

## Leçon 4:

Trous noirs primordiaux et matière  
noire à l'échelle subgalactique

Nicolas Esser

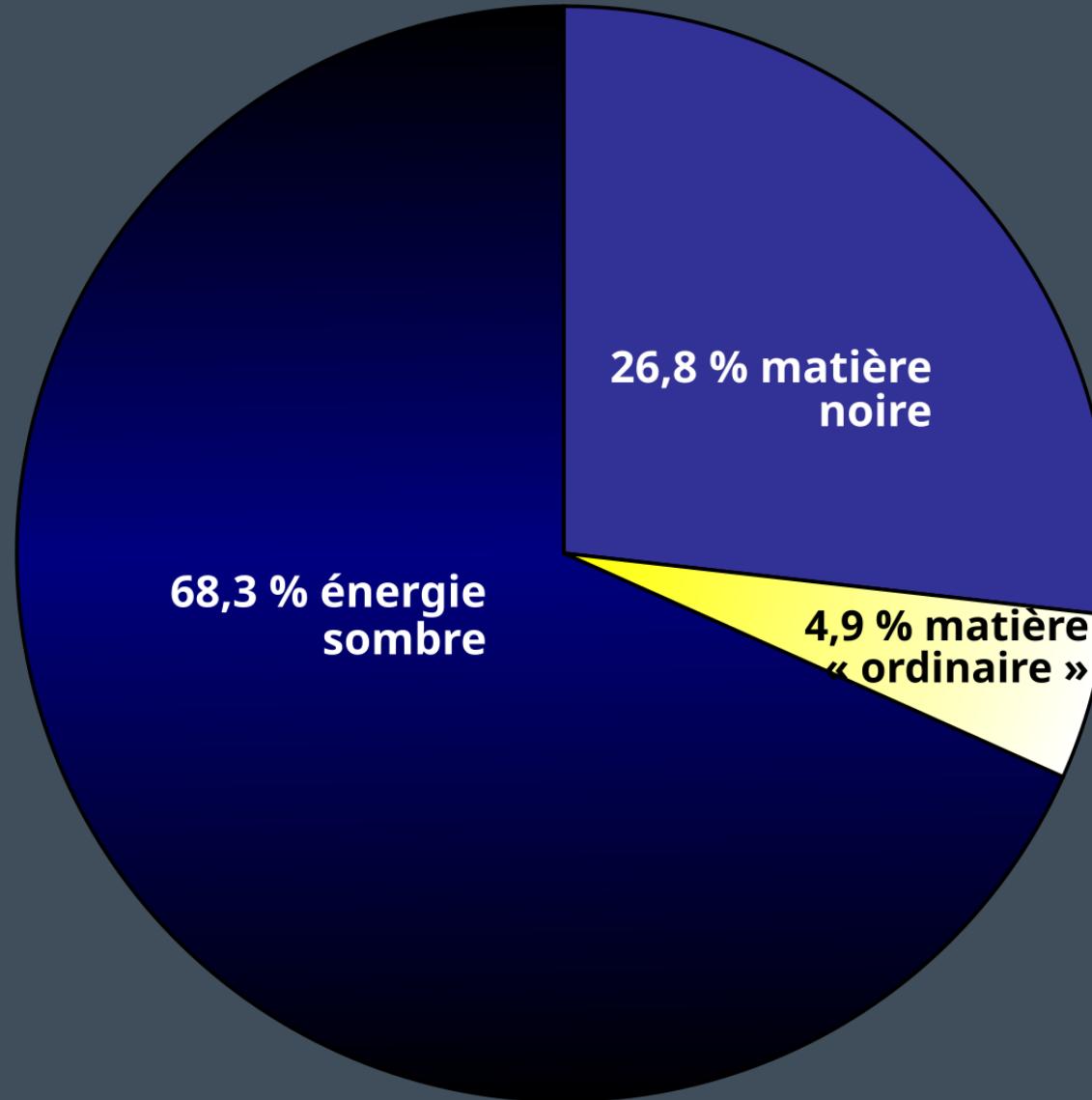
# Plan du cours

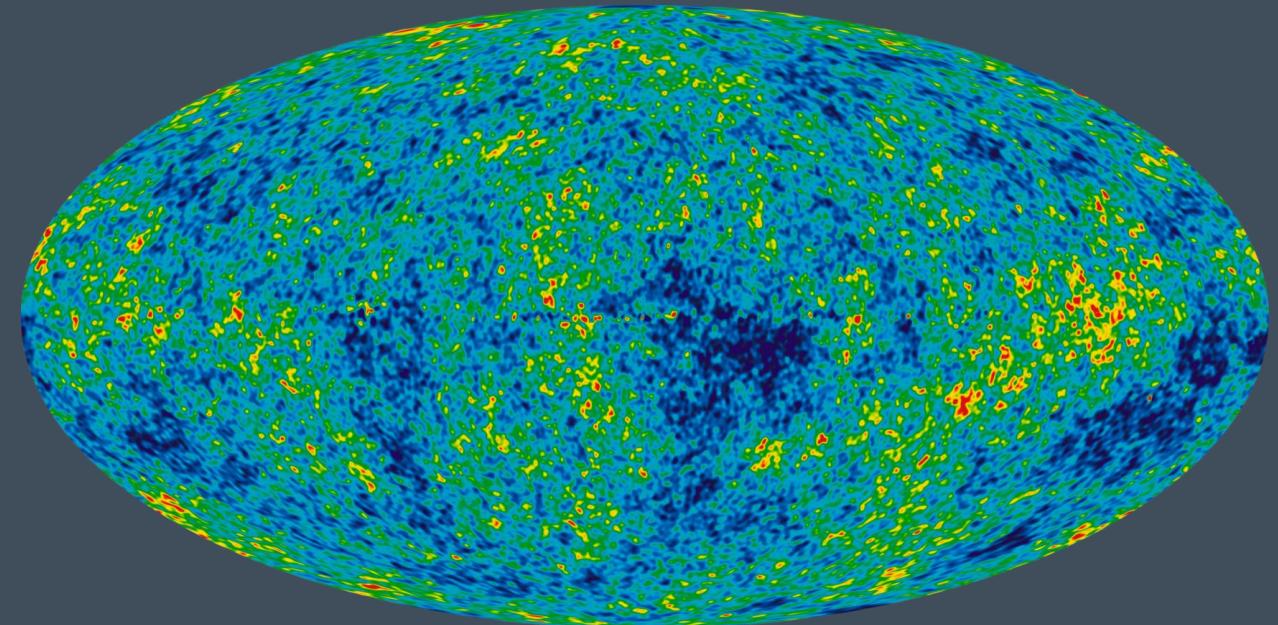
---

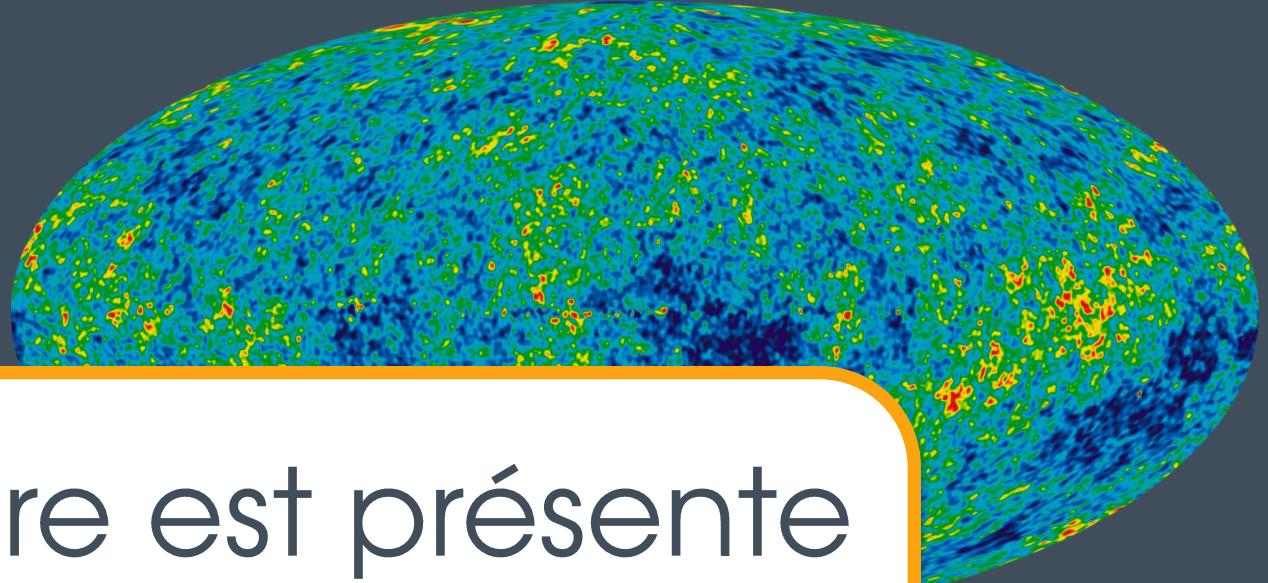
- 14/01 - Historique et approche observationnelle de la matière noire
- 21/01 - Approche théorique de la matière noire et principaux candidats
- 04/02 - Tests et études modernes de la matière noire: des collisionneurs de particules aux simulations cosmologiques
- 11/02 - Trous noirs primordiaux et matière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

# Récapitulatif des cours précédents

---



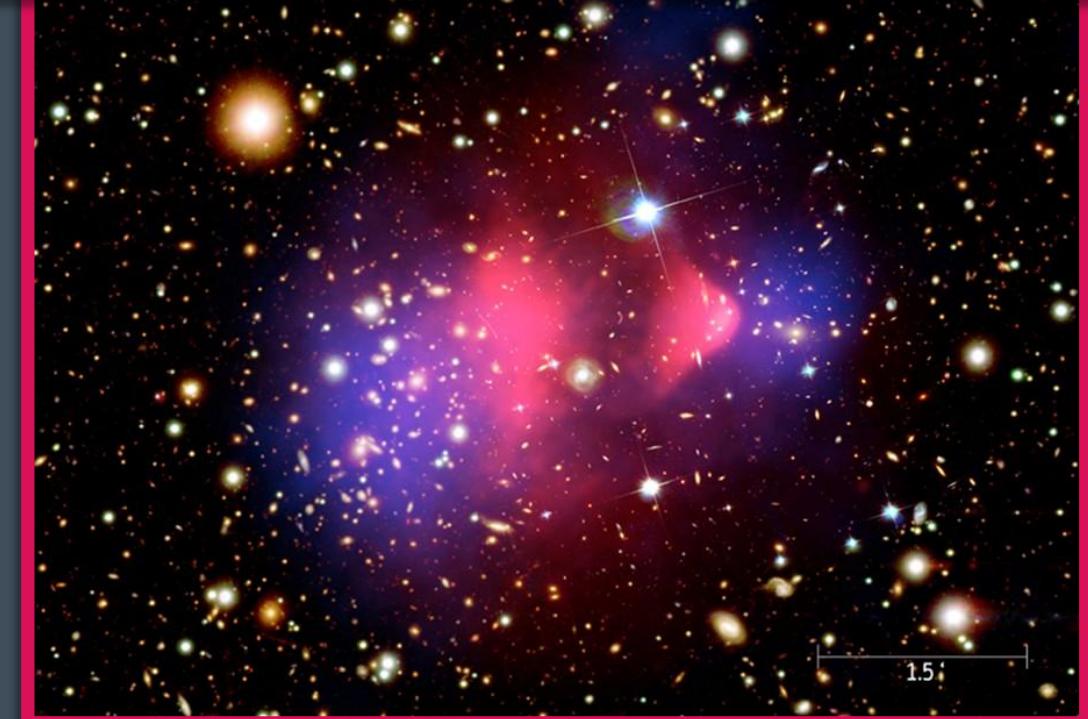




La matière noire est présente  
à différentes échelles et à  
différentes époques !



MAIS: l'échelle la plus petite  
à laquelle on en voit des  
traces est l'échelle  
galactique !



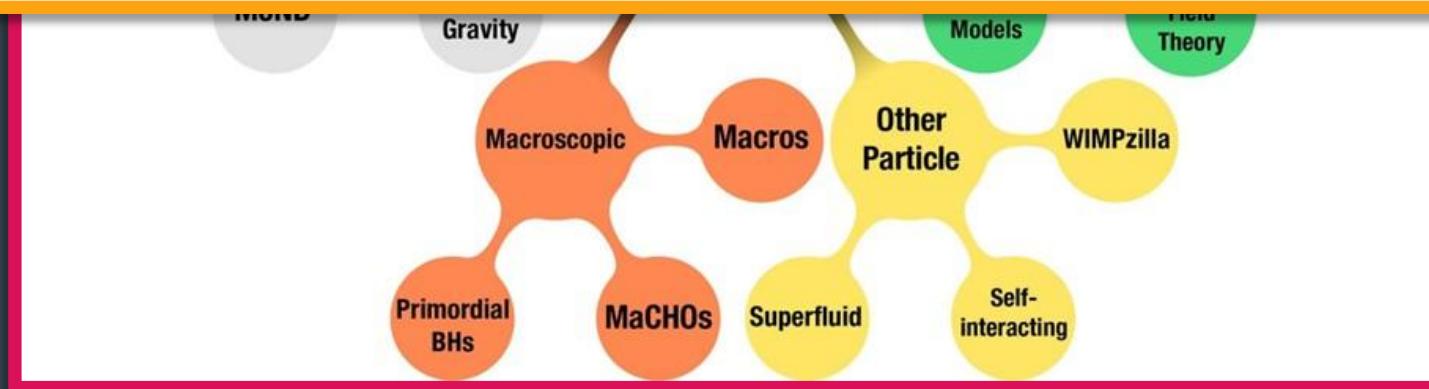
# Candidats possibles



# Candidats possibles

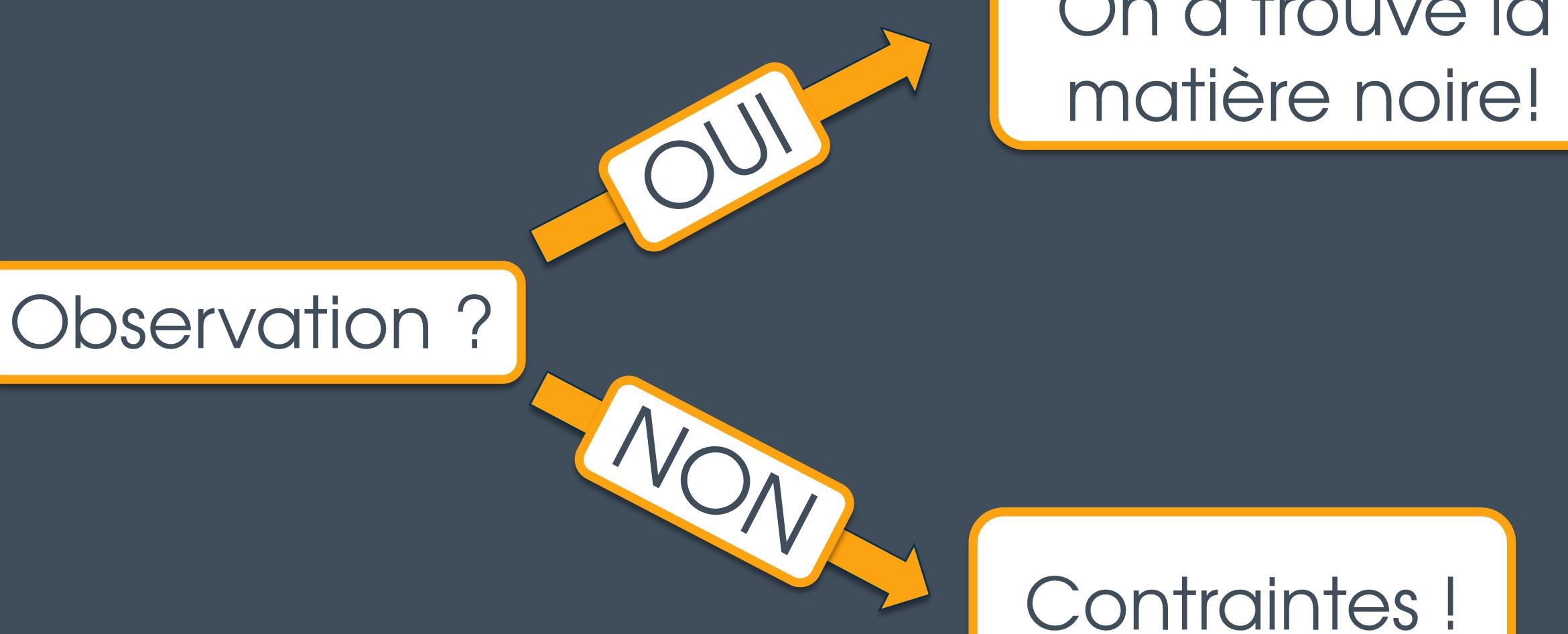


Il en existe des centaines !



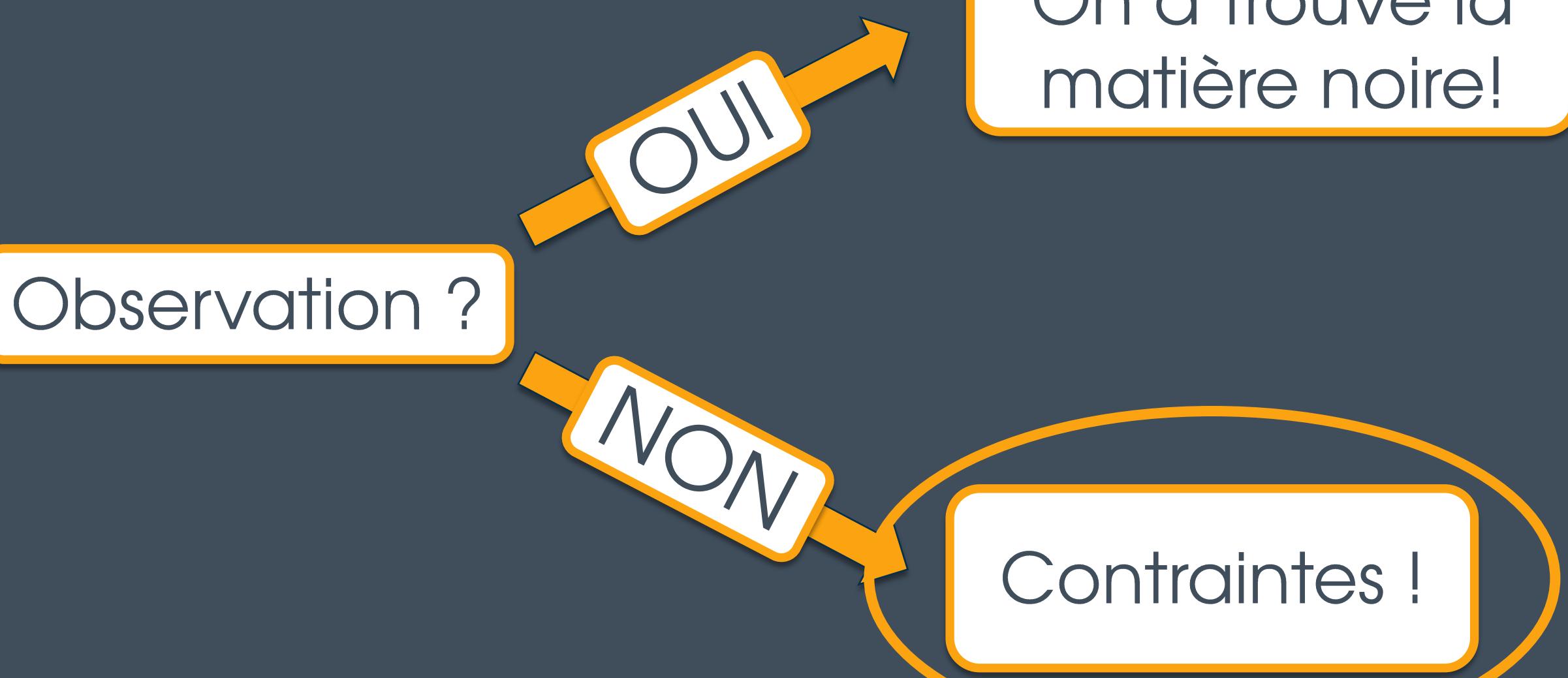
# Phénoménologie

---



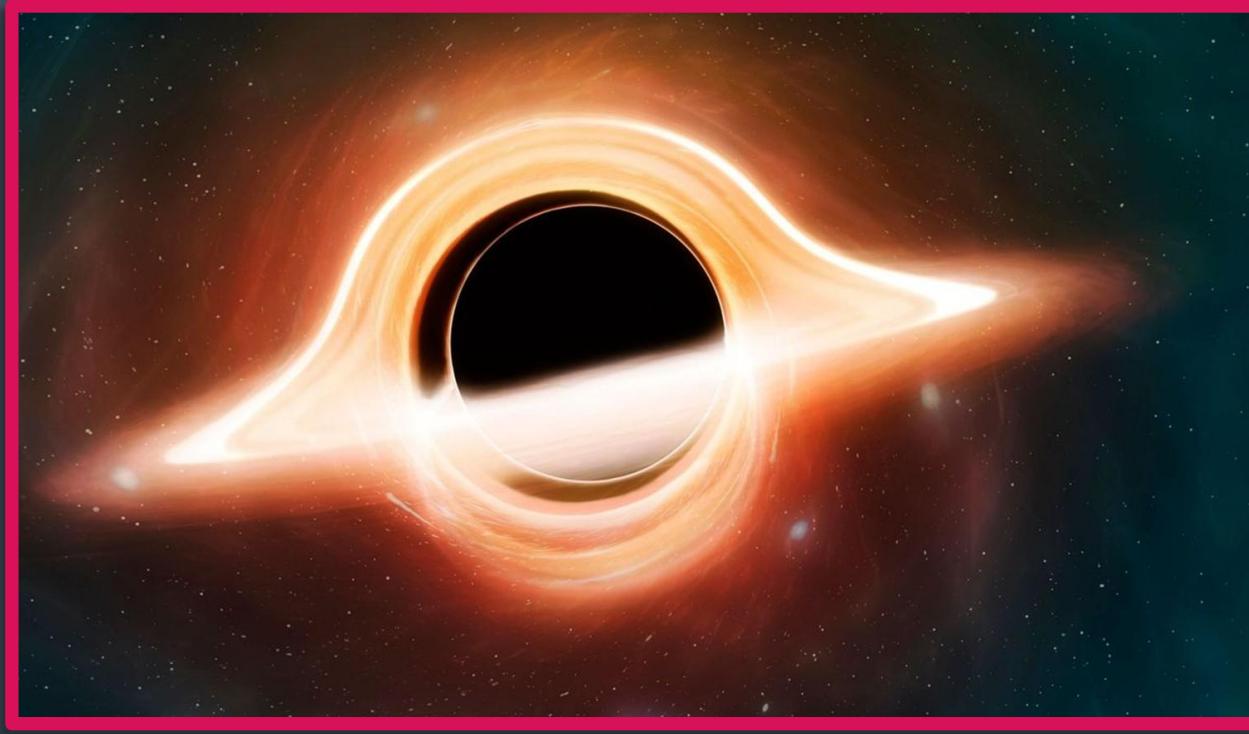
# Phénoménologie

---



# Candidat possible: trou noir primordial

---



Trous noirs formés au  
début de l'Univers !

## Leçon 4:

Trous noirs primordiaux et matière  
noire à l'échelle subgalactique

Nicolas Esser

# Plan de la leçon

---

## Trous noirs primordiaux / Matière noire aux petites échelles

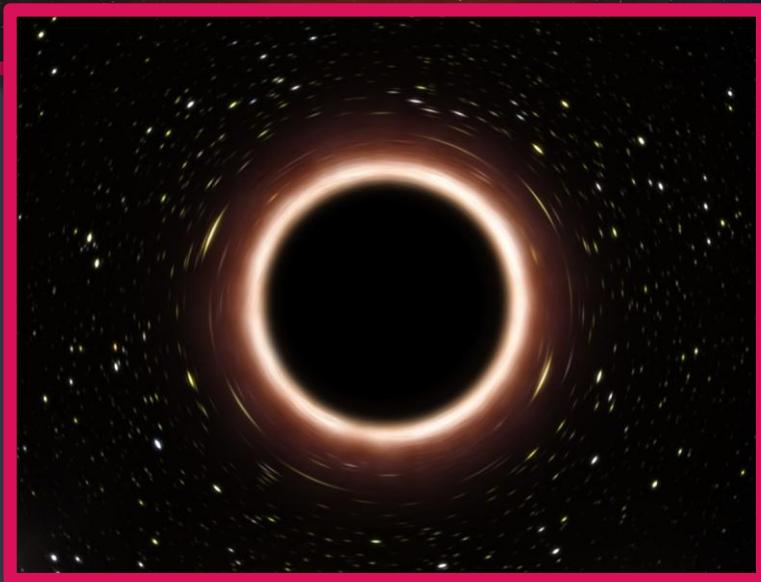
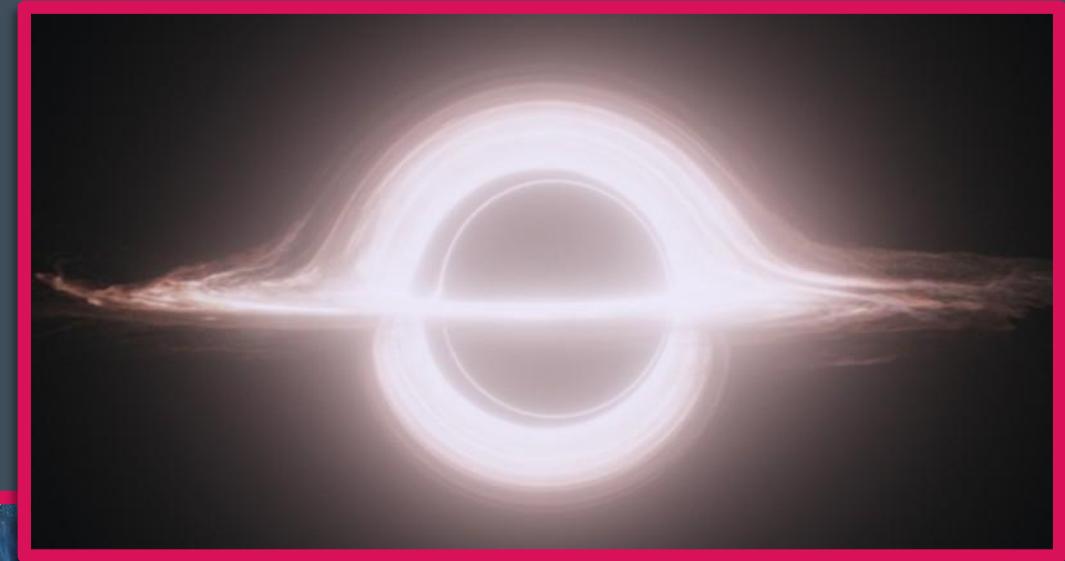
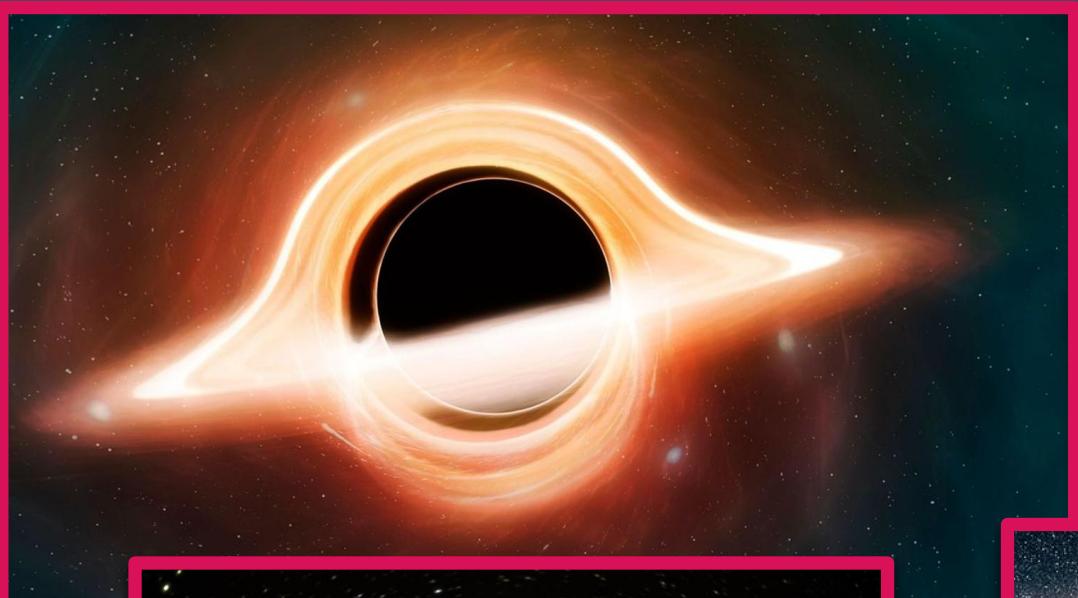
- Trous noirs primordiaux: idée
- Trous noirs primordiaux: contraintes
- Matière noire à l'échelle subgalactique
- Conclusions et synthèse du cours

Trous noirs  
primordiaux: idée et  
origine

# Trous noirs

**Première définition:** un trou noir est une région de l'espace où la gravité est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.

# Trous noirs



# Trous noirs: historique

Prédiction théorique:  
1915 (Einstein)

# Trous noirs: historique

Premier trou noir  
observé de manière  
indirecte: 1971  
(Cygnus X1)

# Trous noirs: historique

ob

re





# Trous noirs: historique

Détection indirecte  
du trou noir au centre  
de notre Galaxie

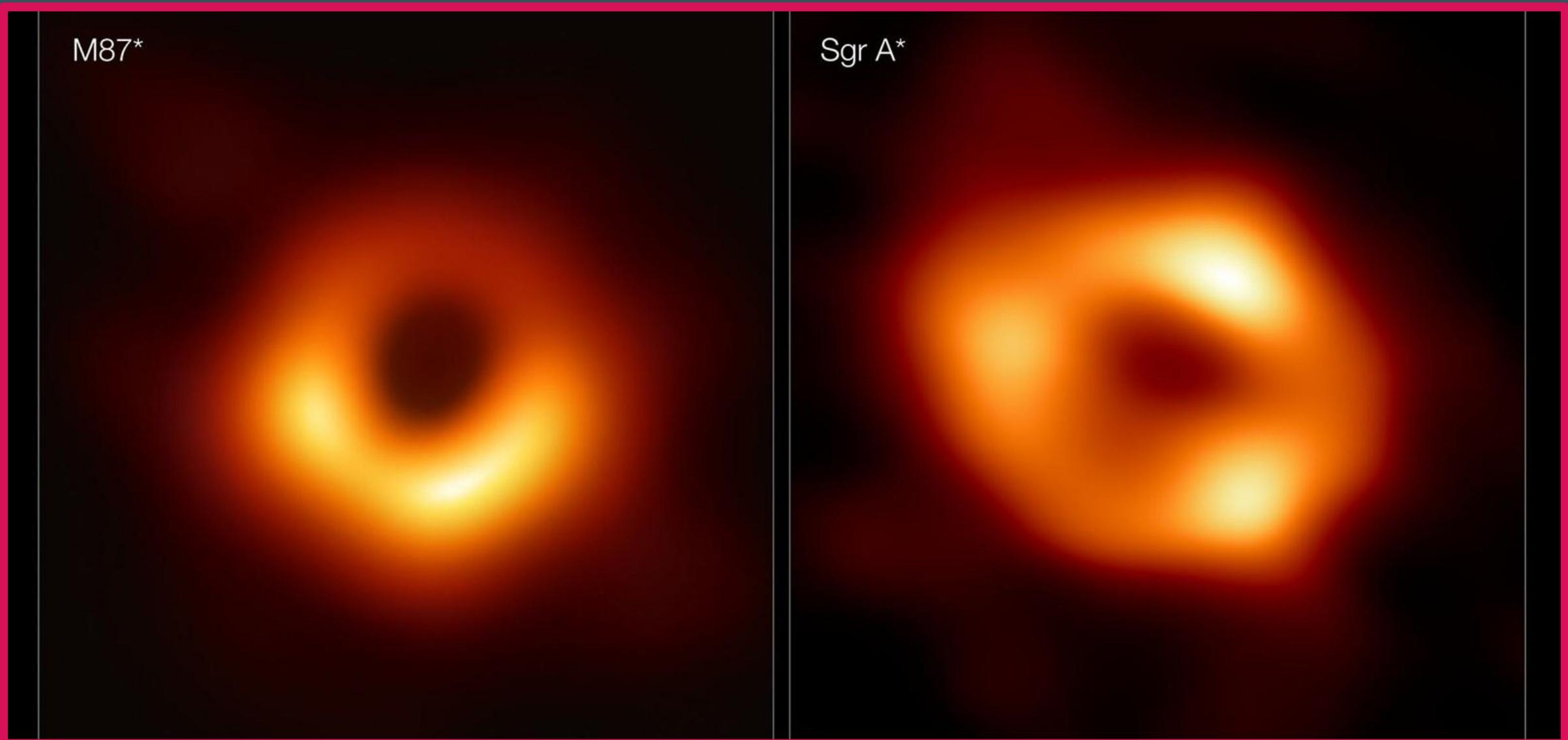
# Trous noirs: historique

Première photo: 2019  
(Event Horizon  
Telescope)

# Trous noirs

M87\*

Sgr A\*



# Trous noirs: propriétés

M87\*

Sgr A\*



# Trous noirs: propriétés



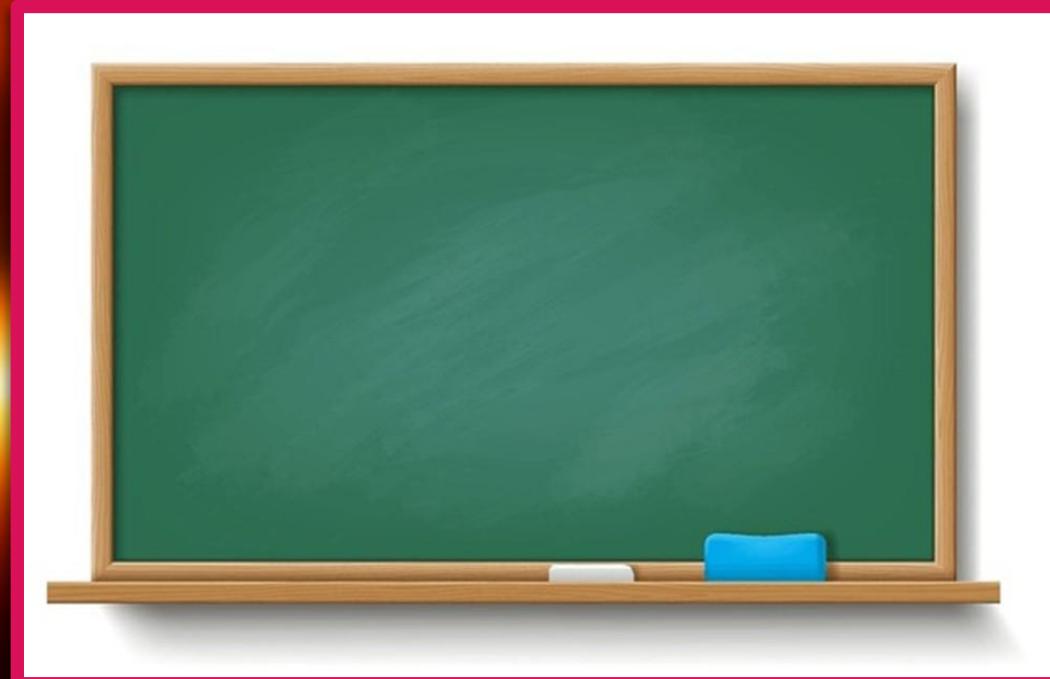
# Trous noirs: disque d'accrétion

M87

Disque d'accrétion:  
Ne fait pas partie du trou noir

???

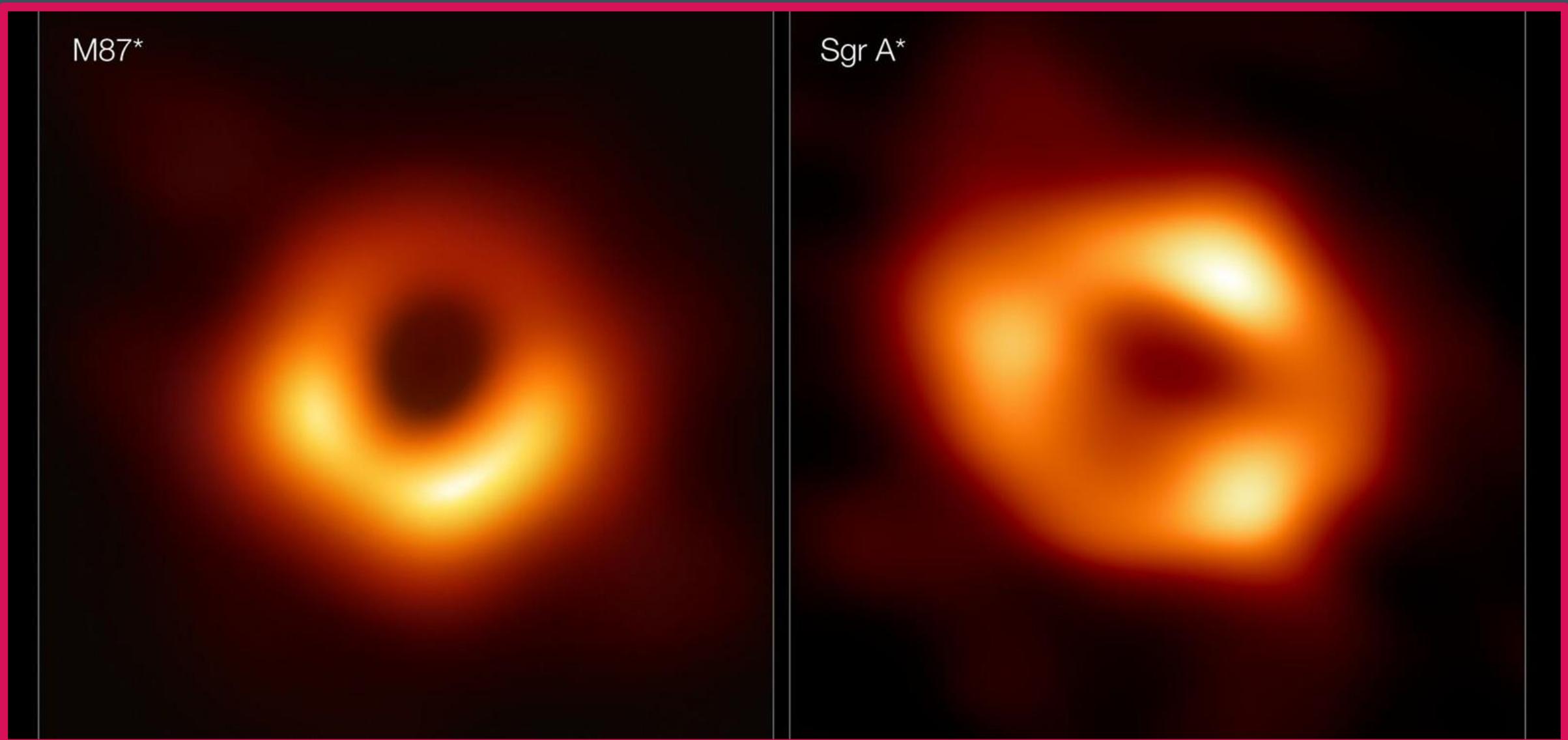
???



# Trous noirs: propriétés

M87\*

Sgr A\*



# Trous noirs: horizon

M87\*

Horizon du trou noir

$$R_S = 2GM/c^2$$

???

???

# Trous noirs: horizon

M87\*

Horizon du trou noir

$$R_S = 2GM/c^2$$

???

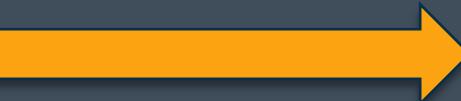
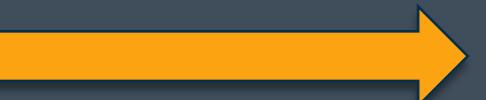
???



# Trous noirs: horizon

Horizon du trou noir

$$R_S = 2GM/c^2$$

- $M = M_\odot = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$    $R_S = 3 \text{ km}$
- $M = 10^6 M_\odot$    $R_S = 3\,000\,000 \text{ km}$
- $M = 10^{17} \text{ kg}$    $R_S = 10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm}$

# Trous noirs: horizon

Horizon du trou noir

$$R_S = 2GM/c^2$$

Point de non-retour: passé ce rayon, la vitesse requise pour s'échapper dépasse celle de la lumière !

# Trous noirs: horizon

---

Rien ne peut sortir  
d'un trou noir !

On ne saura donc  
jamais ce qu'il y à  
a l'intérieur.

# Trous noirs: radiation de Hawking

---

**EN FAIT  
NON**

# Trous noirs: radiation de Hawking

---

**EN FAIT  
NON  
(peut-être)**

# Trous noirs: radiation de Hawking

## Particle Creation by Black Holes

S. W. Hawking

Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge,  
Cambridge, England

Received April 12, 1975

# Trous noirs: radiation de Hawking

Department

Cambridge,

Fluctuations quantiques  
à l'horizon du trou noir  
peuvent en extraire de  
l'énergie.

# Trous noirs: radiation de Hawking

---

Pas (encore) de preuve expérimentale...

# Trous noirs: radiation de Hawking

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B}$$

- Les trous noirs plus légers émettent plus de particules, et s'évaporent plus vite.
- En pratique, seuls des tout petits trous noirs s'évaporeraient de manière non-négligeable.

# Types de trous noirs

---

# Types de trous noirs: stellaires

---



# Types de trous noirs: stellaires

---

Etoile de  
masse  $> 25M_{\odot}$

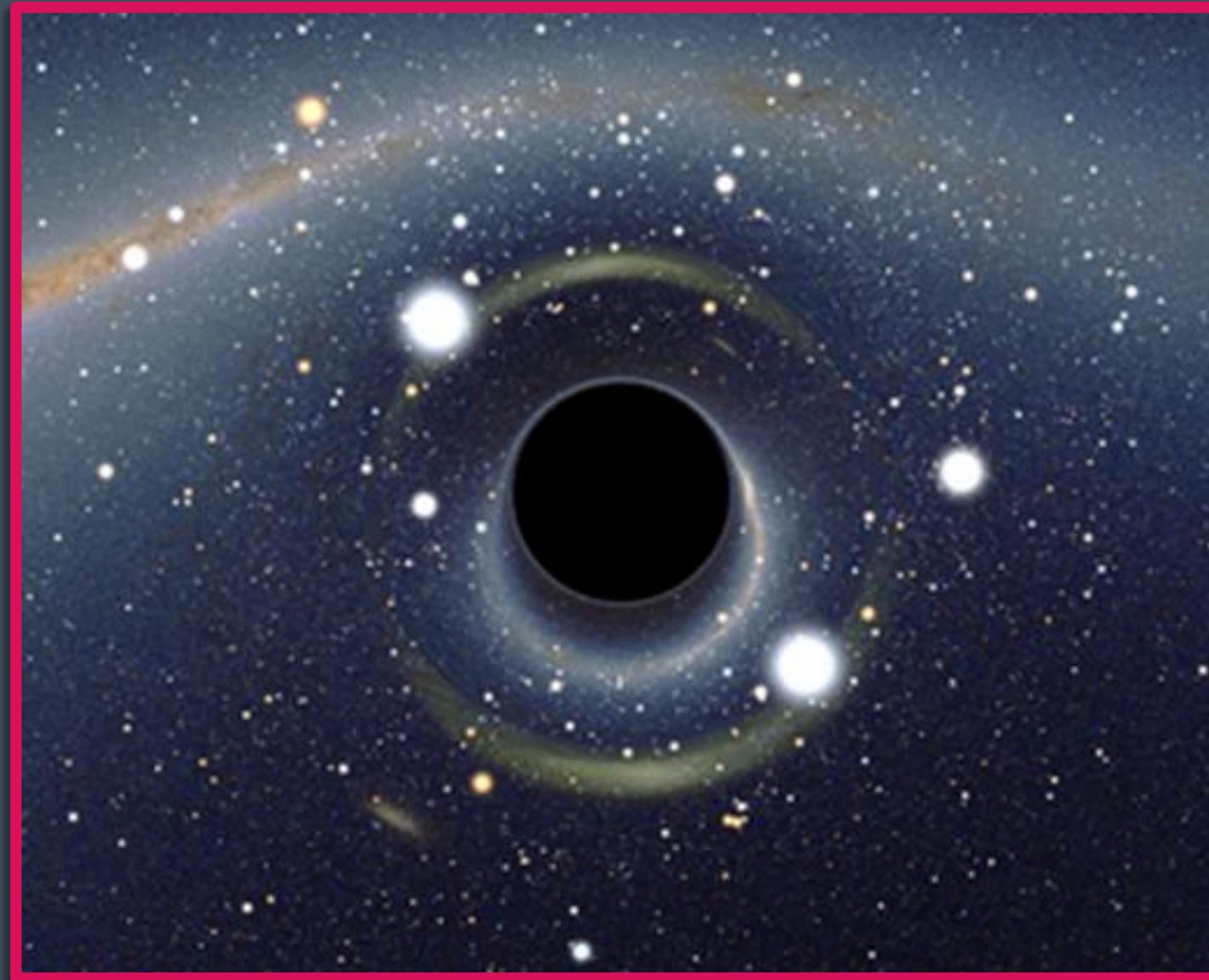
# Types de trous noirs: stellaires

---



# Types de trous noirs: stellaires

---



# Types de trous noirs: supermassifs

---

# Types de trous noirs: supermassifs

M87\*

Sgr A\*



# Types de trous noirs: supermassifs

M87\*

Sgr A\*

Origine  
inconnue !

# Types de trous noirs: primordiaux

---

# Types de trous noirs: primordiaux

---

THEORIQUES  
(candidat à la  
matière noire)

# Trous noirs primordiaux

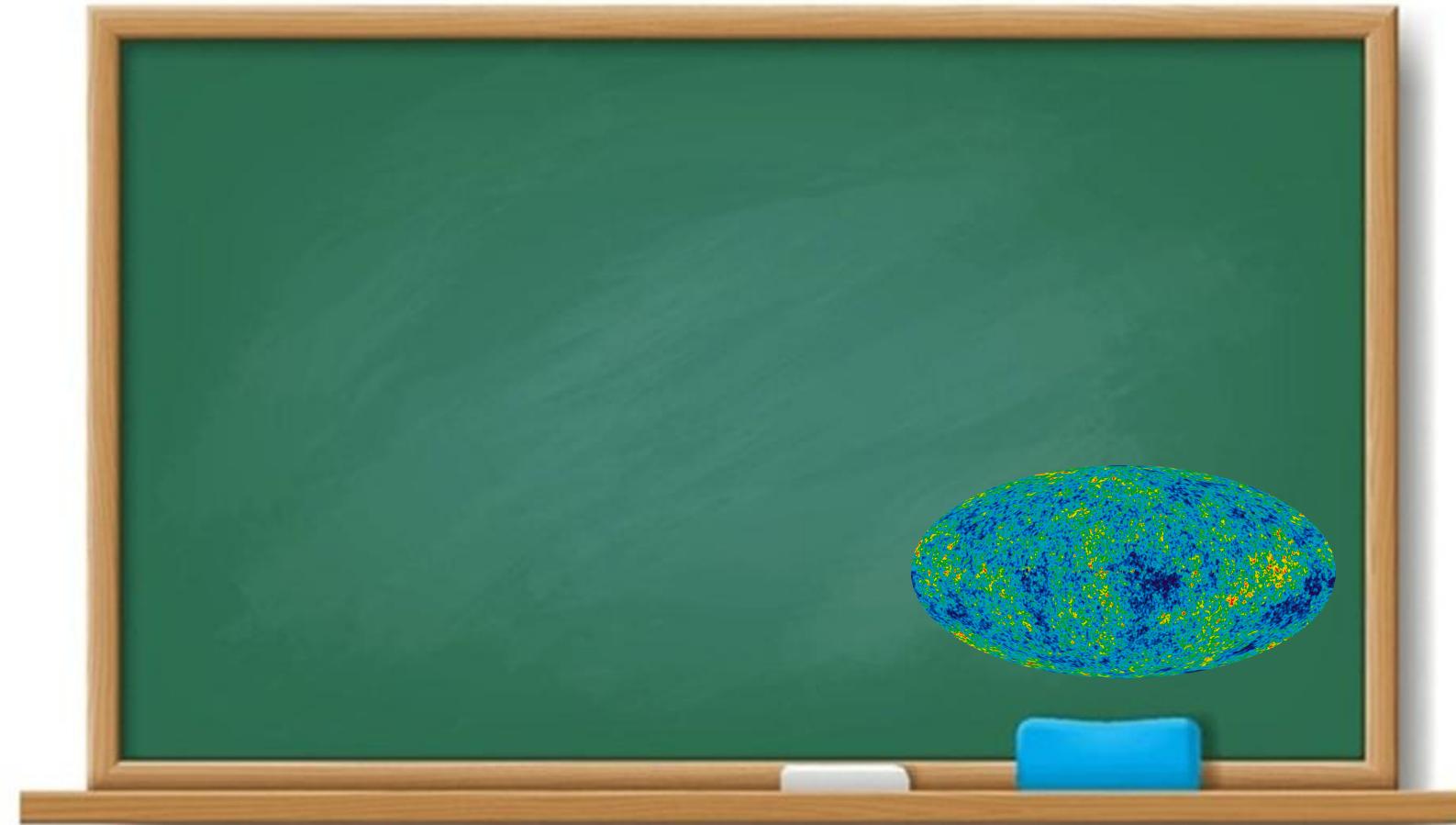
---

Origine: fluctuations  
de densité dans  
l'Univers primordial

# Trous noirs primordiaux

O

I'



ns

al

# Trous noirs primordiaux

---

Peuvent fournir une explication à l'origine des trous noirs supermassifs

# Trous noirs primordiaux

---

Bon candidat à la matière noire ?

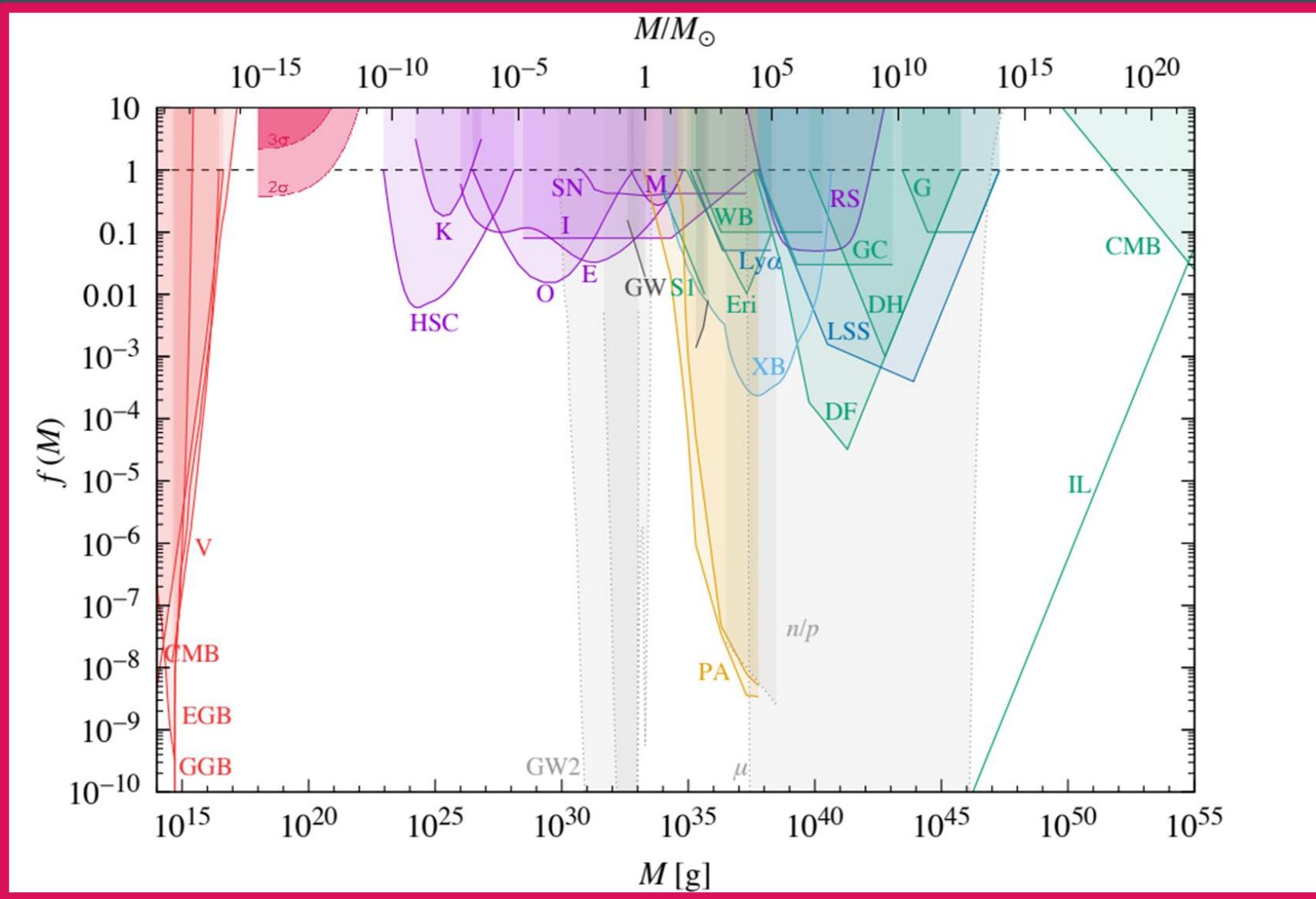
# Trous noirs primordiaux

Bon candidat à la matière noire ?

- N'interagissent que par la gravitation ☺.
- Sont stable (sauf potentiellement les tout petits qui s'évaporent) ☺.
- Sont présent partout et depuis le début de l'Univers ☺.

# Trous noirs primordiaux: contraintes

# Trous noirs primordiaux: contraintes



# Trous noirs primordiaux: contraintes

---

Comment constraint-on  
ces trous noirs ?

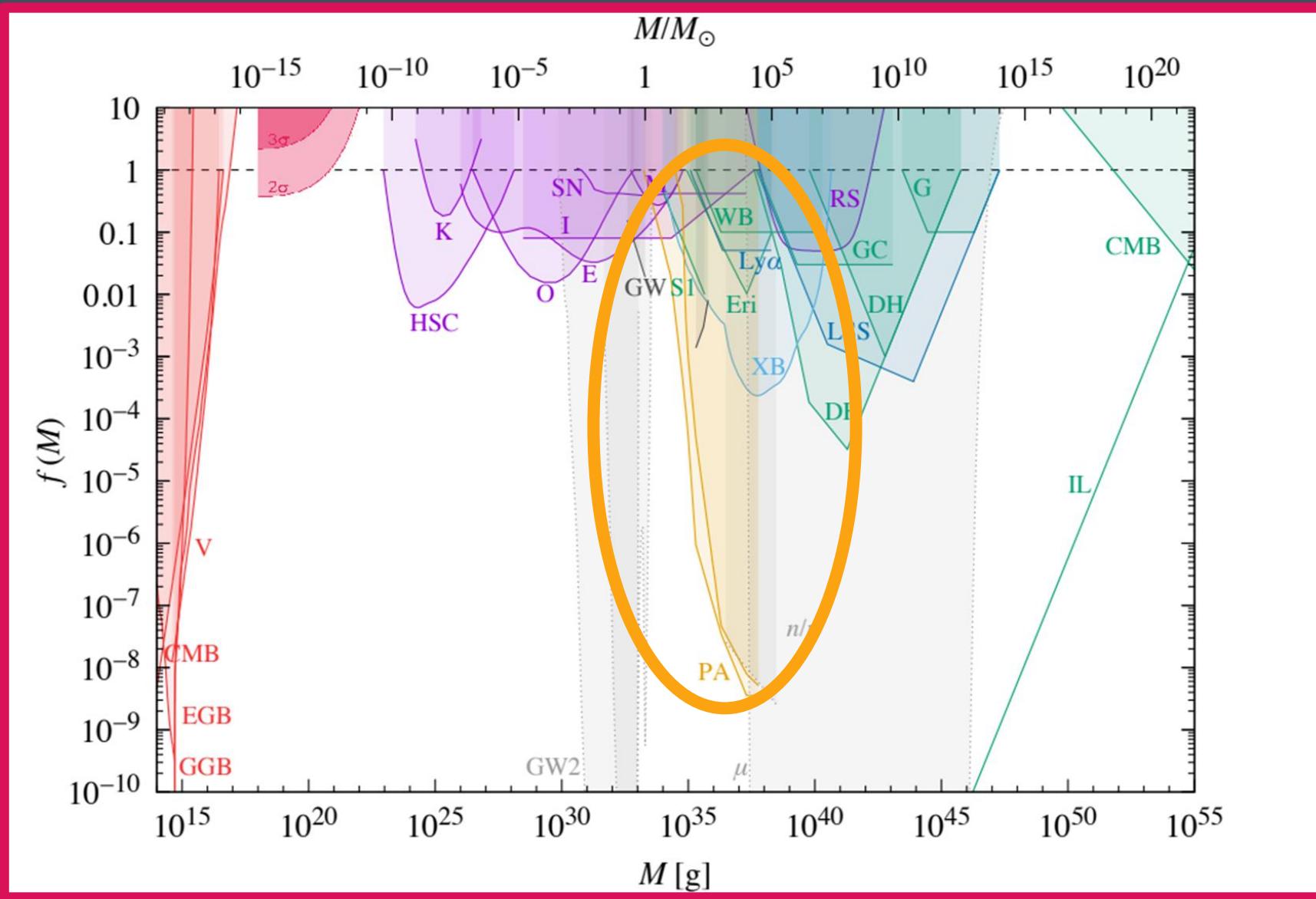
# Trous noirs primordiaux: contraintes

---

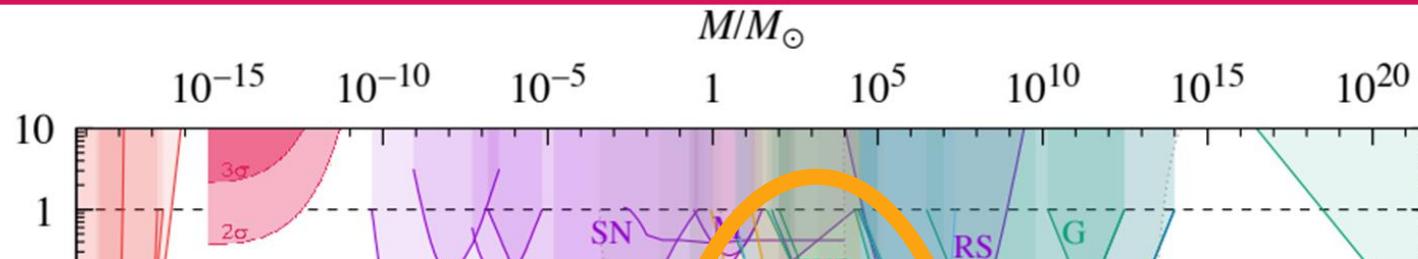
Comment constraint-on  
ces trous noirs ?

- Pas de détection dans une expérience sur Terre...
- Utilisation des effets supplémentaires qu'ils auraient sur diverses observations spatiales !

# Trous noirs primordiaux: contraintes



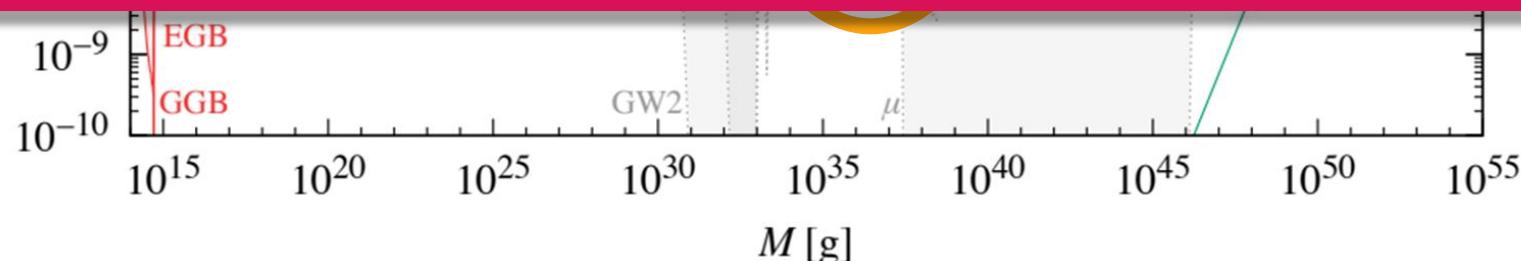
# Trous noirs primordiaux: contraintes



## Feedback in the dark: a critical examination of CMB bounds on primordial black holes

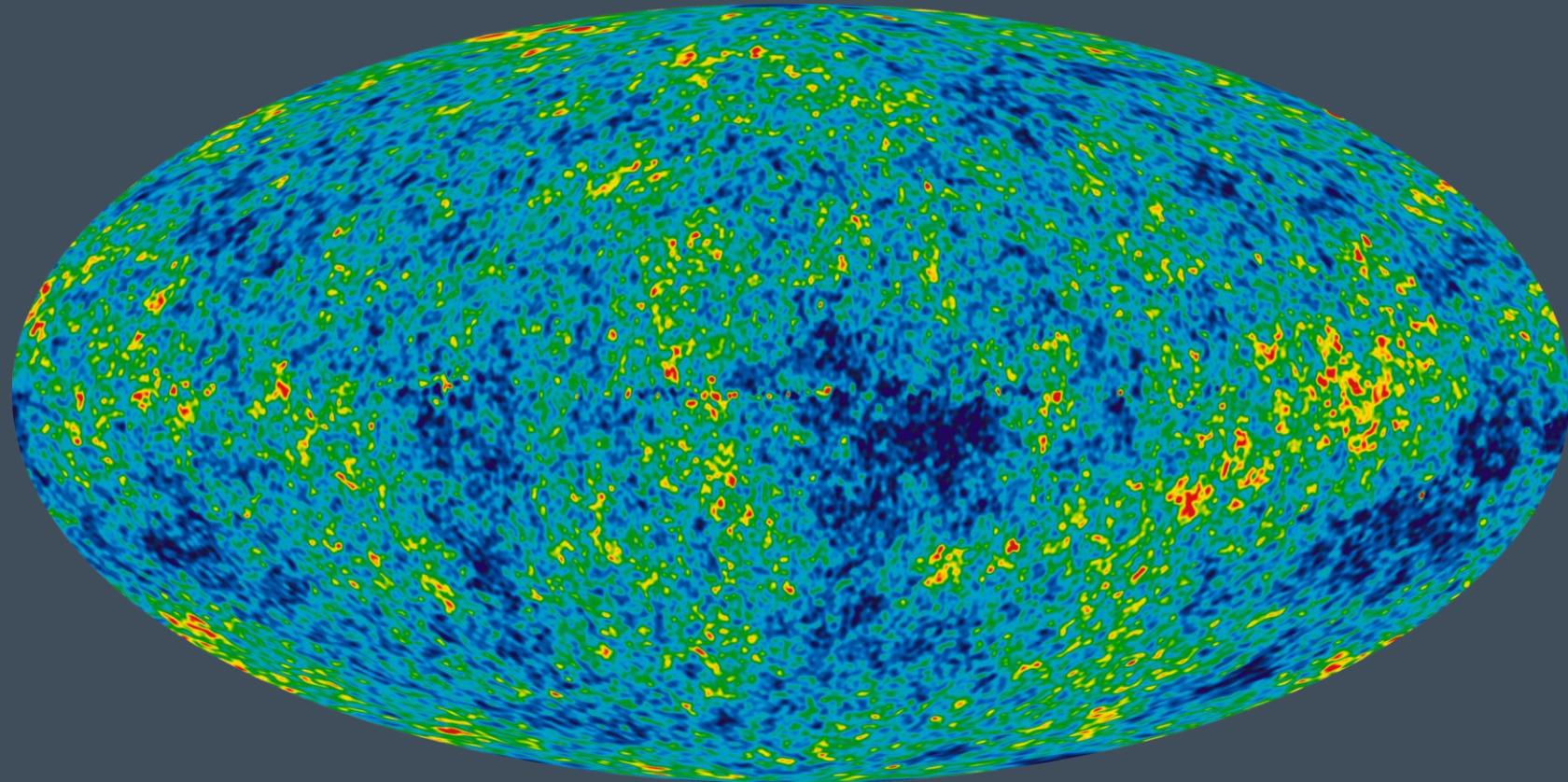
Mar 2024

Dominic Agius,<sup>a</sup> Rouven Essig,<sup>b</sup> Daniele Gaggero,<sup>c</sup>  
Francesca Scarcella,<sup>d</sup> Gregory Suczewski,<sup>b</sup> Mauro Valli<sup>e</sup>



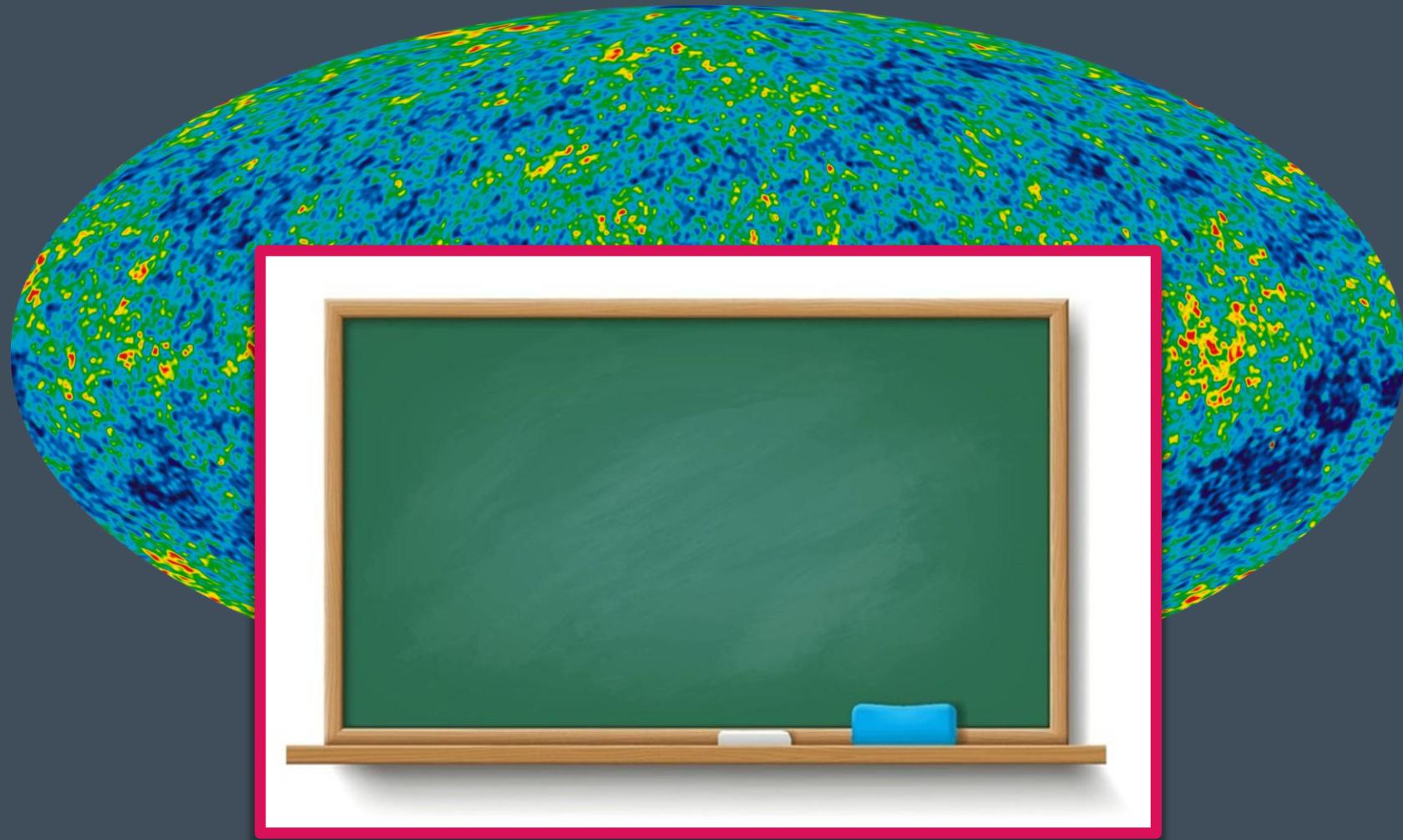
# Trous noirs primordiaux: contraintes

---

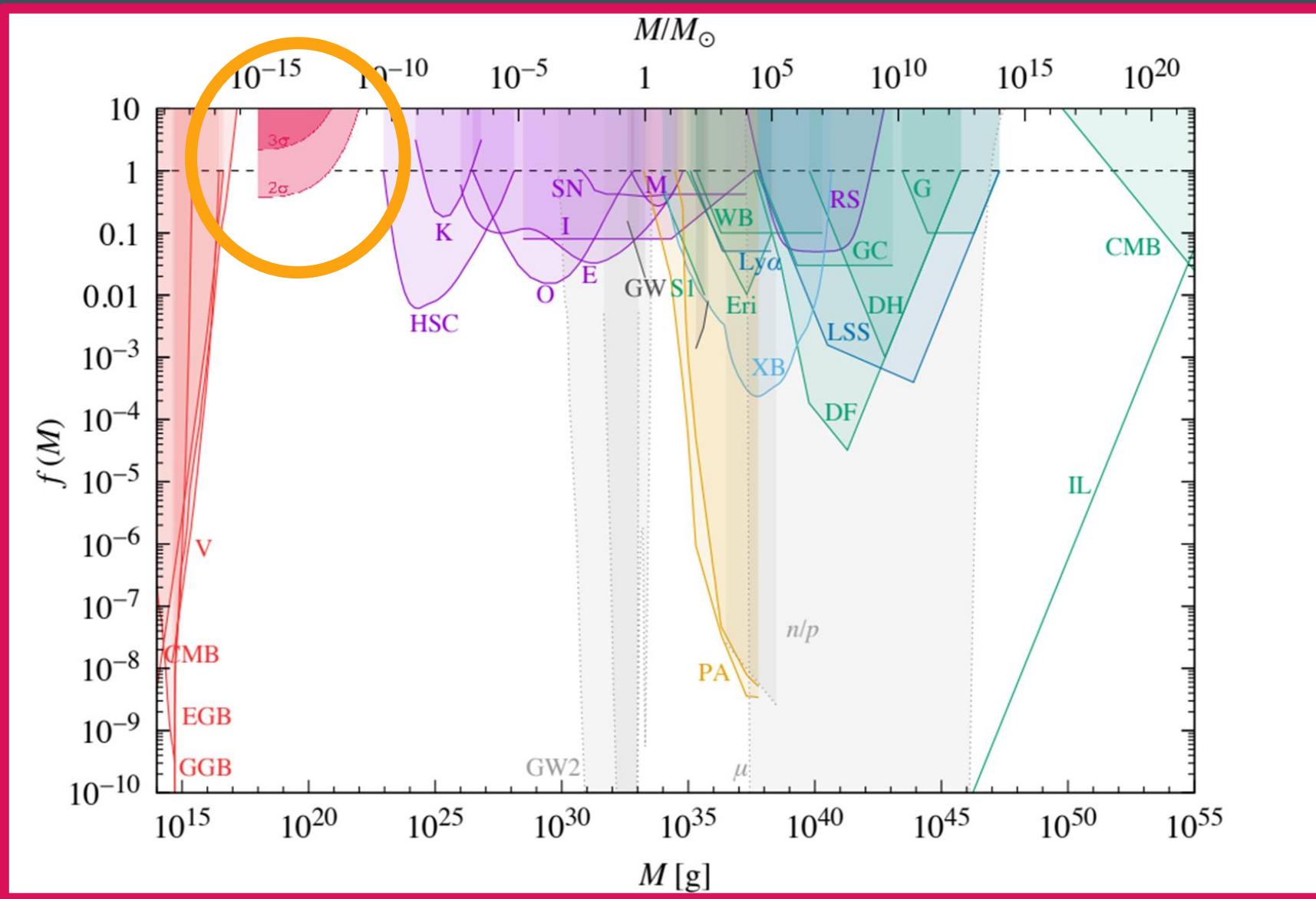


# Trous noirs primordiaux: contraintes

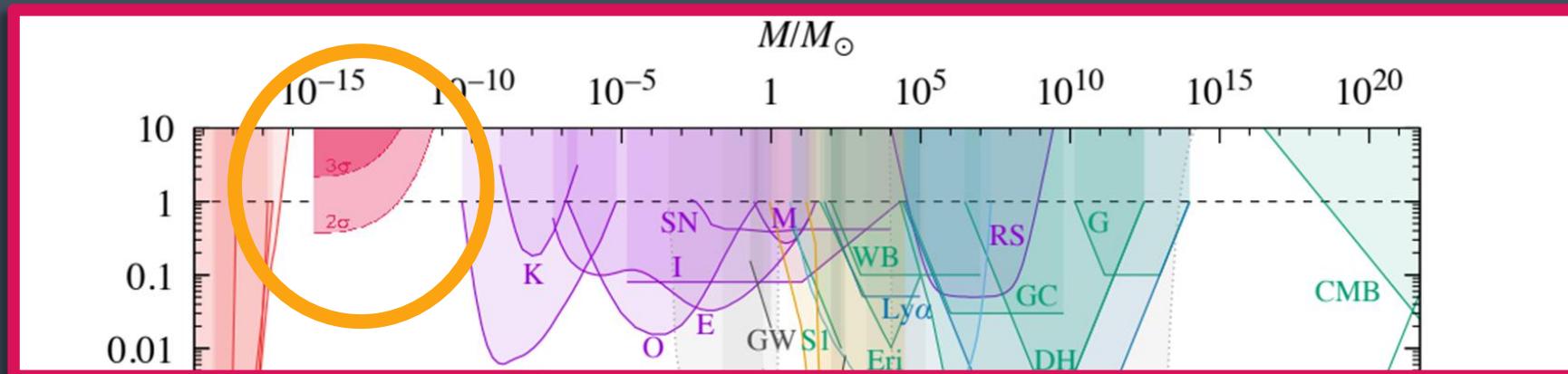
---



# Trous noirs primordiaux: contraintes

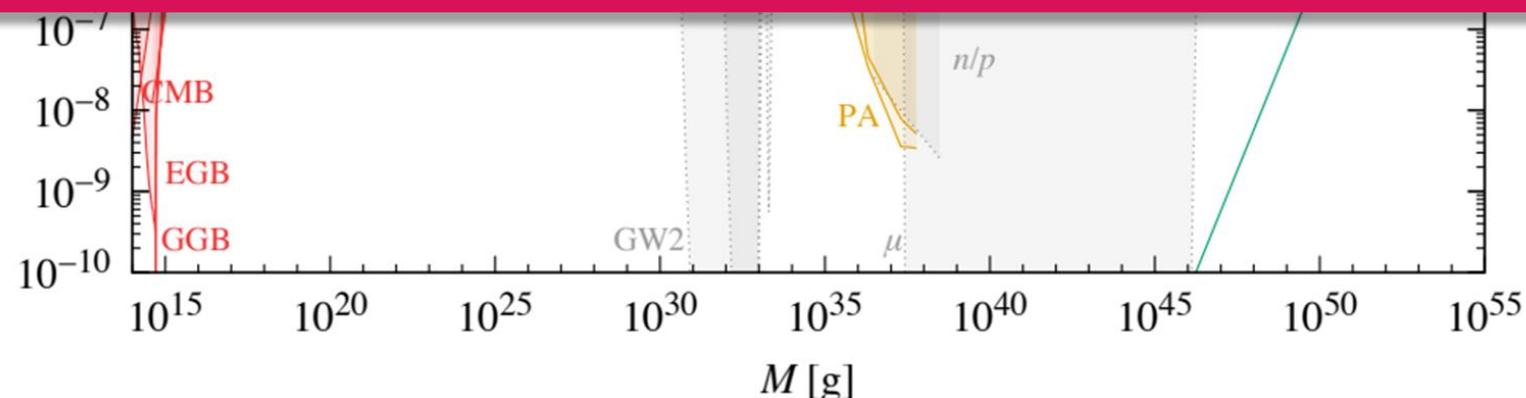


# Trous noirs primordiaux: contraintes



**Constraints on asteroid-mass primordial black holes in dwarf galaxies using Hubble Space Telescope photometry**

Nicolas Esser<sup>1,\*</sup>, Carrie Filion<sup>2</sup>, Sven De Rijcke<sup>3</sup>, Nitya Kallivayalil<sup>4</sup>, Hannah Richstein<sup>4</sup>, Peter Tinyakov<sup>1</sup>, and Rosemary F. G. Wyse<sup>5</sup>



# Destruction d'étoiles...

---



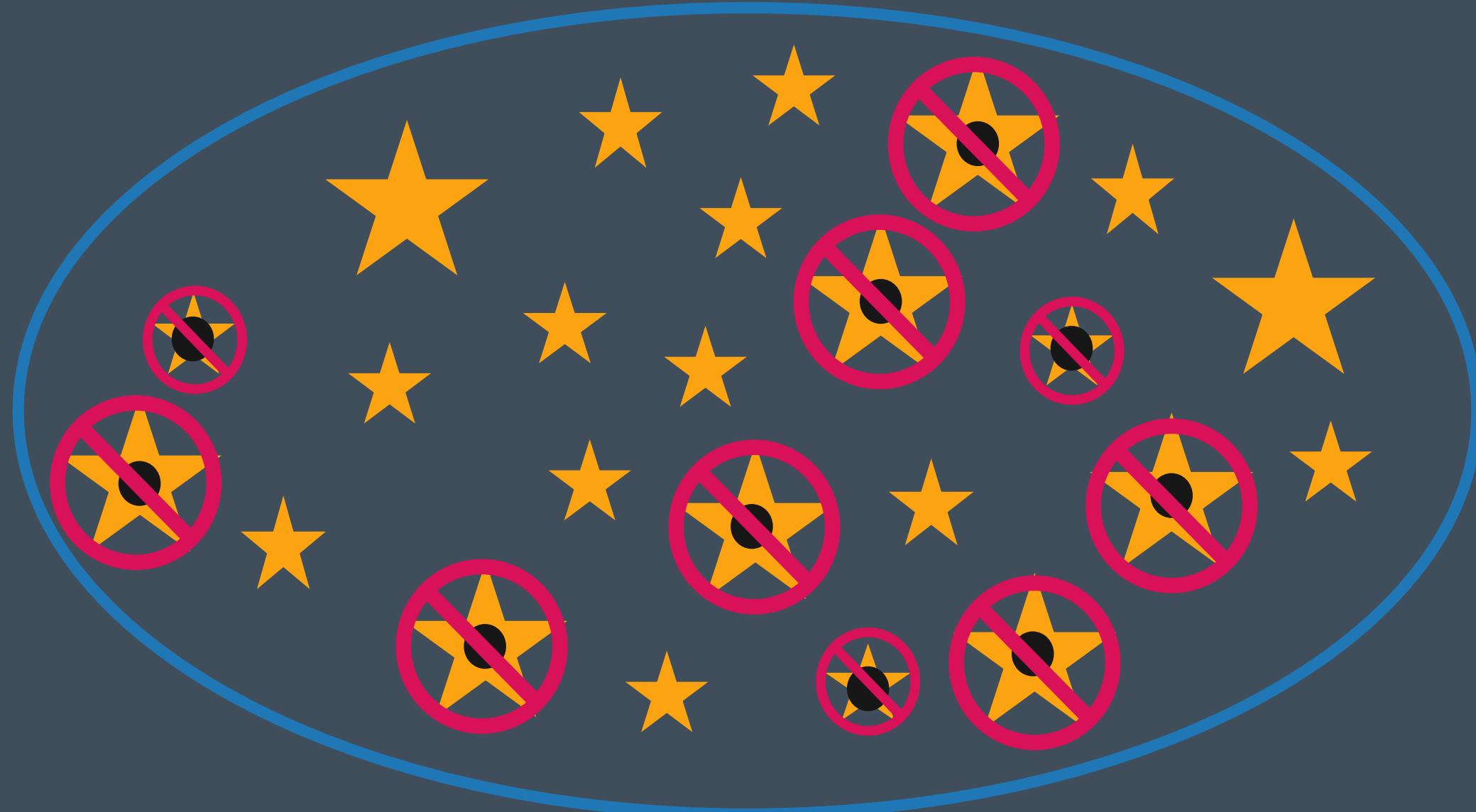
# Destruction d'étoiles...

---



# Destruction d'étoiles...

---



# Destruction d'étoiles...

---

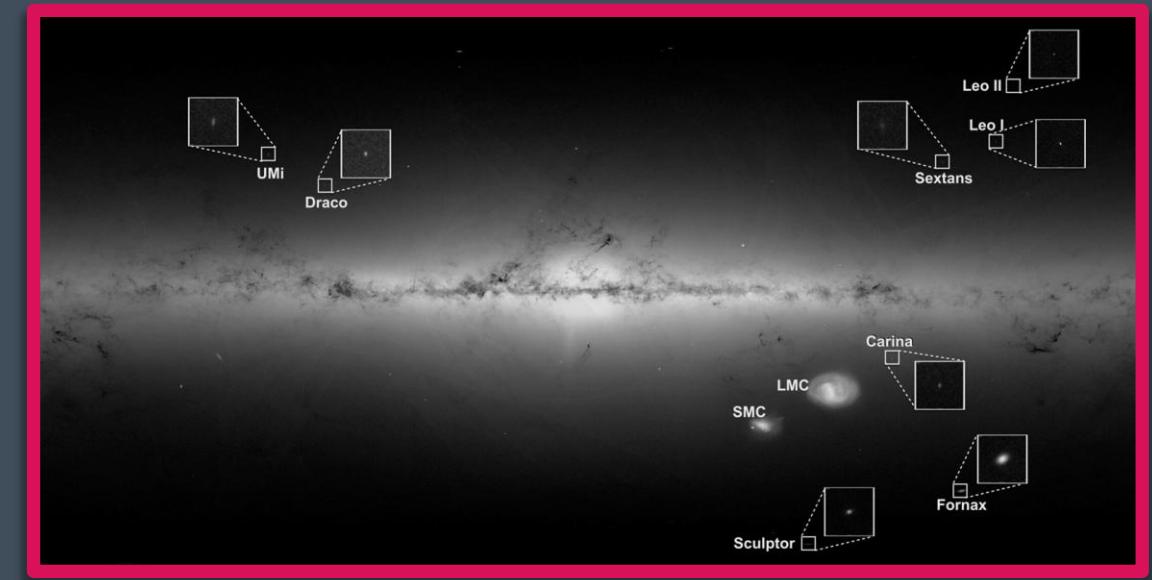


# Observations: Telescope Hubble

---



# Observations: galaxies naines ultra-sombres

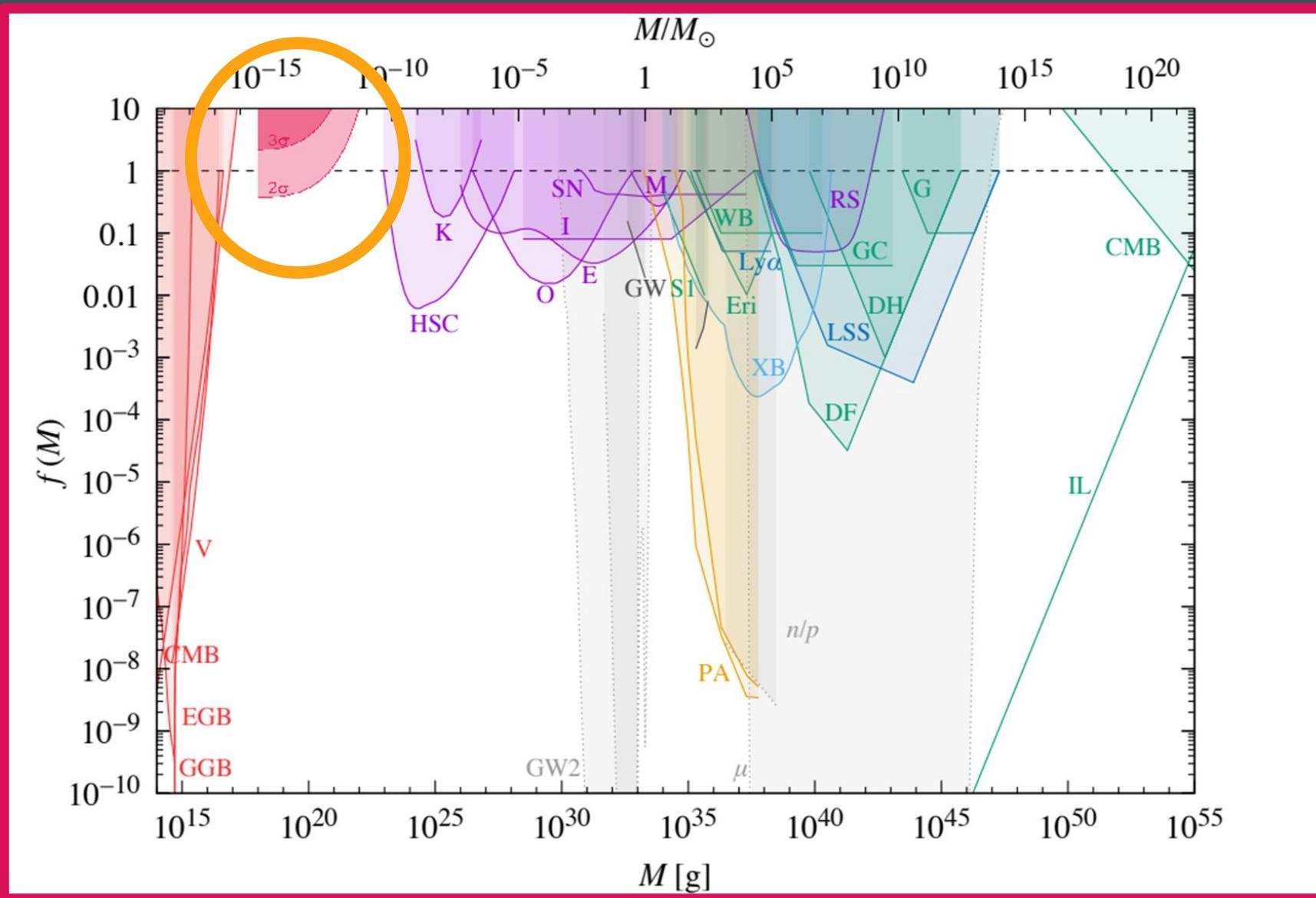


# On observe ceci:

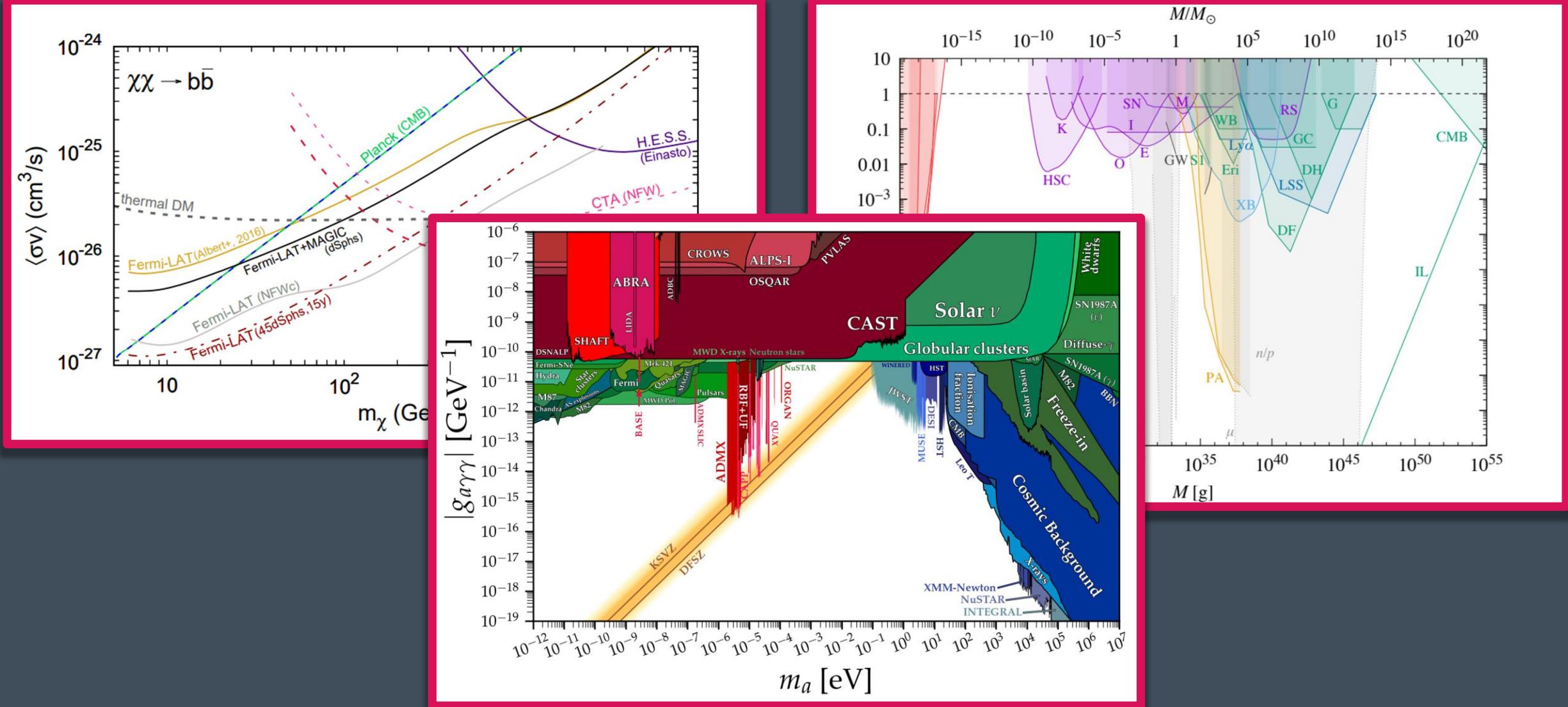
---



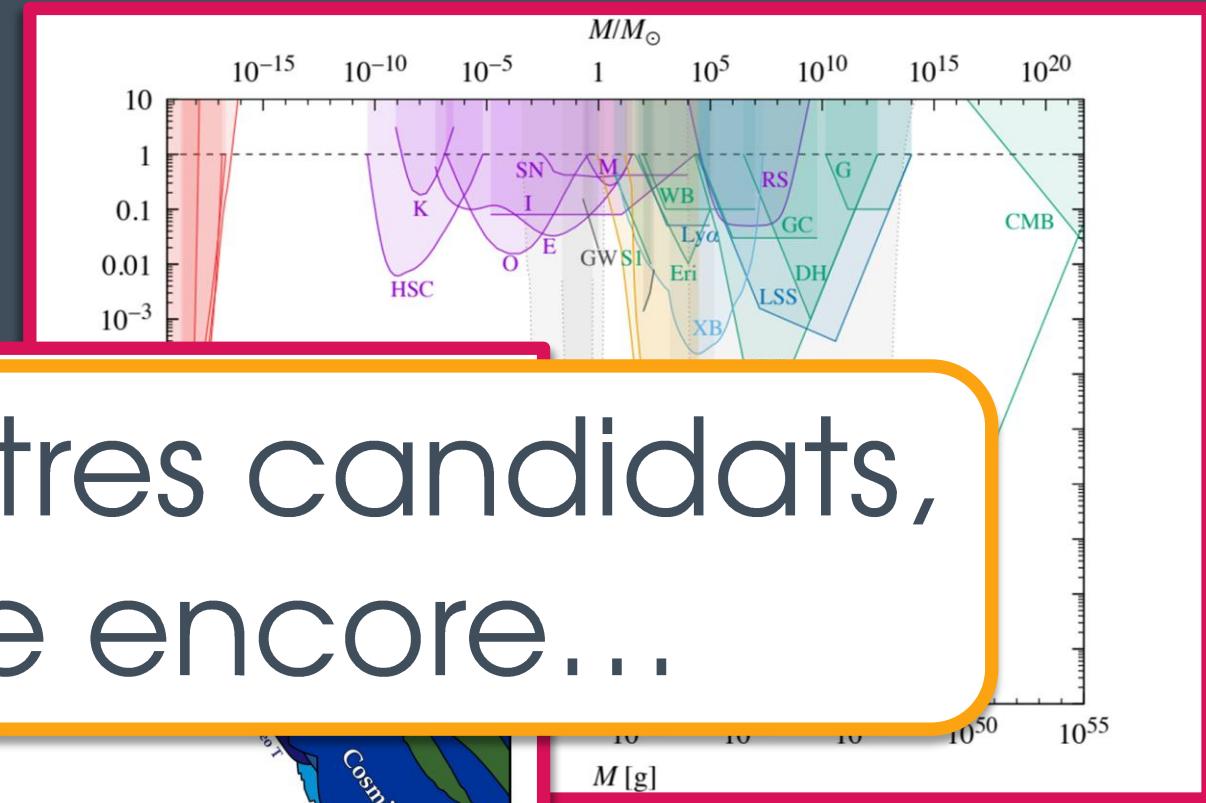
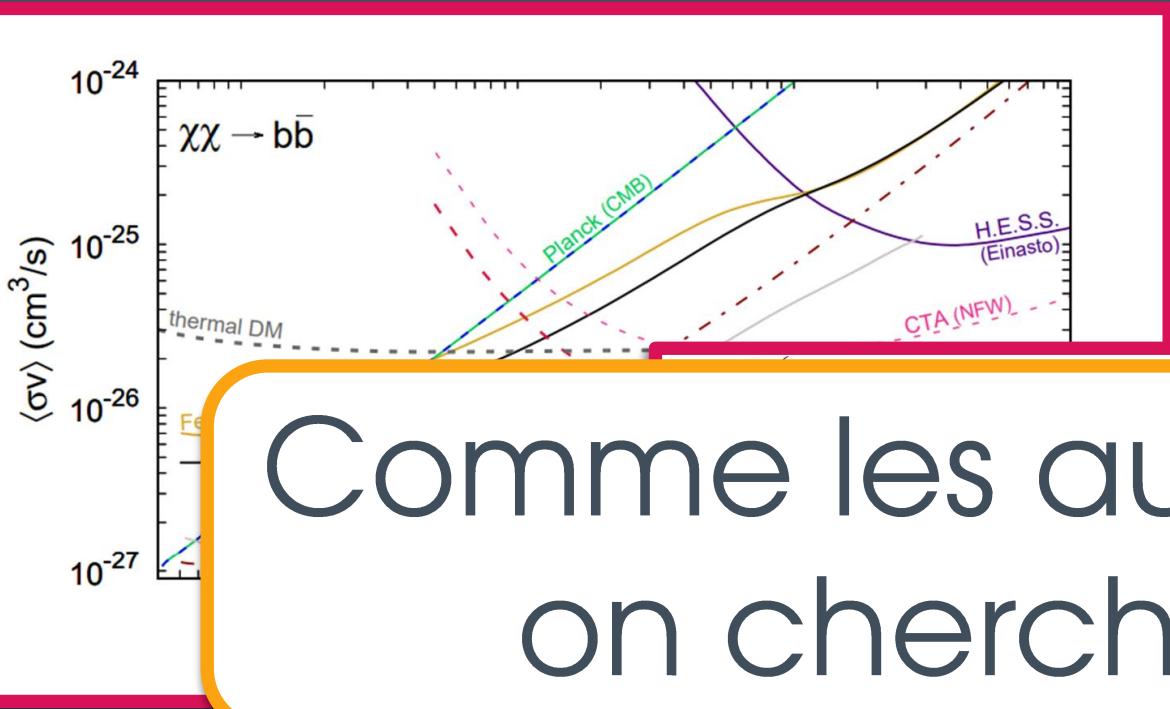
# Trous noirs primordiaux: contraintes



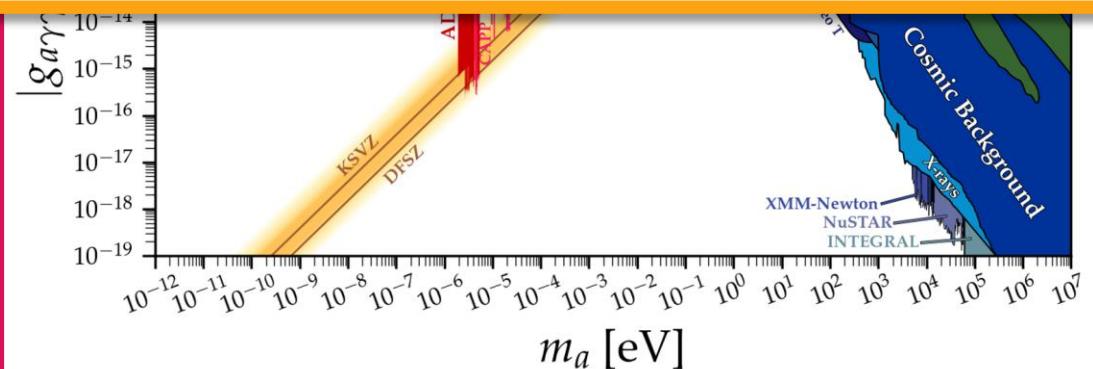
# Contraintes



# Contraintes



Comme les autres candidats,  
on cherche encore...



Matière noire aux  
échelles  
subgalactiques

# Matière noire aux échelles subgalactiques

---

- On cherche la matière noire depuis des dizaines d'années...
- Quelles pistes aujourd'hui ? Directions de recherche privilégiées ?
- Une direction: les petites échelles !

# Matière noire aux échelles subgalactiques

---

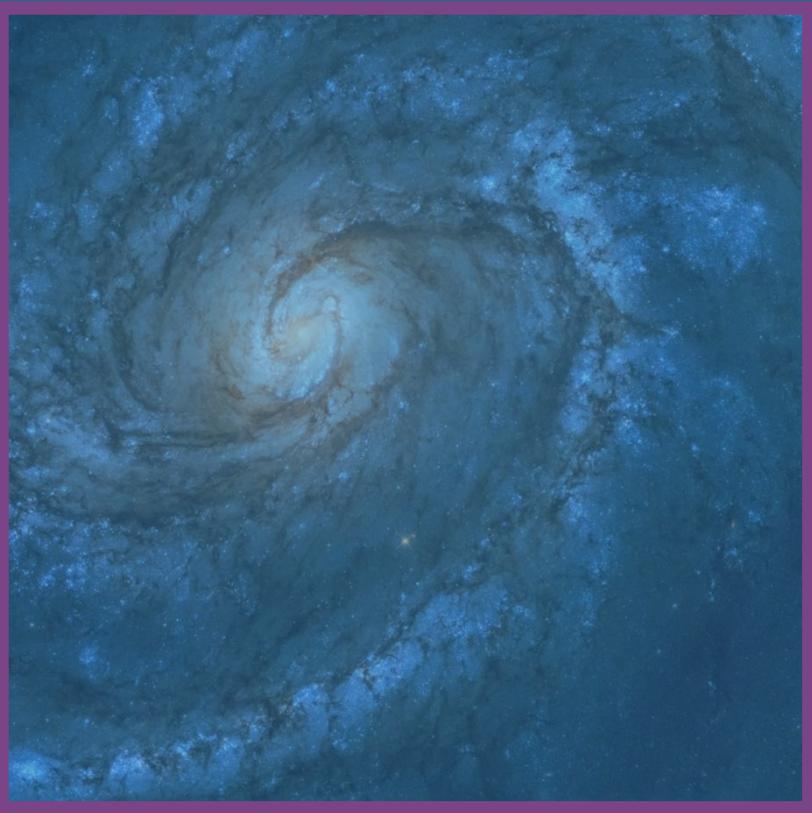
- On cherche la matière noire depuis des dizaines d'années
  - Quelles privilégi
  - Une direction: les petites échelles !
- Pourquoi ?

L'échelle la plus petite à laquelle on voit des traces de la matière noire est l'échelle galactique.



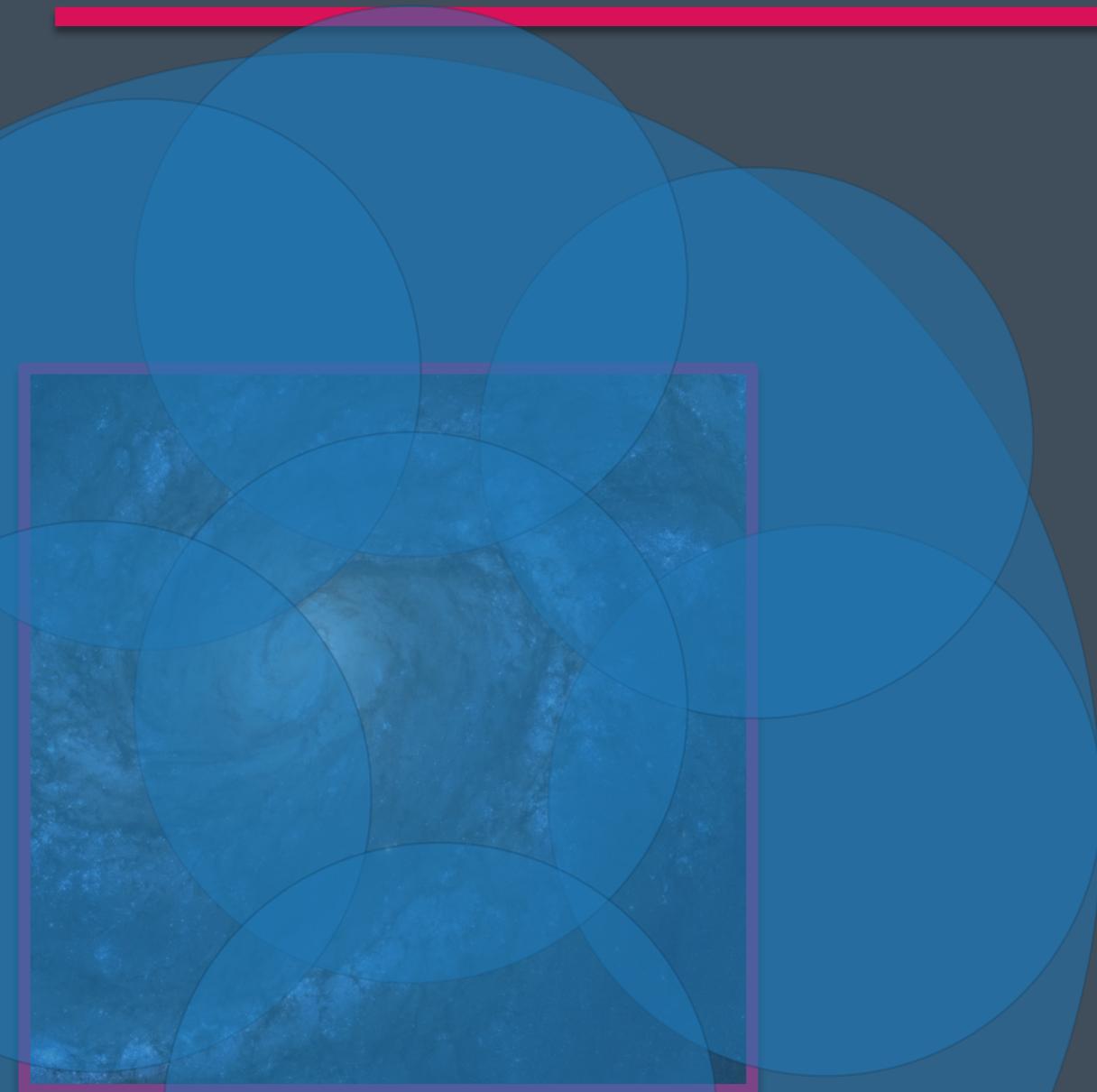
# Matière noire aux échelles subgalactiques

---



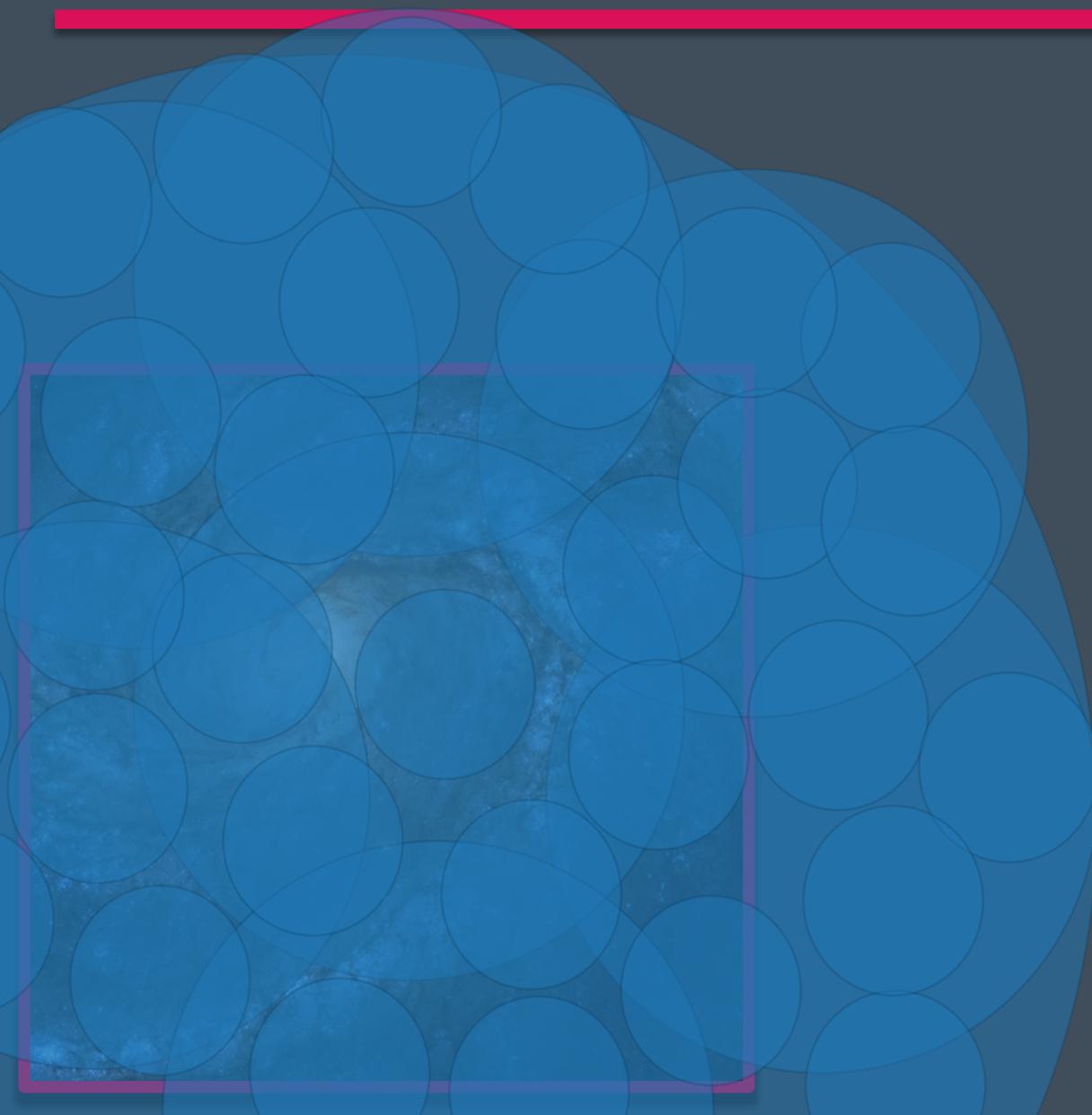
# Matière noire aux échelles subgalactiques

---



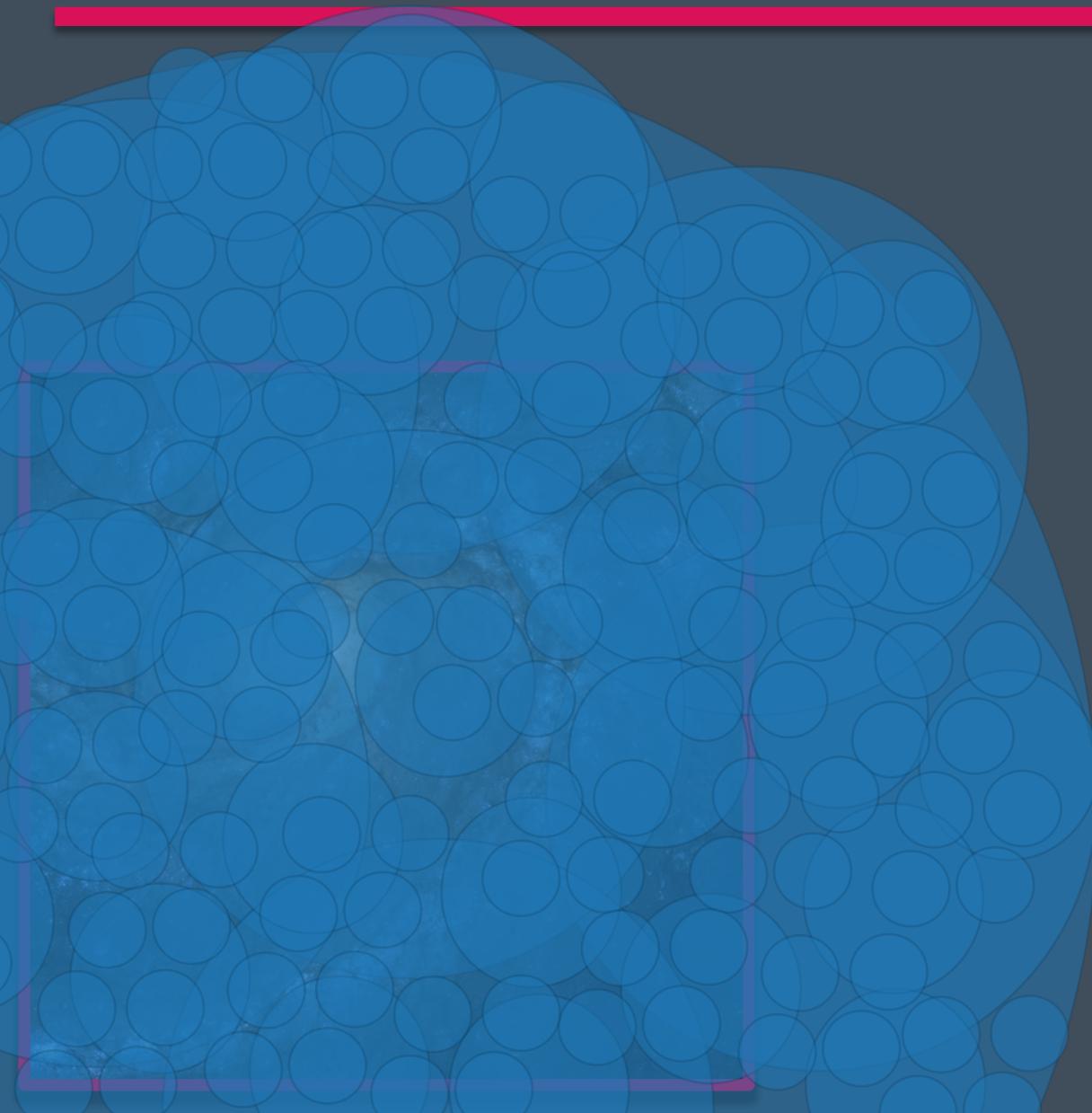
# Matière noire aux échelles subgalactiques

---



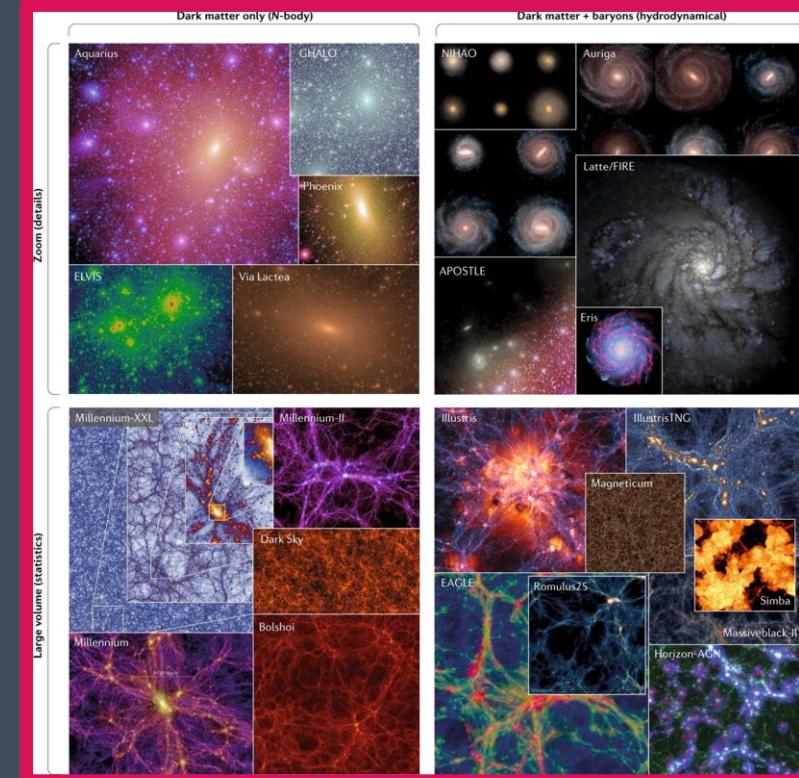
# Matière noire aux échelles subgalactiques

---



# Matière noire aux échelles subgalactiques

Construction hiérarchique  
des halos de matière noire



# Longueur de libre parcours de la matière noire

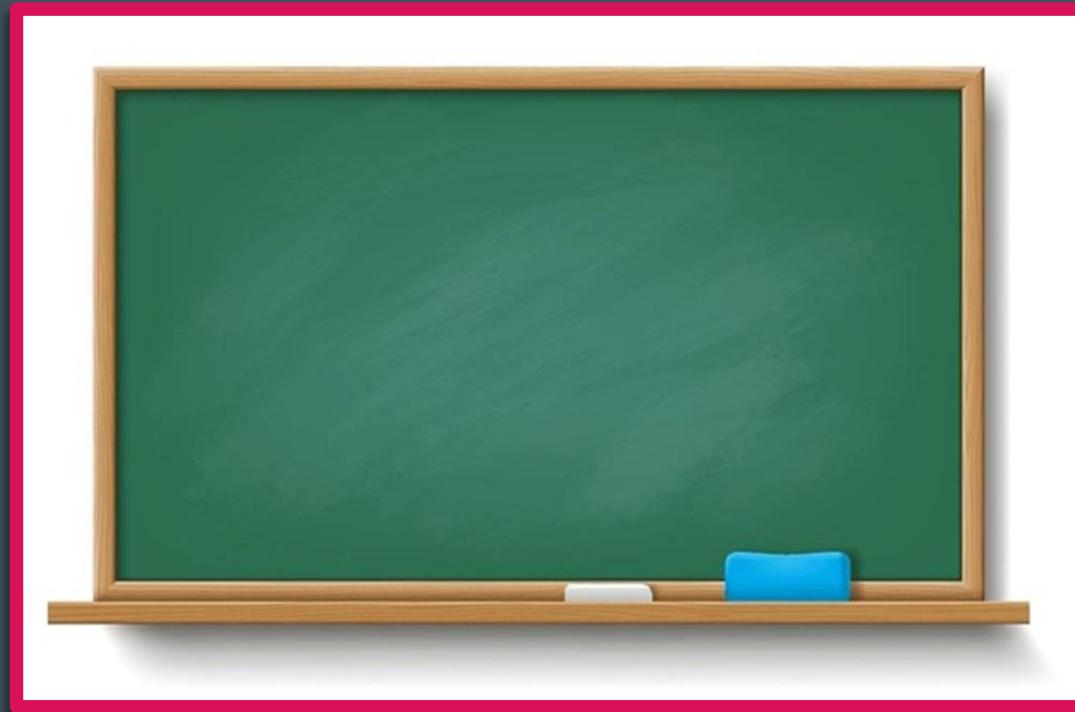
---

A quelle échelle minimale  
cette hiérarchie s'arrête ?

# Longueur de libre parcours de la matière noire

---

A quelle échelle minimale  
cette hiérarchie s'arrête ?



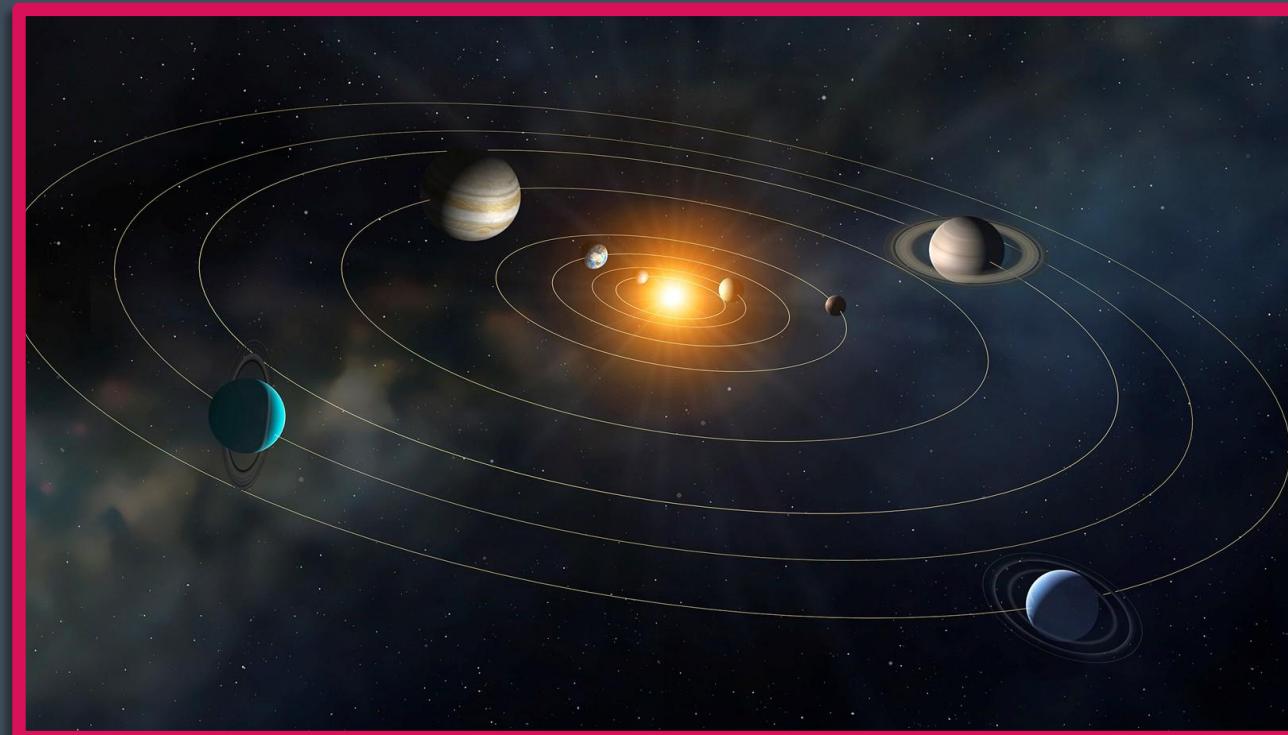
# Matière noire aux échelles subgalactiques

---

Tests gravitationnels aux  
petites échelles ?

# Matière noire aux échelles subgalactiques

Tests gravitationnels aux  
petites échelles ?



# Matière noire aux échelles subgalactiques

Tests gravitationnels aux petites échelles ?

Problème: on estime une masse totale de  $\sim 10^{20}$ g de matière noire dans le système solaire. C'est peu ! (masse d'un gros astéroïde)



# Matière noire aux échelles subgalactiques

Tests gravitationnels aux petites échelles ?

Il existe quelques idées, mais nous avons besoin de données plus précises ...  
Problème ouvert !



# Conclusions

---

- Les trous noirs primordiaux sont un candidats intéressant à la matière noire.

# Conclusions

---

- Les trous noirs primordiaux sont un candidats intéressant à la matière noire.
- On les teste assez différemment des particules, puisqu'on ne s'attend pas à en voir dans un détecteur sur Terre, on utilise les effets supplémentaires qu'ils auraient sur l'Univers.

# Conclusions

---

- La matière noire est difficile à observer aux petites échelles, où elle ne domine plus forcément le contenu en masse (exemple: système solaire)

# Conclusions

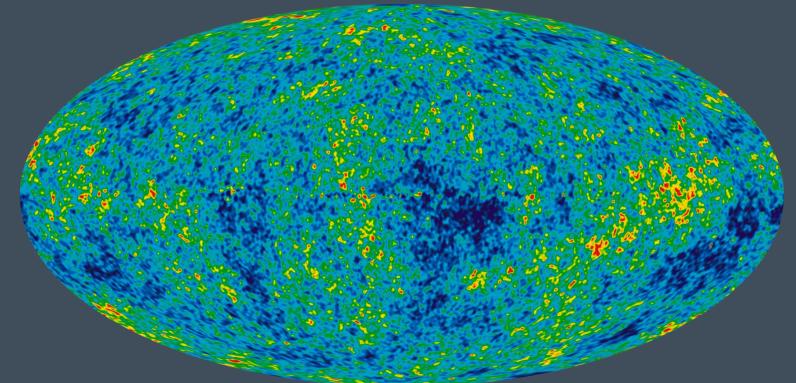
---

- La matière noire est difficile à observer aux petites échelles, où elle ne domine plus forcément le contenu en masse (exemple: système solaire)
- Mais on s'attend à des propriétés différentes à ces échelles en fonction de sa nature. Nous avons cruellement besoin de tests aux petites échelles !

# Synthèse du cours

---

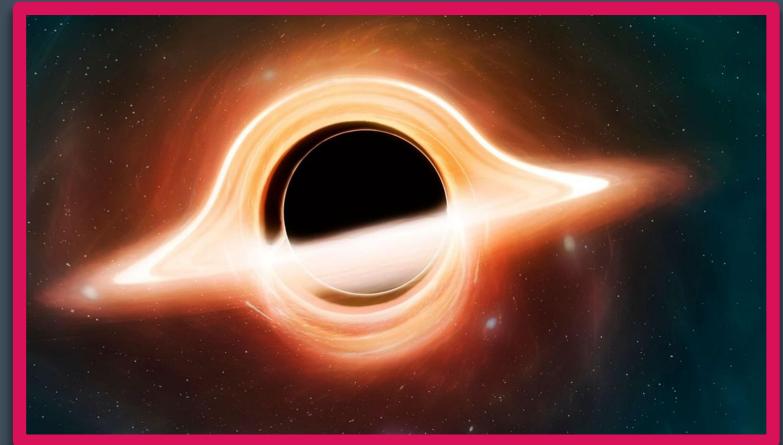
- Nous avons de nombreuses traces de l'existence de la matière noire ...



# Synthèse du cours

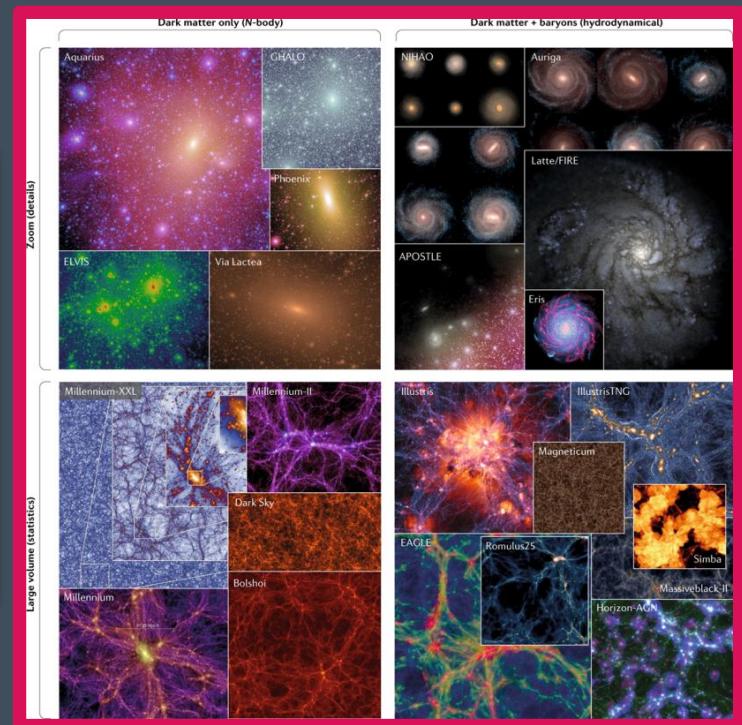
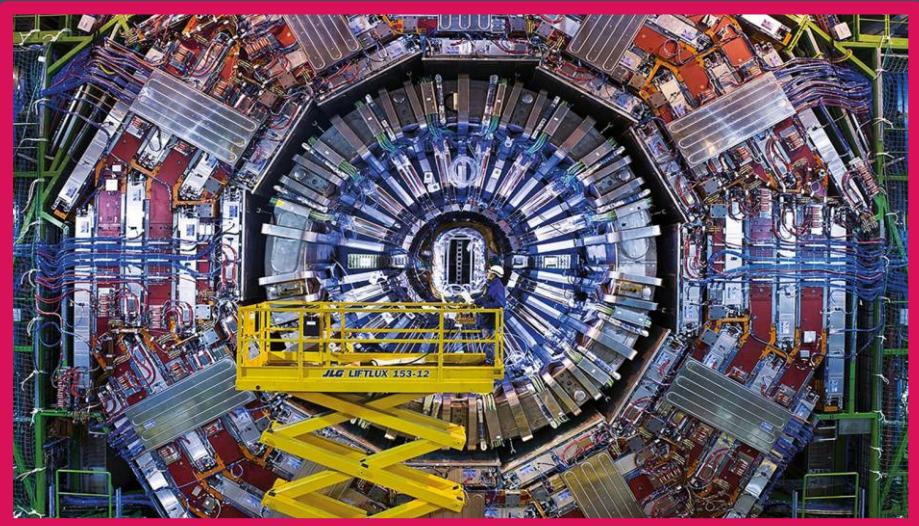
---

- Il existe des centaines de candidats théoriques pouvant expliquer celle-ci.



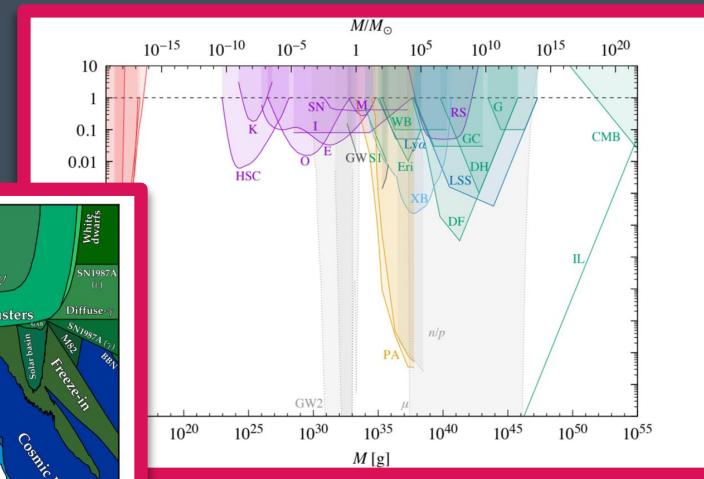
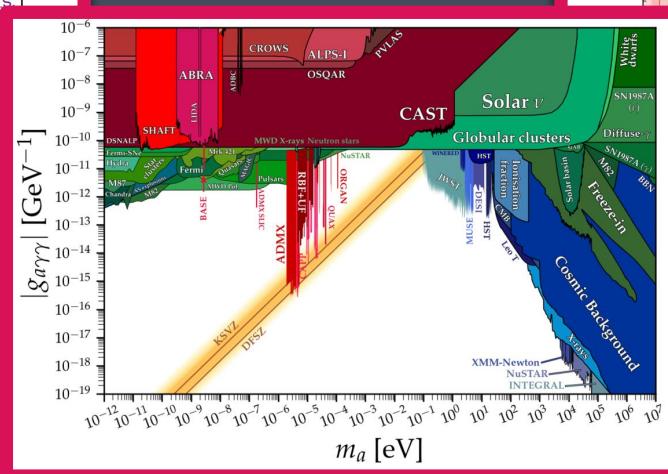
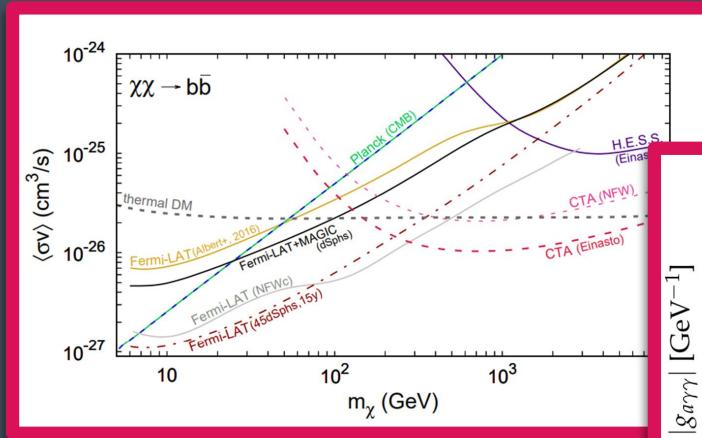
# Synthèse du cours

- On teste ces candidats via des expériences sur Terre, des observations de l'espace, et des simulations.



# Synthèse du cours

➤ Aucune détection pour le moment, mais la recherche avance, avec de nouvelles idées et technologies motivées par les contraintes.



# Synthèse du cours

---

En persévérant, nous finirons certainement un jour par comprendre la nature de cette mystérieuse matière, et enfin dévoiler un des plus grands secrets de notre Univers...

# Synthèse du cours

---

**TO BE  
CONTINUED...**

# CPA: Matière noire: état de la recherche

# MERCI A TOUS !

Nicolas Esser  
<https://nicolasesser.github.io/>