

Leçon 4:

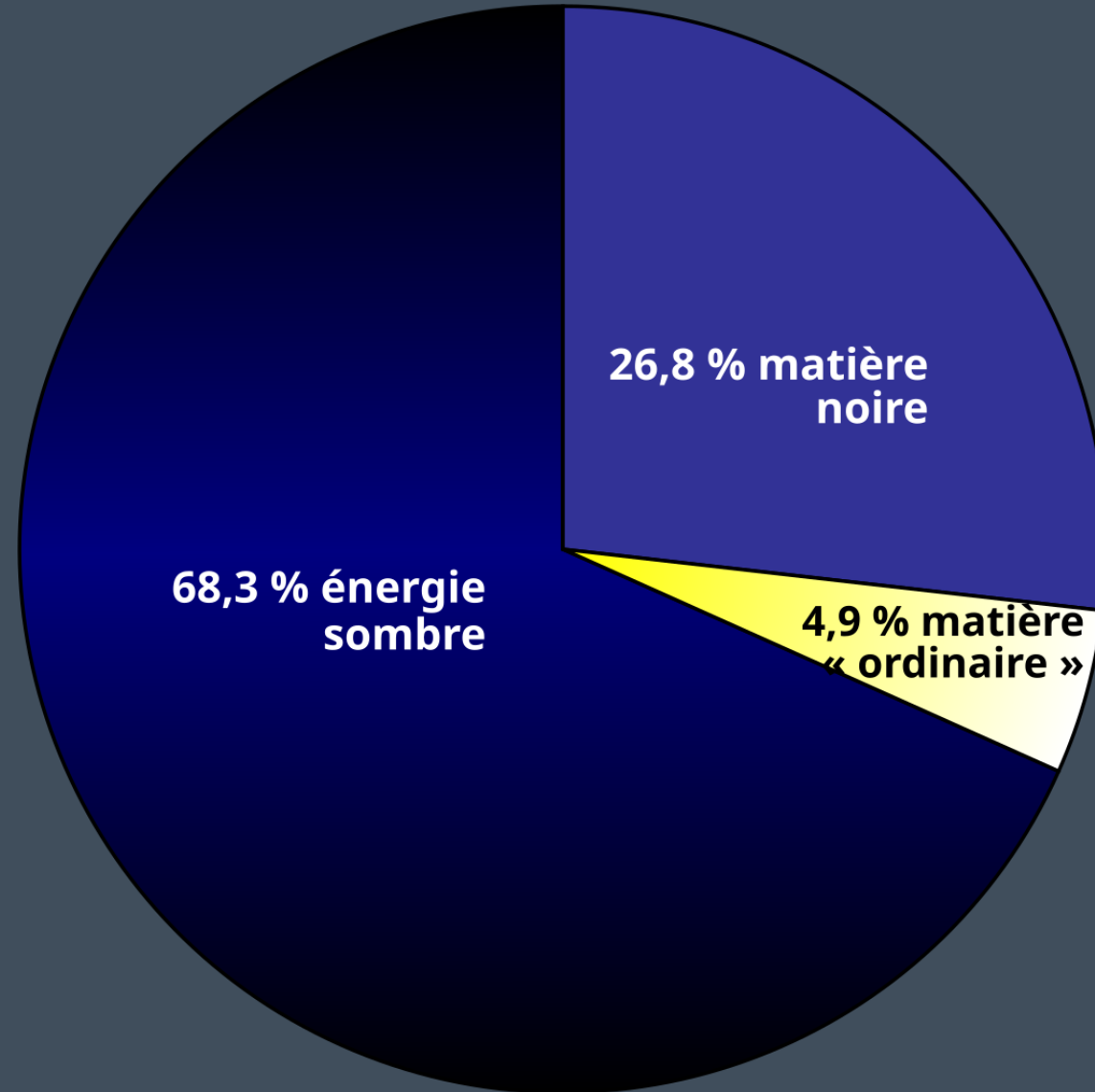
Trous noirs primordiaux et matière
noire à l'échelle subgalactique

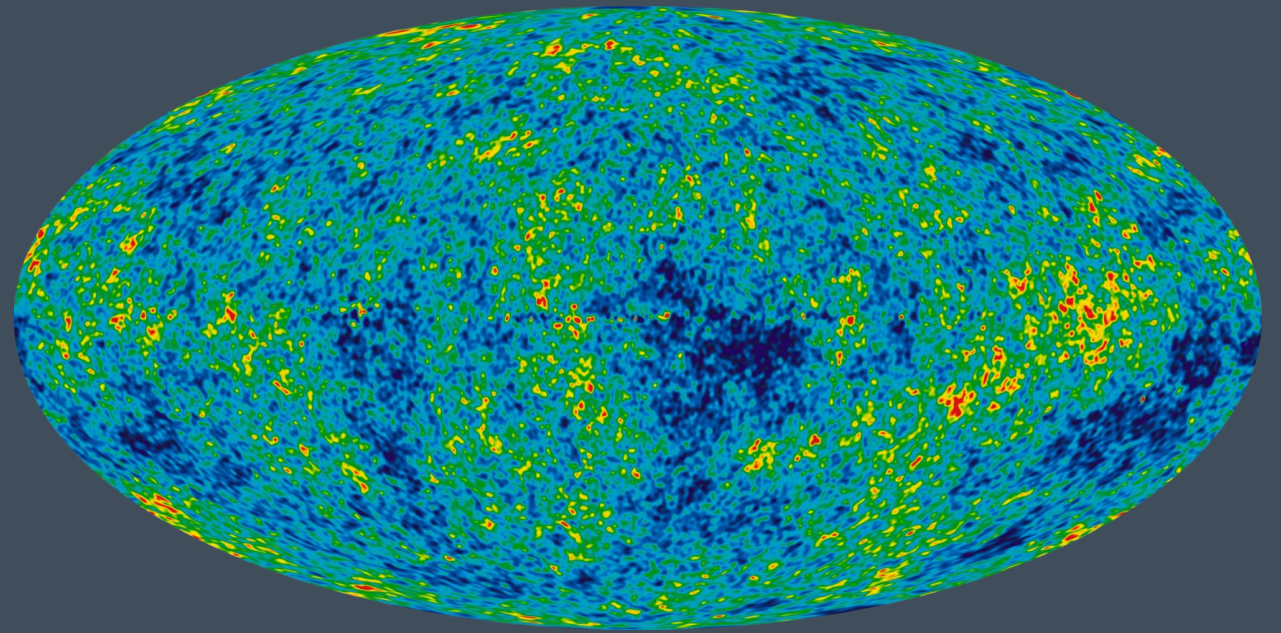
Nicolas Esser

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





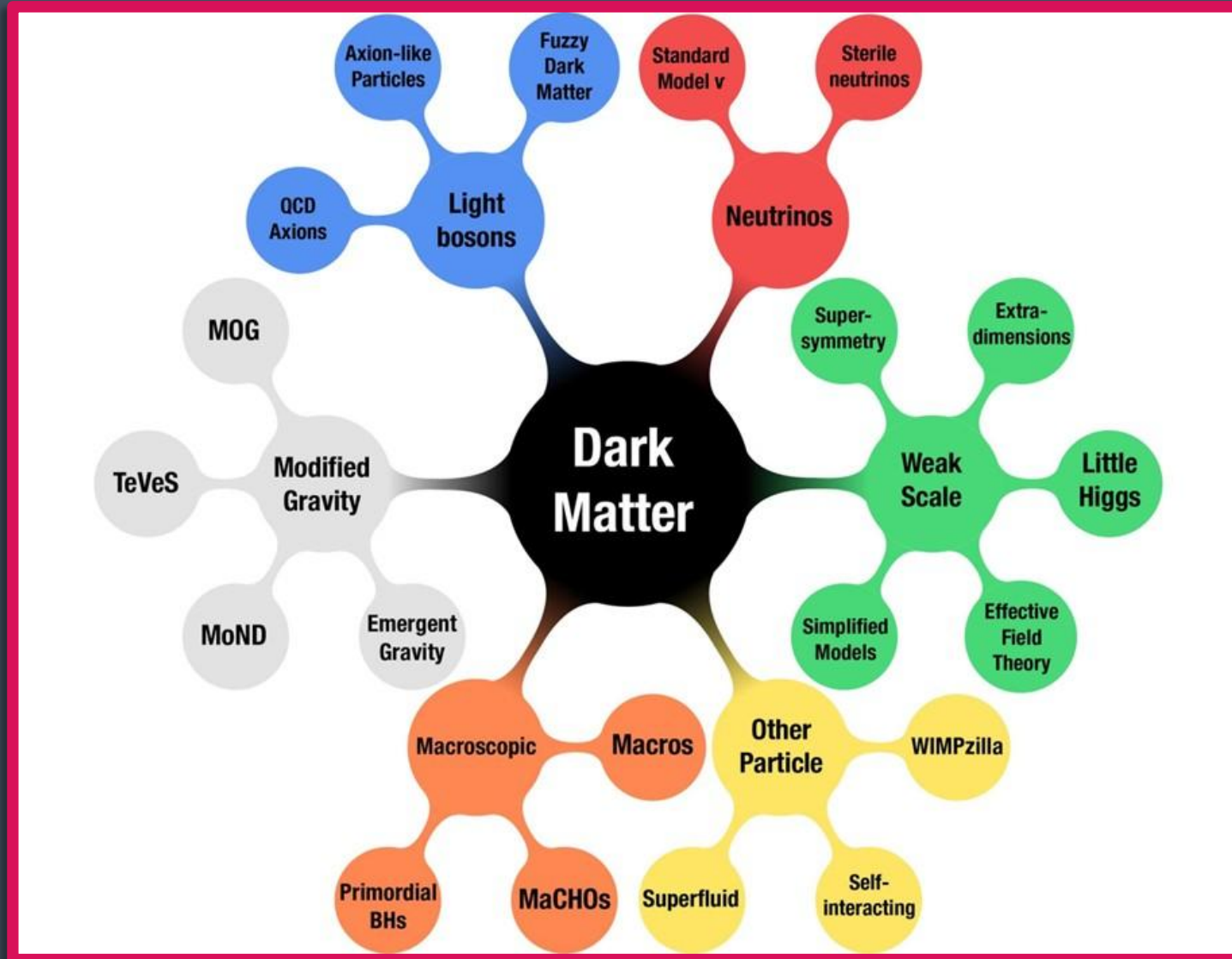


La matière noire est présente
à différentes échelles et à
différentes époques !

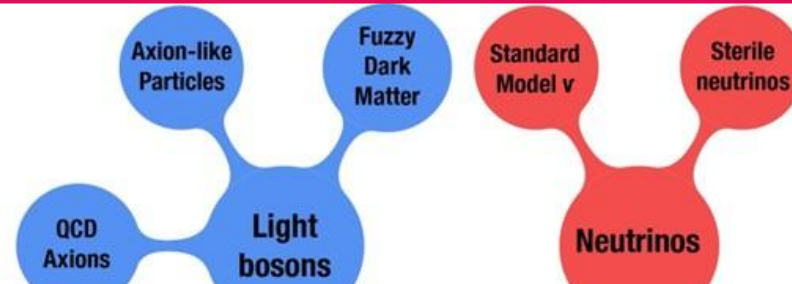
MAIS: l'échelle la plus petite
à laquelle on en voit des
traces est l'échelle
galactique !



Candidats possibles



Candidats possibles



Il en existe des centaines !



Phénoménologie

Observation ?

OUI

On a trouvé la
matière noire!

NON

Contraintes !

Phénoménologie

Observation ?

OUI

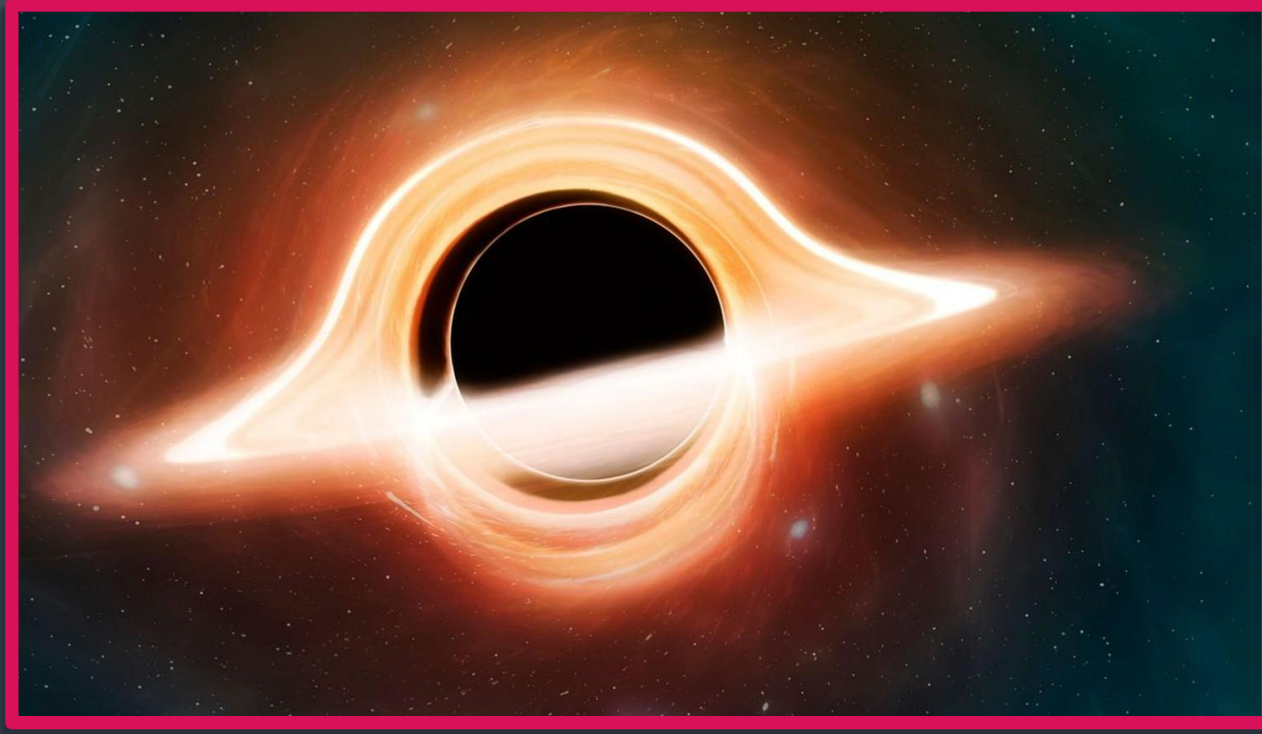
On a trouvé la
matière noire!

NON

Contraintes !



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 leçon₃

Trous noirs primordiaux / Matière noire aux petites échelles

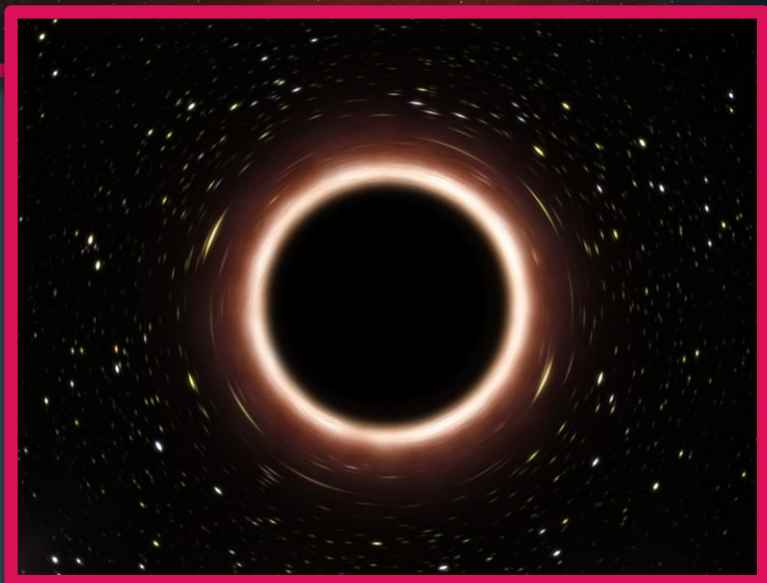
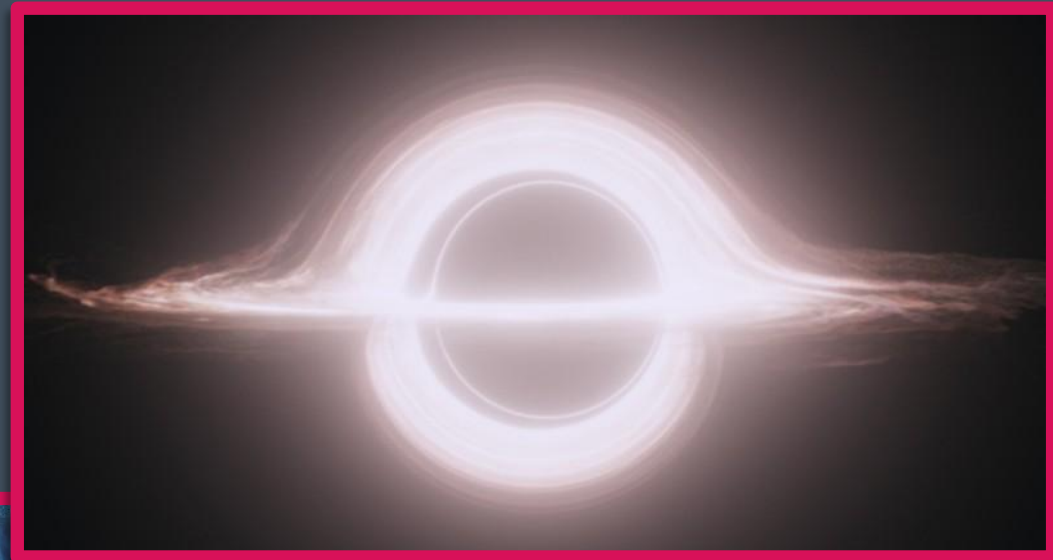
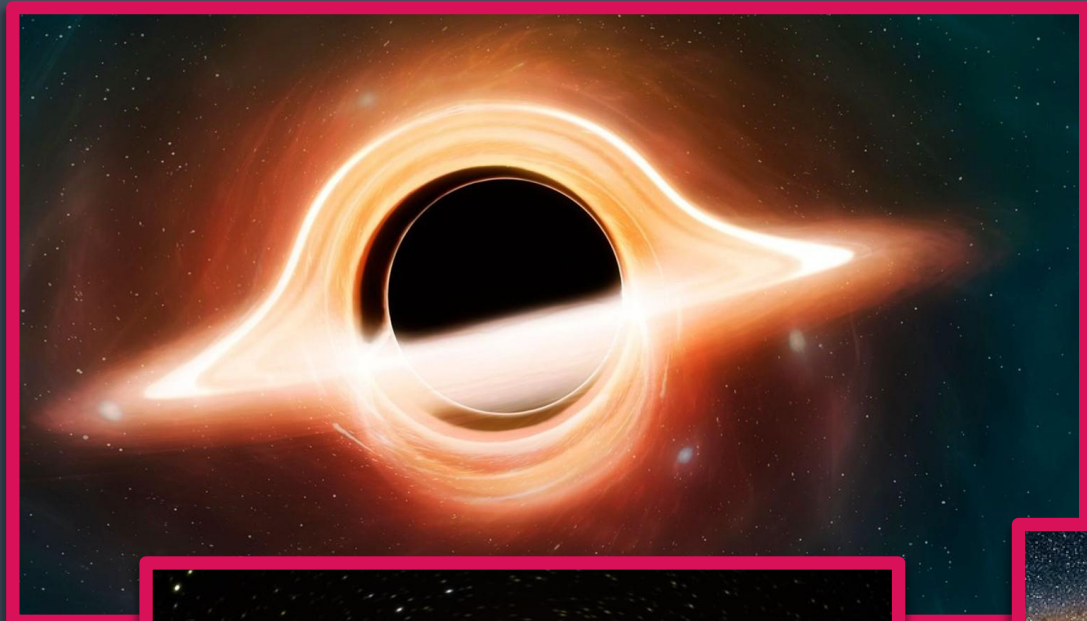
- Trous noirs primordiaux: idée
- Trous noirs primordiaux: contraintes
- Matière noire à l'échelle subgalactique
- Conclusions et synthèse du cours

Trous noirs primordiaux: idée et origine

Trous noirs

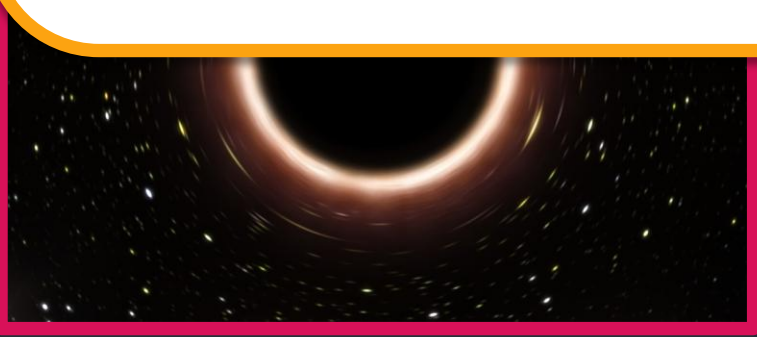
Première définition: un trou noir est une région de l'espace où la gravité est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.

Trous noirs



Trous noirs: historique

Prédiction théorique:
1915 (Einstein)

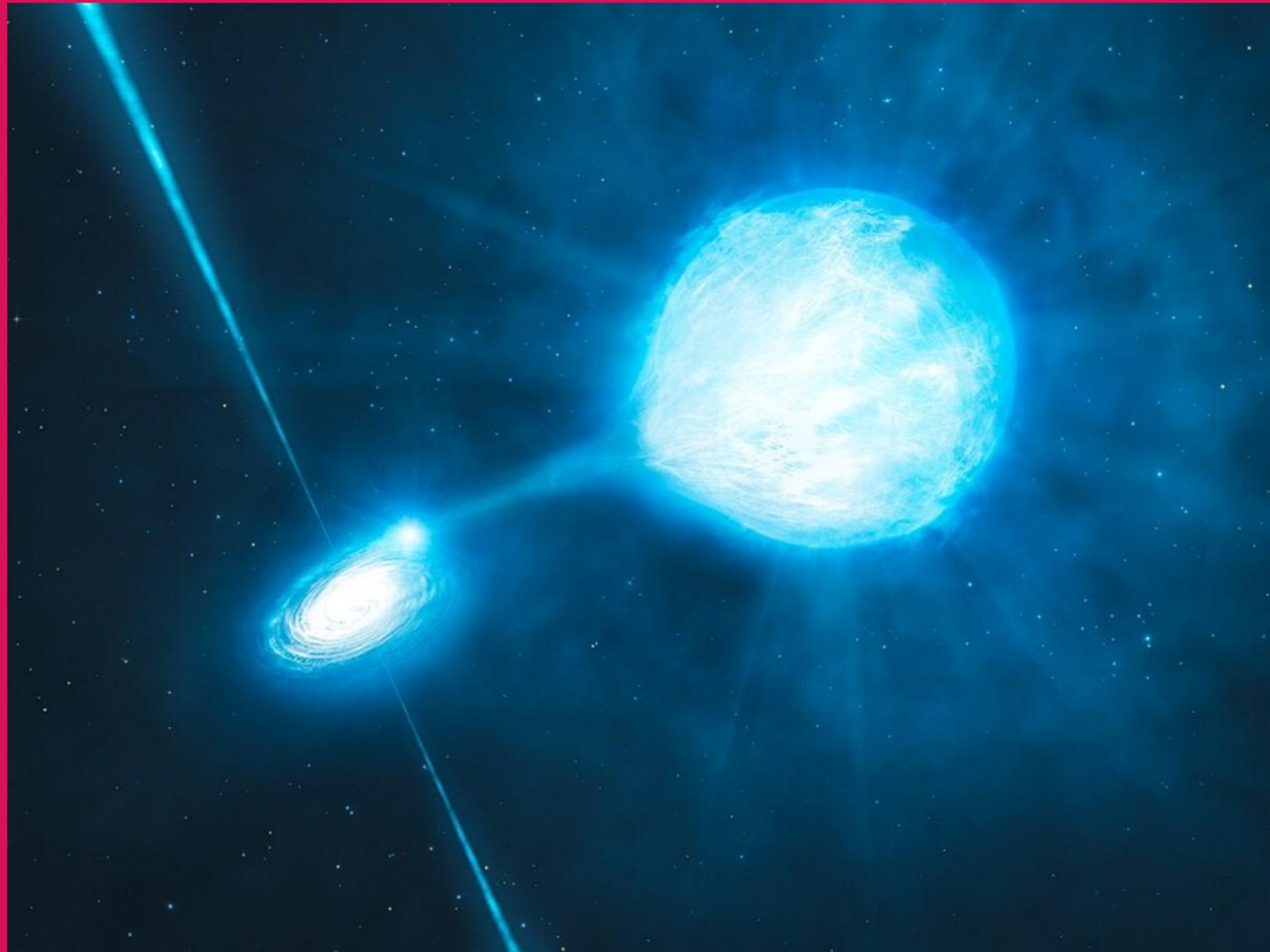


Trous noirs: historique

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

Trous noirs: historique

ob



re

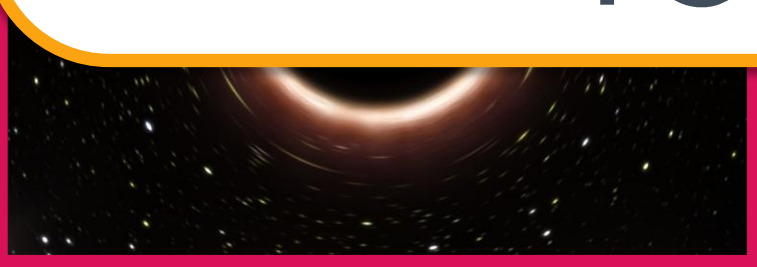
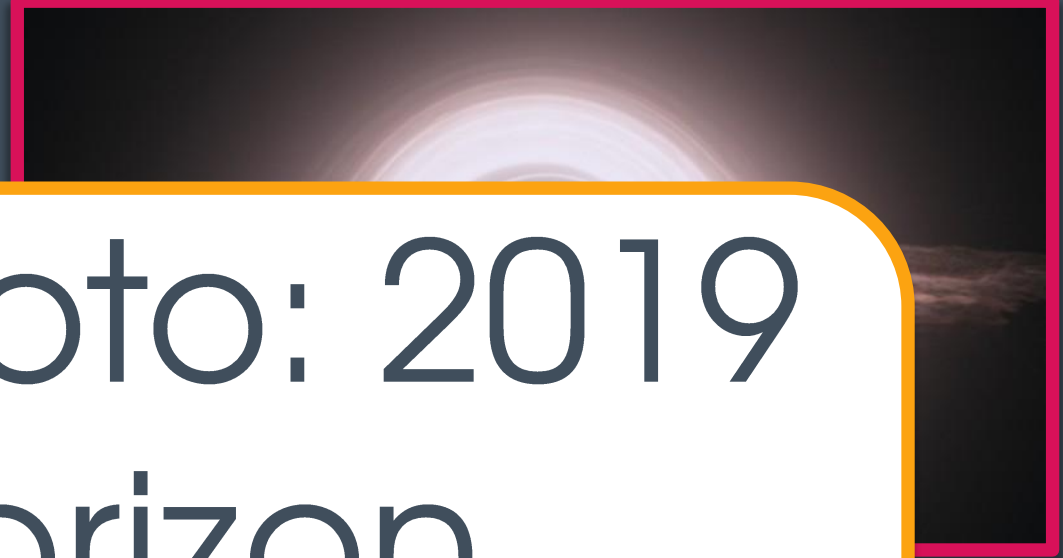


Trous noirs: historique

Détection indirecte
du trou noir au centre
de notre Galaxie

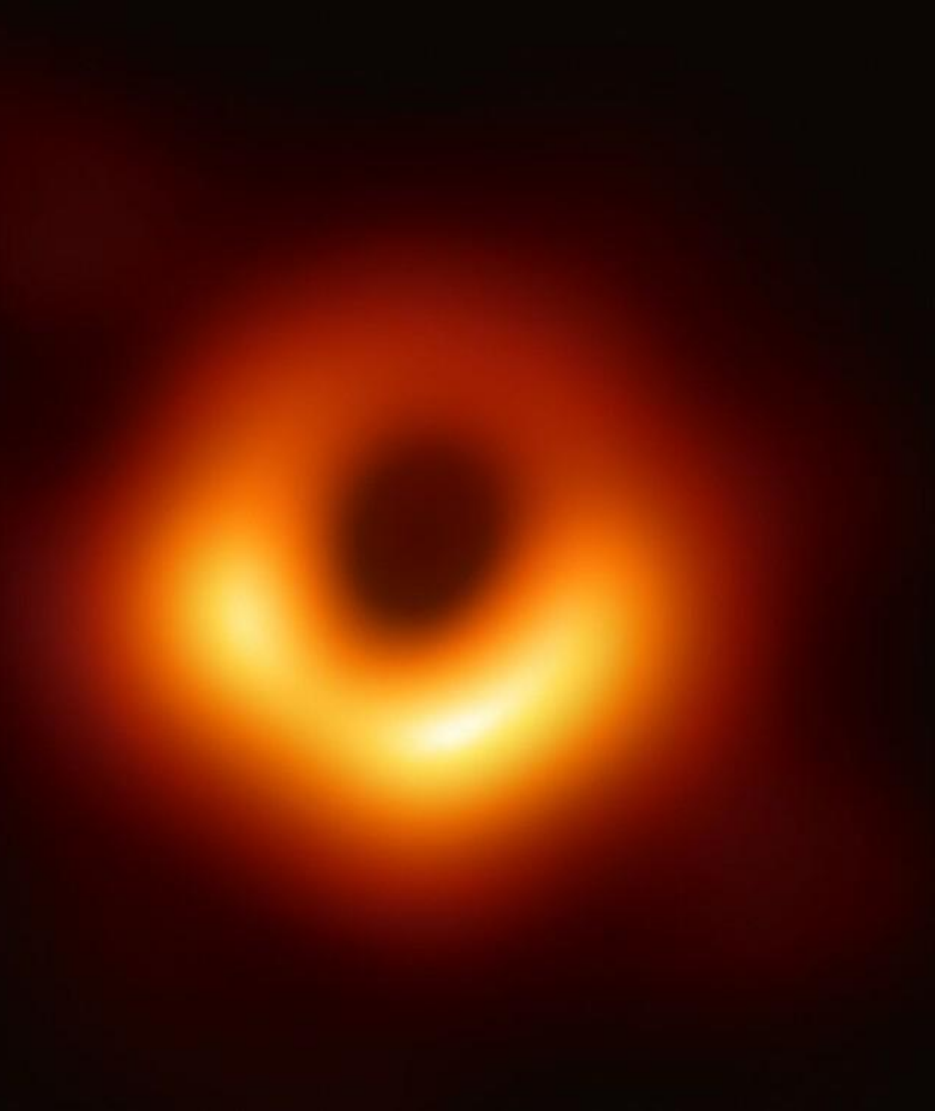
Trous noirs: historique

Première photo: 2019
(Event Horizon
Telescope)

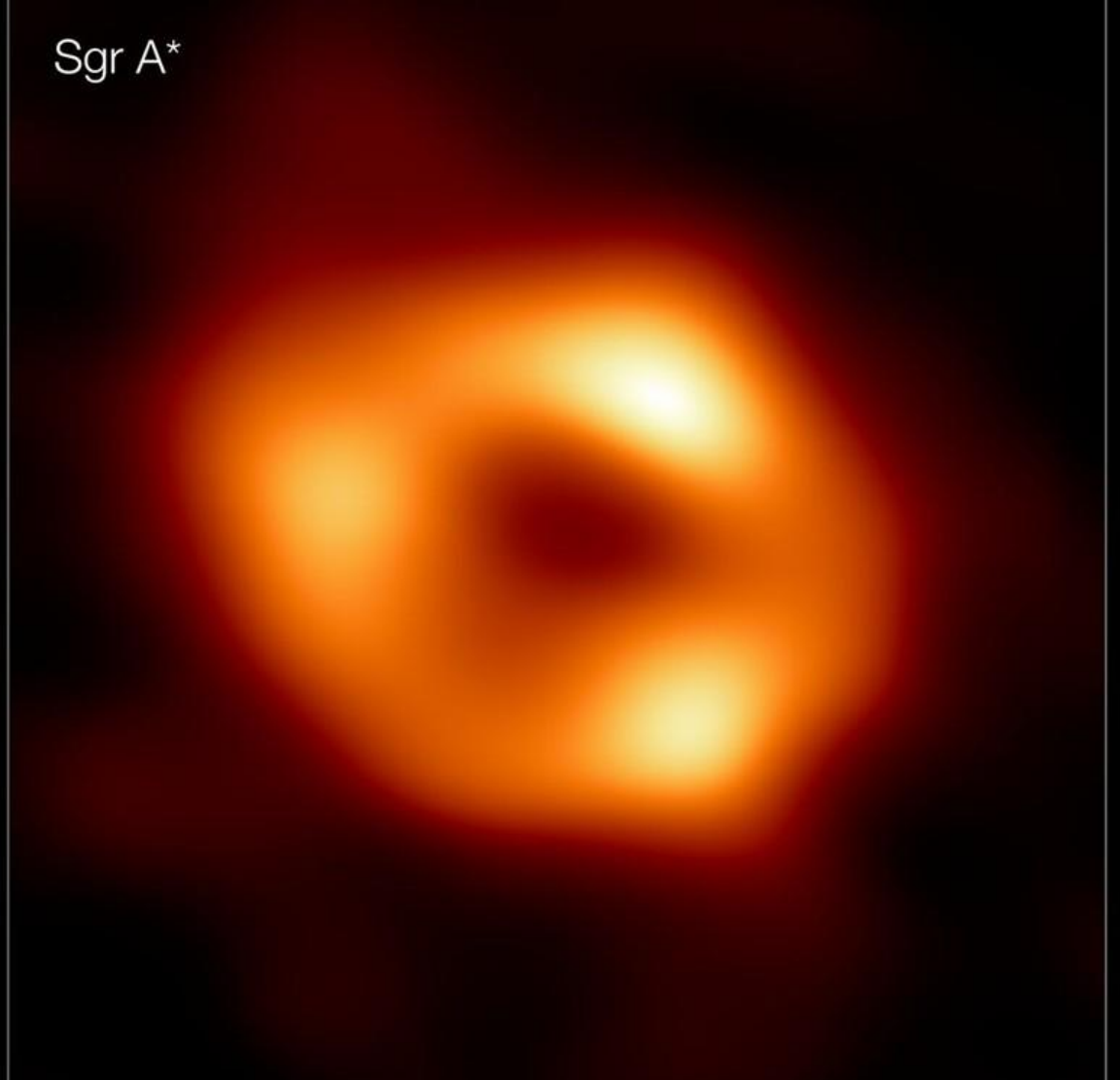


Trous noirs

M87*

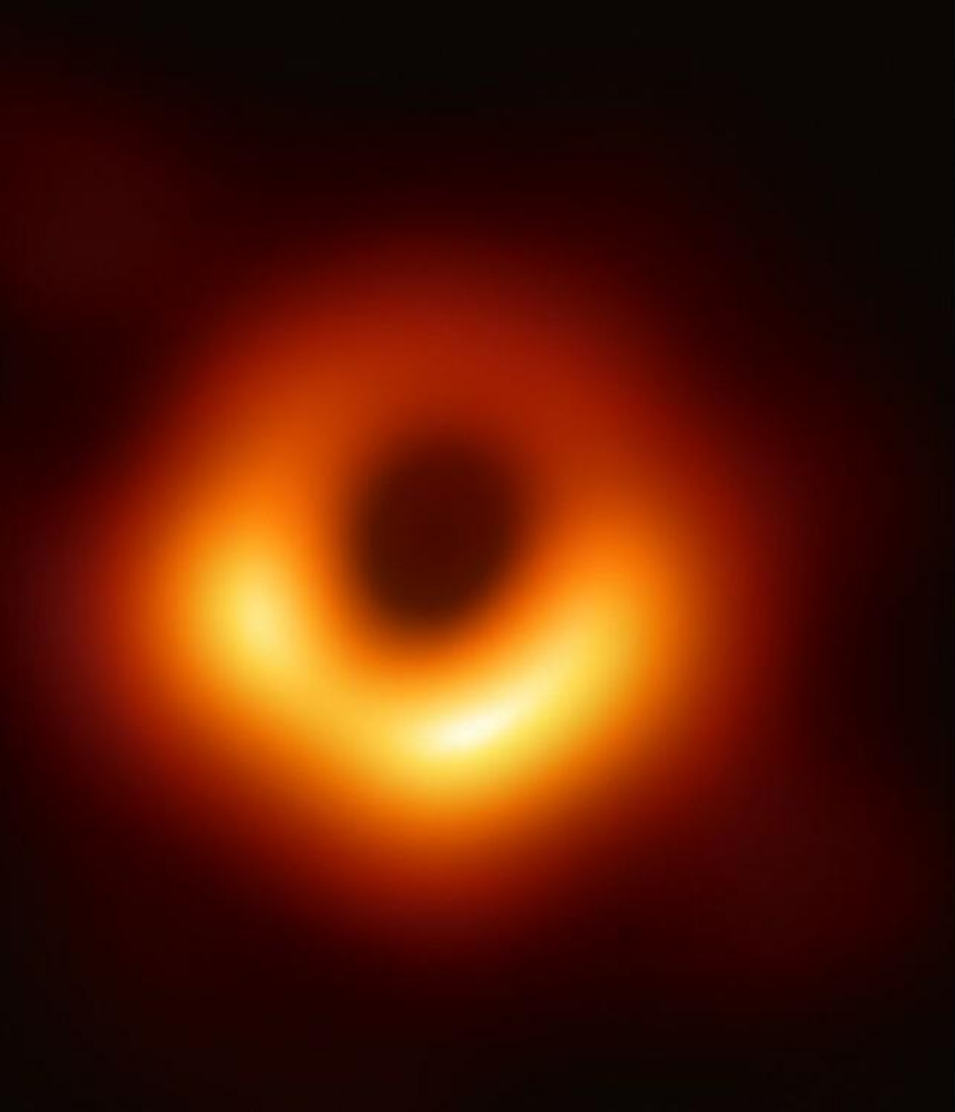


Sgr A*

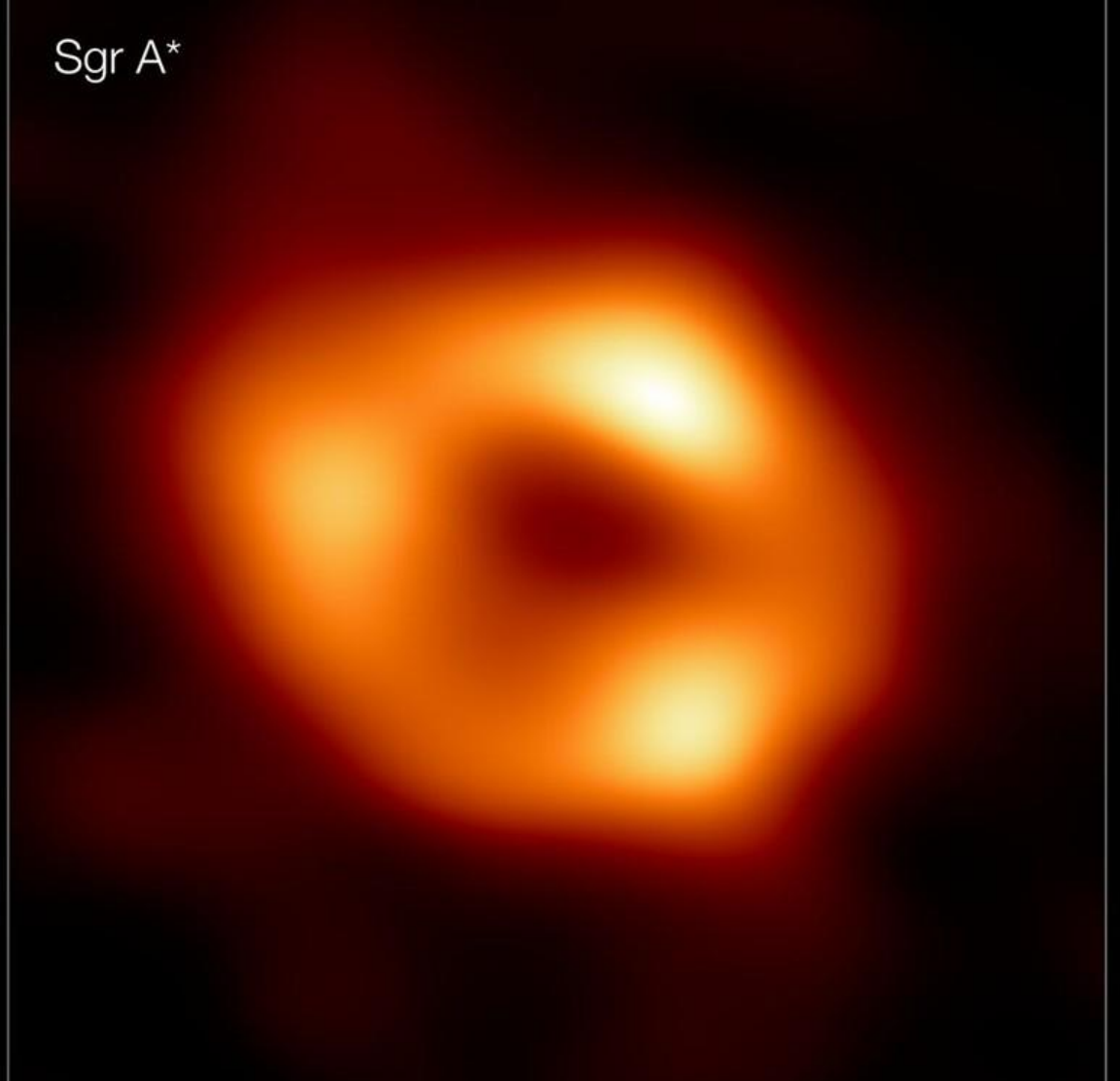


Trous noirs: propriétés

M87*



Sgr A*



Trous noirs: propriétés



Trous noirs: disque d'accrétion

M87

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

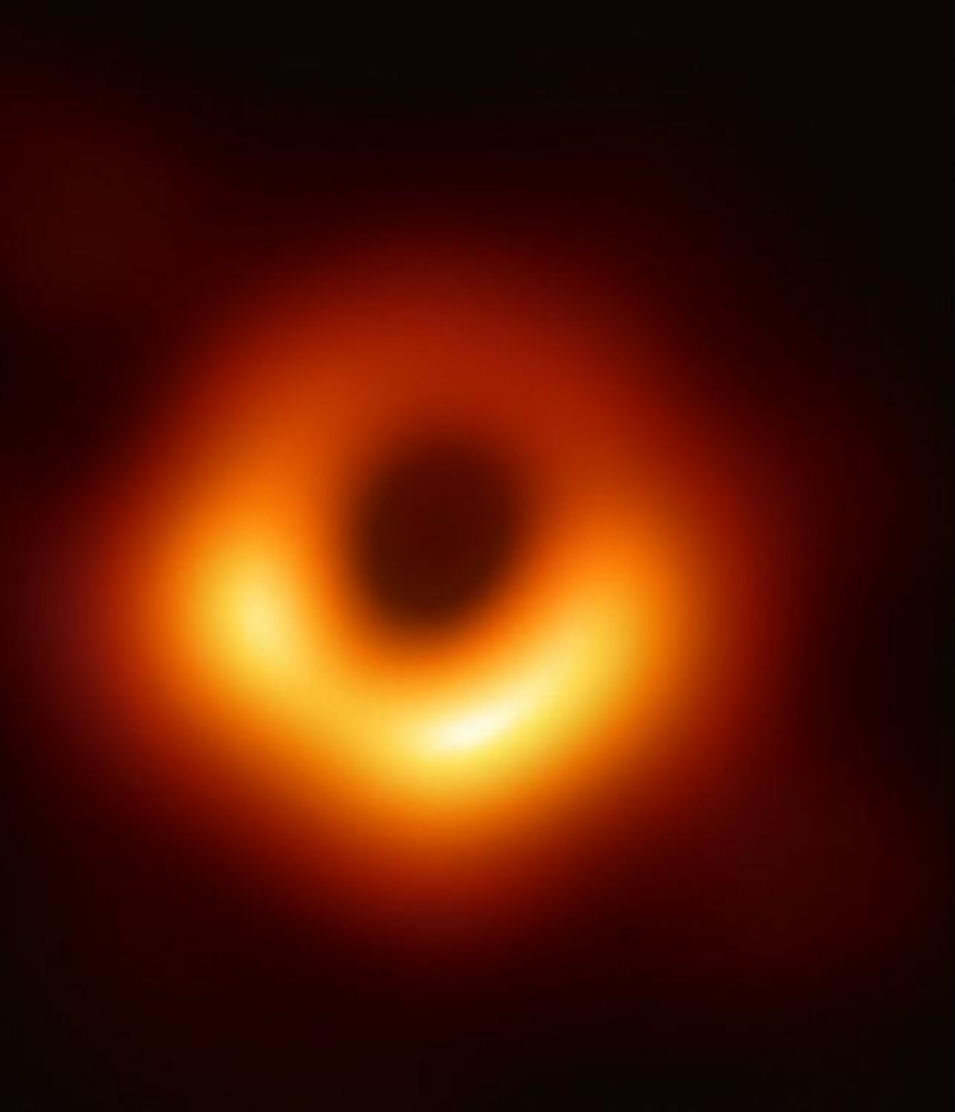


???

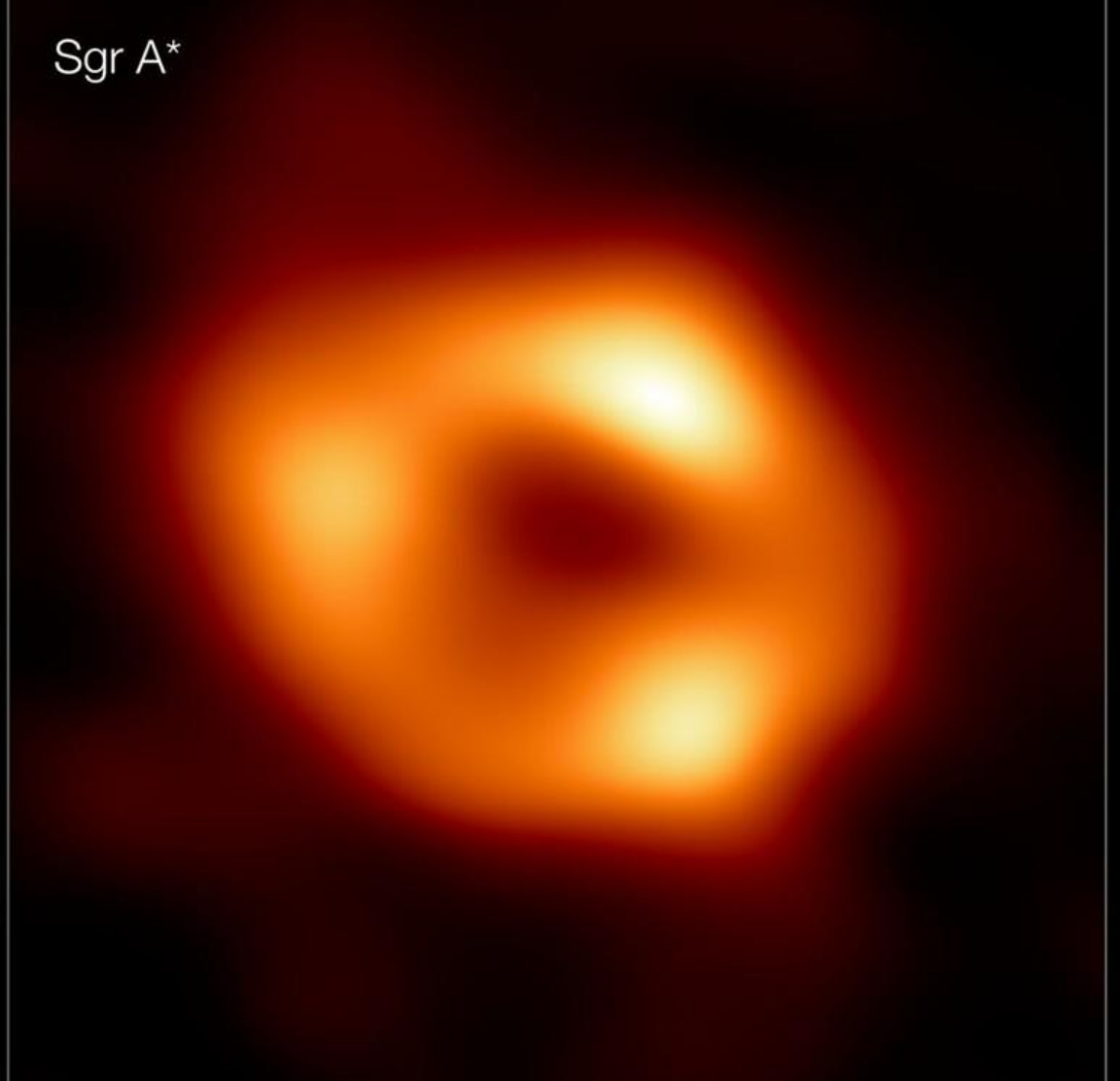
???

Trous noirs: propriétés

M87*



Sgr A*



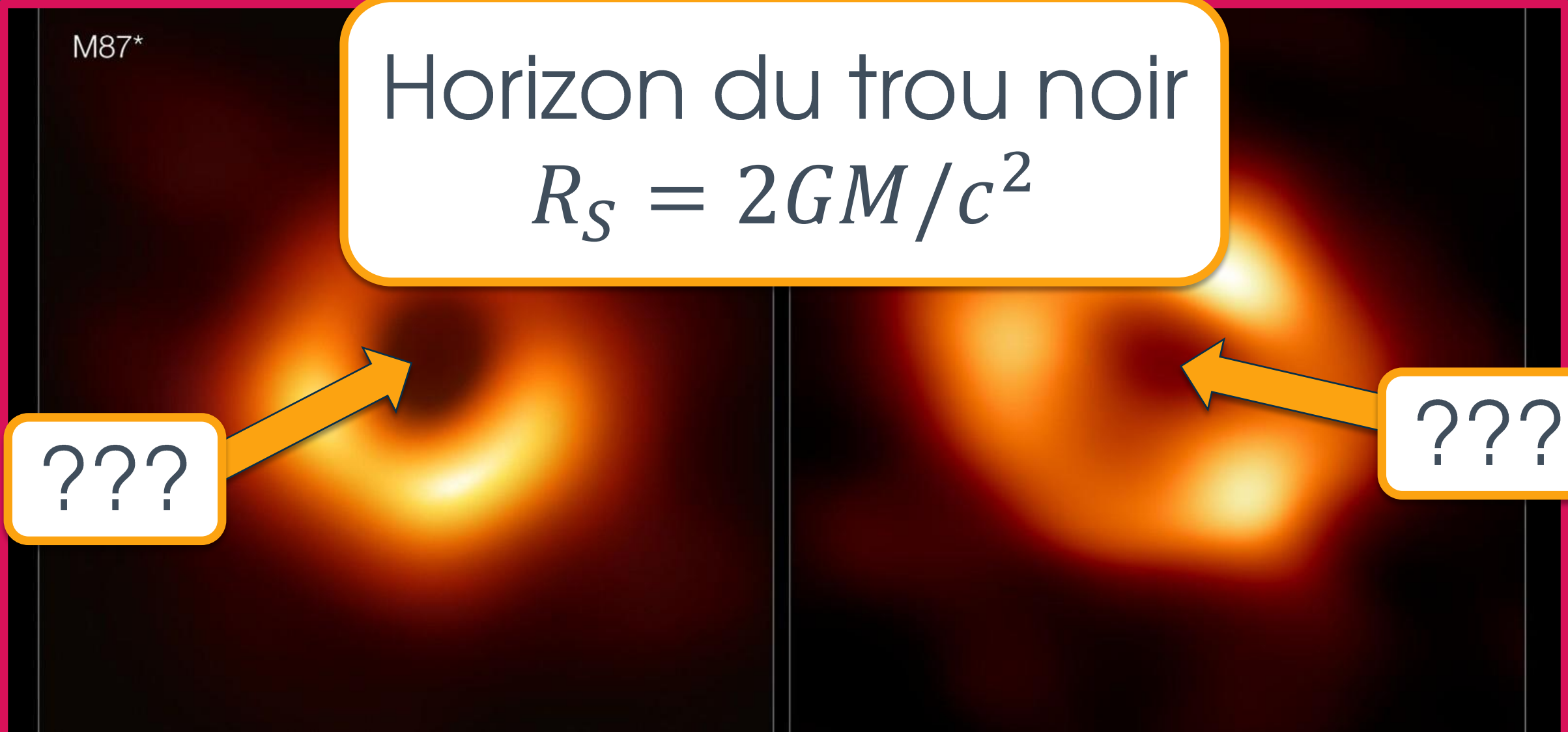
Trous noirs: horizon

M87*

Horizon du trou noir

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

???

A diagram illustrating the event horizon of the black hole M87*. The background is a dark, swirling accretion disk with a bright yellow-orange glow. A central white box contains the text 'Horizon du trou noir' and the formula $R_S = 2GM/c^2$. Two yellow arrows point towards the center from boxes containing '???' on the left and right sides.

???

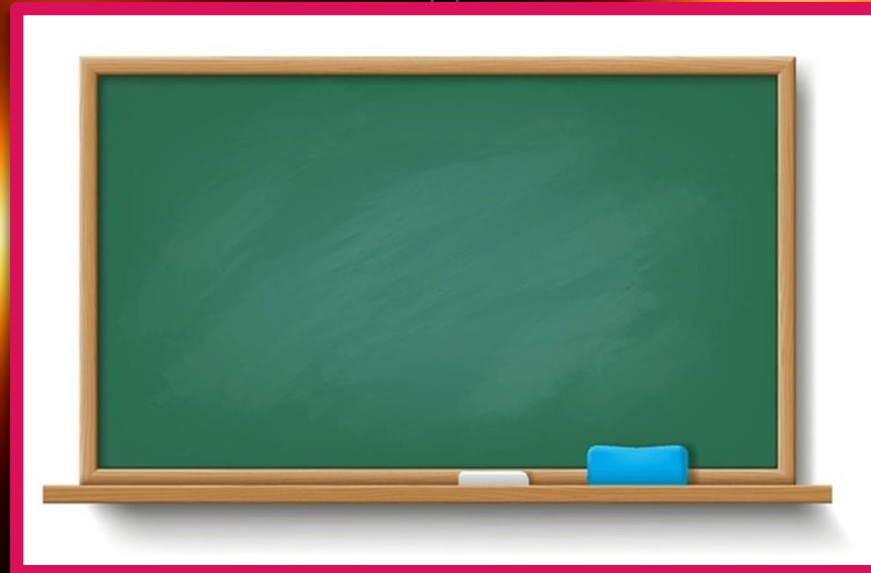
Trous noirs: horizon

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
à 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

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

Department

Cambridge,

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'évaporerait de manière non-négligeable.

Types de trous noirs

Types de trous noirs: stellaires



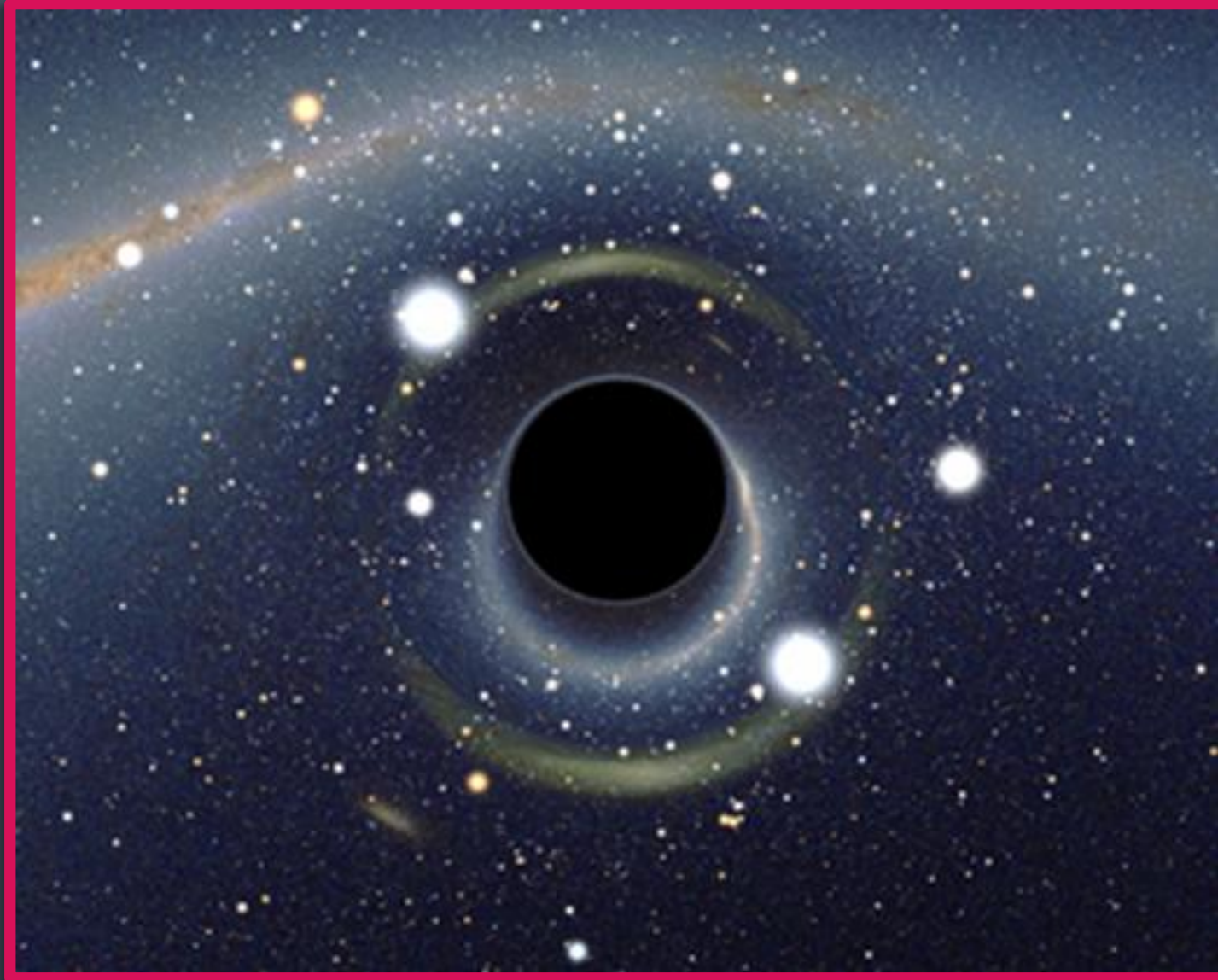
Types de trous noirs: stellaires

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

Types de trous noirs: stellaires



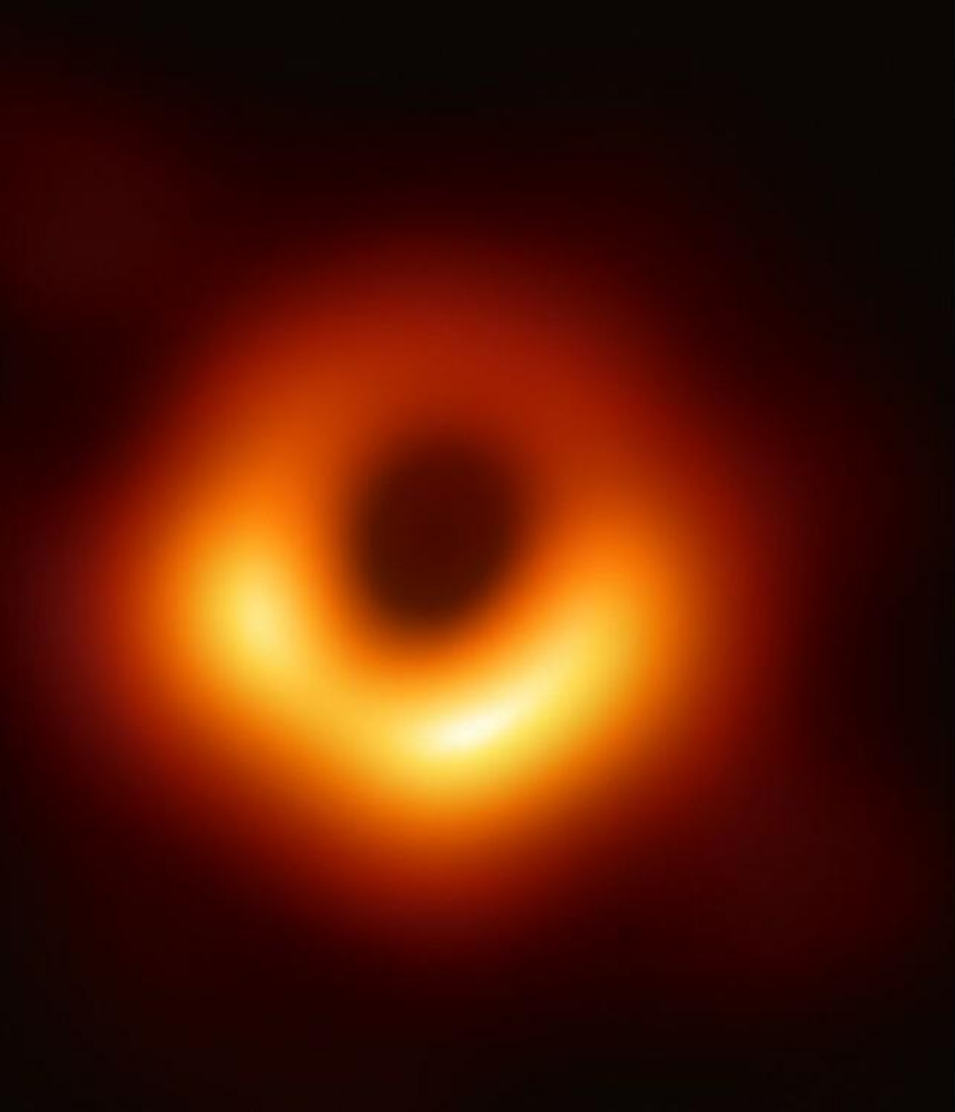
Types de trous noirs: stellaires



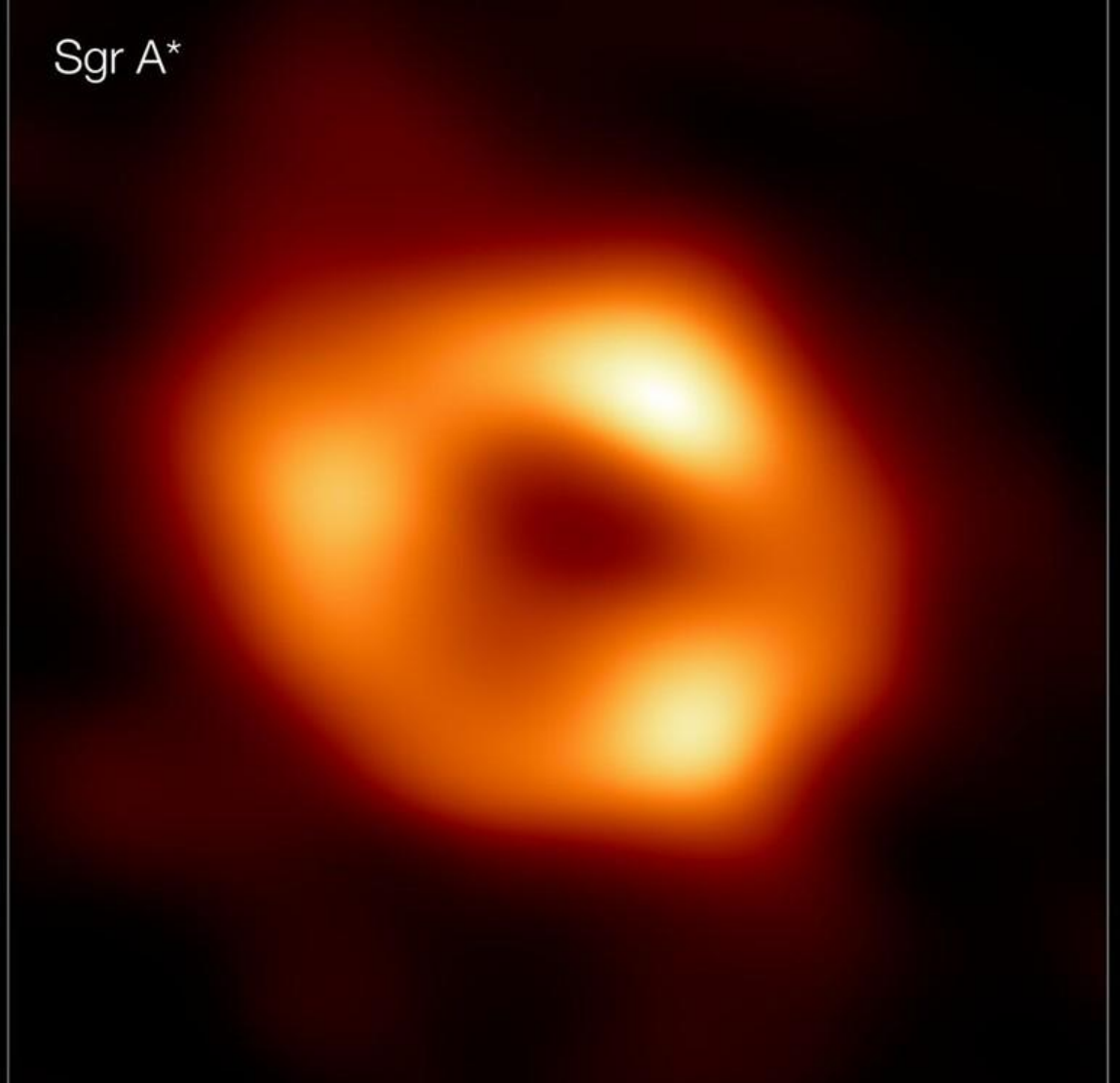
Types de trous noirs: supermassifs

Types de trous noirs: supermassifs

M87*



Sgr A*



Types de trous noirs: supermassifs

M87*

Sgr A*

Origine
inconnue !

Types de trous noirs: primordiaux

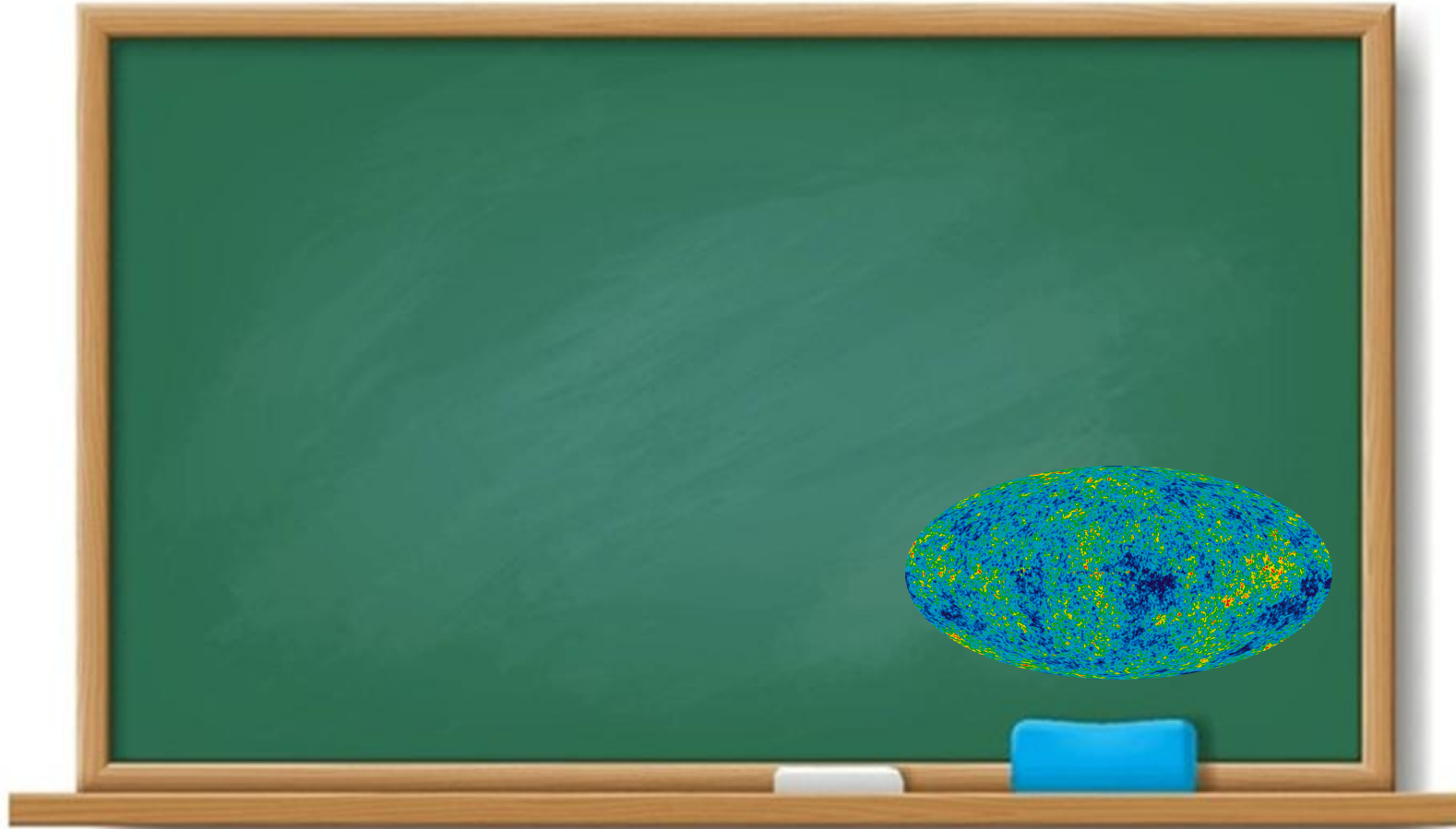
Types de trous noirs: primordiaux

THEORIQUE
(candidat à la
matière noire)

Trous noirs primordiaux

Origine: fluctuations
de densité dans
l'Univers primordial

Trous noirs primordiaux



Trous noirs primordiaux

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

Trous noirs primordiaux

Bon candidat à la matière noire ?

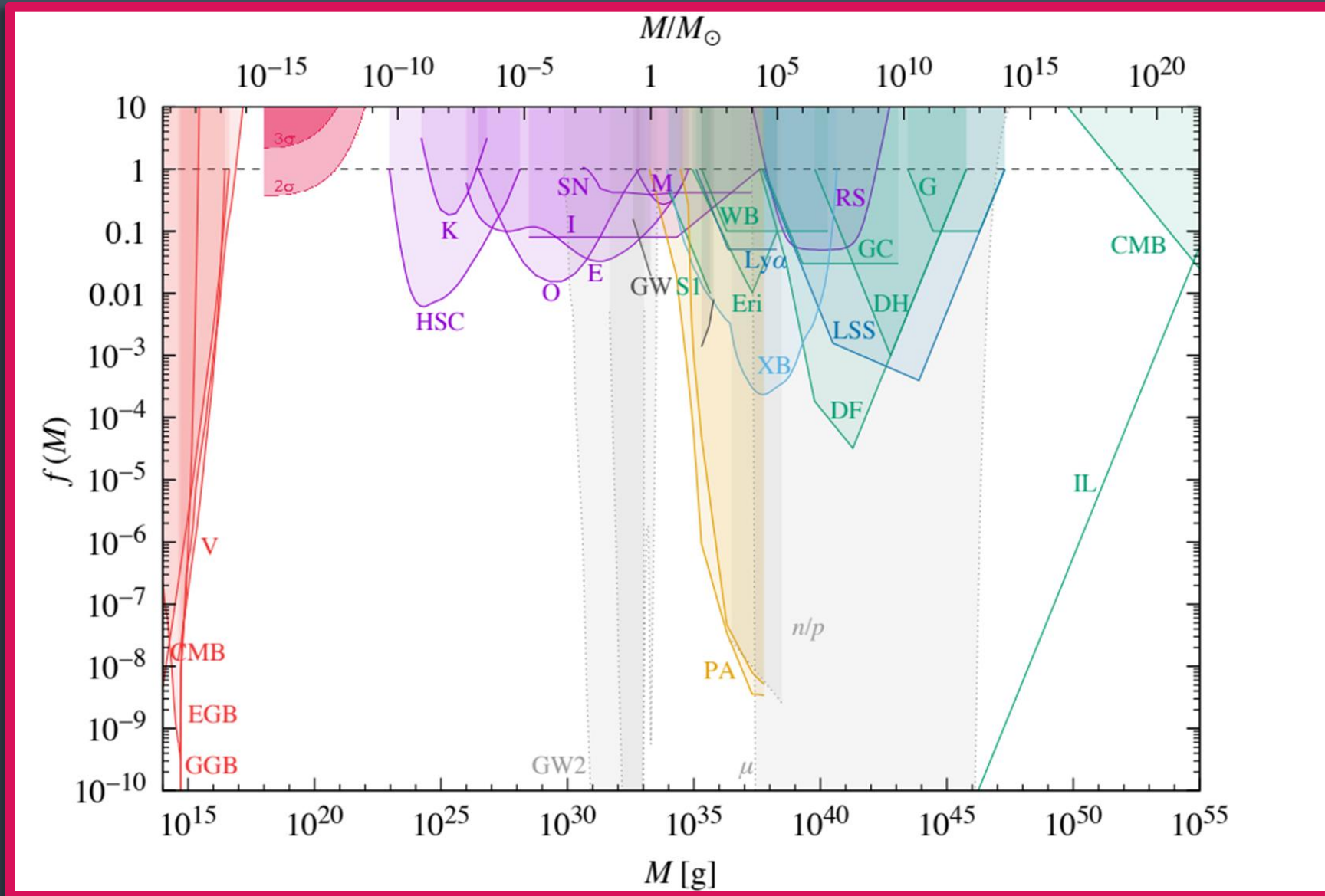
Trous noirs primordiaux

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

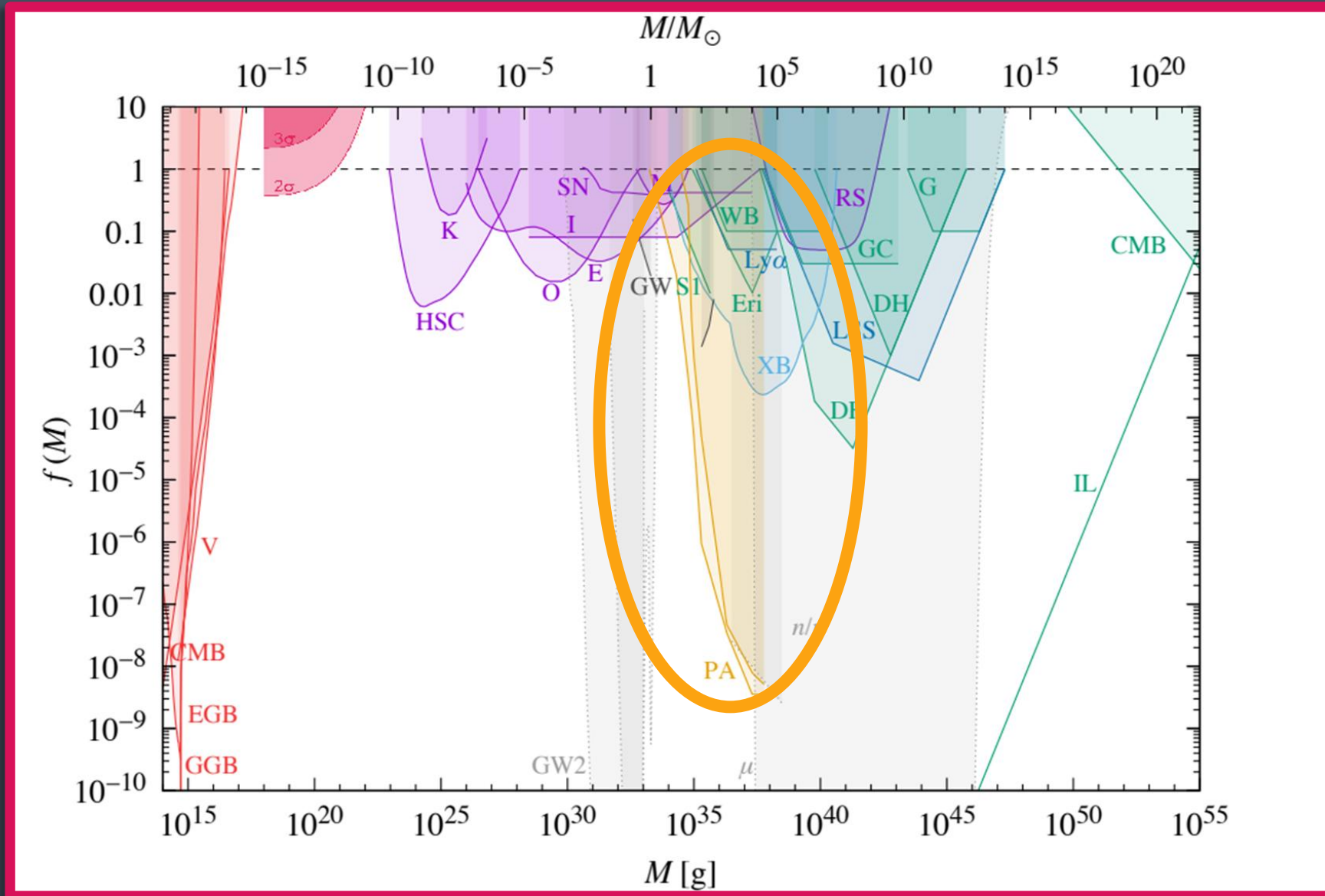
Comment contraind-on
ces trous noirs ?

Trous noirs primordiaux: contraintes

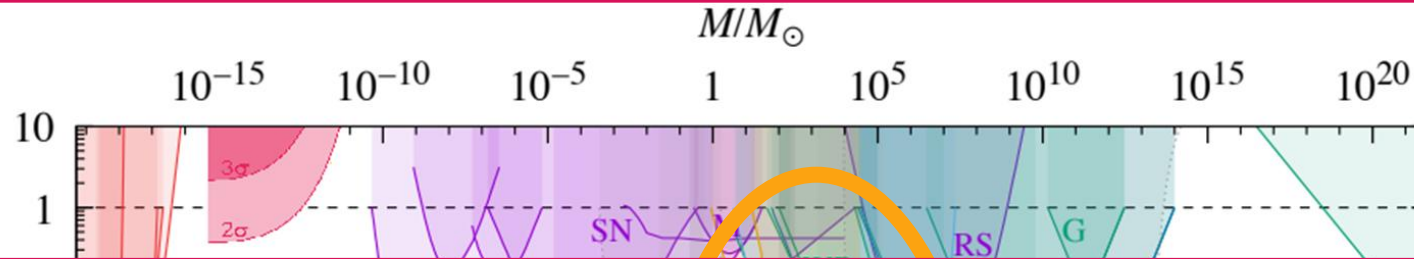
Comment contraind-on
ces trous noirs ?

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

Trous noirs primordiaux: contraintes



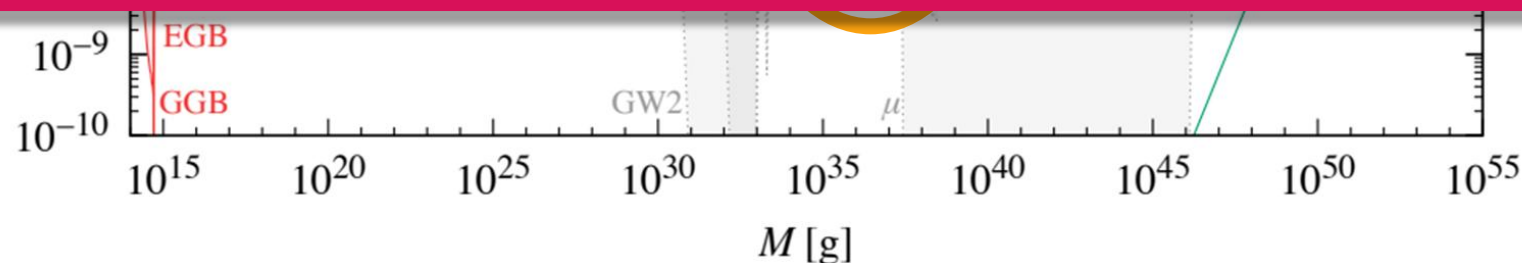
Trous noirs primordiaux: contraintes



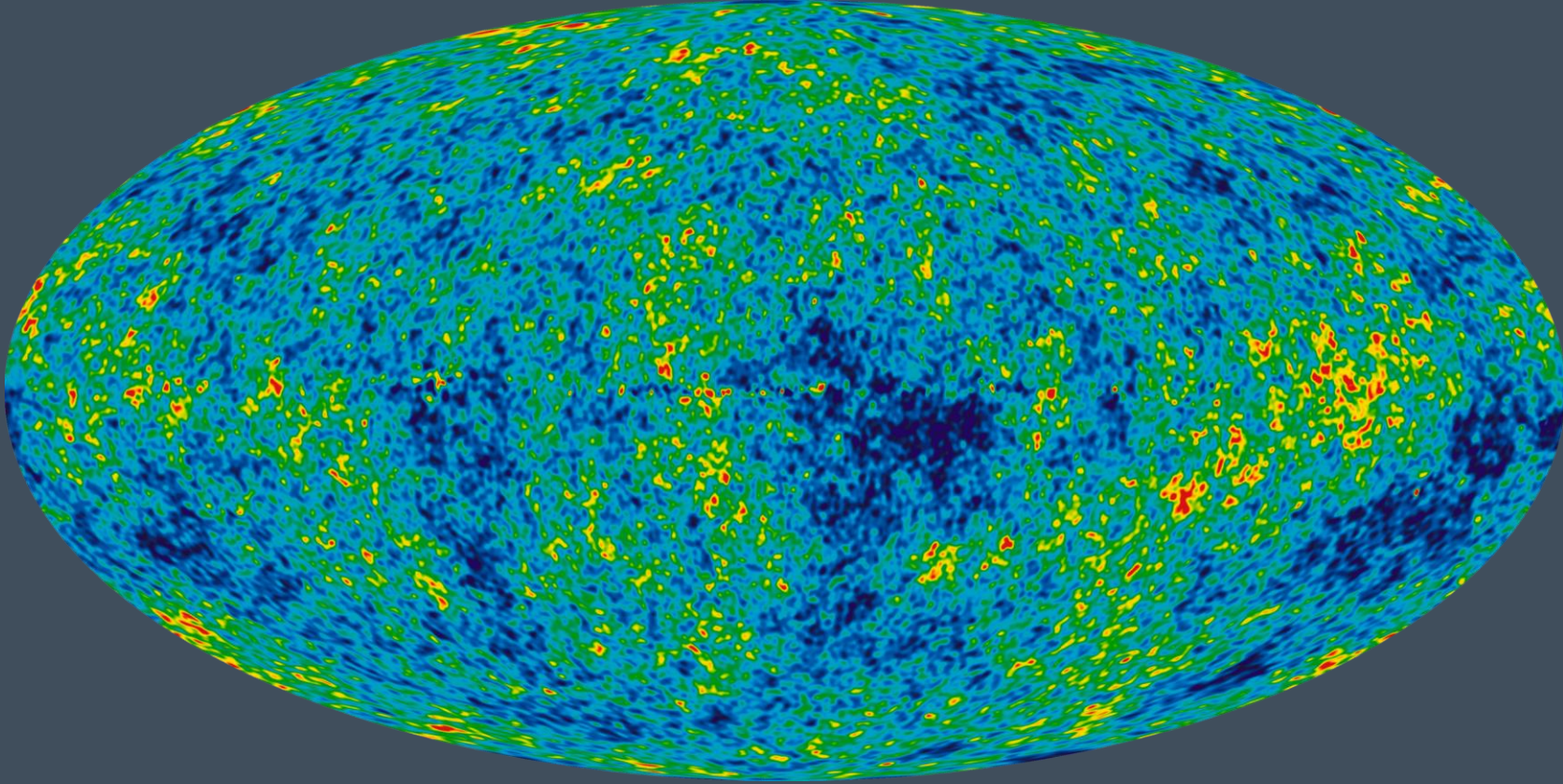
Feedback in the dark: a critical examination of CMB bounds on primordial black holes

Dominic Agius,^a Rouven Essig,^b Daniele Gaggero,^c
Francesca Scarcella,^d Gregory Suczewski,^b Mauro Valli^e

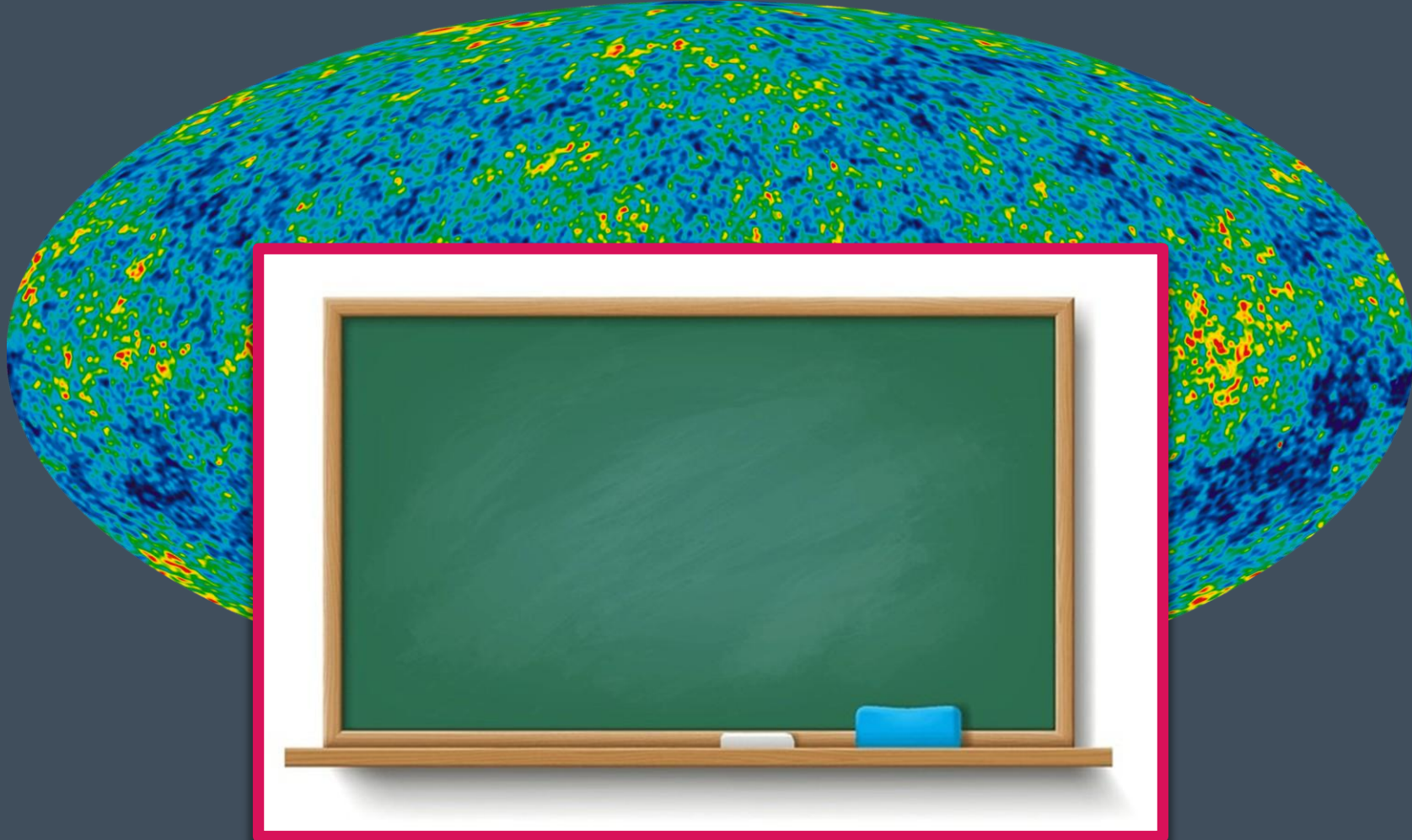
Mar 2024



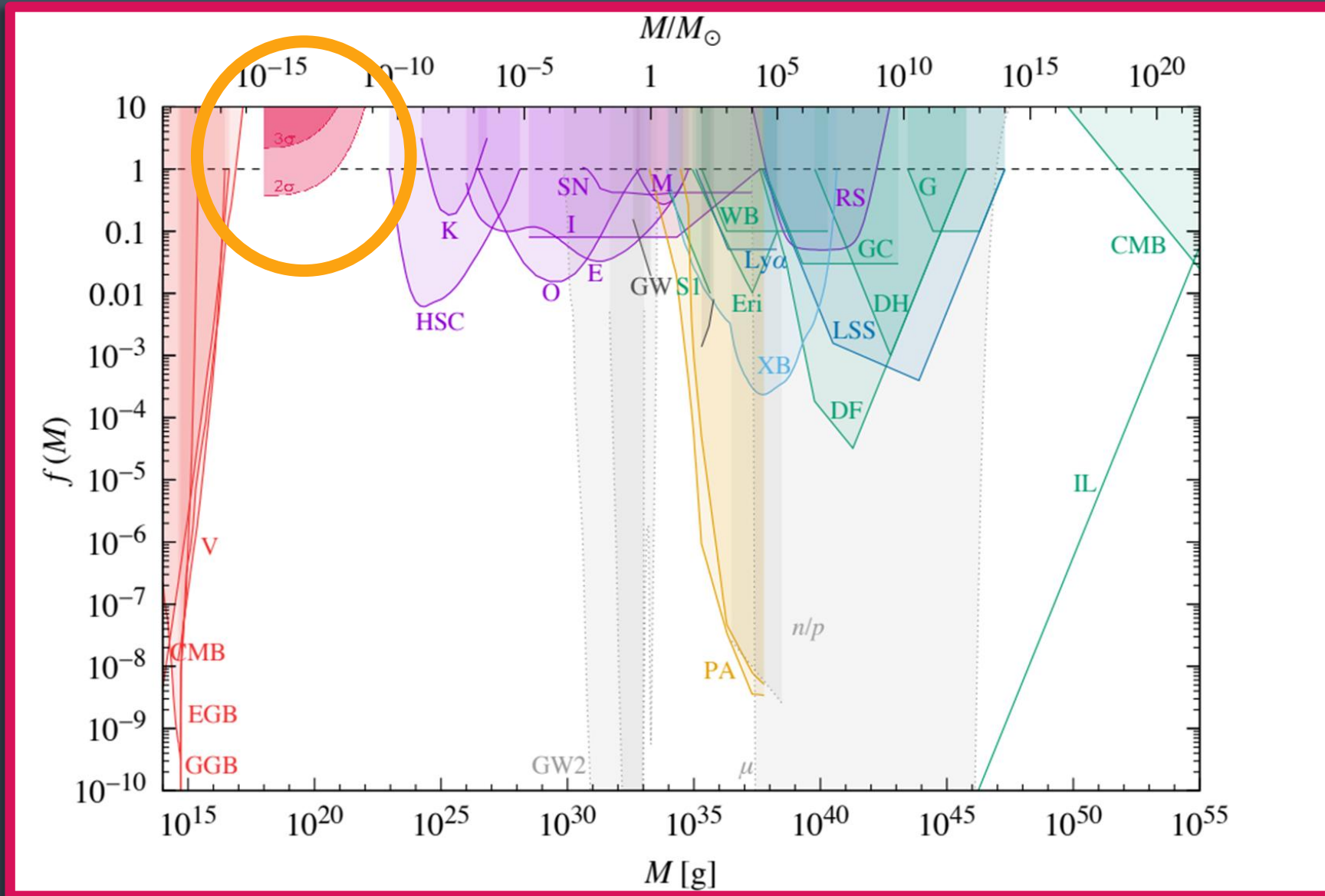
Trous noirs primordiaux: contraintes



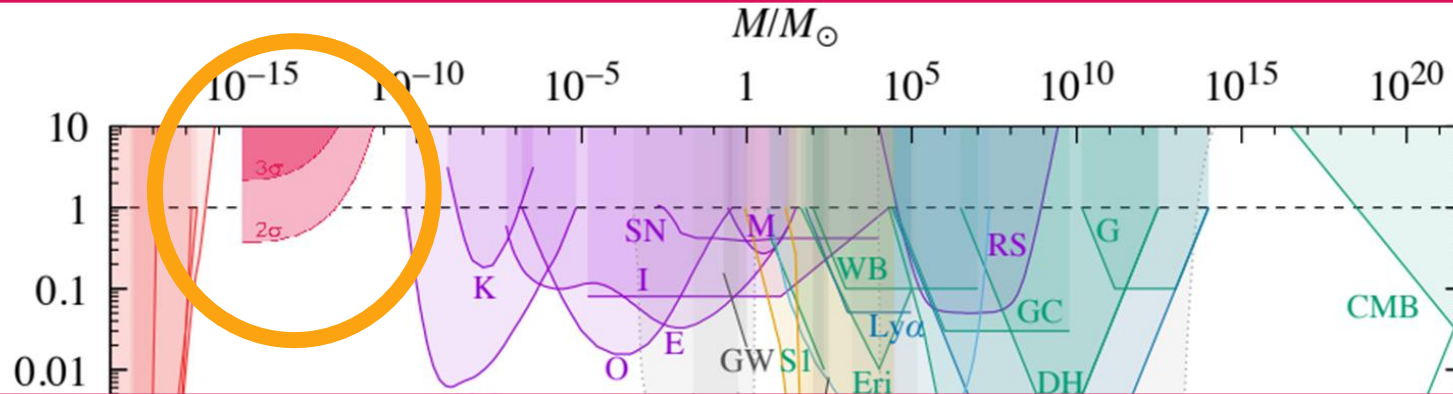
Trous noirs primordiaux: contraintes



Trous noirs primordiaux: contraintes

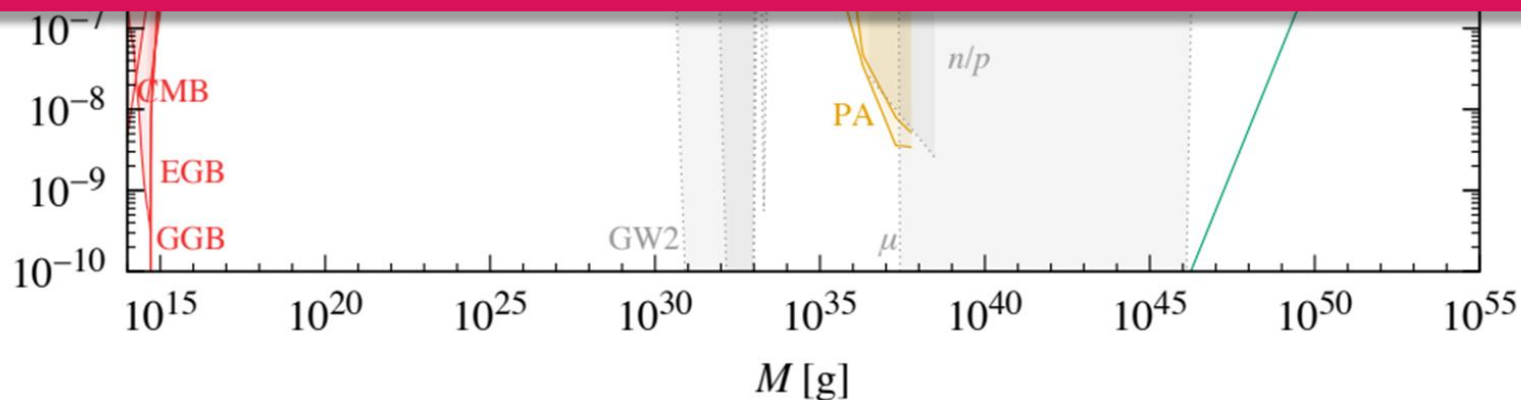


Trous noirs primordiaux: contraintes



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

Nicolas Esser^{1,★}, Carrie Filion², Sven De Rijcke³, Nitya Kallivayalil⁴, Hannah Richstein⁴, Peter Tinyakov¹, and Rosemary F. G. Wyse⁵



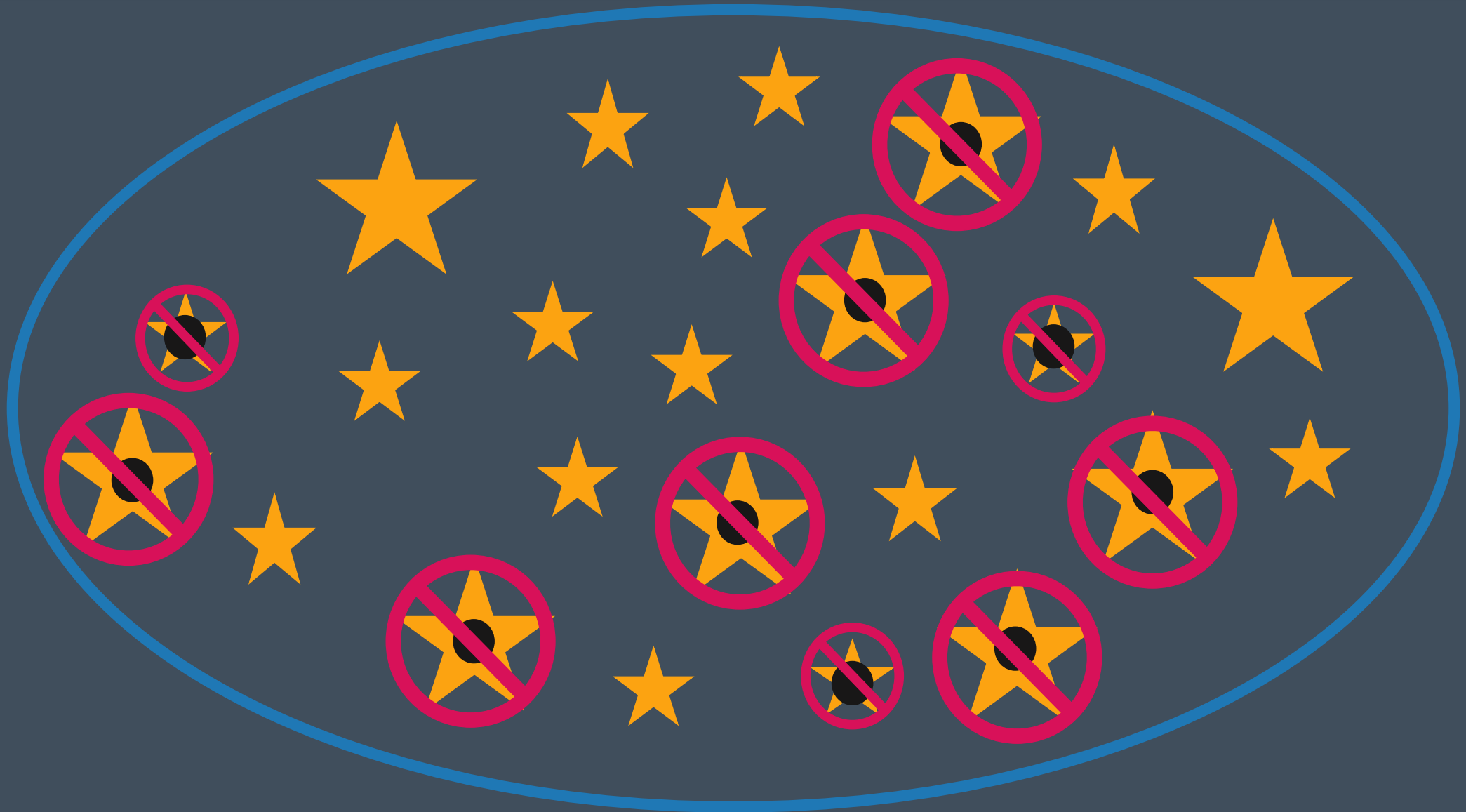
Destruction d'étoiles...



Destruction d'étoiles...



Destruction d'étoiles...



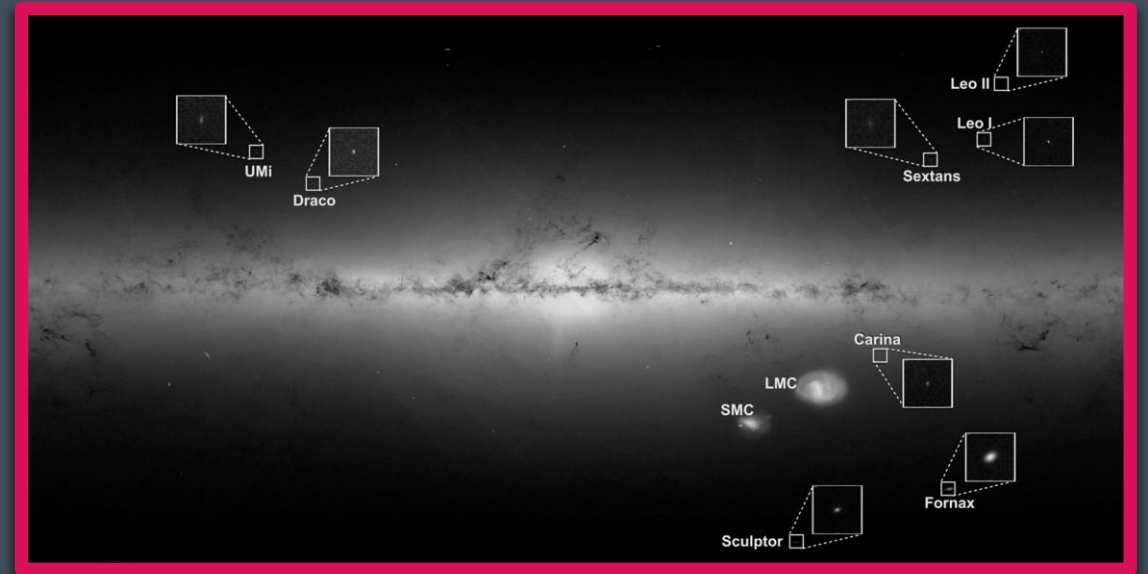
Destruction d'étoiles...



Observations: Telescope Hubble



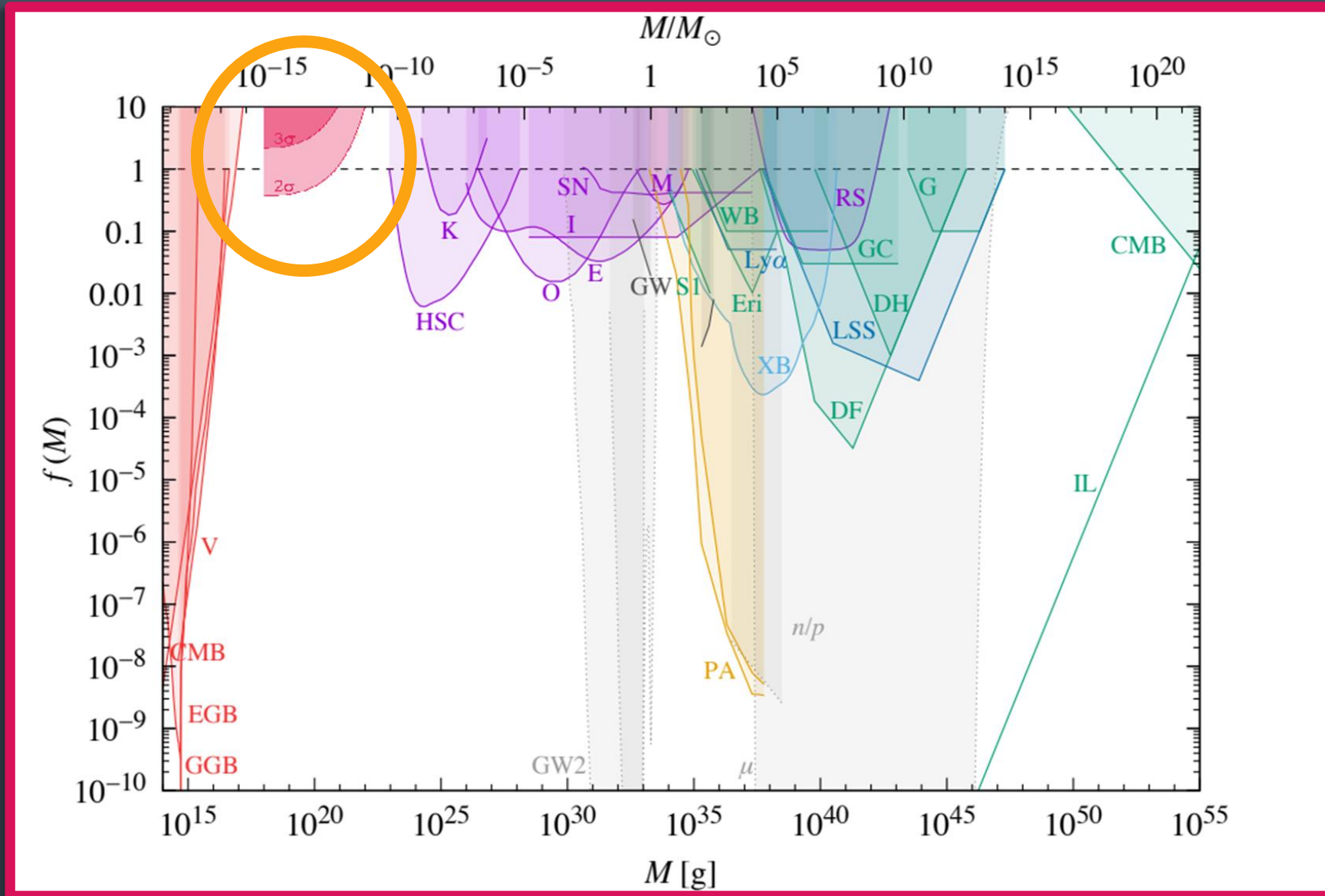
Observations: galaxies naines ultra-sombres



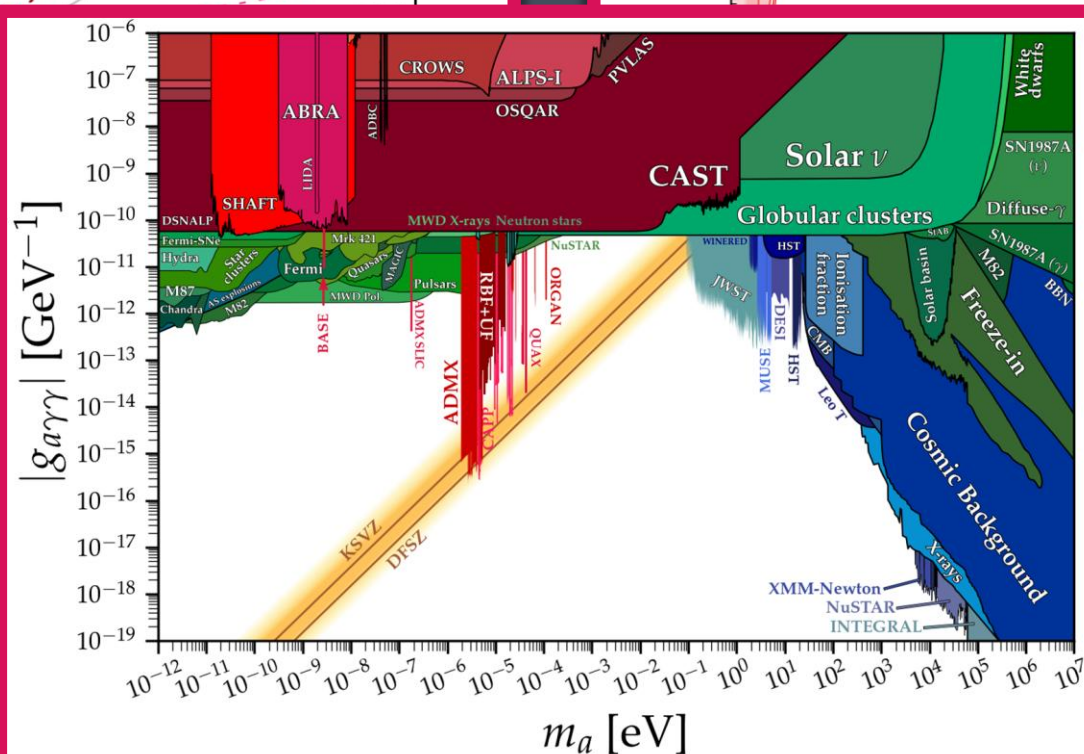
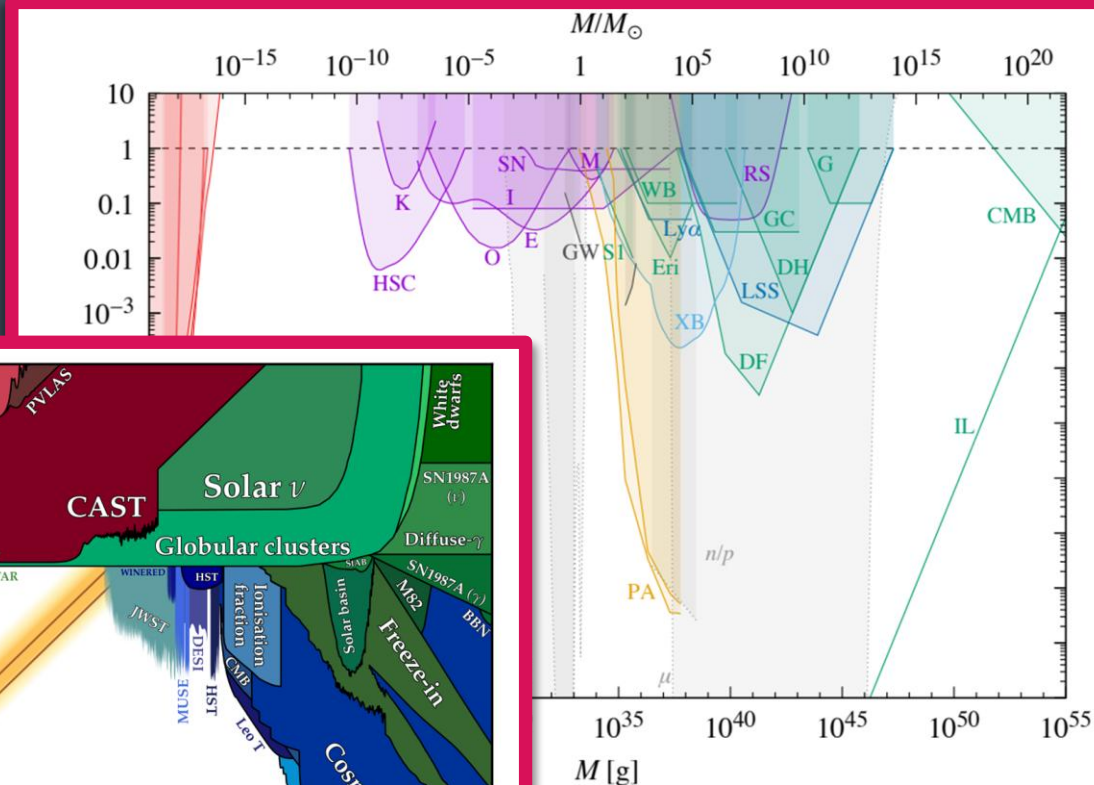
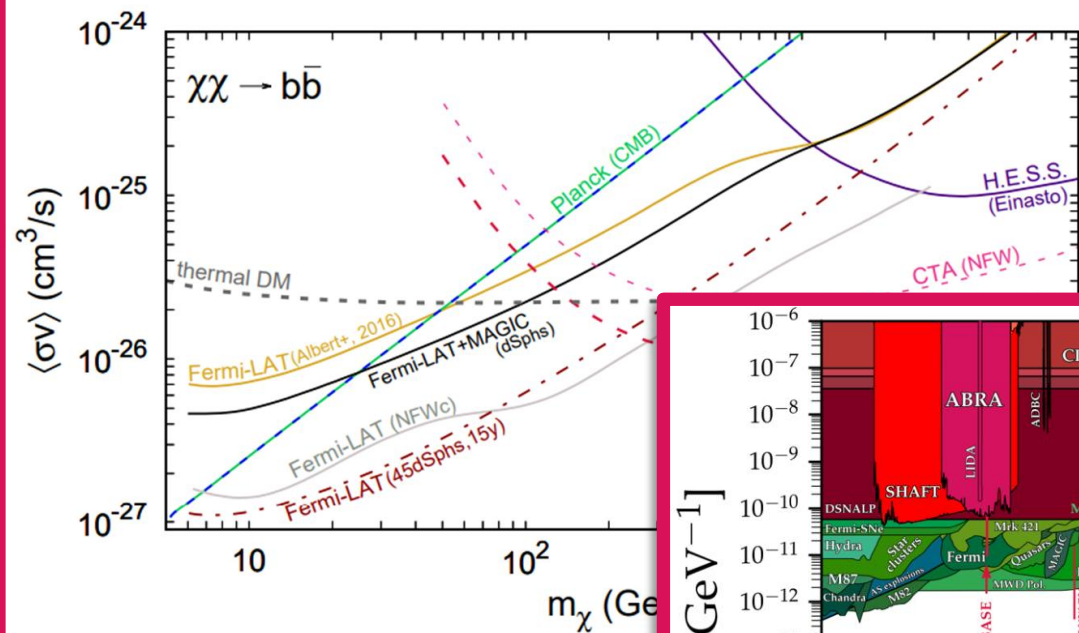
On observe ceci:



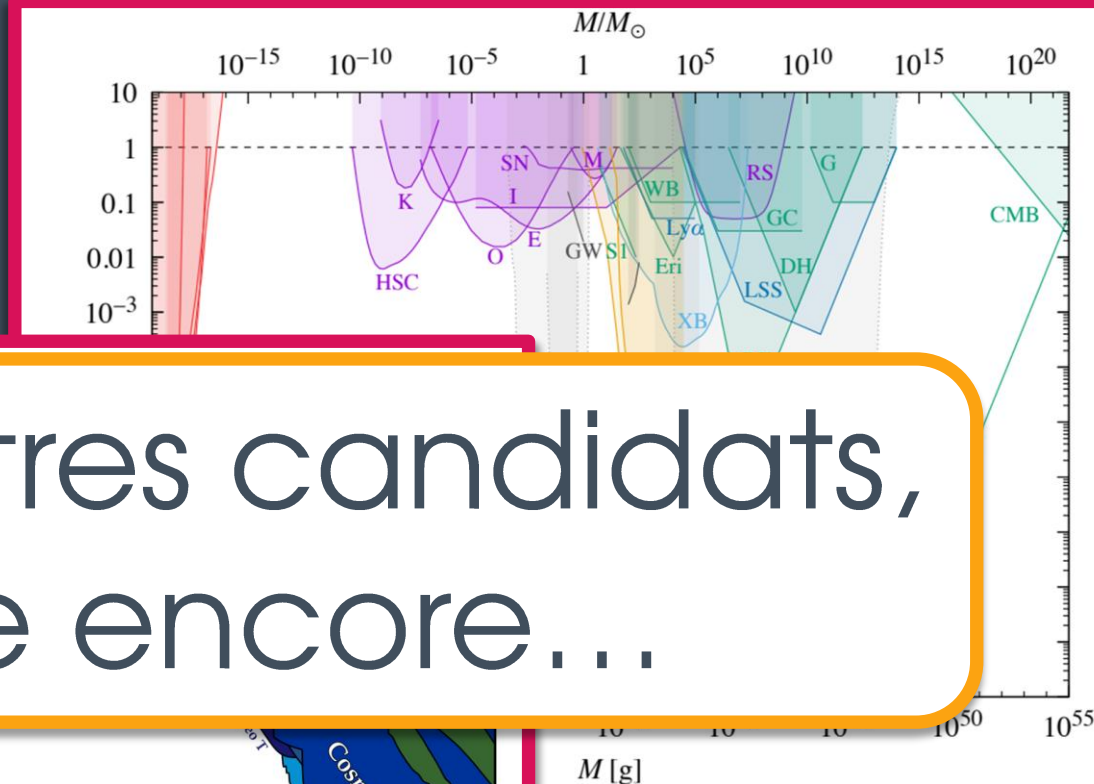
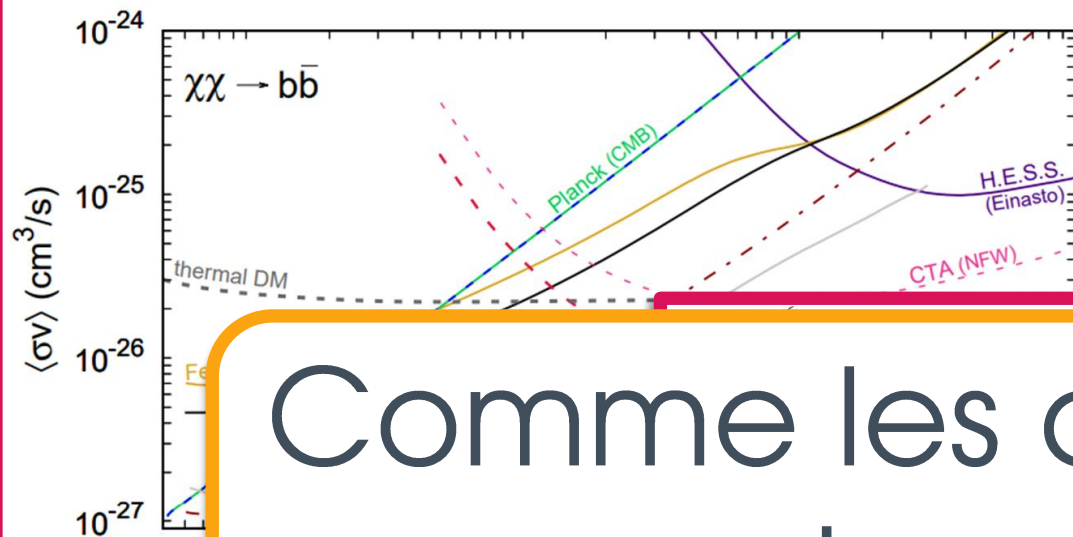
Trous noirs primordiaux: contraintes



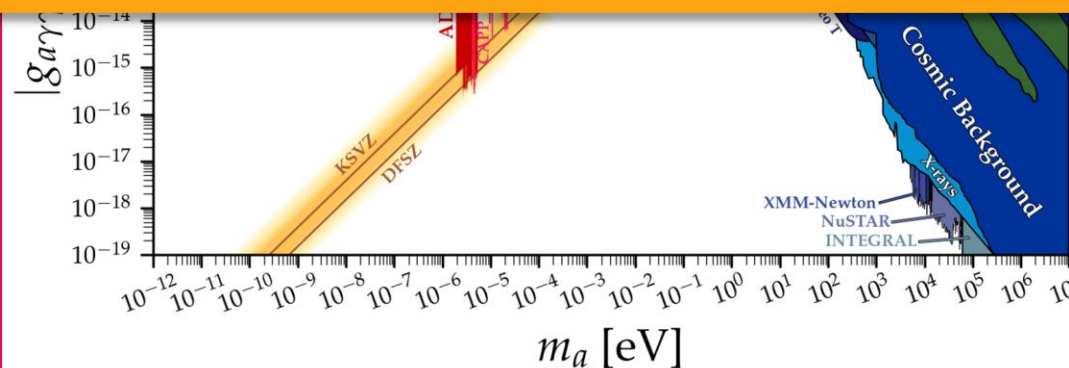
Contraintes



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

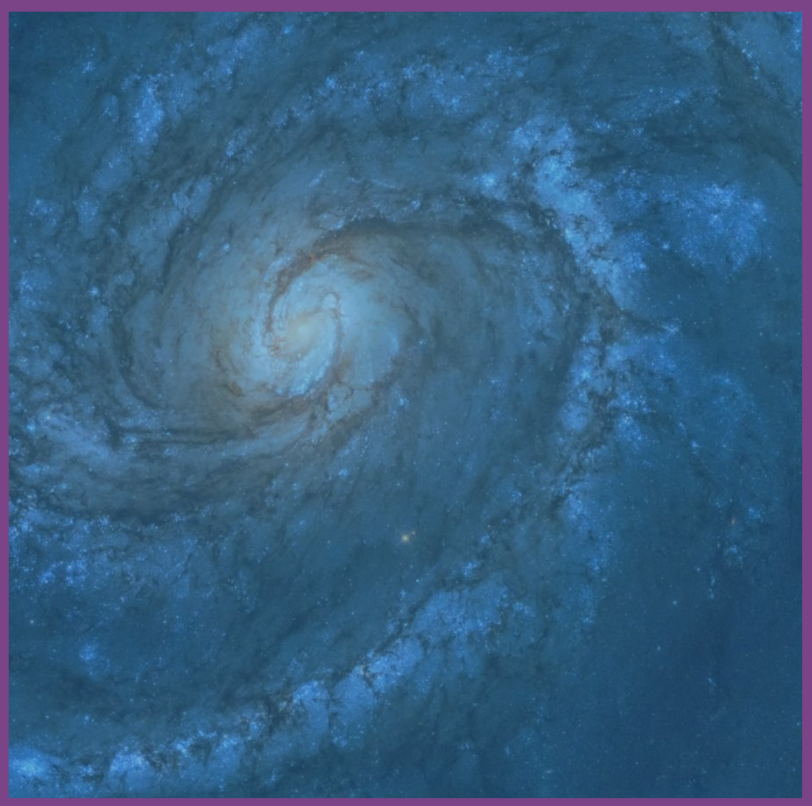
- On cherche la matière noire depuis des dizaines d'années
- Quelles méthodes privilégiées ?
- Une direction: les petites échelles !

Pourquoi ?

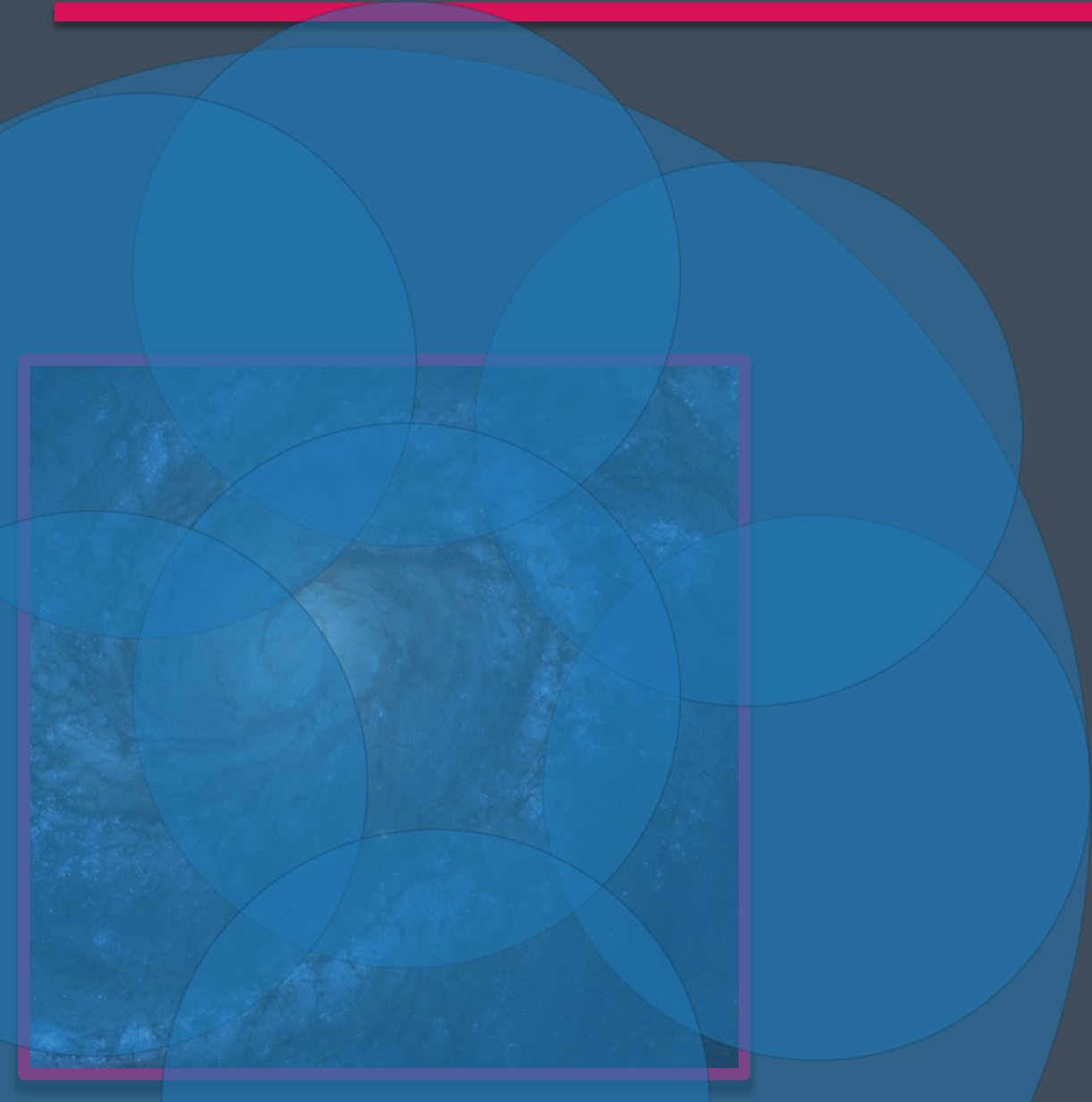
L'échelle la plus petite à laquelle on voit des traces de la matière noire est l'échelle galactique.



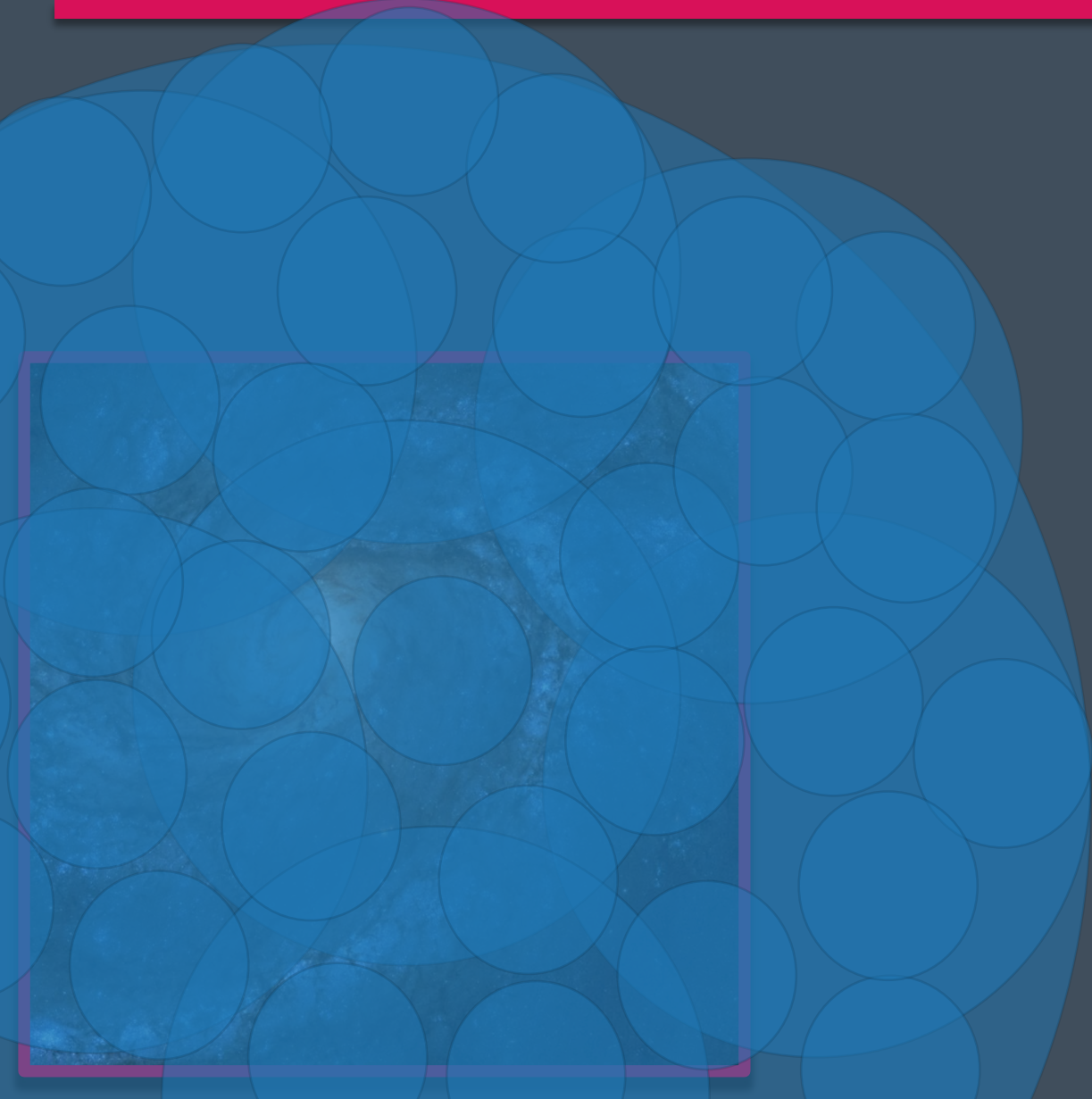
Matière noire aux échelles subgalactiques



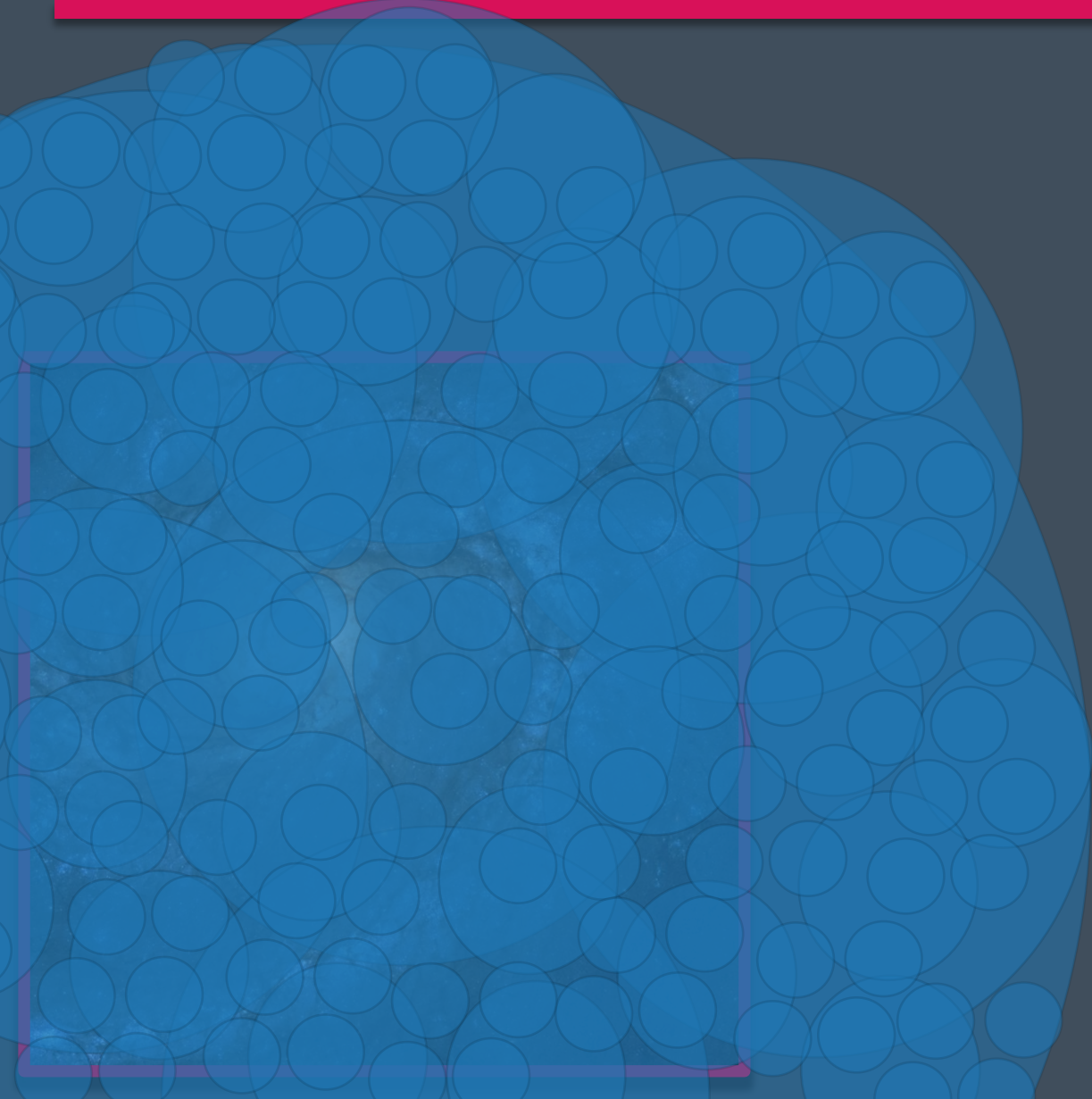
Matière noire aux échelles subgalactiques



Matière noire aux échelles subgalactiques

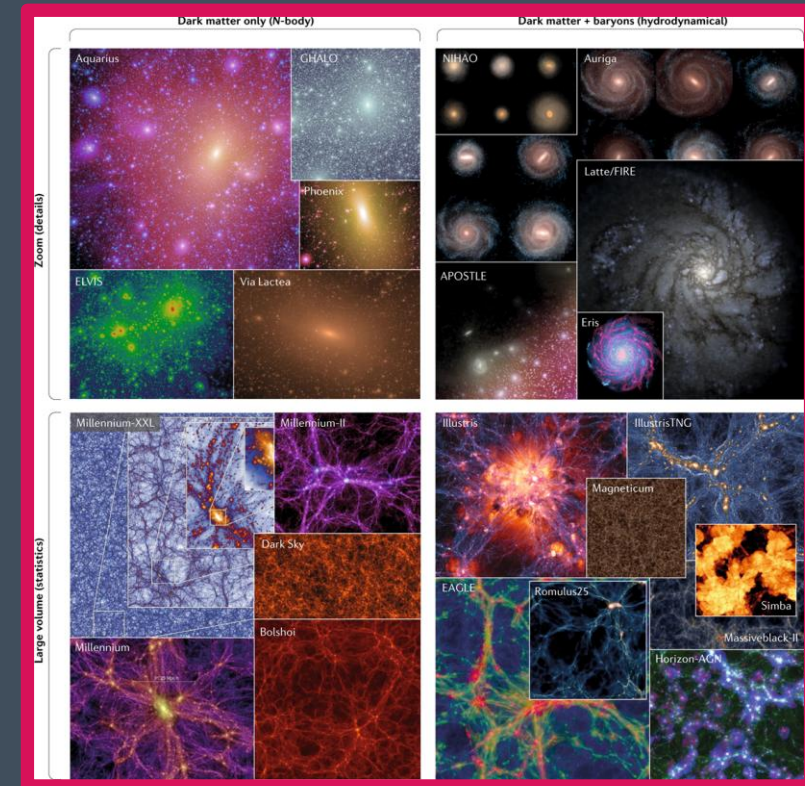


Matière noire aux échelles subgalactiques



Matière noire aux échelles subgalactiques

Construction hiérarchique des halos de matière noire

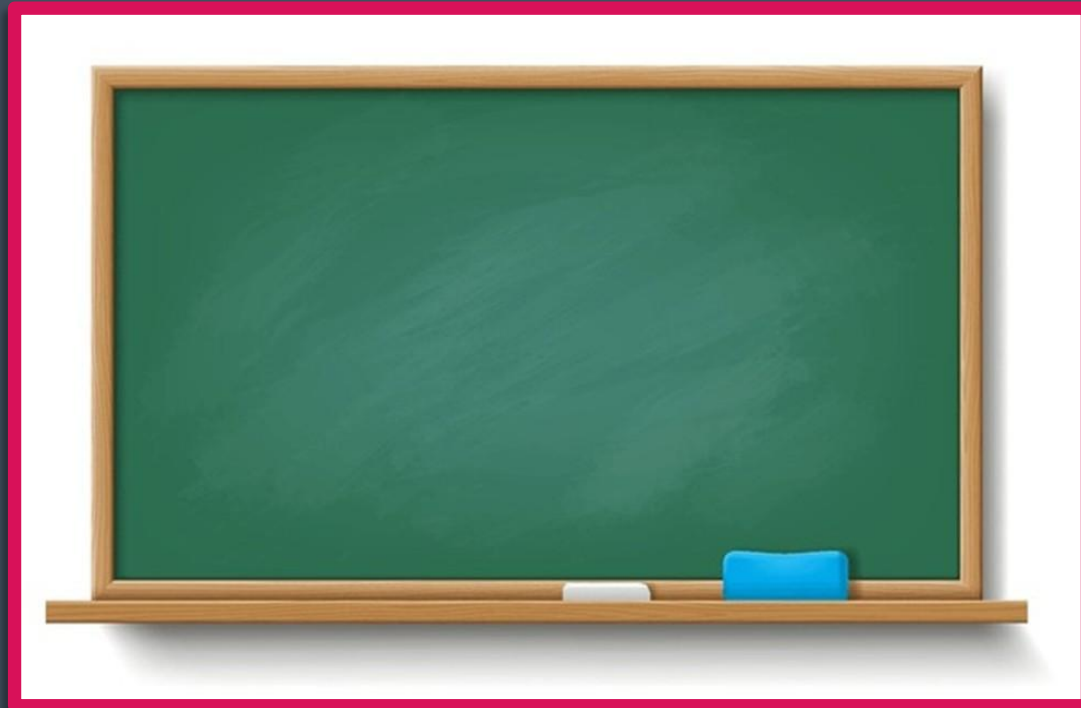


Longueur de libre parcours de la matière noire

A quelle échelle minimale
cette hiérarchie s'arrête ?

Longueur de libre parcours de la matière noire

A quelle échelle minimale
cette hiérarchie s'arrête ?

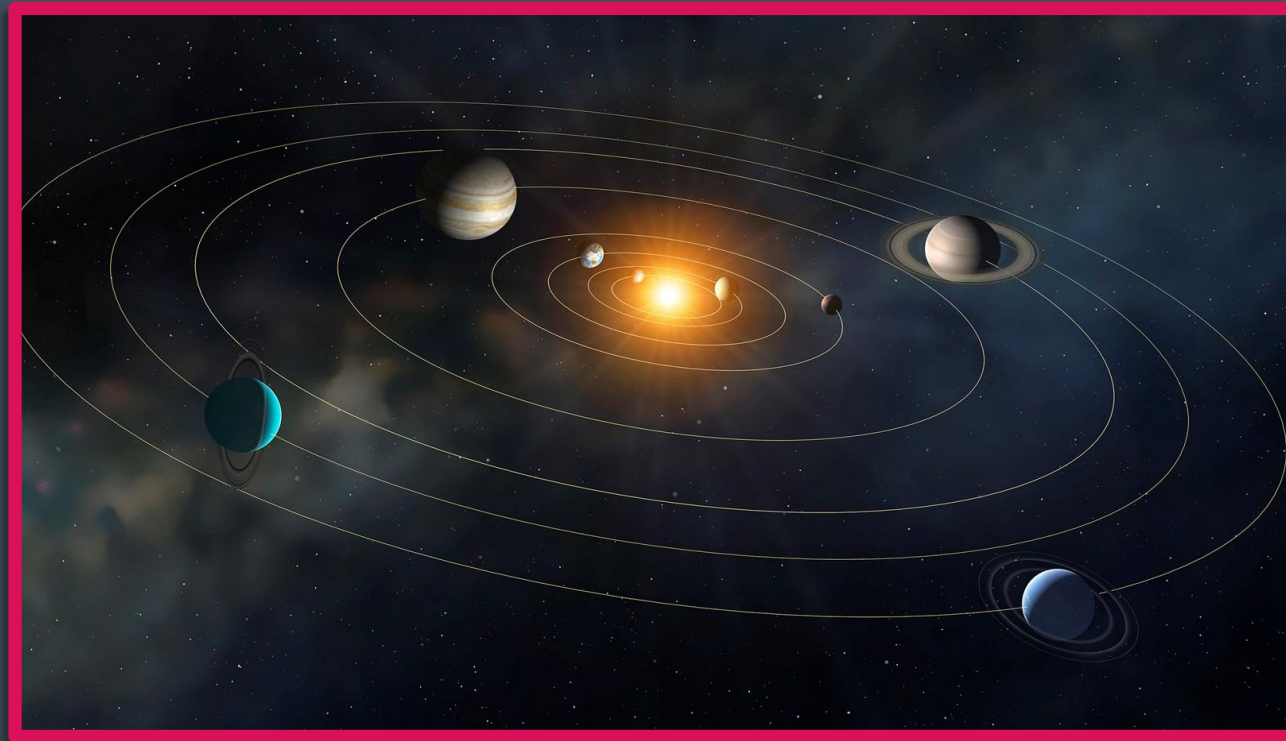


Matière noire aux échelles subgalactiques

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

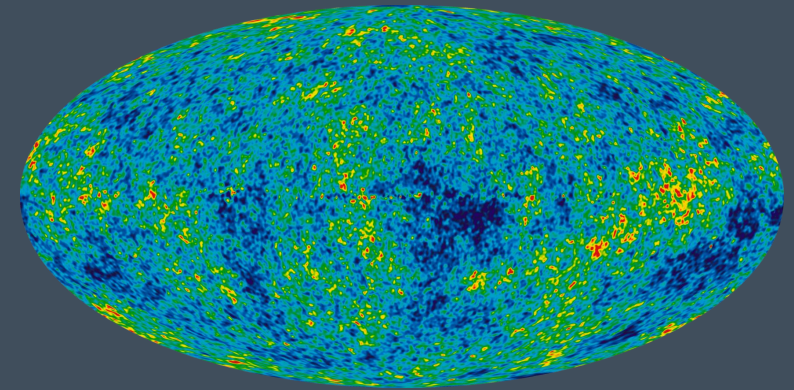
- La matière noire est difficile à observer aux petites échelles, où elle ne domine plus forcément le contenu en masse (exemple: système solaire)

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 ...

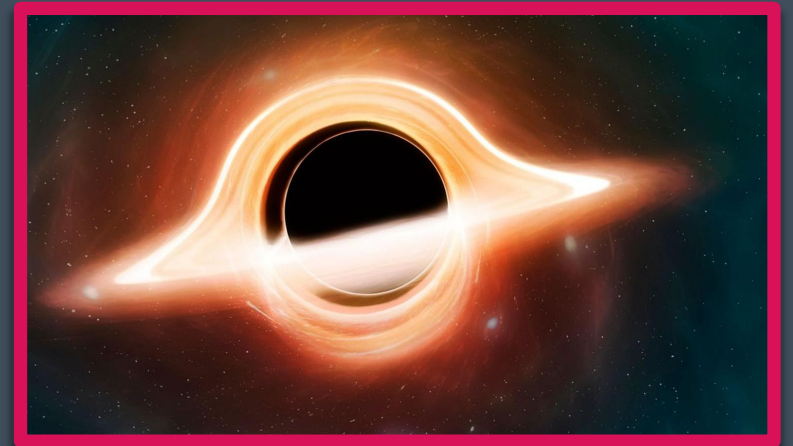


Synthèse du cours

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

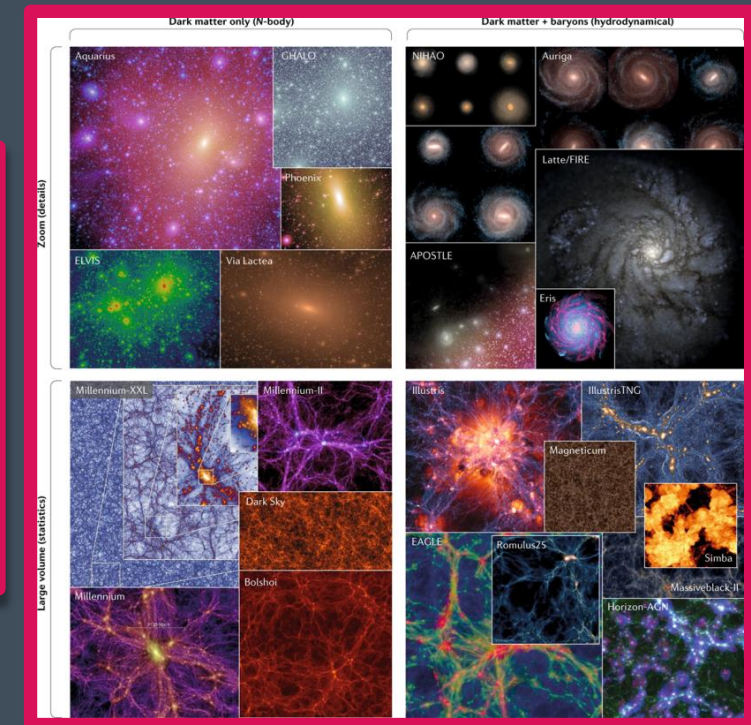
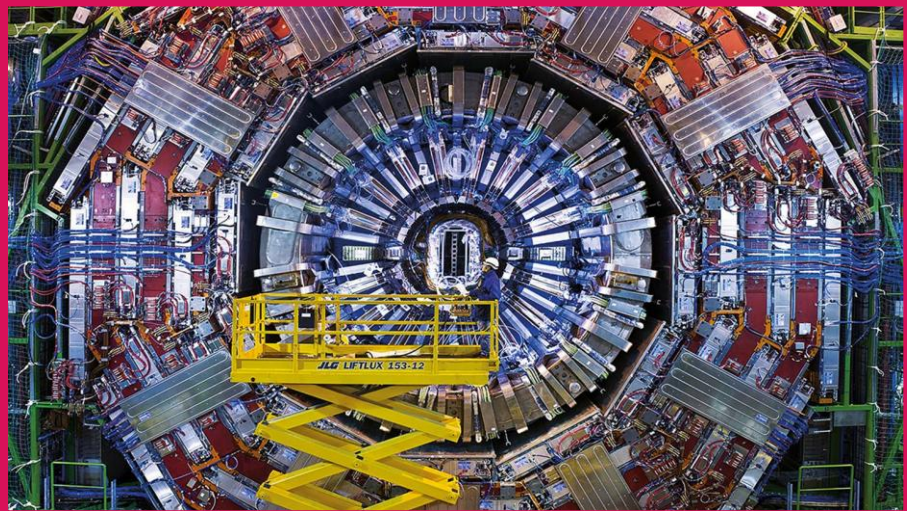
WIMP

Axion



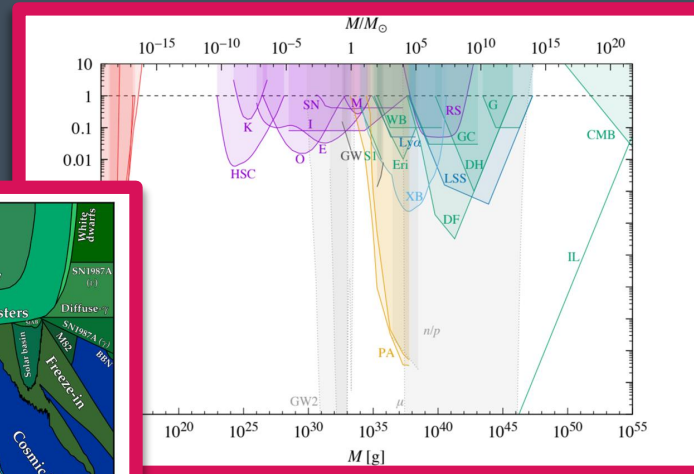
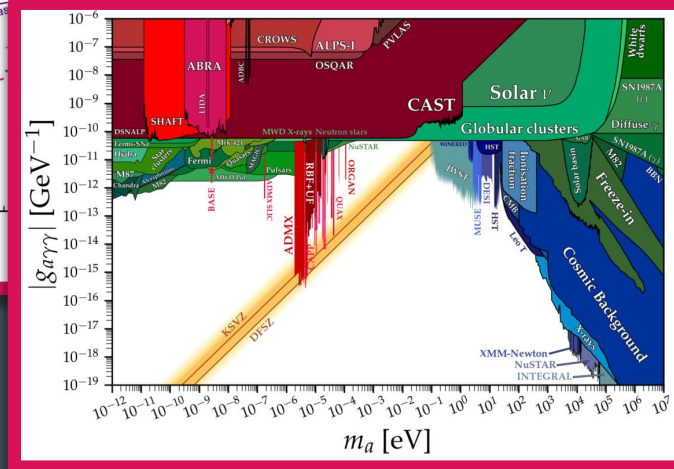
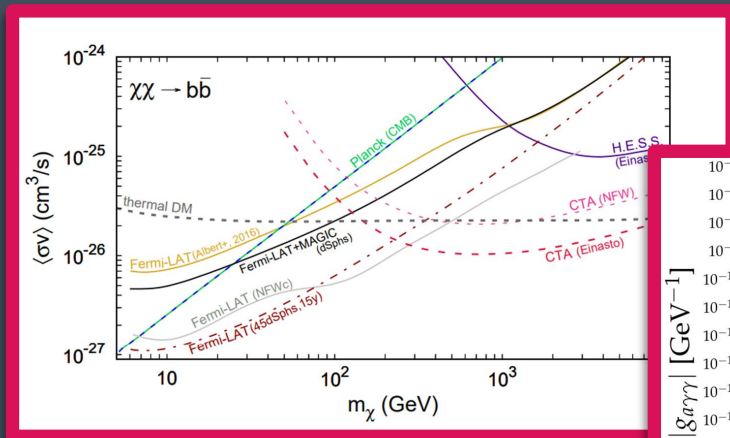
Synthèse du cours

- 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...

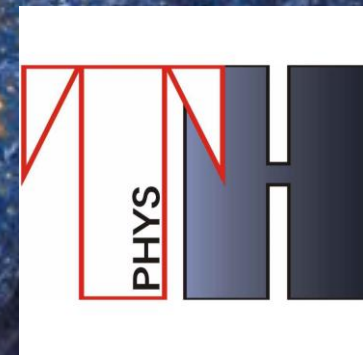
Synthèse du cours

**TO BE
CONTINUED...**



ULB

CPA: Matière noire: état de la recherche



MERCI A TOUS !

Nicolas Esser

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

fnrs
LA LIBERTÉ DE CHERCHER