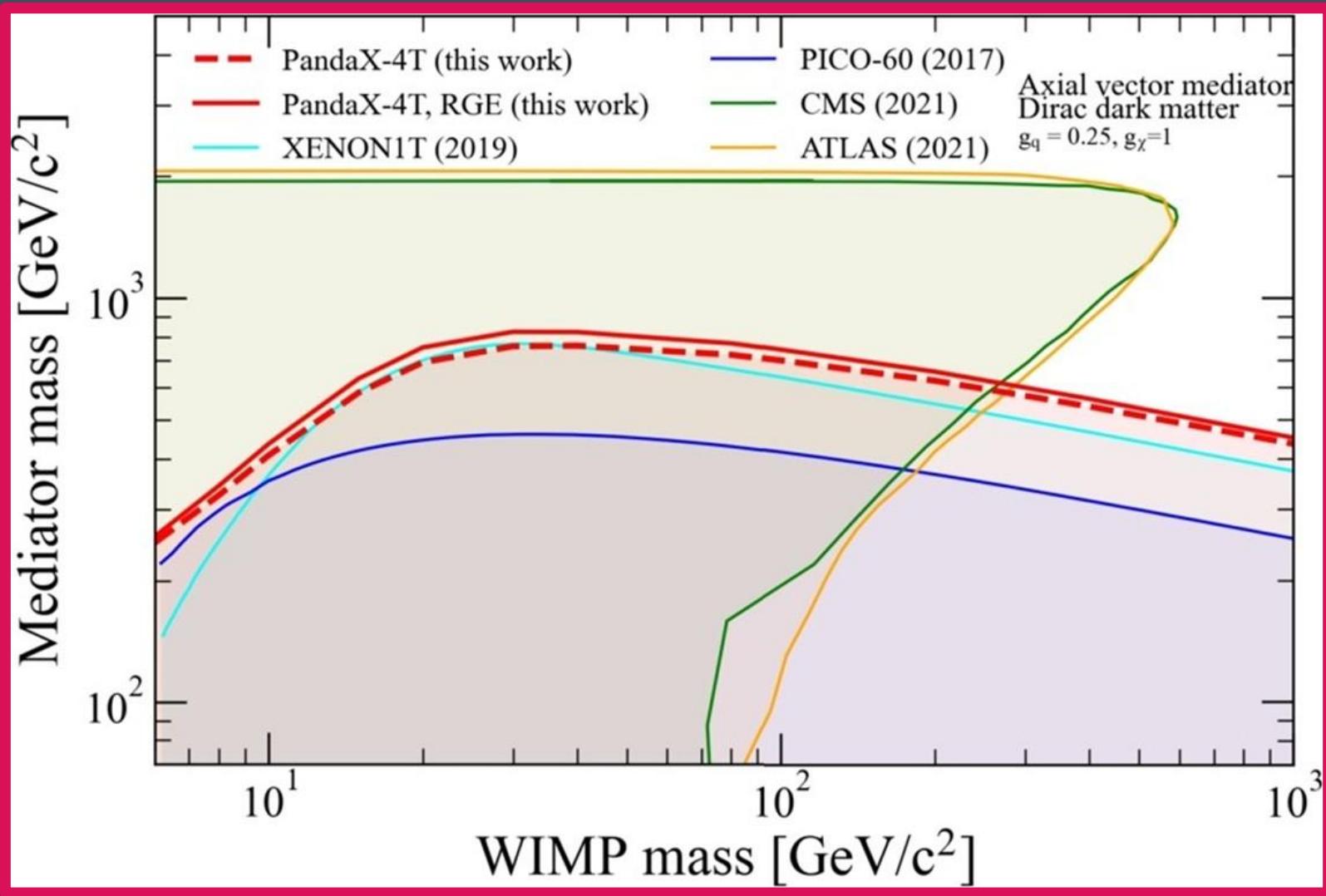
Détecteur CMS

Conservation de
l'énergie !

Détecteur CMS

On ne détecte pas de
manque d'énergie...

Contraintes



Les simulations cosmologiques

Tests de la matière
noire, mais pas que.

Tests de notre modèle
de l'Univers en
général...

Les simulations cosmologiques

Quelles sont les équations qui décrivent l'évolution de l'Univers à grande échelle ?

Equations of Cosmological Hydrodynamics

Multispecies gas dynamics

Mass cons:

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_b \vec{v}_b) + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho_b = 0,$$

Mom cons:

$$\frac{\partial(\rho_b v_{b,i})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho_b v_{b,i}) \vec{v}_b] + 5 \frac{\dot{a}}{a} \rho_b v_{b,i} = -\frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\rho_b}{a^2} \frac{\partial \phi}{\partial x_i},$$

Energy cons:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (e \vec{v}_b) + p \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_b + 3 \frac{\dot{a}}{a} (e + p) = \Gamma - \dot{E},$$

Species cons:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_i \vec{v}_b) + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho_i = \pm \sum_j \sum_l k_{jl}(T) \rho_j \rho_l \pm \sum_j I_j \rho_j,$$

2-body reactions photo-dissoc./ionization

Dark matter dynamics

Newton's law:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{x}_d}{dt} &= \vec{v}_d, \\ \frac{d\vec{v}_d}{dt} &= -2 \frac{\dot{a}}{a} \vec{v}_d - \frac{1}{a^2} \vec{\nabla} \phi. \end{aligned}$$

Poisson eq. $\nabla^2 \phi = 4\pi G a^2 (\rho - \bar{\rho}),$

Metric

$$\frac{da}{dt} = H_0 \left[\Omega_M \left(\frac{1}{a} - 1 \right) + \Omega_\Lambda (a^2 - 1) + 1 \right]^{1/2}$$

Friedmann eq. for scale factor a(t)

Equations of Cosmological Hydrodynamics

Multispecies gas dynamics

Mass cons:

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_b \vec{v}_b) + 3\frac{\dot{a}}{a}\rho_b = 0,$$

Mom cons:

$$\frac{\partial(\rho_b v_{b,i})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho_b v_{b,i}) \vec{v}_b] + 5\frac{\dot{a}}{a}\rho_b v_{b,i} = -\frac{1}{2}\frac{\partial p}{\partial \phi} - \frac{\rho_b}{2}\frac{\partial \phi}{\partial a},$$

Dans un (très gros) ordi
(> 10 000 CPU)

Dark matter dynamics

Newton's law:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{x}_d}{dt} &= \vec{v}_d, \\ \frac{d\vec{v}_d}{dt} &= -2\frac{\dot{a}}{a}\vec{v}_d - \frac{1}{a^2}\vec{\nabla}\phi. \end{aligned}$$

Poisson eq. $\nabla^2\phi = 4\pi G a^2 (\rho - \bar{\rho}),$

metric

$$\frac{da}{dt} = H_0 \left[\Omega_M \left(\frac{1}{a} - 1 \right) + \Omega_\Lambda (a^2 - 1) + 1 \right]^{1/2}$$

Friedmann eq. for scale factor a(t)

Equations of Cosmological Hydrodynamics

Multispecies gas dynamics

Mass cons:

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_b \vec{v}_b) + 3\frac{\dot{a}}{a}\rho_b = 0,$$

Mom cons:

$$\frac{\partial(\rho_b v_{b,i})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho_b v_{b,i}) \vec{v}_b] + 5\frac{\dot{a}}{a}\rho_b v_{b,i} = -\frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\rho_b}{a^2} \frac{\partial \phi}{\partial x_i},$$

Energy cons:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (e \vec{v}_b) + p \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_b + 3\frac{\dot{a}}{a}(e + p) = \Gamma - \dot{E},$$

Species cons:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_i \vec{v}_i) + \dot{a} \frac{\partial \rho_i}{\partial a} = -\sum \sum L_{ij} / (T_j) - \dot{\Sigma} L_i$$

Décrivent l'évolution entre un temps A et un temps B

$$at \quad a \quad a^a$$

Poisson eq. $\nabla^2 \phi = 4\pi G a^2 (\rho - \bar{\rho}),$

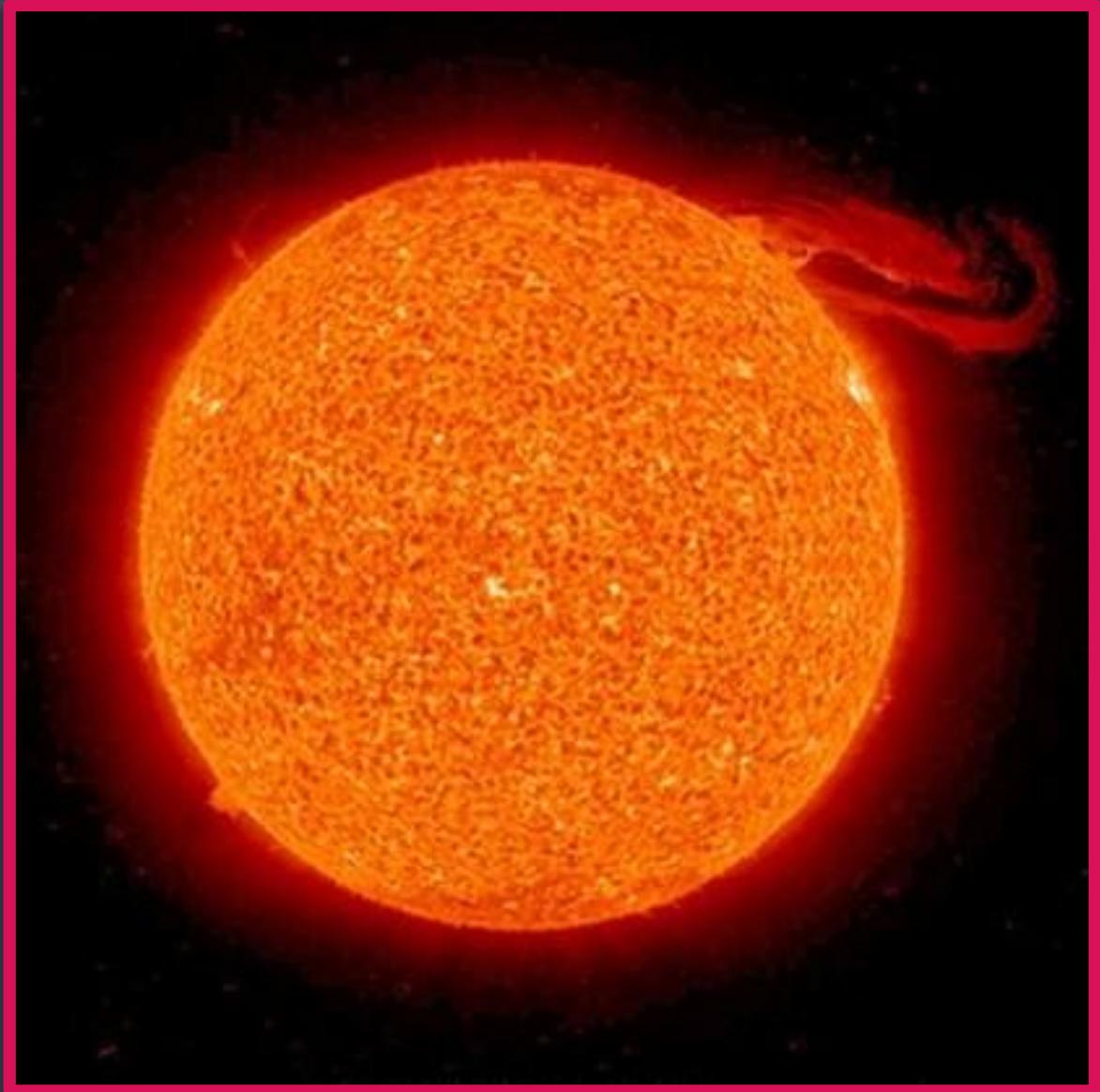
Friedmann eq. for scale factor a(t)

Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui

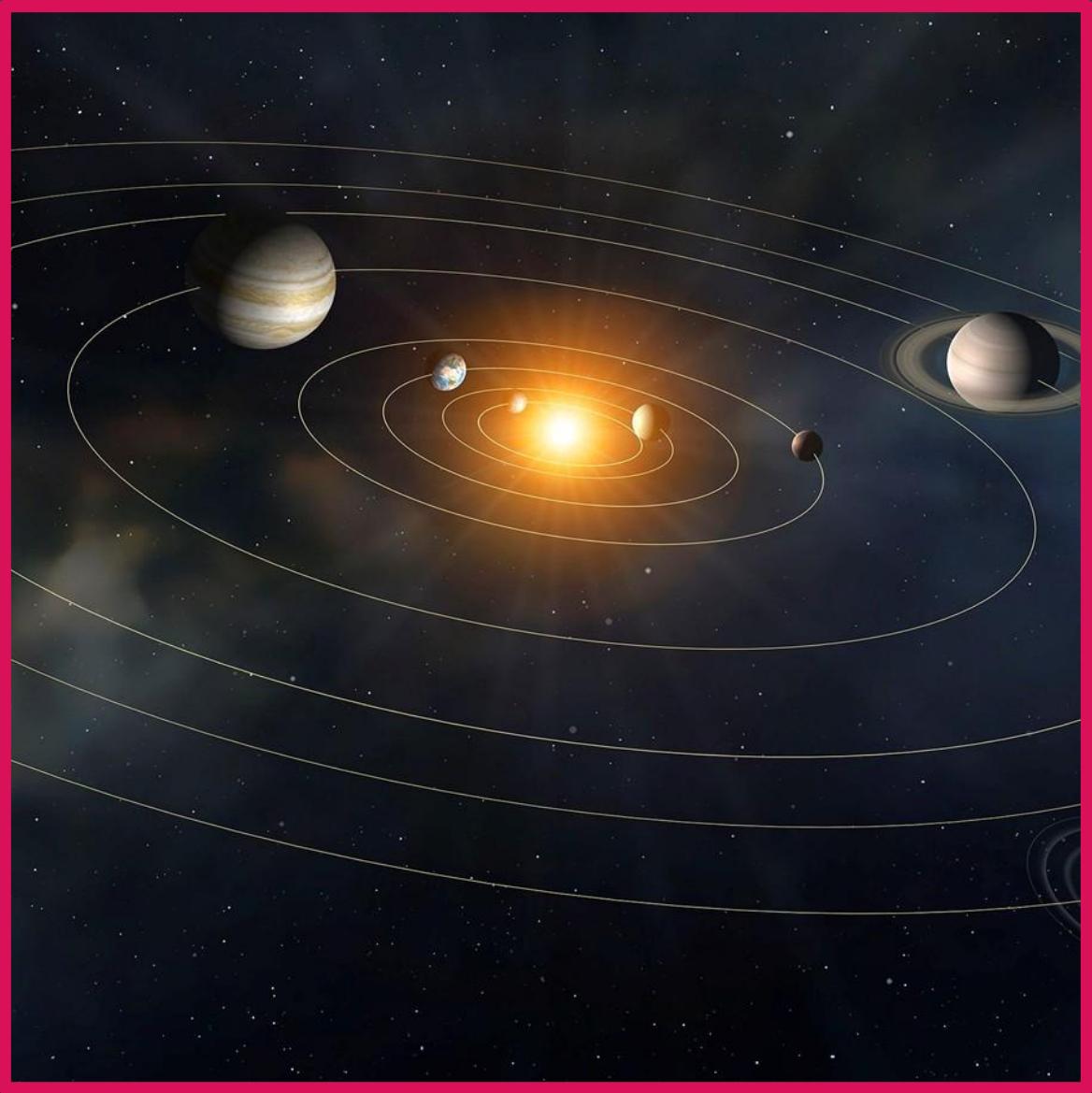
Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui



Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui



Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui



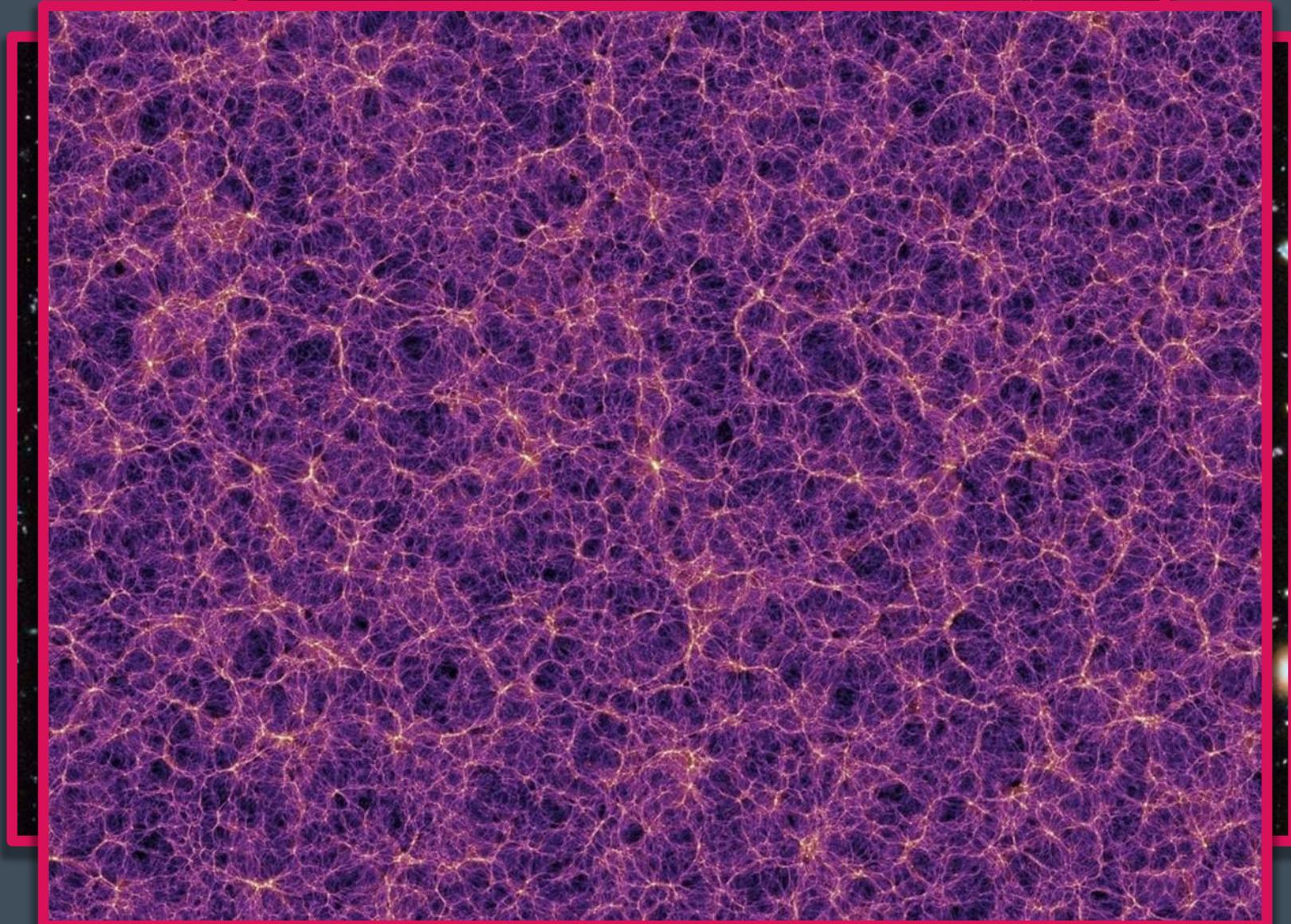
Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui



Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui

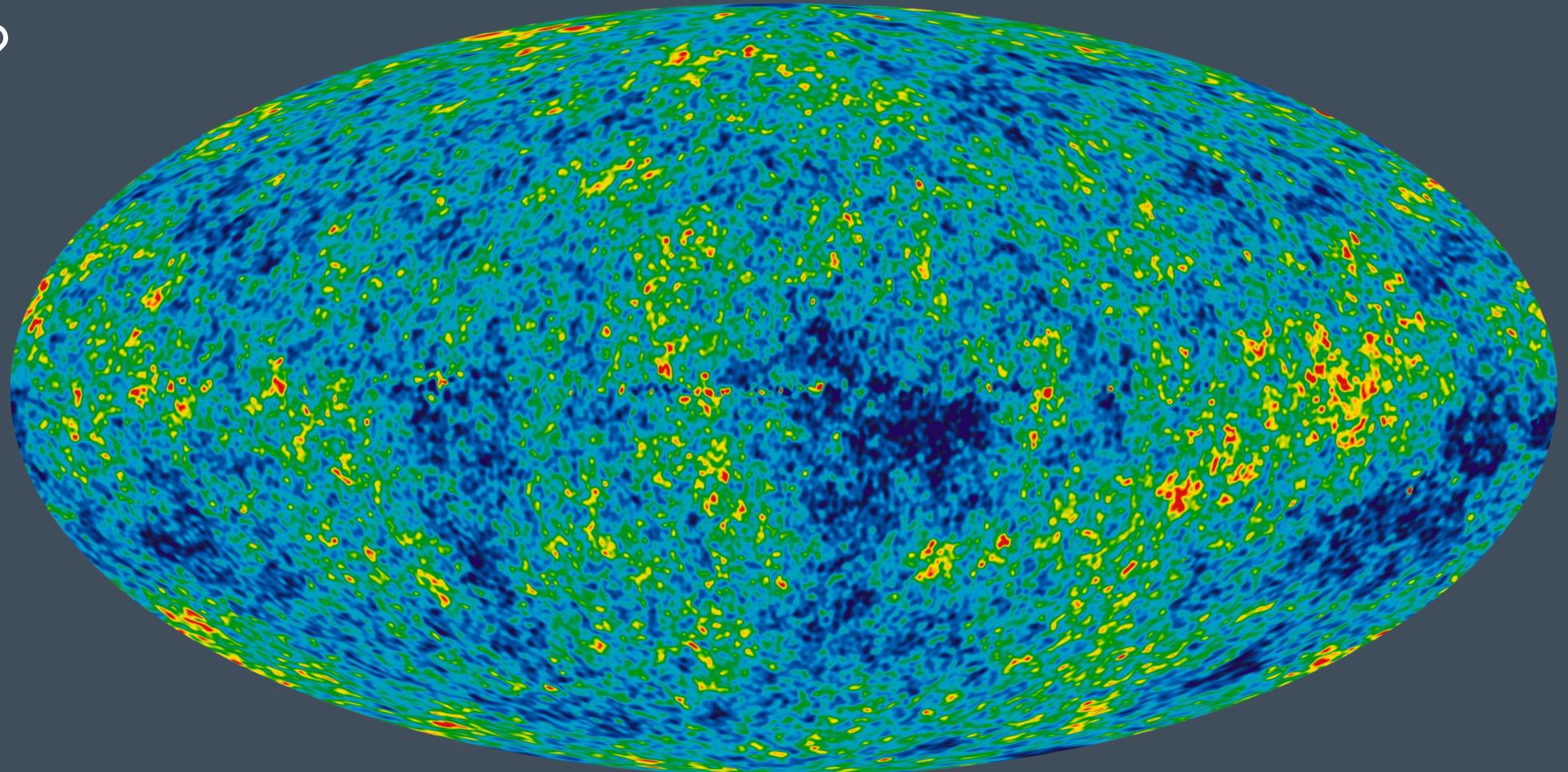


Les simulations cosmologiques

Temps A: ?

Les simulations cosmologiques

Temps A: ?



380 000 ans après le Big Bang

Les simulations cosmologiques

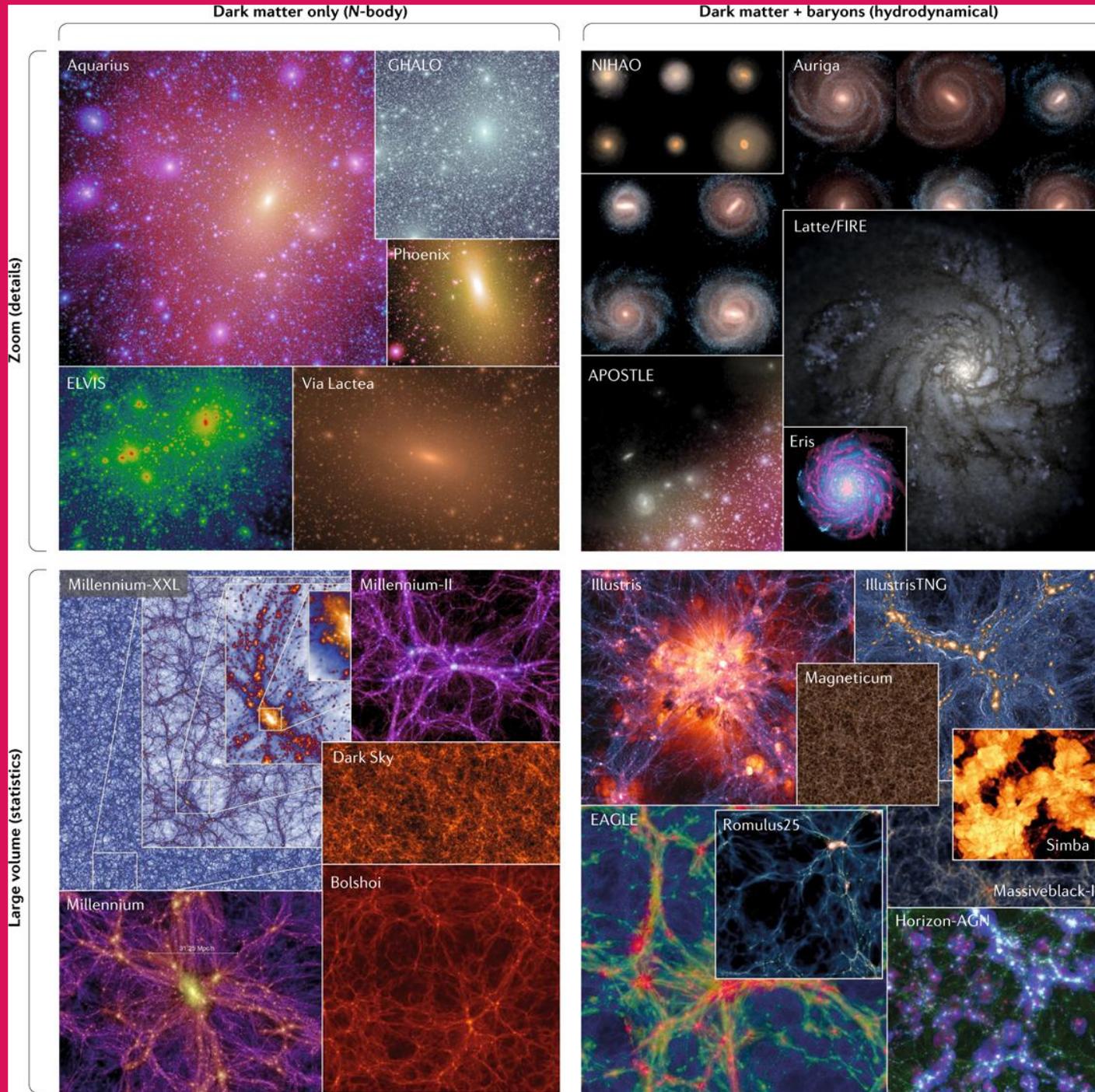
Temps A: ?

Nous donne les conditions initiales !

380 000 ans après le Big Bang

Les si

iques



Equations of Cosmological Hydrodynamics

Multispecies gas dynamics

Mass cons:

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_b \vec{v}_b) + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho_b = 0,$$

Mom cons:

$$\frac{\partial(\rho_b v_{b,i})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\rho_b v_{b,i}) \vec{v}_b] + 5 \frac{\dot{a}}{a} \rho_b v_{b,i} = -\frac{1}{a^2} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\rho_b}{a^2} \frac{\partial \phi}{\partial x_i},$$

Energy cons:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (e \vec{v}_b) + p \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_b + 3 \frac{\dot{a}}{a} (e + p) = \Gamma - \dot{E},$$

Species cons:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_i \vec{v}_b) + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho_i = \pm \sum_j \sum_l k_{jl}(T) \rho_j \rho_l \pm \sum_j I_j \rho_j,$$

2-body reactions photo-dissoc./ionization

Dark matter dynamics

Newton's law:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{x}_d}{dt} &= \vec{v}_d, \\ \frac{d\vec{v}_d}{dt} &= -2 \frac{\dot{a}}{a} \vec{v}_d - \frac{1}{a^2} \vec{\nabla} \phi. \end{aligned}$$

Poisson eq. $\nabla^2 \phi = 4\pi G a^2 (\rho - \bar{\rho}),$

Metric

$$\frac{da}{dt} = H_0 \left[\Omega_M \left(\frac{1}{a} - 1 \right) + \Omega_\Lambda (a^2 - 1) + 1 \right]^{1/2}$$

Friedmann eq. for scale factor $a(t)$

Multispecies gas dynamics

Mass cons:

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_b \vec{v}_b) + 3\frac{\dot{a}}{a} \rho_b = 0.$$

Progression sur des années ! (premières il y a plus de 50 ans)

law:

$$\frac{d\vec{v}_d}{dt} = -2\frac{\dot{a}}{a}\vec{v}_d - \frac{1}{a^2}\vec{\nabla}\phi.$$

Poisson eq.

$$\nabla^2\phi = 4\pi G a^2 (\rho - \bar{\rho}),$$

at

L

a

J

Friedmann eq. for scale factor a(t)

La matière noire dans tout ça ?

La matière noire dans tout ça ?

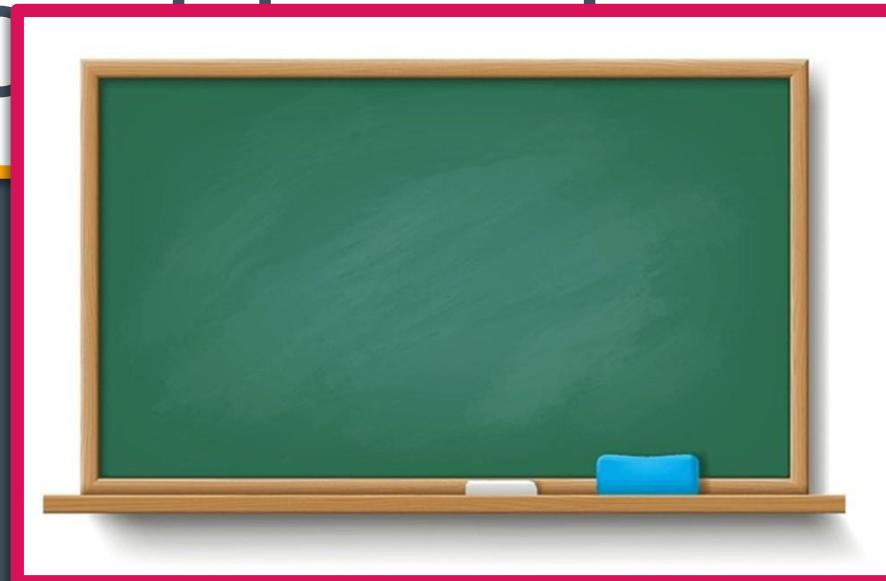
La matière noire ‘dirige’ la formation des grandes structures ! (car elle fait la plupart de la masse)

La matière noire dans tout ça ?

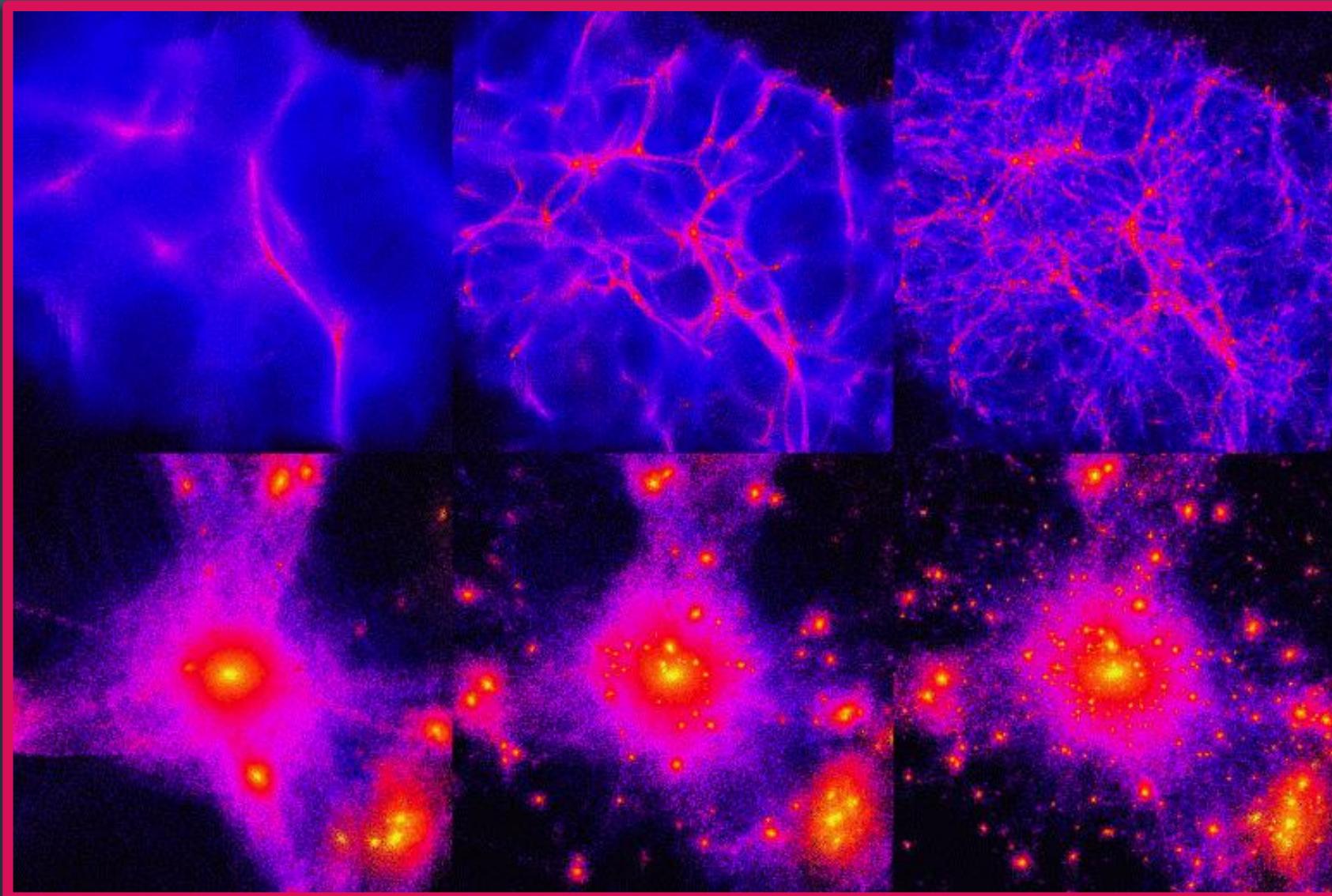
Selon sa masse, la matière noire créé plus ou moins de petites structures

La matière noire dans tout ça ?

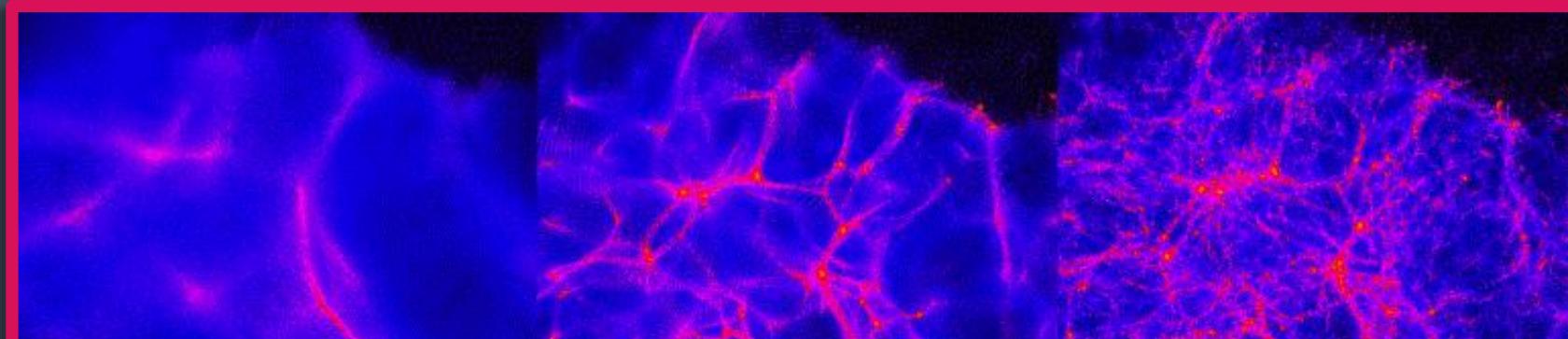
Selon sa masse, la matière noire créé plus ou moins de p... tures



La matière noire dans tout ça ?



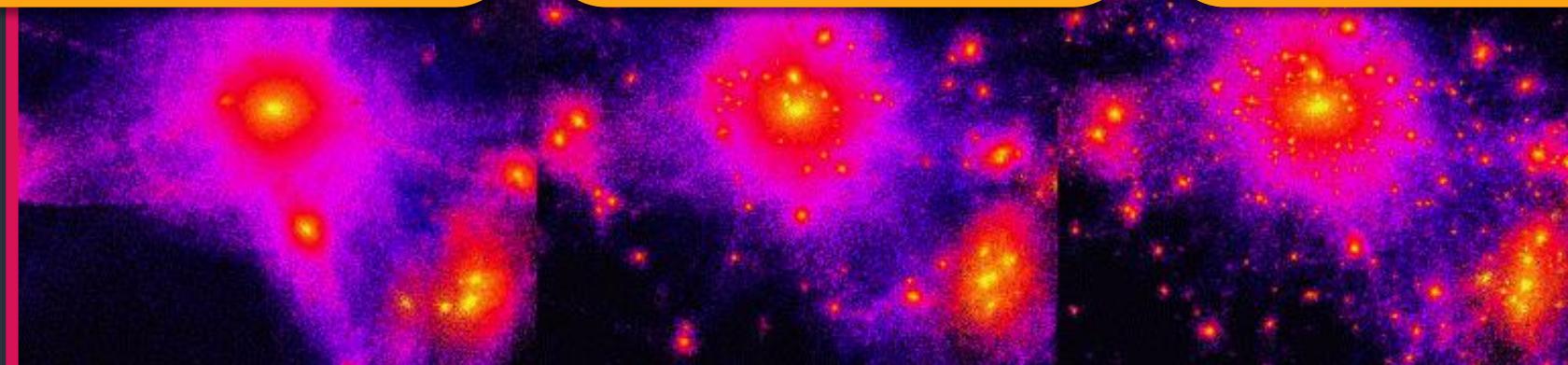
La matière noire dans tout ça ?



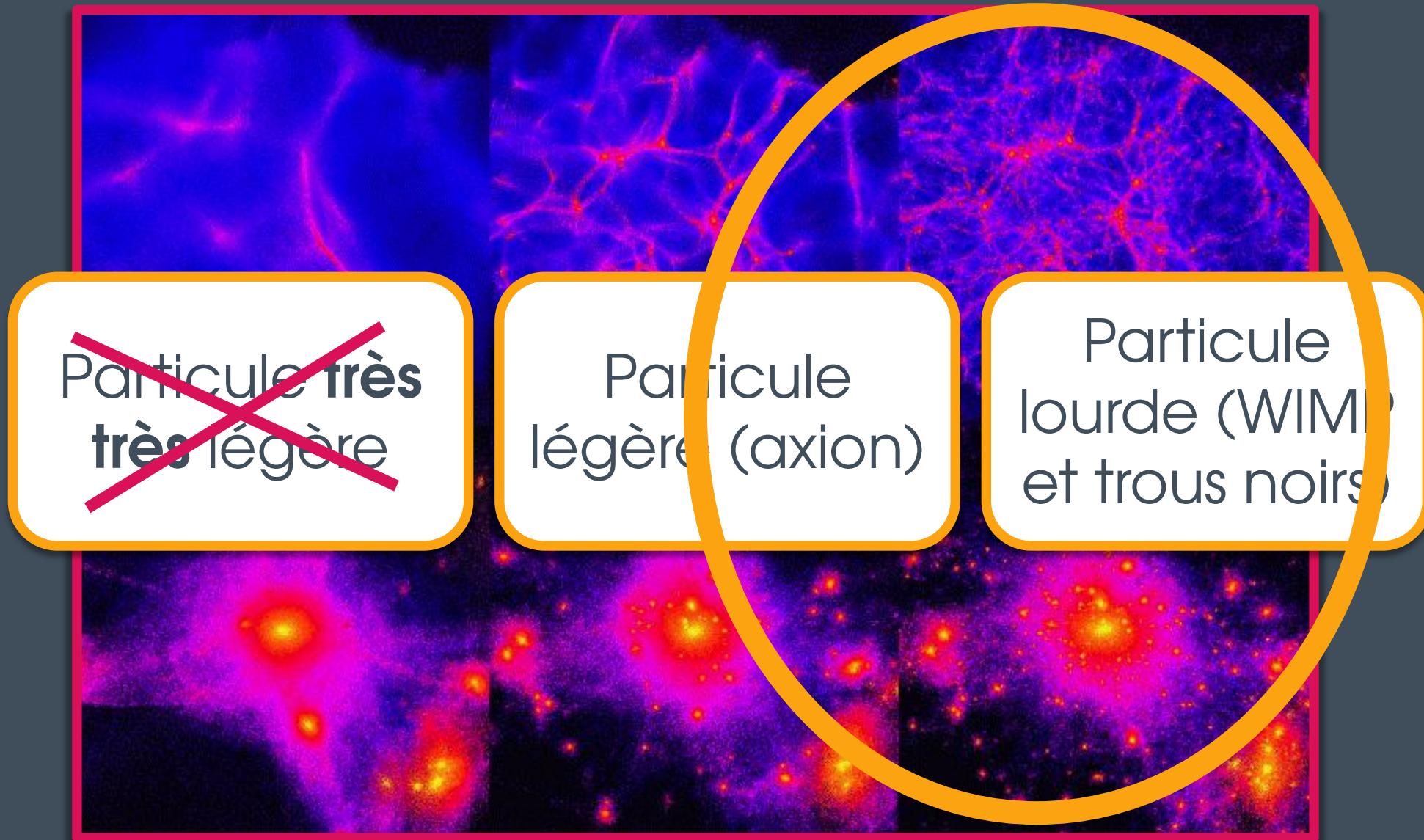
Particule **très
très** légère

Particule
légère (axion)

Particule
lourde (WIMP
et trous noirs)



La matière noire dans tout ça ?



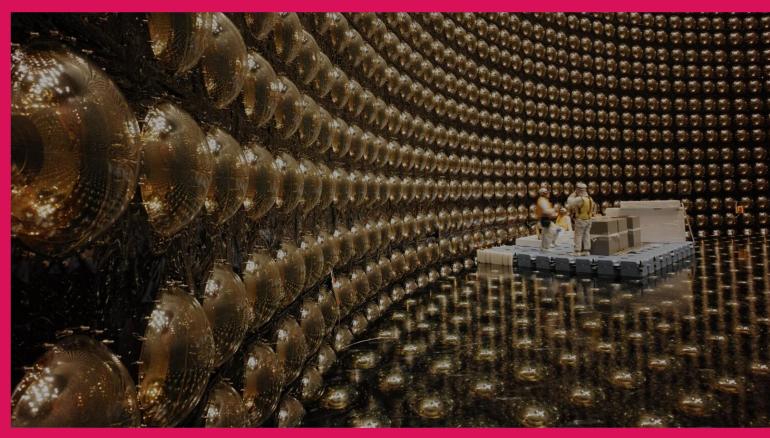
Conclusions

Conclusions

- L'étude repose sur une avancée à deux tableaux: des calculs théoriques qui permettent des prédictions, et des expériences pour les tester.

Conclusions

- L'étude repose sur une avancée à deux tableaux: des calculs théoriques qui permettent des prédictions, et des expériences pour les tester.
- Pour la matière noire particule: trois types d'expériences: détection directe, détection indirecte, et collisionneurs. On a rien vu !

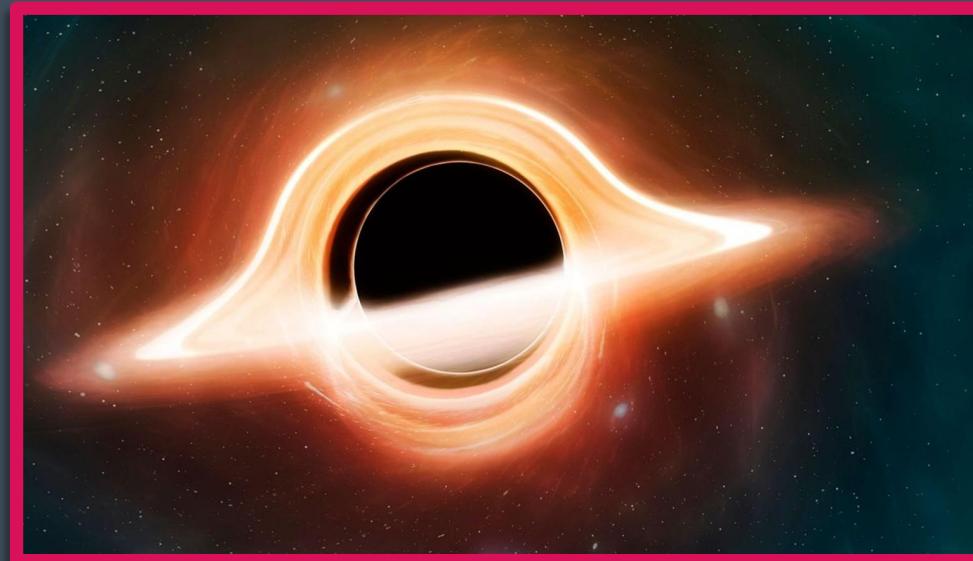


Conclusions

- L'étude repose sur une avancée à deux tableaux: des calculs théoriques qui permettent des prédictions, et des expériences pour les tester.
- Pour la matière noire particule: trois types d'expériences: détection directe, détection indirecte, et collisionneurs. On a rien vu !
- Les simulations cosmologiques nous donnent des informations intéressantes en plus sur la matière noire (mais pas que). Mais il y a encore du progrès à faire dans ce domaine...

Questions en suspens

- Que sont et comment teste-t-on les trous noirs primordiaux ?
- La matière noire aux petites échelles... la comprend on vraiment ?
- Mon domaine d'expertise ☺☺☺



Questions en suspens

- Que sont et comment teste-t-on les trous noirs primordiaux ?
- La matière noire aux petites échelles... la comprend on vraiment ?
- Mon domaine d'expertise ☺☺☺

A la semaine
prochaine...

