

Leçon 3:

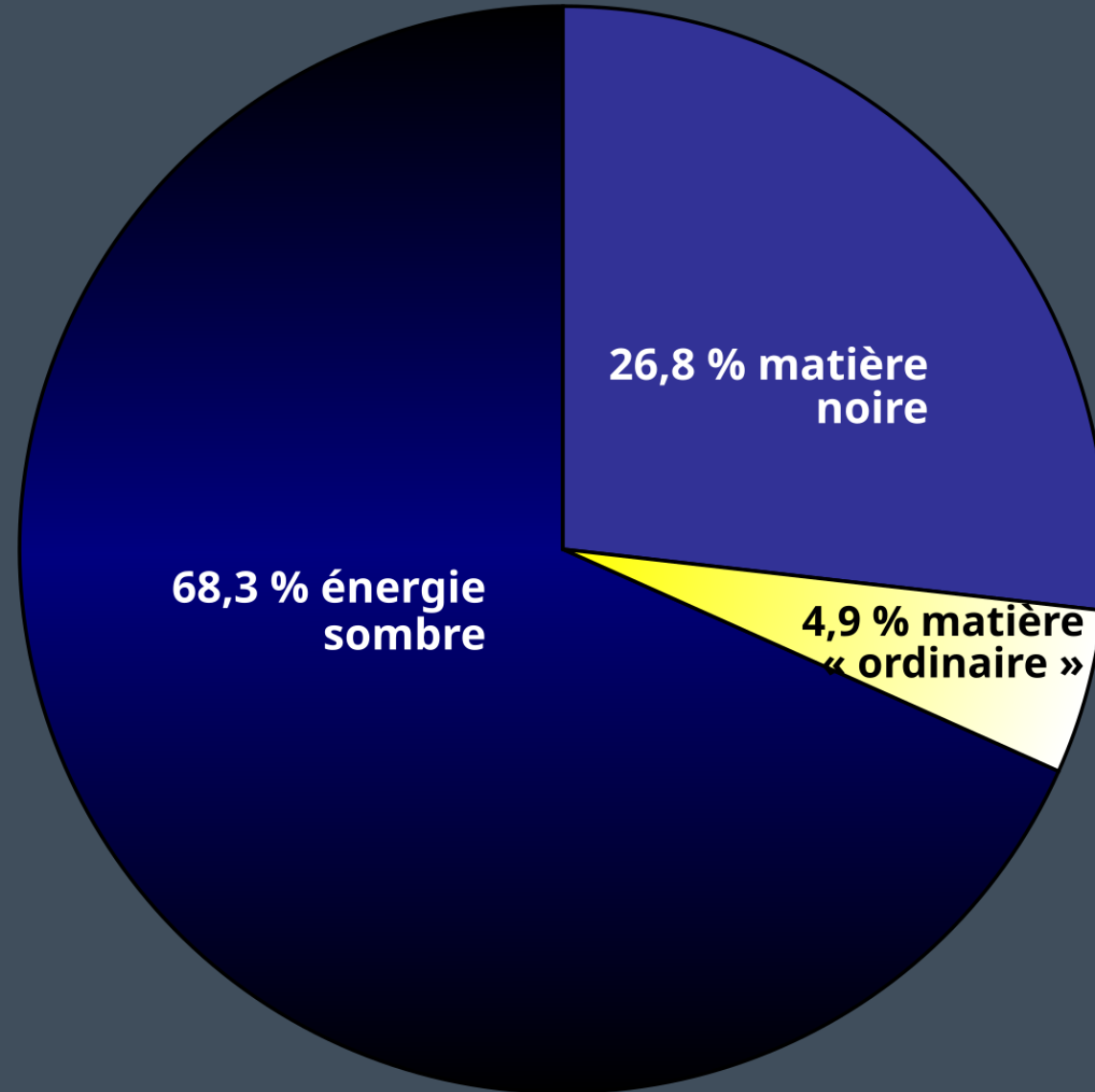
Tests et études modernes de la matière noire

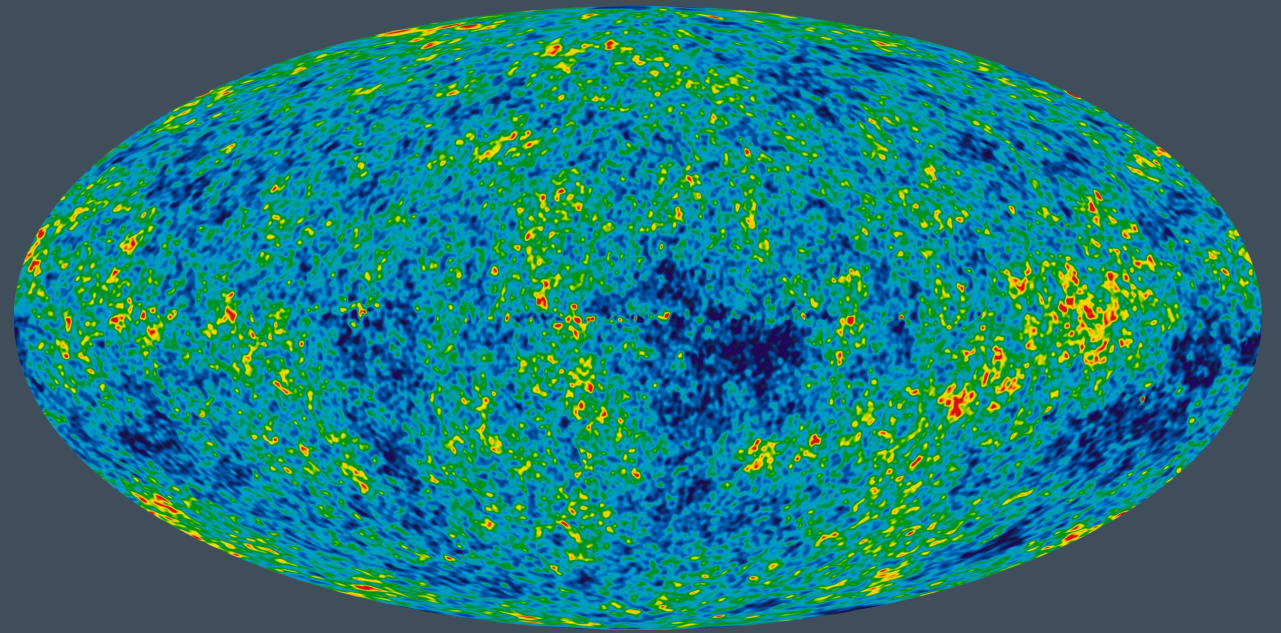
Nicolas Esser

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





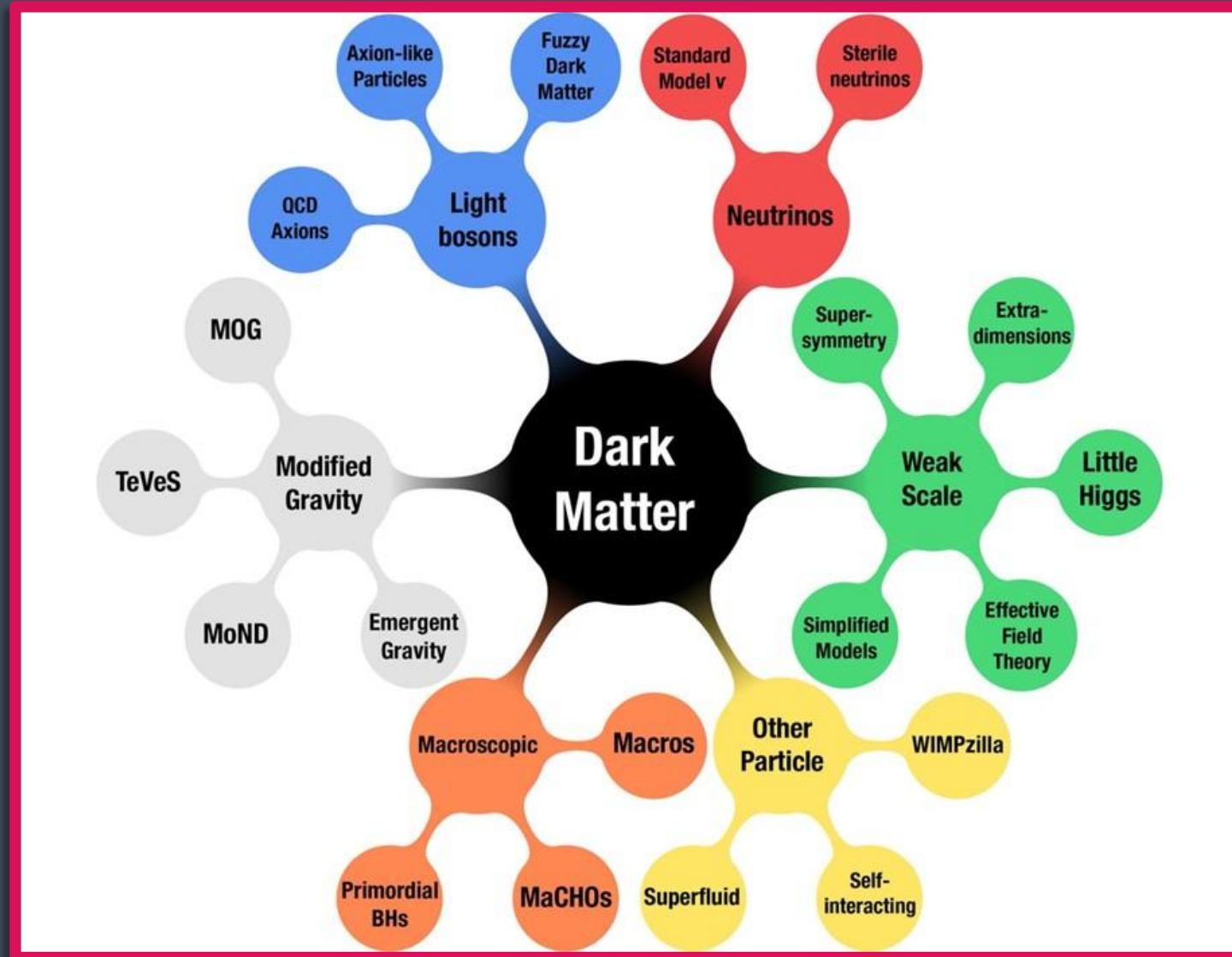


La matière noire est présente
à différentes échelles et à
différentes époques !

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**.

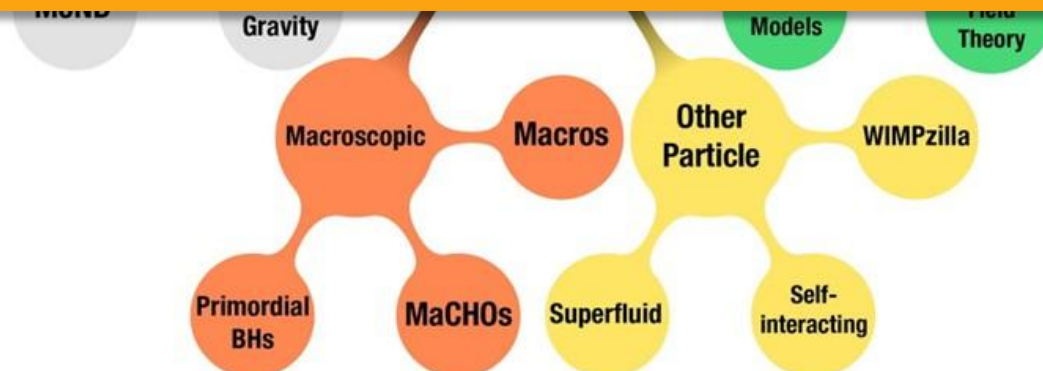
Candidats possibles



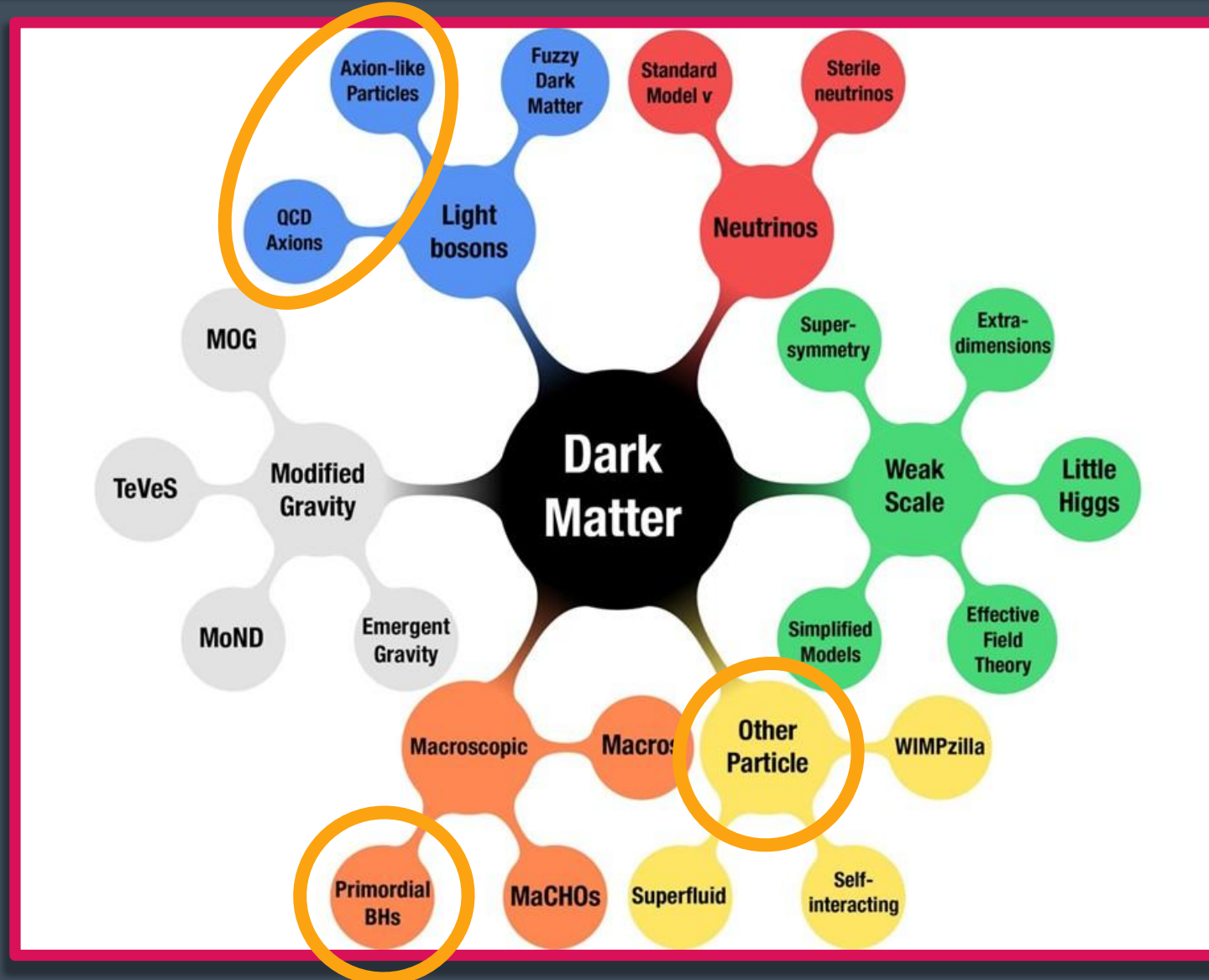
Candidats possibles



Il en existe des centaines !



Candidats possibles



Matière noire particule

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
mass	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
LEPTONS	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
			SCALAR BOSONS	
			GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	

+

DM

Couplage g_{DM}
Très faible!

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

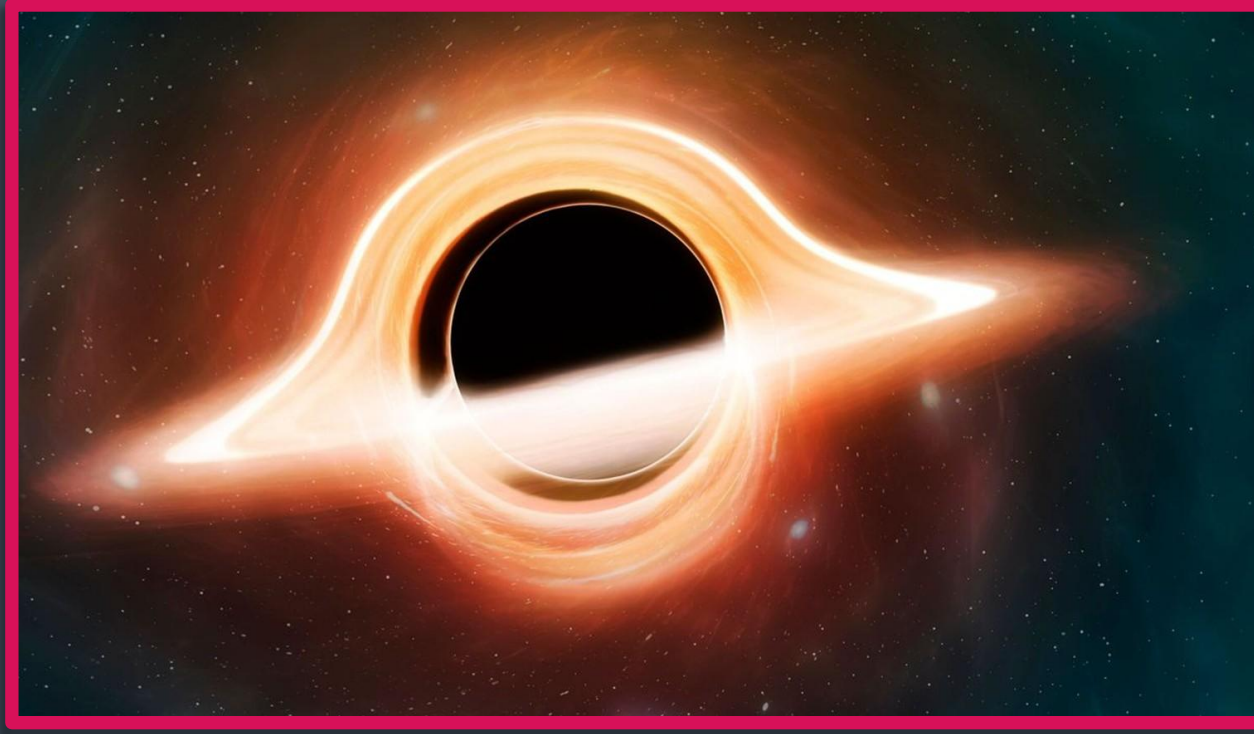
Candidats possibles: WIMP et Axion

2 paramètres: masse
et couplage

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

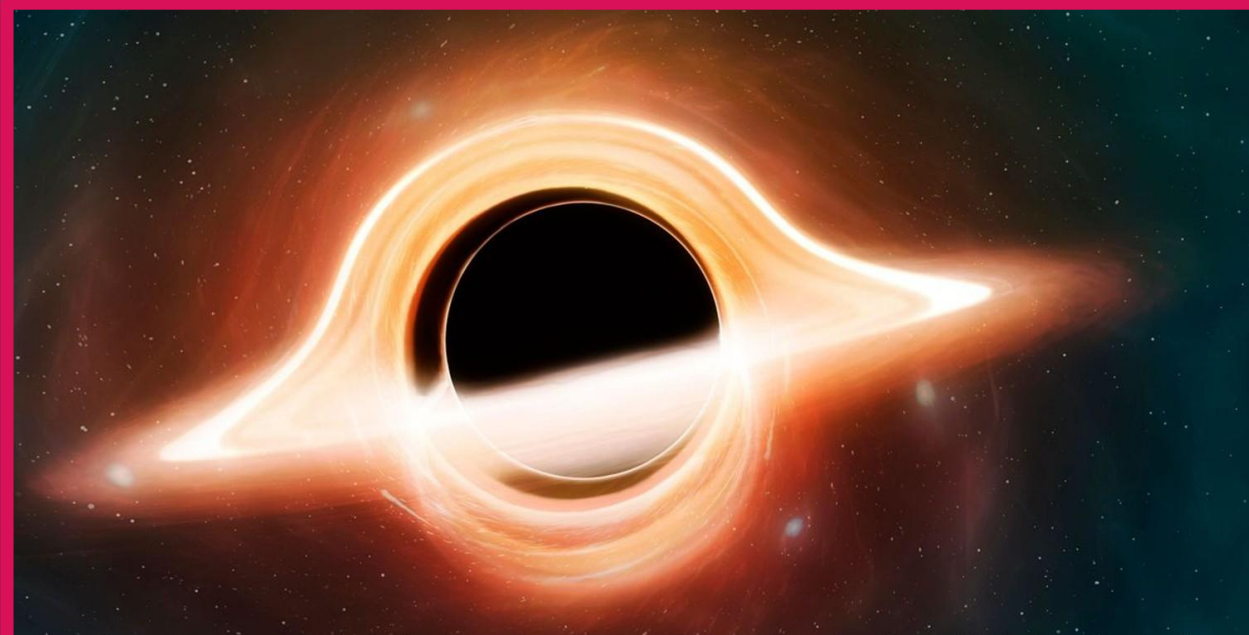
Particule **très légère**
 $< 1 \text{ eV} = 10^{-36} \text{ kg} \simeq 10^{-9} m_p$

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 leçon₃

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

=

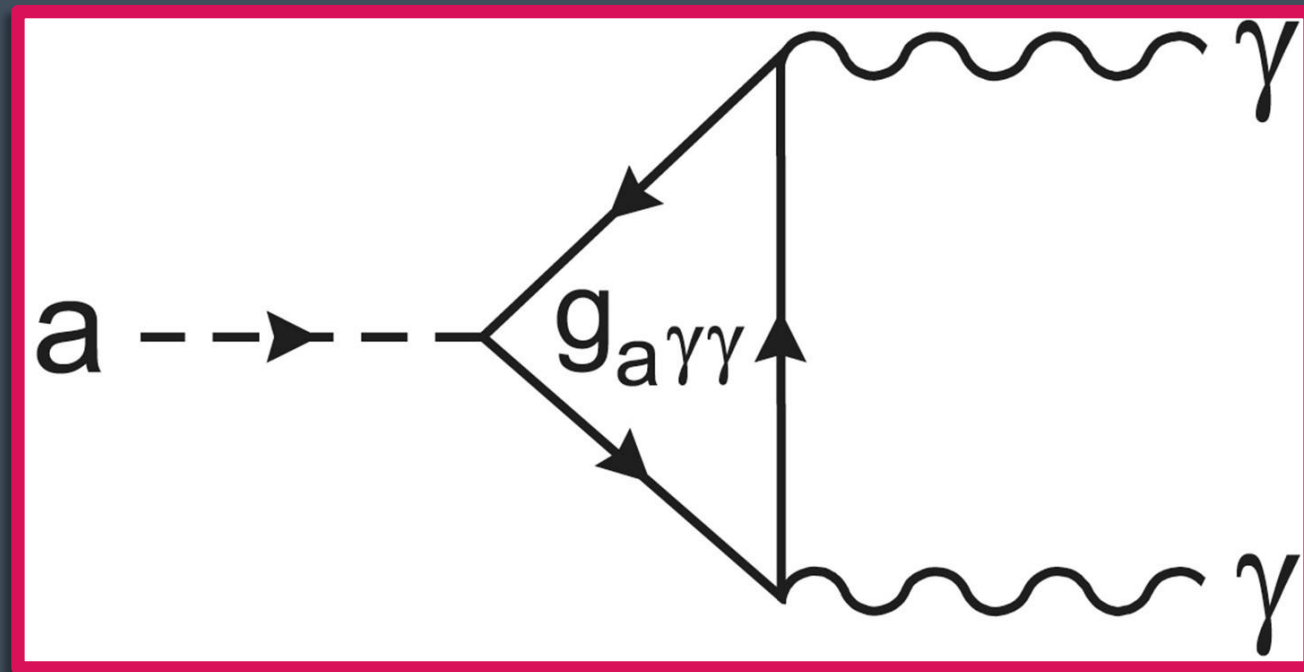
Etude des phénomènes
(effets) dus à la matière noire

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

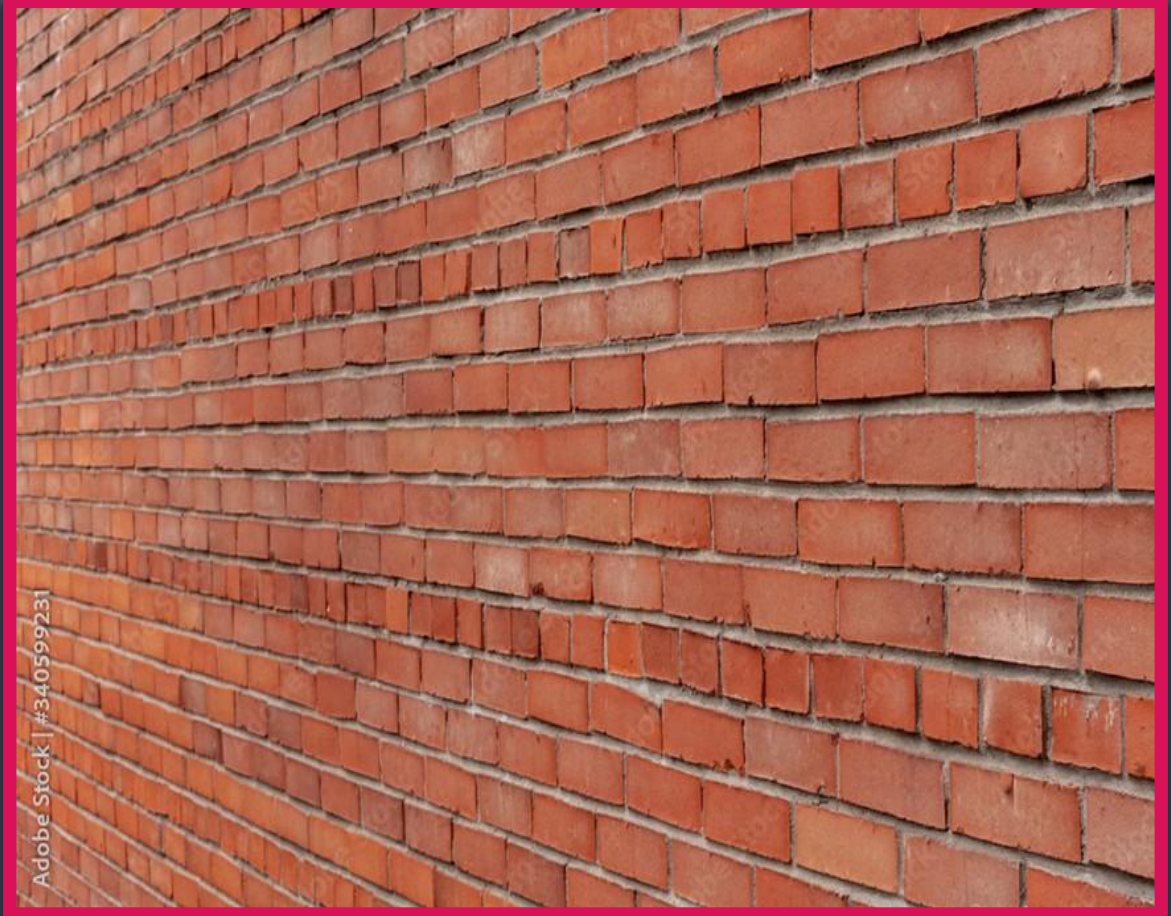
- On prédit à quelle fréquence ce phénomène devrait avoir lieu dans des conditions d'expérience

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



Phénoménologie

- Exemple: axion + champ magnétique = photon

CERN Axion
Solar
Telescope
(CAST)



Phénoménologie

Observation ?

Phénoménologie

Observation ?



On a trouvé la
matière noire!

Phénoménologie

Observation ?

OUI



On a trouvé la matière noire!

Implications:

- Gloire
- Richesse
- Beauté
- Prix Nobel

Phénoménologie

Observation ?

OUI



On a trouvé la matière noire!

Implications:

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

Phénoménologie

Observation ?

OUI



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 ?

OUI

On a trouvé la
matière noire!

NON

On a pas
(encore) trouvé
la matière noire

Phénoménologie

On a trouvé la

Contraintes !

(encore) trouve
la matière noire

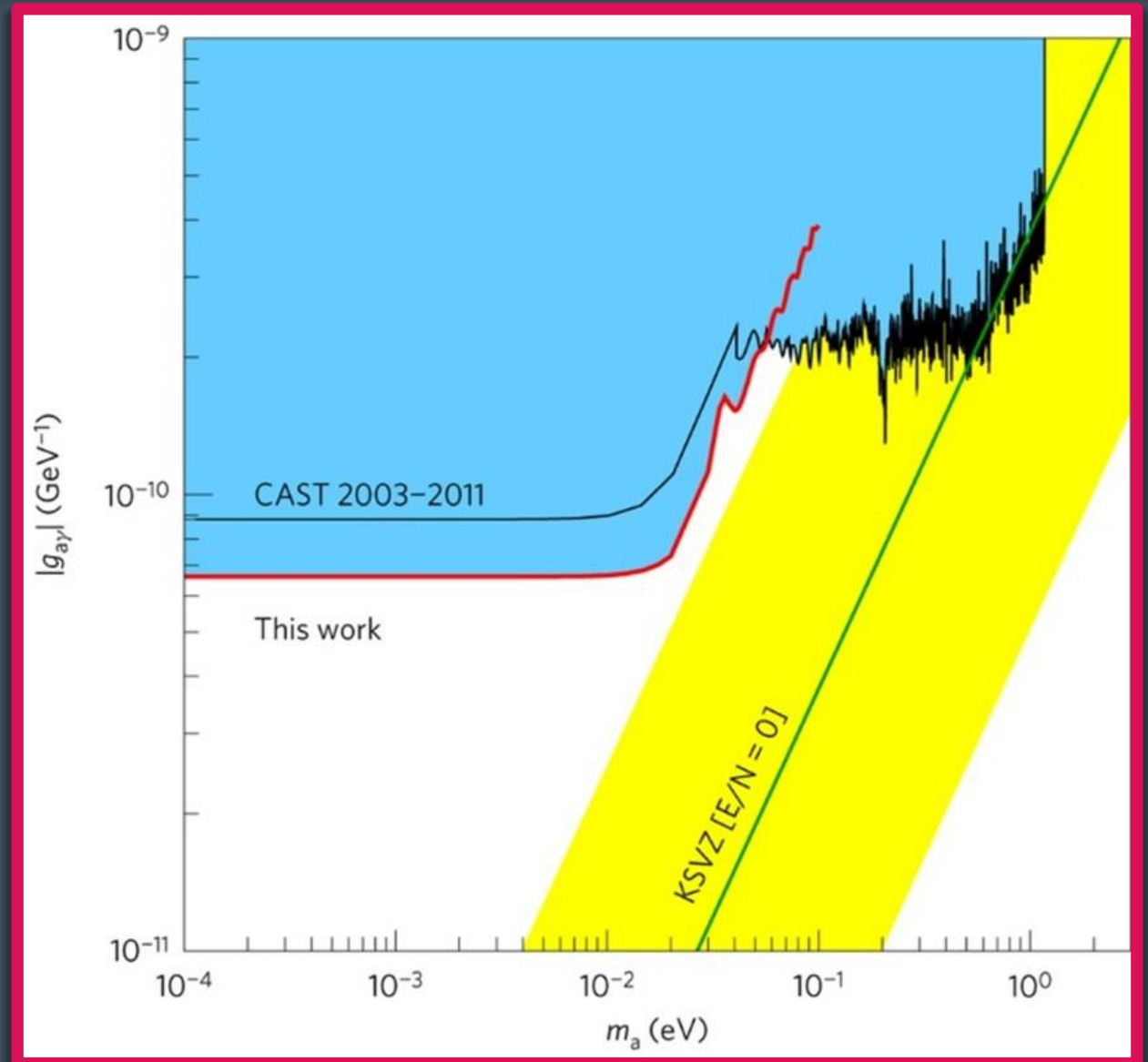
Phénoménologie

On a trouvé la

Contraintes !
(moins excitant)

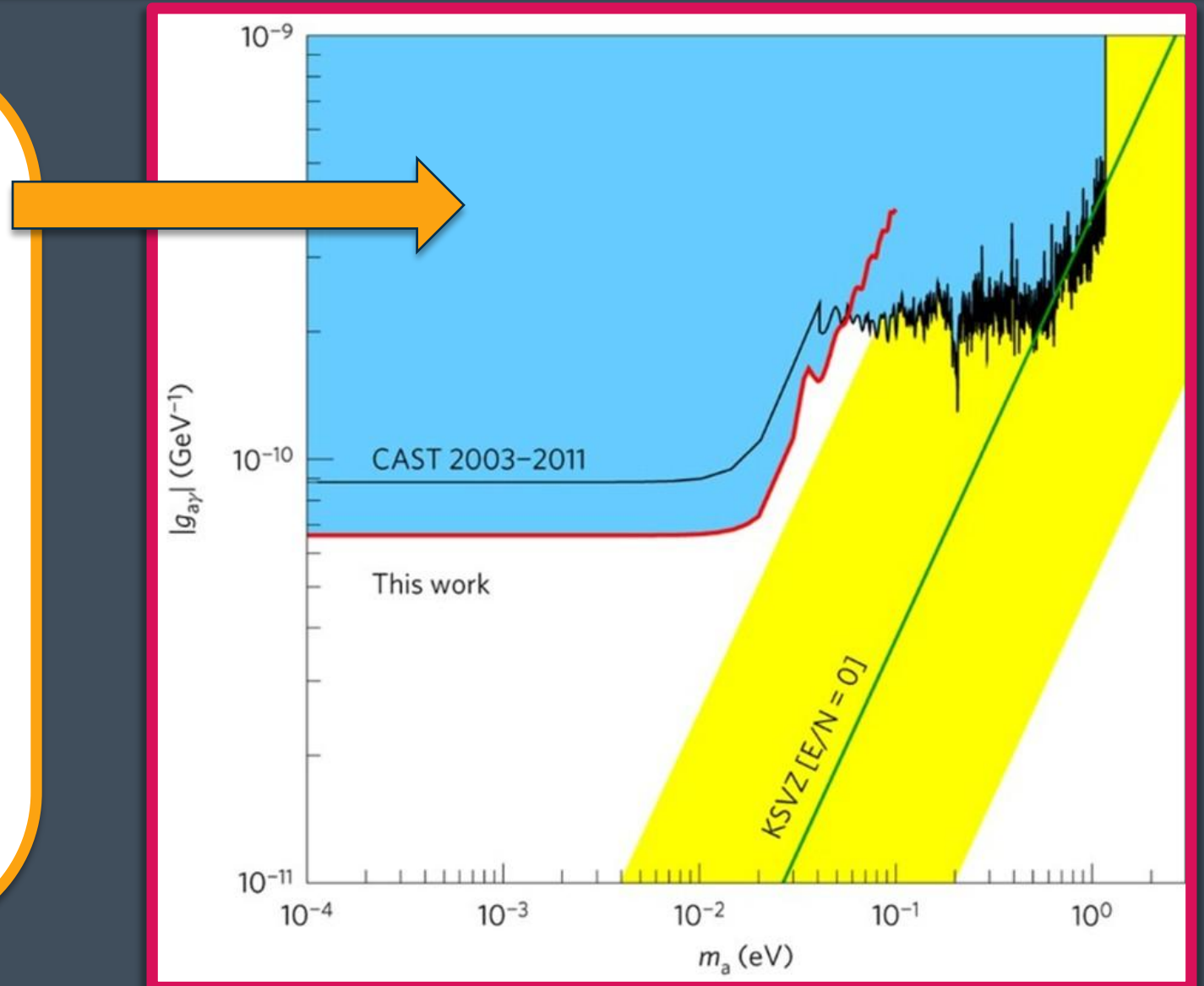
(encore) trouve
la matière noire

Contraintes



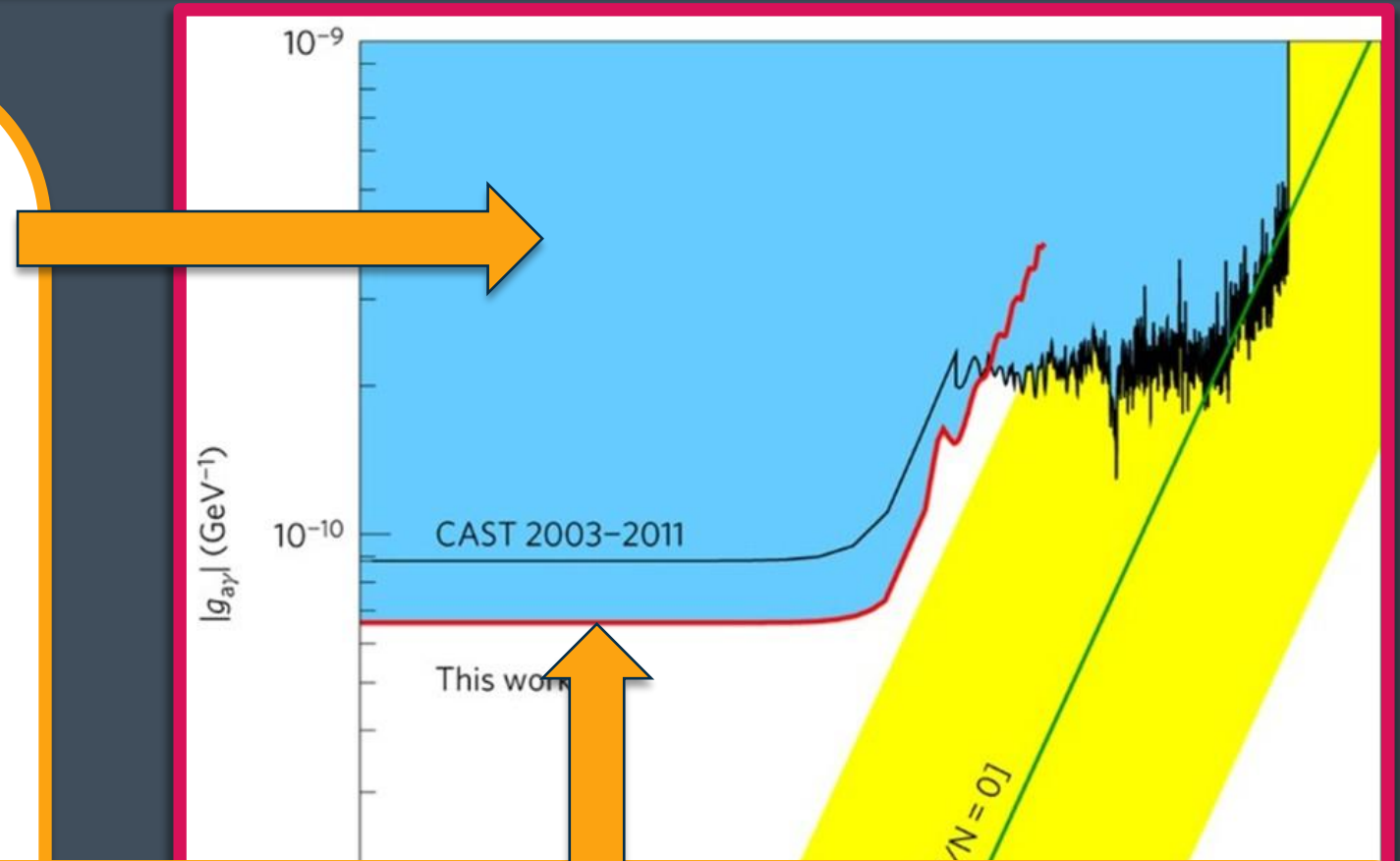
Contraintes

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



Contraintes

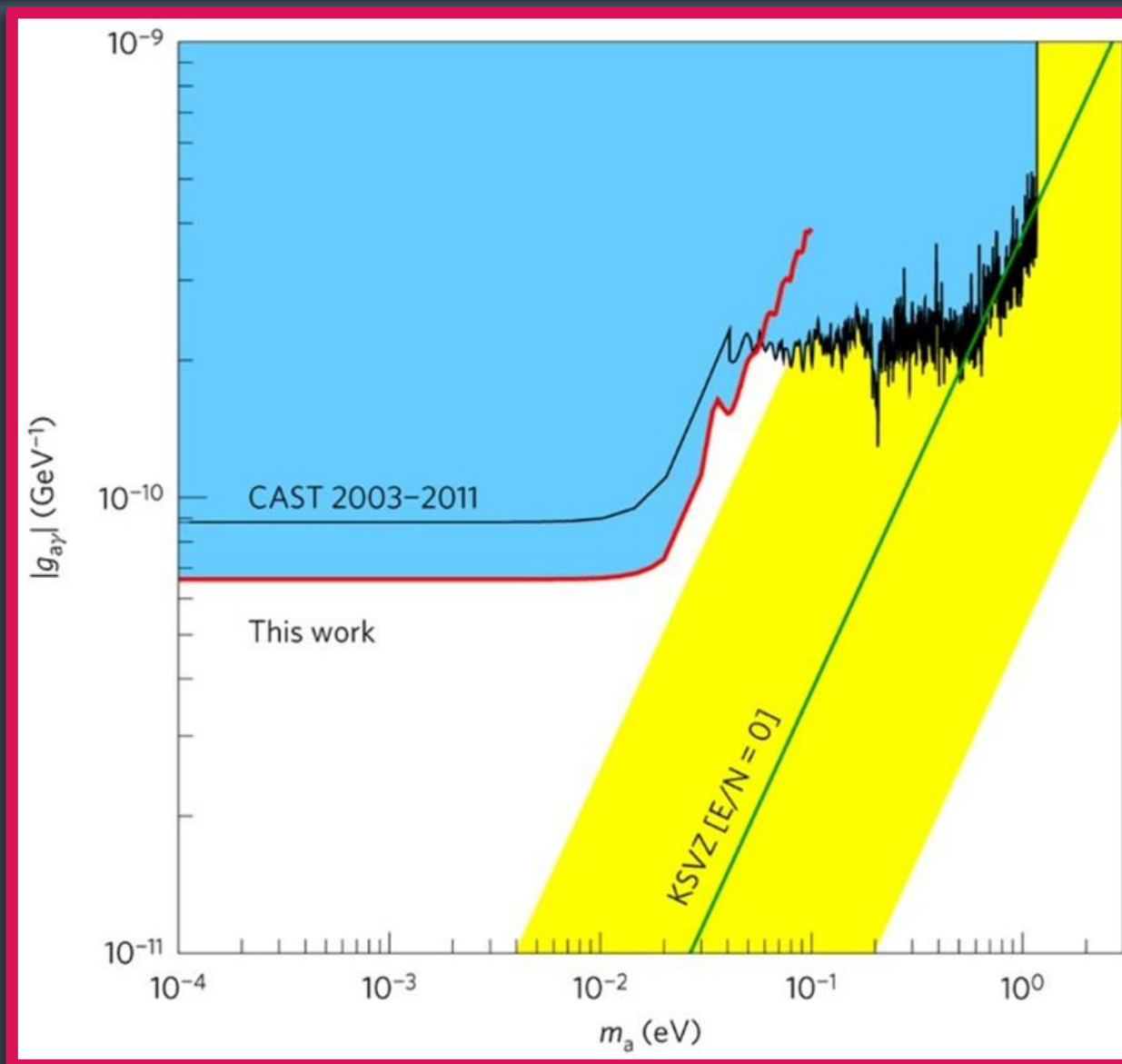
La matière noire
ne peut pas être
faite d'axions
avec une
combinaison g
et m dans cette
zone



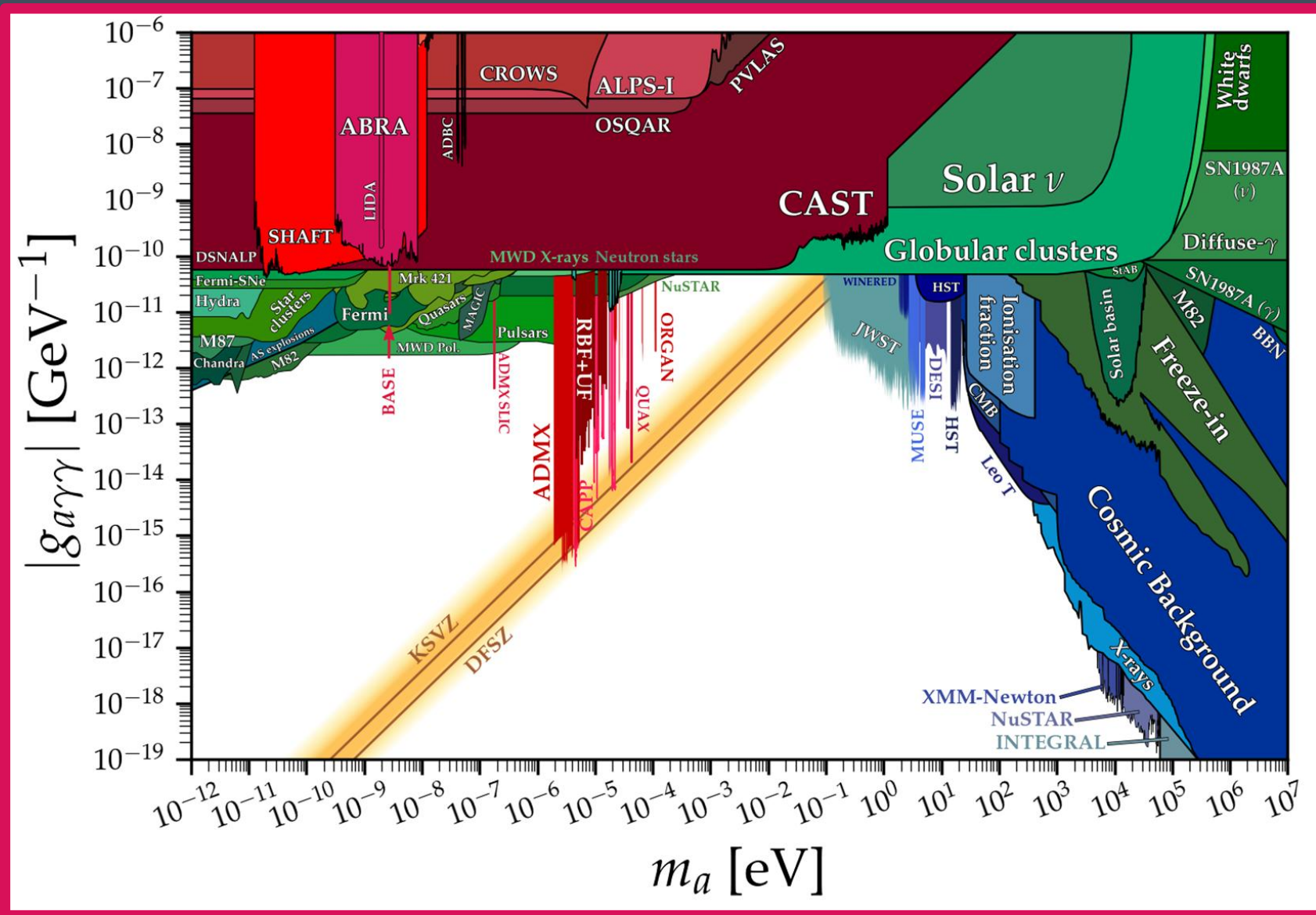
On a prédit au moins 1 signal
entre 2003 et 2011, et on a rien vu

Contraintes

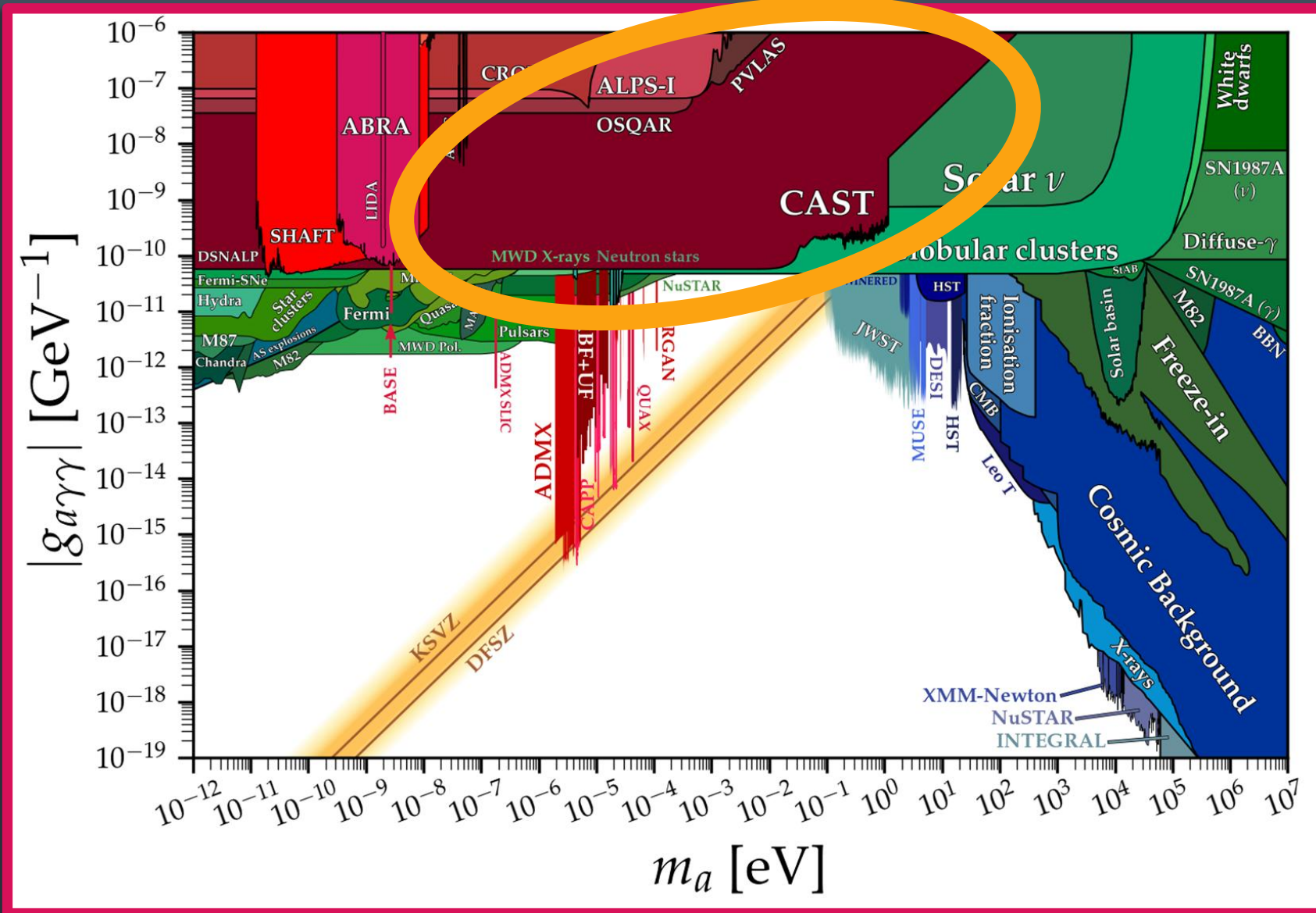
Une expérience:
des années de
travail de plusieurs
physiciens



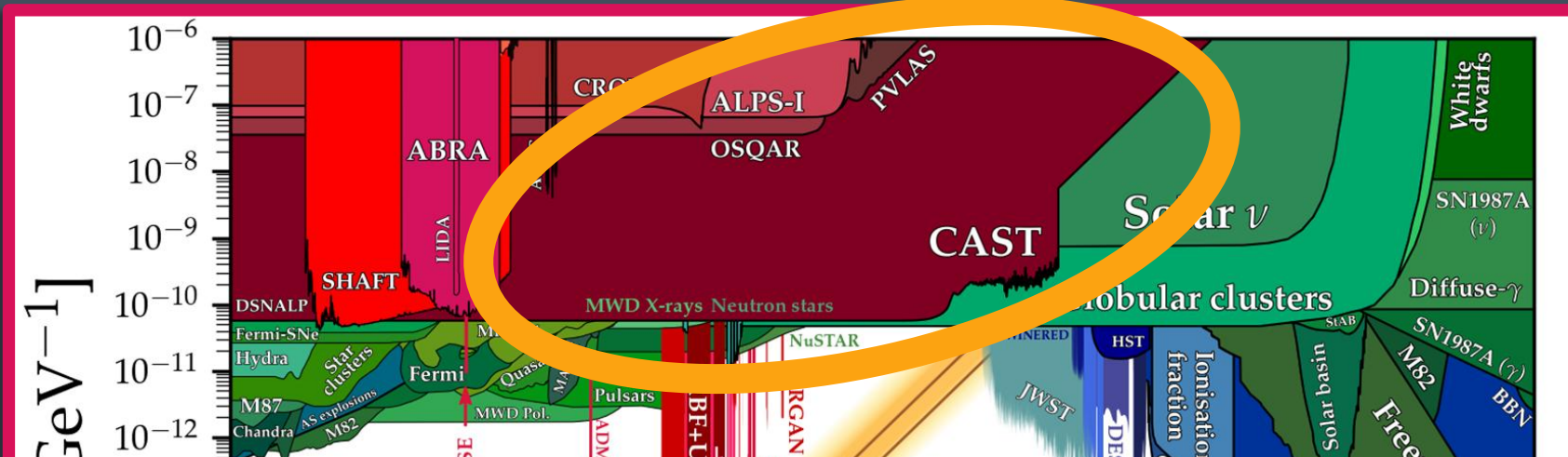
Constraints: axion



Constraints: axion



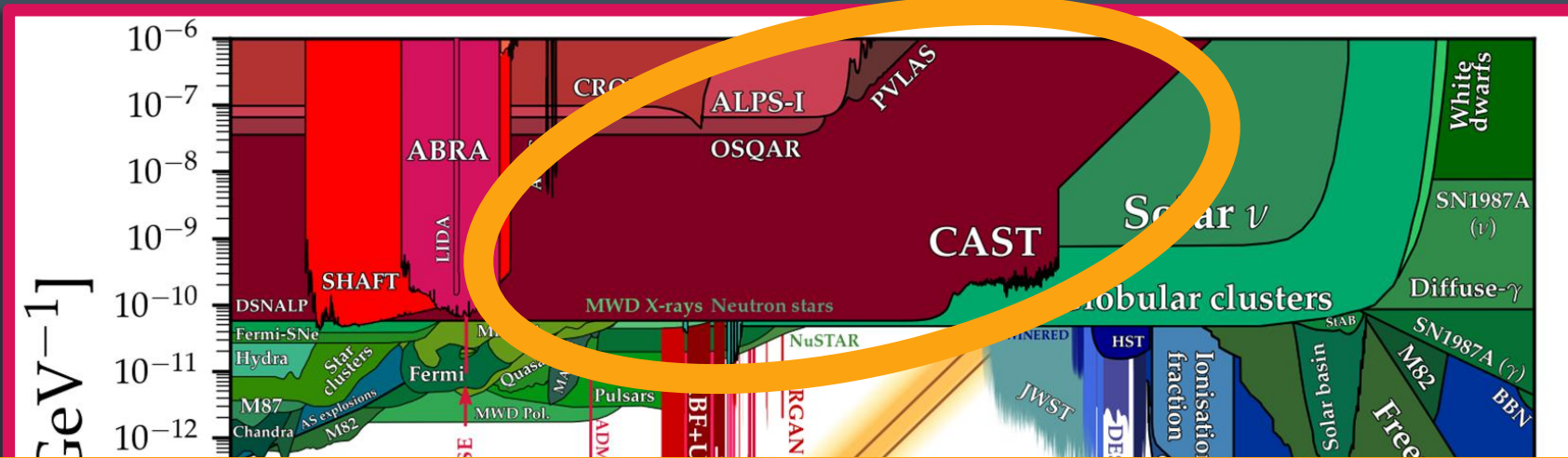
Contraintes: axion



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

m_a [eV]

Contraintes: axion

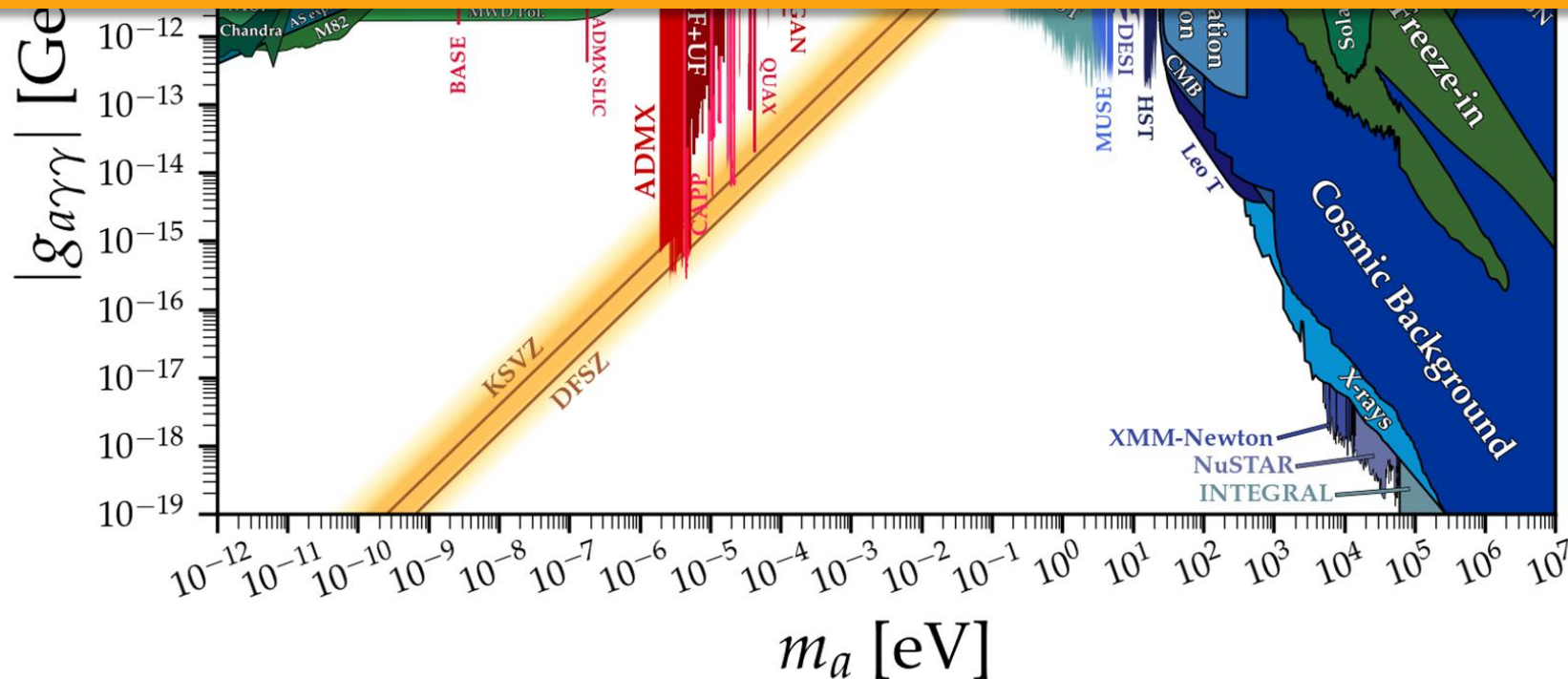


Conclusion: il faut
beaucoup travailler...

m_a [eV]

Contraintes: axion

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

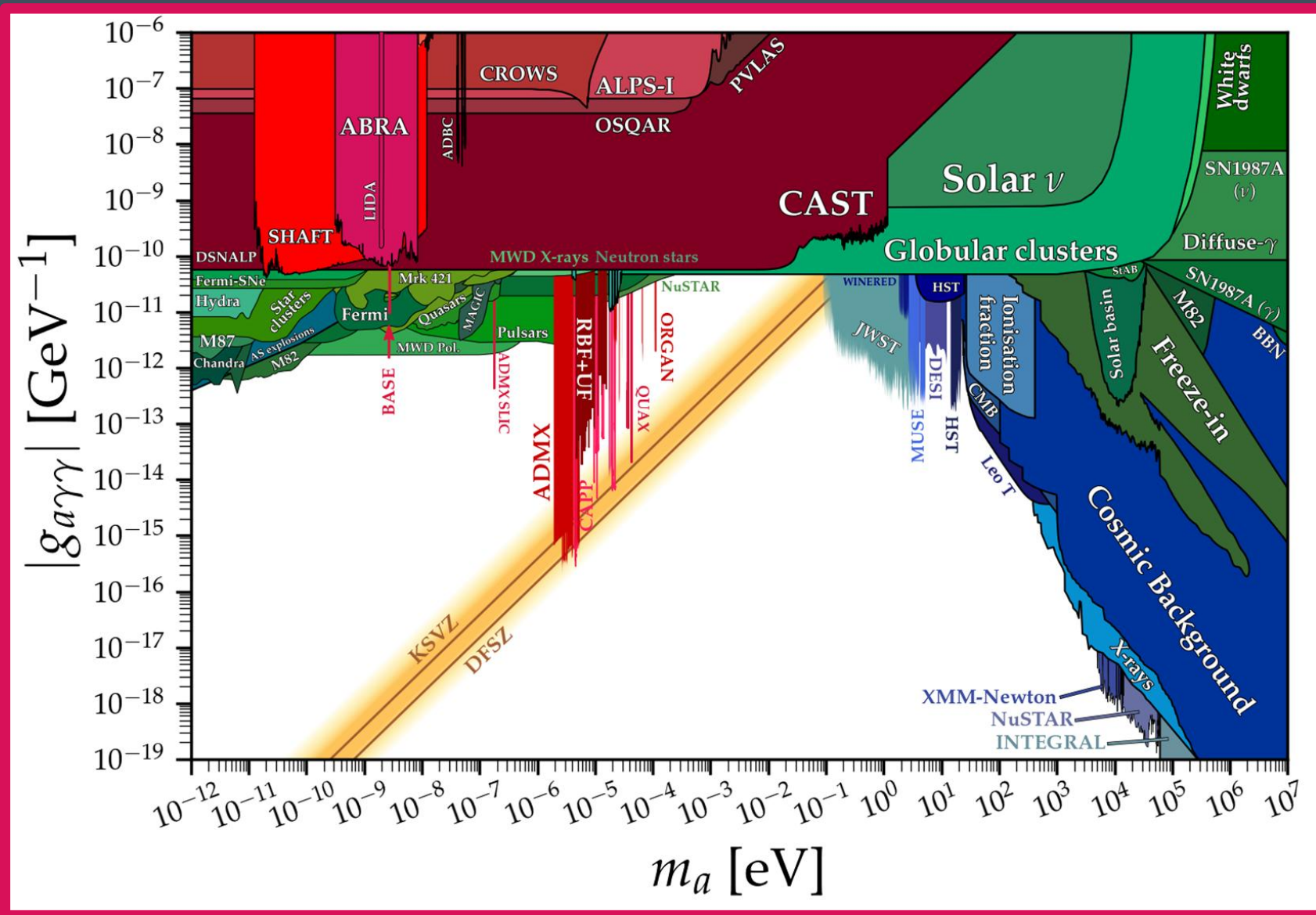


Contraintes: axion

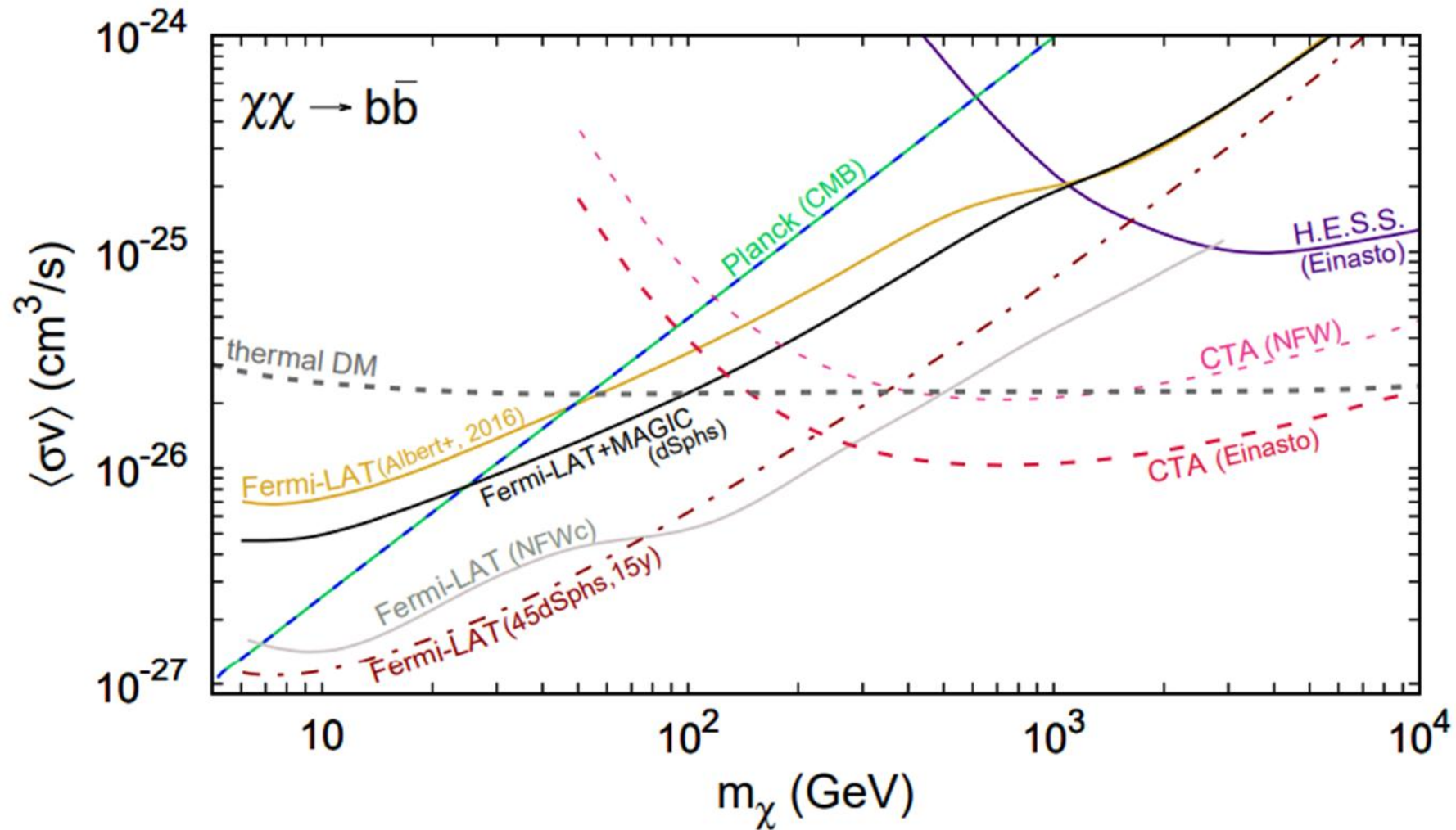
Tant qu'on aura pas tout colorié, l'axion pourra être la matière noire... Mais on ne pourra jamais tout tester.

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

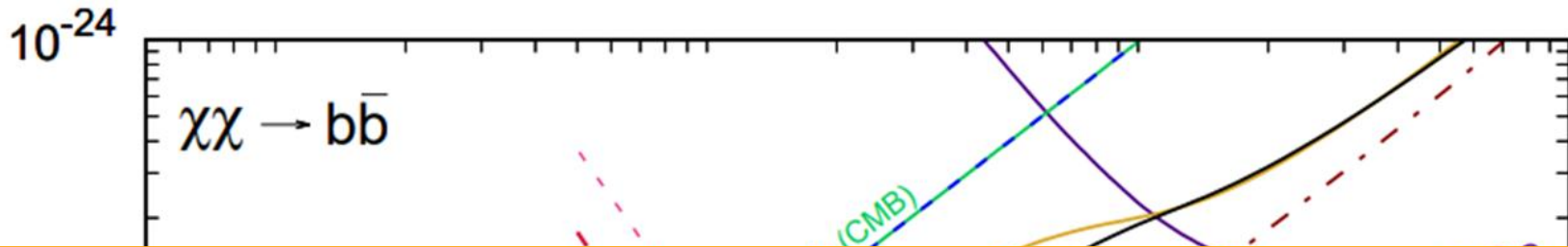
Constraints: axion



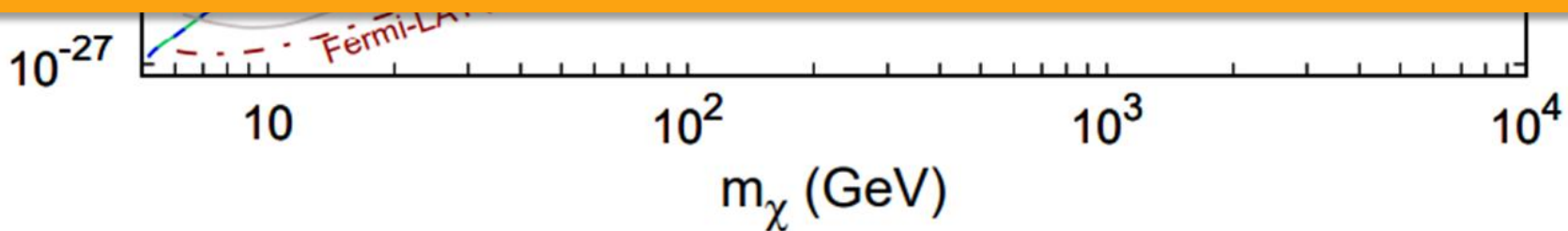
Contraintes: WIMP



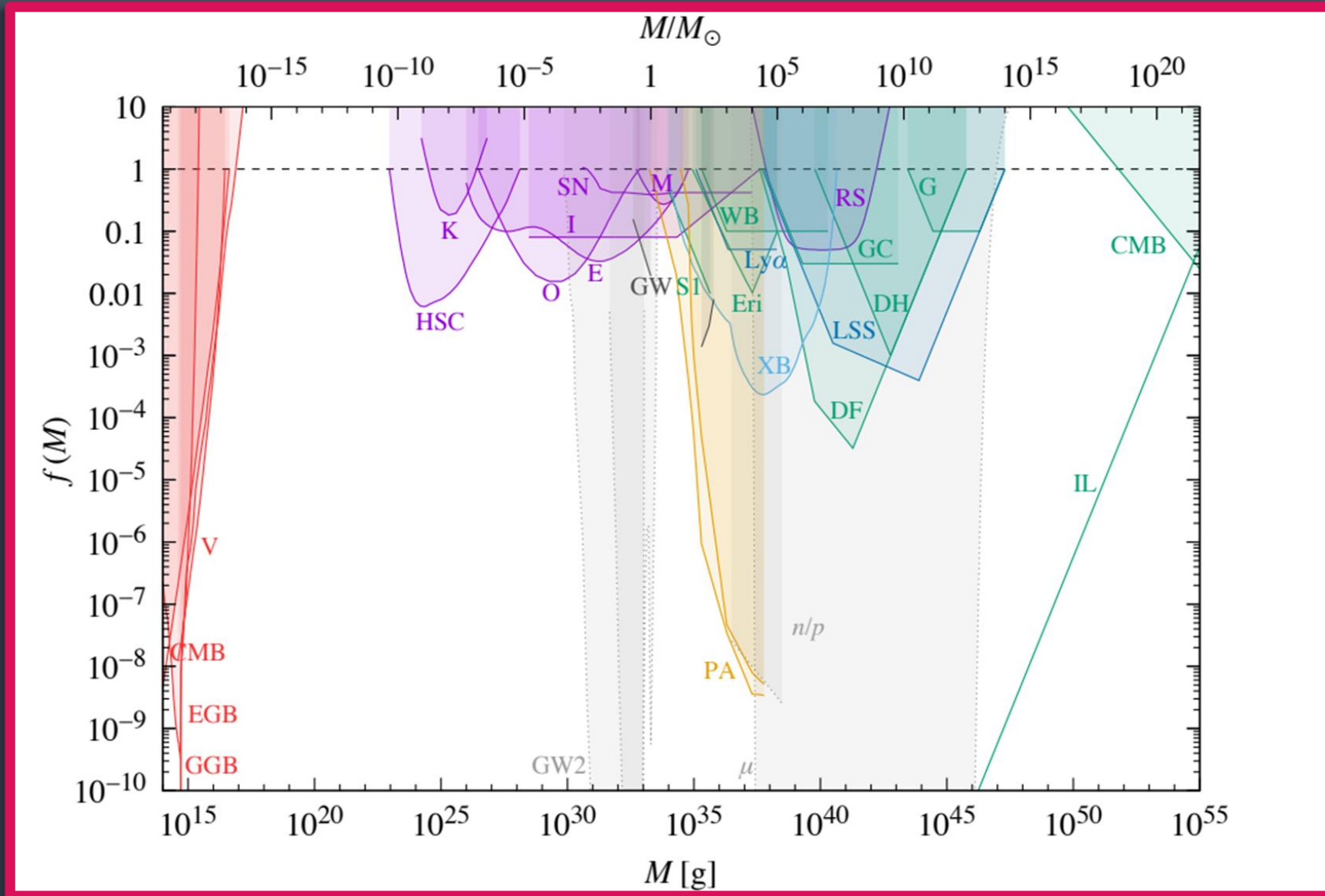
Contraintes: WIMP



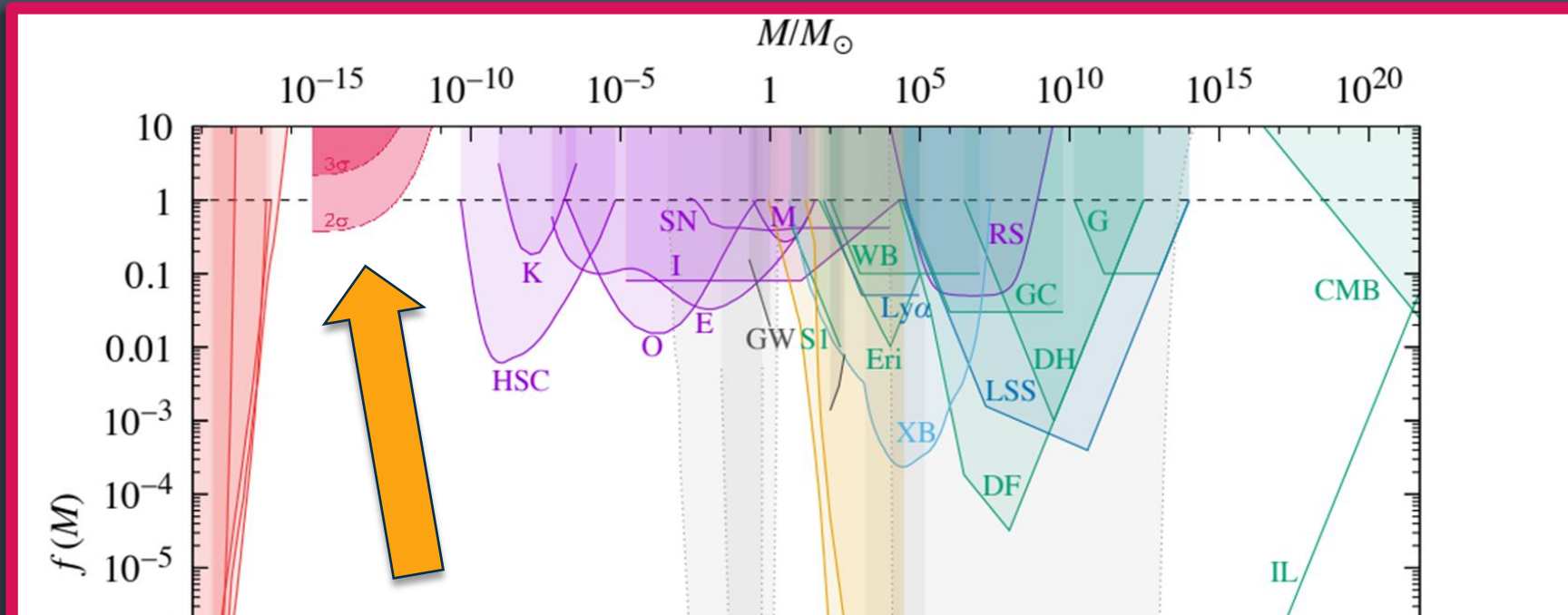
(Il en existe beaucoup d'autres pour les WIMPs)



Contraintes: trous noirs primordiaux

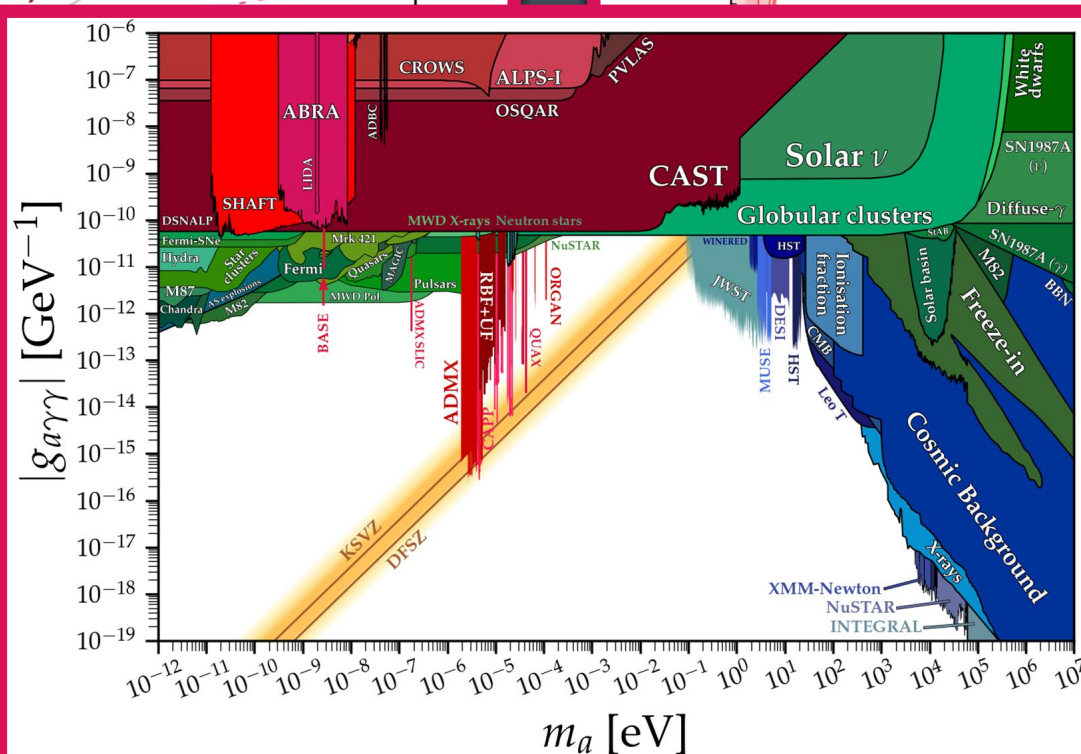
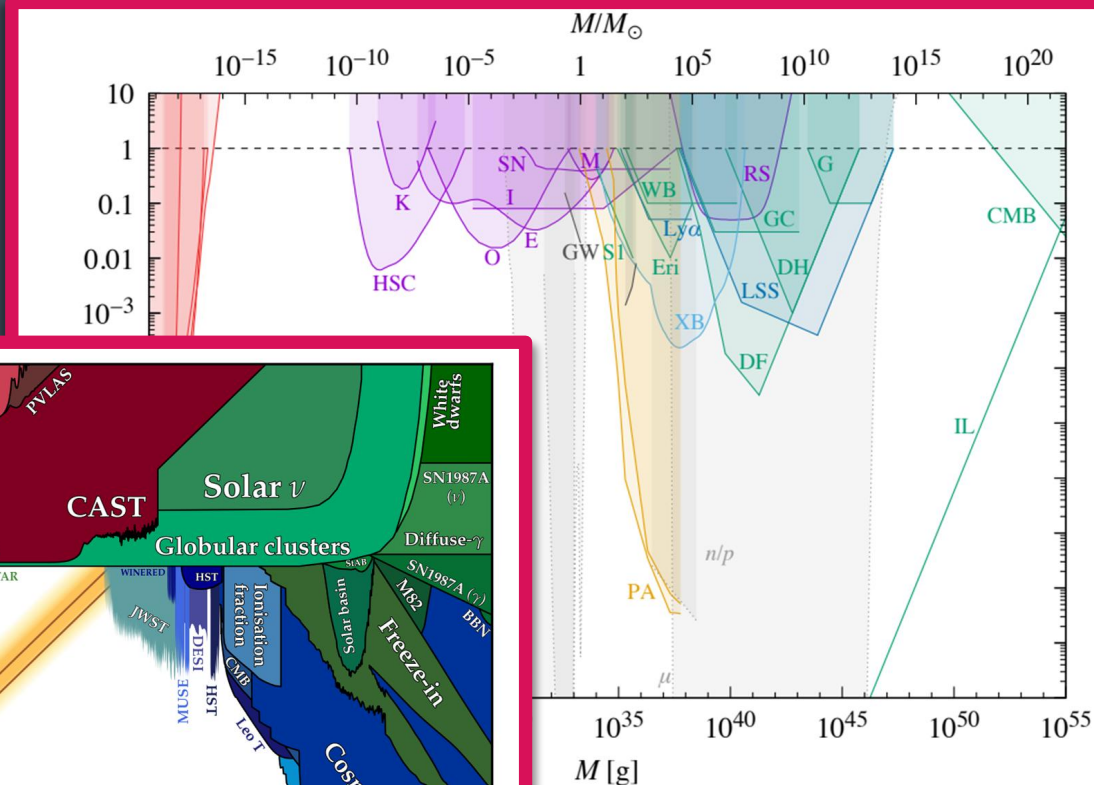
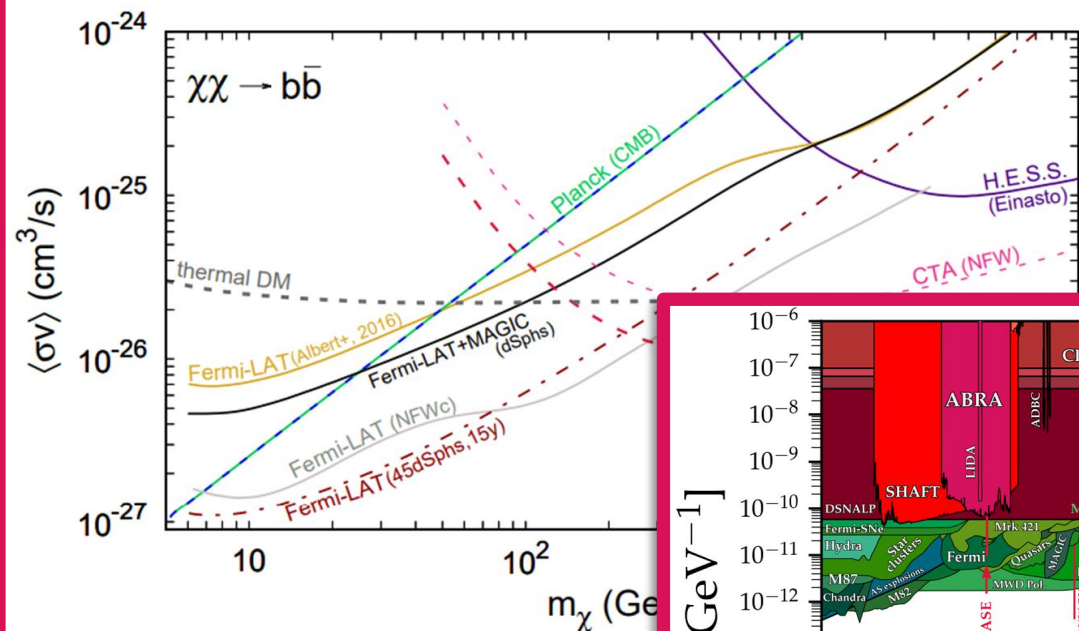


Contraintes: trous noirs primordiaux

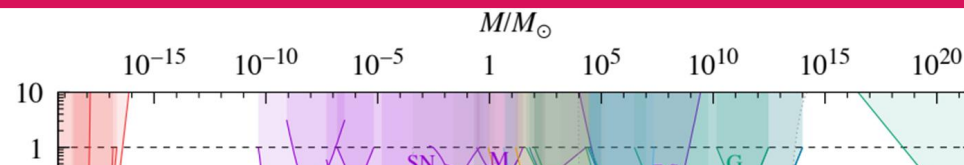
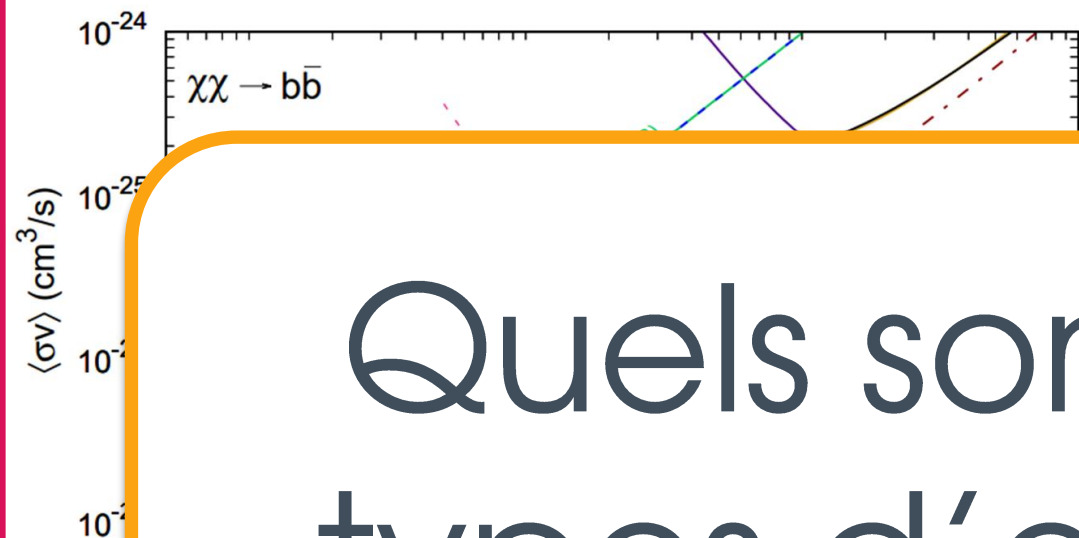


4 ans de thèse. Et on est pas encore certains.

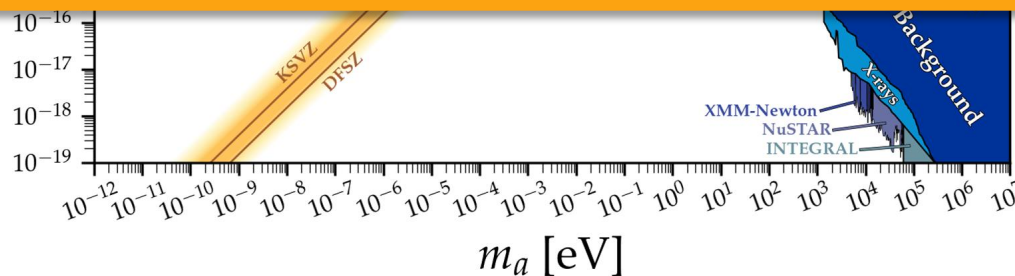
Contraintes



Contraintes



Quels sont les grands types d'expériences?



Détection directe,
détection indirecte et
production aux
collisionneurs

Détection directe,

détection indirecte et

Matière noire particule

production aux

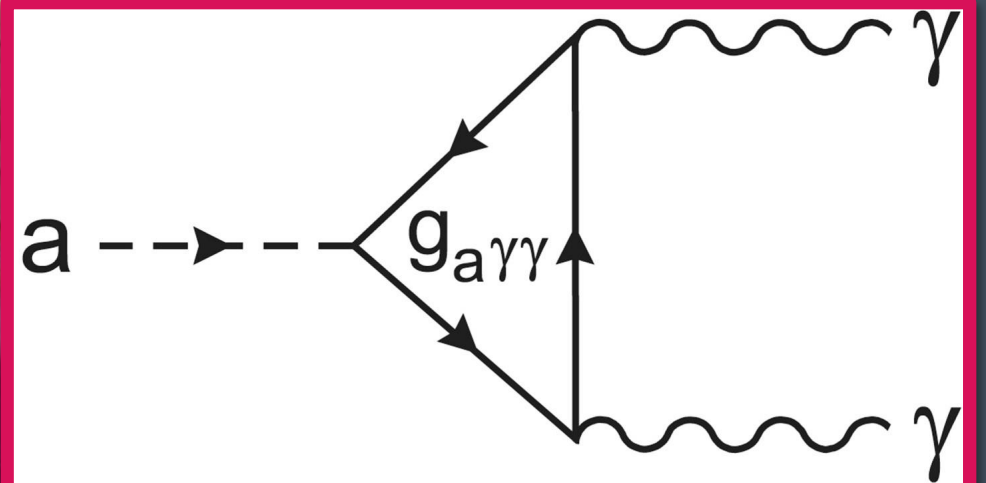
collisionneurs

Détection directe

Détection directe

La matière noire
interagit directement
avec l'expérience

CAST (depuis 2002)



XENON1T (depuis 2002)



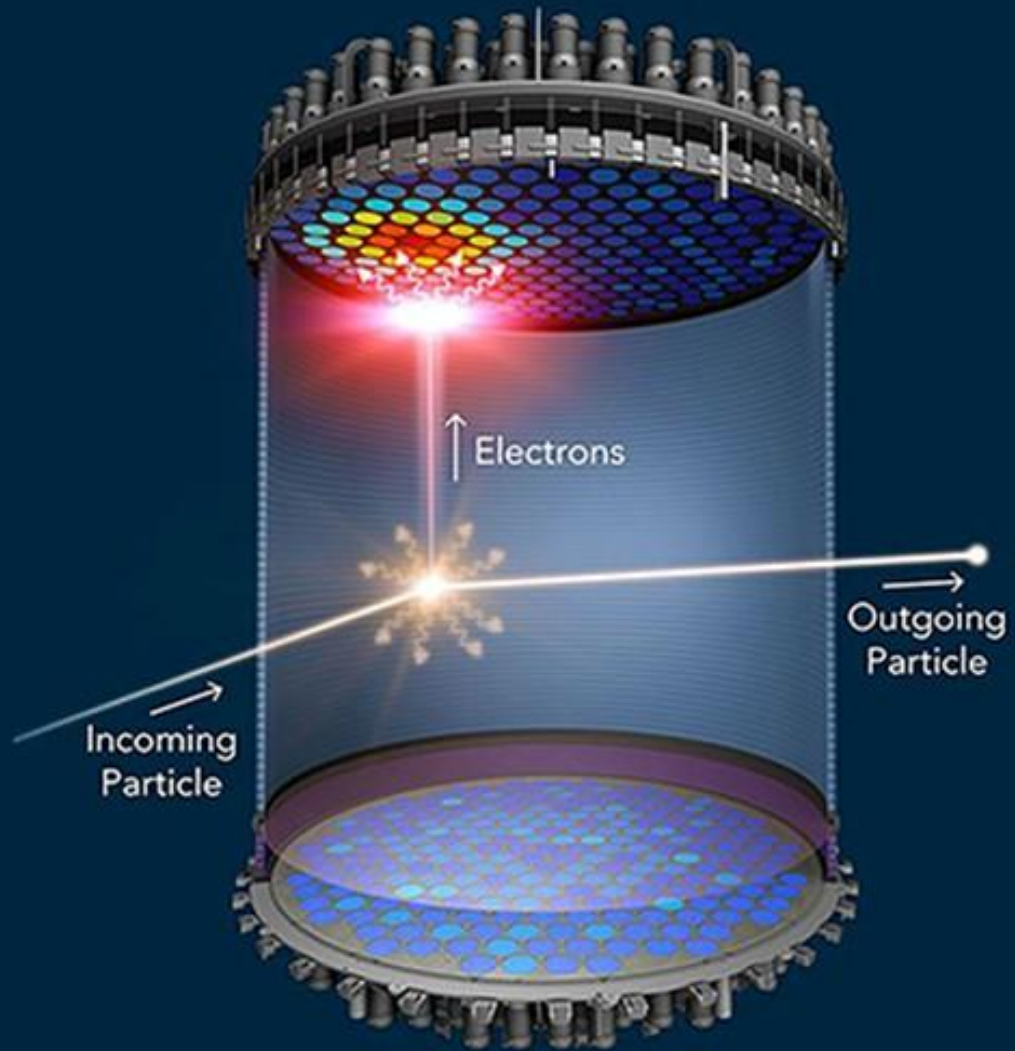
Tableau périodique des éléments chimiques

Groupe →		I A																VIII A															
Période		1																		18													
1	Hydrogène 1 H 1,00795																	Hélium 2 He 4,002602															
2	Lithium 3 Li 6,9395	Béryllium 4 Be 9,0121831																	Bore 5 B 10,8135										Carbone 6 C 12,0106	Azote 7 N 14,006855	Oxygène 8 O 15,99940	Fluor 9 F 18,99840316	Néon 10 Ne 20,1797 (6)
3	Sodium 11 Na 22,98976928	Magnésium 12 Mg 24,3055																	Aluminium 13 Al 26,9815385										Silicium 14 Si 28,085 (1)	Phosphore 15 P 30,97376200	Soufre 16 S 32,0675	Chlore 17 Cl 35,4515	Argon 18 Ar 39,948 (1)
4	Potassium 19 K 39,0983 (1)	Calcium 20 Ca 40,078 (4)	Scandium 21 Sc 44,955908 (5)	Titane 22 Ti 47,867 (1)	Vanadium 23 V 50,9415 (1)	Chrome 24 Cr 51,9961 (6)	Manganèse 25 Mn 54,938044	Fer 26 Fe 55,845 (2)	Cobalt 27 Co 58,933194	Nickel 28 Ni 58,6934 (4)	Cuivre 29 Cu 63,546 (3)	Zinc 30 Zn 65,38 (2)	Gallium 31 Ga 69,723 (1)	Germanium 32 Ge 72,630 (8)	Arsenic 33 As 74,921595	Sélénium 34 Se 78,971 (8)	Brome 35 Br 79,904	Krypton 36 Kr 83,801 (2)															
5	Rubidium 37 Rb 85,4678 (3)	Strontium 38 Sr 87,62 (1)	Yttrium 39 Y 88,90584	Zirconium 40 Zr 91,224 (2)	Niobium 41 Nb 92,90637	Molybdène 42 Mo 95,95 (1)	Technétium 43 Tc [98]	Ruthénium 44 Ru 101,07 (2)	Rhodium 45 Rh 102,90550	Palladium 46 Pd 106,42 (1)	Argent 47 Ag 107,8682 (2)	Cadmium 48 Cd 112,414 (4)	Indium 49 In 114,818 (1)	Étain 50 Sn 118,710 (7)	Antimoine 51 Sb 121,760 (1)	Tellure 52 Te 127,60 (3)	Iode 53 I 126,905 (4)	Xénon 54 Xe 131,293 (6)															
6	Césium 55 Cs 132,905452	Baryum 56 Ba 137,327 (7)	Lanthanides 57-71		Hafnium 72 Hf 178,49 (2)	Tantale 73 Ta 180,94788	Tungstène 74 W 183,84 (1)	Rhénium 75 Re 186,207 (1)	Osmium 76 Os 190,23 (3)	Iridium 77 Ir 192,217 (3)	Platine 78 Pt 195,084 (9)	Or 79 Au 196,966569	Mercury 80 Hg 200,592 (3)	Thallium 81 Tl 204,3835	Plomb 82 Pb 207,2 (1)	Bismuth 83 Bi 208,98040	Polonium 84 Po [209]	Astatoine 85 At [210]	Radon 86 Rn [222]														
7	Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	Actinides 89-103		Rutherfordium 104 Rf [267]	Dubnium 105 Db [268]	Seaborgium 106 Sg [269]	Bohrium 107 Bh [270]	Hassium 108 Hs [277]	Meitnerium 109 Mt [278]	Darmstadtium 110 Ds [281]	Roentgenium 111 Rg [282]	Copernicium 112 Cn [285]	Nihonium 113 Nh [286]	Flerovium 114 Fl [289]	Moscovium 115 Mc [289]	Livermorium 116 Lv [293]	Tennesse 117 Ts [294]	Oganesson 118 Og [294]														
				Lanthane 57 La 138,90547	Cérium 58 Ce 140,116 (1)	Praséodyme 59 Pr 140,90766	Néodyme 60 Nd 144,242 (3)	Prométhium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150,36 (2)	Europium 63 Eu 151,964 (1)	Gadolinium 64 Gd 157,25 (3)	Terbium 65 Tb 158,92535	Dysprosium 66 Dy 162,500 (1)	Holmium 67 Ho 164,93033	Erbium 68 Er 167,259 (3)	Thulium 69 Tm 168,93422	Ytterbium 70 Yb 173,045	Lutéций 71 Lu 174,9668															
				Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,03588	Uranium 92 U 238,02891	Neptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Américium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendélévium 101 Md [258]	Noëbelium 102 No [259]	Lawrencium 103 Lr [266]															
Métaux AlcalinsAlcalino-terreuxLanthanidesActinidesMétaux de transitionMétaux pauvresMétalloïdesAutres non-métauxHalogènesGaz noblesNon classés Non métaux																																	
primordial désintégration d'autres éléments synthétique																																	

XENON1T



XENON1T

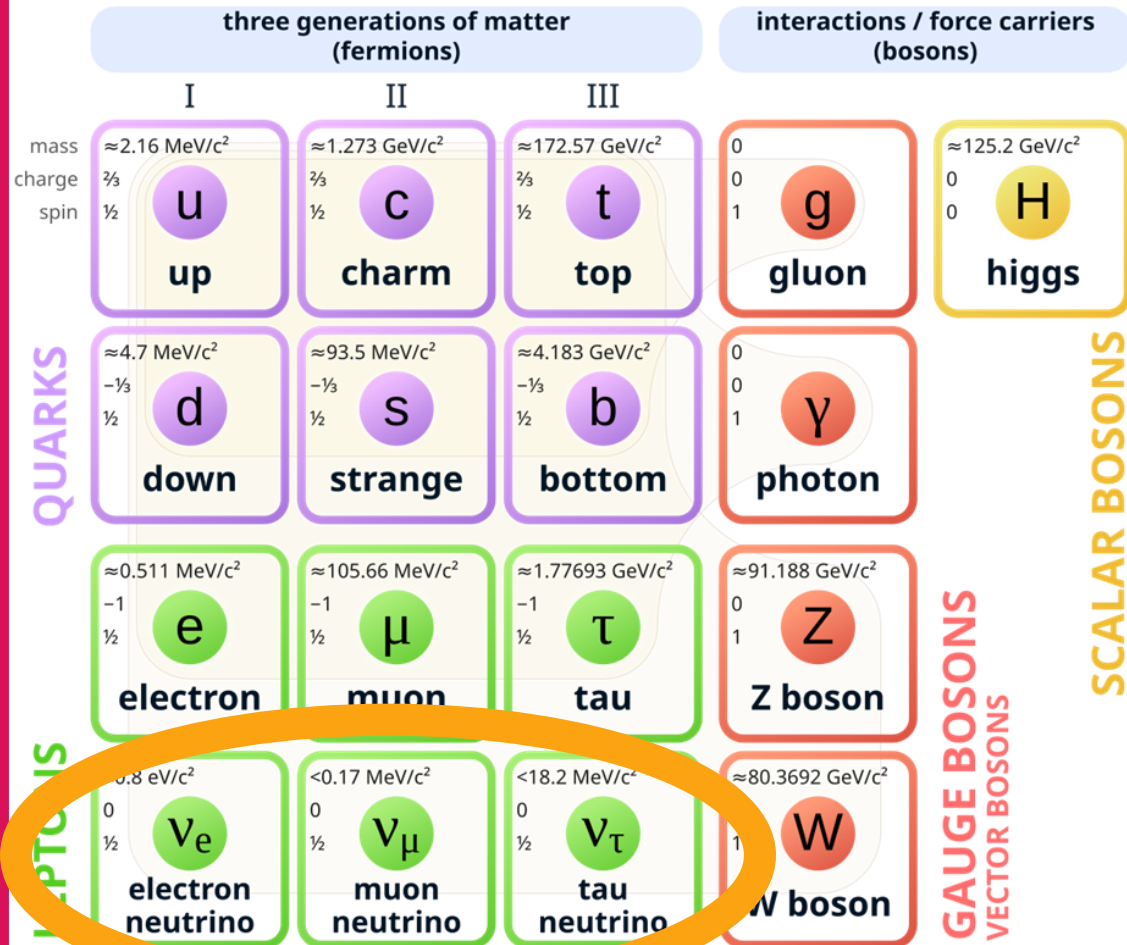


XENON1T

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

XENON1T

Standard Model of Elementary Particles

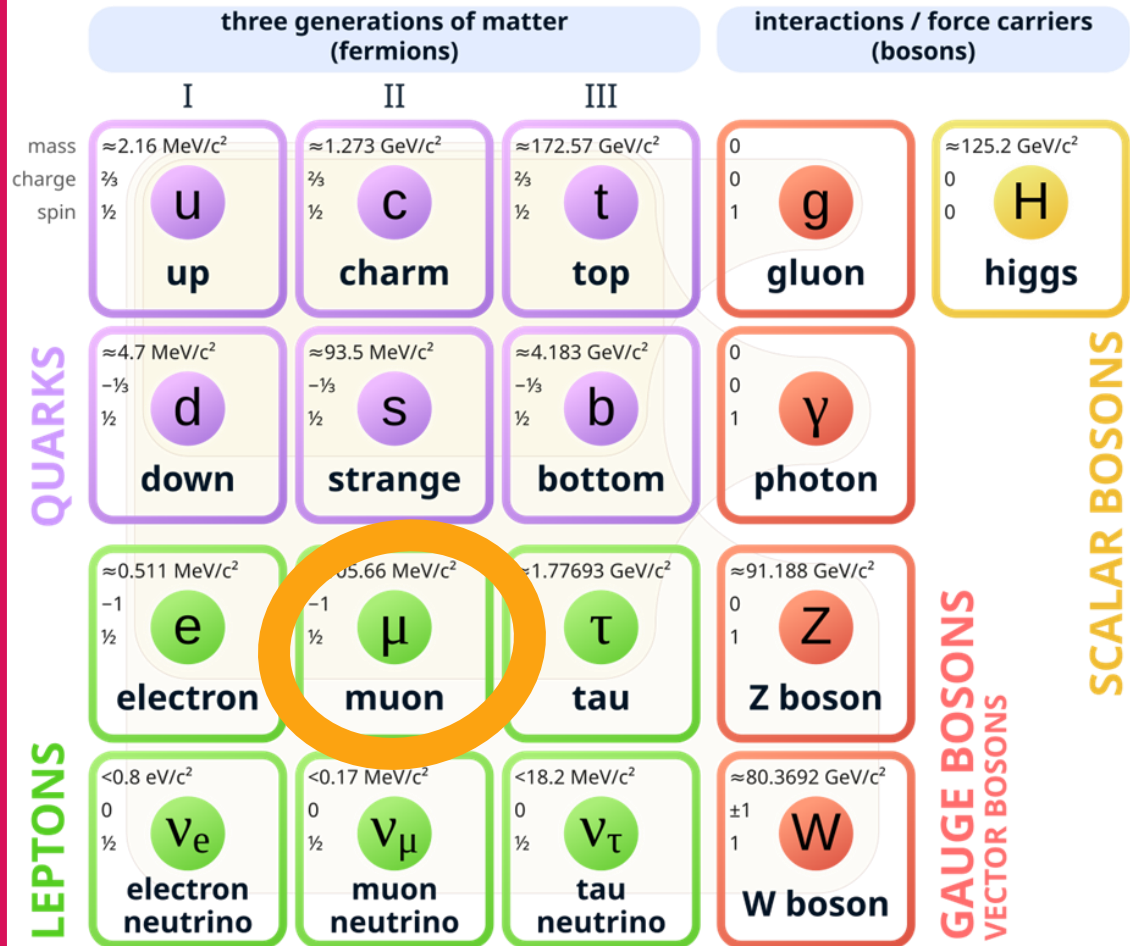


Neutrinos: 10^{15} par
mètre carré par
seconde

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

XENON1T

Standard Model of Elementary Particles

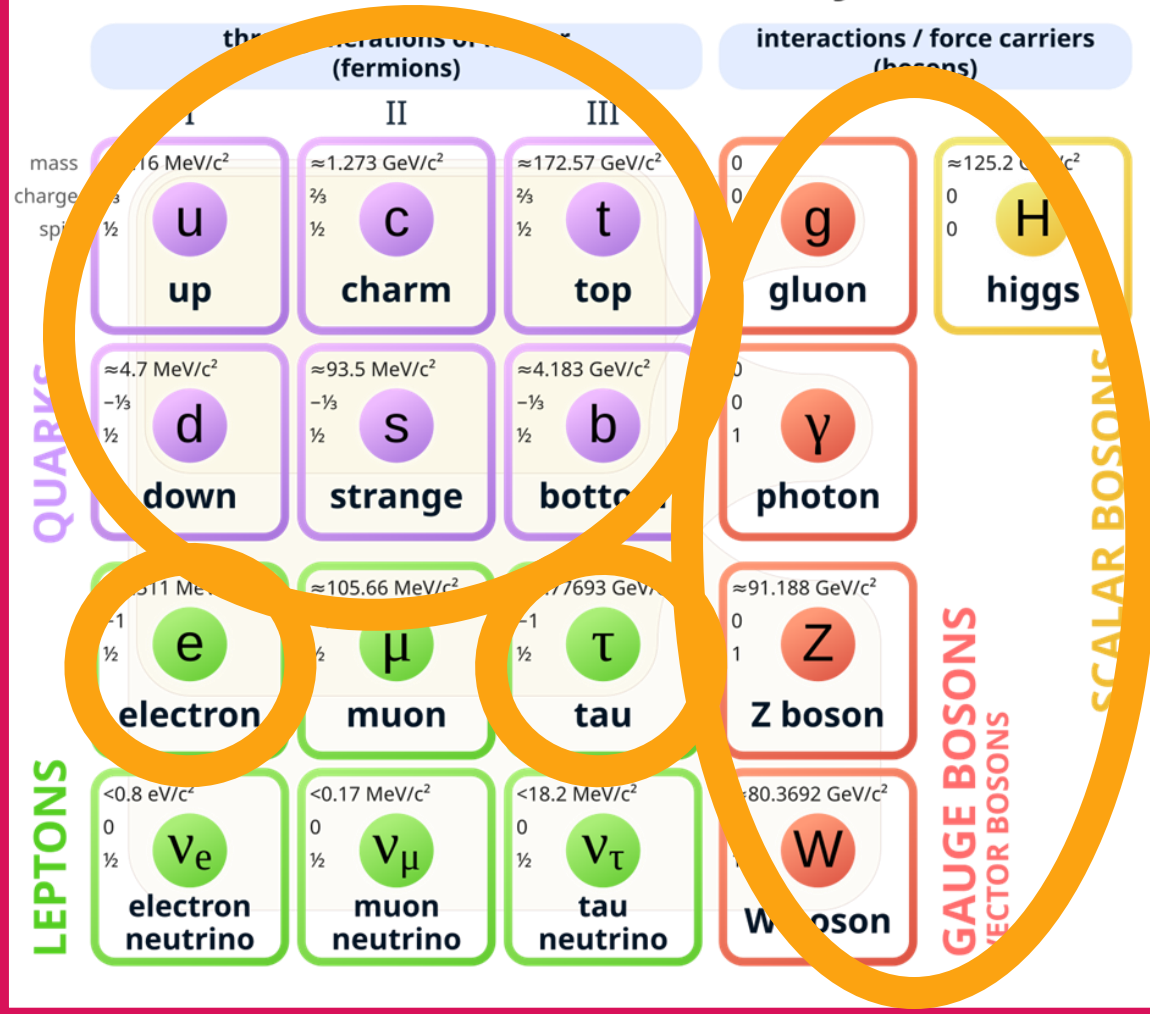


Muons: 10000 par
mètre carré par
seconde

Ont une charge
électrique (interaction
électromagnétique).
Problème!

XENON1T

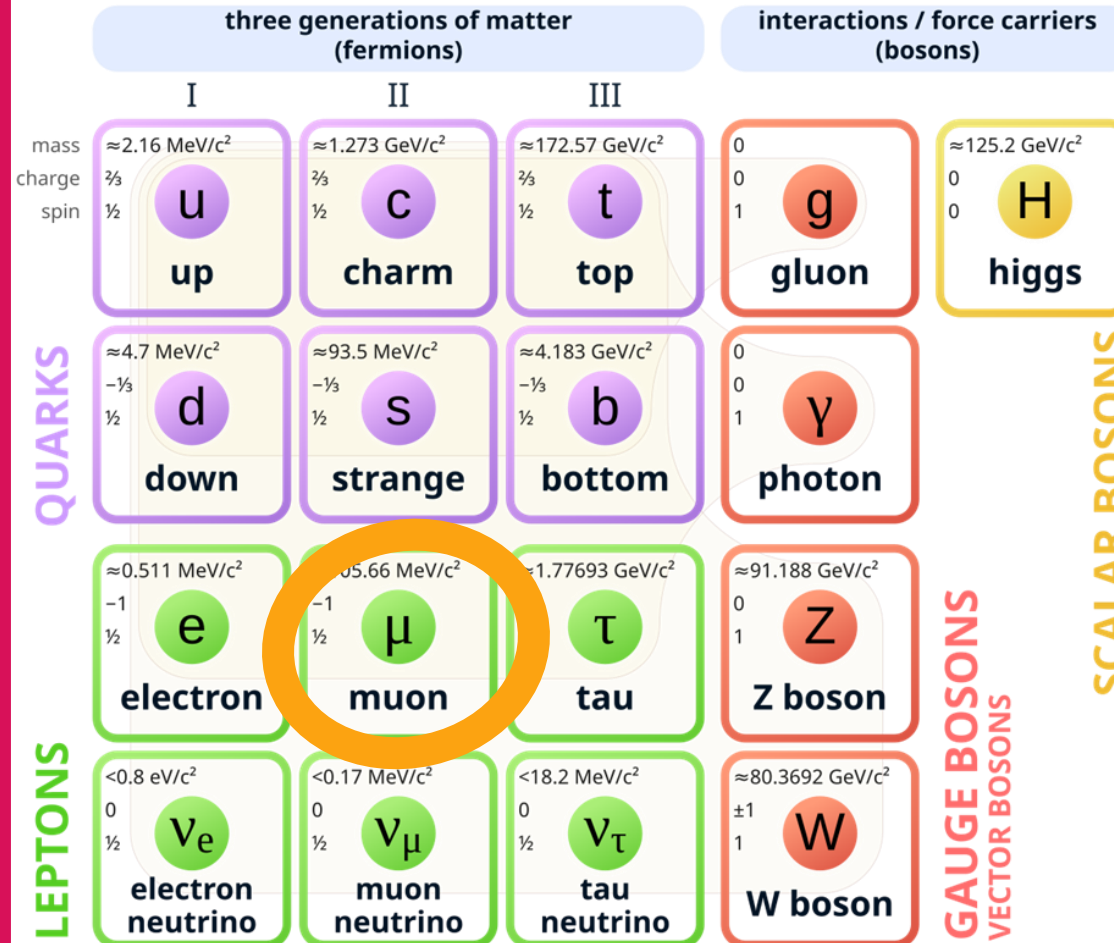
Standard Model of Elementary Particles



Le reste: pas de problème...

XENON1T

Standard Model of Elementary Particles



XENON1T



XENON1T



XENON1T

The background of the slide features a photograph of a rugged mountain landscape. The top portion shows a sharp, rocky peak against a clear blue sky. The bottom portion shows a steep, rocky slope with some sparse vegetation. A small, rectangular inset image is visible in the center of the slope, showing a structure that appears to be part of the XENON1T experiment.

Malgré tout:
quelques muons
passent !

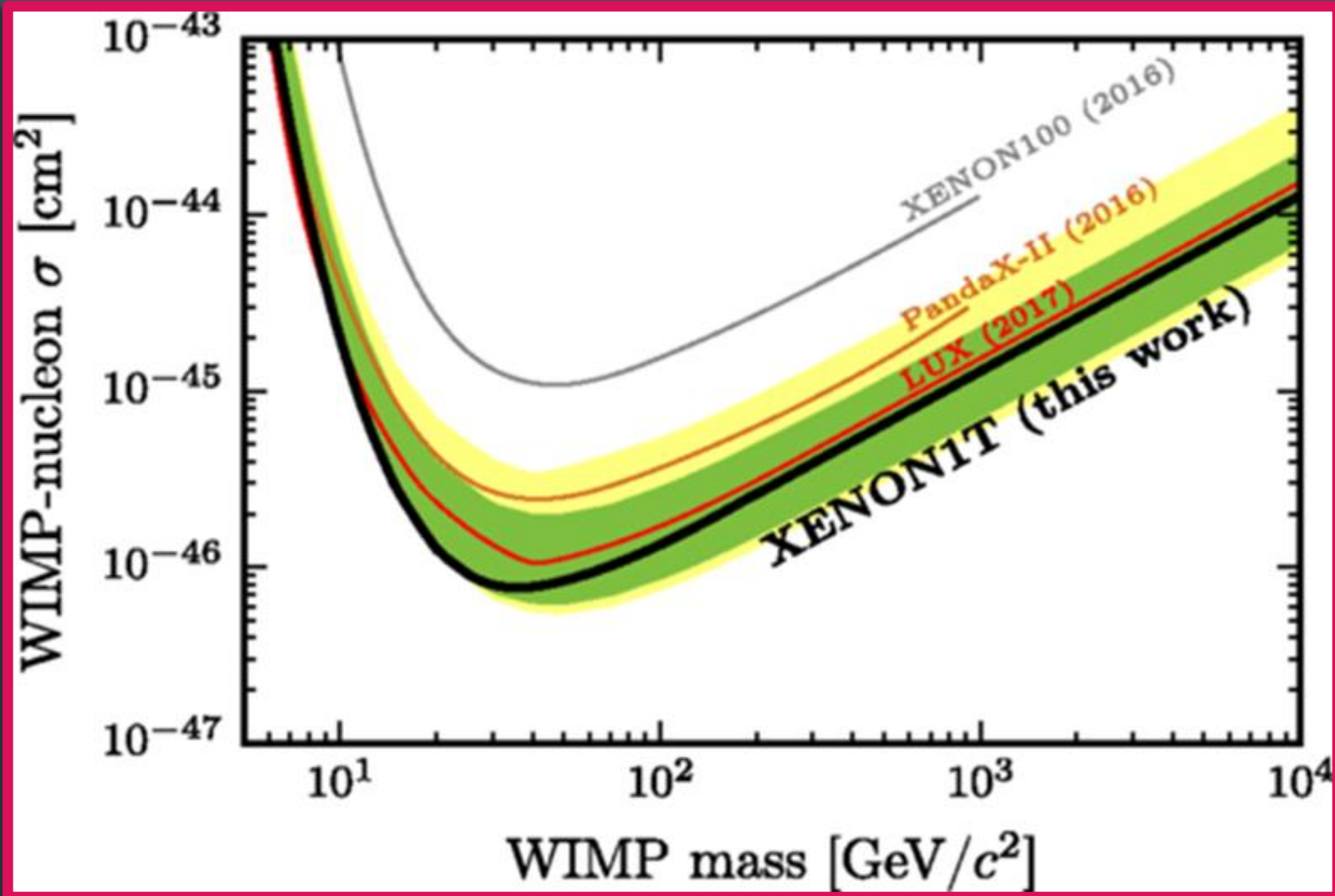
XENON1T



XENON1T

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

XENON1T: contraintes



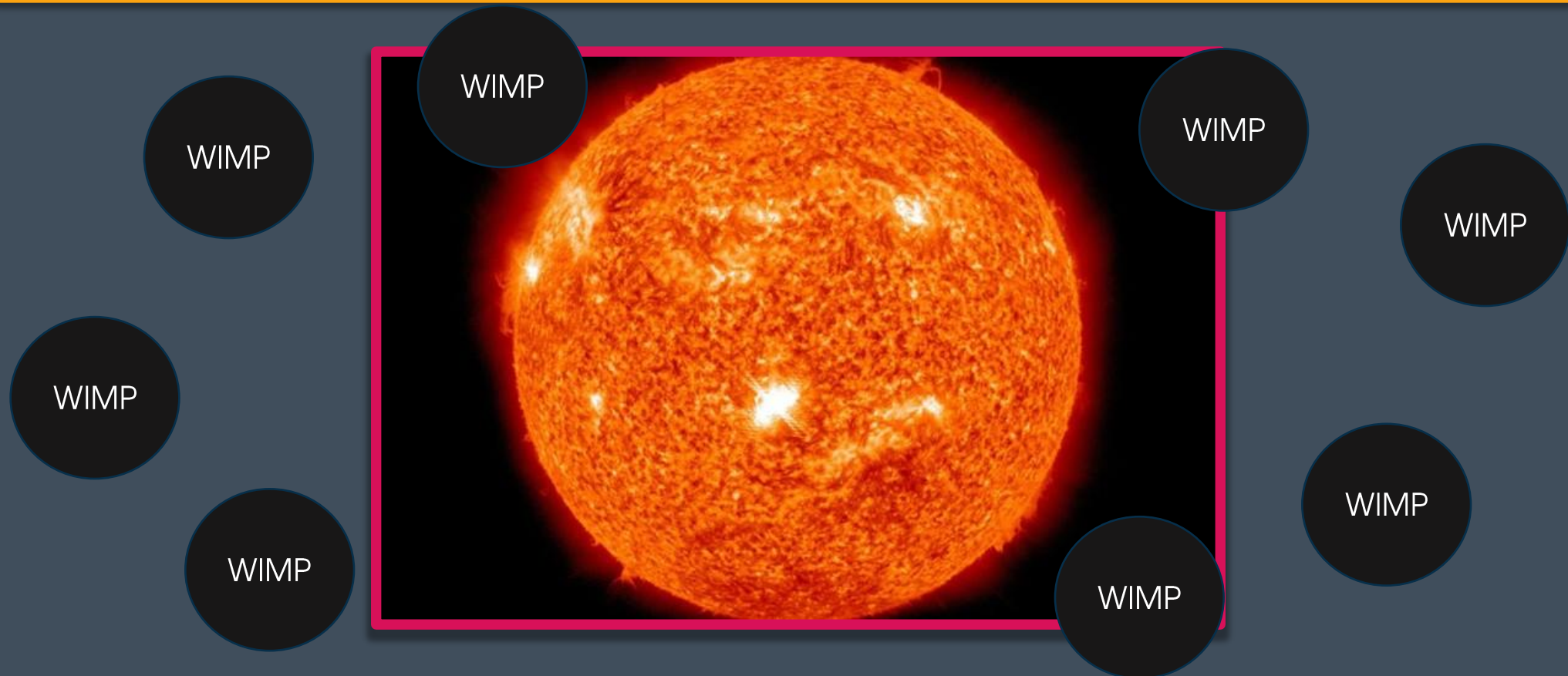
Détection indirecte

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



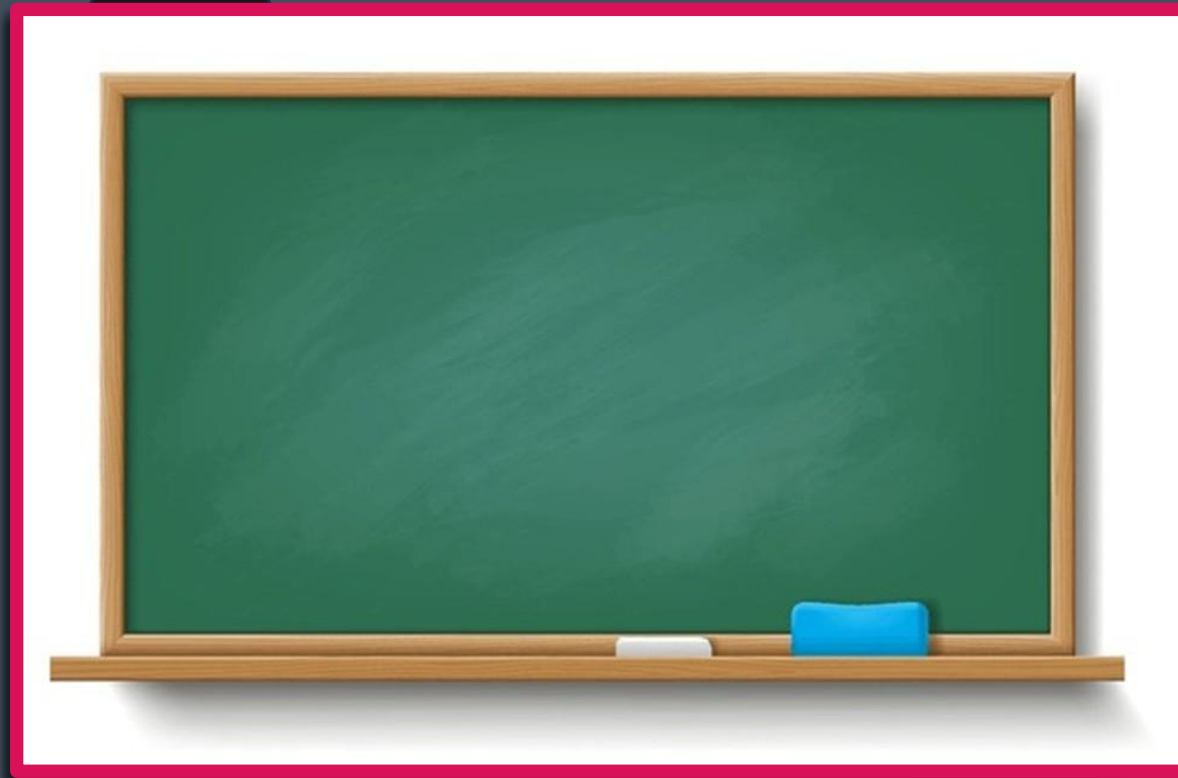
Capture de WIMPs par le soleil

Exemple: capture de WIMPs par le soleil

WIMP

WIMP

WIMP



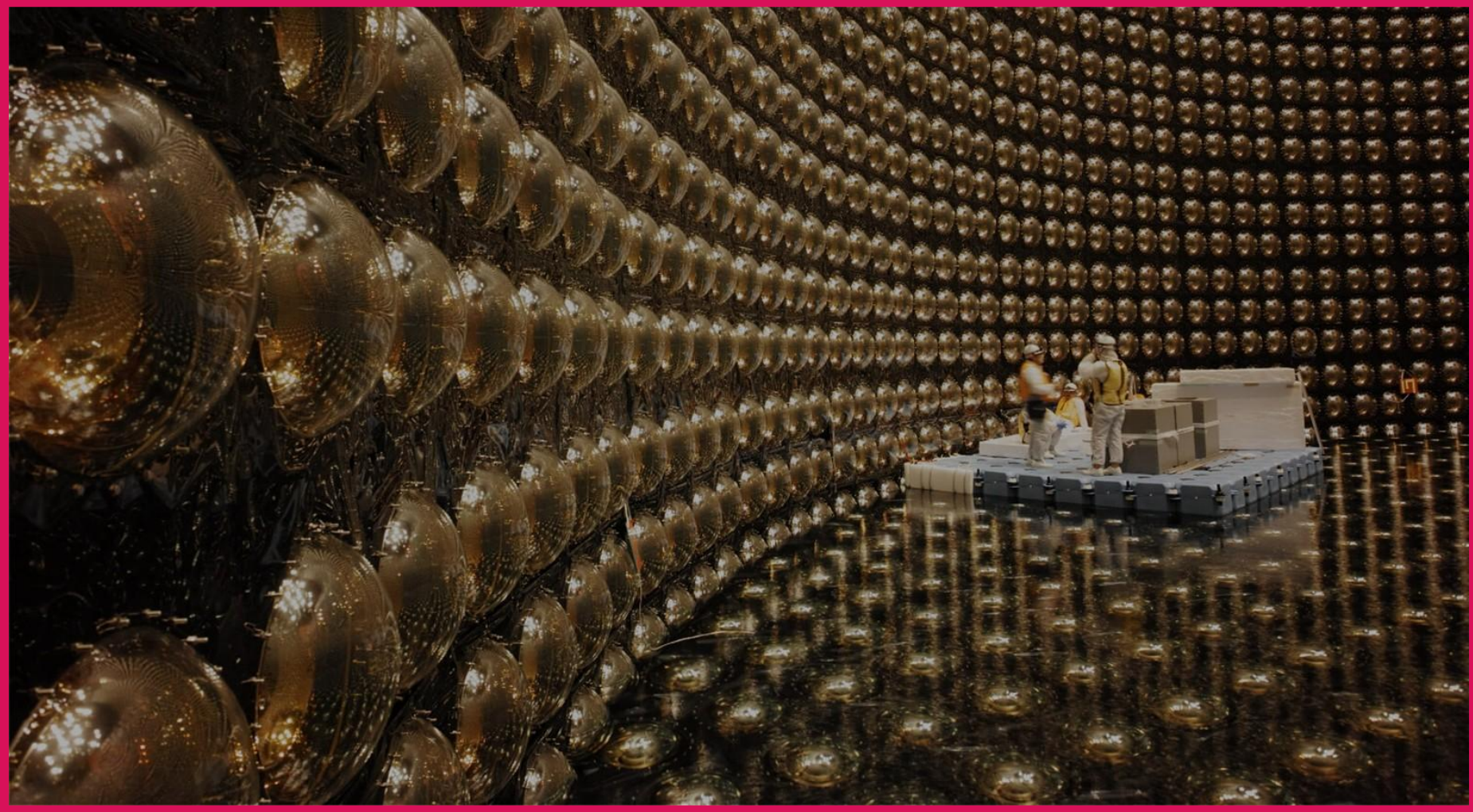
WIMP

WIMP

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



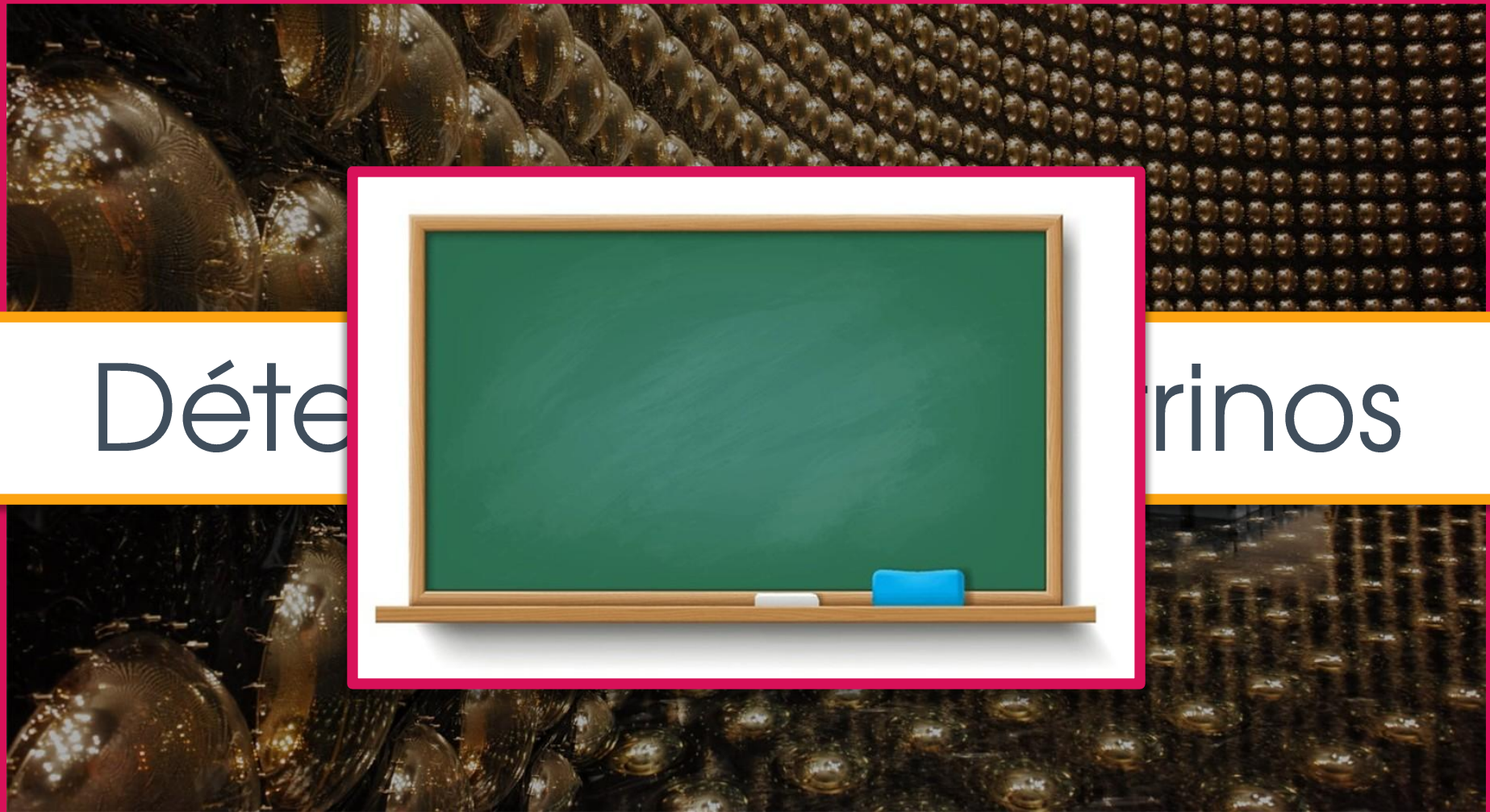
Super-Kamiokande

Détection

Neutrinos



Super-Kamiokande



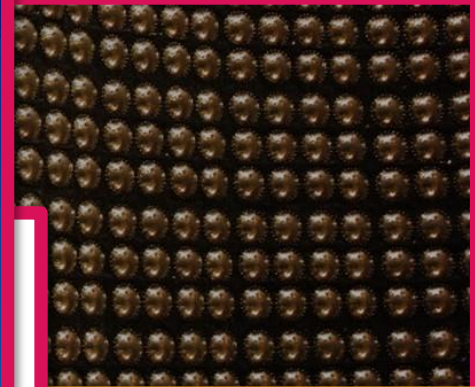
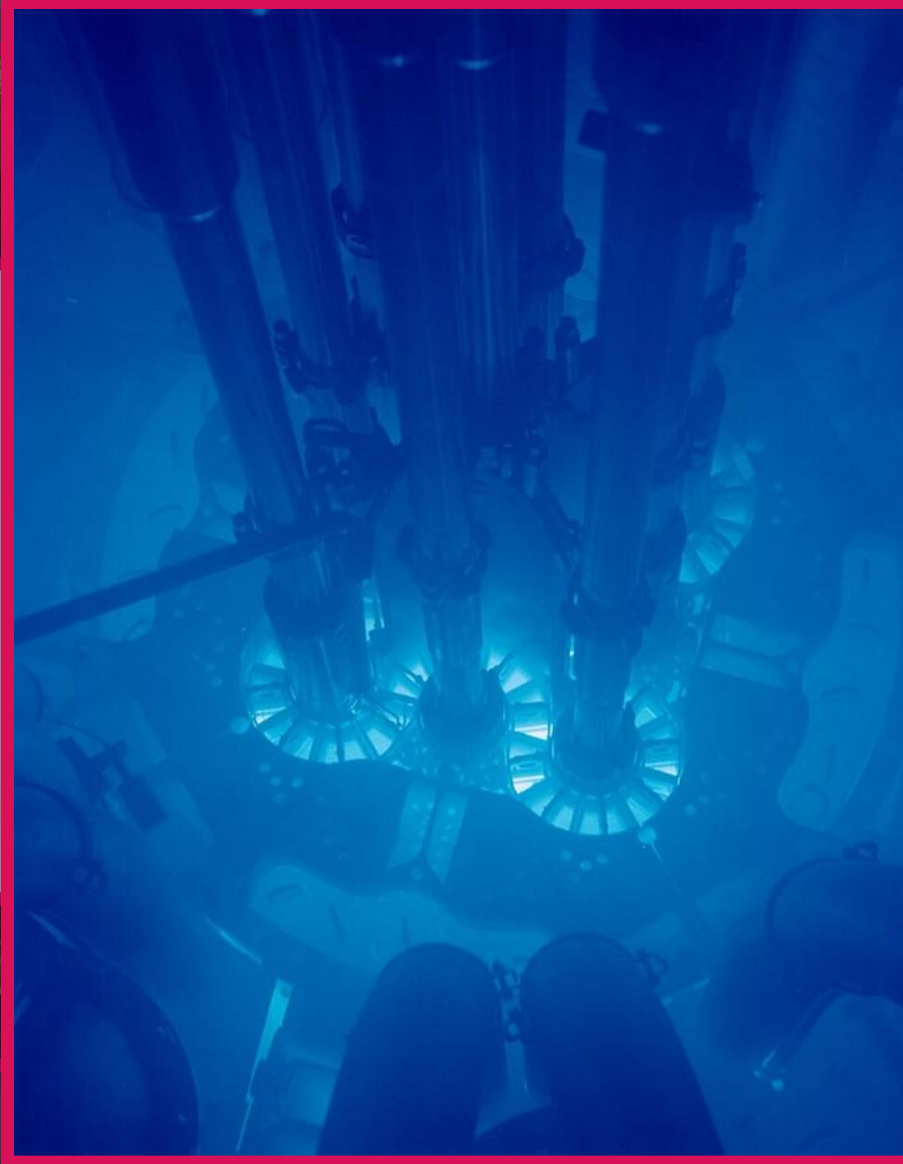
Déte

rinos

Super-Kamiokande



Déte



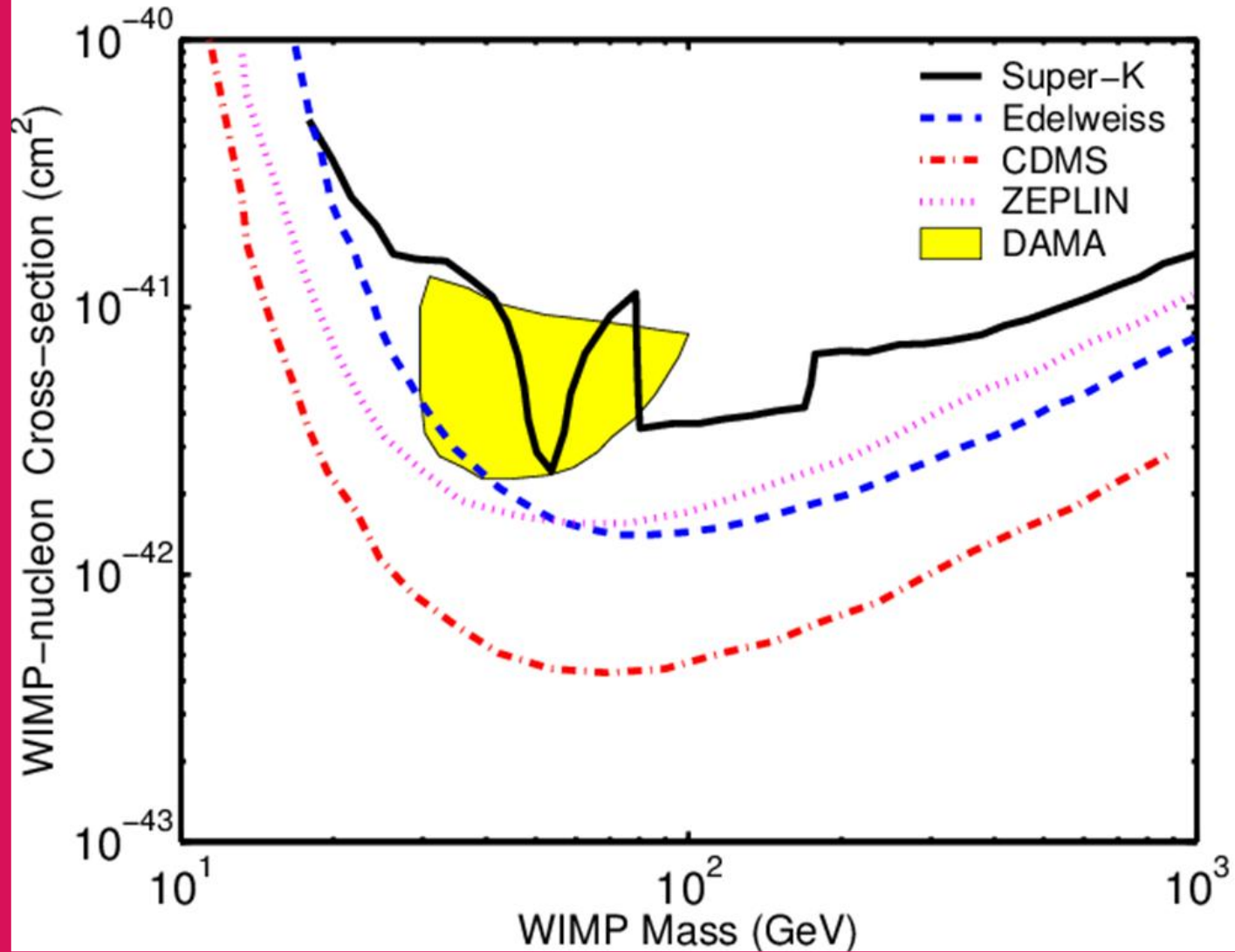
rinos



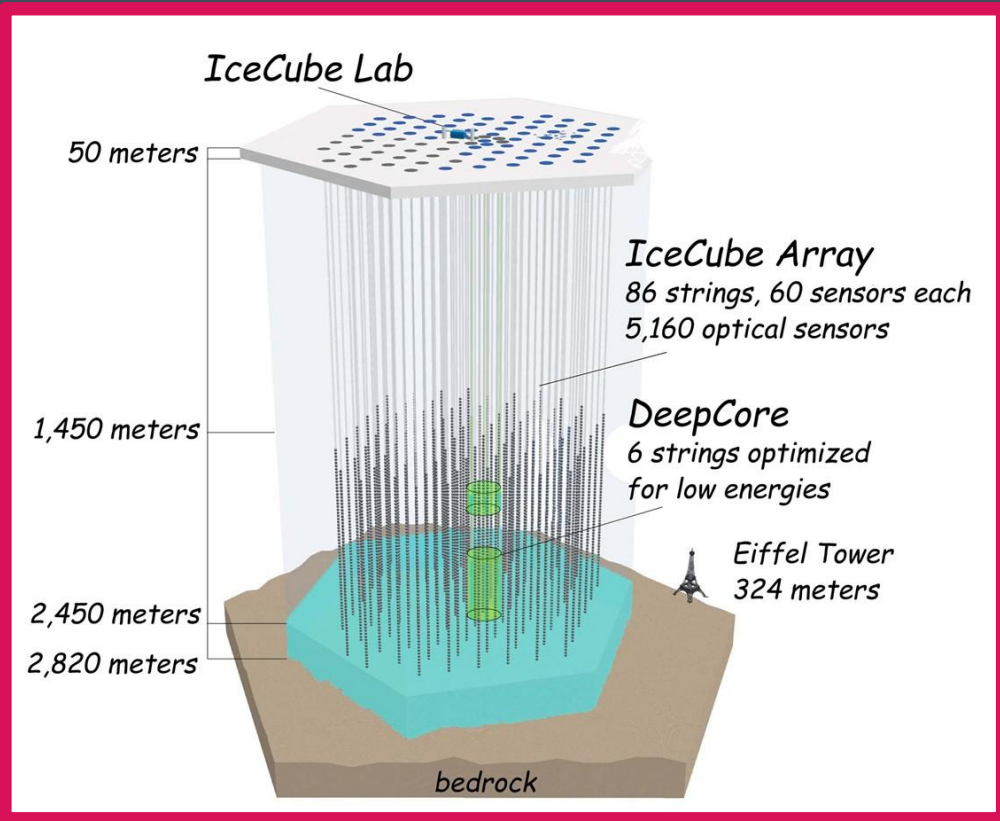
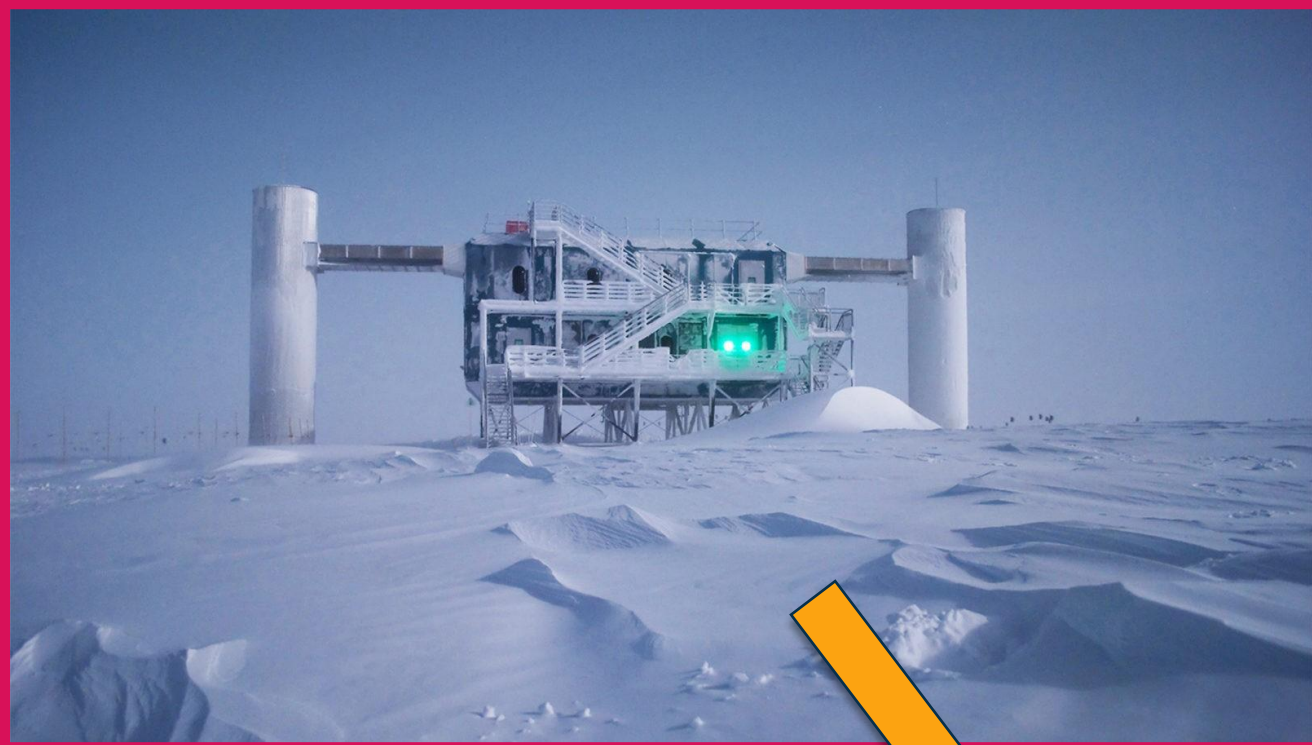
Super-Kamiokande

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

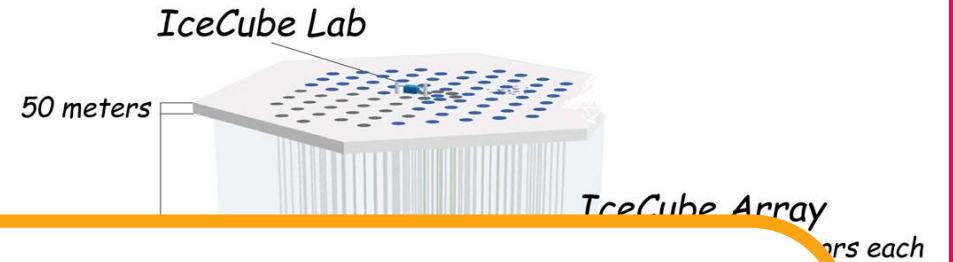
Super-Kamiokande



IceCube



IceCube



L'ULB participe à
IceCube!



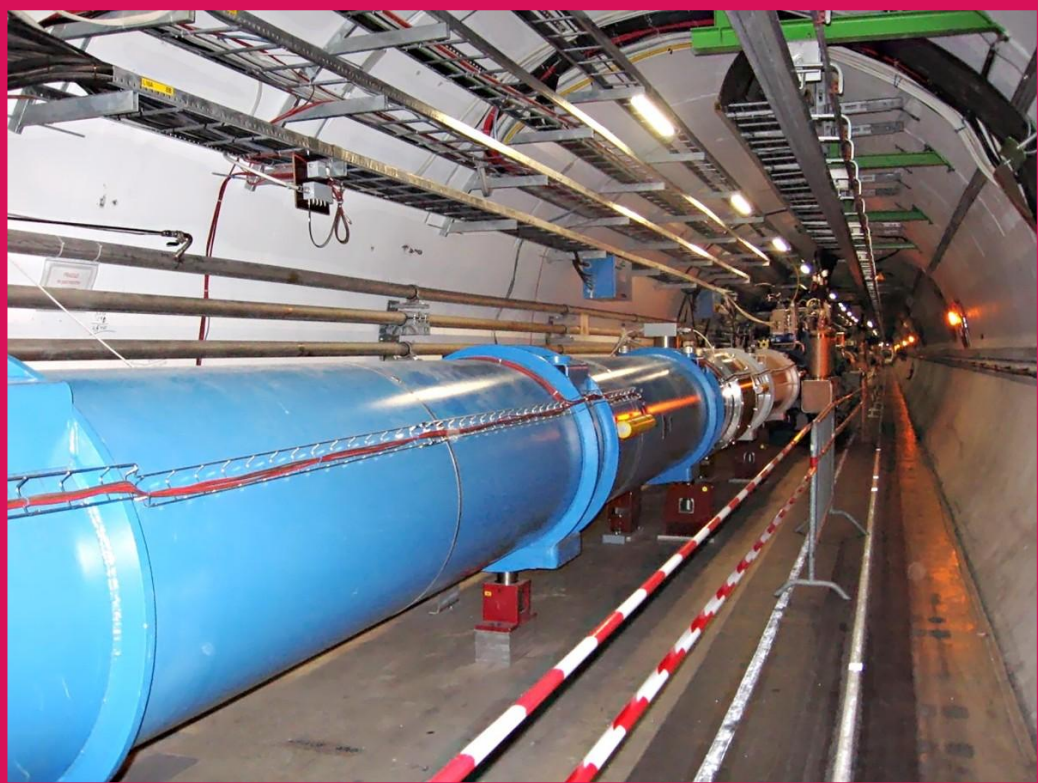
Détection aux collisionneurs

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 collisionner.
- $E = mc^2$: la masse est une forme d'énergie. On convertit de l'énergie cinétique en énergie de masse.
- On créé (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

Accélérateur

Collision



$$p^2/R$$

$$\frac{p^2}{c^2}$$

Grand collisionneurs de hadrons

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

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

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

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

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

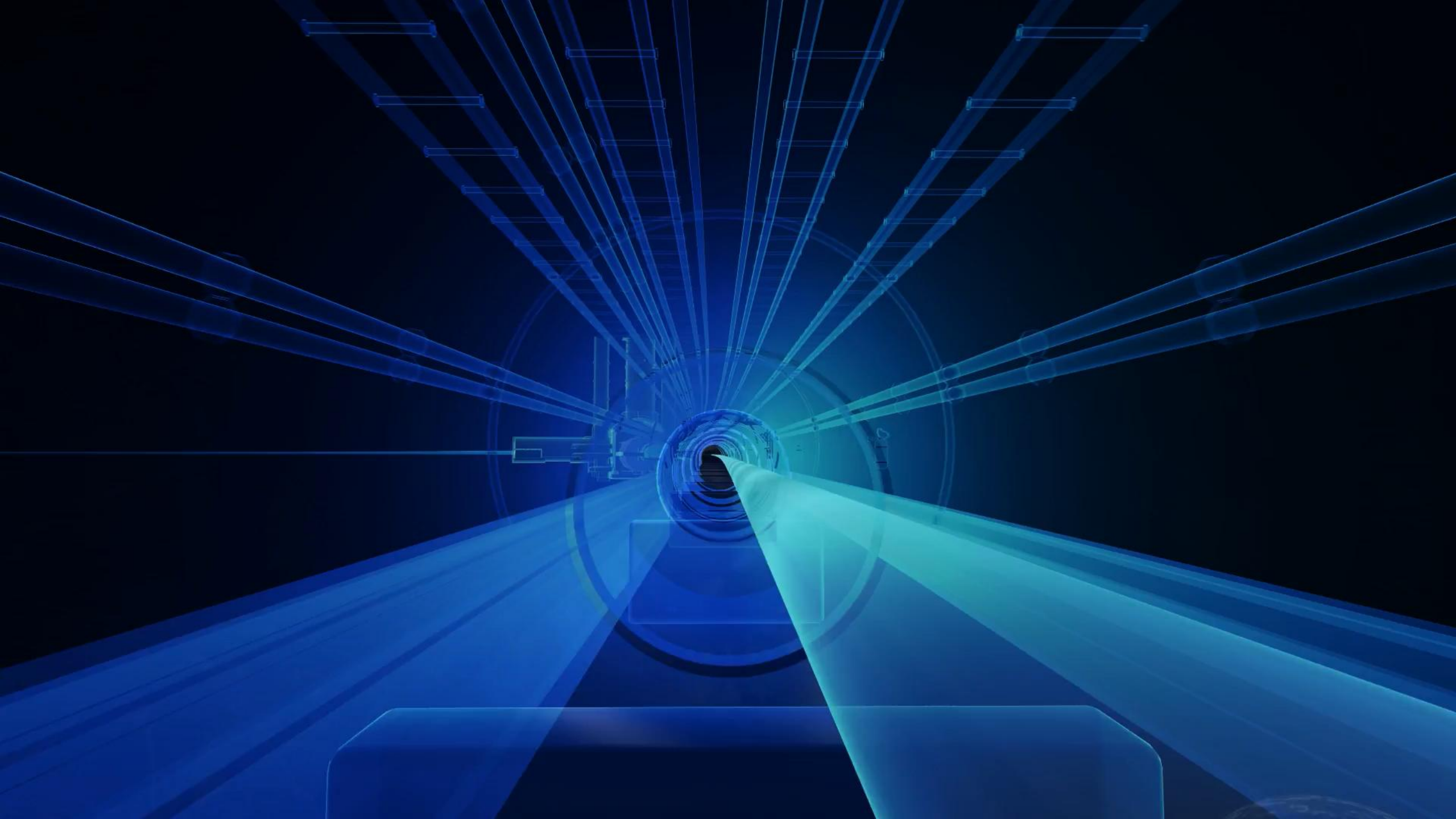
Grand collisionneurs de hadrons

$$v = 0.9999999999 \times c$$

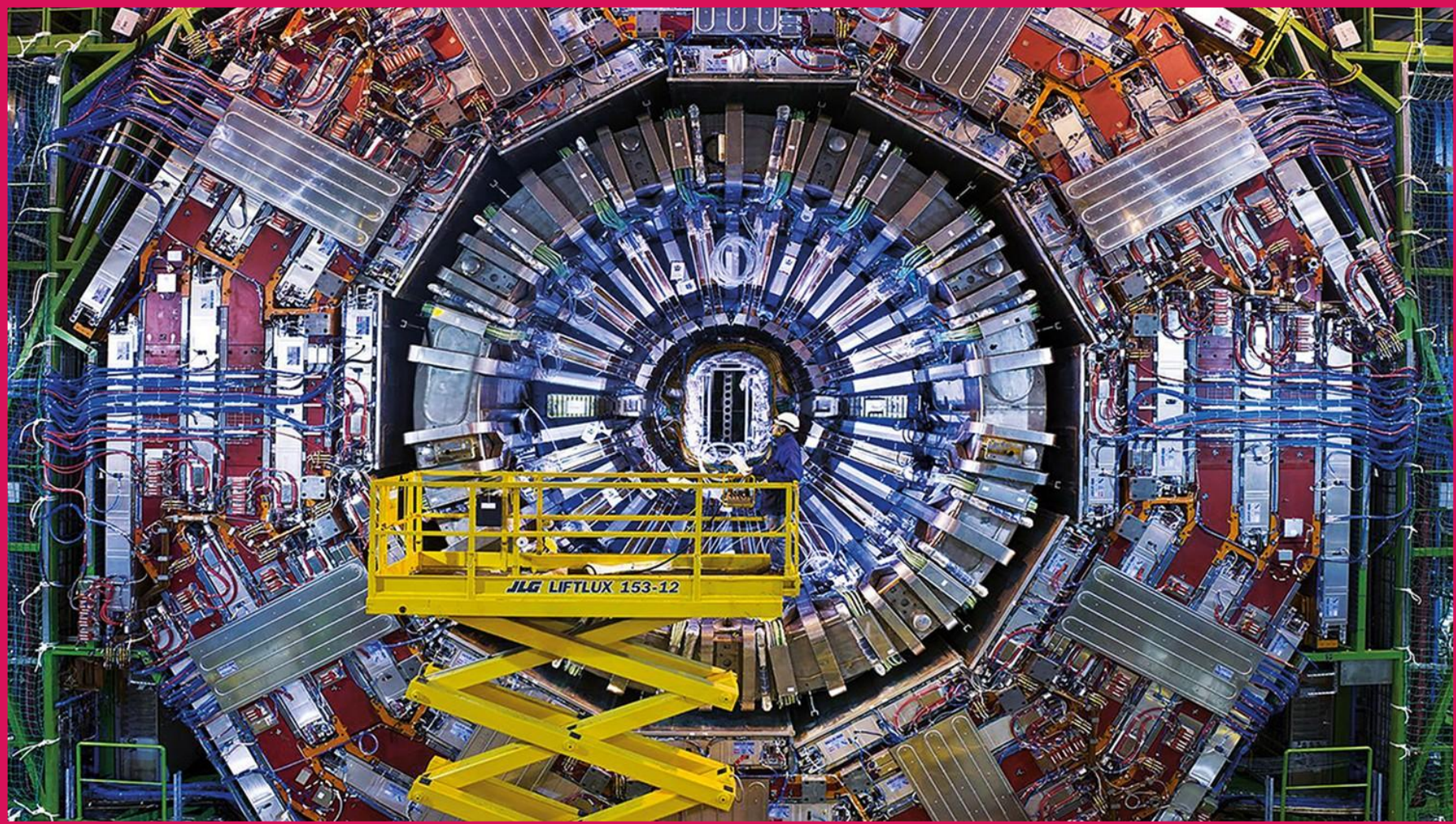
Magnet frigo: $\sim 0.001 \text{ T}$

Aimants du LHC: $\sim 8 \text{ T}$

Boucle de 27km: 11000 fois par seconde.



Détecteur CMS



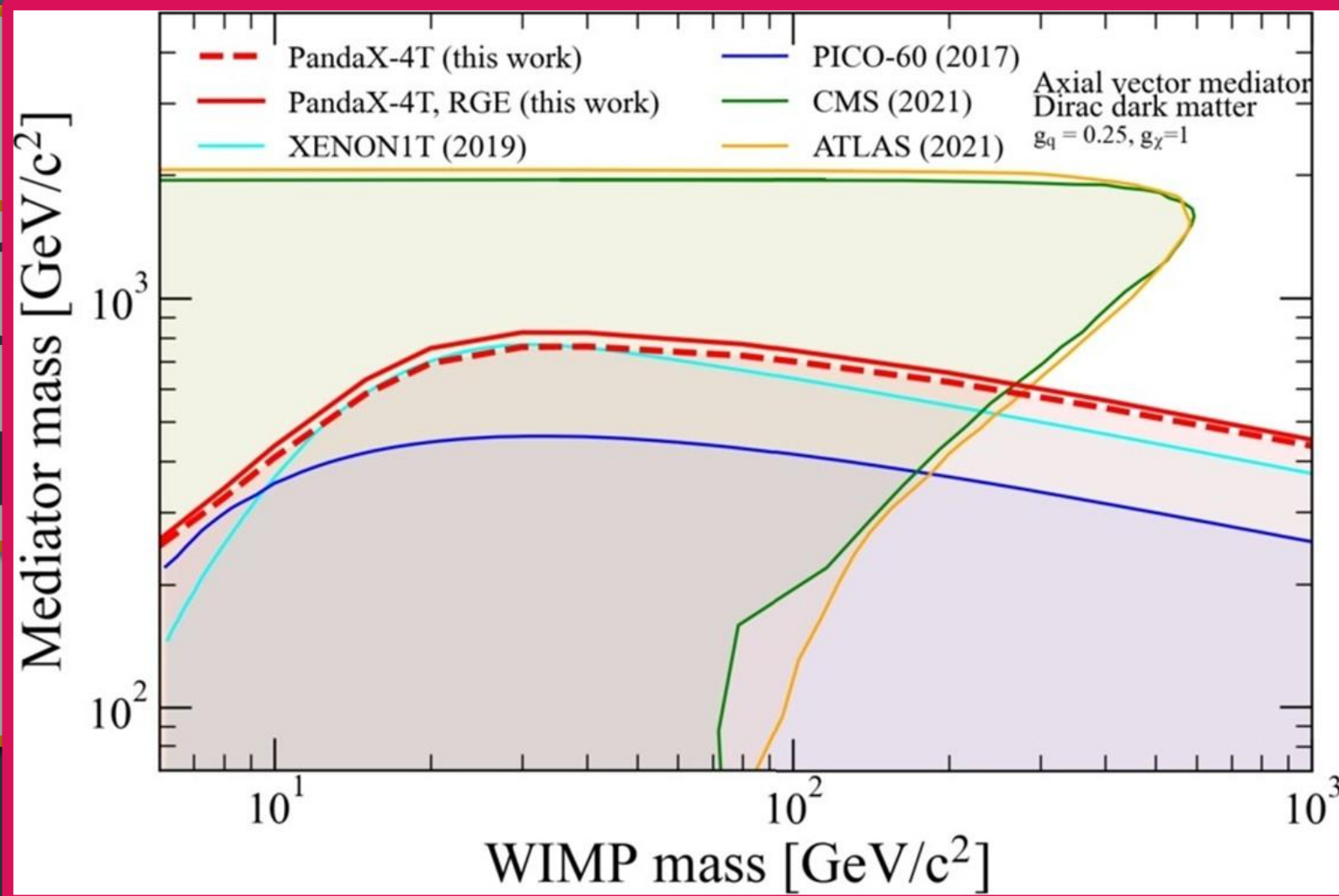
Détecteur CMS

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 $a(t)$

Le

es

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:

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

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

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

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

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:
$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_i \vec{v}_i) + 3 \frac{\dot{a}}{a} \rho_i = \Sigma_i - \dot{N}_i$$

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

Poisson eq.
$$\frac{1}{a^2} \nabla^2 \phi = 4\pi G a^2 (\rho - \bar{\rho}),$$

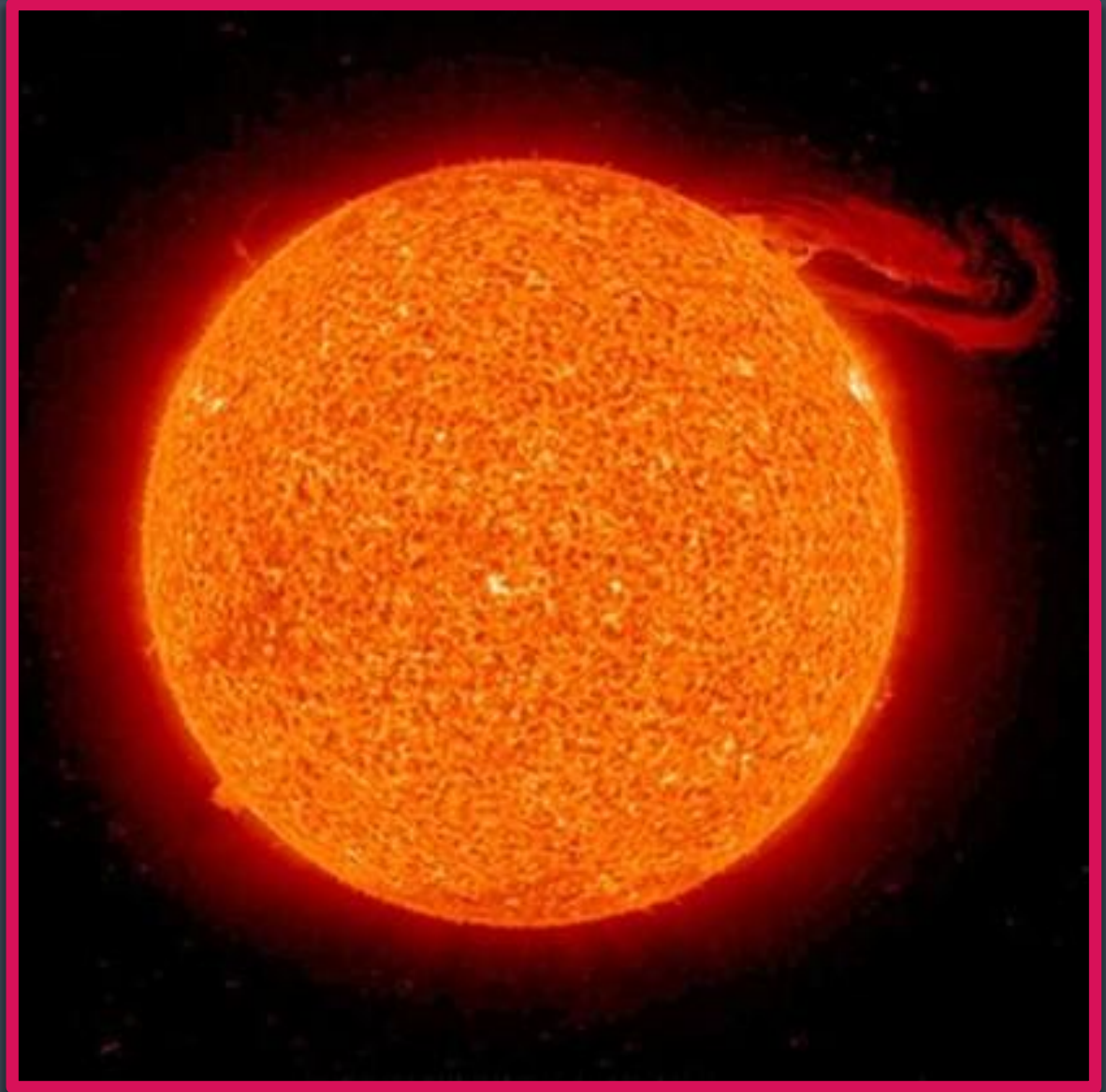
Friedmann eq. for scale factor $a(t)$

Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui

Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui



Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui



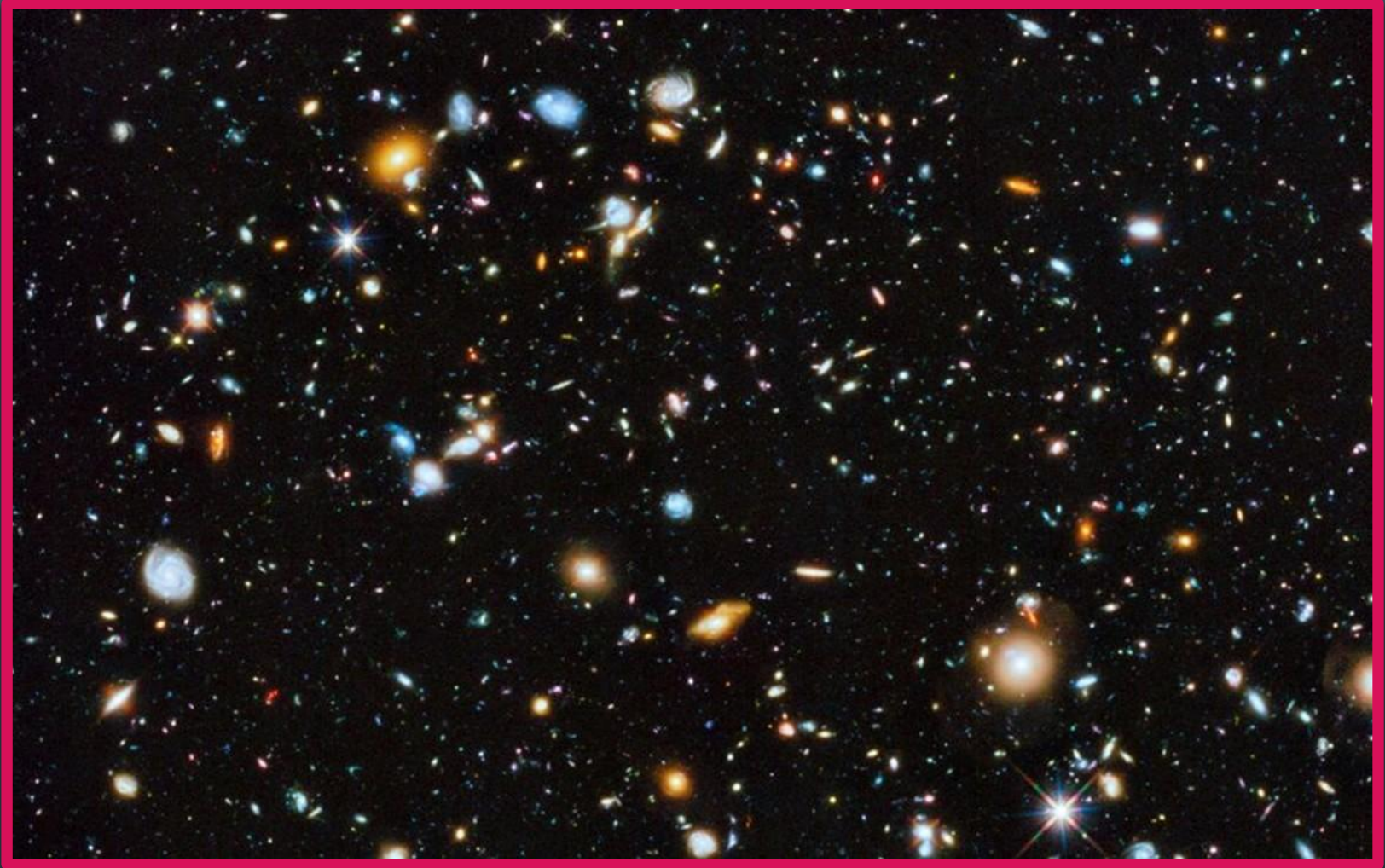
Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui



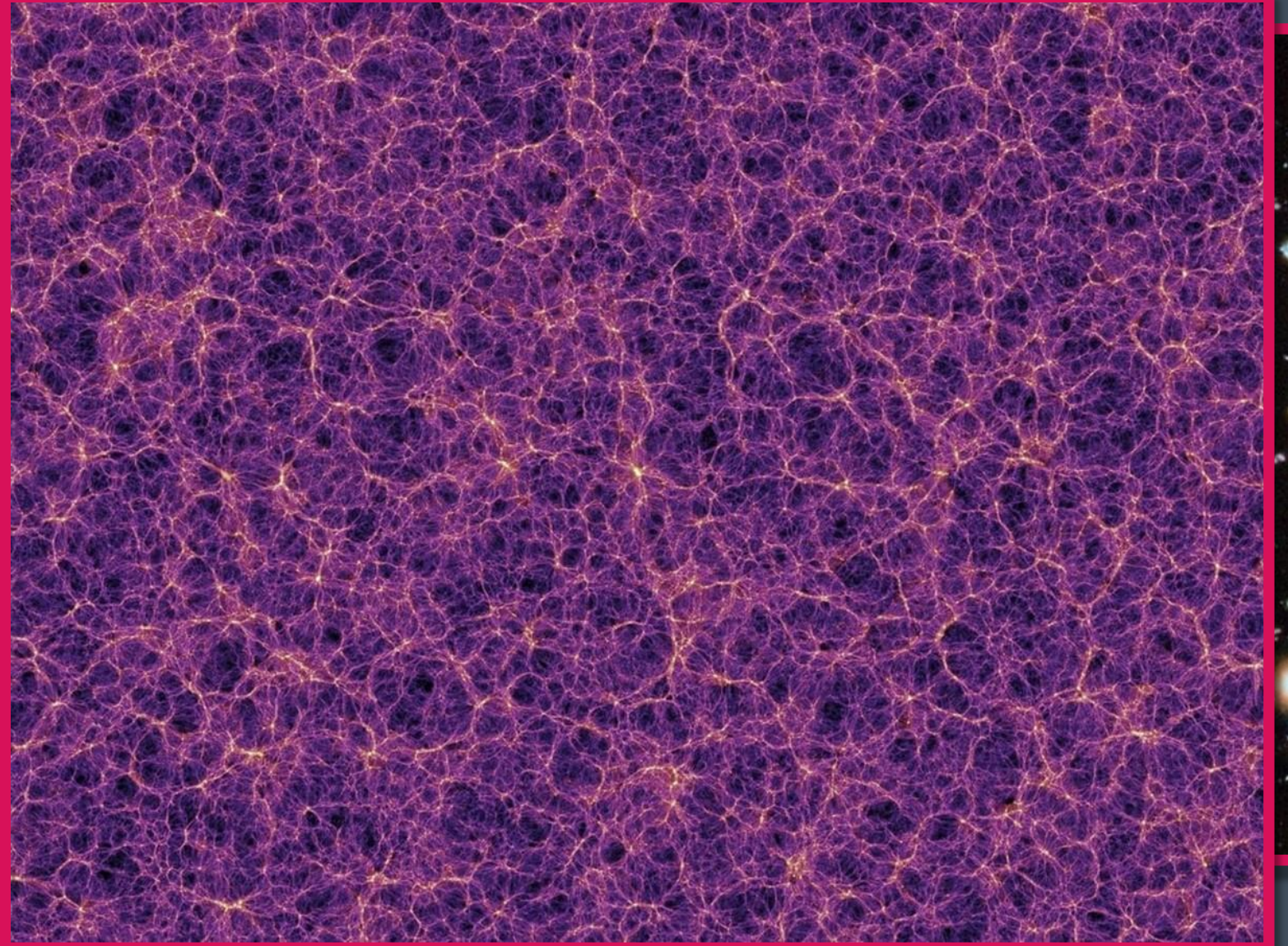
Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui



Les simulations cosmologiques

Temps B: aujourd'hui

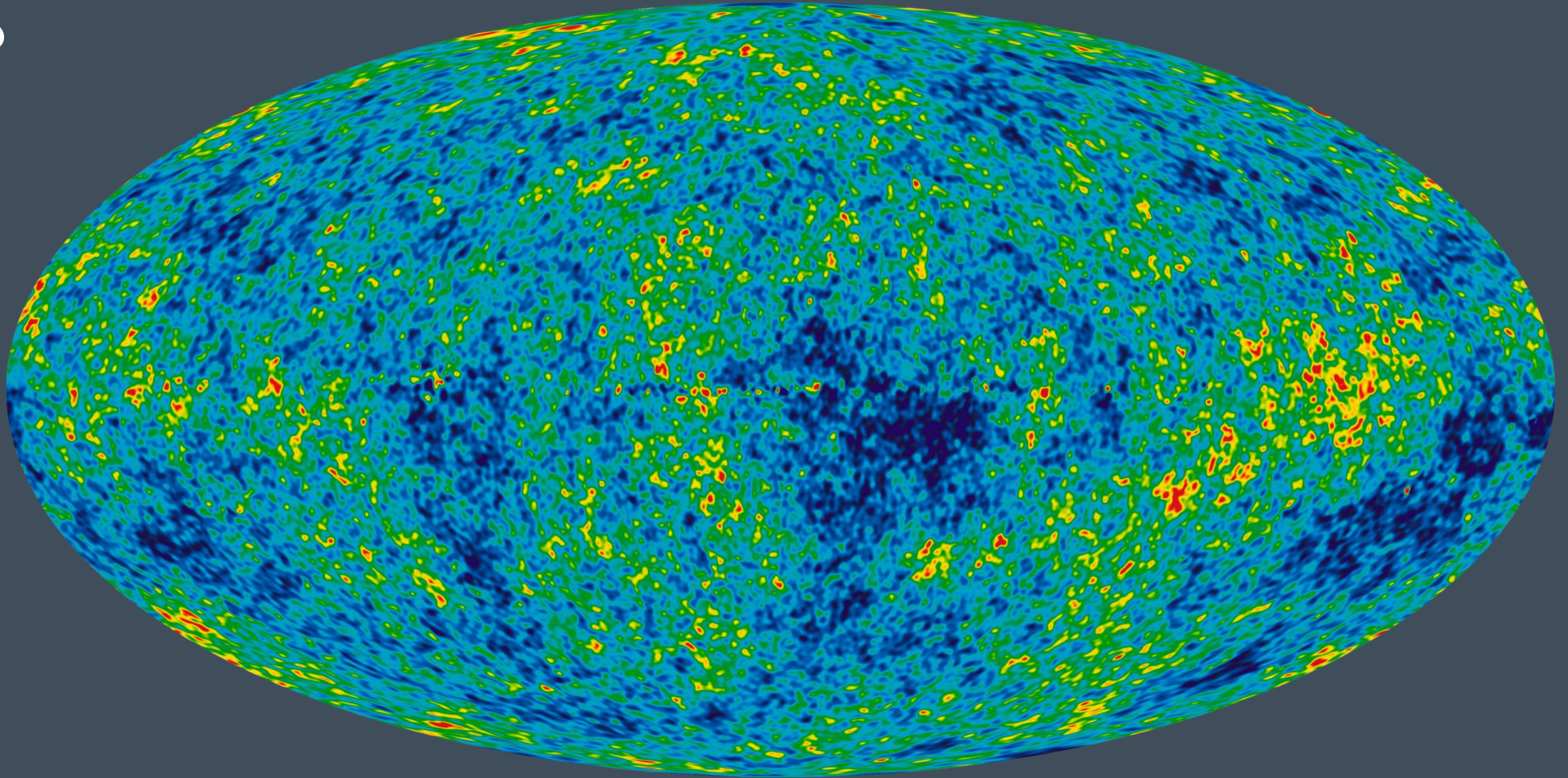


Les simulations cosmologiques

Temps A: ?

Les simulations cosmologiques

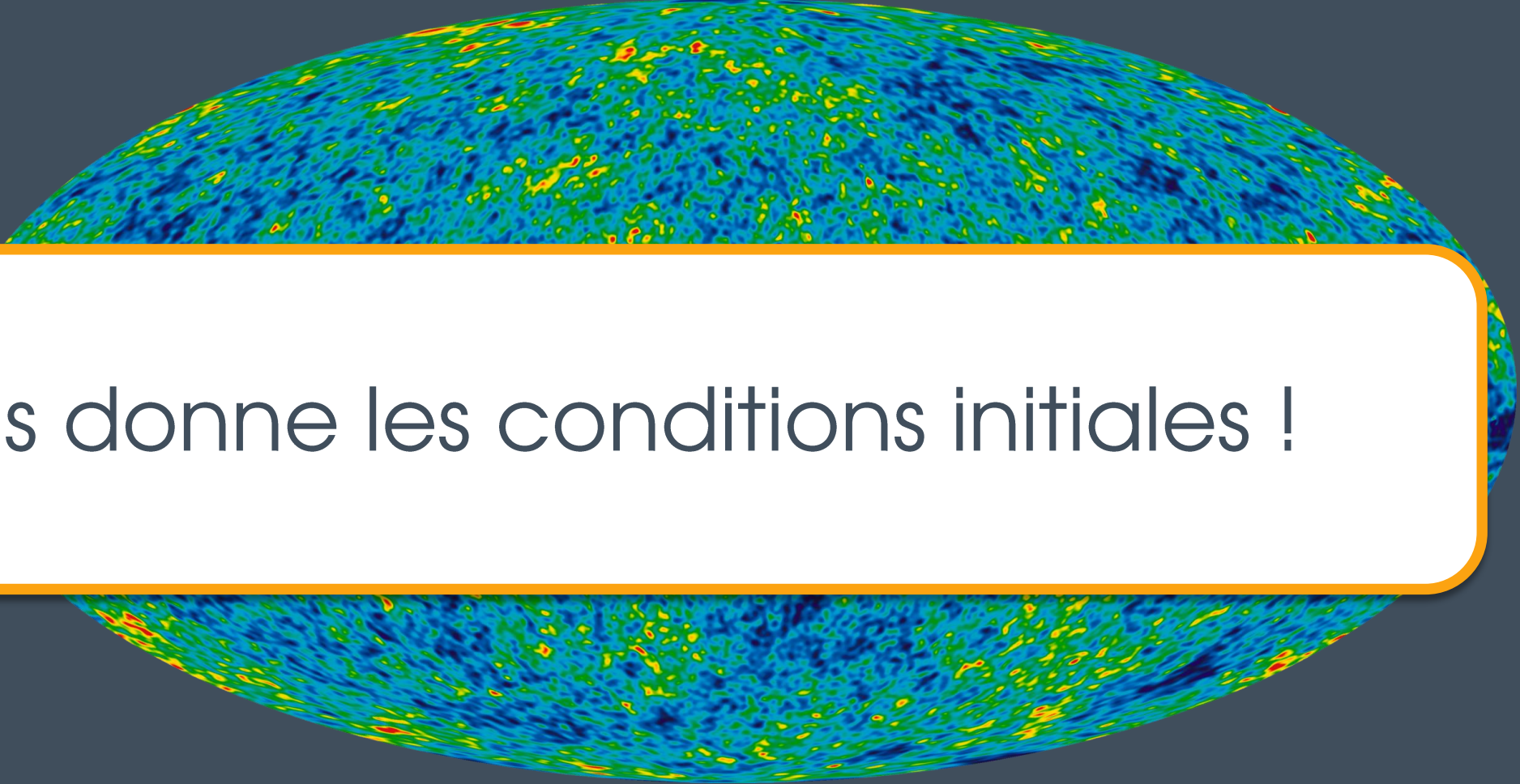
Temps A: ?



380 000 ans après le Big Bang

Les simulations cosmologiques

Temps A: ?

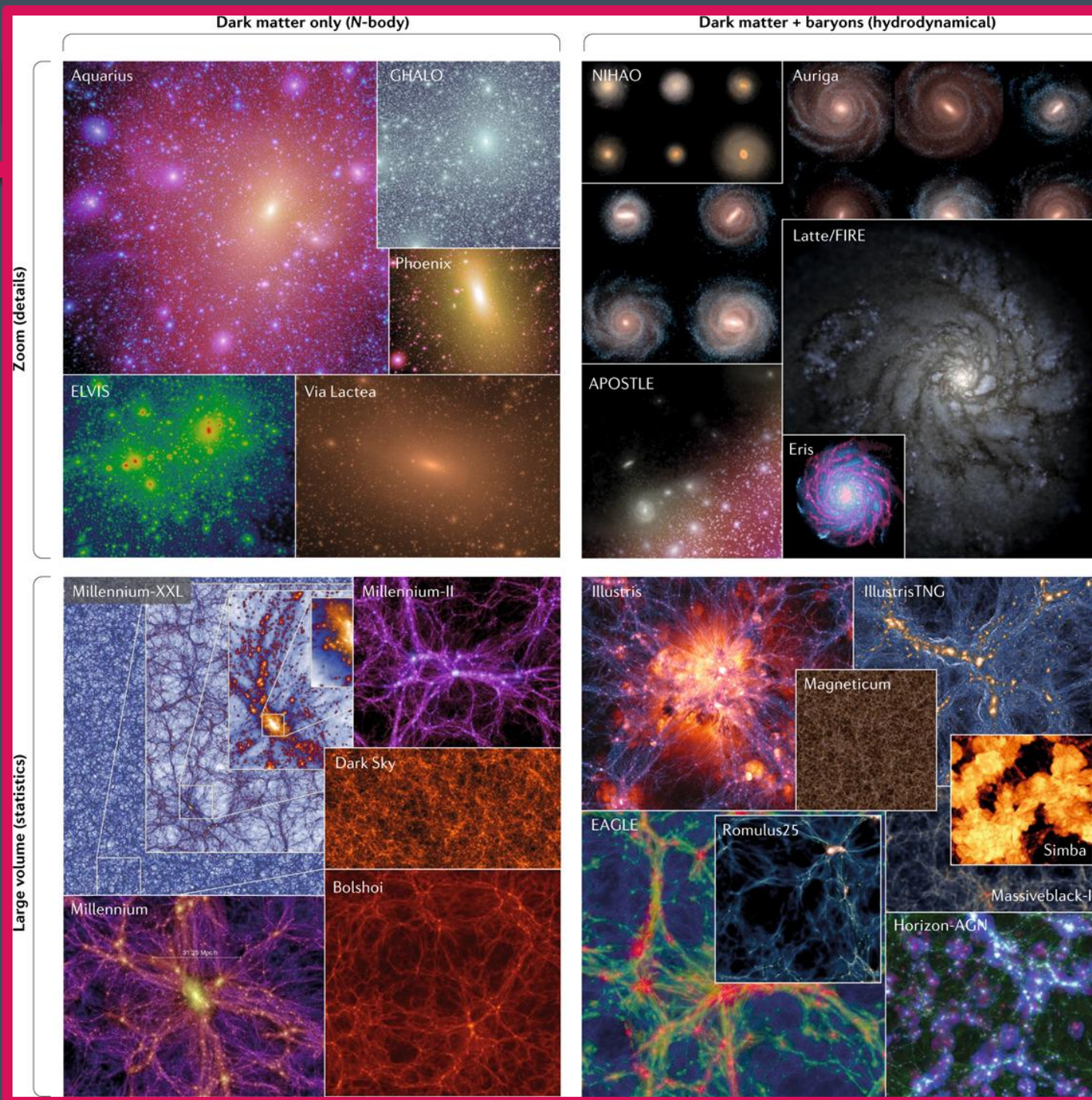


Nous donne les conditions initiales !

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 $a(t)$

Equations of Cosmological Hydrodynamics

Multispecies gas dynamics

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

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

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

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

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 ?

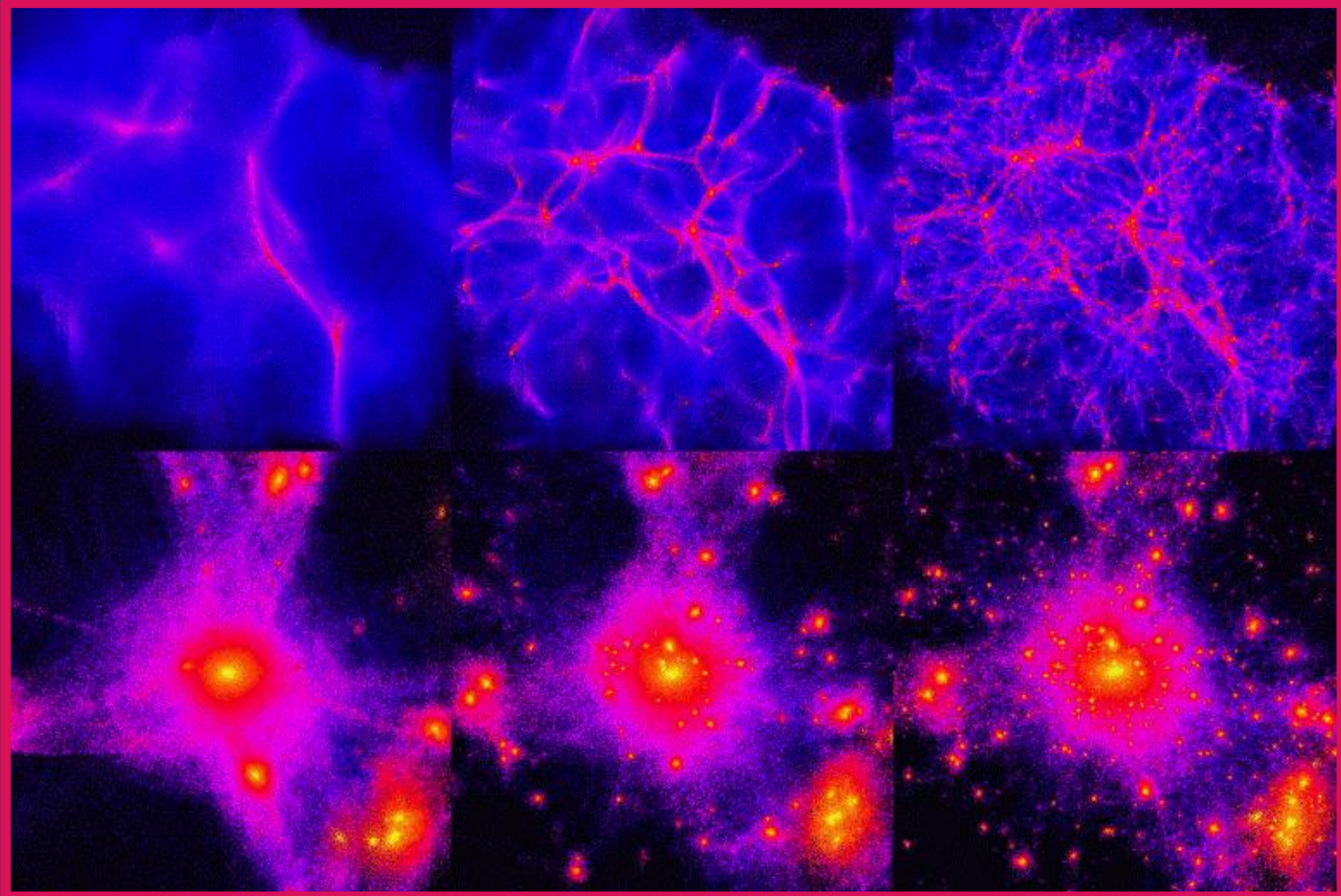
Selon sa masse, la matière noire créé plus ou moins de petites structures

La matière noire dans tout ça ?

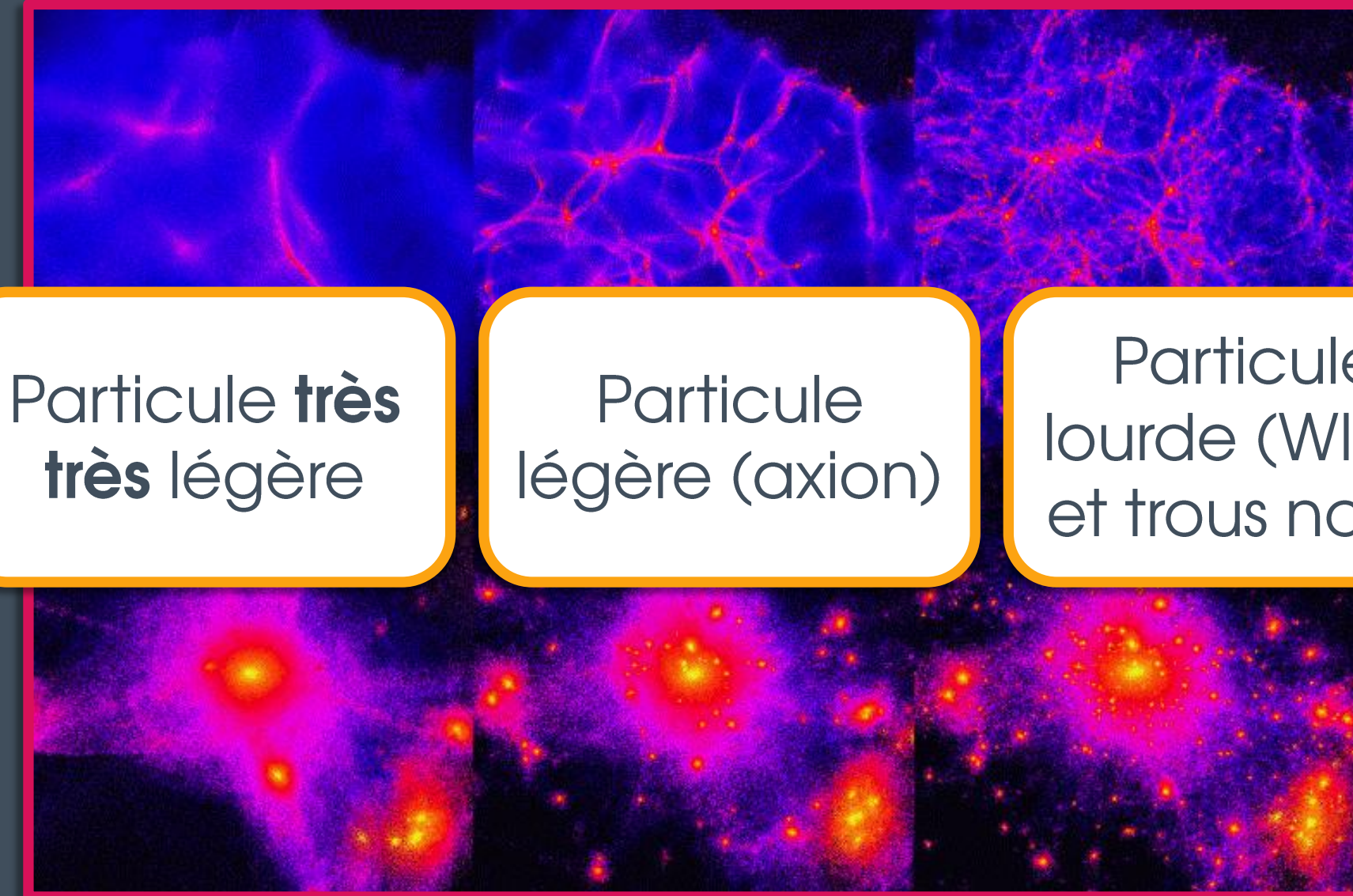
Selon sa masse, la matière
noire créé plus ou moins
de perturbations



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 ?

~~Particule très
très légère~~

Particule
légère (axion)

Particule
lourde (WIMP
et trous noirs)

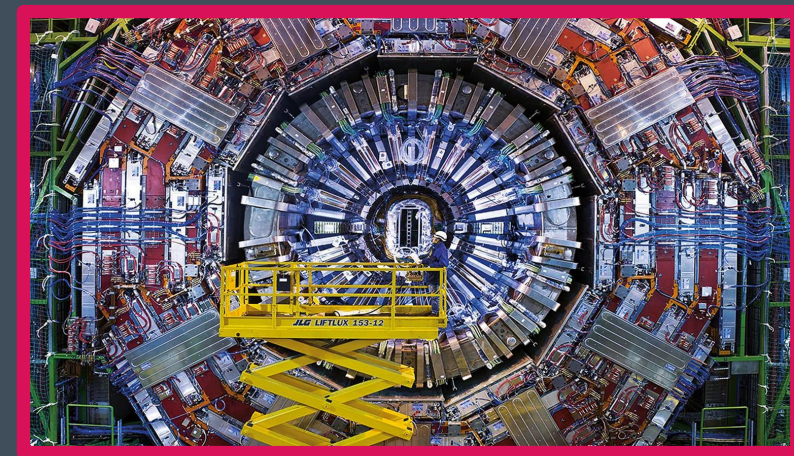
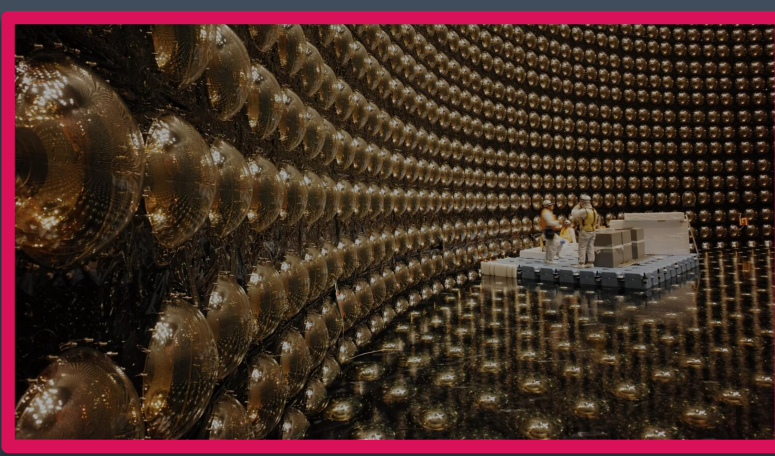
Conclusions

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 !

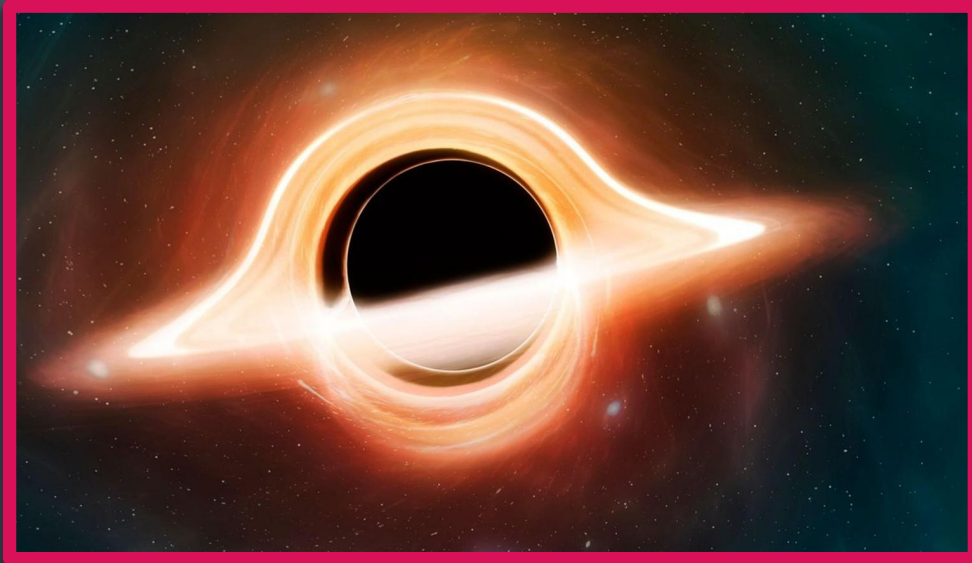


Conclusions

- 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...

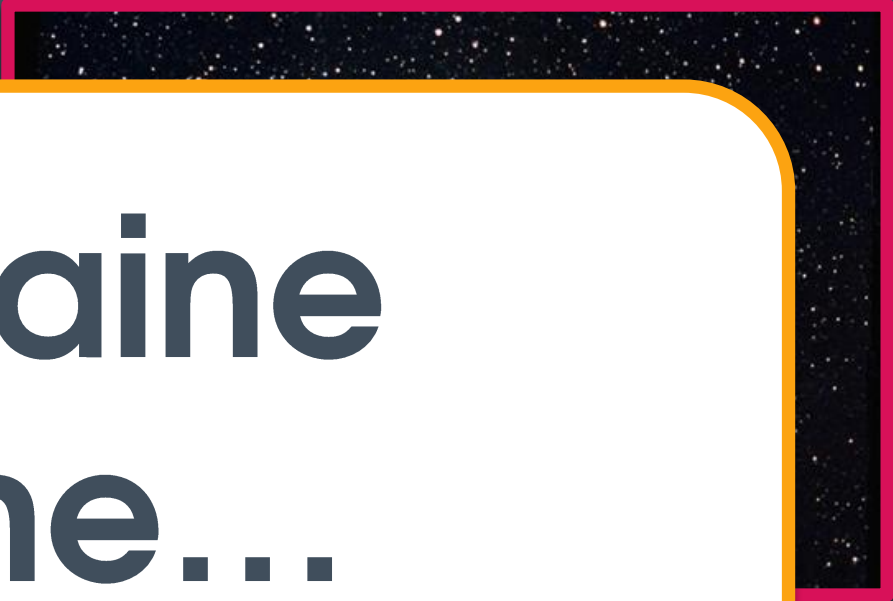
Questions en suspens

- 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...**