

Modave, août 2020

Les trous noirs

A central black hole is depicted as a solid black circle. It is surrounded by a glowing accretion disk with concentric rings of light, transitioning from blue and purple to yellow and green. The background is a vast field of stars of various colors (white, yellow, orange, blue) and sizes, set against a dark blue space.

François Mernier

Sommaire

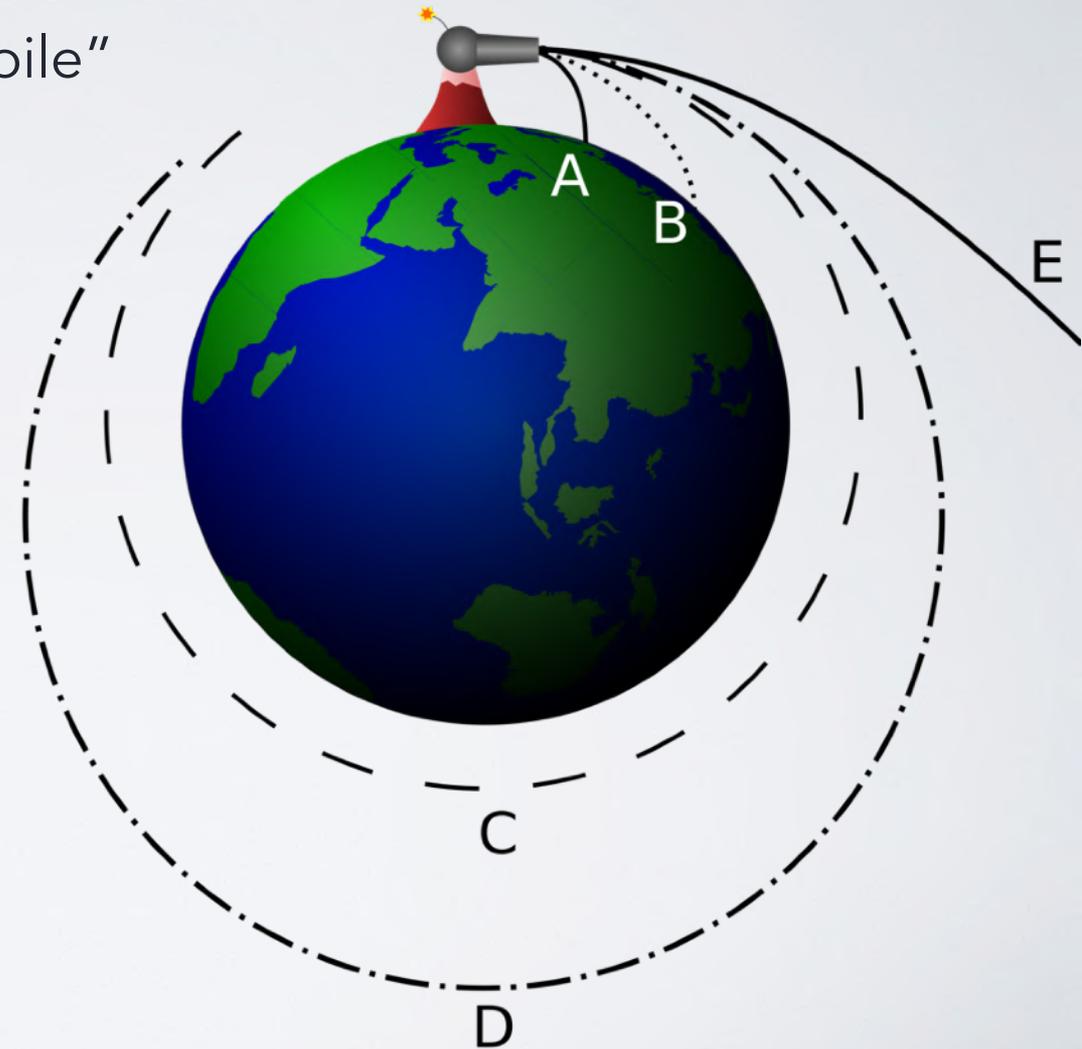
1. Introduction
2. Trous noirs et astrophysique
3. Trous noirs et physique fondamentale

1. Introduction

Vitesse de libération

“Vitesse nécessaire à un corps pour s'échapper du champ gravitationnel d'une planète ou d'une étoile”

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

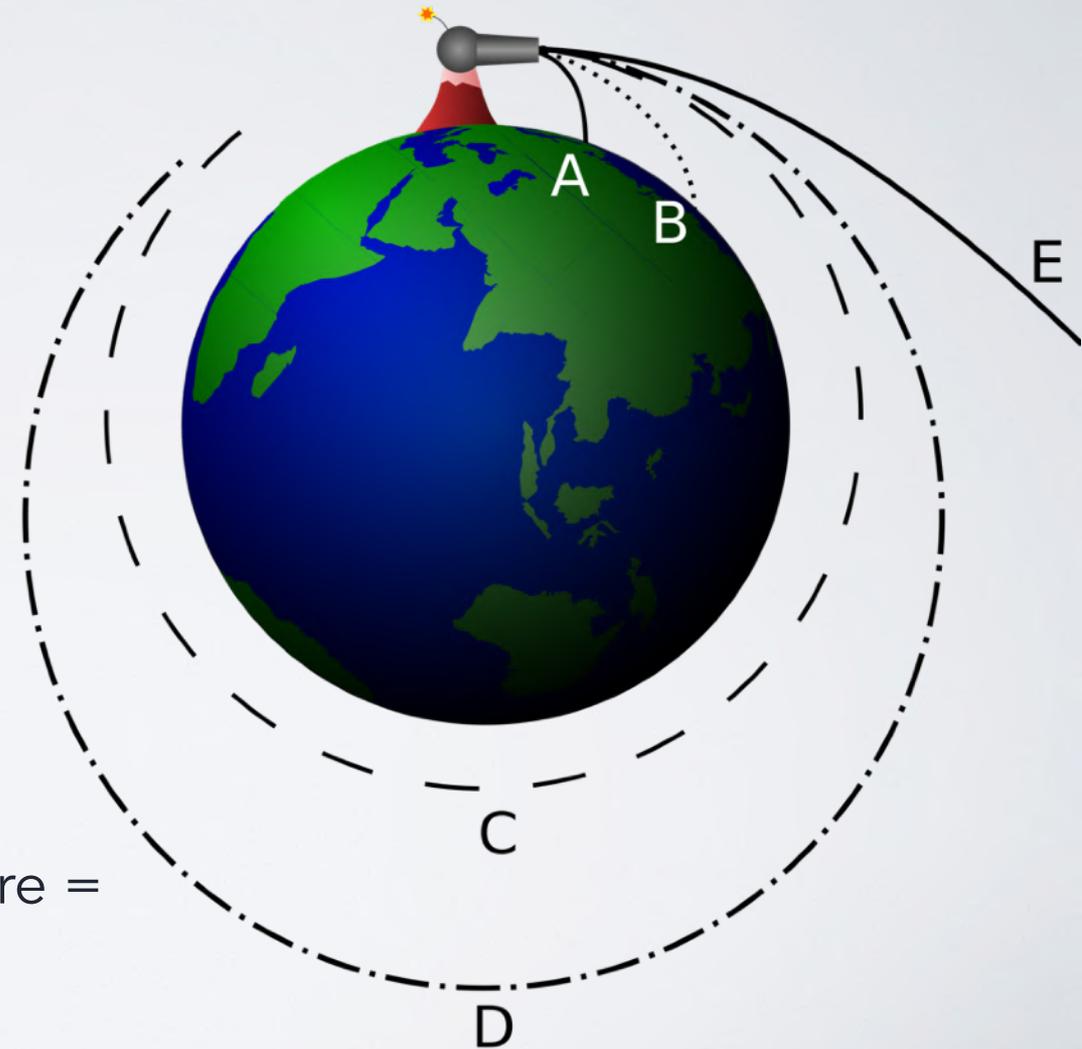


Vitesse de libération

- Masse de la Terre: 6×10^{24} kg
- Rayon de la Terre: 6371 km
- $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Vitesse de libération de la Terre =
11,2 km/s

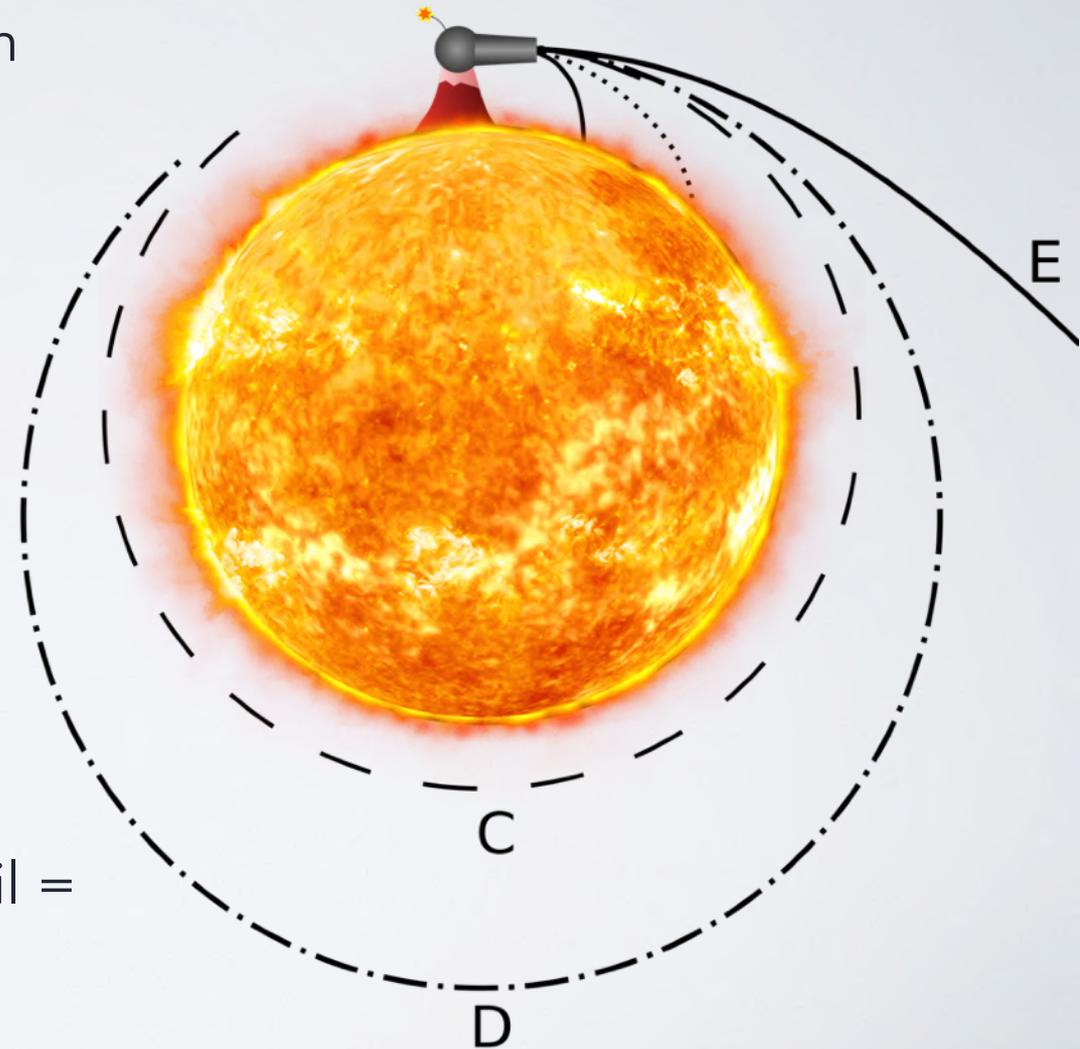


Vitesse de libération

- Masse du Soleil: 2×10^{30} kg
- Rayon du Soleil: 700 000 km
- $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

Vitesse de libération du Soleil =
619 km/s



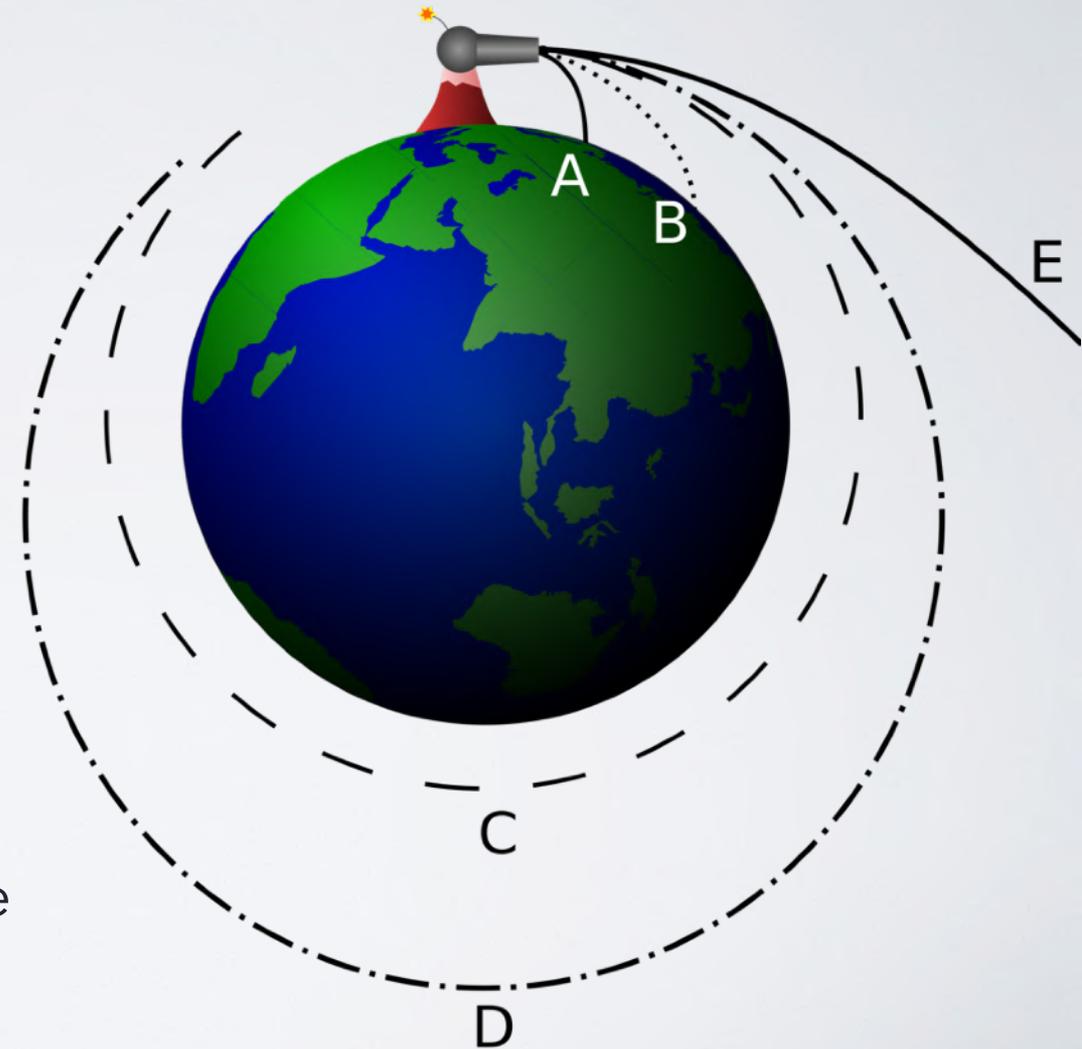
Vitesse de libération

Si M ↗↗
et r ↘↘ :

v_{lib} ↗↗

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

“Plus un objet est dense et compact, plus il sera difficile de lui échapper...”

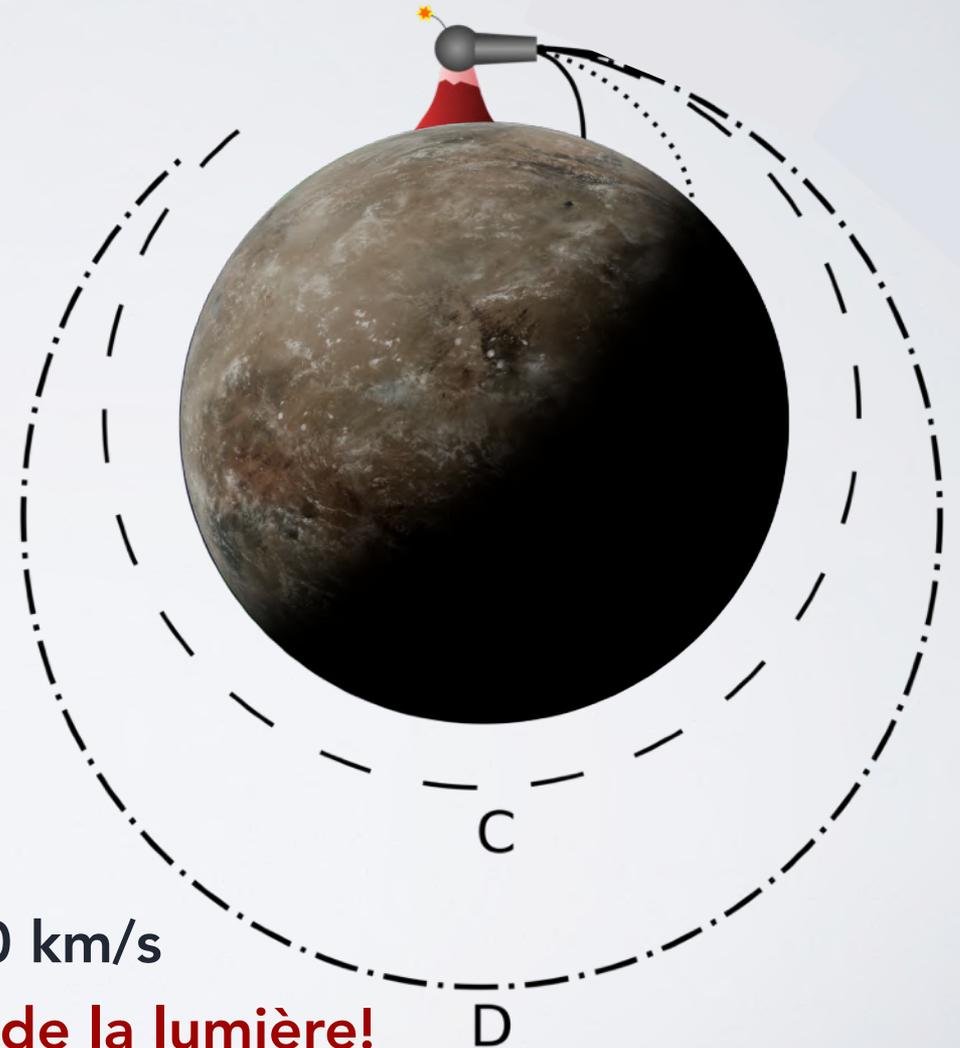


Vitesse de libération

Planète "X"

- Masse = 2×10^{30} kg
- Rayon = 2 km
- $G = 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$



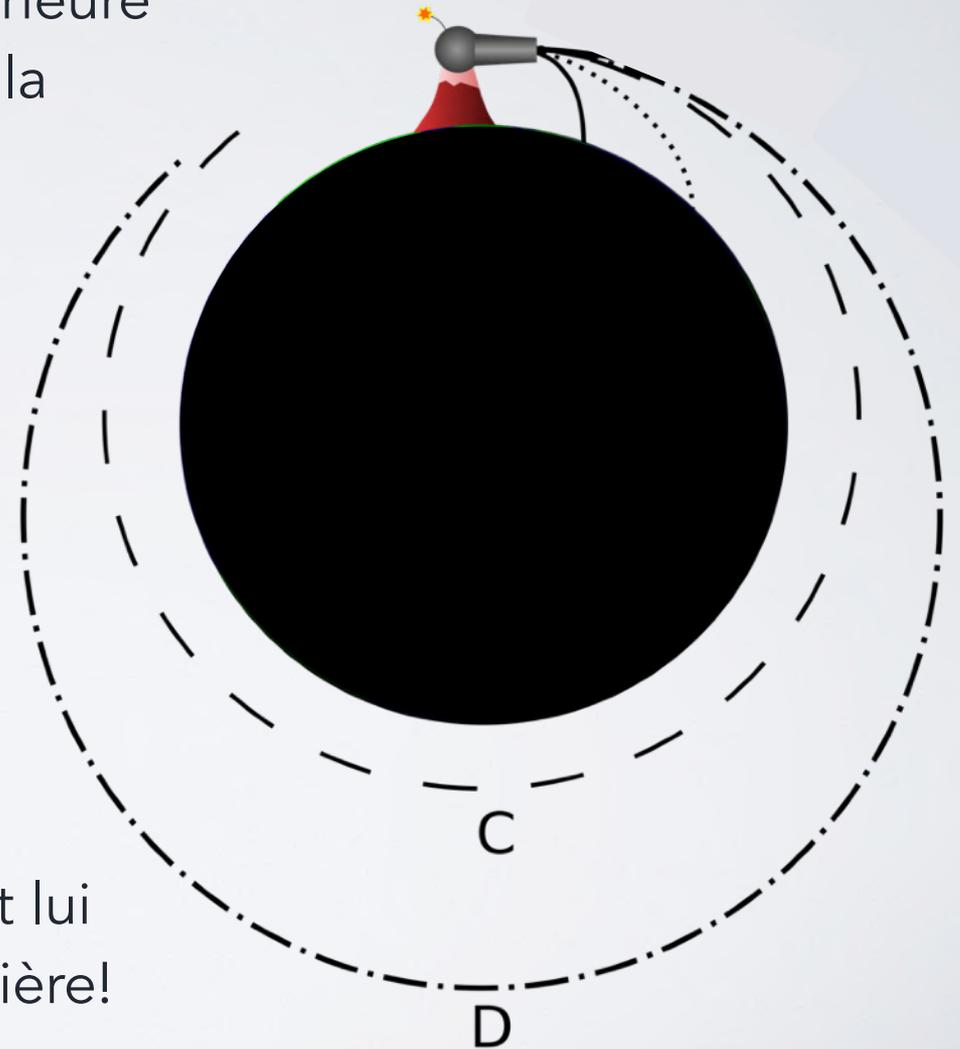
Vitesse de libération = **366 000 km/s**

> vitesse de la lumière!

Trou noir

“Un trou noir est un astre dont la vitesse de libération est supérieure (ou égale) à la vitesse de la lumière.”

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

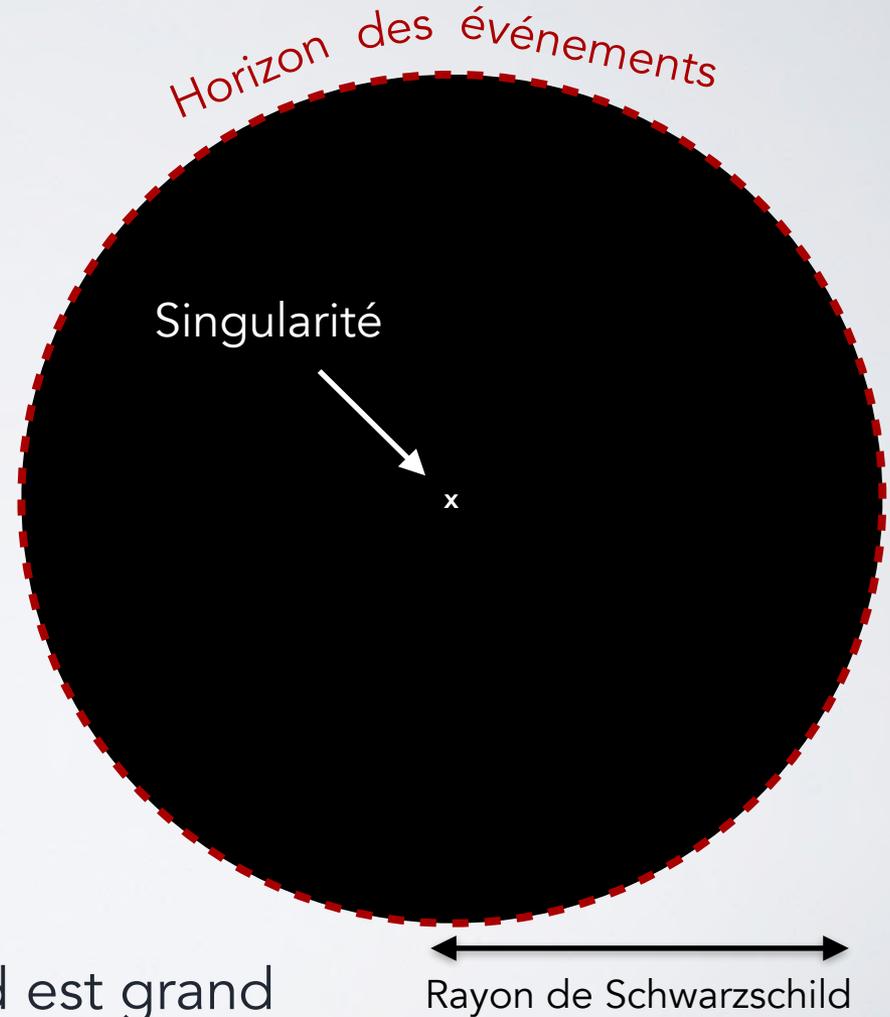


Dans ce cas, **rien** ne saurait lui échapper, même pas la lumière!

Anatomie d'un trou noir

Rayon de Schwarzschild:

$$R_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

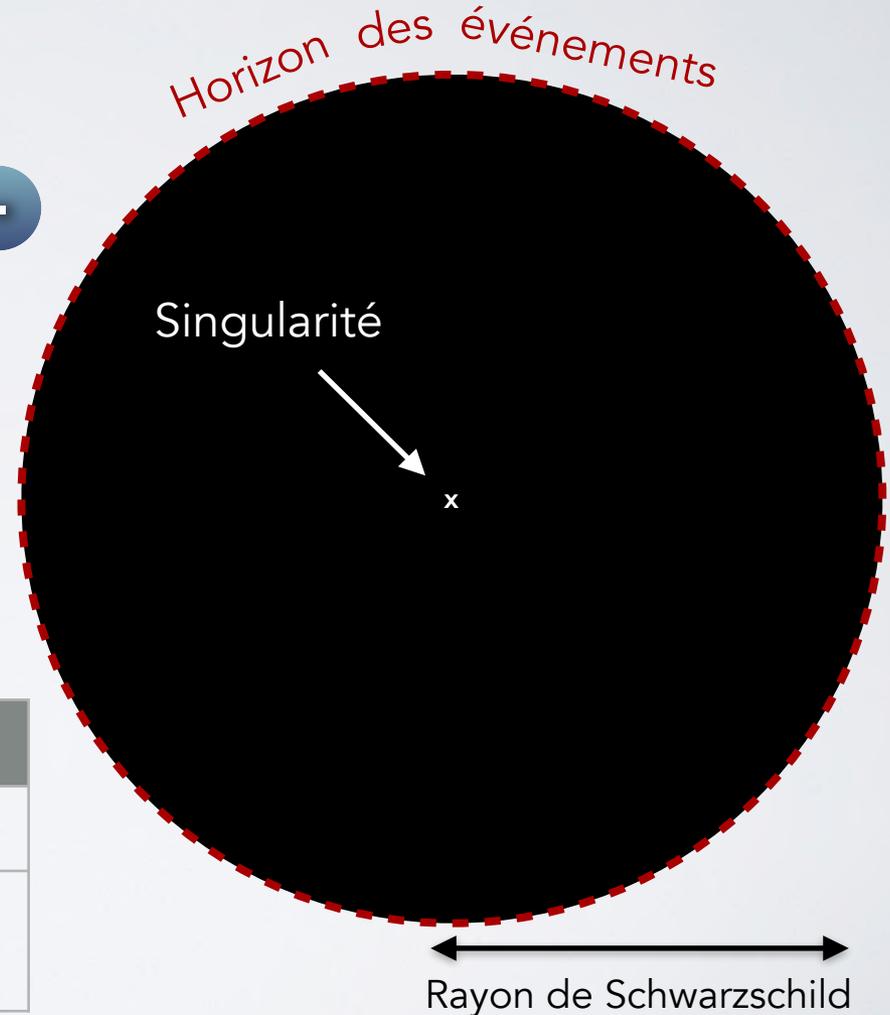


Plus un trou noir est massif,
plus son rayon de Schwarzschild est grand

Anatomie d'un trou noir

Ne dépend que de 3 paramètres:

- Masse (M)  kg
- Charge électrique (Q)  
- Moment cinétique (J) 



	J=0	J≠0
Q=0	Schwarzschild	Kerr
Q≠0	Reissner-Nordström	Kerr-Newmann

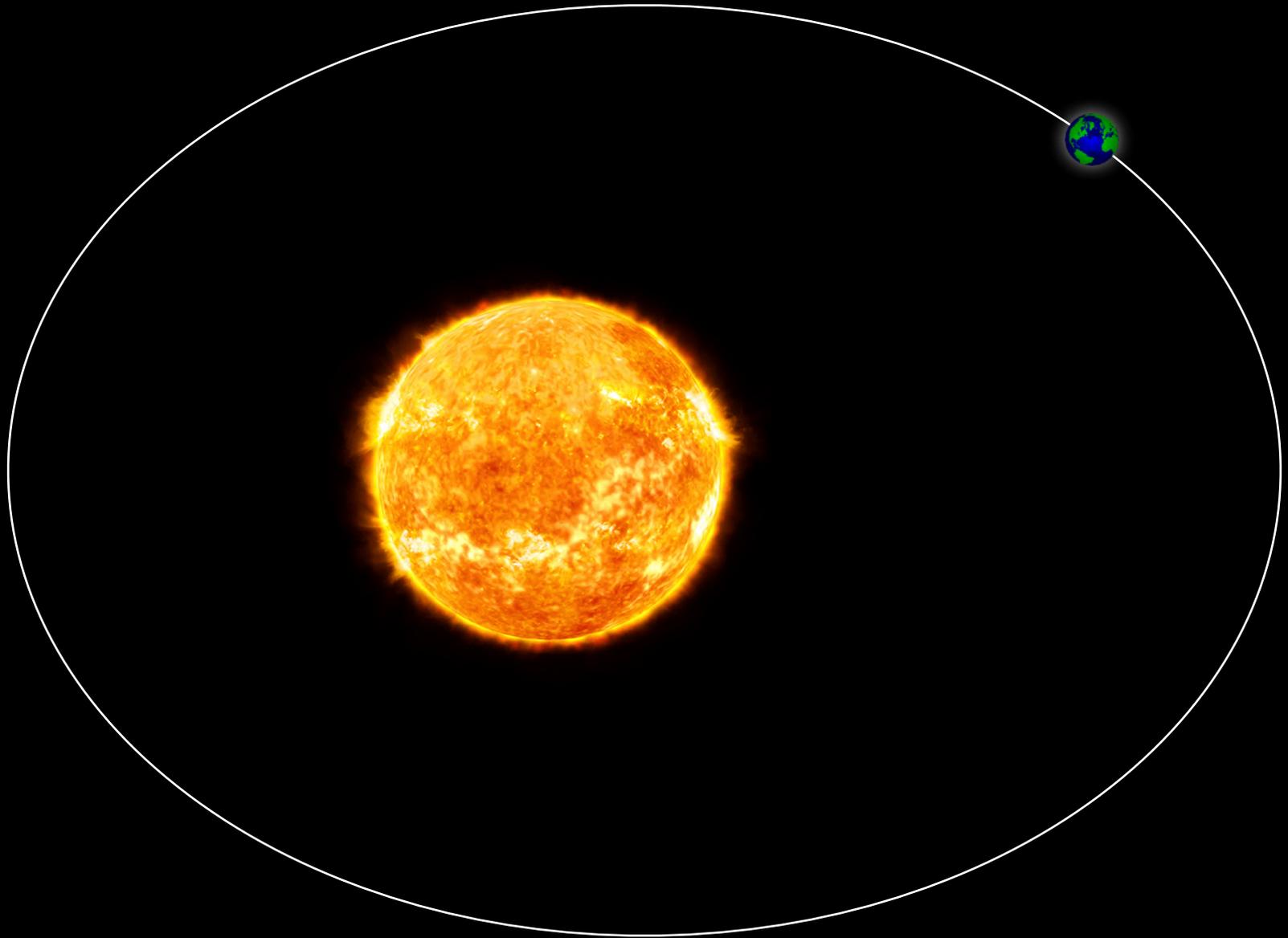
Vrai ou faux?

1) Un trou noir, c'est "super-aspirator".

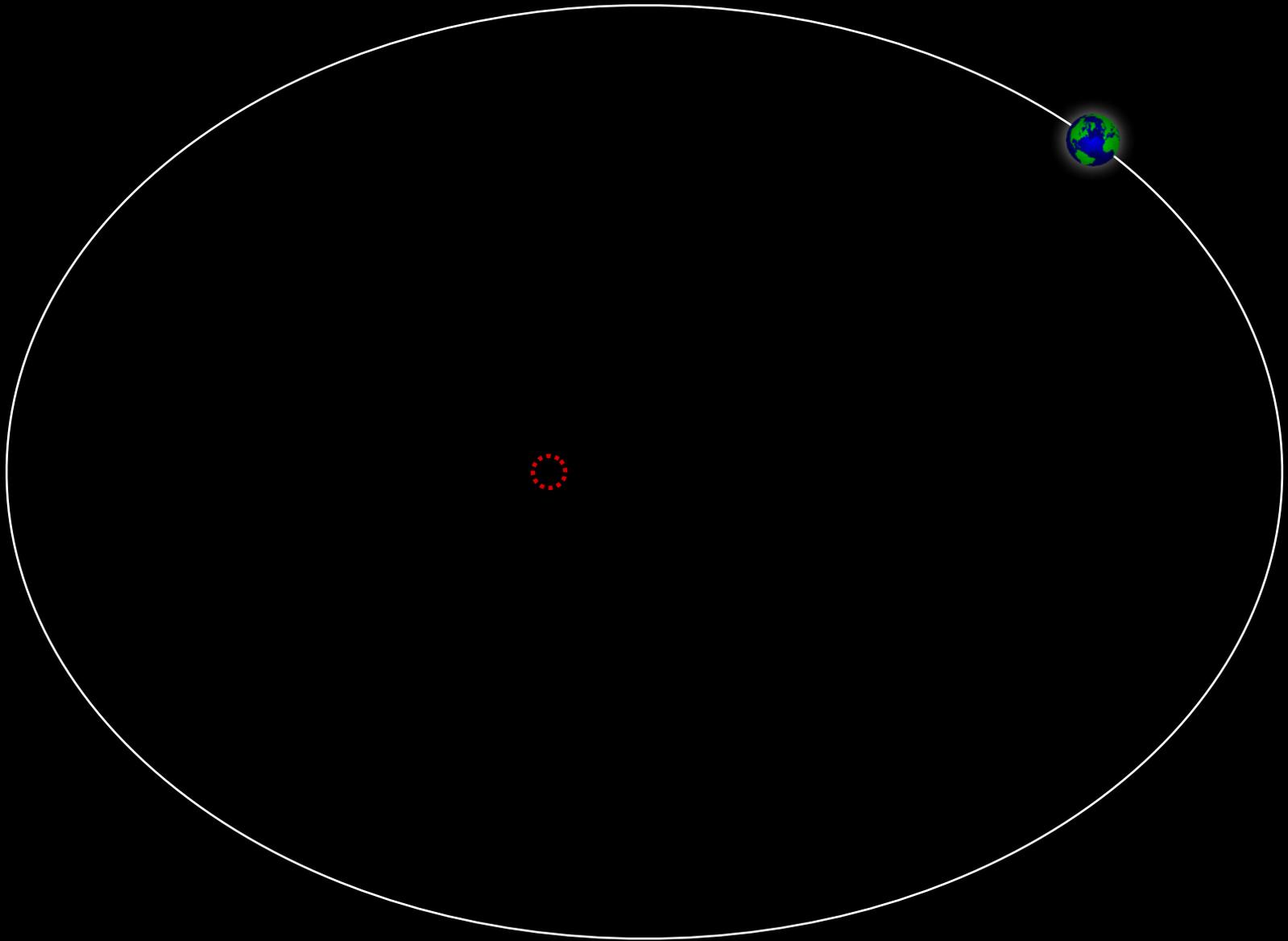


FAUX!

Quelques idées reçues...



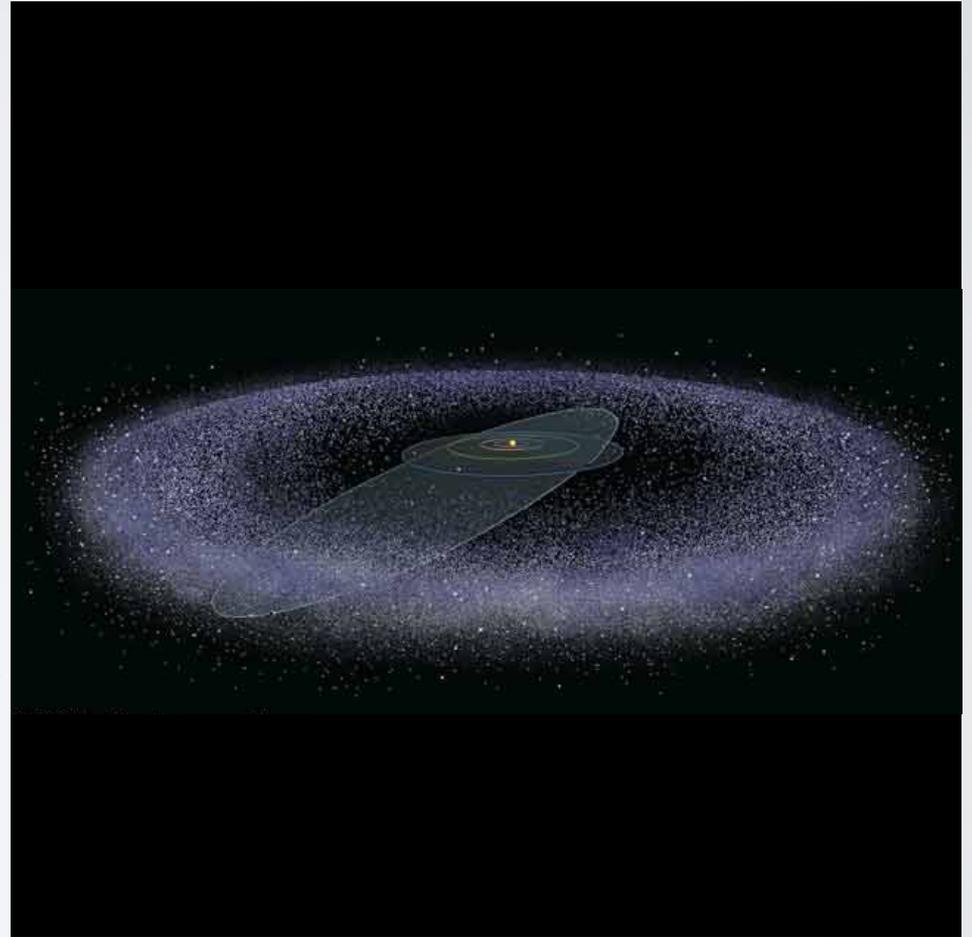
Quelques idées reçues...



Vrai ou faux?

2) La densité à l'intérieur d'un trou noir est ÉNORME.

Quelle masse faudrait-il pour créer un trou noir géant de la taille du Système Solaire?



Vrai ou faux?

2) La densité à l'intérieur d'un trou noir est ÉNORME.

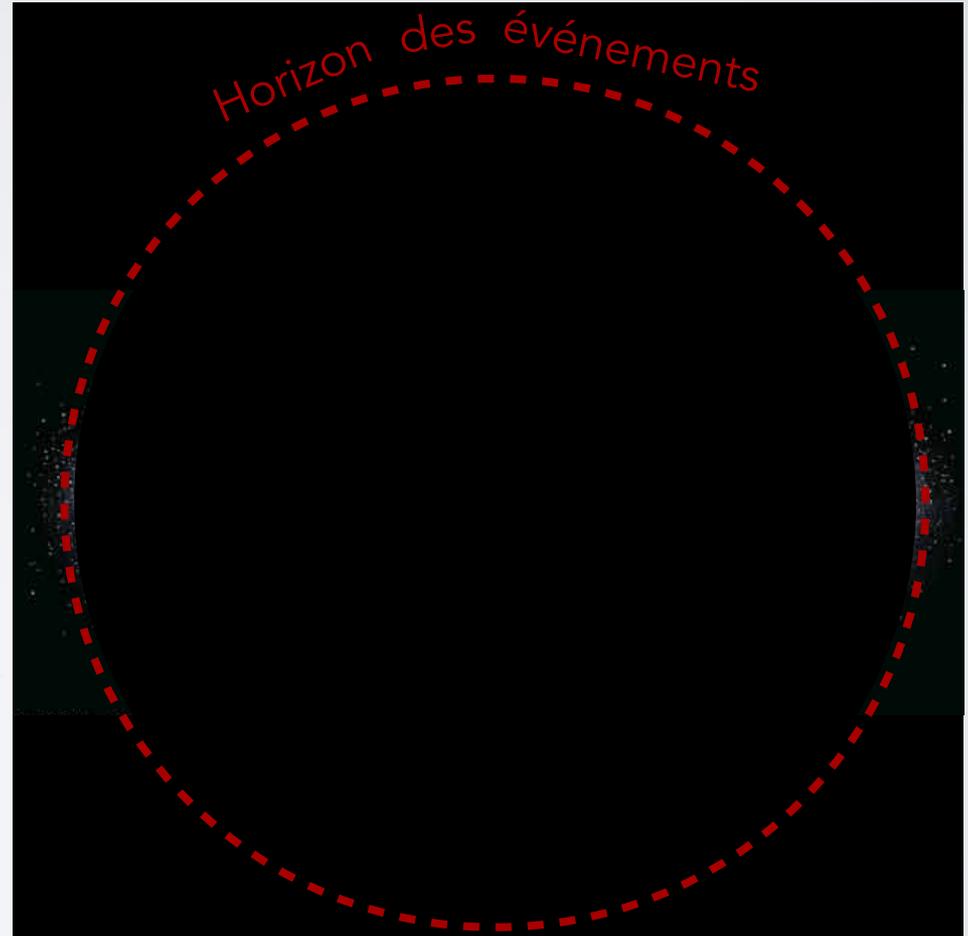
Quelle masse faudrait-il pour créer un trou noir géant de la taille du Système Solaire?

$$R_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$$

10^{40} kg

Quelle densité (masse volumique) cela représenterait-il?

710 g/m^3



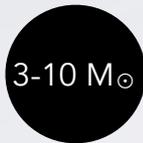
FAUX!

(sauf sur la singularité...)

2. Trous noirs et astrophysique

Les 4 types de trous noirs

1) Trous noirs stellaires



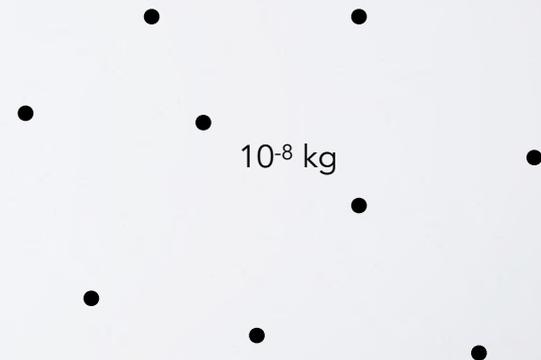
2) Trous noirs supermassifs



3) Trous noirs de masse intermédiaire



4) Trous noirs primordiaux



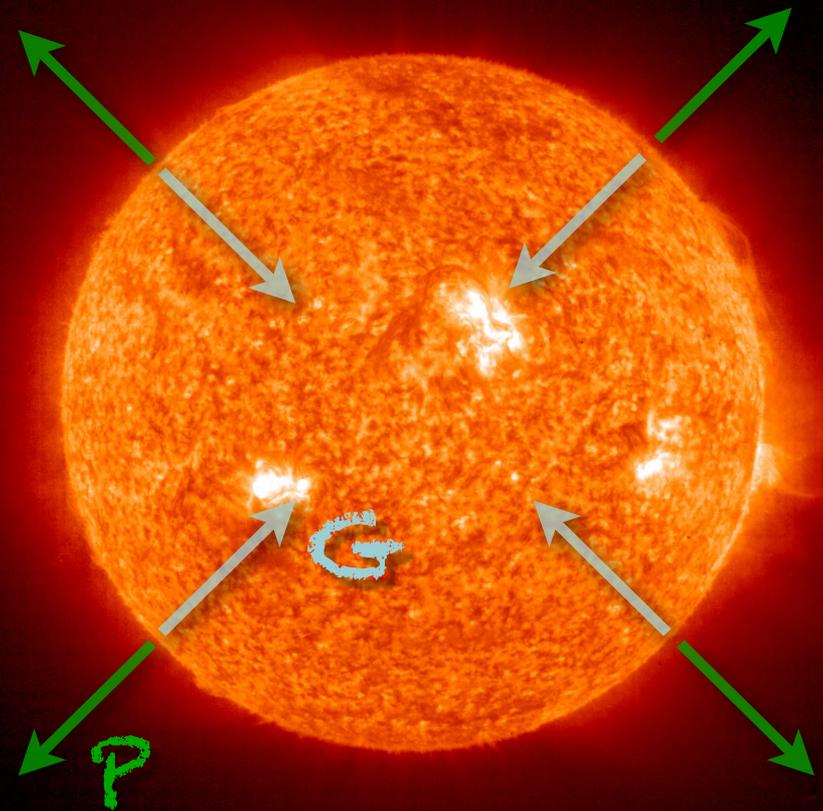
A central black hole is depicted as a solid black circle. It is surrounded by a glowing accretion disk with a greenish-yellow hue. The background is a dense field of stars of various colors (white, yellow, orange, blue) against a dark blue space. A semi-transparent dark horizontal band is overlaid across the center of the image.

1) Trous noirs stellaires

Formation: vieillissement des étoiles (massives)

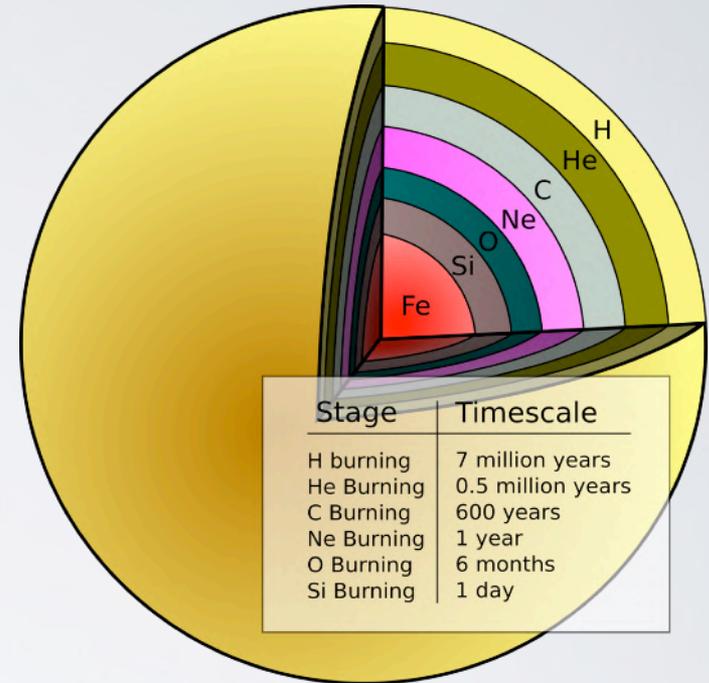
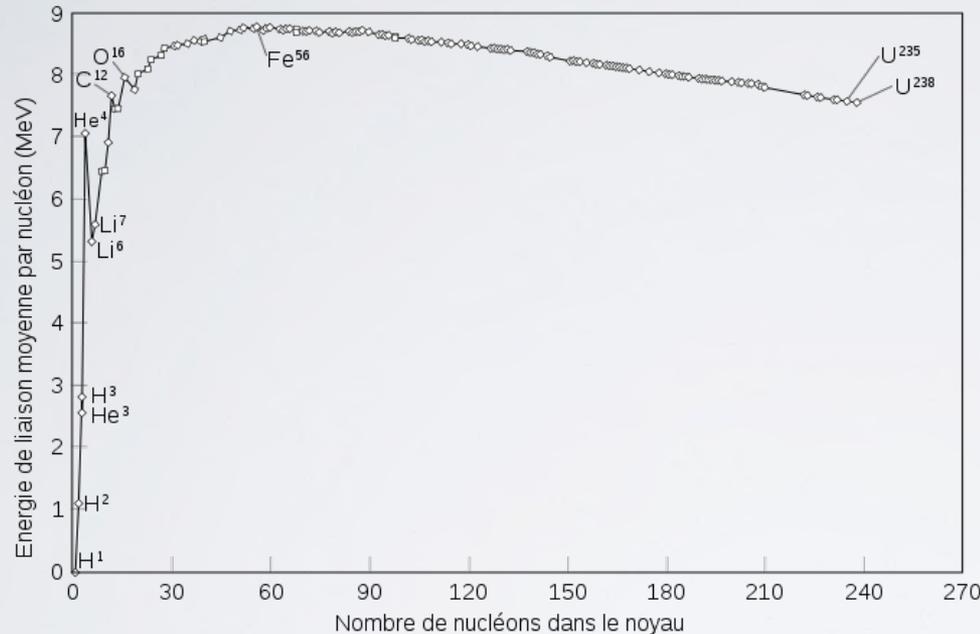
- Équilibre hydrostatique
 - Pression interne de l'étoile = sa propre gravité
- L'hélium s'accumule au coeur et gêne la fusion de l'hydrogène
- Pression interne diminue
- Le coeur se contracte
- Température du coeur augmente
- Le taux de réactions $H \rightarrow He$ augmente
- etc...

- $T > 100\,000\,000\text{ °C}$
 - Suffisant pour transformer de l'hélium en carbone!



Formation: mort des étoiles massives

- Si l'étoile est $> 8 M_{\odot}$, la température au cœur atteint 1 milliard de K!
- Fusion du **carbone, néon, oxygène, ..., fer.**



	Température	Étoile de 0,3 masse solaire	Étoile de 1 masse solaire	Étoile de 25 masses solaires
Fusion de l'hydrogène	4×10^6 K ; 15×10^6 K ; 40×10^6 K	~800 milliards d'années	10-12 milliards d'années	7 millions d'années
Fusion de l'hélium	1×10^8 K	S'arrête avant d'atteindre ce stade	~200 millions d'années	500 000 ans
Fusion du carbone	1×10^9 K		S'arrête avant d'atteindre ce stade	200 ans
Fusion du néon	$1,2 \times 10^9$ K			1 an
Fusion de l'oxygène	2×10^9 K			5 mois
Fusion du silicium	3×10^9 K			~1 jour

Formation: mort des étoiles massives

• Durant l'effondrement:

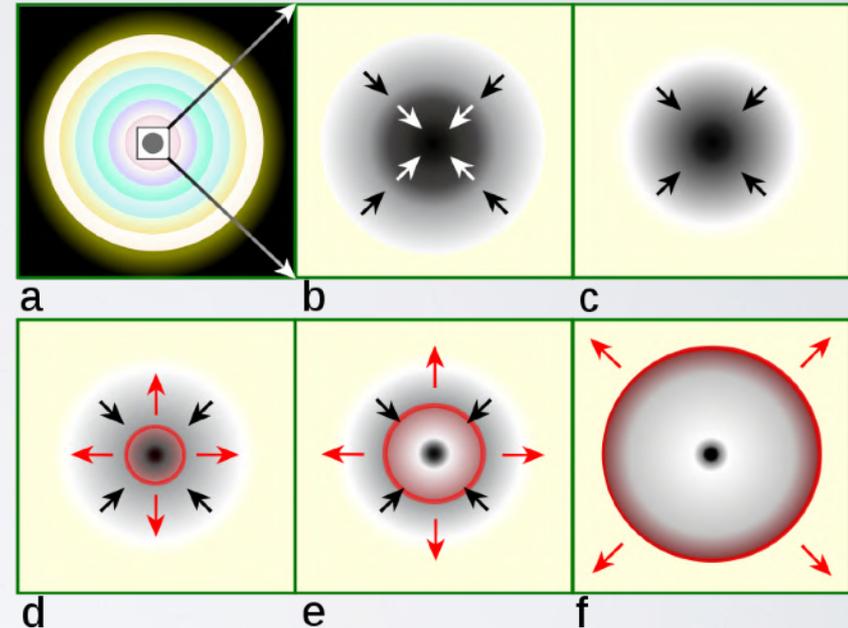


• ...mais à haute densité, l'interaction forte devient répulsive!

• La matière "rebondit" sur le coeur de neutrons

• Choc vers l'extérieur de l'étoile

- Vitesse de plus en plus grande...
- ...jusqu'à $0,5 c$!!
- Expulse toute la matière de l'étoile (sauf le coeur de neutrons)



Supernova (à effondrement de coeur)

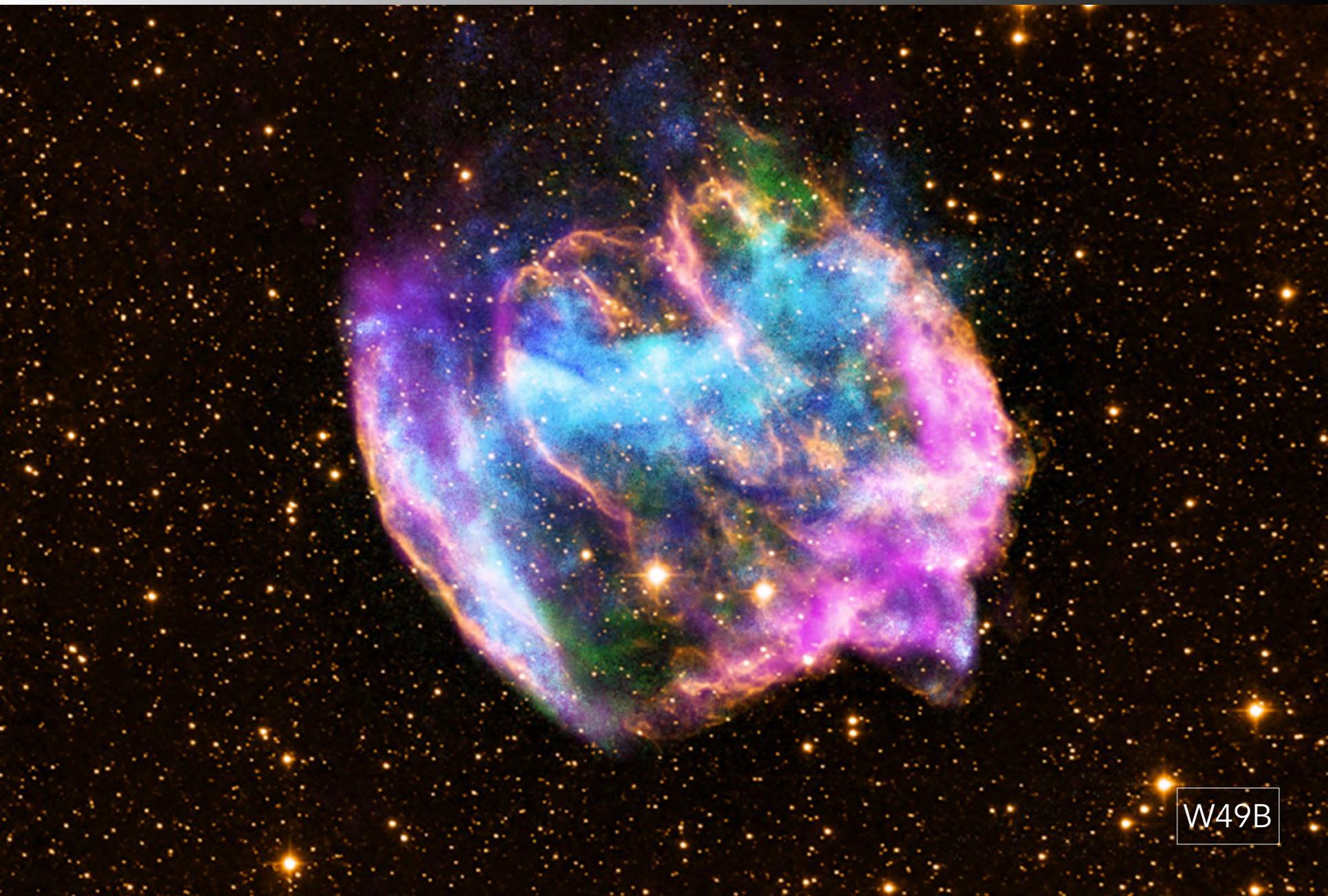
➔ Si l'étoile avait plus de $15 M_{\odot}$, son coeur s'effondrera en un **trou noir stellaire**

Supernovae à effondrement de coeur



SN 1054
(Nébuleuse du Crabe)

Supernovae à effondrement de coeur



W49B

Les trous noirs stellaires existent-ils?

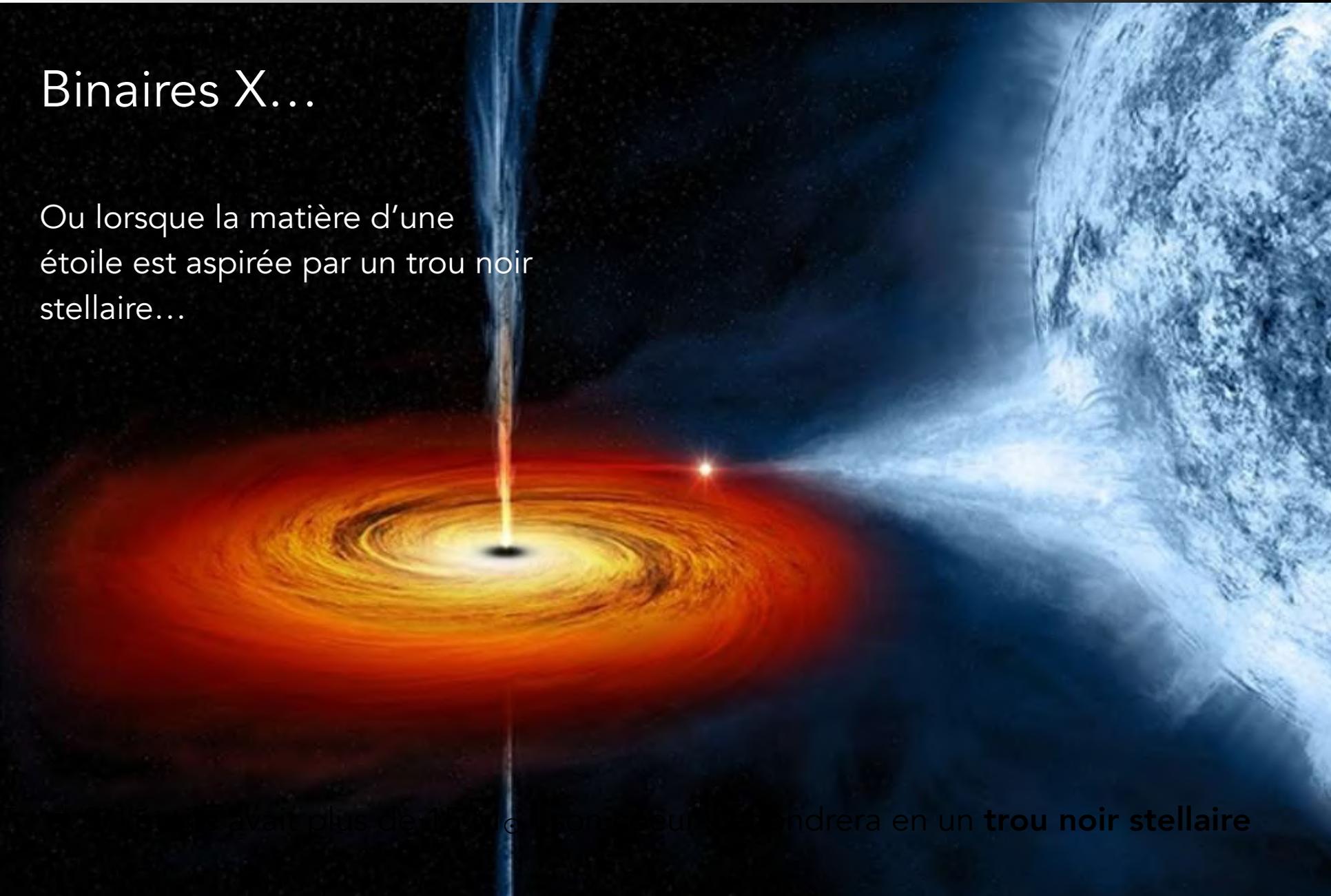
Binaires X...

Ou lorsque la matière d'une étoile est aspirée par un trou noir stellaire...

Les trous noirs stellaires existent-ils?

Binaires X...

Ou lorsque la matière d'une étoile est aspirée par un trou noir stellaire...

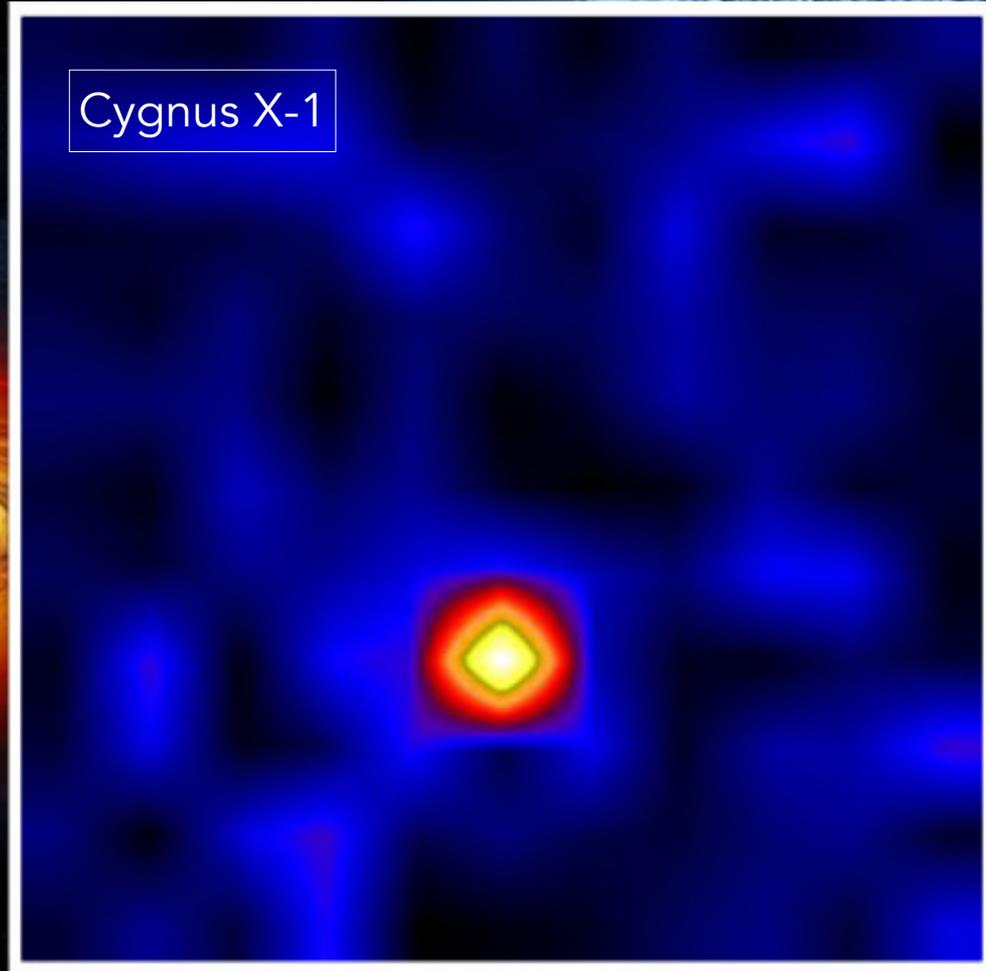


Il y a au moins un milliard de trous noirs stellaires dans notre galaxie. Un trou noir stellaire de 10 fois la masse du soleil aura plus de 15 milliards d'années avant de s'évaporer. Un trou noir de 10 fois la masse du soleil deviendra en un **trou noir stellaire**

Les trous noirs stellaires existent-ils?

Binaires X...

Ou lorsque la matière d'une étoile est aspirée par un trou noir stellaire...



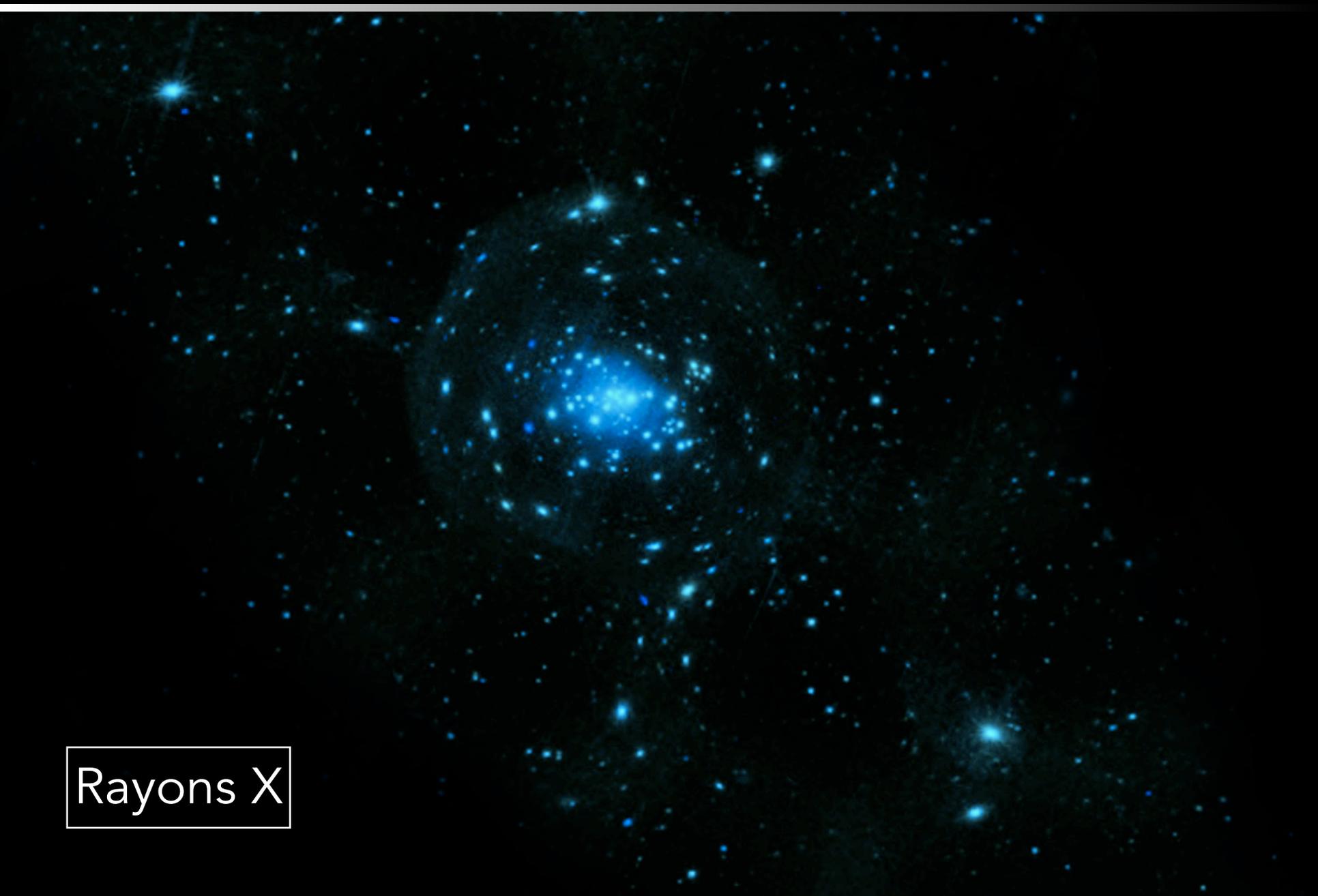
Il en existe au moins plus de 100 en notre galaxie.

Exemple...



Optique

Exemple...



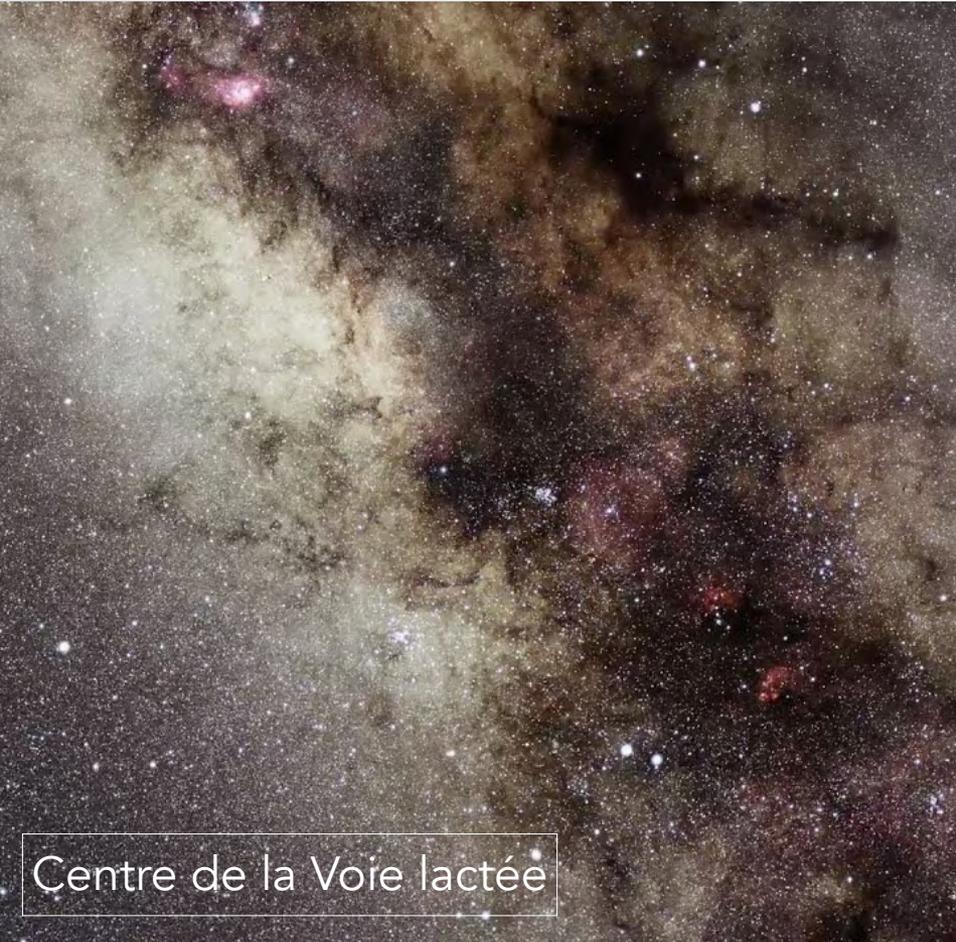
Rayons X



2) Trous noirs supermassifs

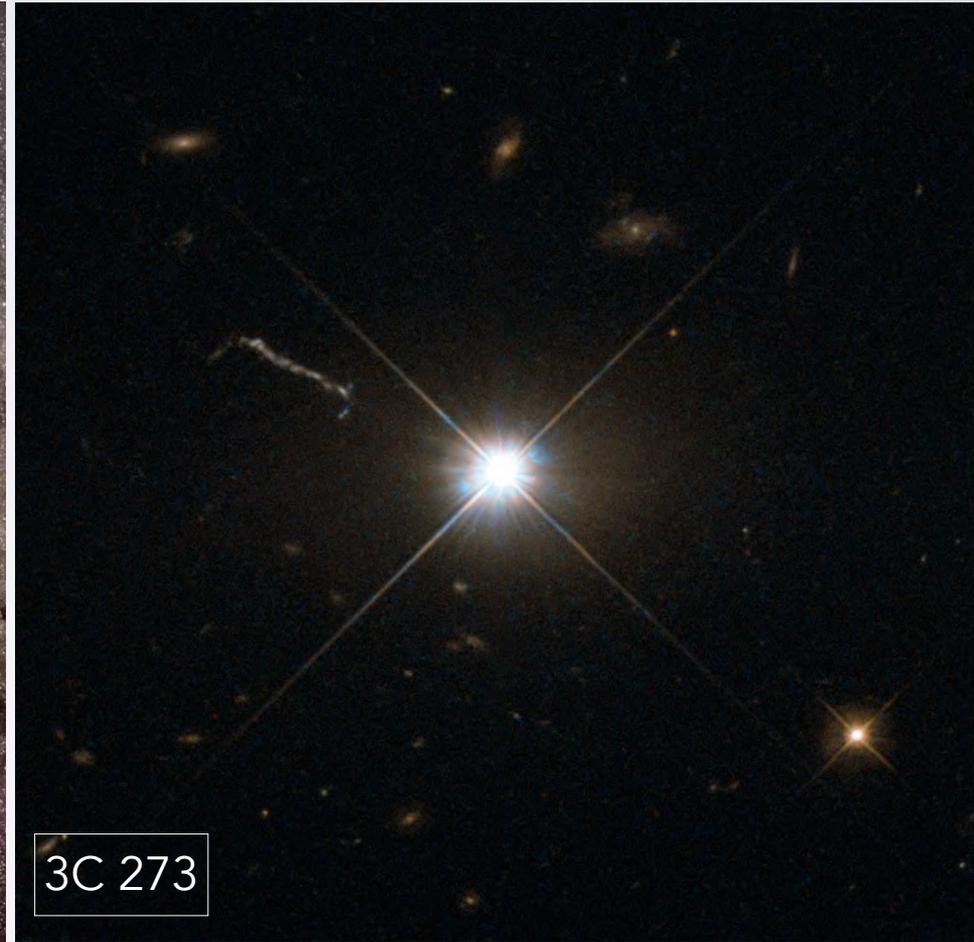
Deux types de trous noirs supermassifs

A) Trous noirs supermassifs **inactifs**



Très peu (ou pas) d'accrétion de matière autour du trou noir → **invisible**

B) Noyaux **actifs** de galaxies (AGN)



Beaucoup d'accrétion de matière autour du trou noir → **très brillant** (optique, X,...)

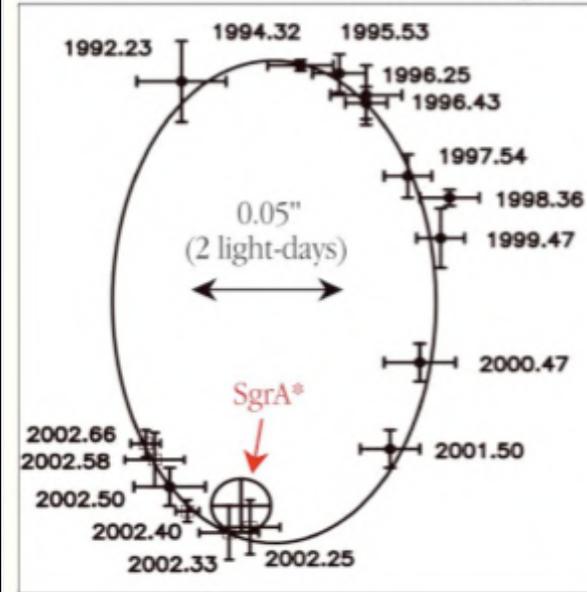
Au centre de notre Galaxie: Sagittarius A*

1992

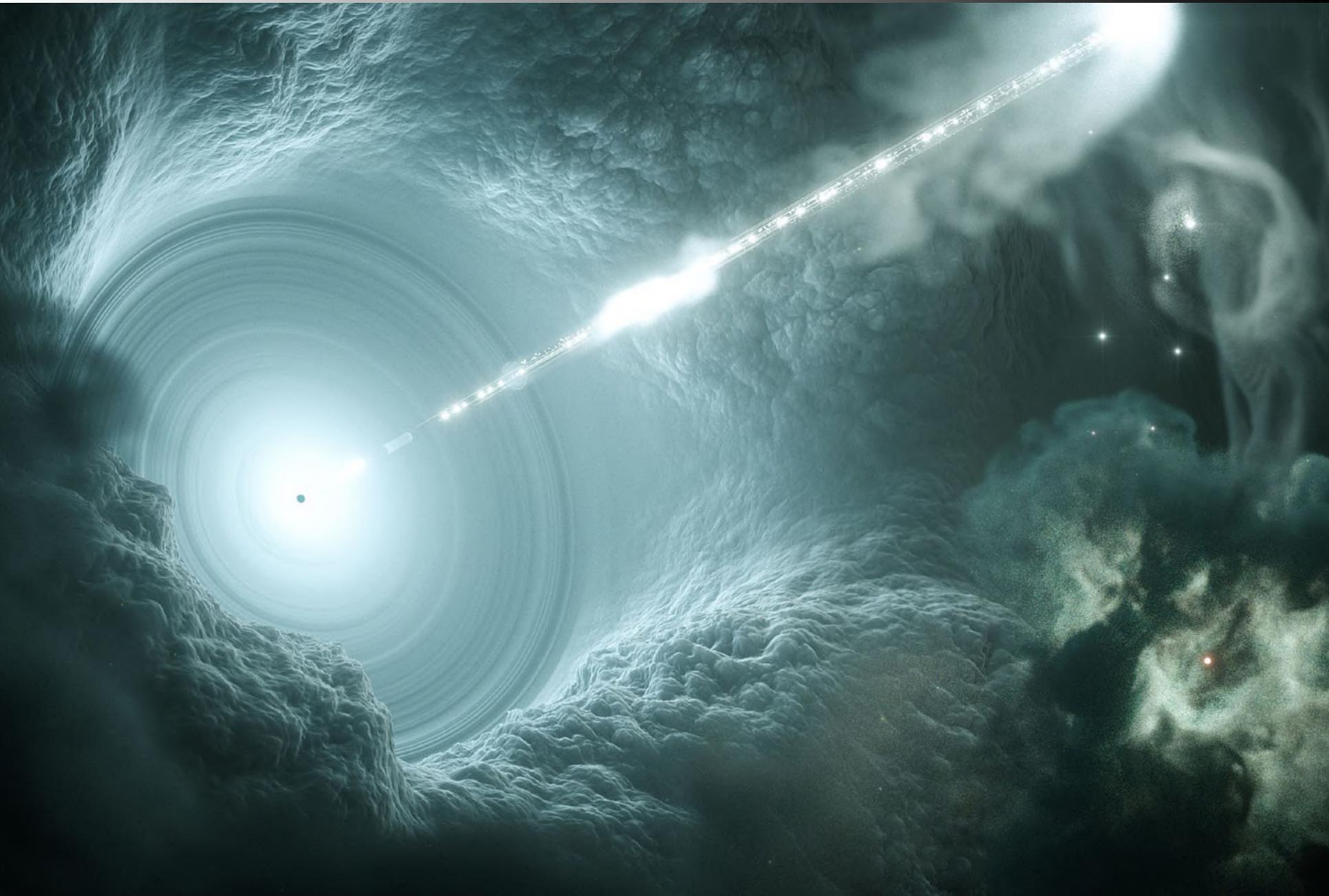
10 light days



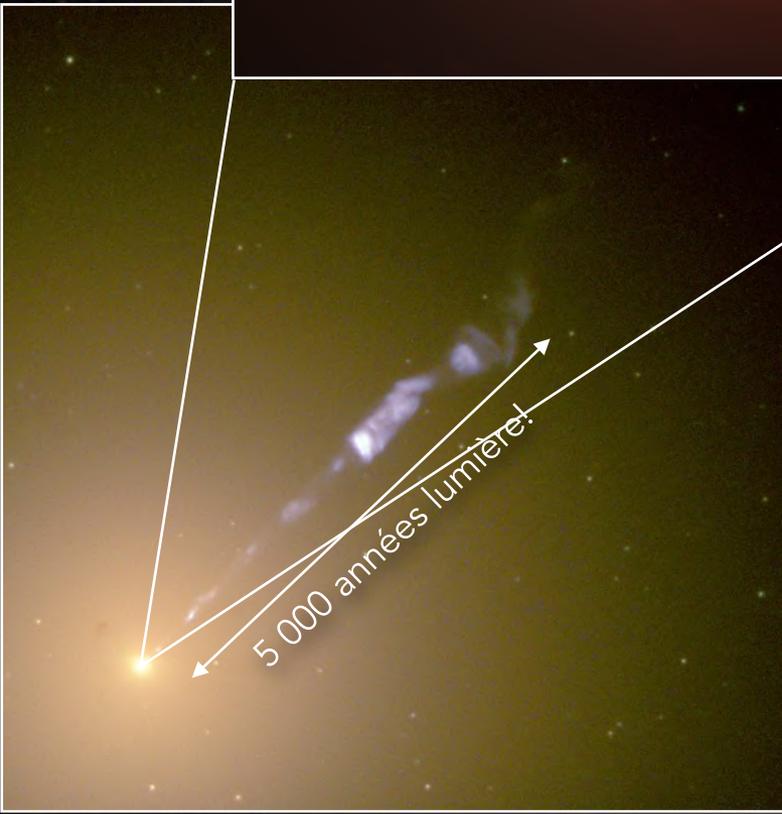
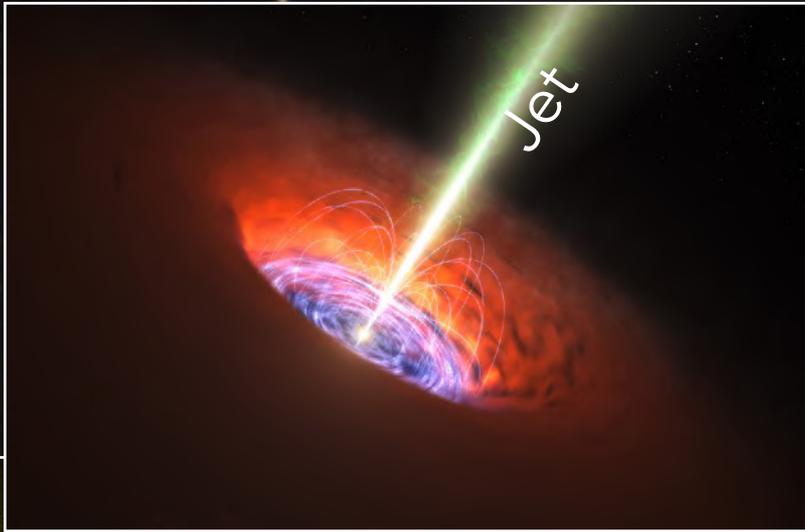
S2 Orbit around SgrA*



B) Quasars et noyaux actifs de galaxies



M87



Vrai ou faux?

3) Un trou noir (supermassif) peut tout avaler, tout le temps.

A detailed illustration of a supermassive black hole. At the center is a small, dark, circular event horizon. Surrounding it is a bright, glowing accretion disk composed of swirling gas and dust. The disk is illuminated from within, showing a gradient of colors from yellow and orange near the center to red and dark brown towards the outer edges. The background is a dark, starry space.

FAUX!

Vrai ou faux?

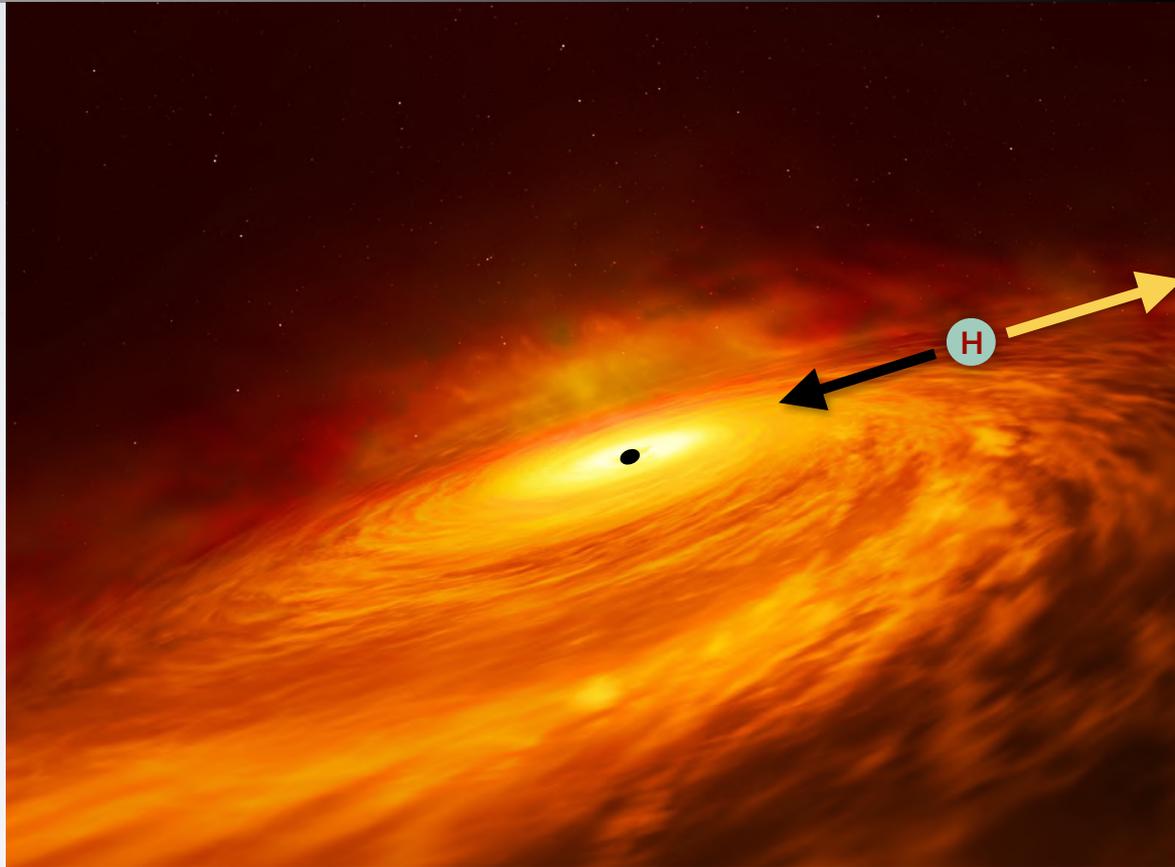
Force gravitationnelle:

$$F_{\text{grav}} = \frac{GM(m_p + m_e)}{r^2} \approx \frac{GMm_p}{r^2}$$

Pression de radiation:

$$\cancel{P}_{\text{rad}} = \frac{L}{4\pi r^2 c} \sigma_e$$

F_{rad}



Luminosité d'Eddington: $F_{\text{grav}} = F_{\text{rad}}$

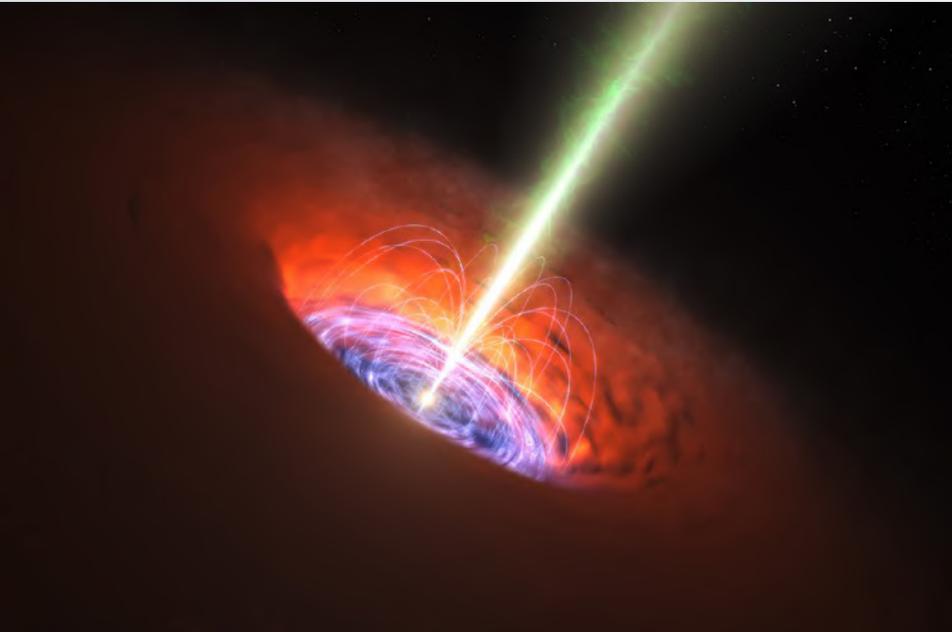
$$L_E = \frac{4\pi Gcm_p}{\sigma_e} M$$

$$\rightarrow \frac{L_E}{L_\odot} \approx 3.3 \times 10^4 \frac{M}{M_\odot}$$

Les trous noirs ne peuvent **pas** avaler leurs alentours à un rythme infini!

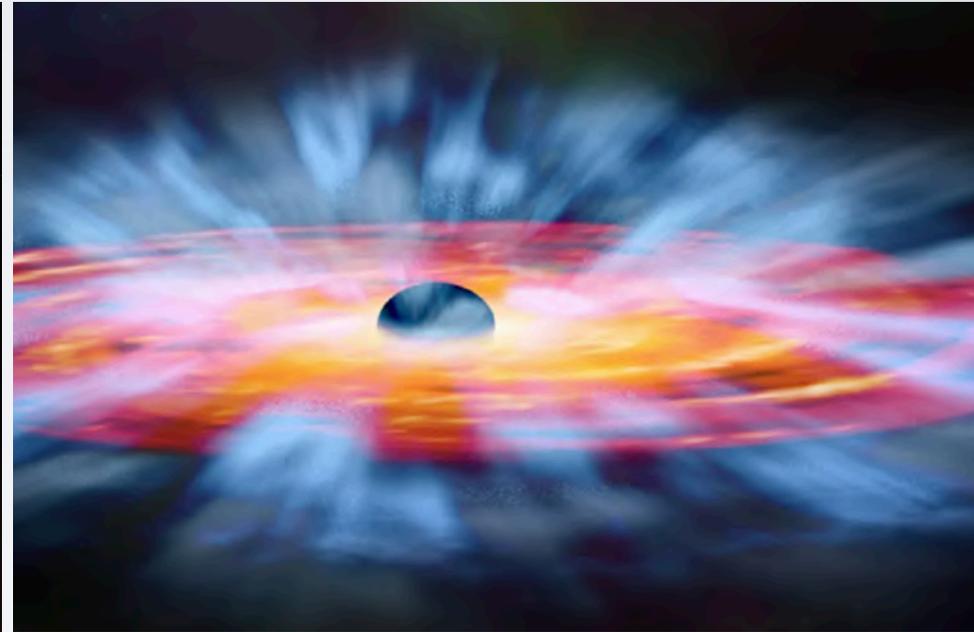
Deux "modes" d'accrétion...

Mode "cinétique" ($L \ll L_E$)



Trou noir peu brillant, mais présence de jets
(synchrotron, visibles en ondes radio)

Mode "radiatif" ($L \sim L_E$)



Trou noir TRÈS brillant, parfois plus que sa
galaxie hôte! (**quasar**)

Comment les jets (relativistes!) se forment-ils?

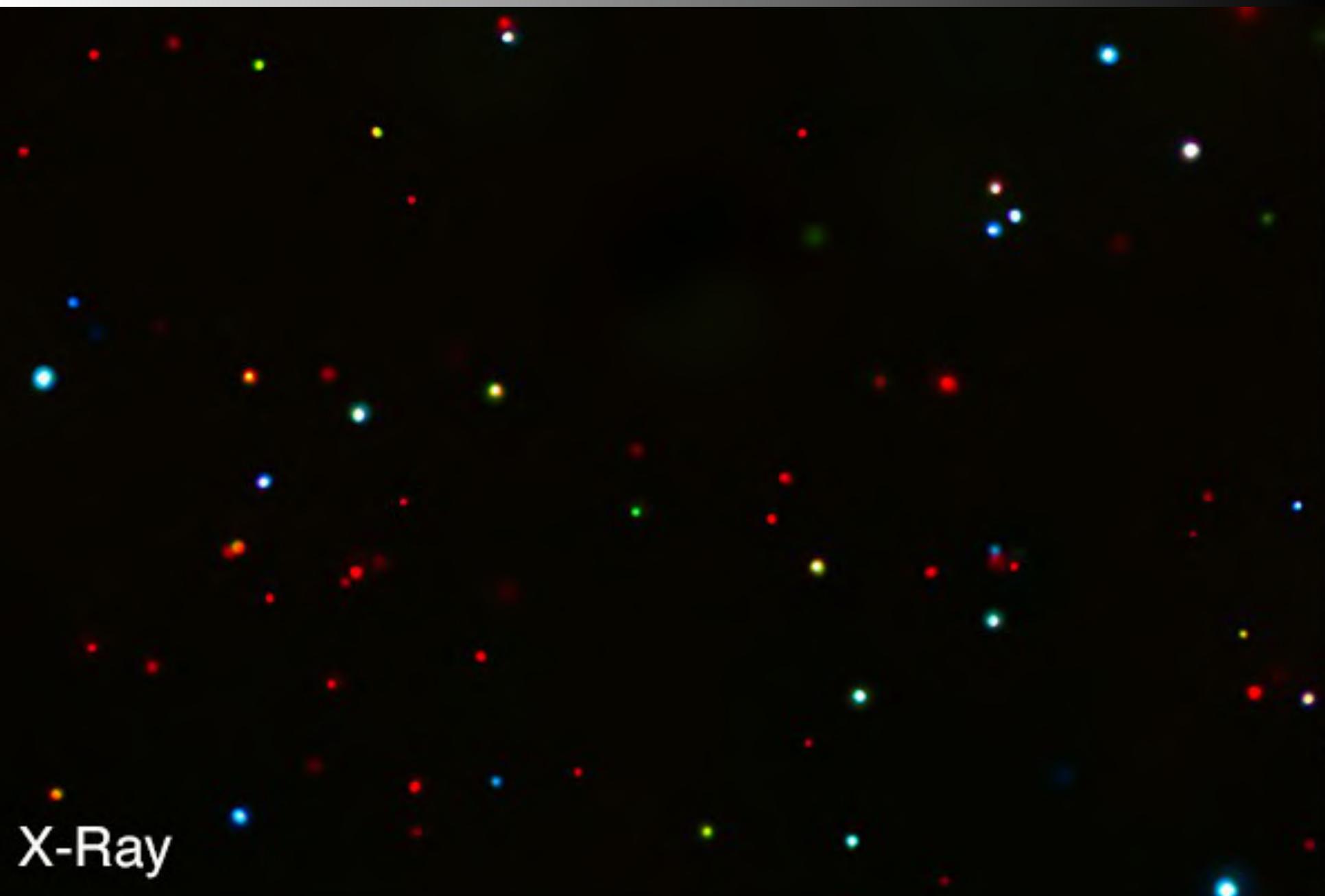


Le ciel en rayons X...



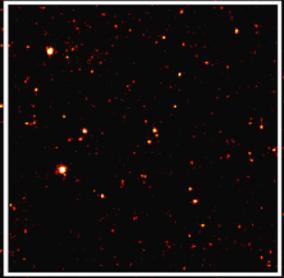
Optical

Le ciel en rayons X...

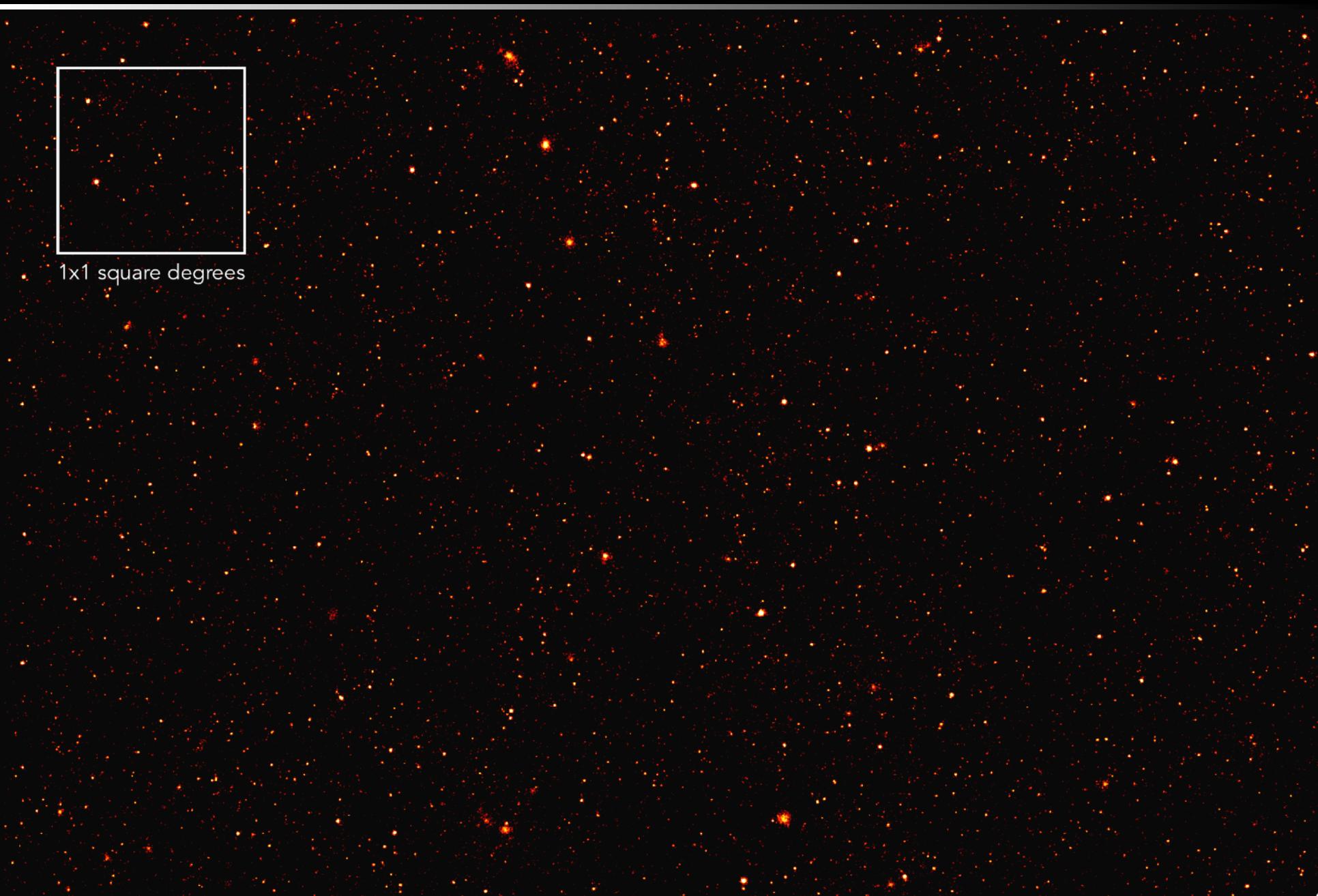


X-Ray

Le ciel en rayons X...



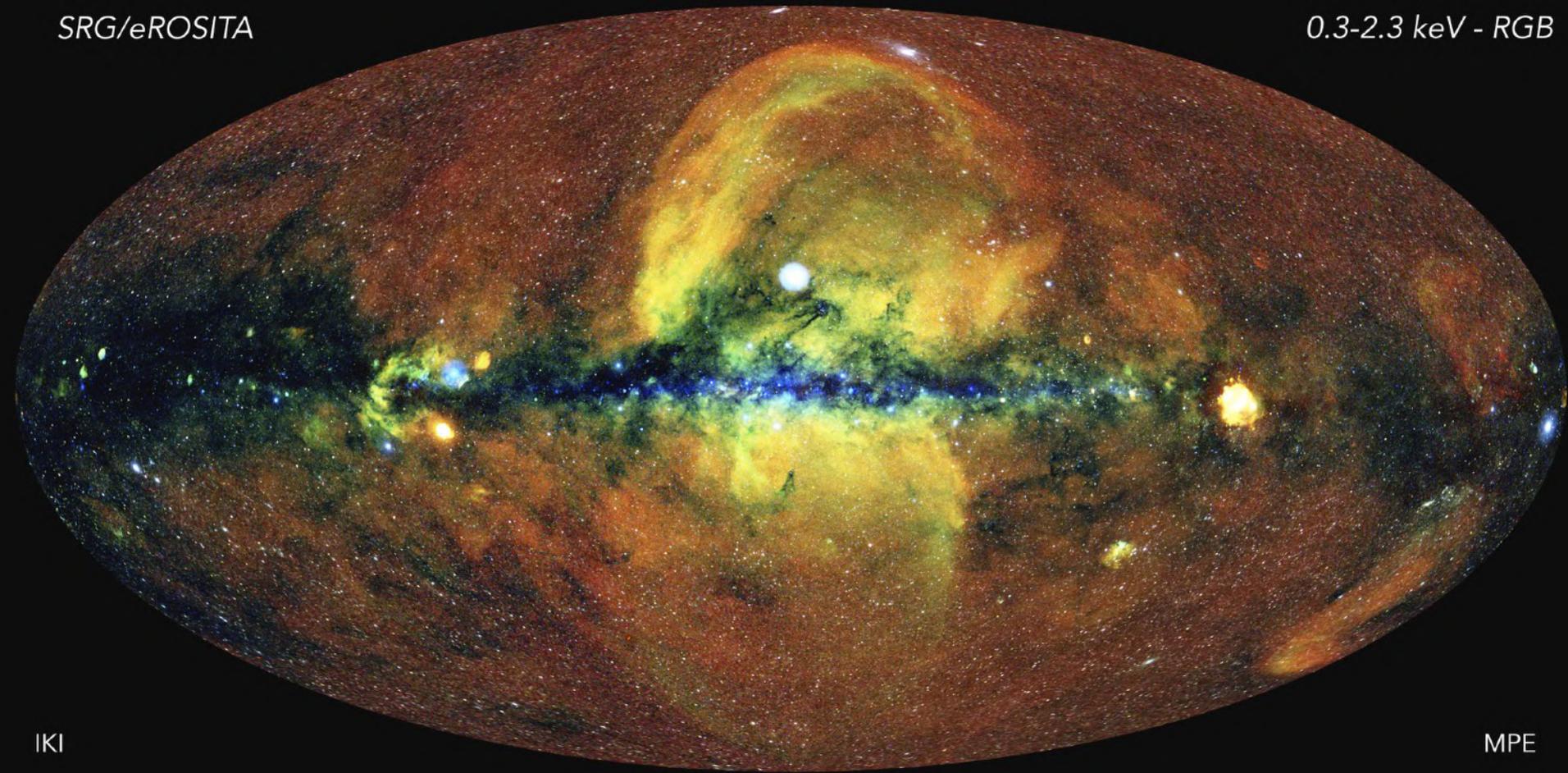
1x1 square degrees



Le ciel en rayons X...

SRG/eROSITA

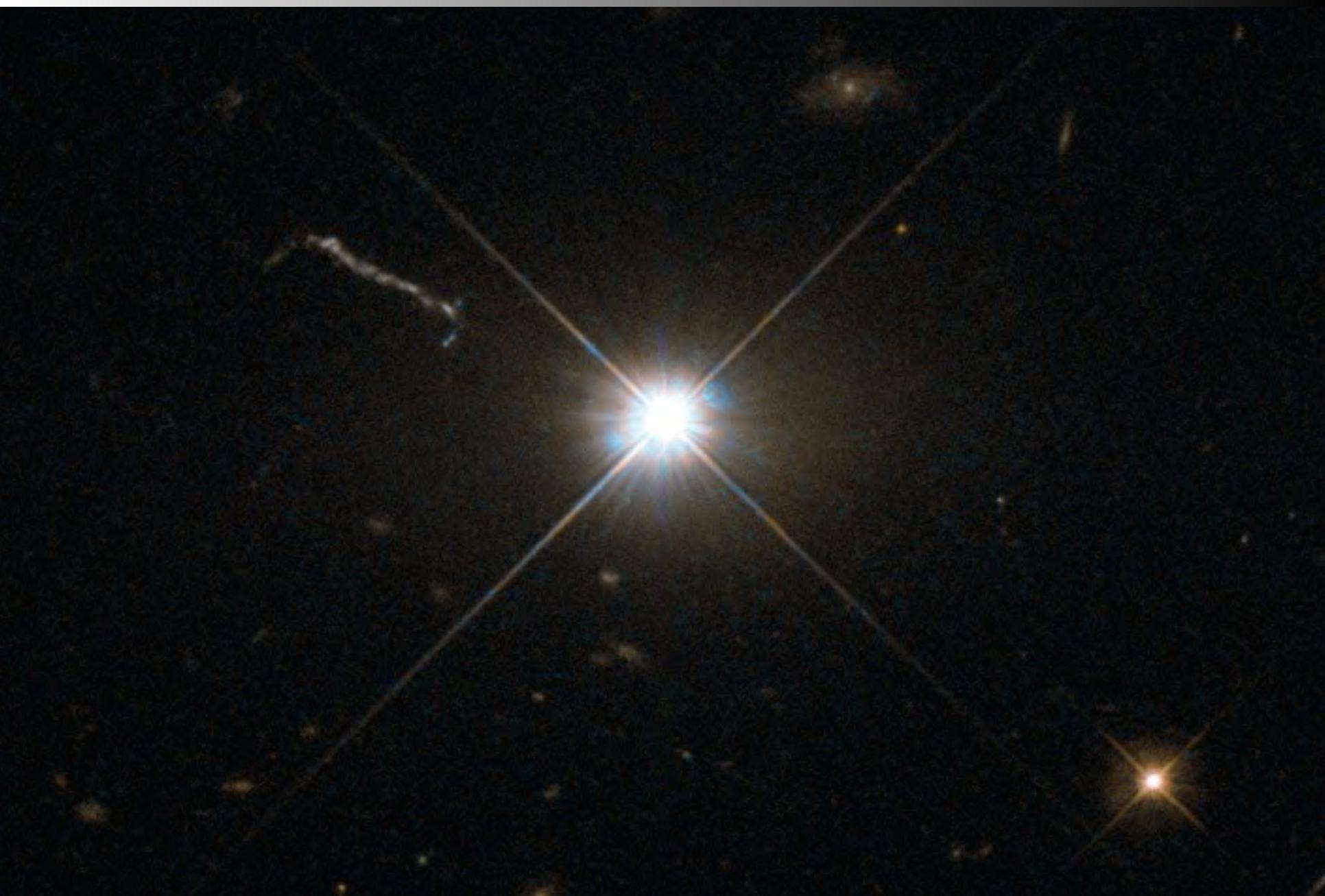
0.3-2.3 keV - RGB



IKI

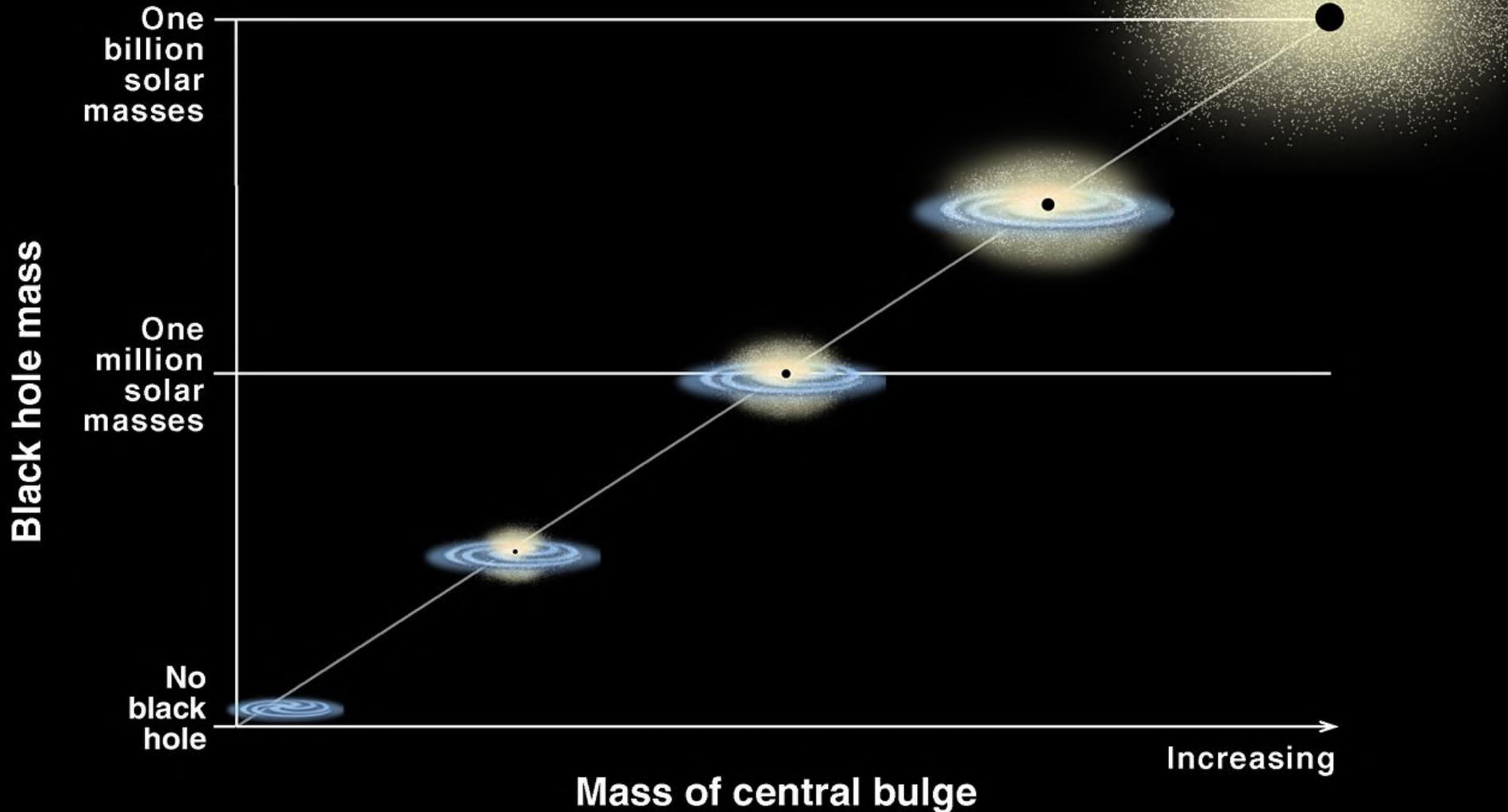
MPE

3C 273, un quasar typique

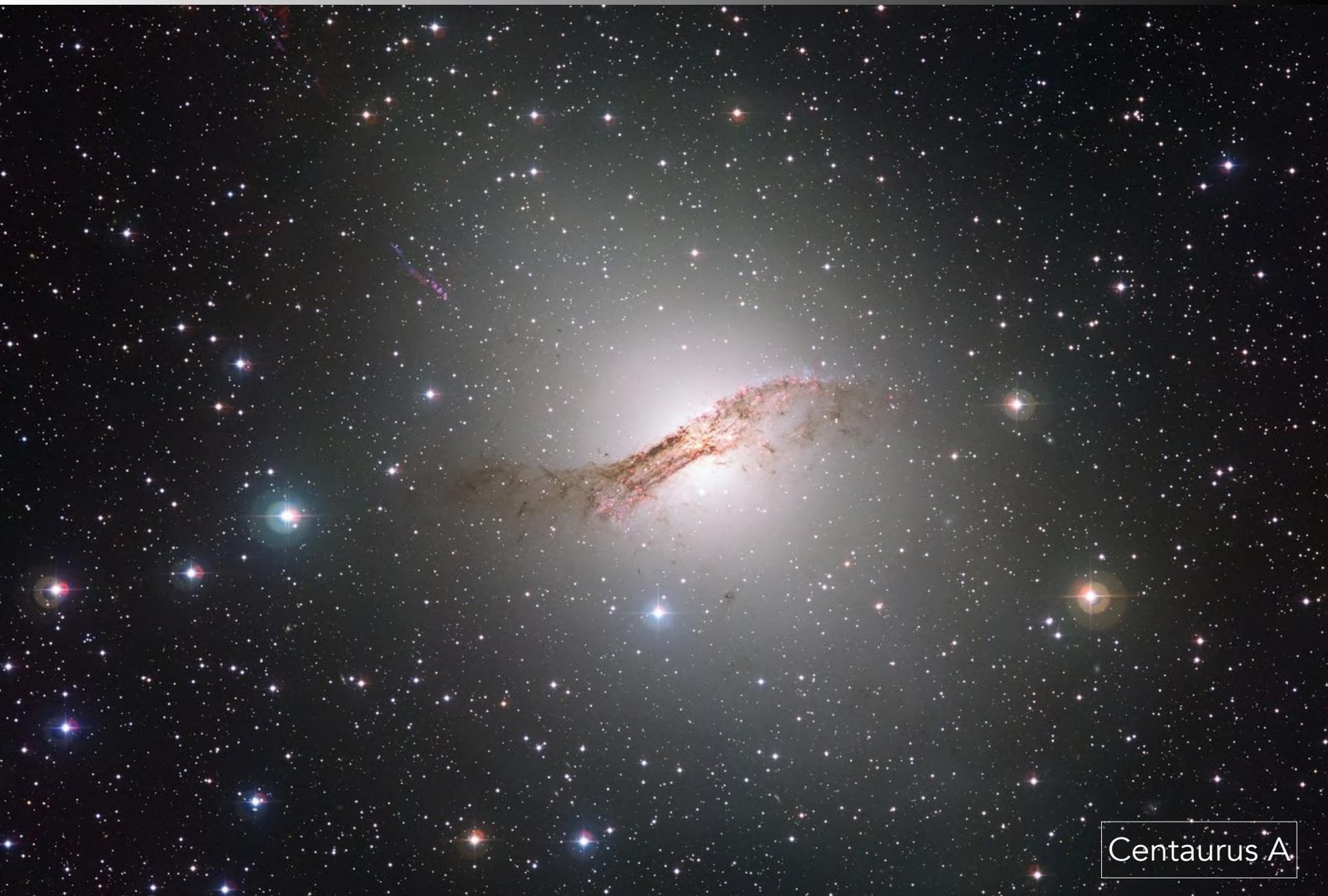


L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass



L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



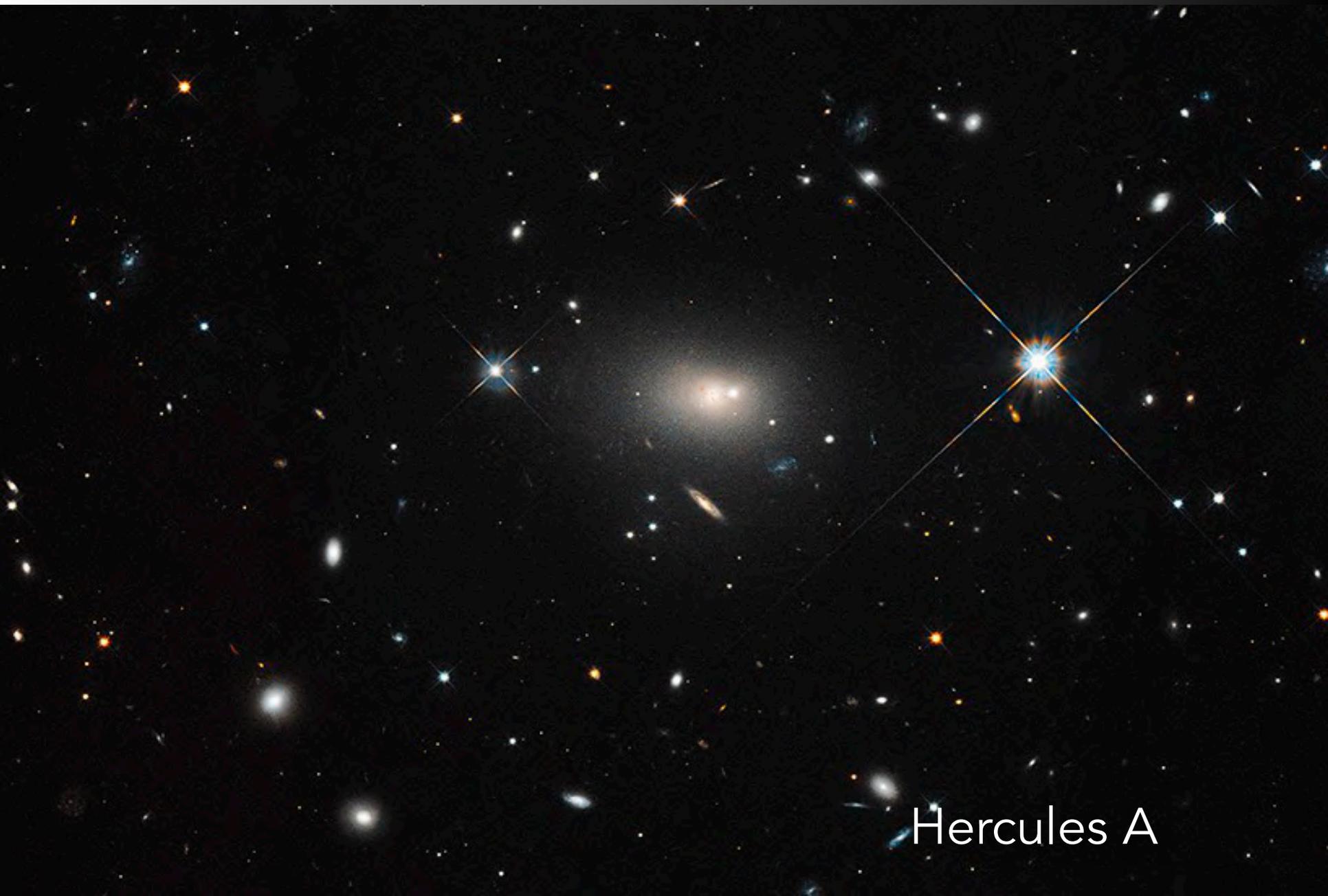
Centaurus A

L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



Centaurus A

L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



Hercules A

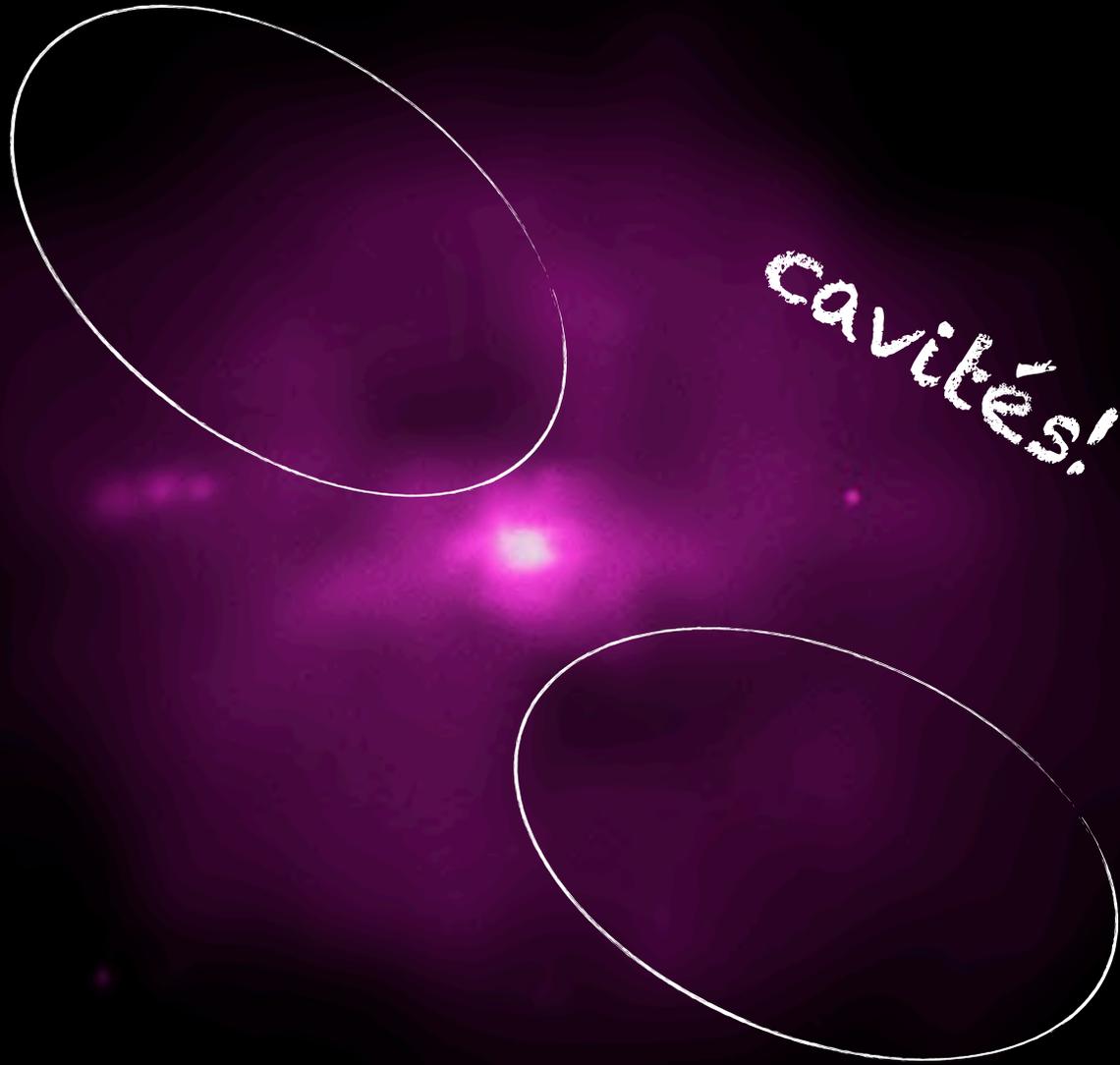
L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



Radio

Hercules A

L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

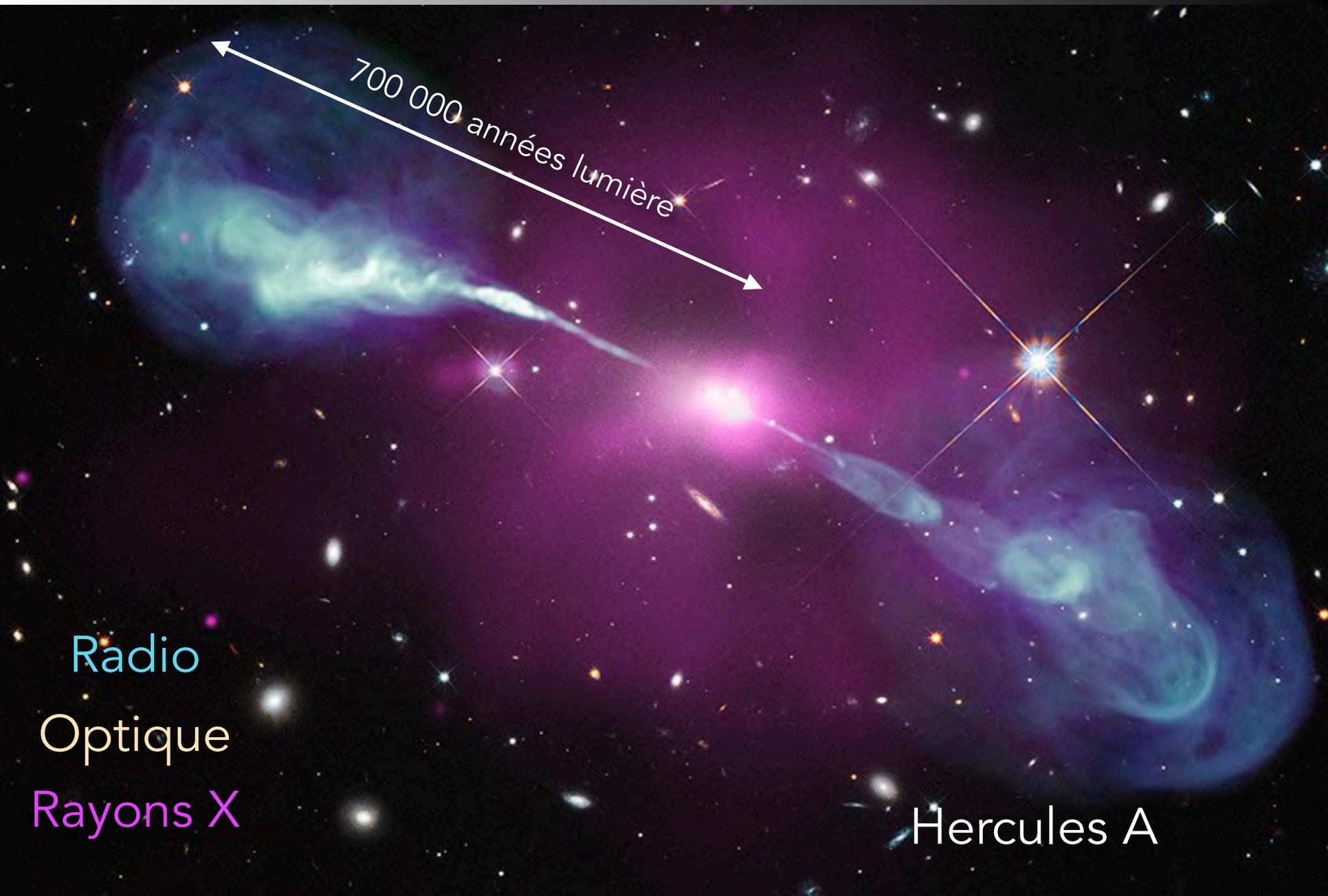


cavités!

Rayons X

Hercules A

L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

Optique



MS 0735.6+7421 (2.6 milliards d'années lumière)

L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

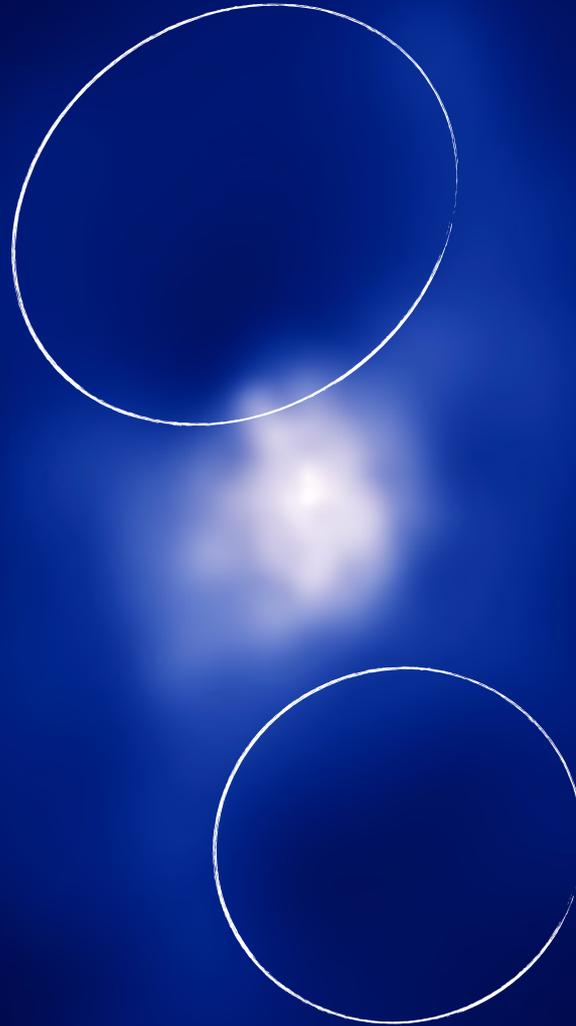
Radio

Rayons X

MS 0735.6+7421 (2.6 milliards d'années lumière)

L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

Rayons X



cavités!

MS 0735.6+7421 (2.6 milliards d'années lumière)

L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



MS 0735.6+7421 (2.6 milliards d'années lumière)

Formation?

Bootes



LETTER

doi:10.1038/nature25180

An 800-million-solar-mass black hole in a significantly neutral Universe at a redshift of 7.5

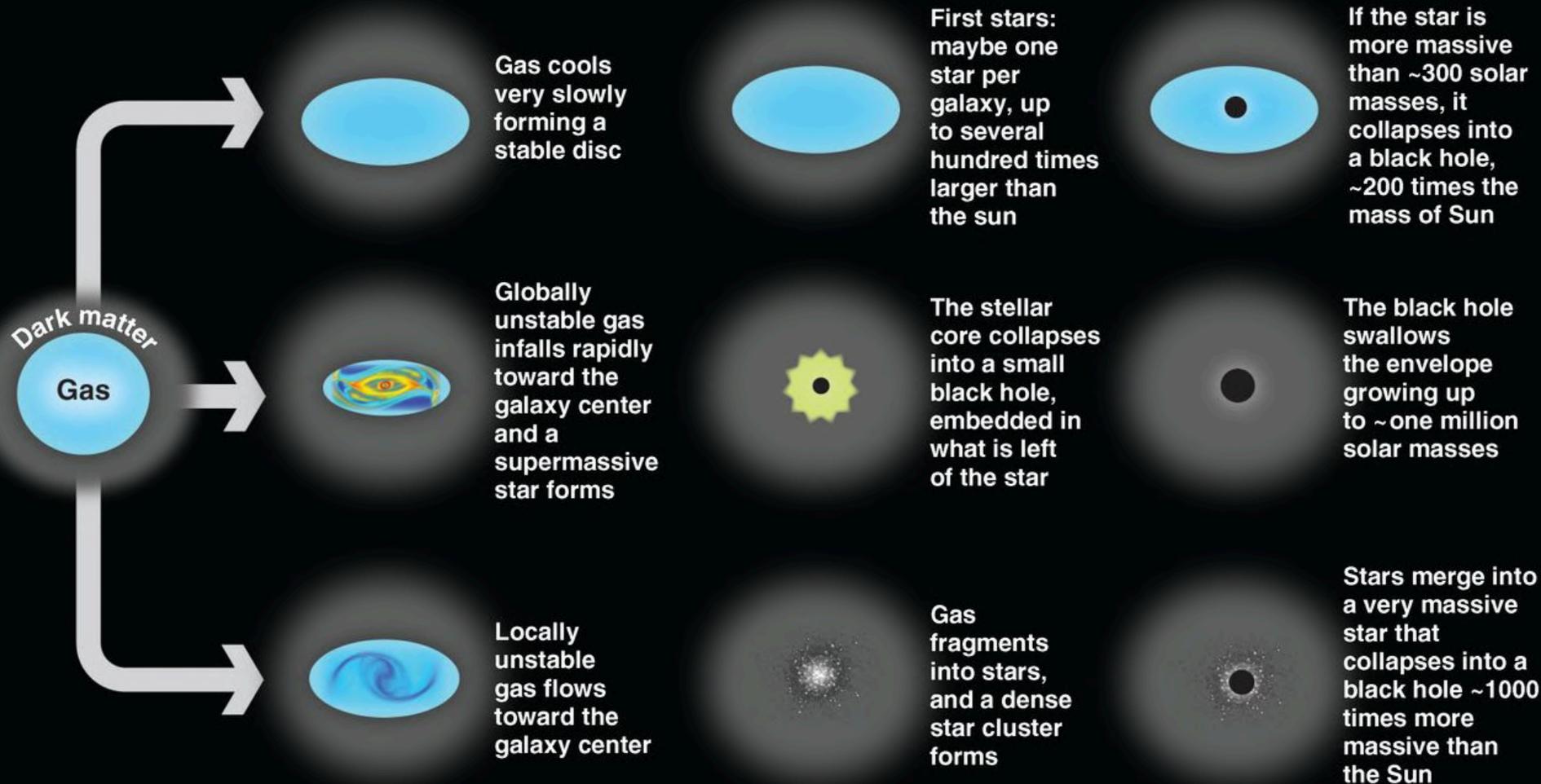
Eduardo Bañados¹, Bram P. Venemans², Chiara Mazzucchelli², Emanuele P. Farina², Fabian Walter², Feige Wang^{3,4}, Roberto Decarli^{2,5}, Daniel Stern⁶, Xiaohui Fan⁷, Frederick B. Davies⁸, Joseph F. Hennawi⁸, Robert A. Simcoe⁹, Monica L. Turner^{9,10}, Hans-Walter Rix², Jinyi Yang^{3,4}, Daniel D. Kelson¹, Gwen C. Rudie¹ & Jan Martin Winters¹¹

Quasars are the most luminous non-transient objects known and as a result they enable studies of the Universe at the earliest cosmic epochs. Despite extensive efforts, however, the quasar ULAS J1120+0641 at redshift $z=7.09$ has remained the only one known at $z>7$ for more than half a decade¹. Here we report observations of the quasar ULAS J134208.10+092838.61 (hereafter J1342+0928) at redshift $z=7.54$. This quasar has a bolometric luminosity of 4×10^{43} times the luminosity of the Sun and a black-hole mass of 8×10^8 solar masses. The existence of this supermassive black hole when the Universe was only 690 million years old—just five per cent of its current age—reinforces models of early black-hole growth that allow black holes with initial masses of more than about 10^4 solar masses^{2,3} or episodic hyper-Eddington accretion^{4,5}. We see strong evidence of absorption of the spectrum of the quasar redwards of the Lyman α emission line (the Gunn–Peterson damping wing), as

would be expected if a significant amount (more than 10 per cent) of the hydrogen in the intergalactic medium surrounding J1342+0928 is neutral. We derive such a significant fraction of neutral hydrogen, although the exact fraction depends on the modelling. However, even in our most conservative analysis we find a fraction of more than 0.33 (0.11) at 68 per cent (95 per cent) probability, indicating that we are probing well within the reionization epoch of the Universe.

We detected the quasar J1342+0928 as part of an on-going effort to find quasars at $z>7$ by mining three large-area surveys: the Wide-field Infrared Survey Explorer⁶ (ALLWISE), the United Kingdom Infrared Telescope Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS) Large Area Survey⁷ and the DECam Legacy Survey (DECaLS; <http://legacysurvey.org/decams>). At redshifts of more than about 7, residual neutral hydrogen in the intergalactic medium (IGM) absorbs virtually all flux bluewards of the

Formation



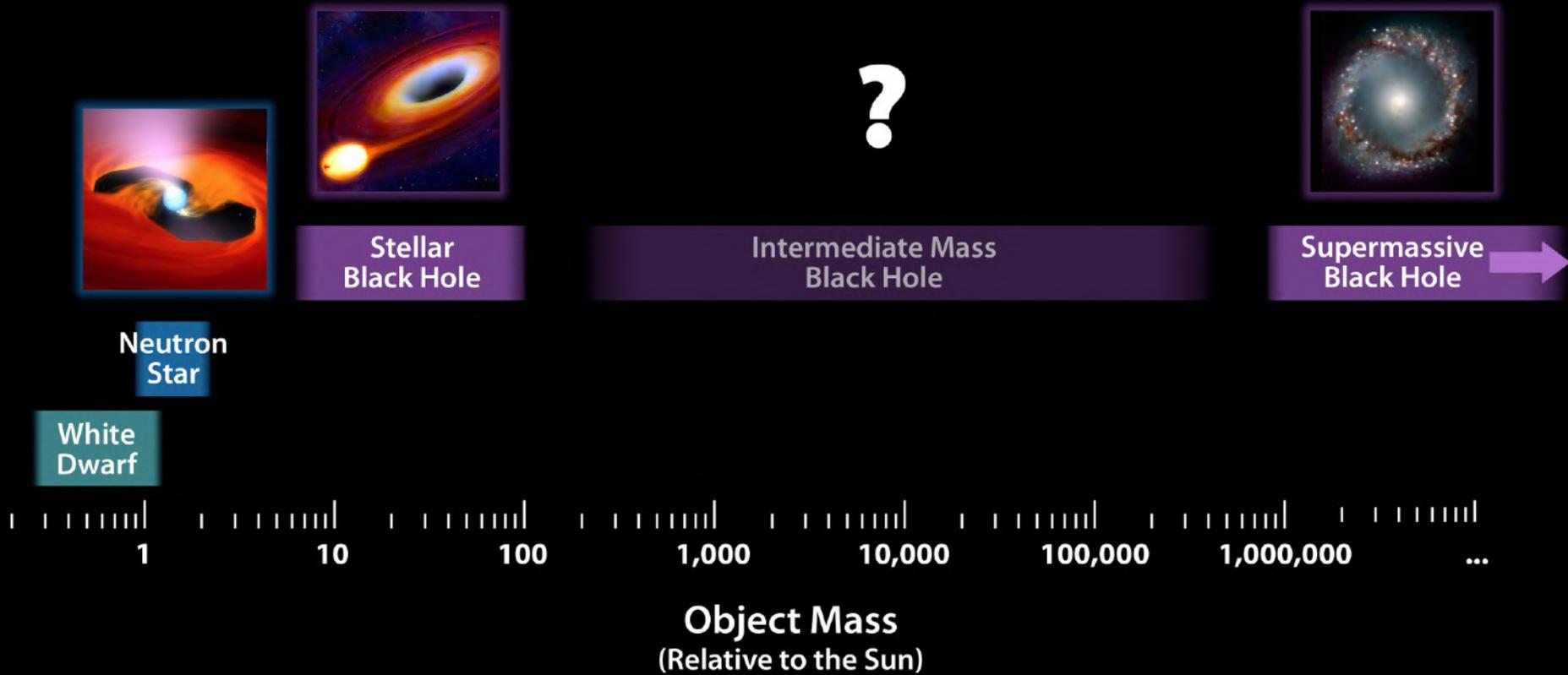
Comment les trous noirs supermassifs se sont-ils formés?

A black hole is depicted as a central black circle, surrounded by a glowing accretion disk. The disk is composed of many small, bright spots, likely representing stars or gas being pulled into the black hole. The background is a dark blue space filled with numerous stars of various colors, including white, yellow, and orange. The overall scene is a representation of a black hole in a star-forming region.

3) Trous noirs de masse intermédiaire

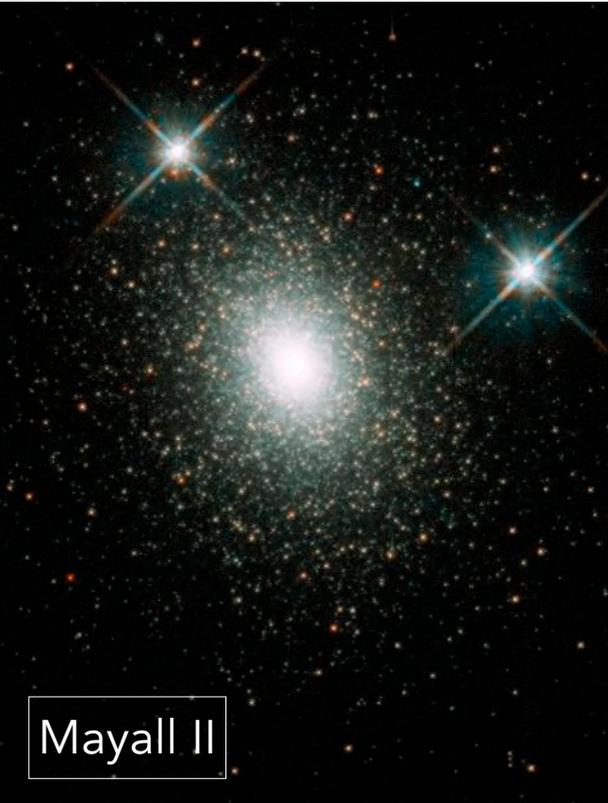
Existent-ils?

Observed Mass Ranges of Compact Objects



Meilleur candidats: les sources "ULX"

- On pense en avoir découverts quelques uns (ULXs)...
- ...mais reste débattu!



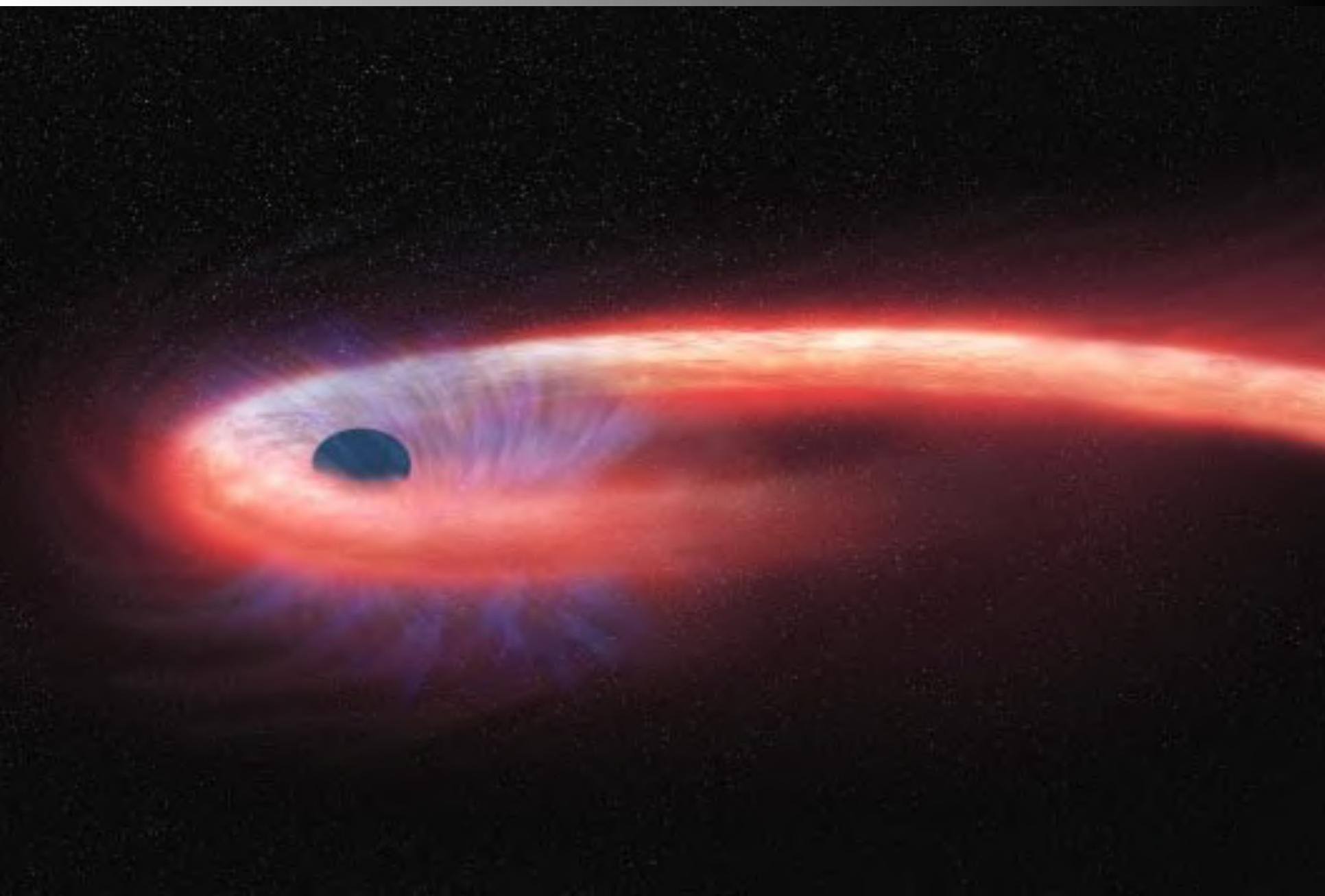
Mayall II

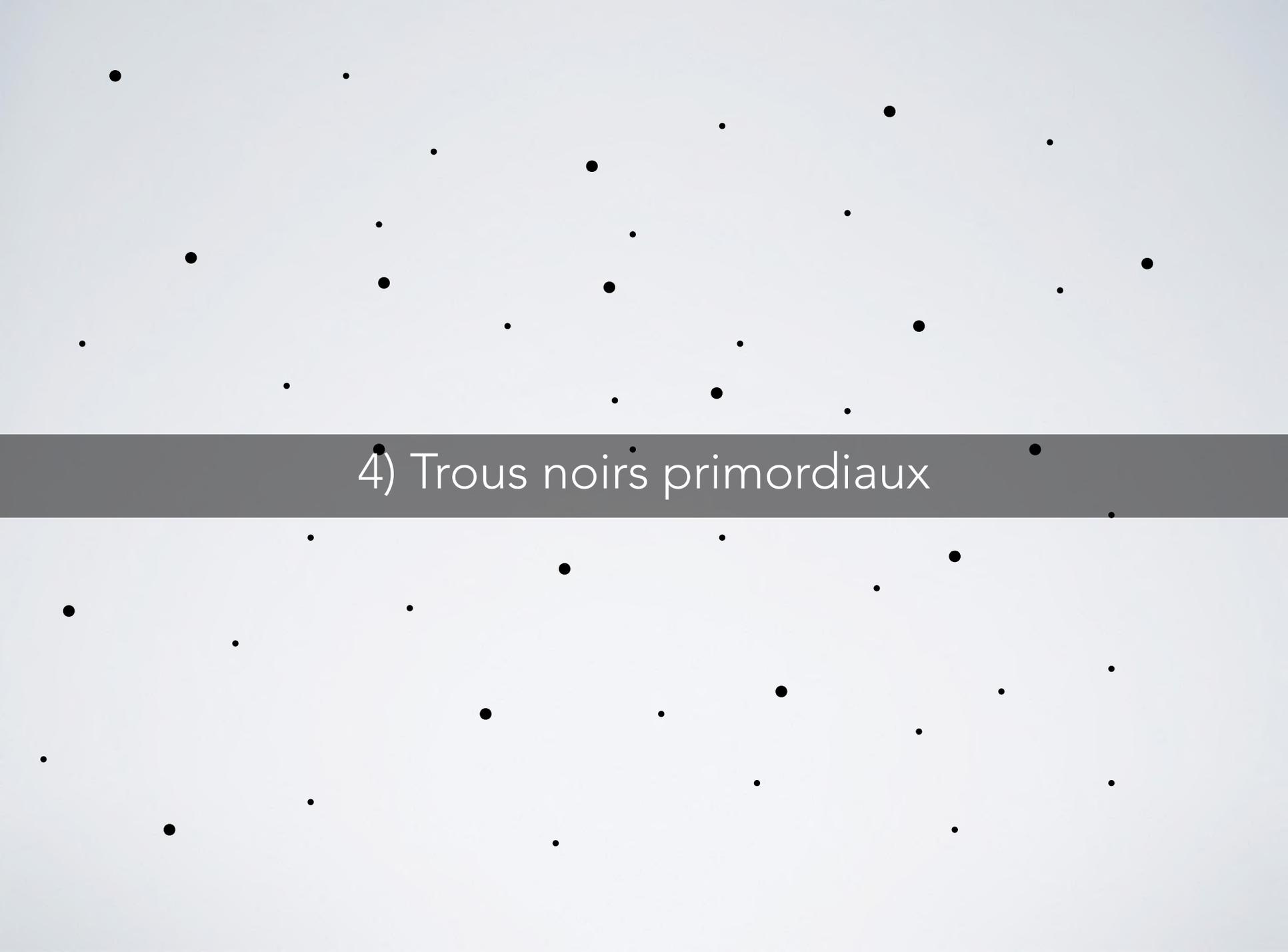


Ultraluminous X-ray Source

(Limite d'Eddington!)

Meilleur candidats: les sources "ULX"





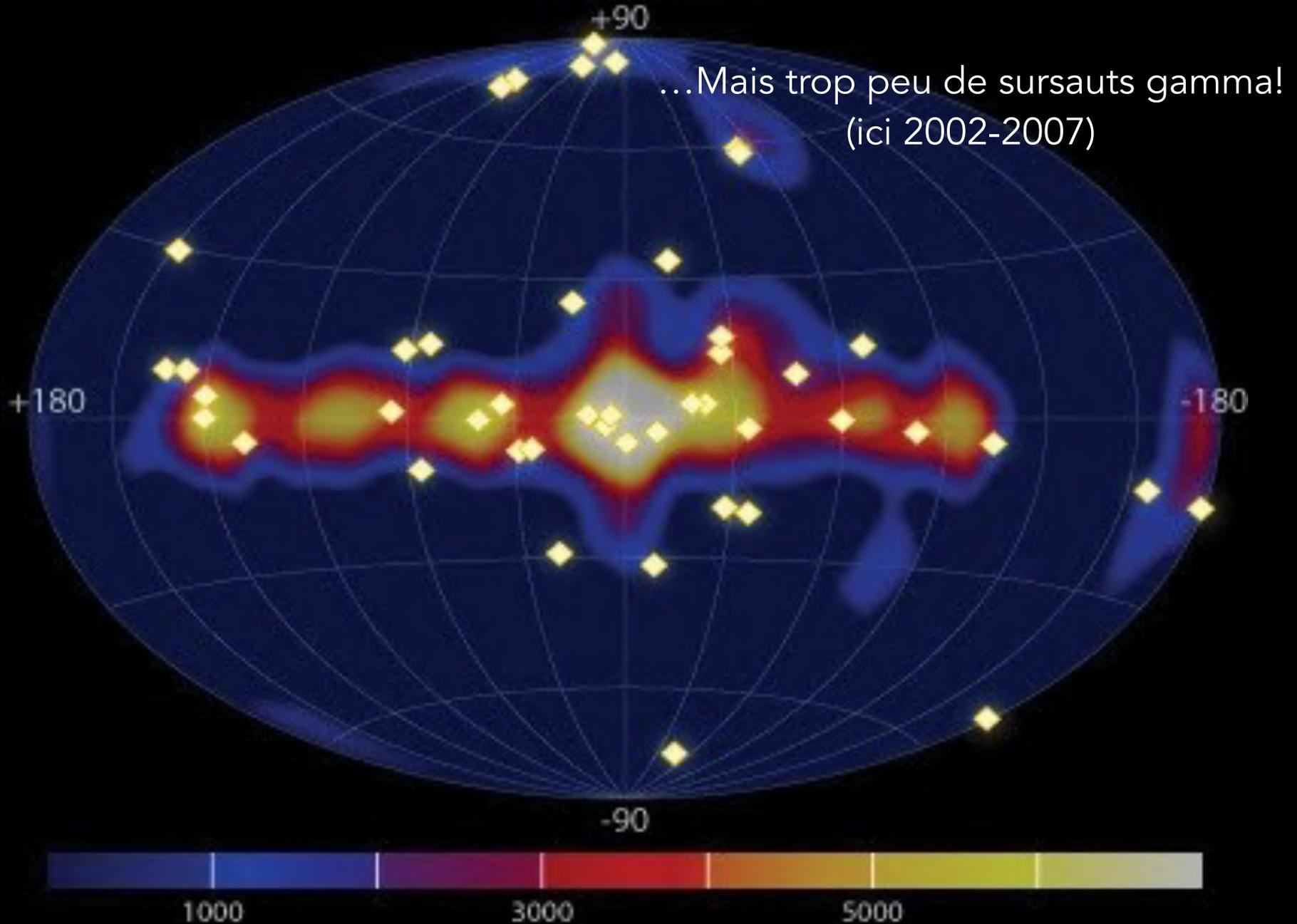
4) Trous noirs primordiaux

4) Trous noirs primordiaux

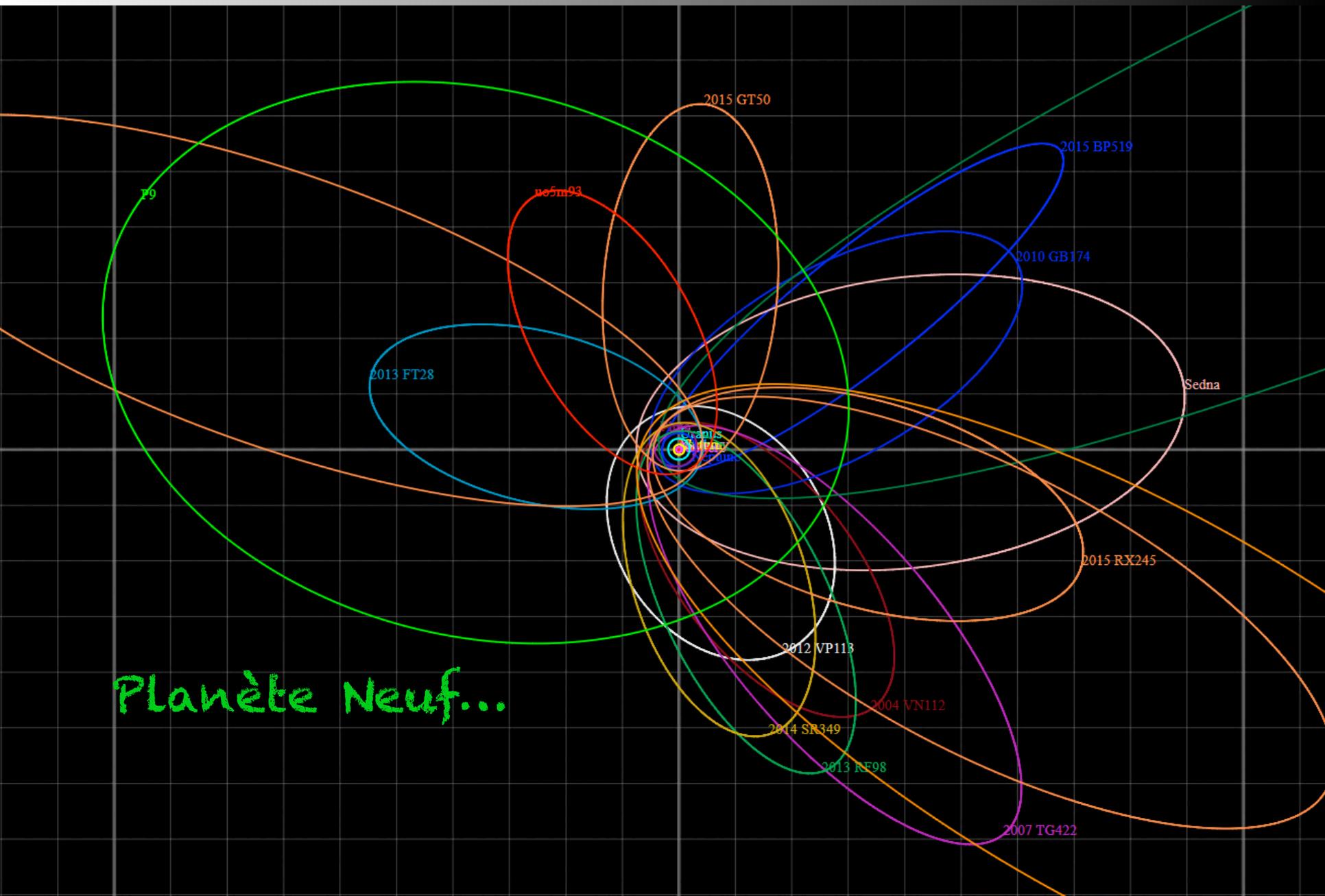
- Potentiellement formés juste après le Big Bang...
- Leurs tailles et nombre devraient dépendre de l'inflation cosmique
- Devraient émettre des sursauts gammas!



4) Trous noirs primordiaux



Une neuvième planète?



Planète Neuf...

Une neuvième planète?

- Masse: environ 10 fois celle de la Terre (un peu moins massive que Neptune)
 - Pour une telle masse, la planète serait gazeuse...
- 350 - 800 u.a. (!!)
 - 30 milliards de km!!

...et si c'était un trou noir primordial?!

PHYSICAL REVIEW LETTERS 125, 051103 (2020)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

What If Planet 9 Is a Primordial Black Hole?

Jakub Scholtz¹ and James Unwin²

¹*Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham University, Durham DH1 3LE, United Kingdom*

²*Department of Physics, University of Illinois at Chicago, Chicago, Illinois 60607, USA
and Department of Physics, University of California, Berkeley and Theoretical Physics Group,
LBNL and Mathematics Sciences Research Institute, Berkeley, California 94720, USA*

(Received 13 November 2019; revised 10 February 2020; accepted 26 June 2020; published 29 July 2020)

We highlight that the anomalous orbits of trans-Neptunian objects (TNOs) and an excess in microlensing events in the 5-year Optical Gravitational Lensing Experiment data set can be simultaneously explained by a new population of astrophysical bodies with mass several times that of the Earth (M_{\oplus}). We take these objects to be primordial black holes (PBHs) and point out the orbits of TNOs would be altered if one of these PBHs was captured by the Solar System, inline with the Planet 9 hypothesis. Capture of a free floating planet is a leading explanation for the origin of Planet 9, and we show that the probability of capturing a PBH instead is comparable. The observational constraints on a PBH in the outer Solar System significantly differ from the case of a new ninth planet. This scenario could be confirmed through annihilation signals from the dark matter microhalo around the PBH.

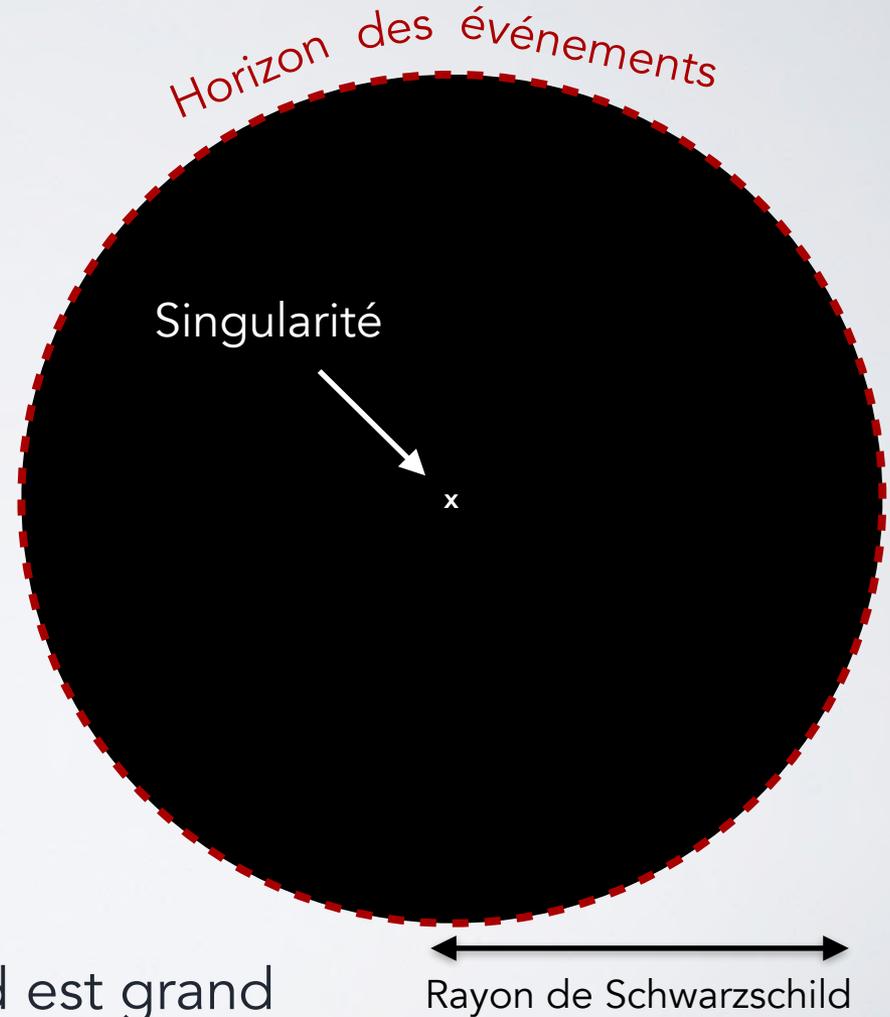
DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.051103

3. Trous noirs et physique fondamentale

Anatomie d'un trou noir

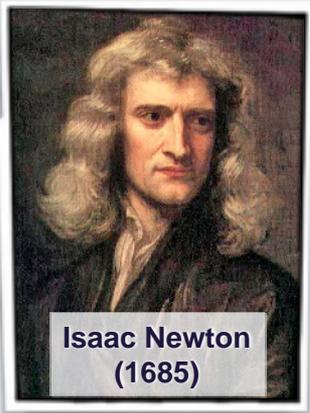
Rayon de Schwarzschild:

$$R_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$$



Plus un trou noir est massif,
plus son rayon de Schwarzschild est grand

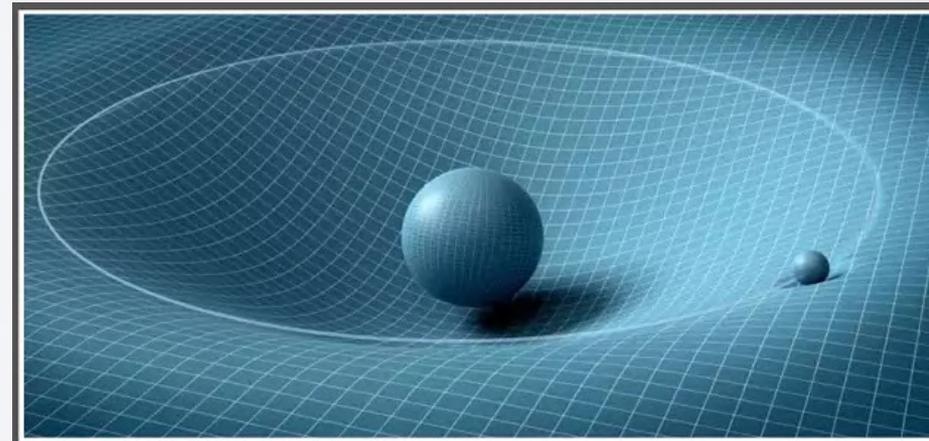
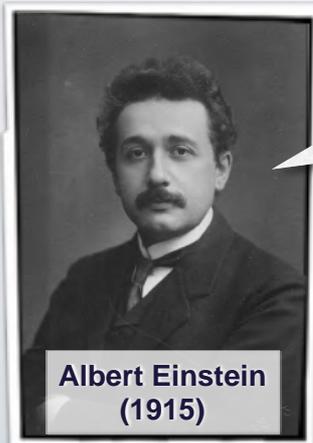
Relativité générale



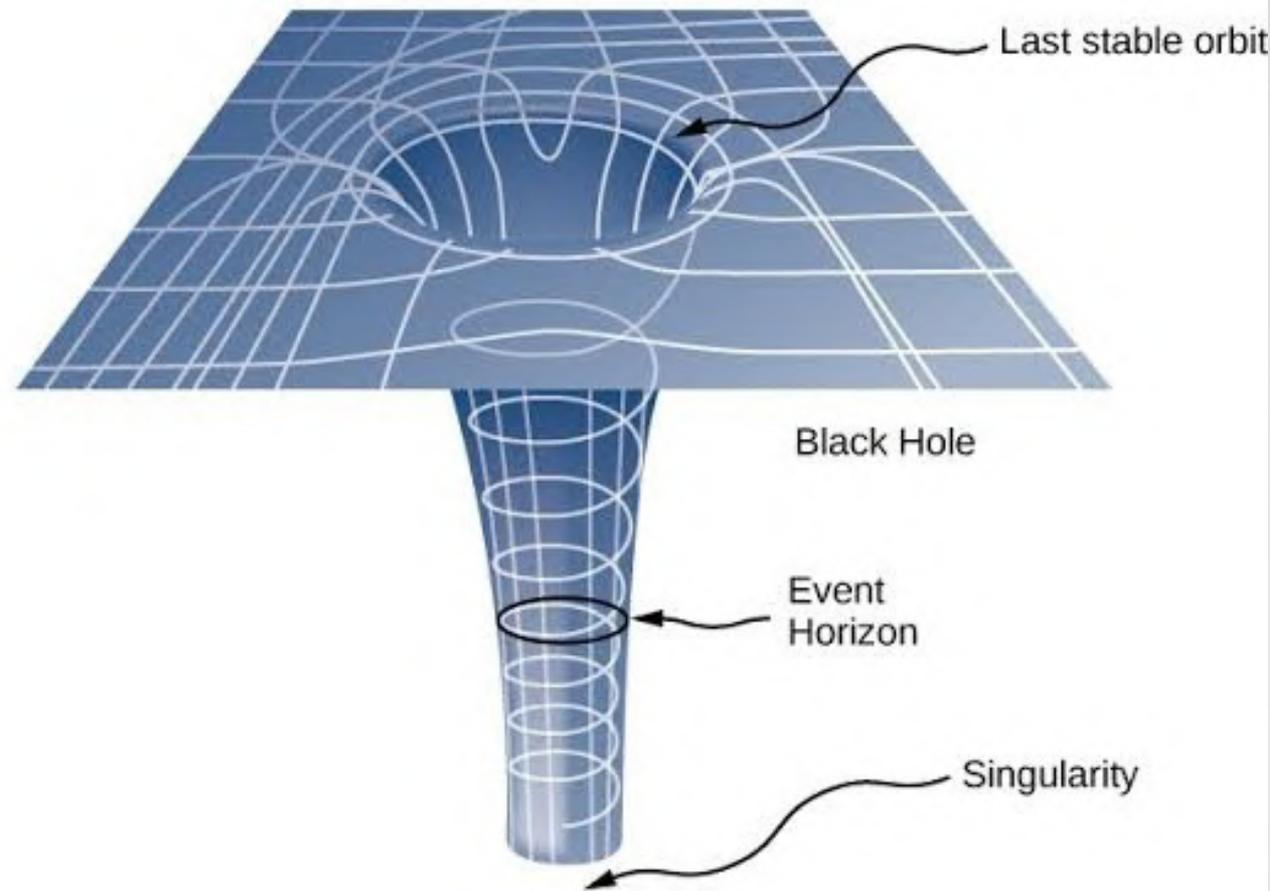
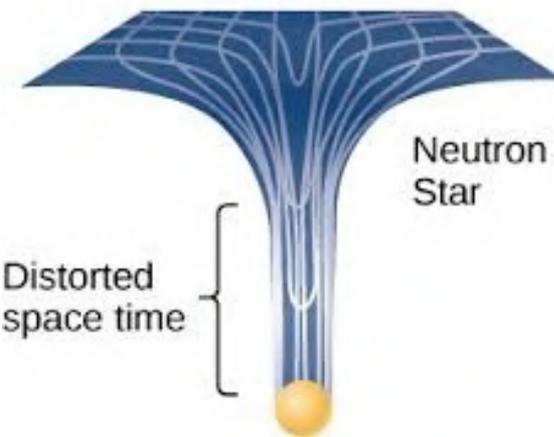
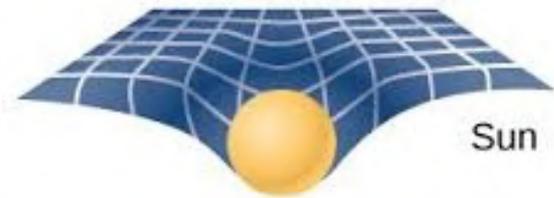
La gravité est une force "magique" instantanée qui agit réciproquement sur 2 corps massifs.



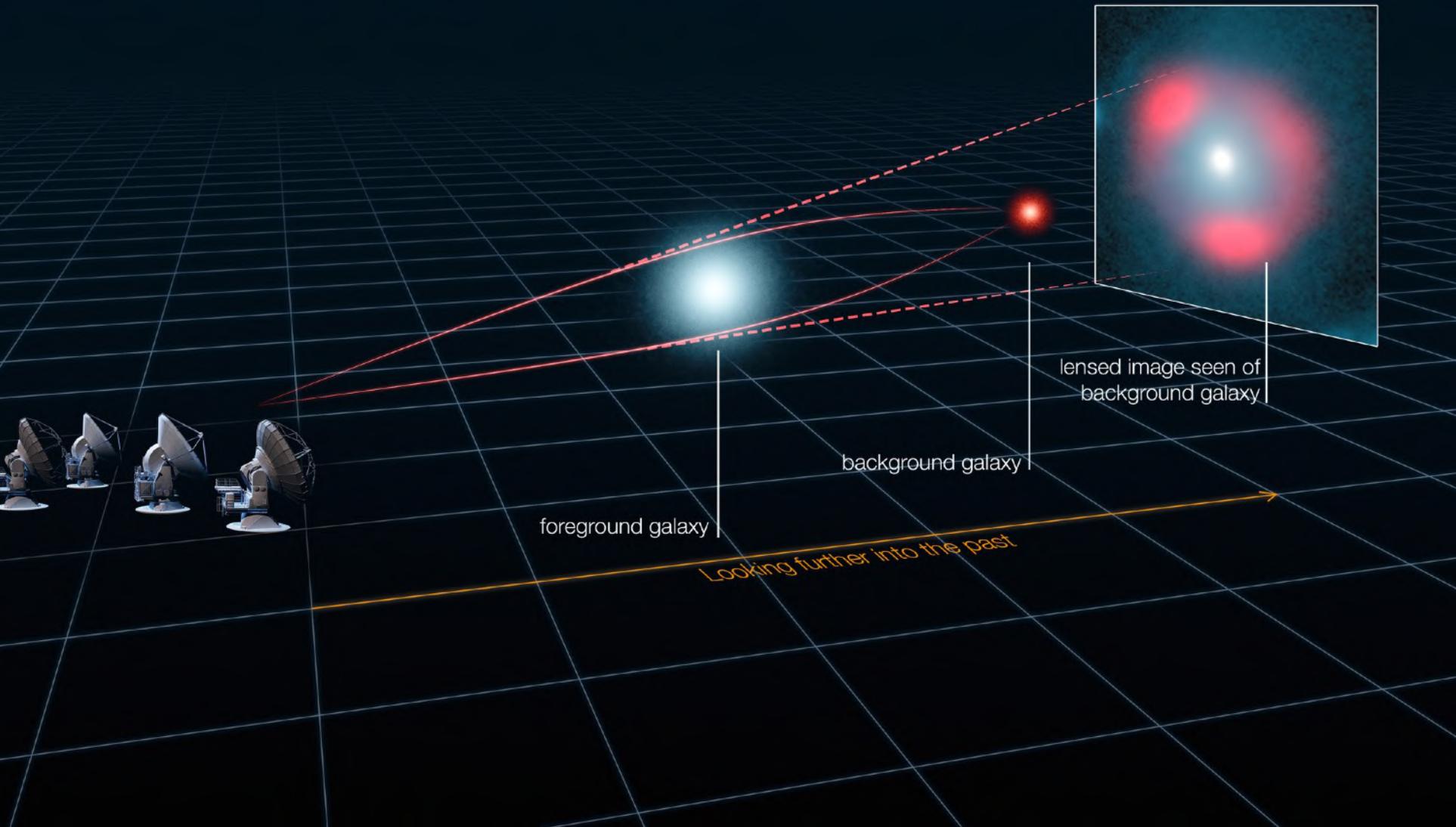
La gravité est une distorsion de l'espace-temps causé par un corps massif qui "attire" (le long de géodésiques) **tout** autre corps (massif ou non).



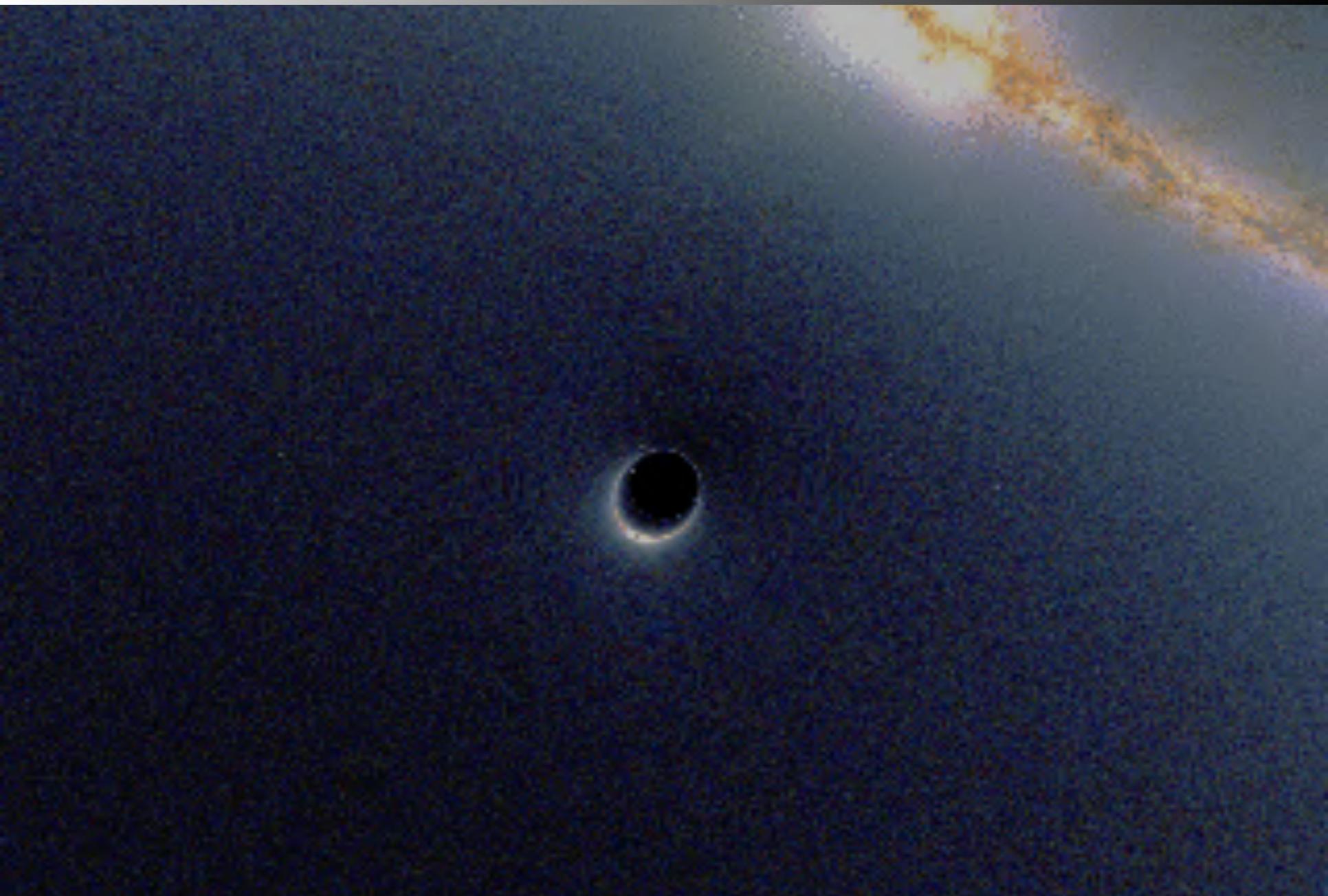
Relativité générale



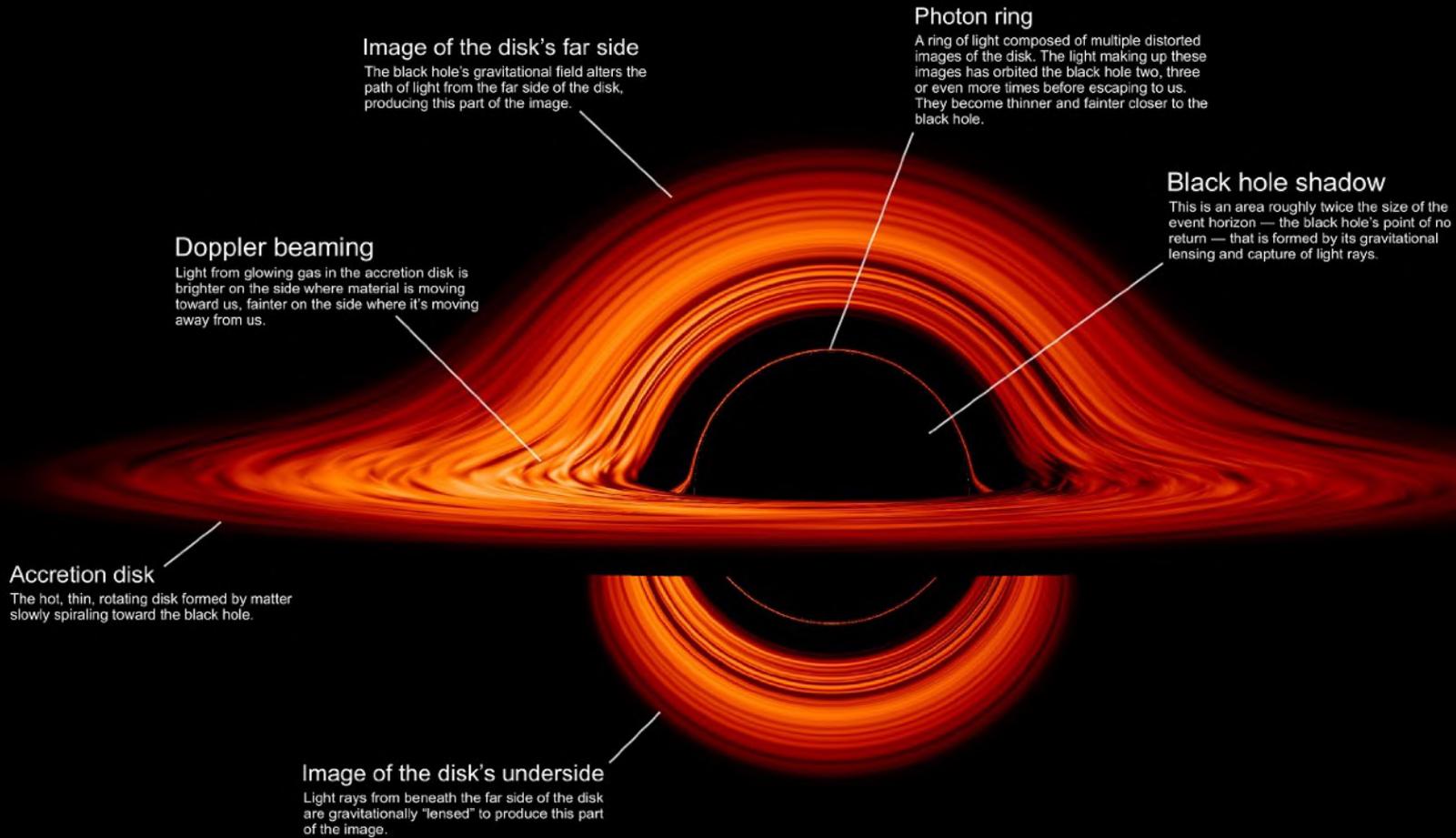
Relativité générale



Relativité générale



Relativité générale



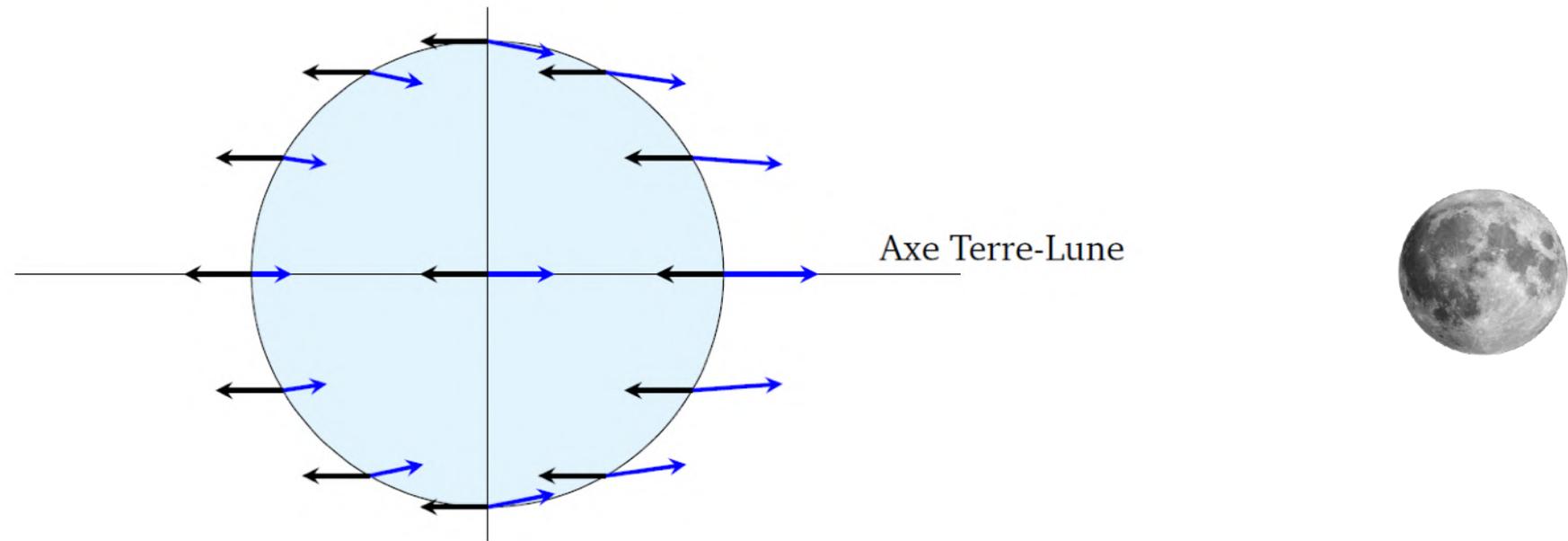
Spaghettification



Axe Terre-Lune

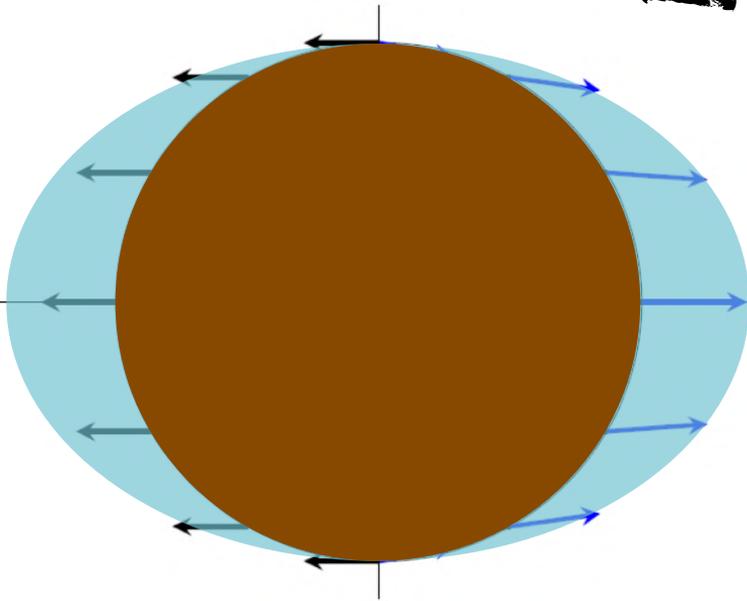


Spaghettification



Spaghettification

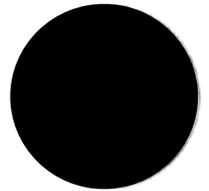
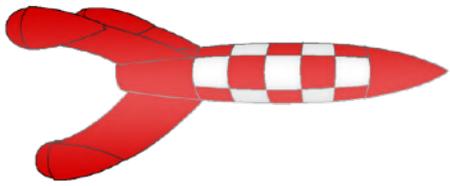
Effet de marée



Axe Terre-Lune



Spaghettification



Trou noir stellaire

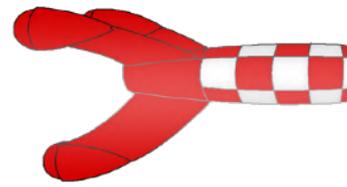
Spaghettification



Spaghettification



Spaghettification

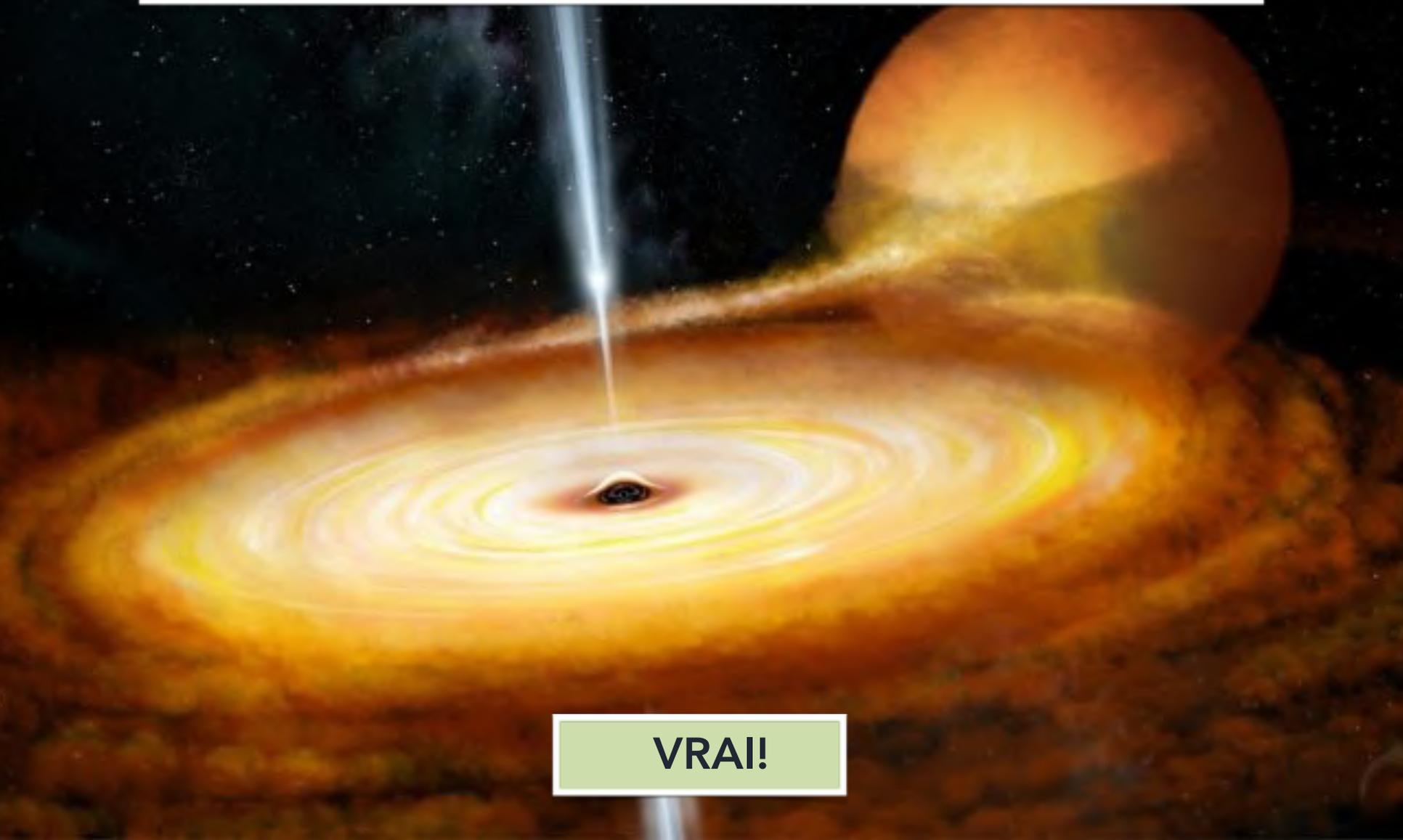


Trou noir
supermassif



Vrai ou faux?

4) Les trous noirs peuvent disparaître.



VRAI!

Évaporation



(vide)

Évaporation



(vide)

Évaporation



(vide)

Évaporation

Le trou noir peut donc être vu comme émettant des particules (photons, etc.)...

...donc émettant de l'énergie...

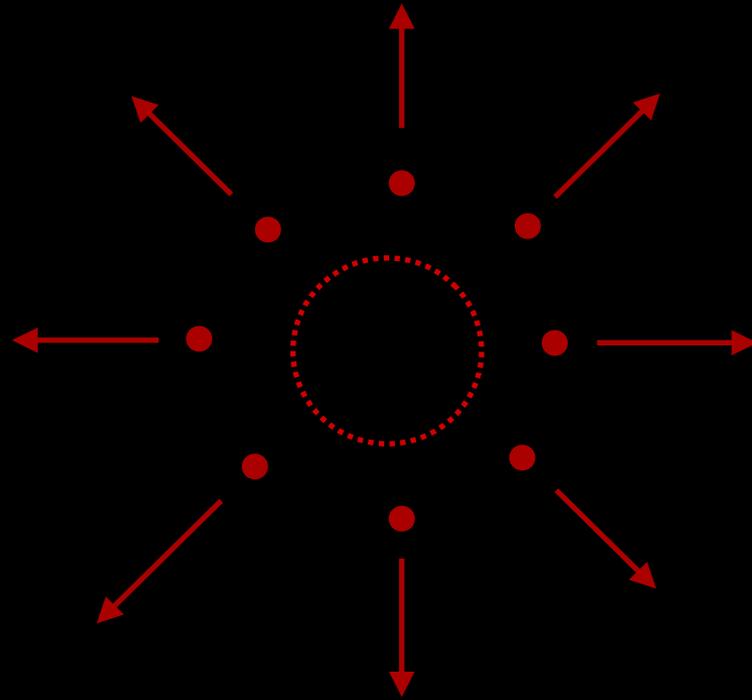
...donc perdant de la masse!



L'effet est d'autant plus efficace que le trou noir est petit!

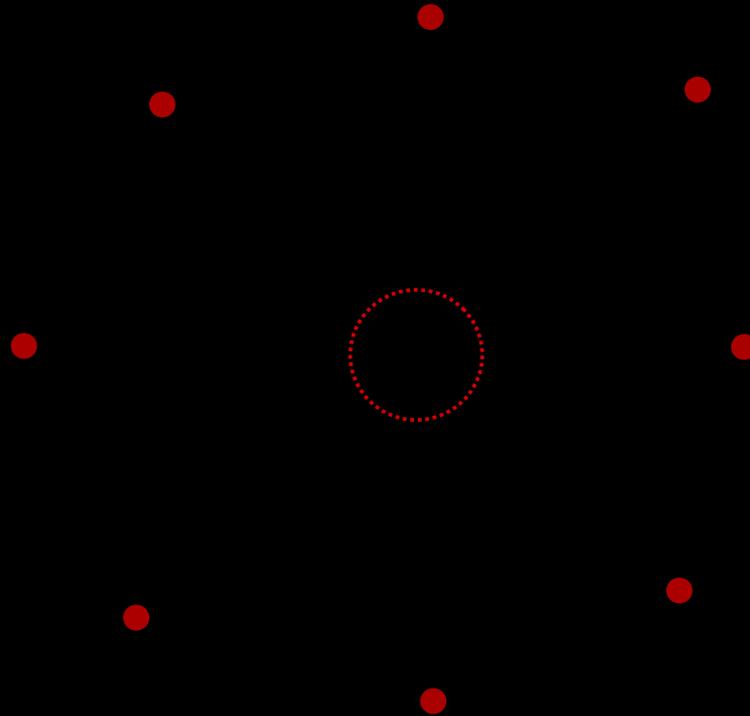
(vide)

Évaporation



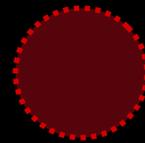
(vide)

Évaporation



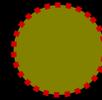
(vide)

Évaporation



(vide)

Évaporation



(vide)

Évaporation



(vide)

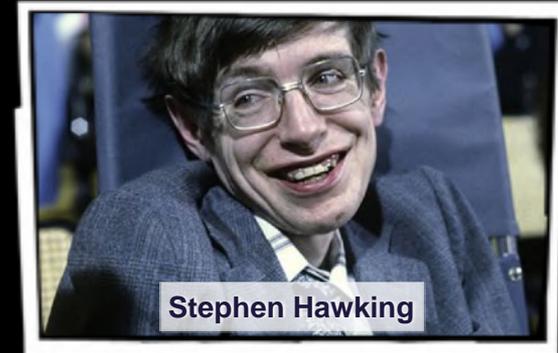
Évaporation

(vide)

Évaporation

Rayonnement de Hawking

(les (petits) trous noirs
"émettent" de la lumière!!)

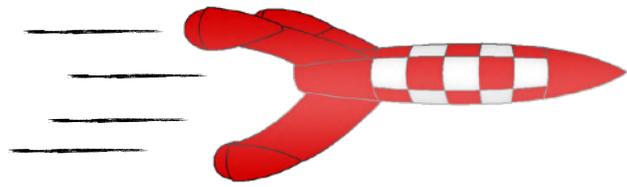


"Température" associée au trou noir

(plus un trou noir est petit, plus il est
"chaud", donc "bleu")

(vide)

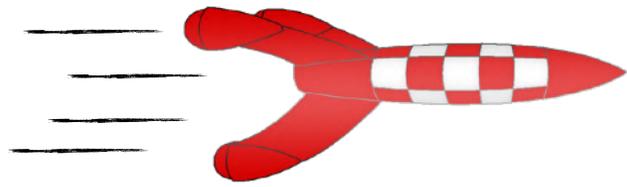
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



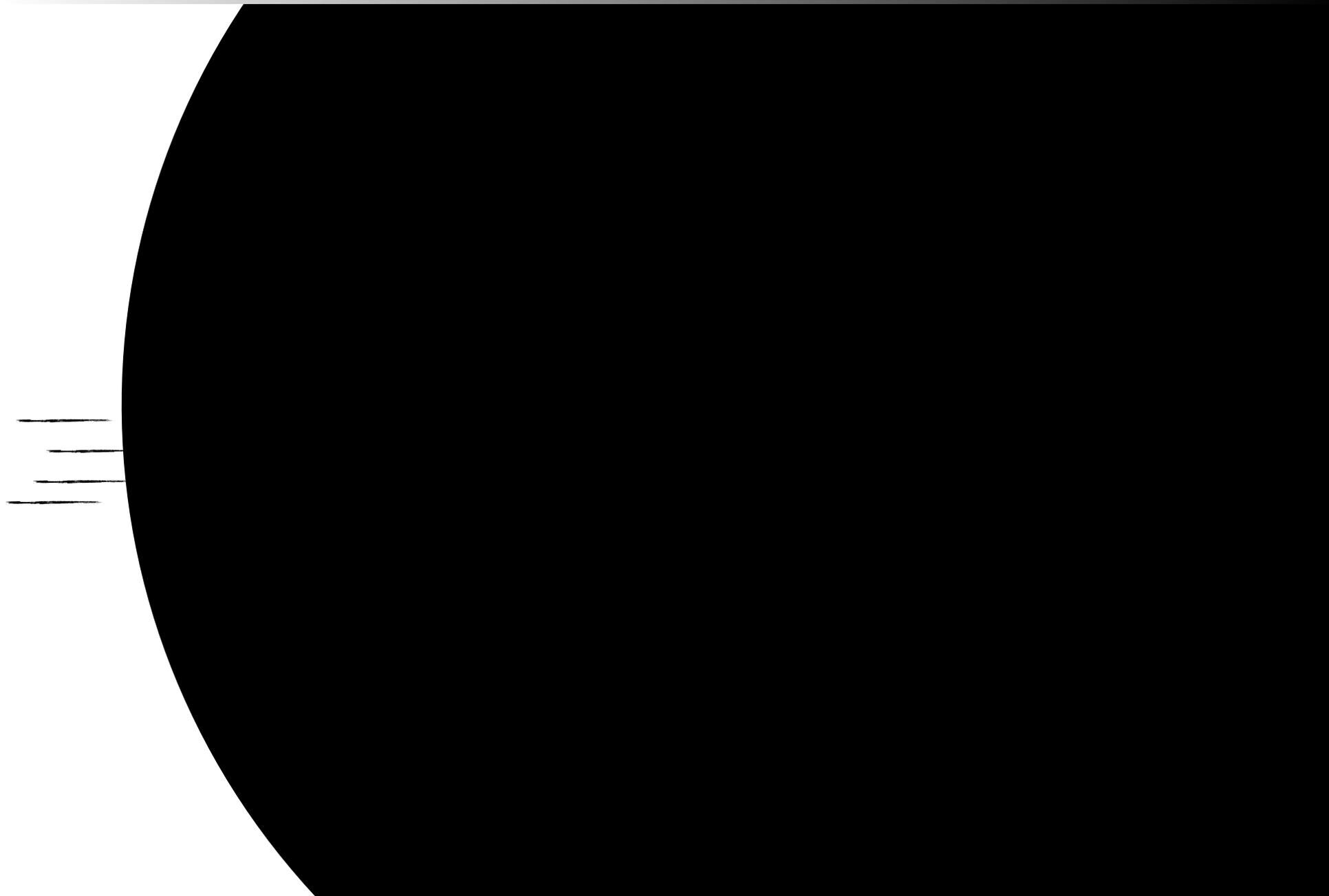
Trou noir
supermassif



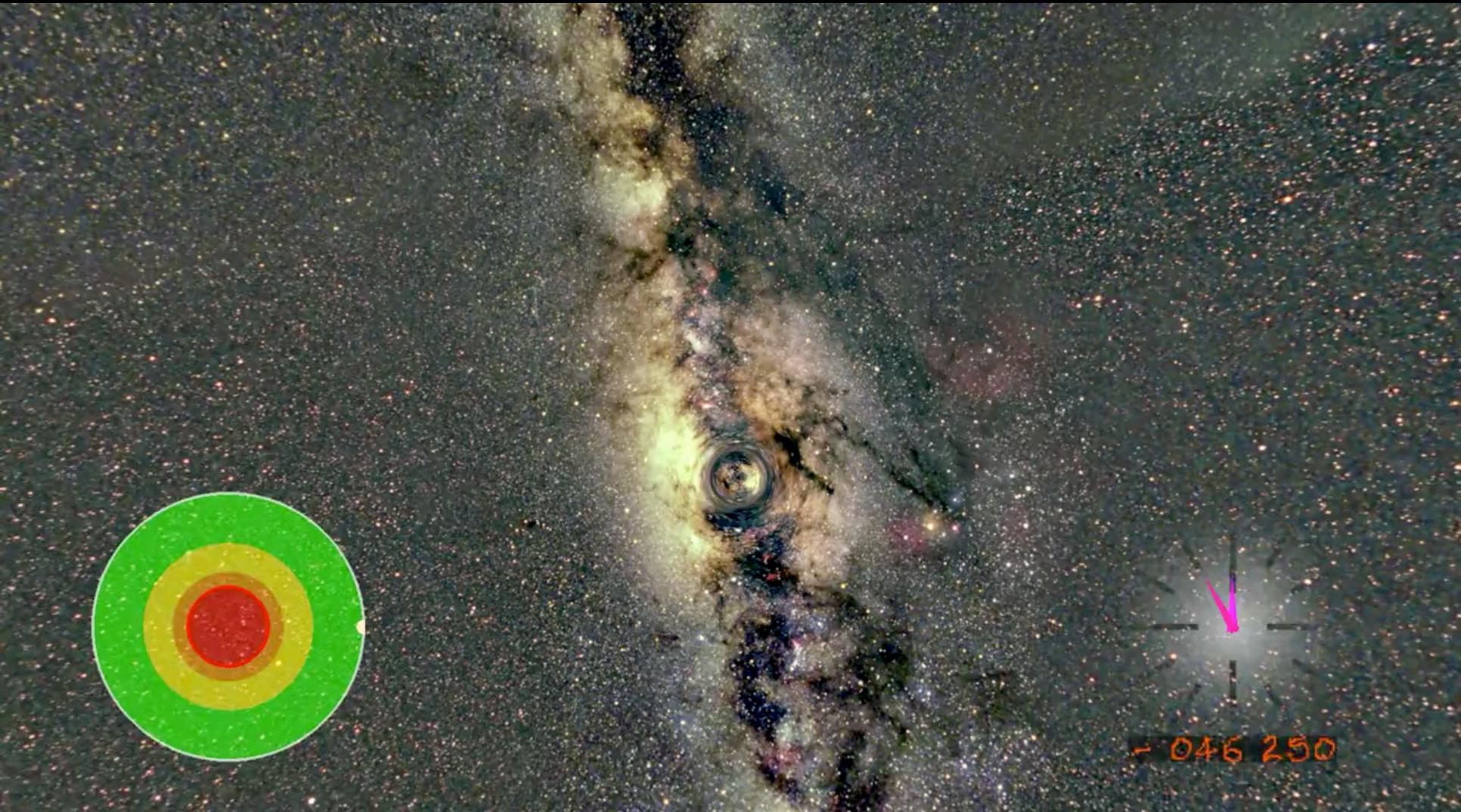
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



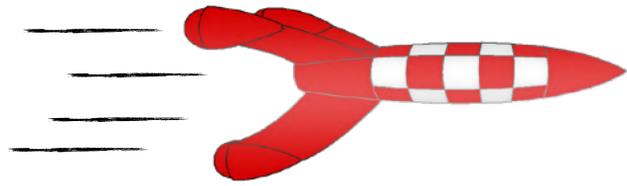
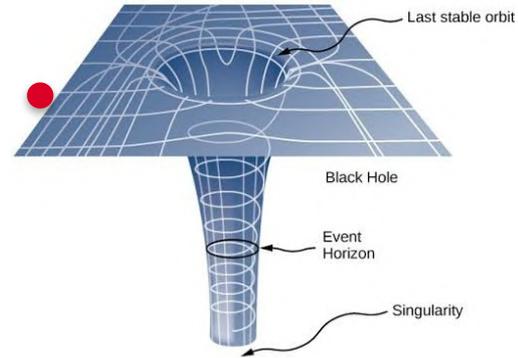
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



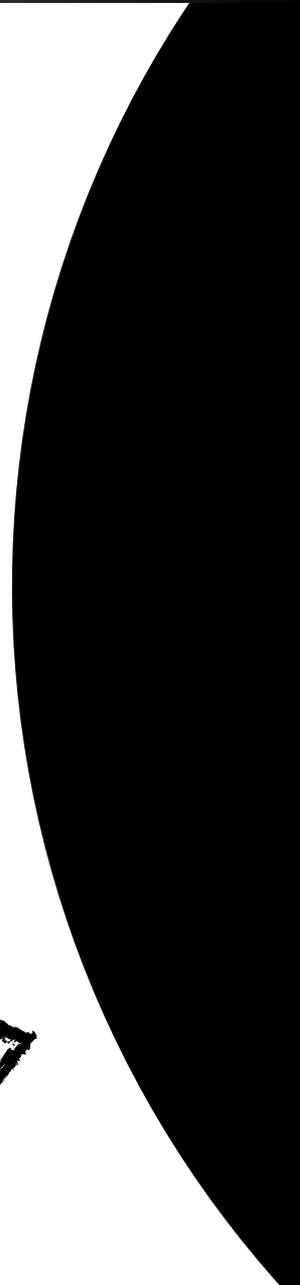
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



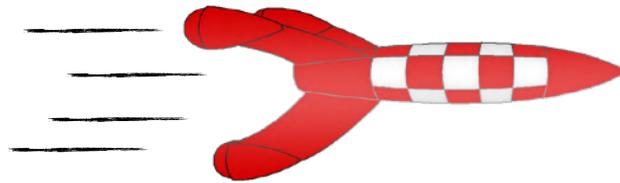
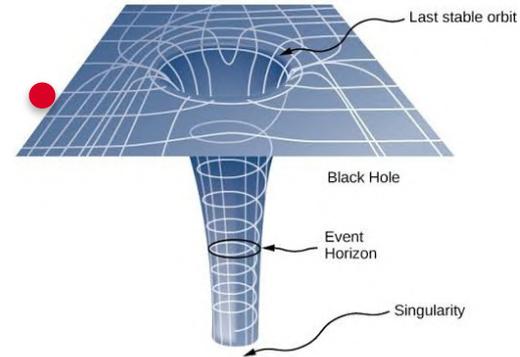
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



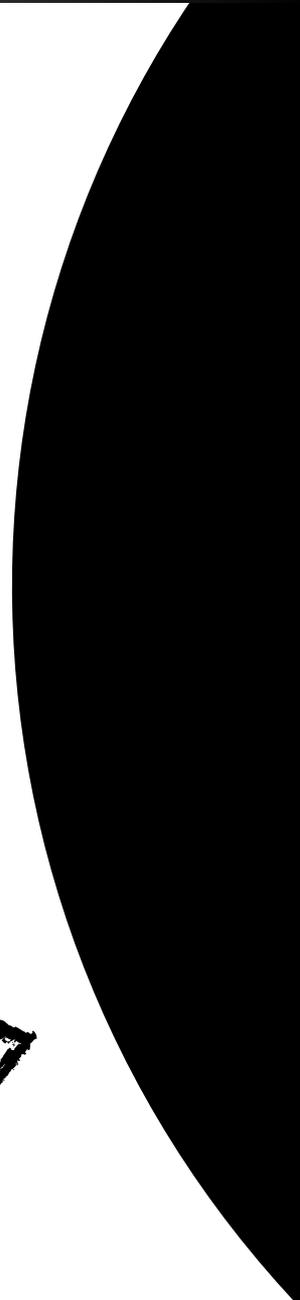
Trou noir
supermassif



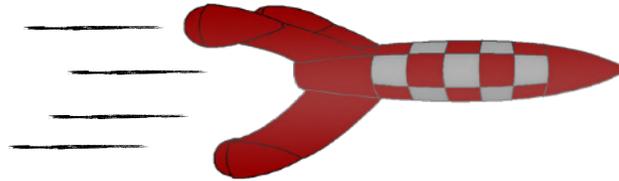
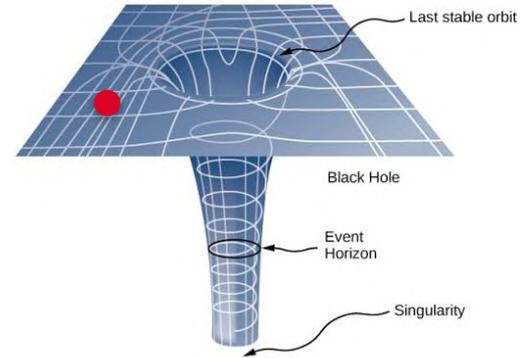
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



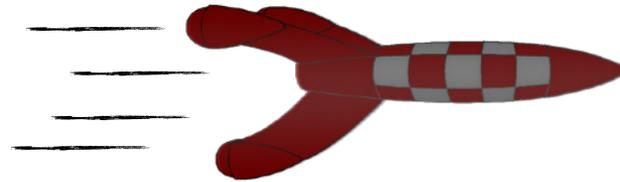
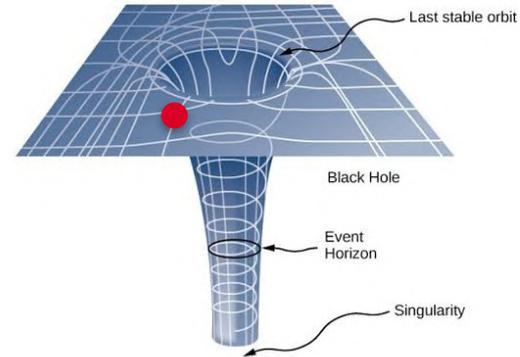
Trou noir
supermassif



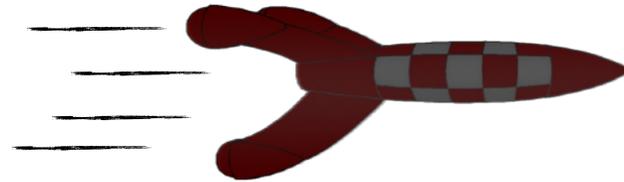
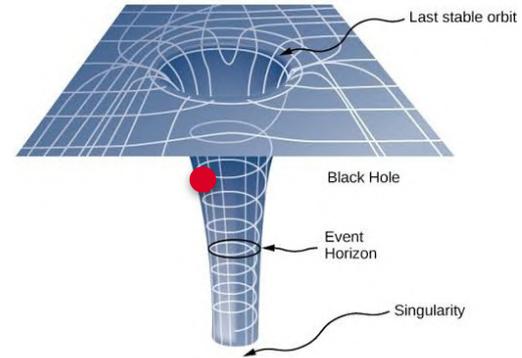
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



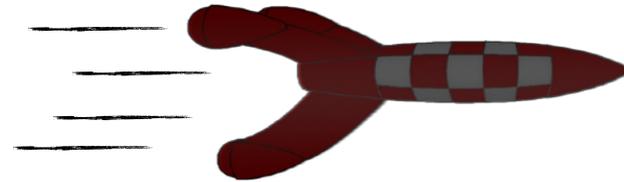
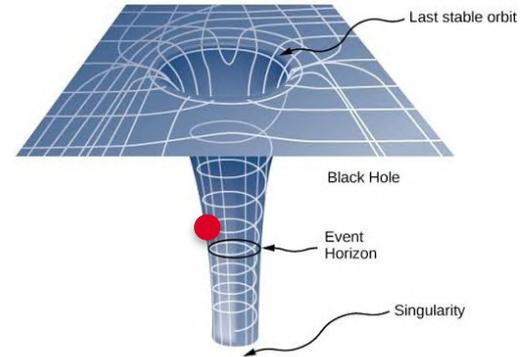
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



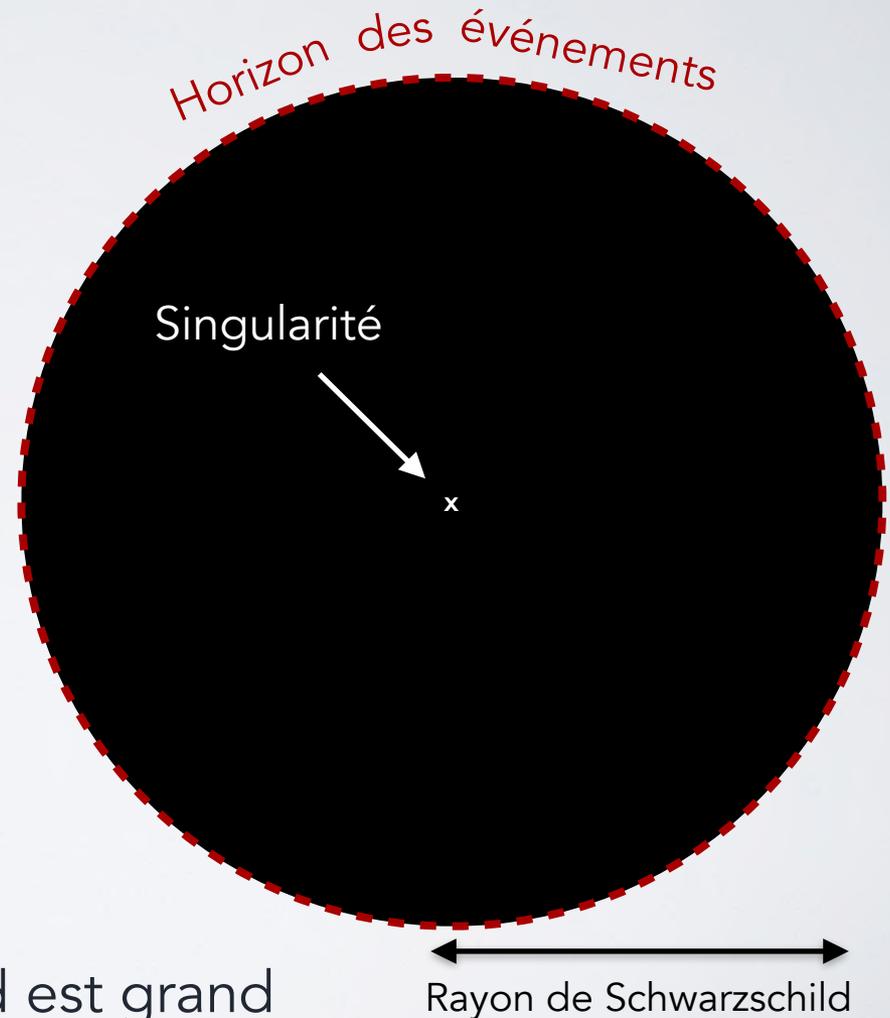
Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



Singularité

Rayon de Schwarzschild:

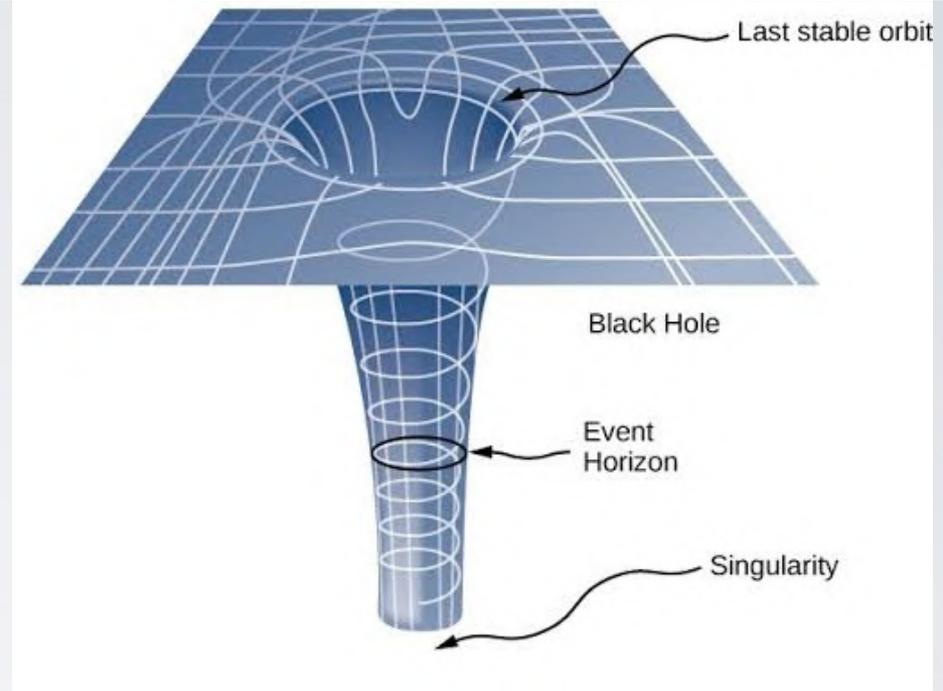
$$R_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$$



Plus un trou noir est massif,
plus son rayon de Schwarzschild est grand

Singularité

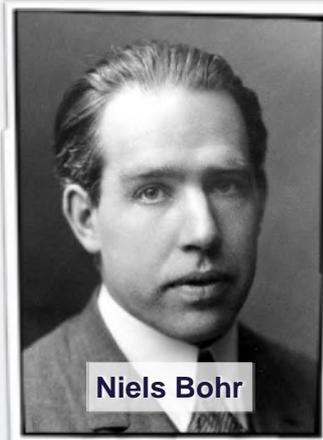
- Fait intervenir:
 - Relativité générale
 - Mécanique quantique
- Problème: les deux sont (pour l'instant) **inconciliables!**



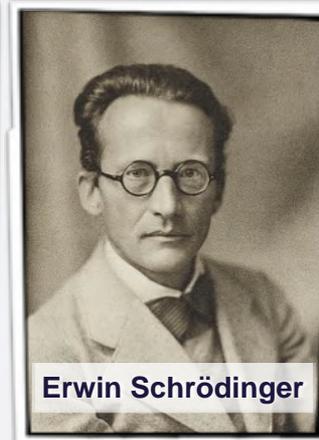
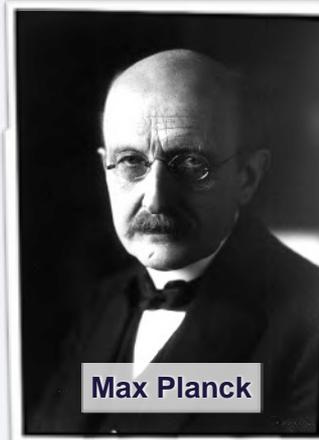
Relativité générale



VS



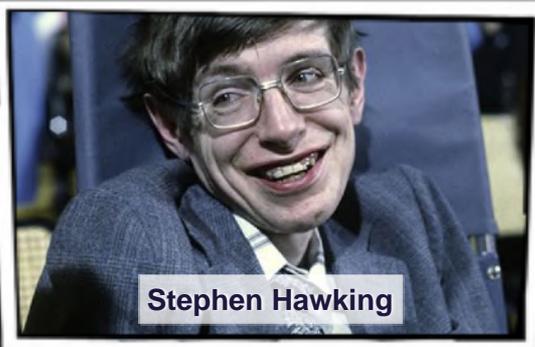
Mécanique quantique



Singularité

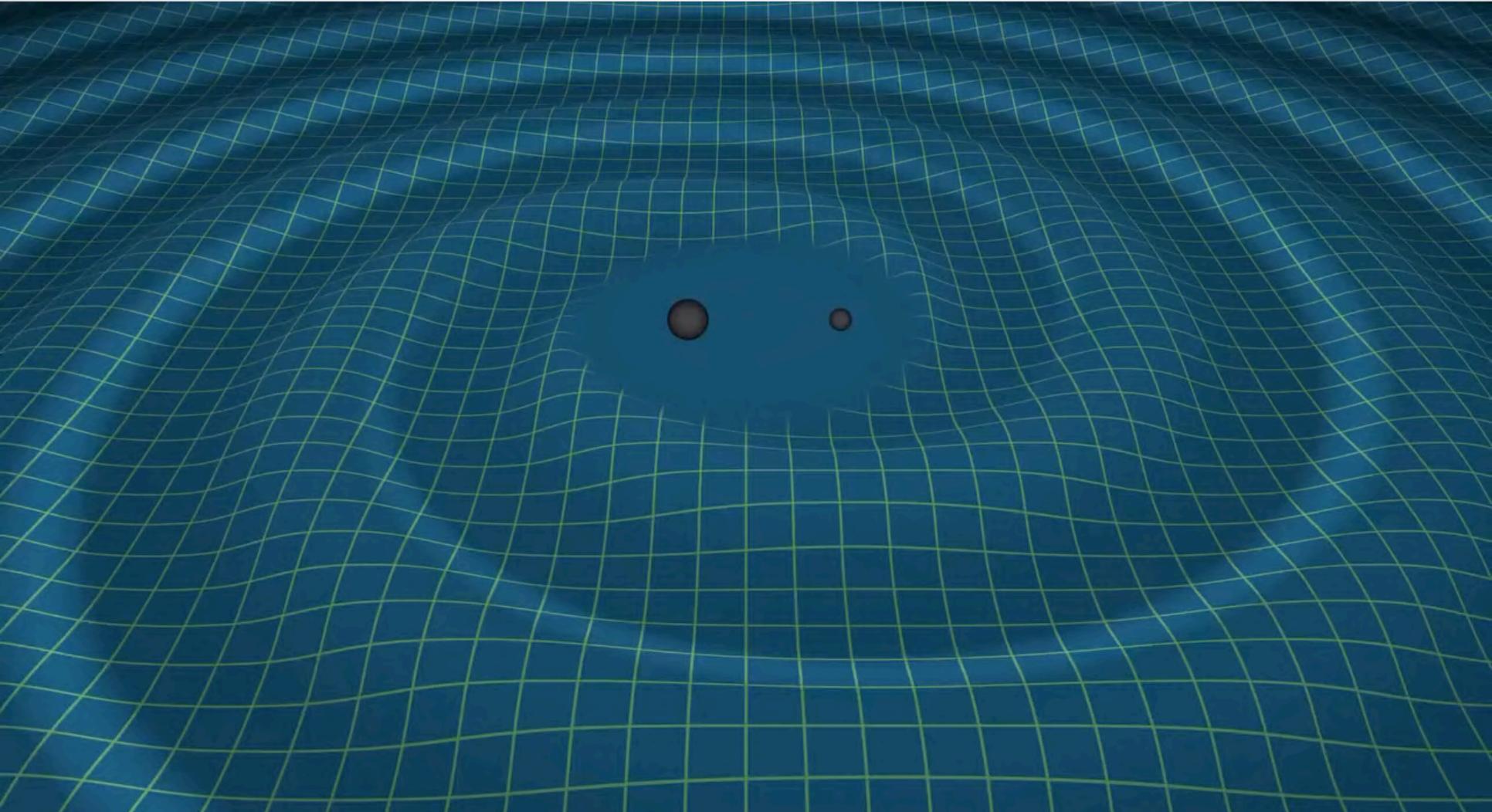
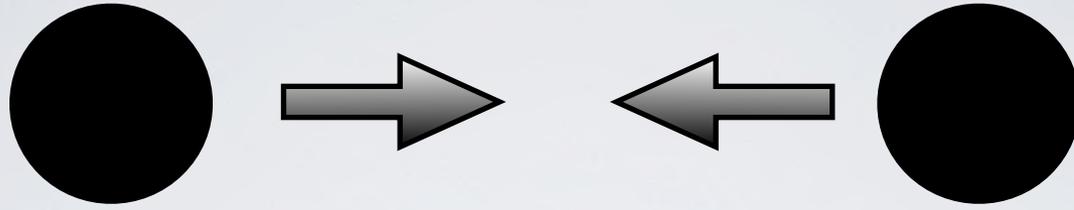
En théorie, il pourrait exister des singularités nues
(sans horizon des événements)!

Mais cela suppose des trous noirs qui tournent très
(trop?) vite...

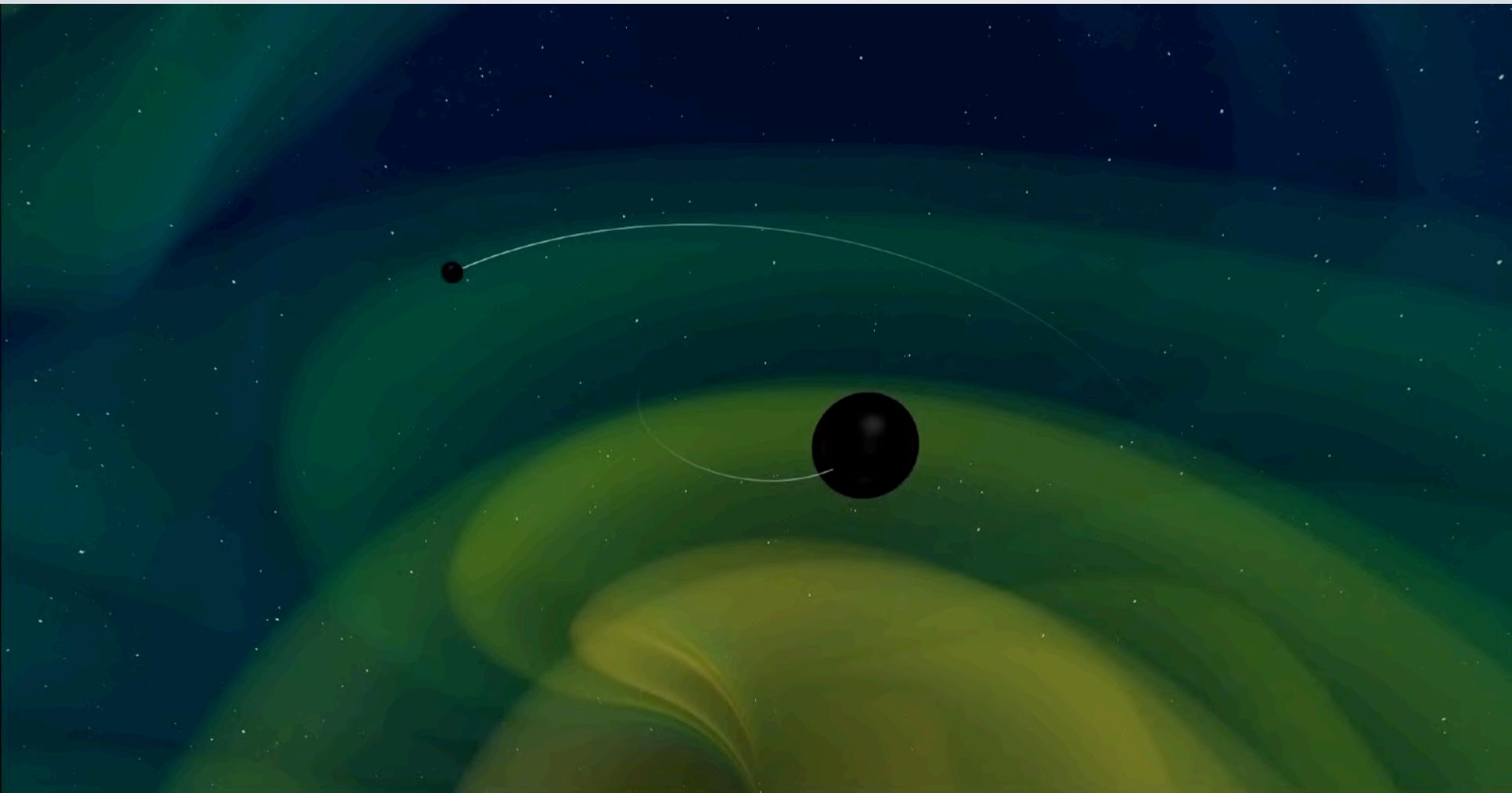
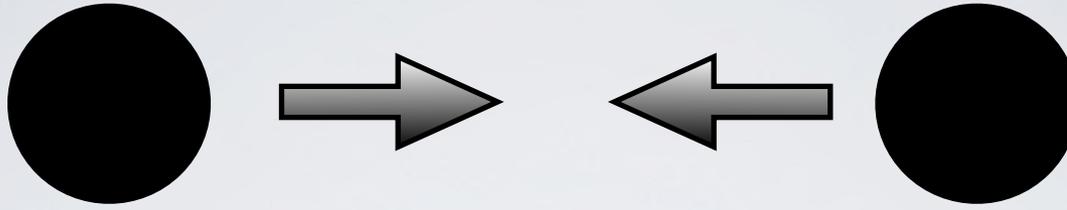


Stephen Hawking

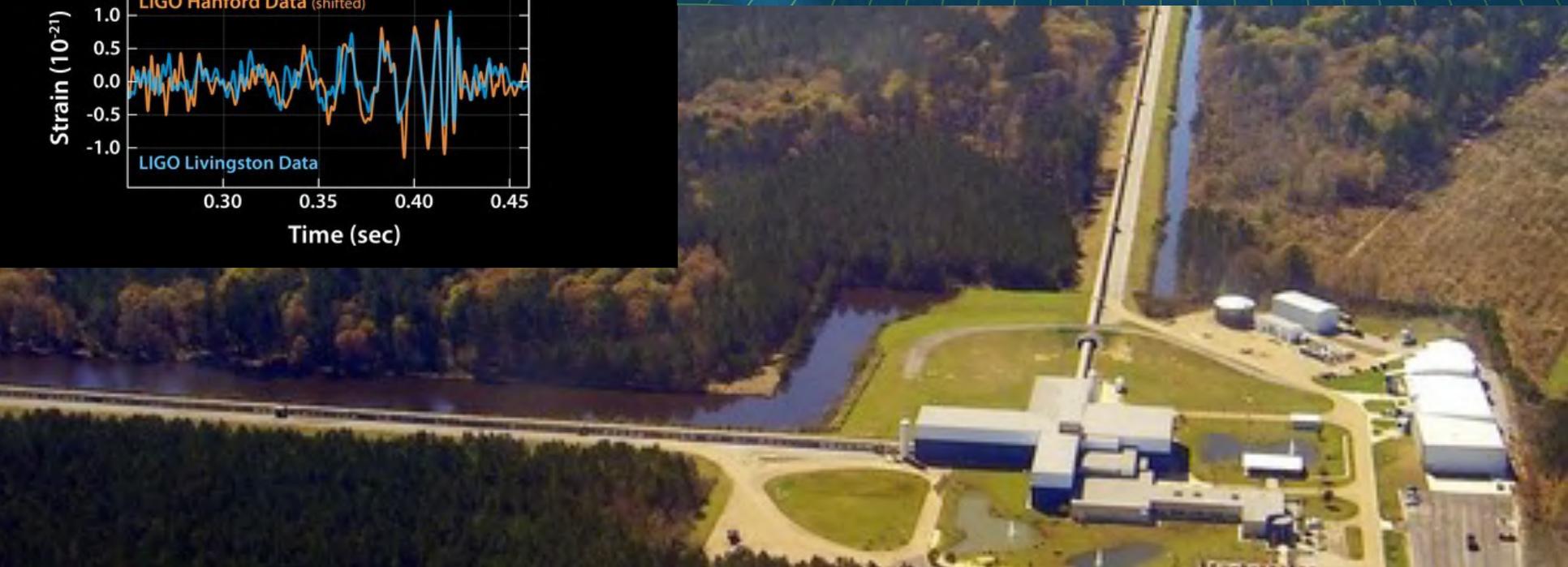
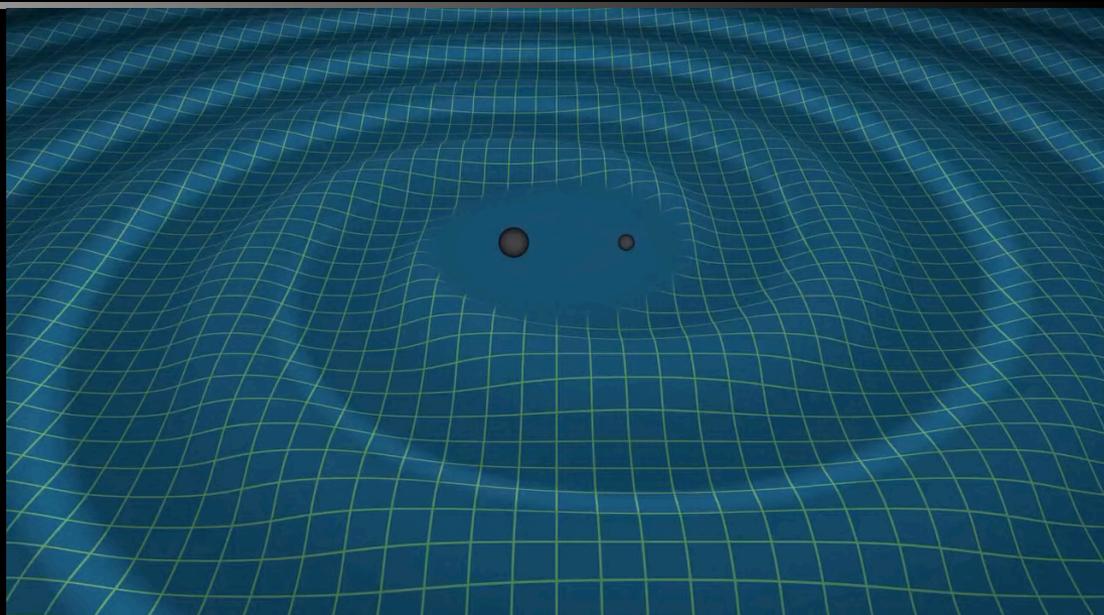
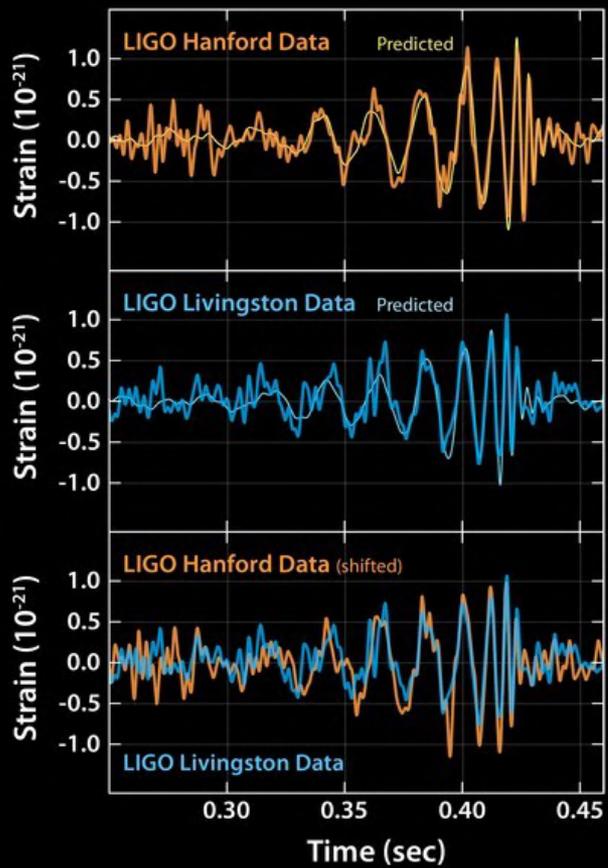
Fusion de trous noirs



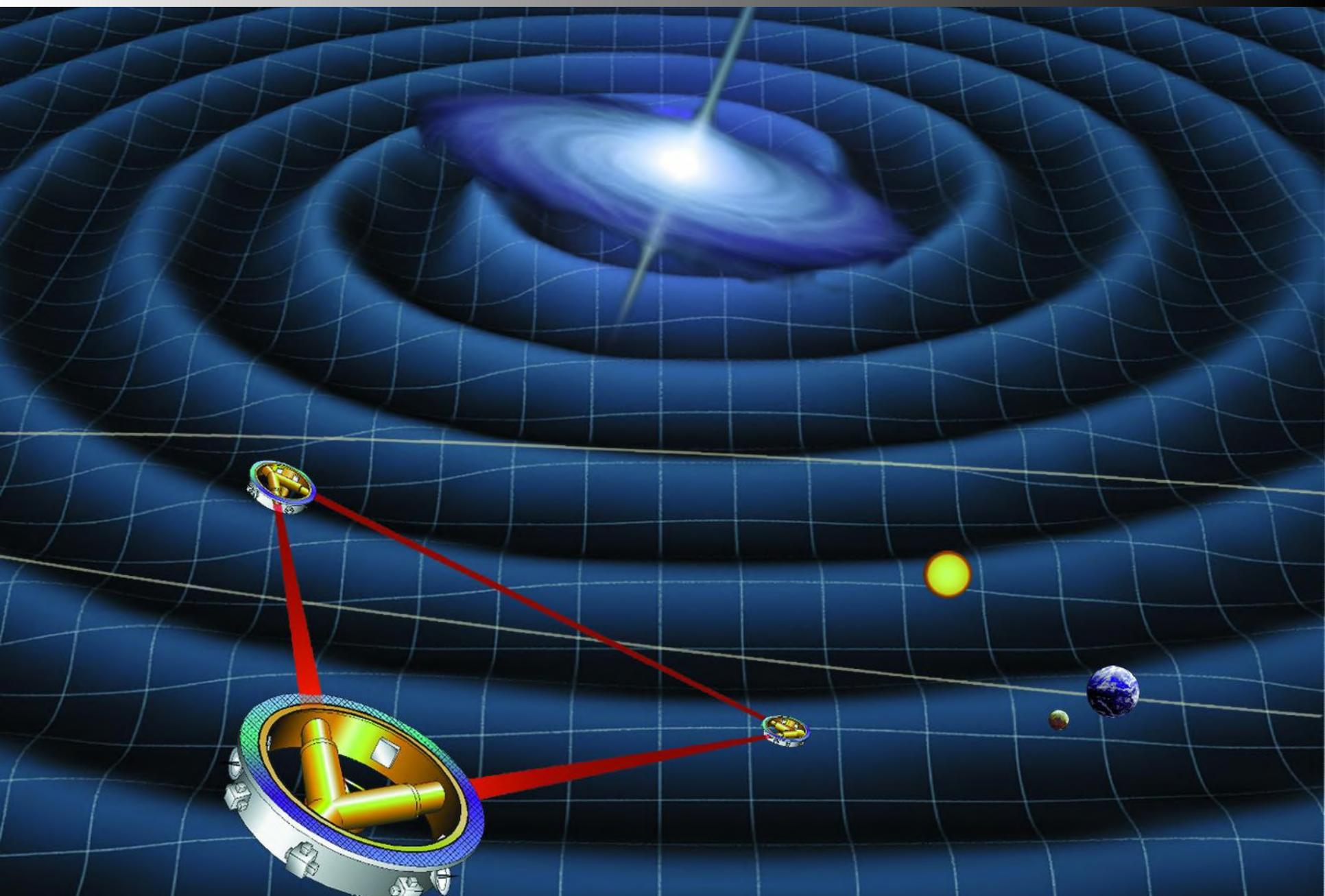
Fusion de trous noirs



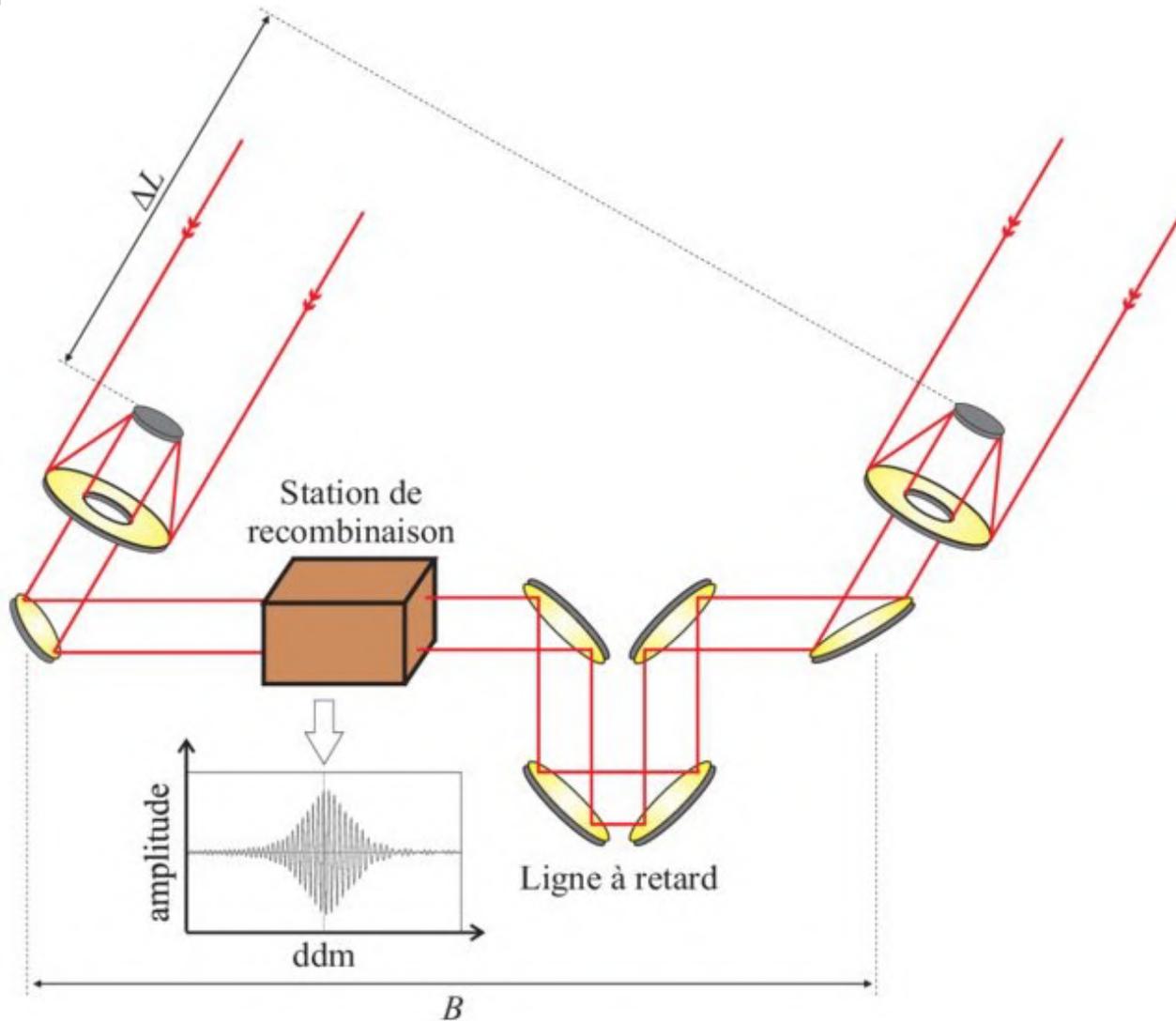
LIGO



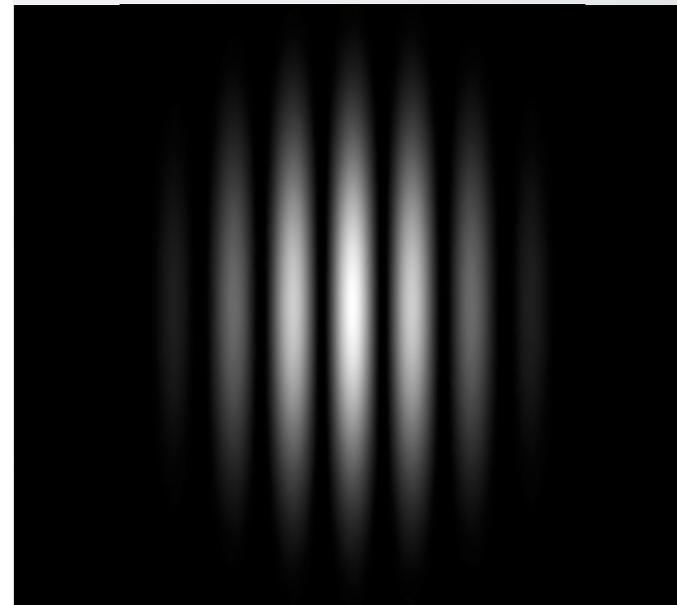
LISA



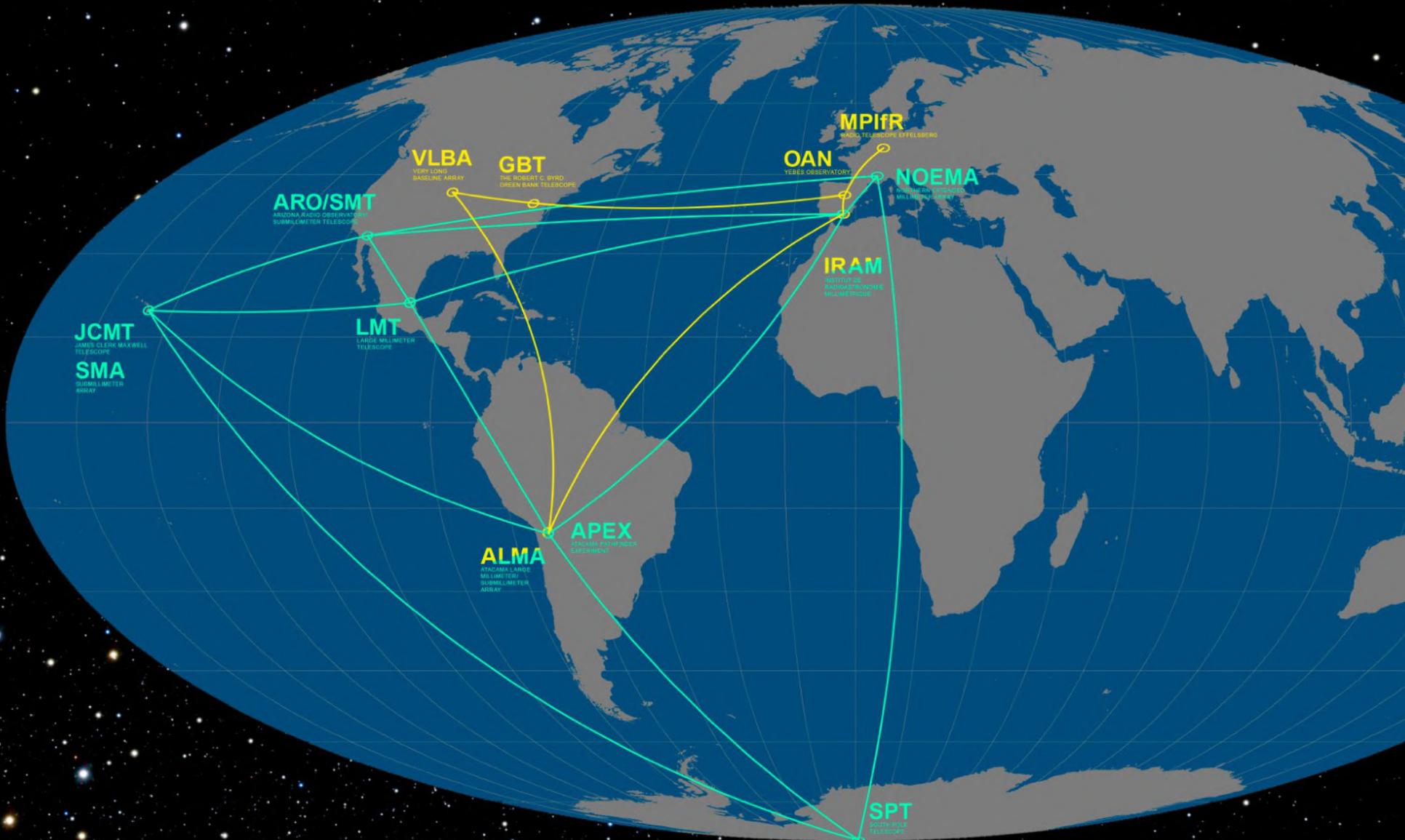
L'Event Horizon Telescope et M87



- Connecter 2 télescope par interférométrie d'une distance B , c'est comme avoir un télescope de taille B !
- Plus il y a de télescopes connectés, plus l'image devient précise...



L'Event Horizon Telescope et M87



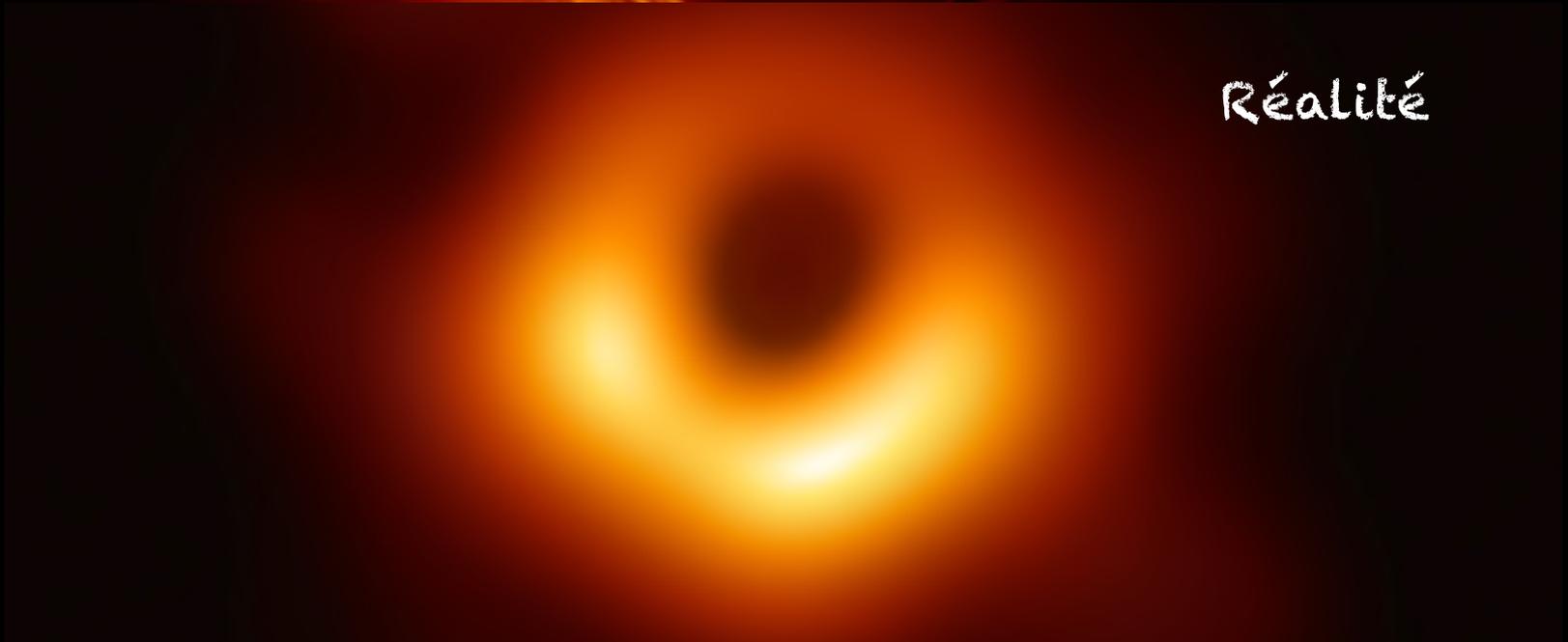
M87



L'Event Horizon Telescope et M87

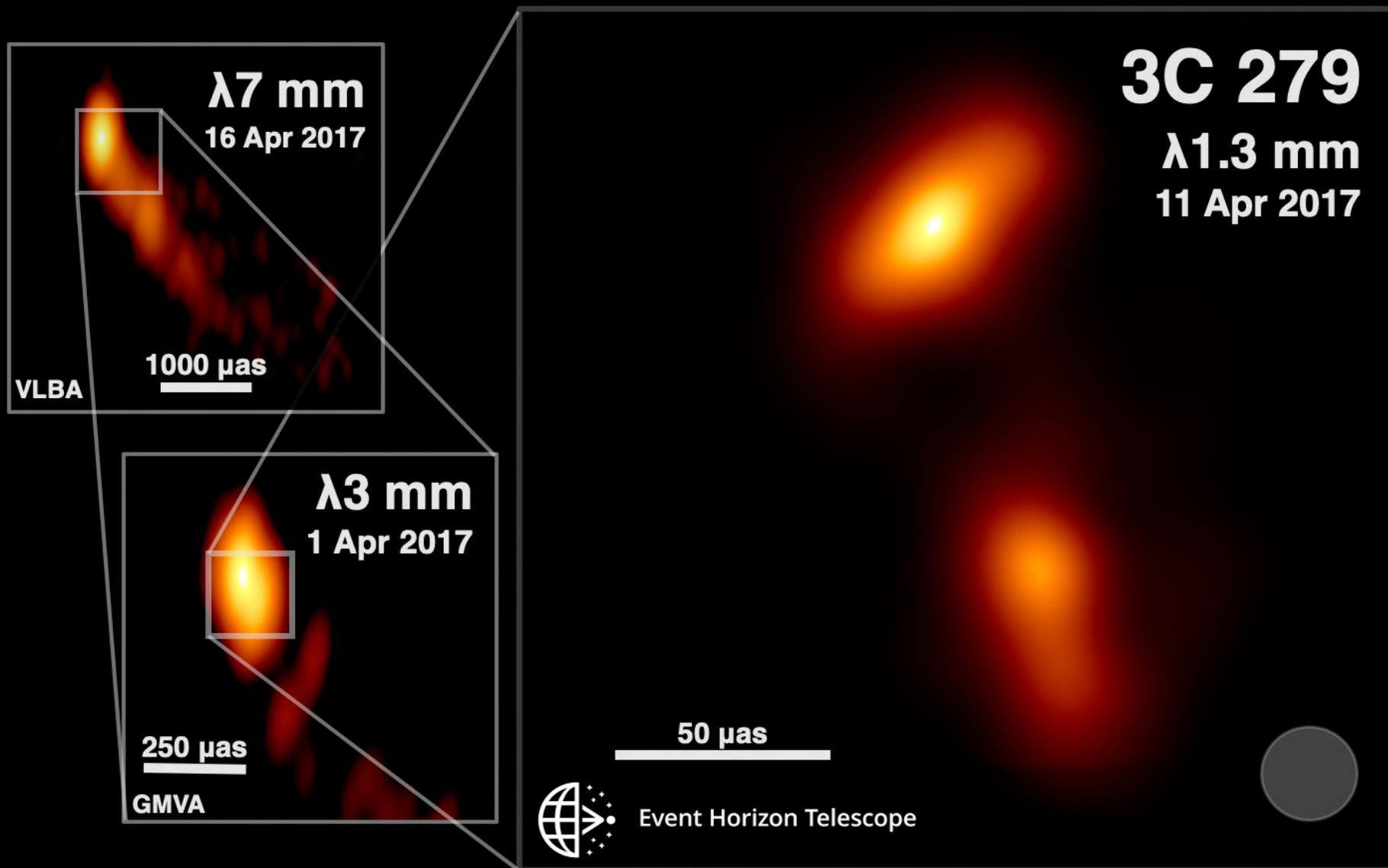


Simulations

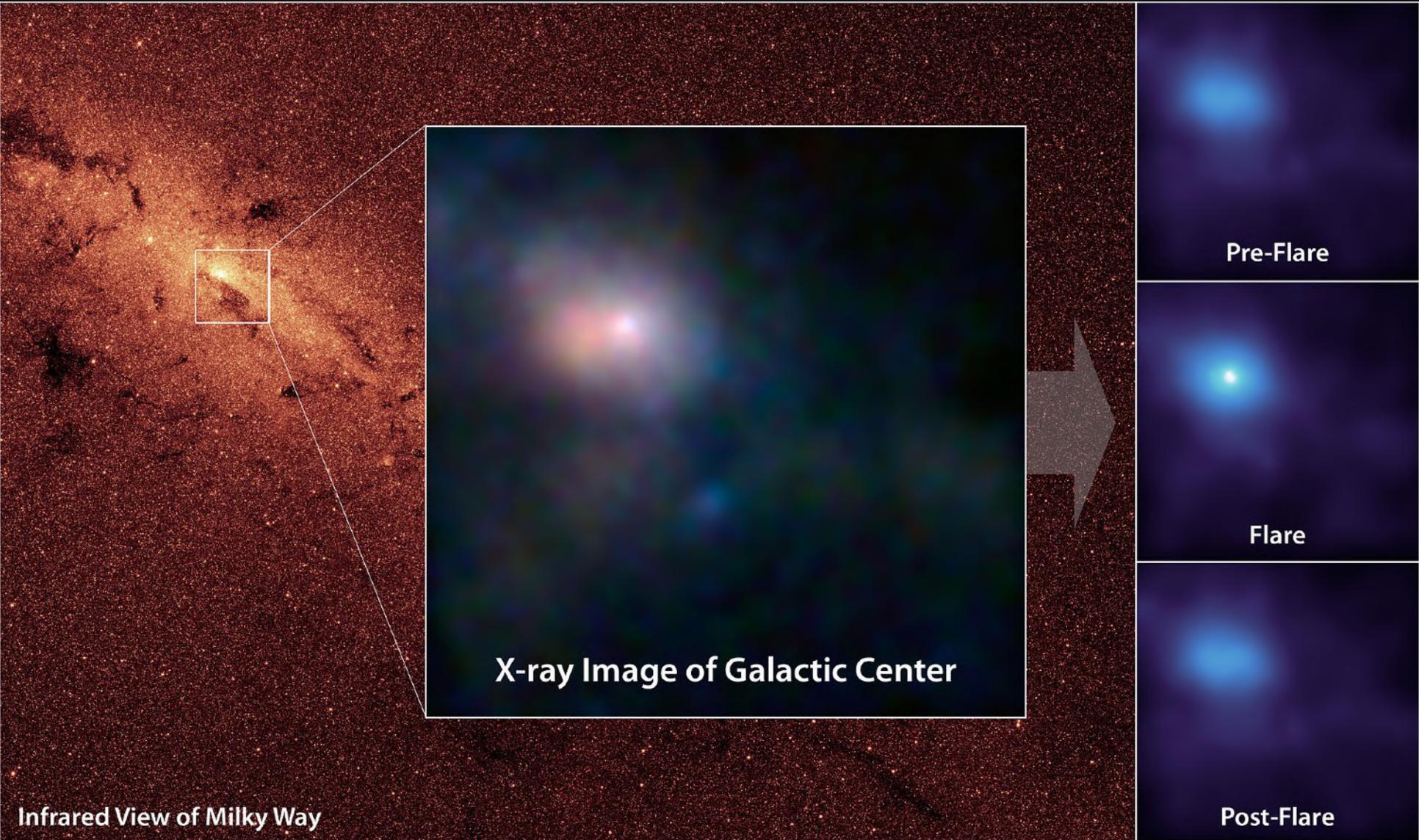


Réalité

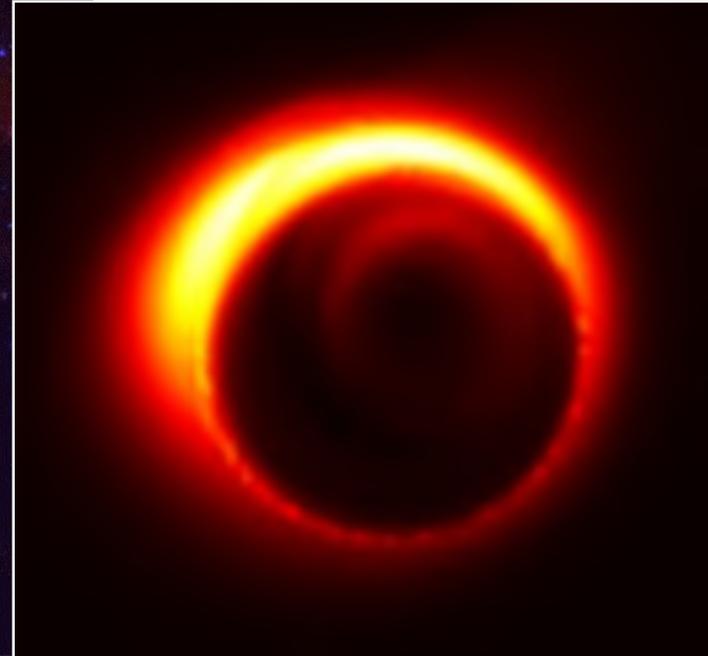
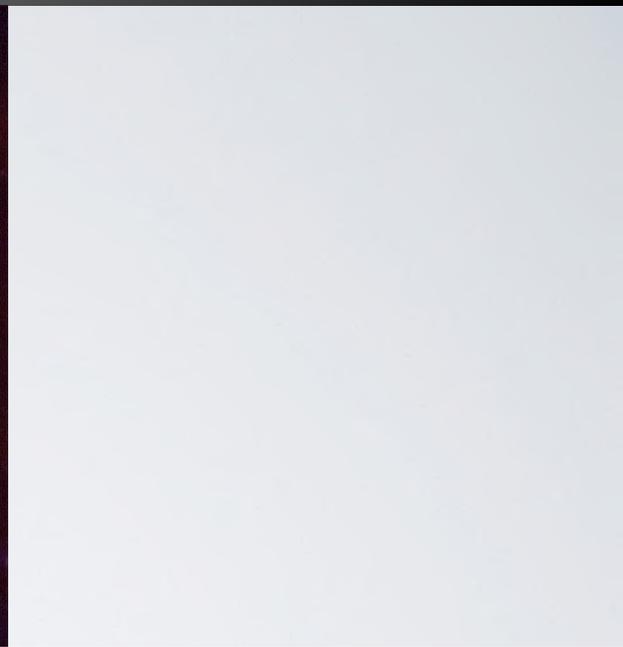
L'Event Horizon Telescope et 3C 279



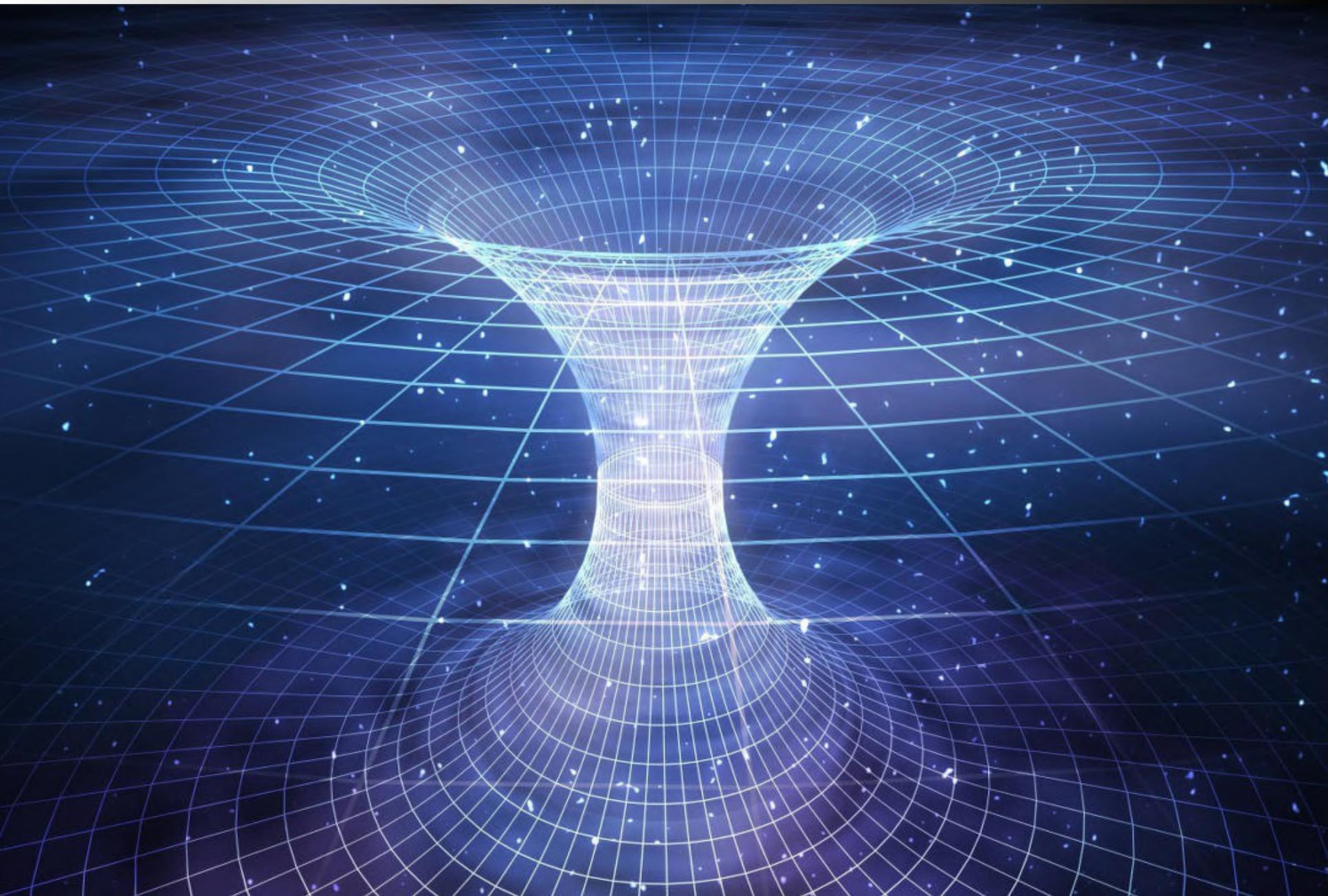
L'Event Horizon Telescope et Sgr A*



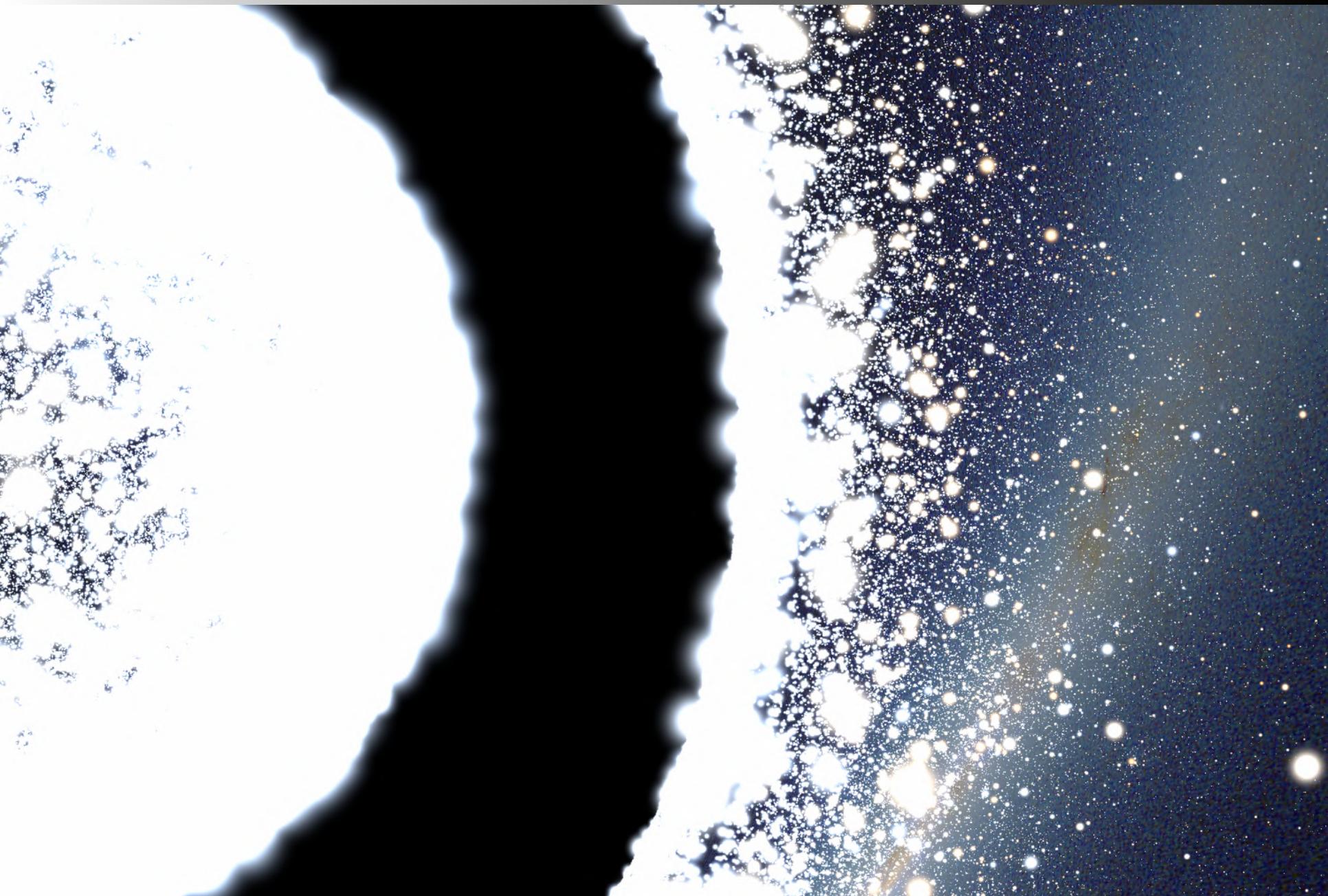
L'Event Horizon Telescope et Sgr A*



Trous de ver



Trous de ver



Trou blanc?



Conclusions

Les trous noirs...

- ...sont relativement fréquents
- ...se forment facilement (et presque trop rapidement!)
- ...n'aspirent pas tout
- ...peuvent rétrécir voir s'évaporer
- ...peuvent ouvrir la porte à d'autres univers
- ...mais il vaut mieux ne pas tomber dedans!