

Modave, août 2020

# Les trous noirs

François Mernier

# Sommaire

---

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

---

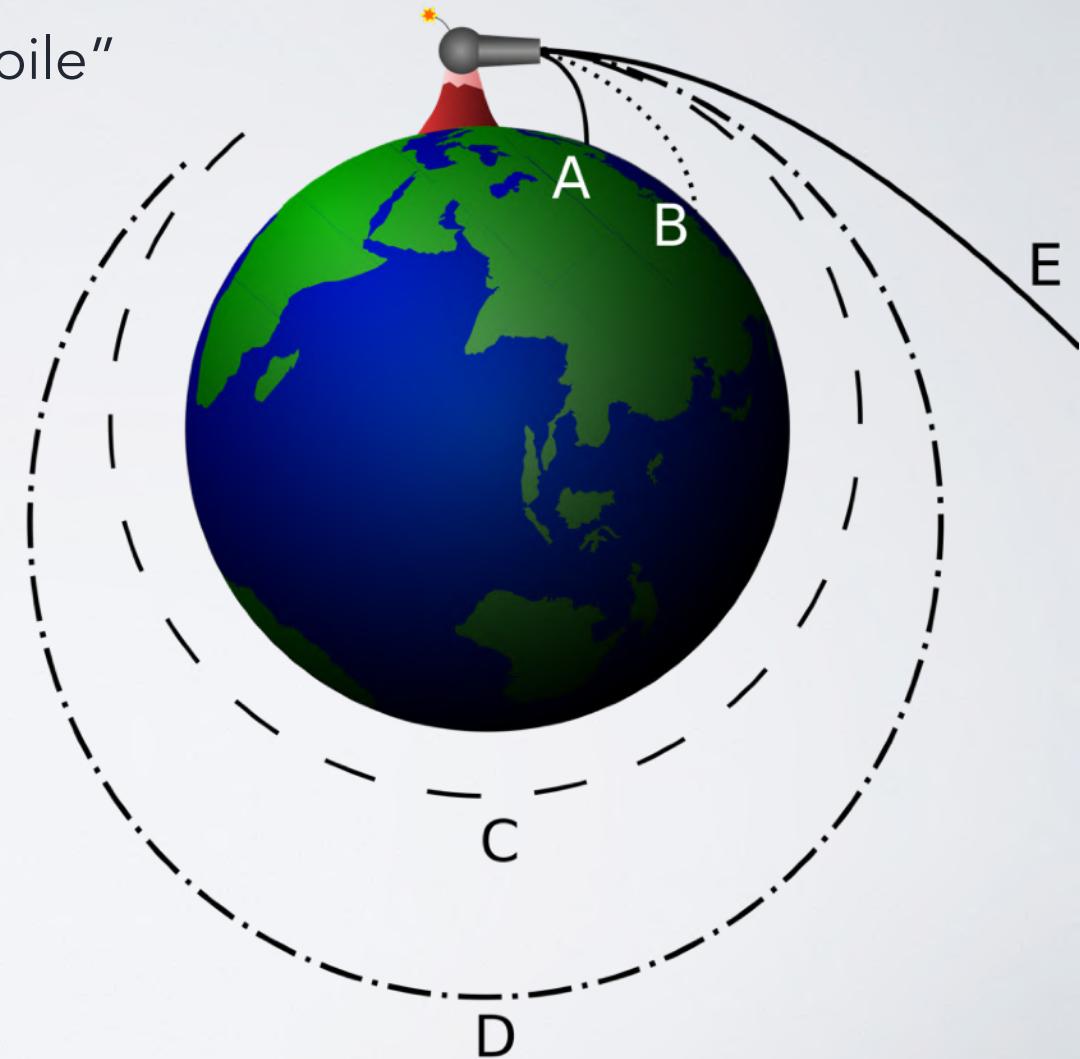
# 1. Introduction

---

# Vitesse de libération

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

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

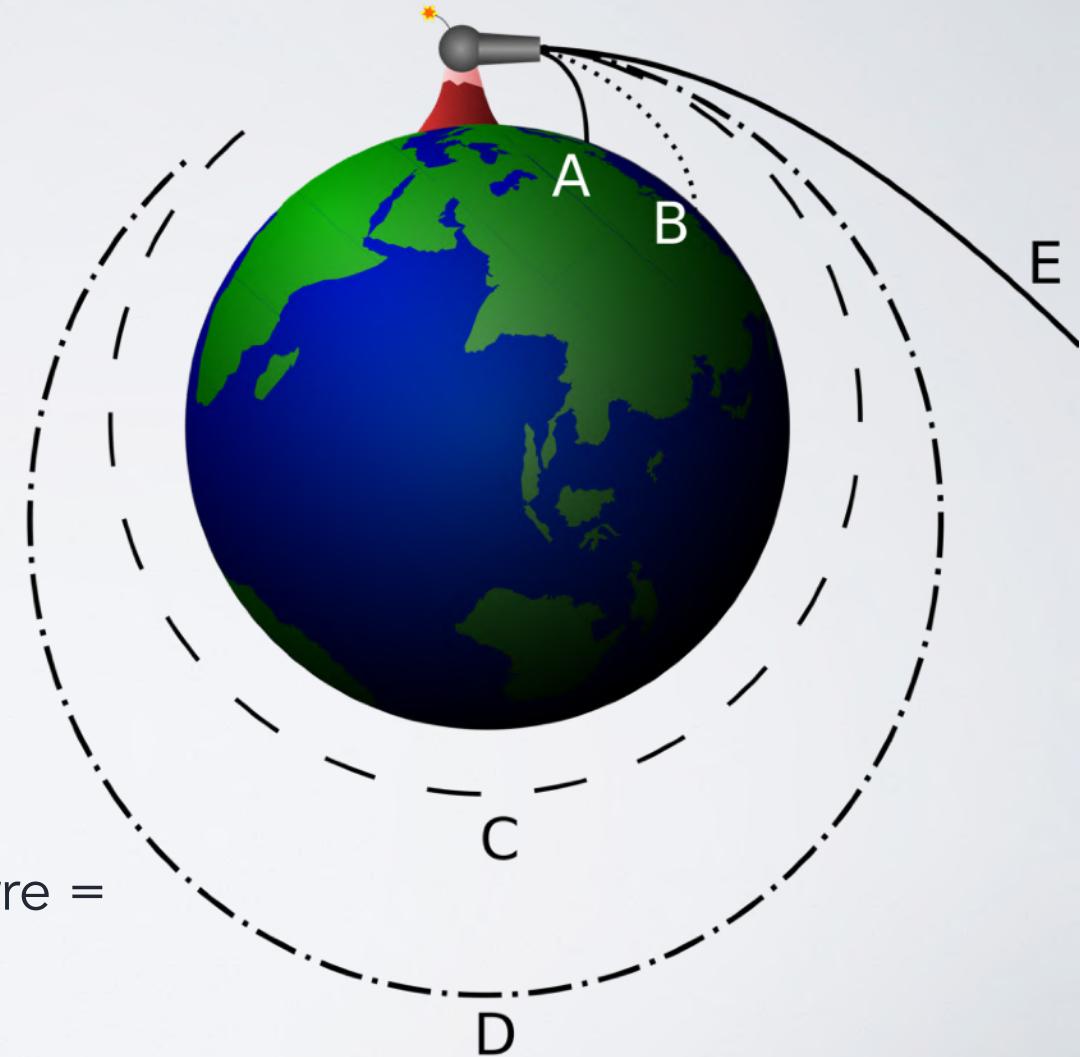


# Vitesse de libération

- Masse de la Terre:  $6 \times 10^{24}$  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**

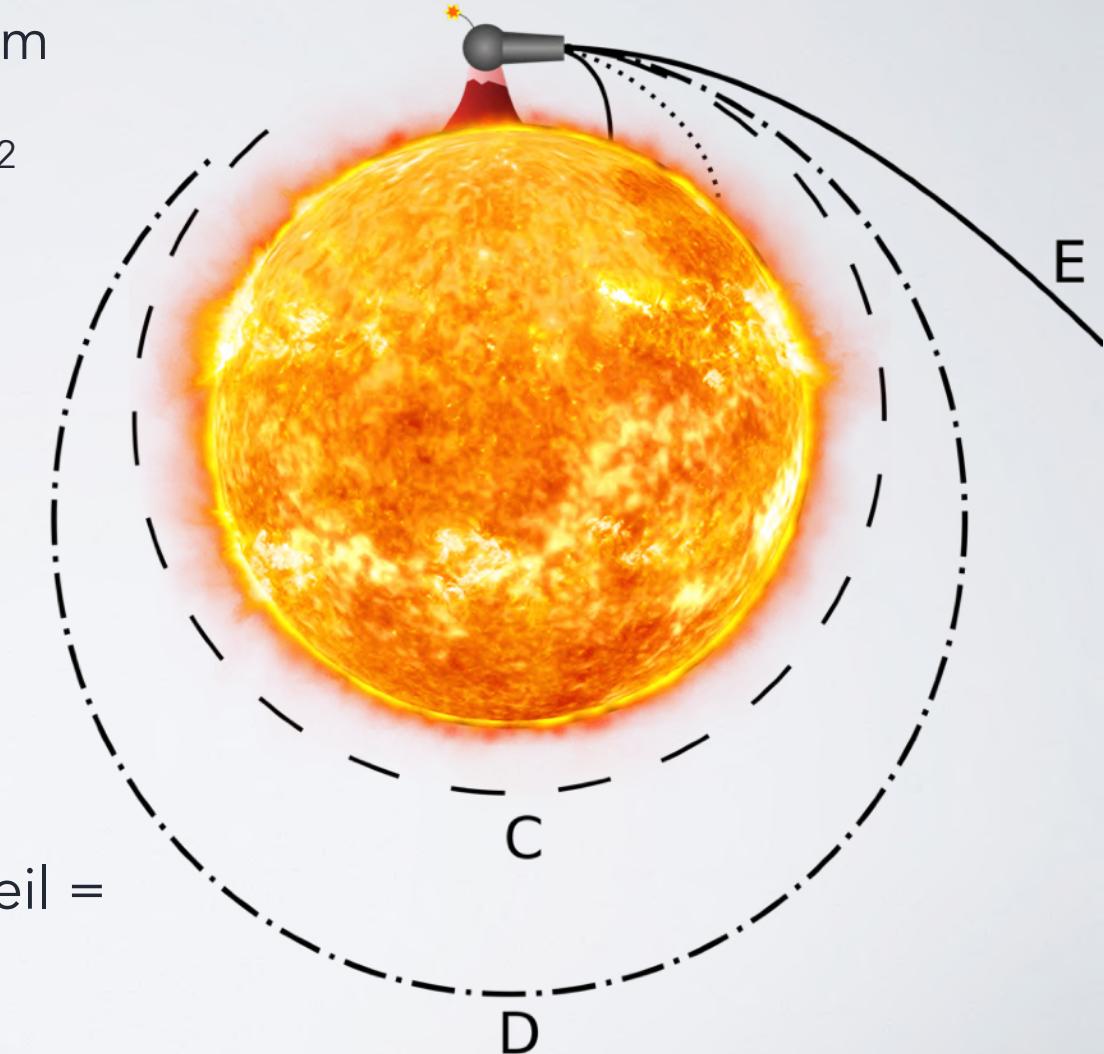


# Vitesse de libération

- Masse du Soleil:  $2 \times 10^{30}$  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**



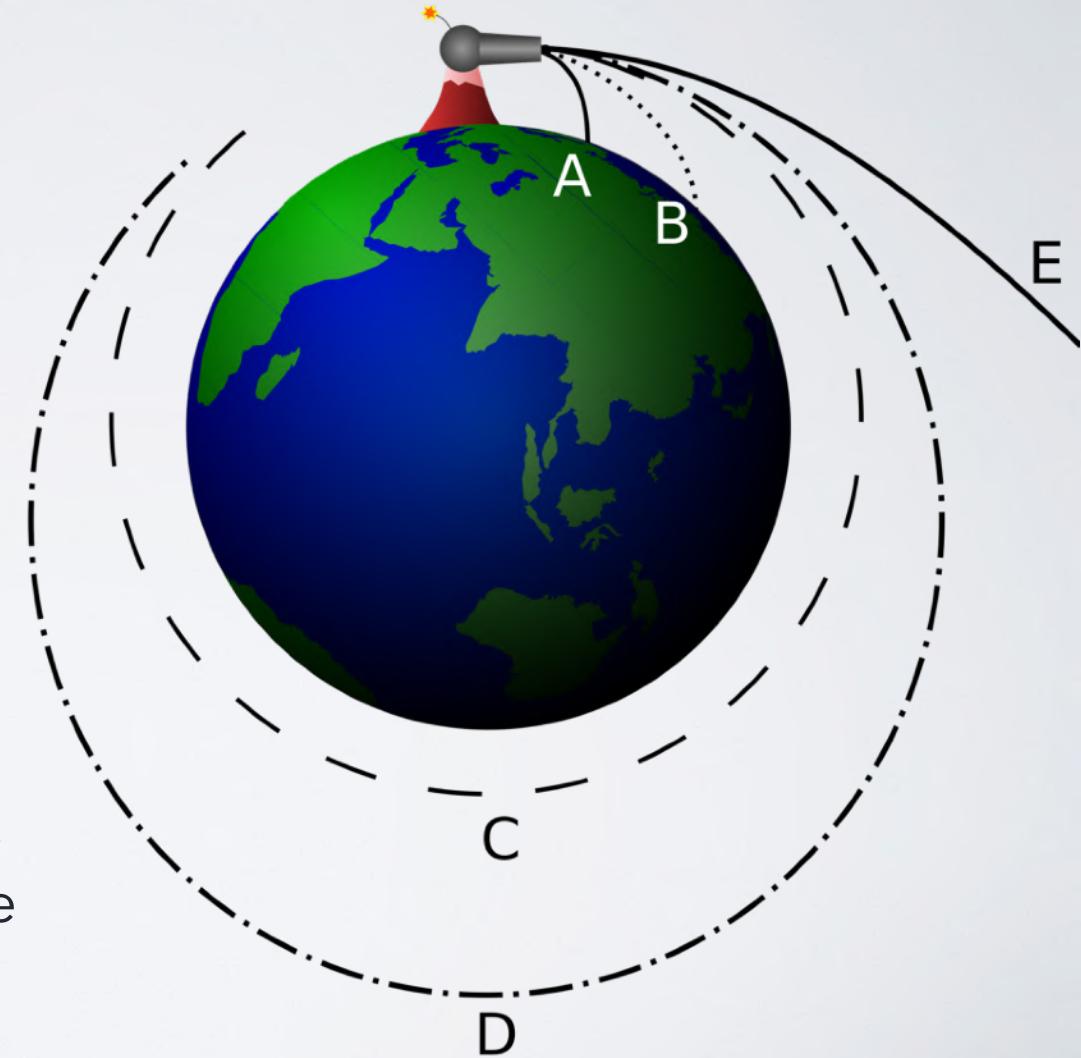
# Vitesse de libération

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...”

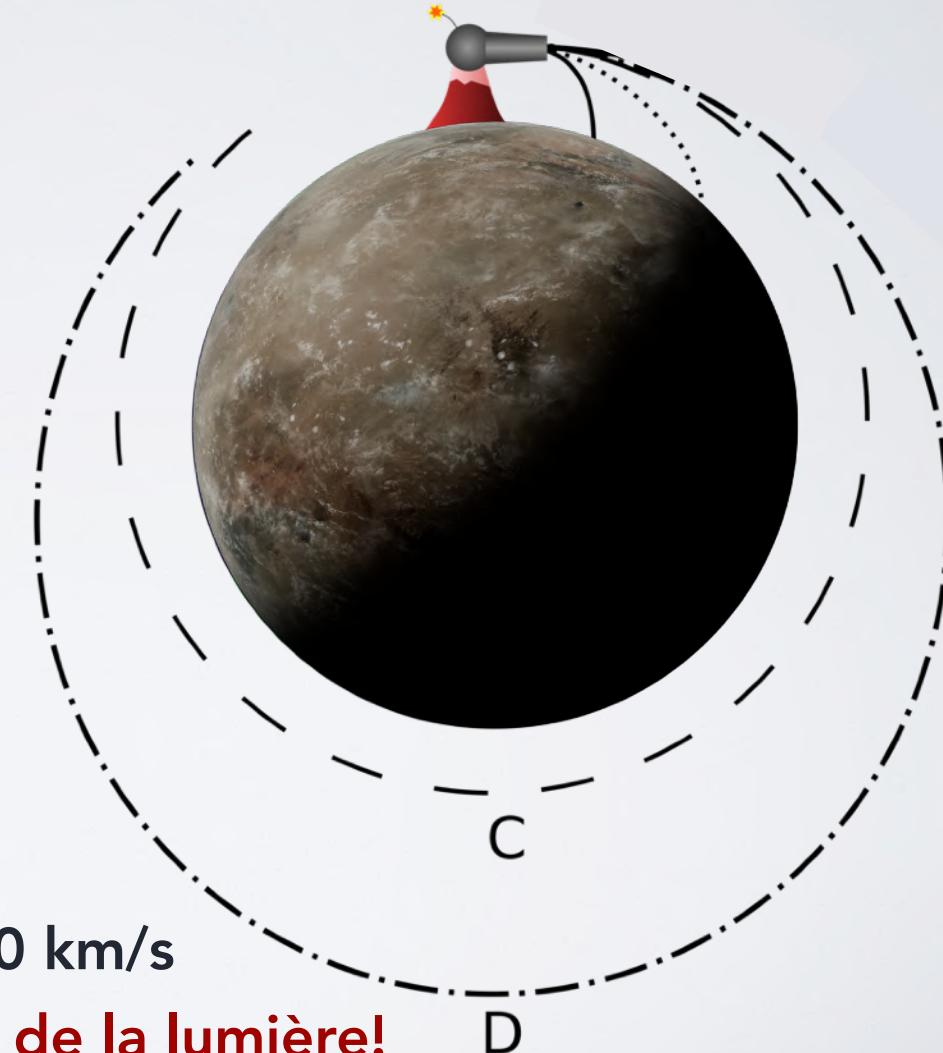


# Vitesse de libération

Planète "X"

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

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



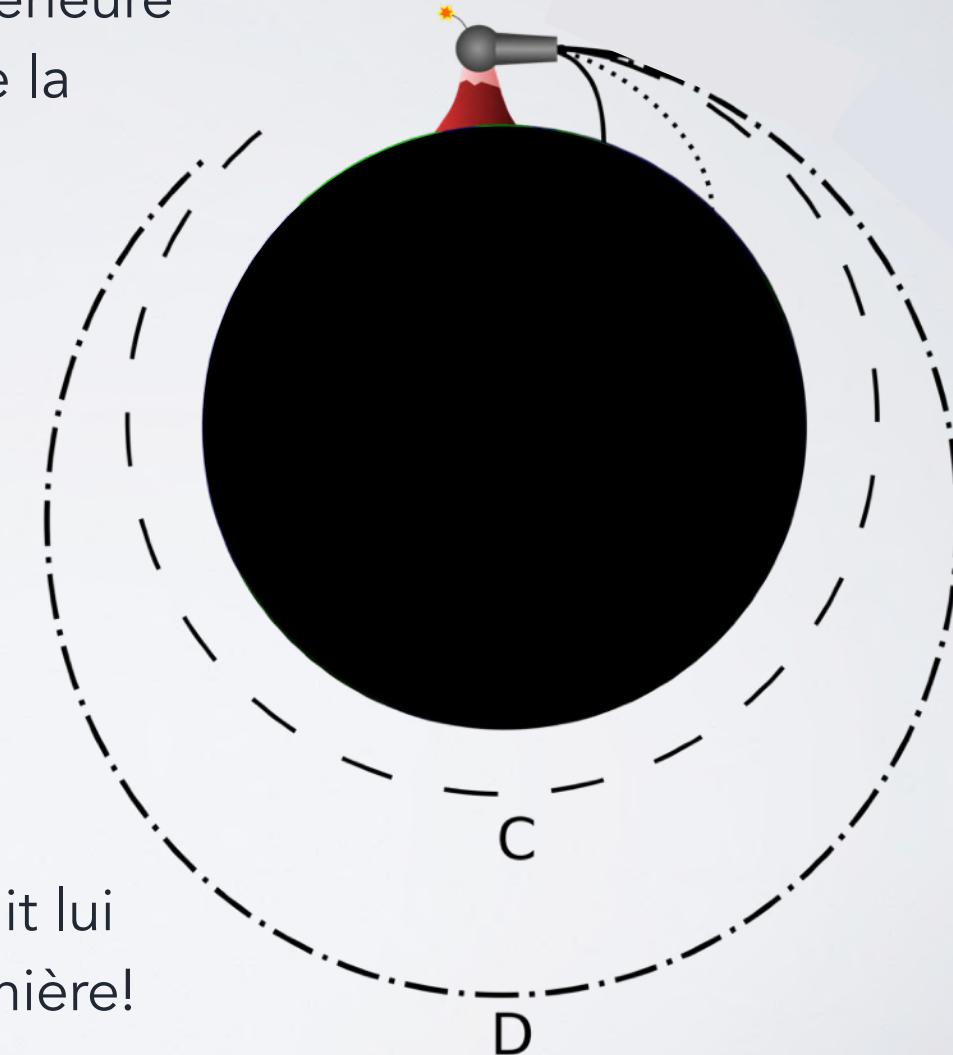
Vitesse de libération = **366 000 km/s**

> 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.”

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

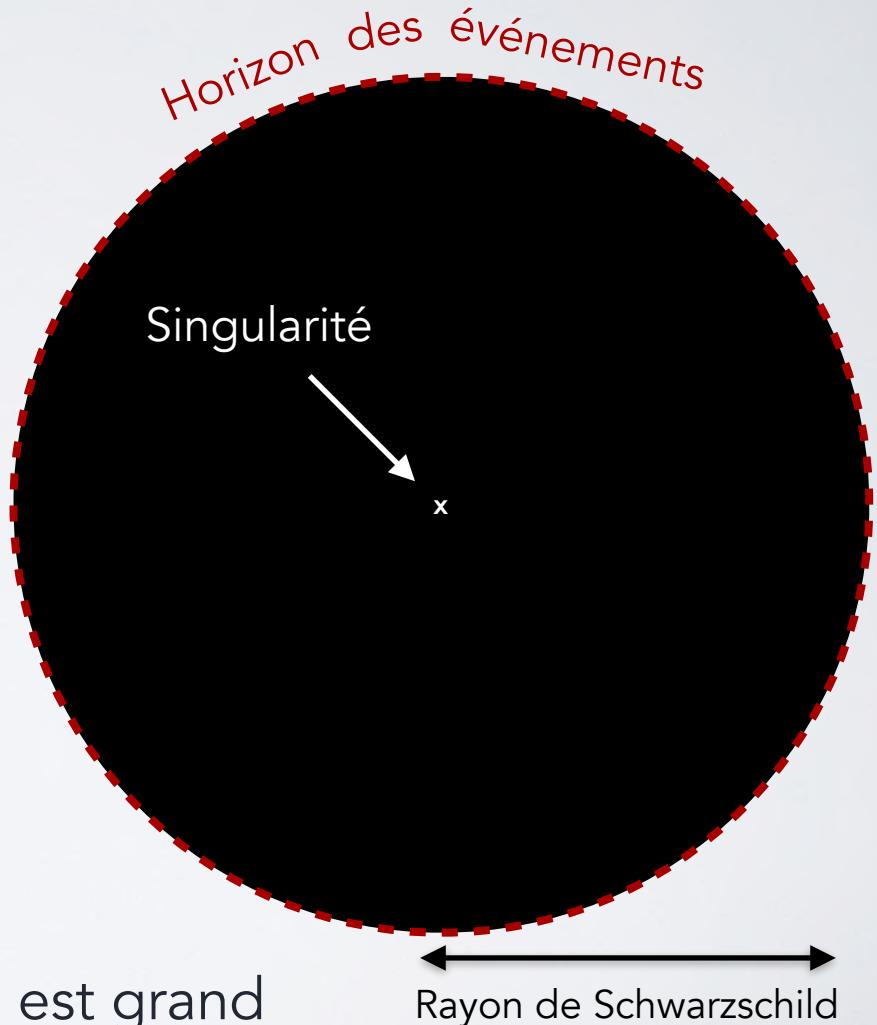


Dans ce cas, **rien** ne saurait lui échapper, même pas la lumière!

# 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 ( $M$ )



- Charge électrique ( $Q$ )

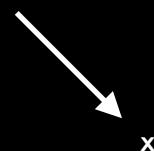


- Moment cinétique ( $J$ )



Horizon des événements

Singularité



Rayon de Schwarzschild

	$J=0$	$J \neq 0$
$Q=0$	Schwarzschild	Kerr
$Q \neq 0$	Reissner-Nordström	Kerr-Newmann

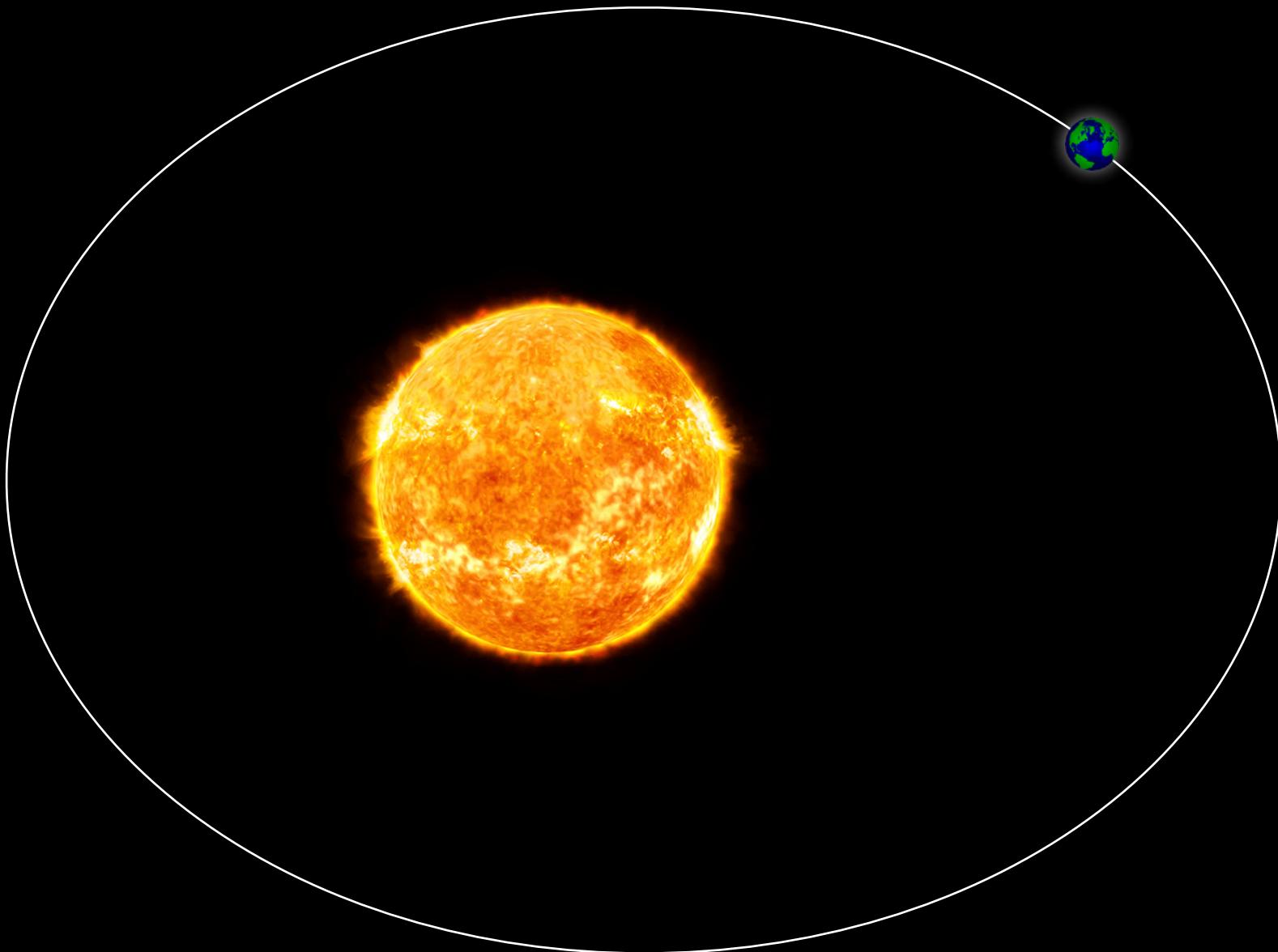
# Vrai ou faux?

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

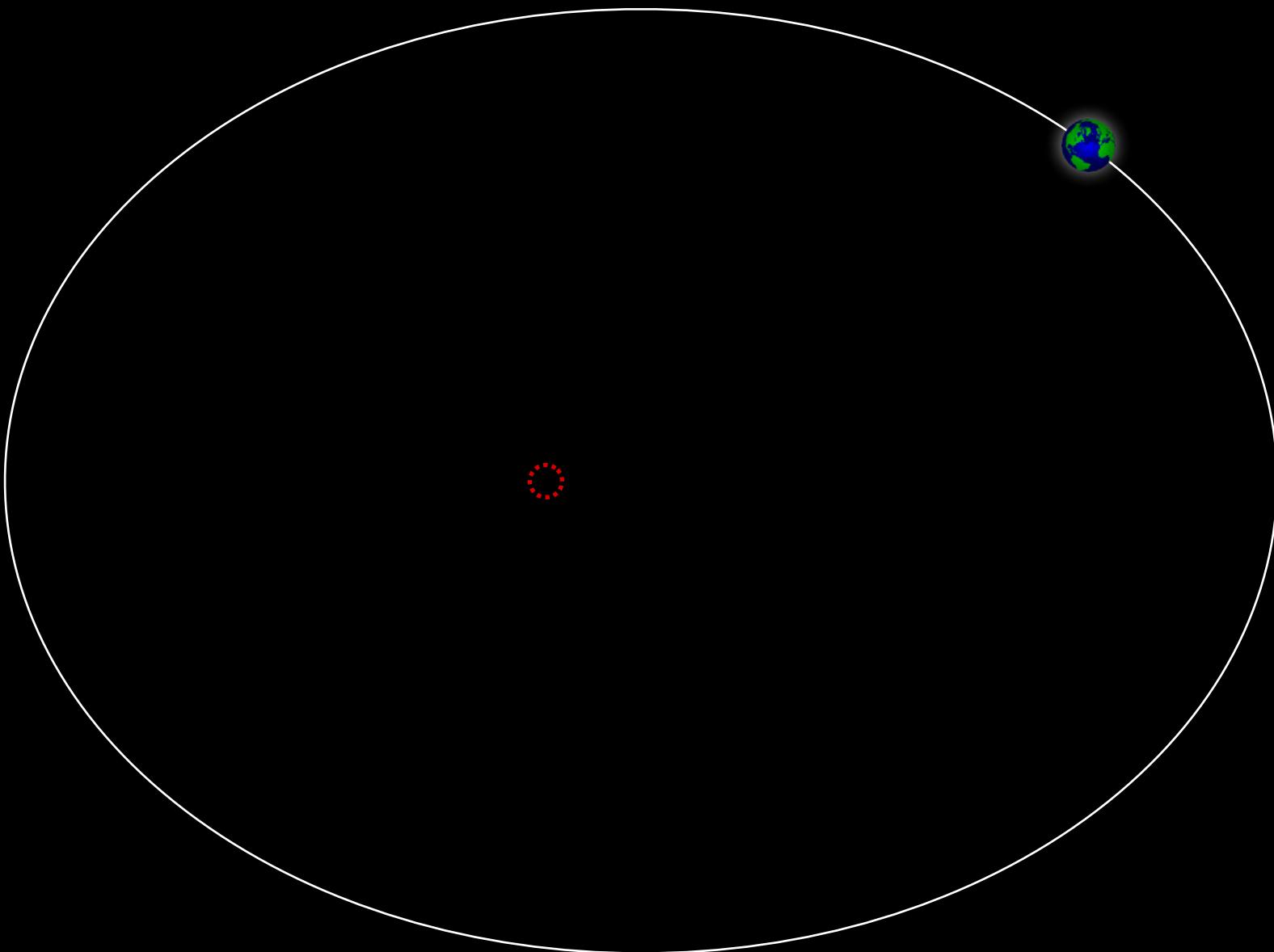


**FAUX!**

# Quelques idées reçues...



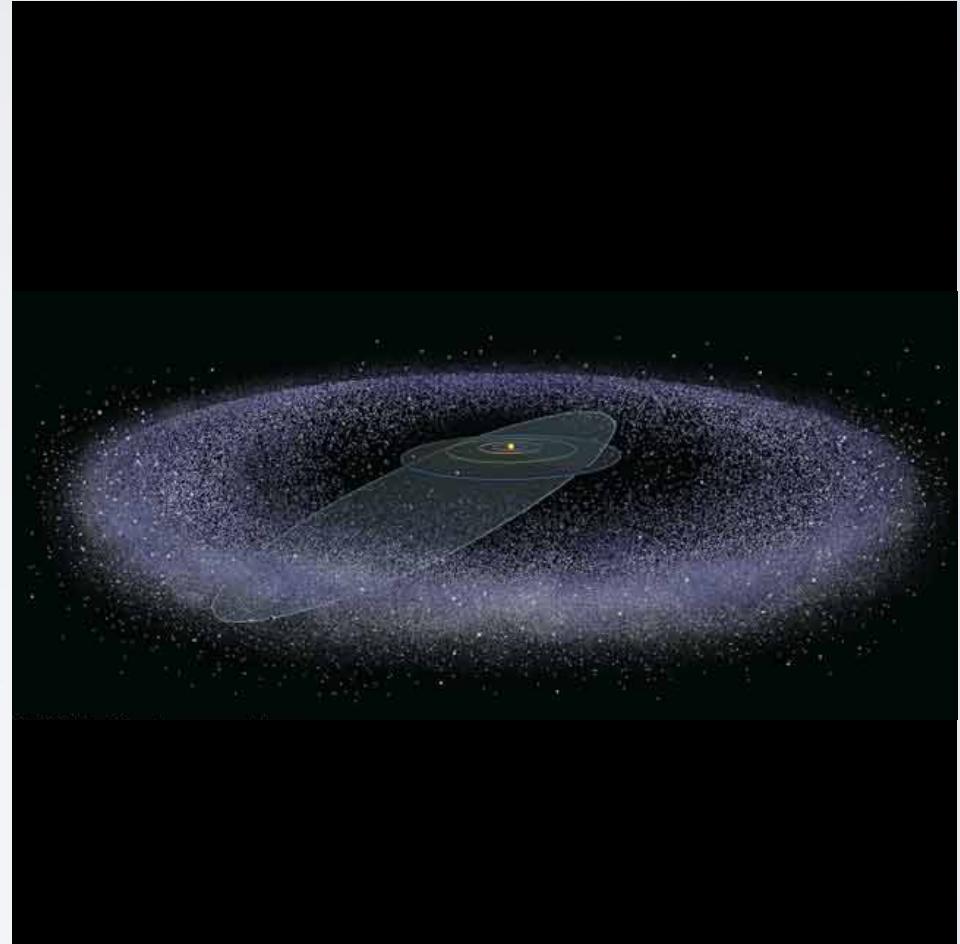
# Quelques idées reçues...



# 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?**



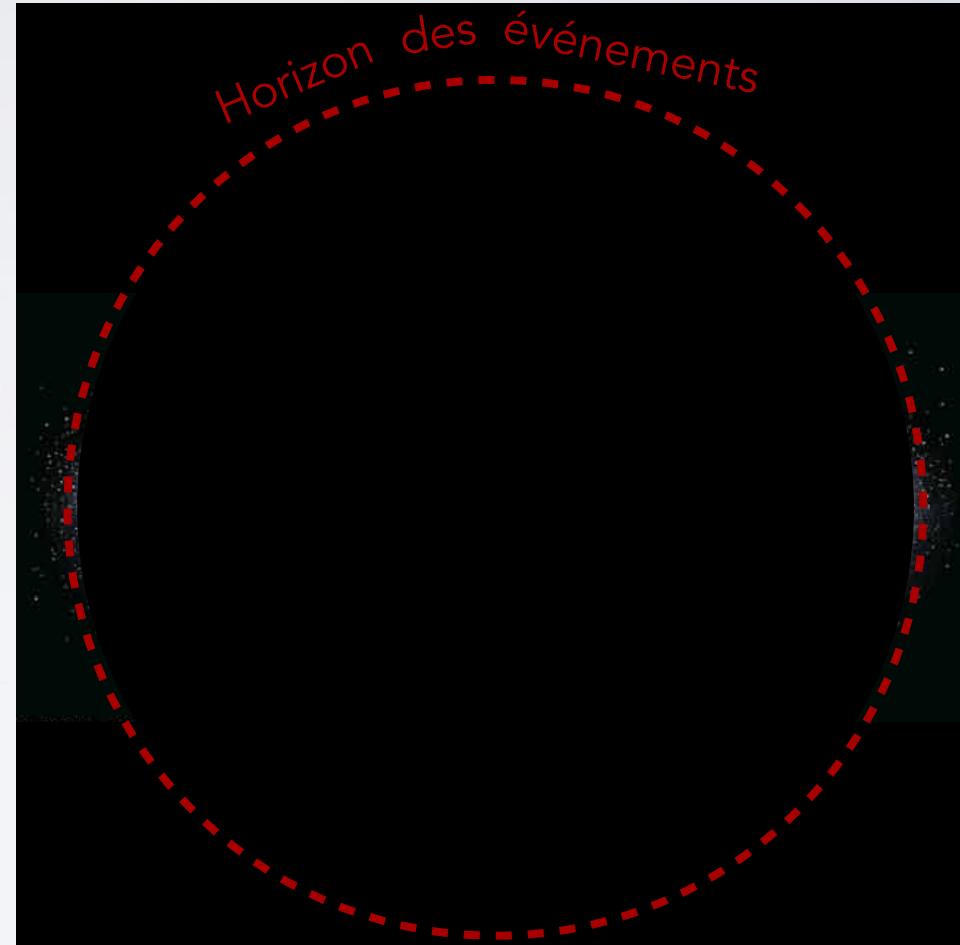
# Vrai ou faux?

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?

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

$10^{40} \text{ kg}$



Quelle densité (masse volumique) cela représenterait-il?

$710 \text{ g/m}^3$

**FAUX!**

(sauf sur la singularité...)

---

## 2. Trous noirs et astrophysique

# Les 4 types de trous noirs

1) Trous noirs stellaires

$3-10 M_{\odot}$

2) Trous noirs supermassifs

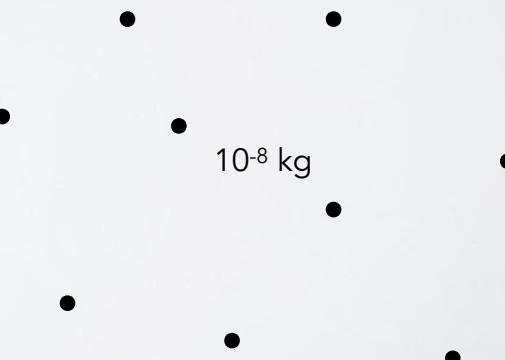
$10^6-10^9 M_{\odot}$

3) Trous noirs de masse intermédiaire

$10^2-10^4 M_{\odot}$

4) Trous noirs primordiaux

$10^{-8} kg$

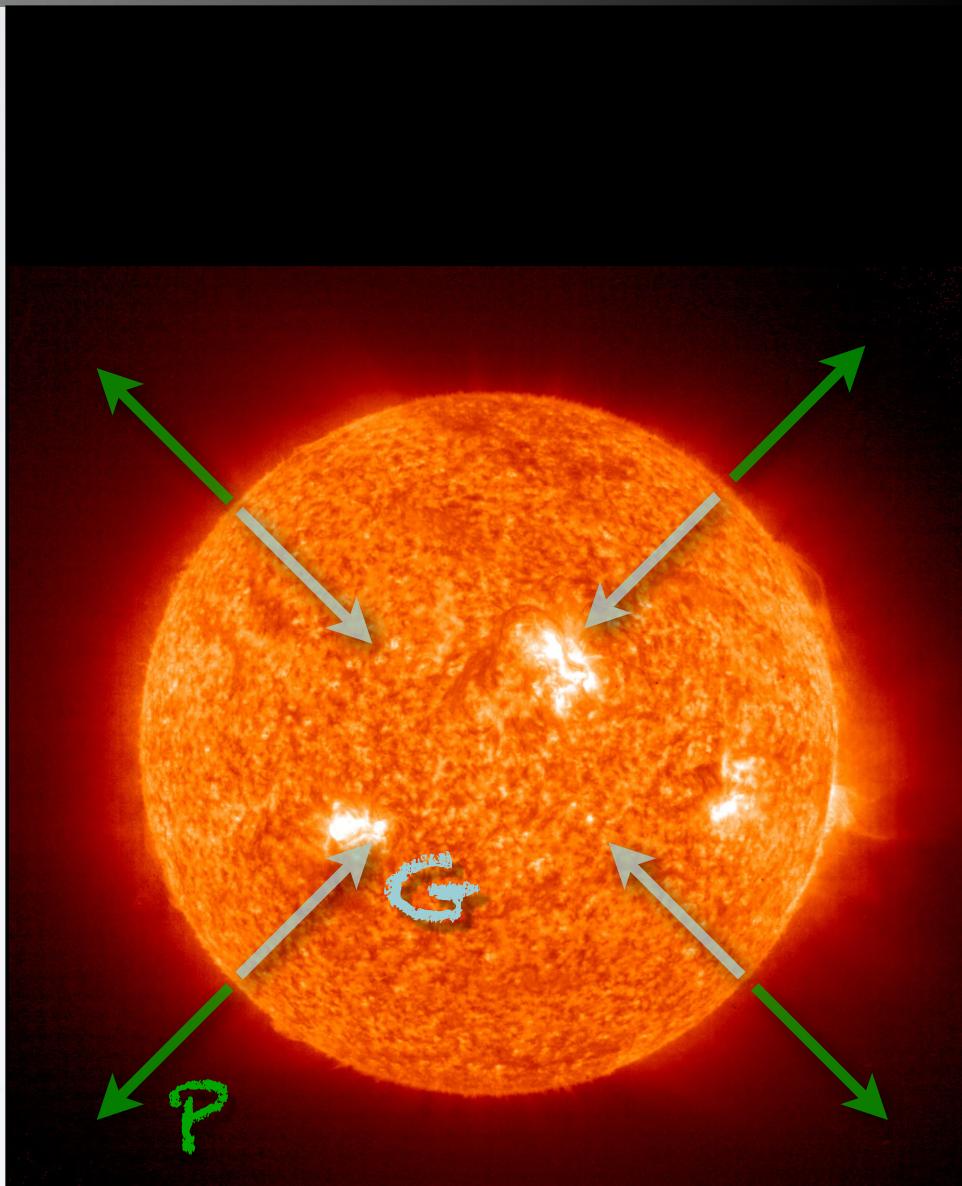




# 1) Trous noirs stellaires

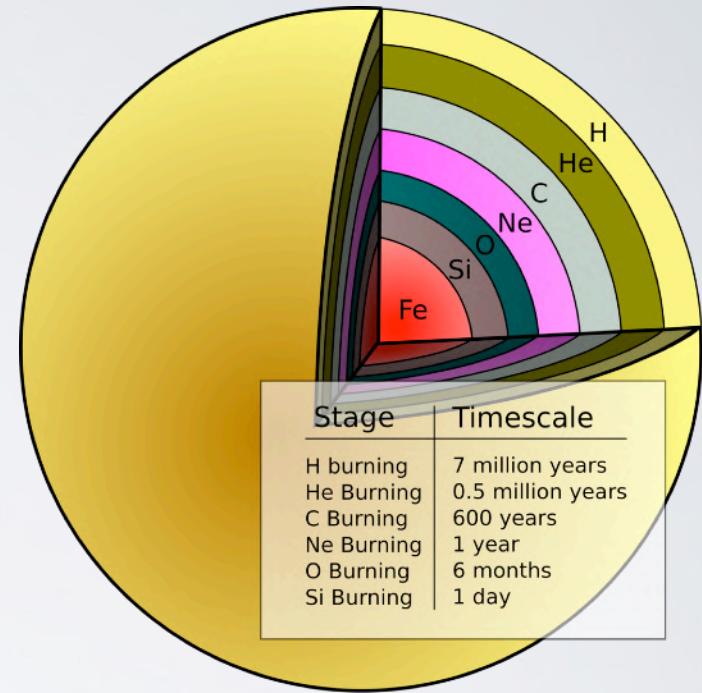
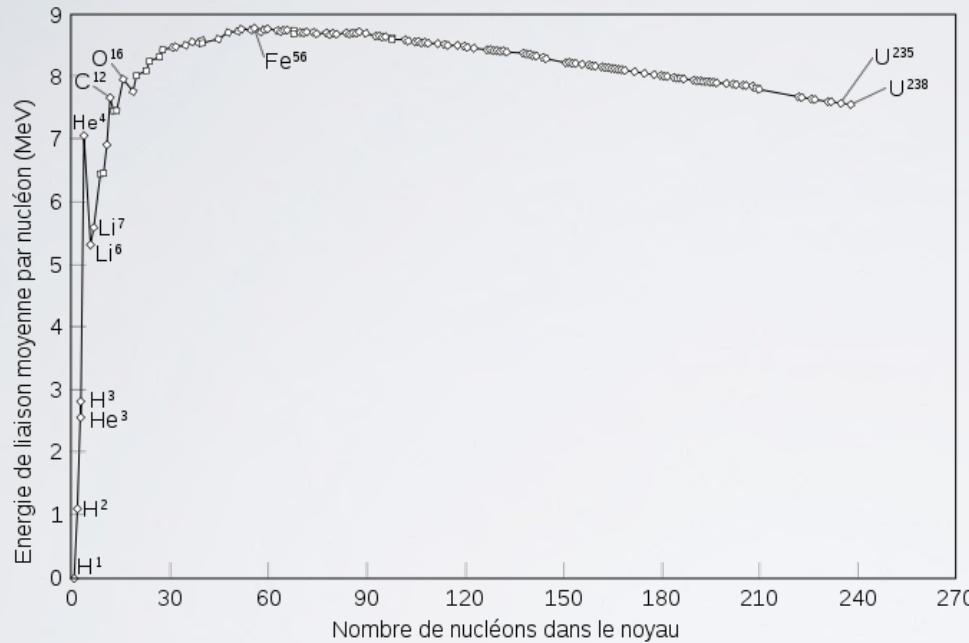
# Formation: vieillissement des étoiles (massives)

- Équilibre hydrostatique
    - Pression interne de l'étoile = sa propre gravité
  - L'hélium s'accumule au cœur et gêne la fusion de l'hydrogène
  - Pression interne diminue
  - Le cœur se contracte
  - Température du cœur augmente
  - Le taux de réactions  $H \rightarrow He$  augmente
  - etc...
- 
- $T > 100\,000\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 
    - 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	$4 \times 10^6$ K ; $15 \times 10^6$ K ; $40 \times 10^6$ K	~800 milliards d'années	10-12 milliards d'années	7 millions d'années
Fusion de l'hélium	$1 \times 10^8$ K	S'arrête avant d'atteindre ce stade	~200 millions d'années	500 000 ans
Fusion du carbone	$1 \times 10^9$ 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	$2 \times 10^9$ K			5 mois
Fusion du silicium	$3 \times 10^9$ K			~1 jour

# Formation: mort des étoiles massives

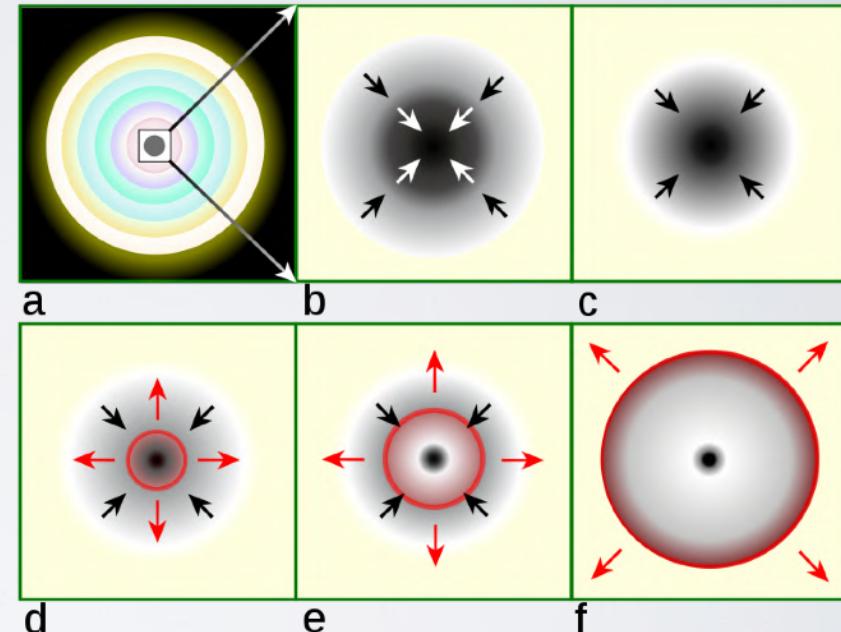
- Durant l'effondrement:



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

- La matière "rebondit" sur le cœur 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 cœur de neutrons)



## Supernova (à effondrement de cœur)

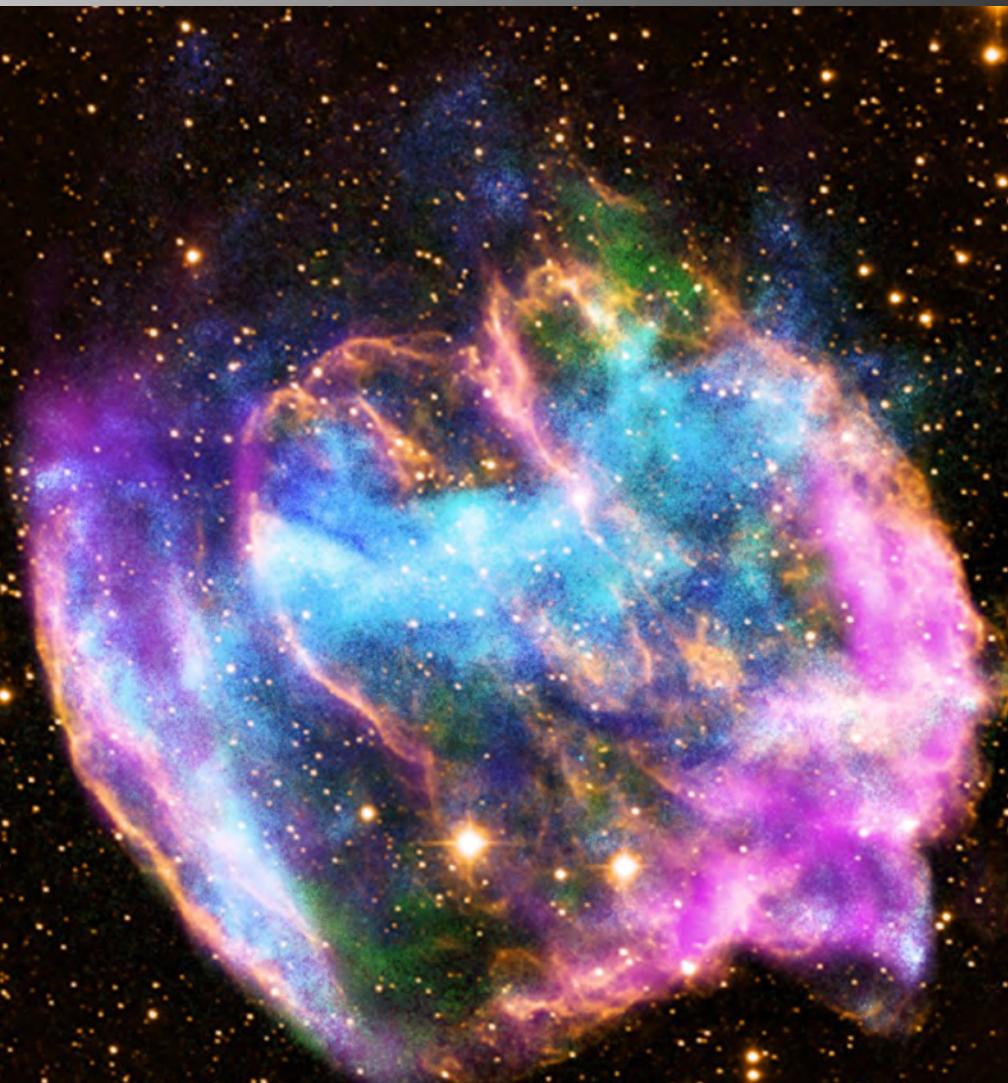
- Si l'étoile avait plus de  $15 M_{\odot}$ , son cœur s'effondrera en un **trou noir stellaire**

# Supernovae à effondrement de cœur



SN 1054  
(Nébuleuse du Crabe)

# Supernovae à effondrement de cœur



W49B

# Les trous noirs stellaires existent-ils?

---

Binaires X...

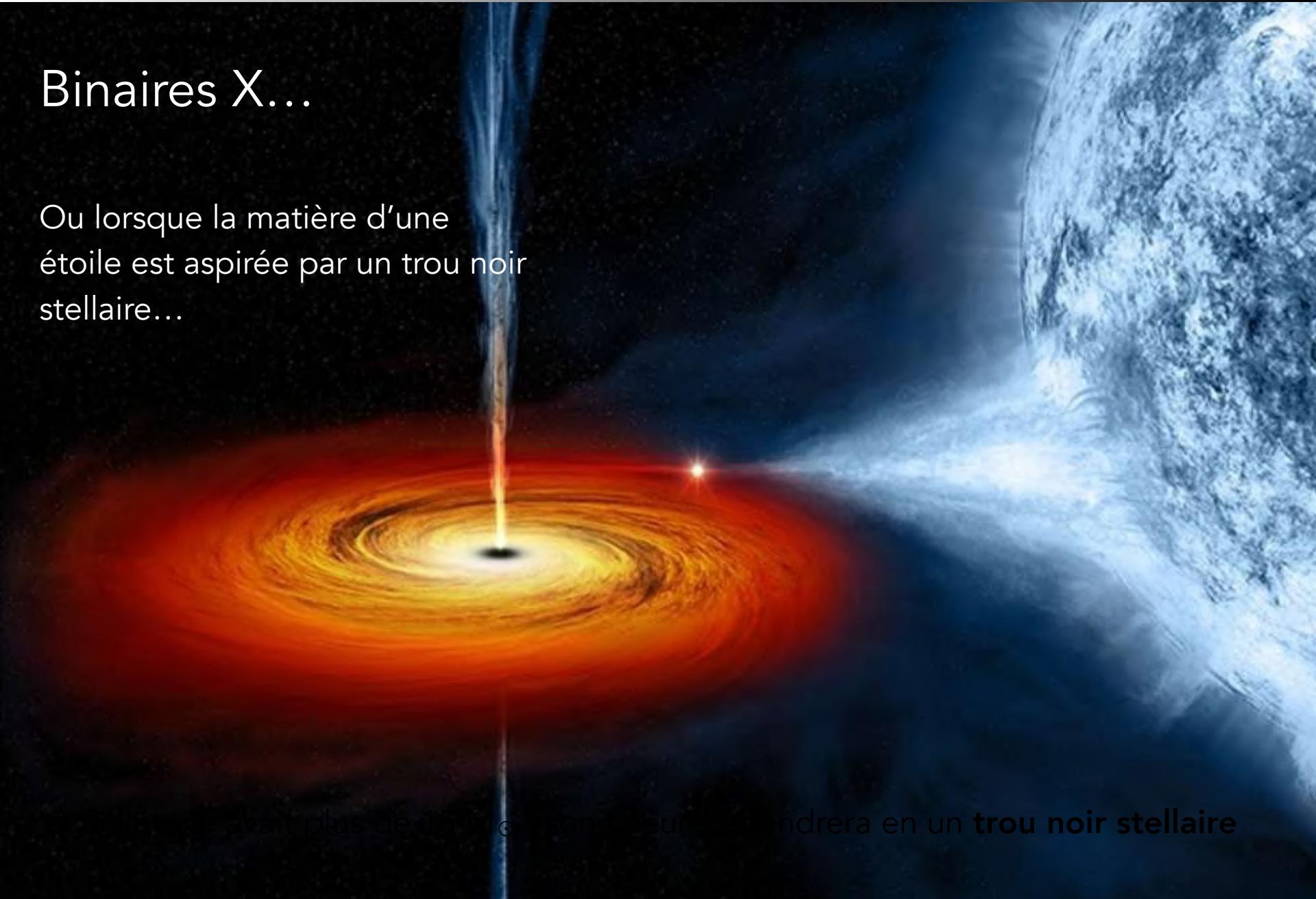
Ou lorsque la matière d'une  
étoile est aspirée par un trou noir  
stellaire...

# Les trous noirs stellaires existent-ils?

## Binaires X...

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

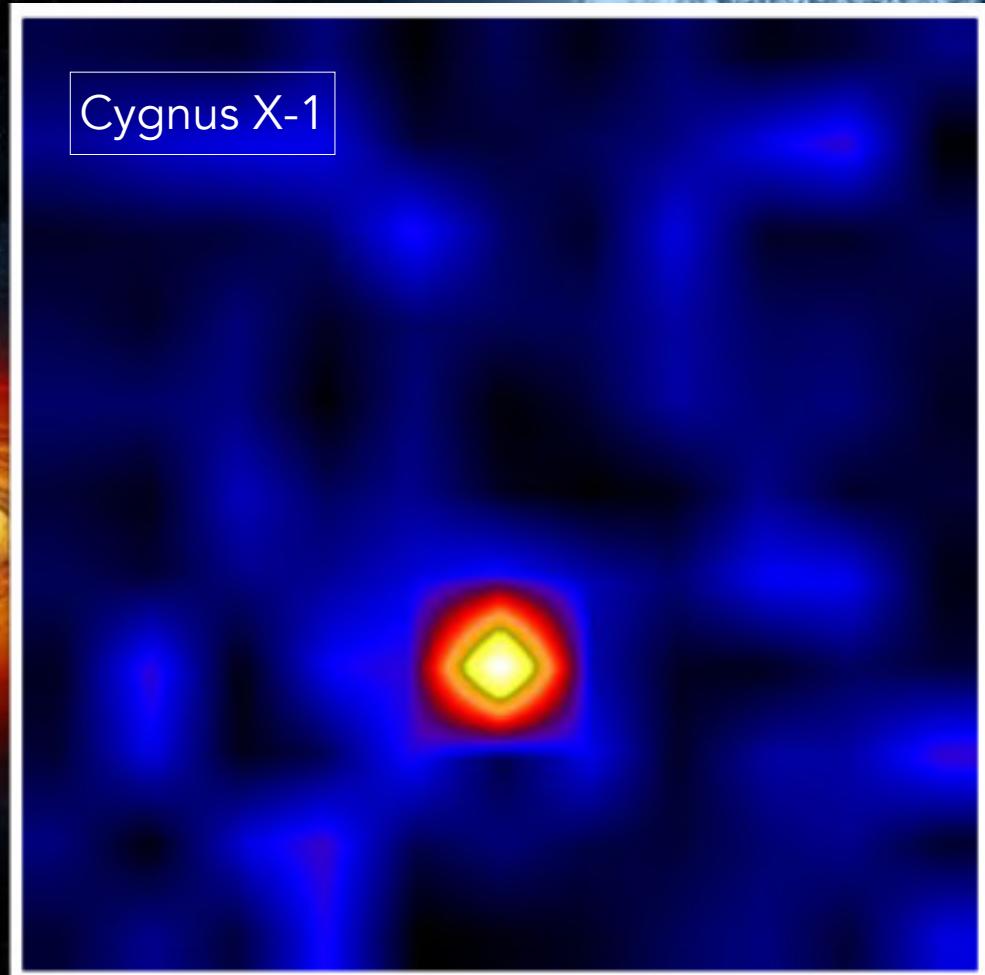
avait plus de 100 millions de fois la masse du Soleil et se transformera en un **trou noir stellaire**.



# Les trous noirs stellaires existent-ils?

## Binaires X...

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

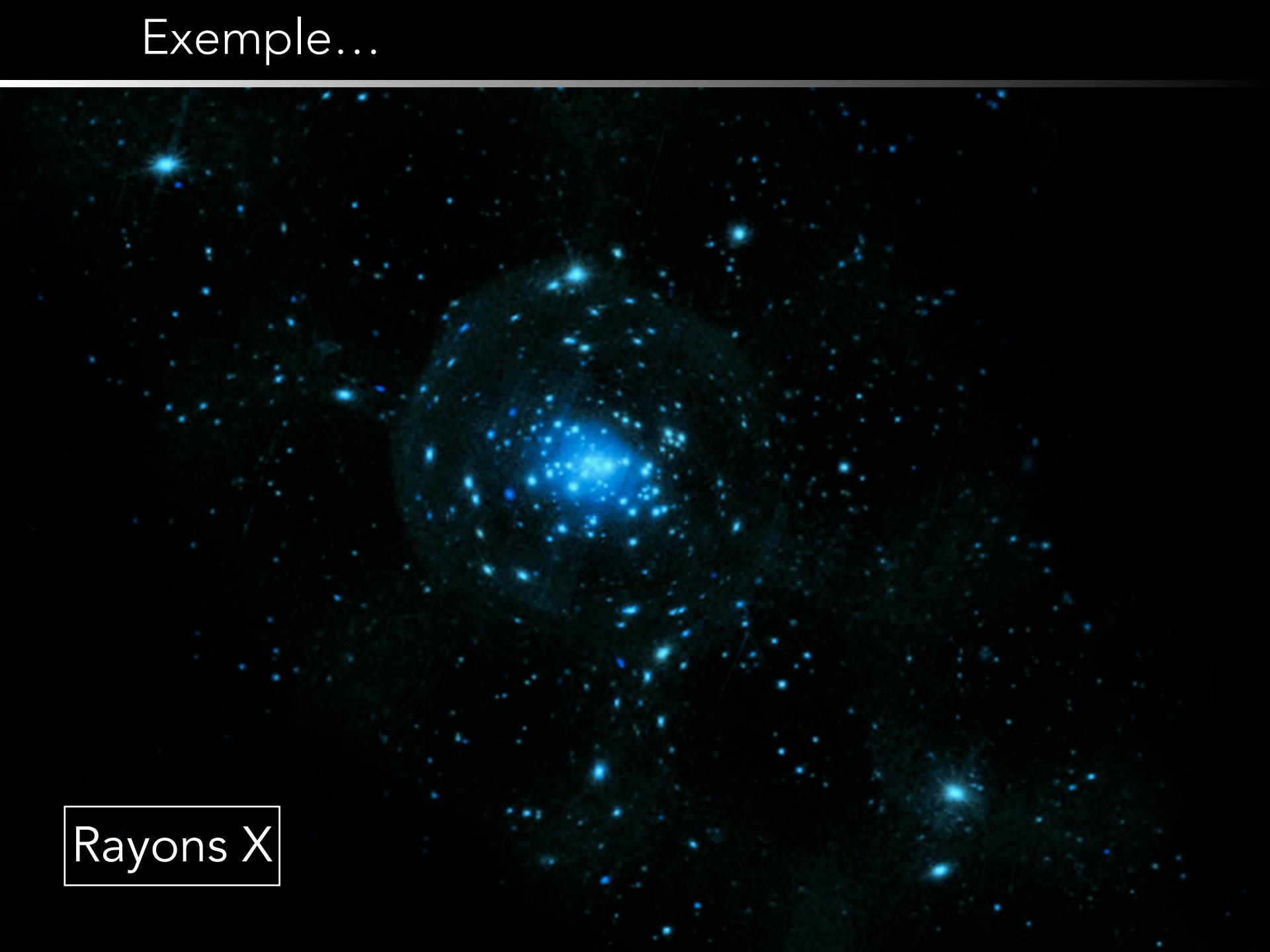


Exemple...



Optique

Exemple...



Rayons X

A dramatic black hole image. A massive, luminous accretion disk surrounds the central black hole, appearing as a bright, swirling mass of orange and yellow light. A small, dark, circular object, possibly a companion star or a planet, is visible against the dark background of space. The overall scene is one of intense gravitational pull and energy.

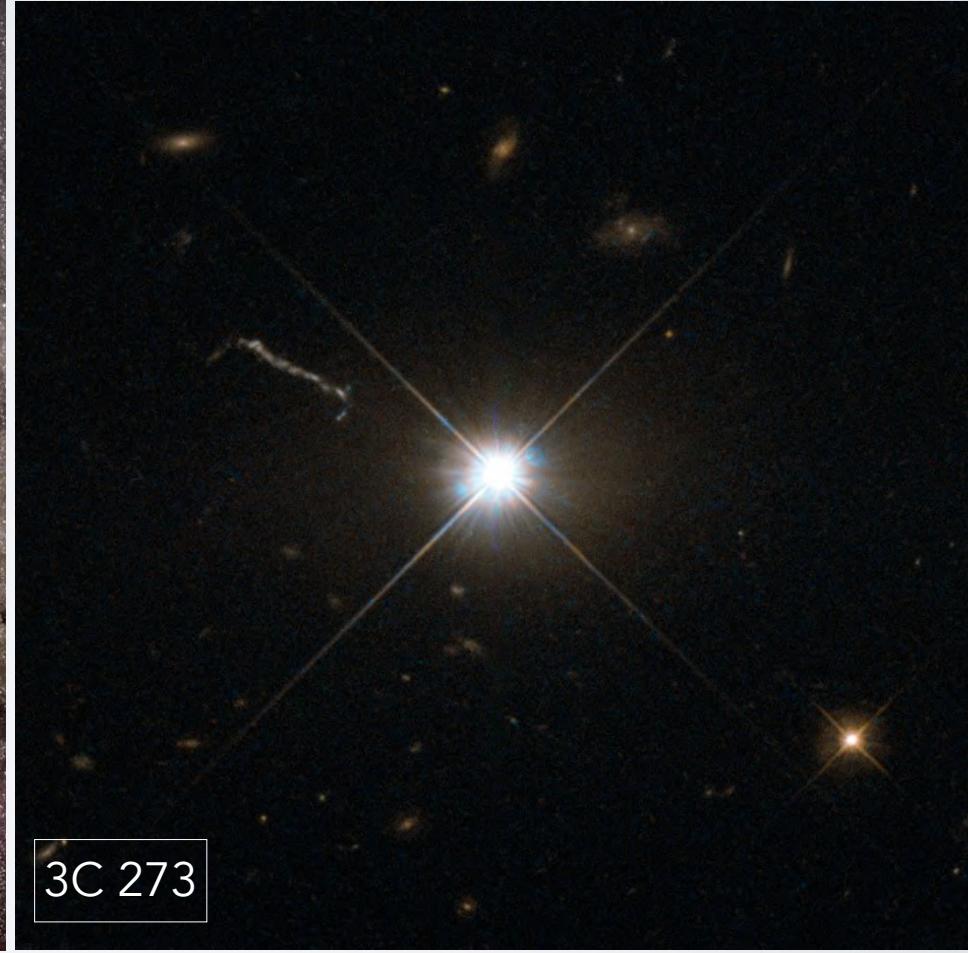
## 2) Trous noirs supermassifs

# Deux types de trous noirs supermassifs

A) Trous noirs supermassifs **inactifs**



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



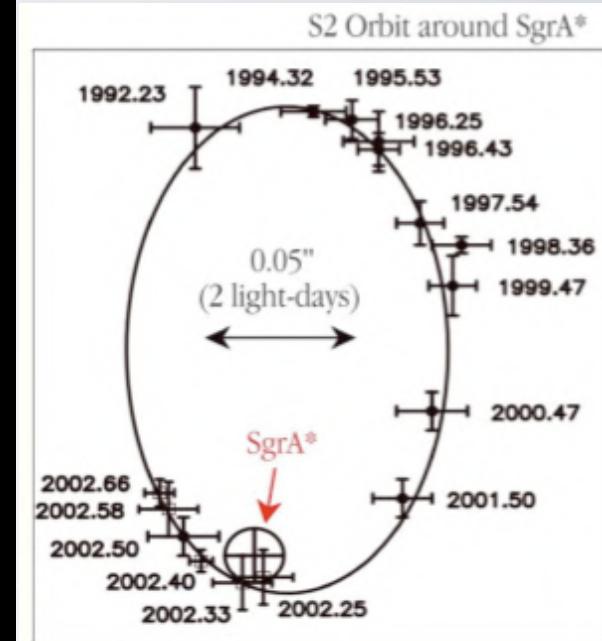
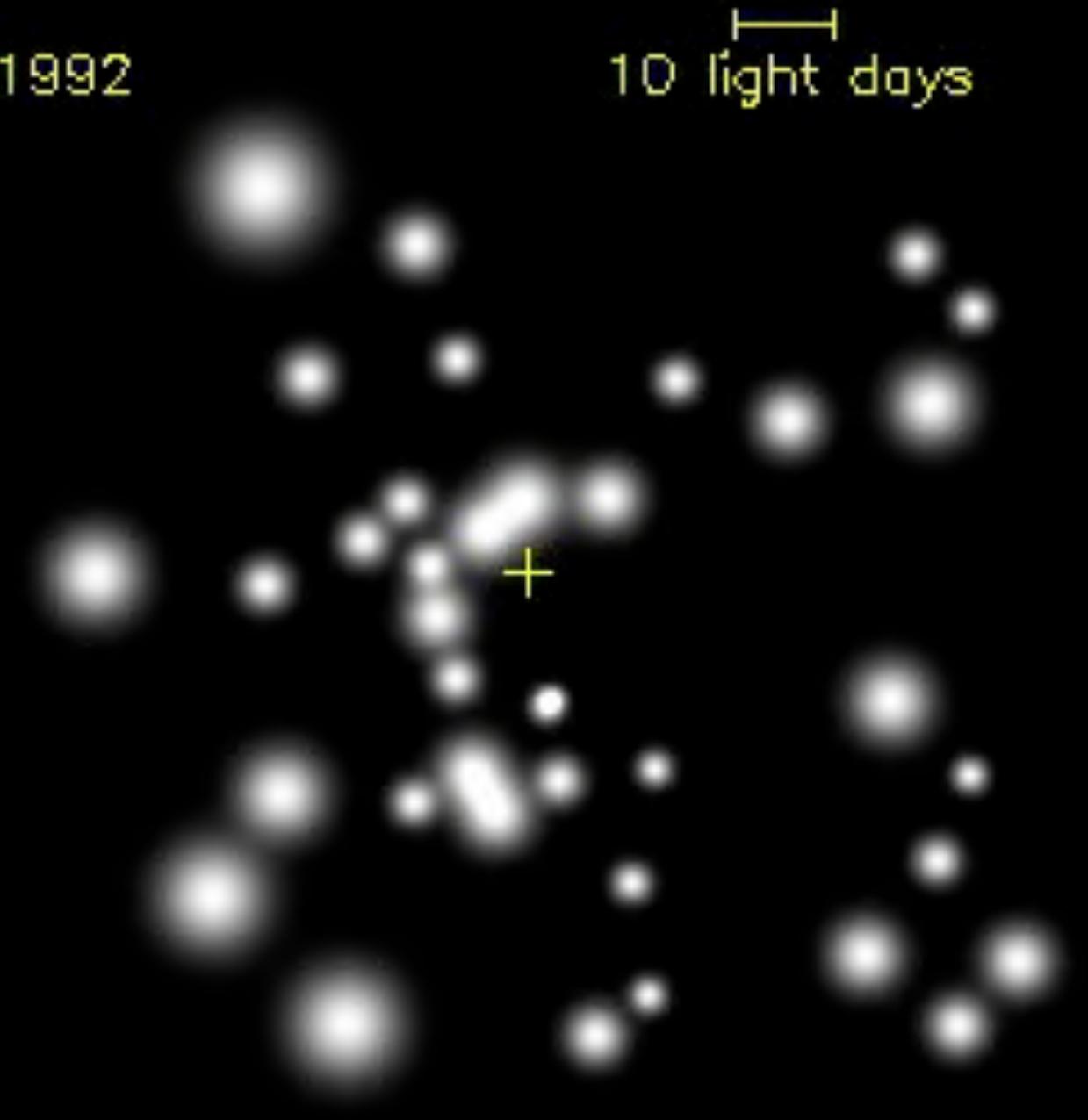
Très peu (ou pas) d'accrétion de matière  
autour du trou noir → **invisible**

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

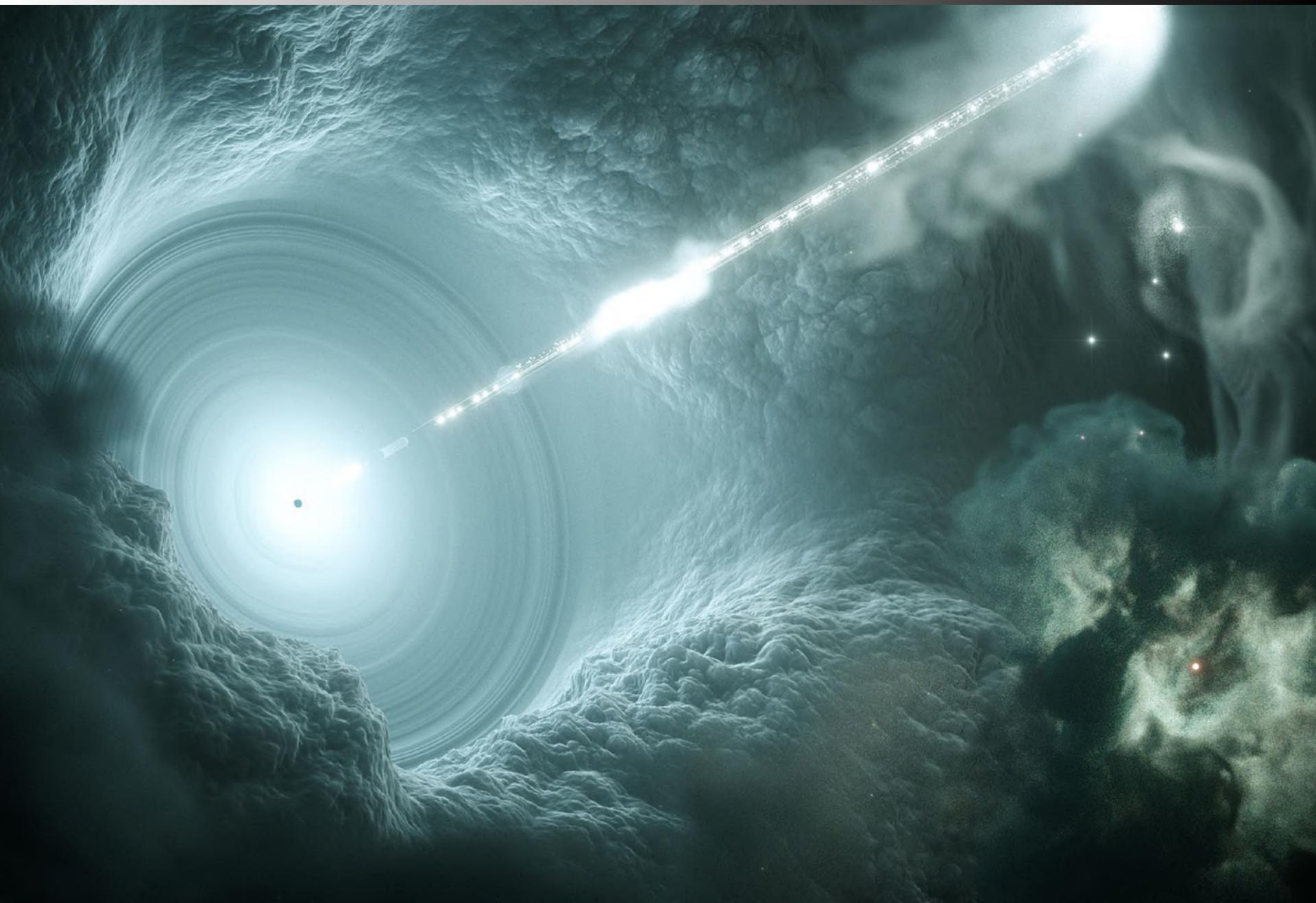
# Au centre de notre Galaxie: Sagittarius A\*

1992

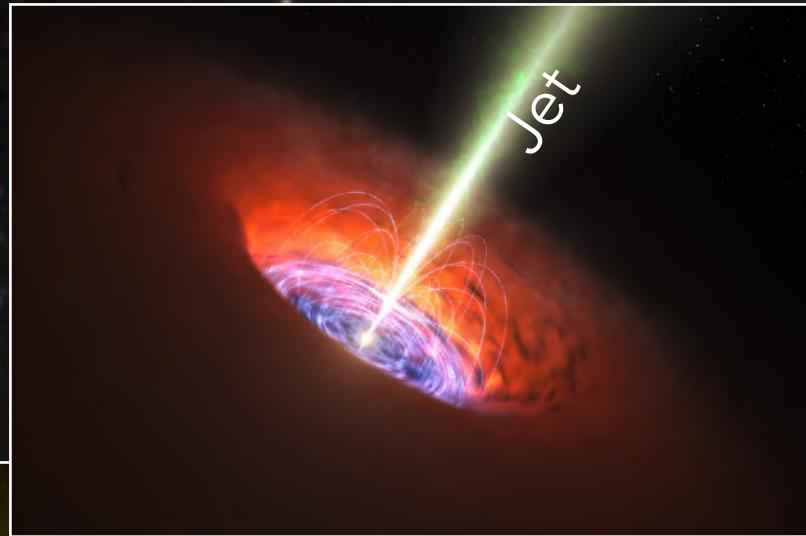
10 light days



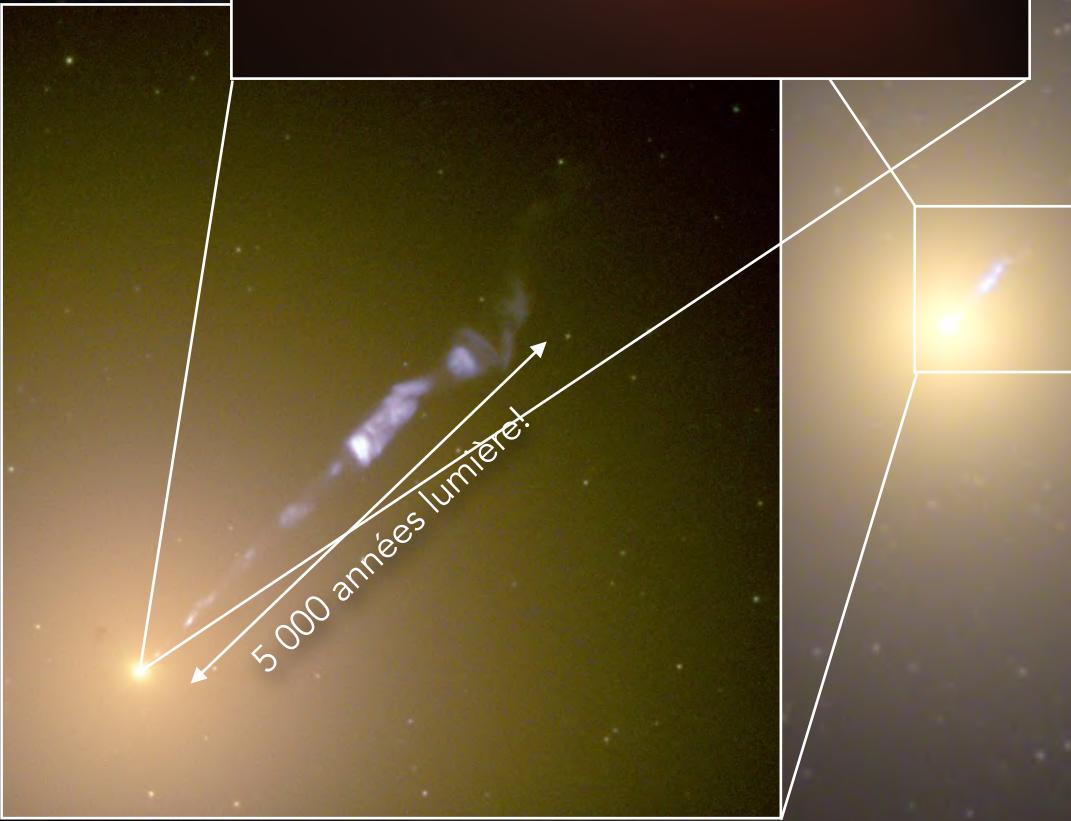
## B) Quasars et noyaux actifs de galaxies



# M87



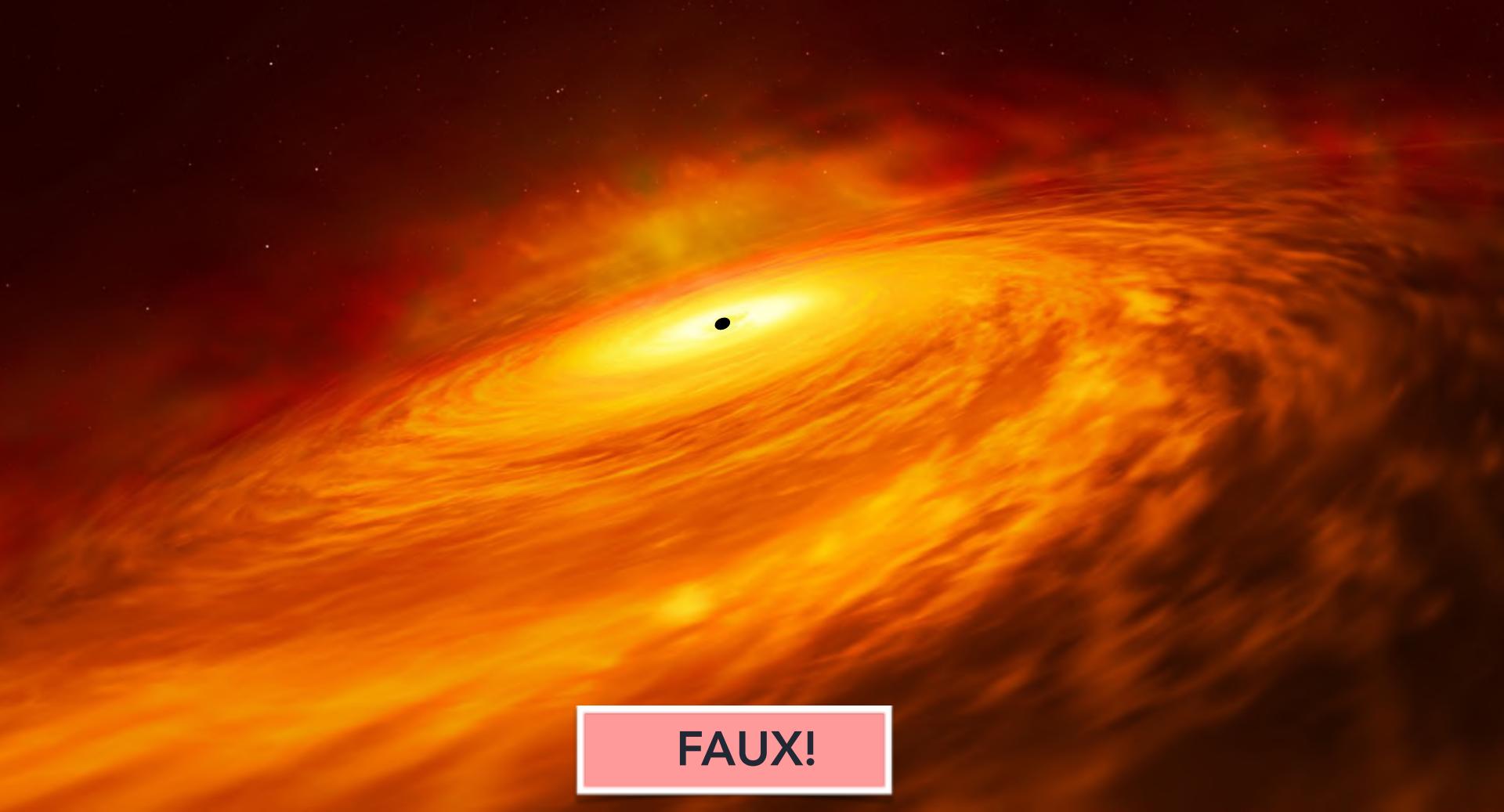
Jet



5 000 années lumière

# Vrai ou faux?

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



**FAUX!**

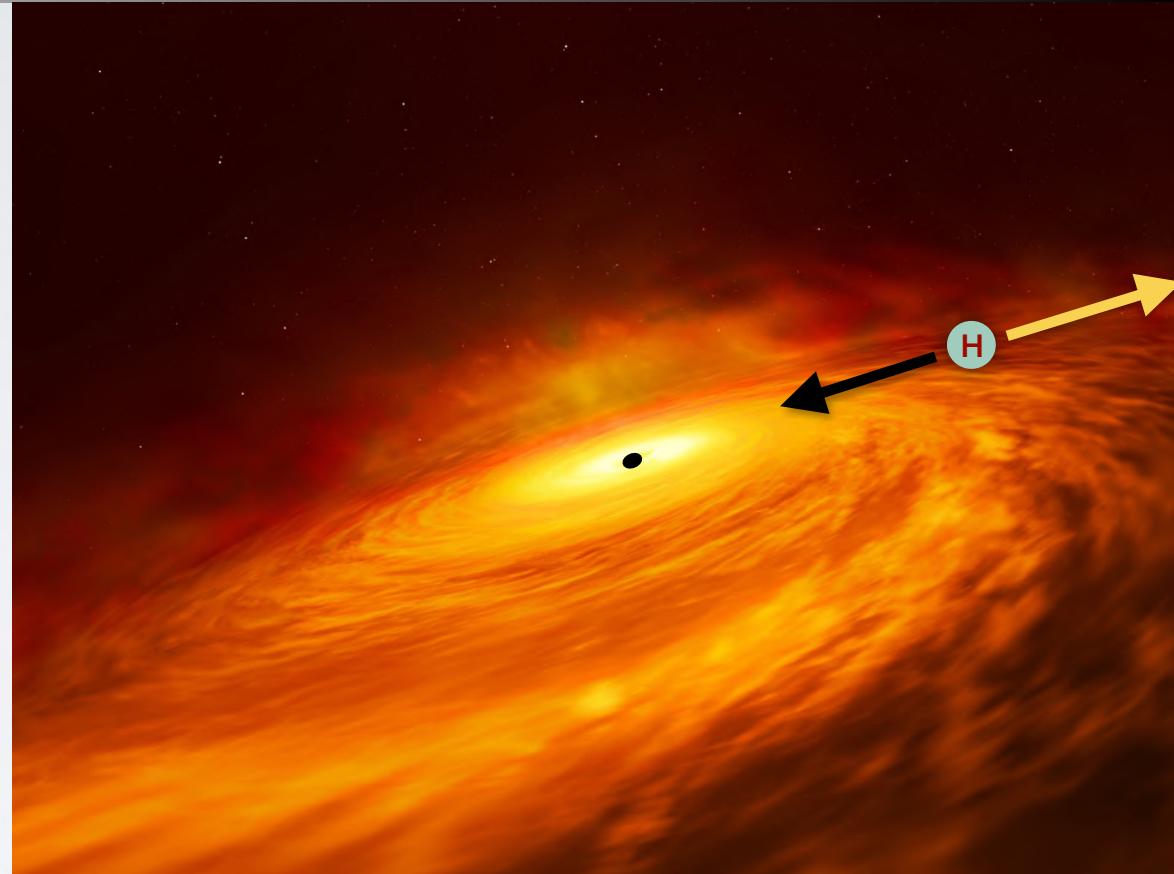
# Vrai ou faux?

Force gravitationnelle:

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

Pression de radiation:

~~$$\frac{P_{rad}}{F_{rad}} = \frac{L}{4\pi r^2 c} \sigma_e$$~~



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

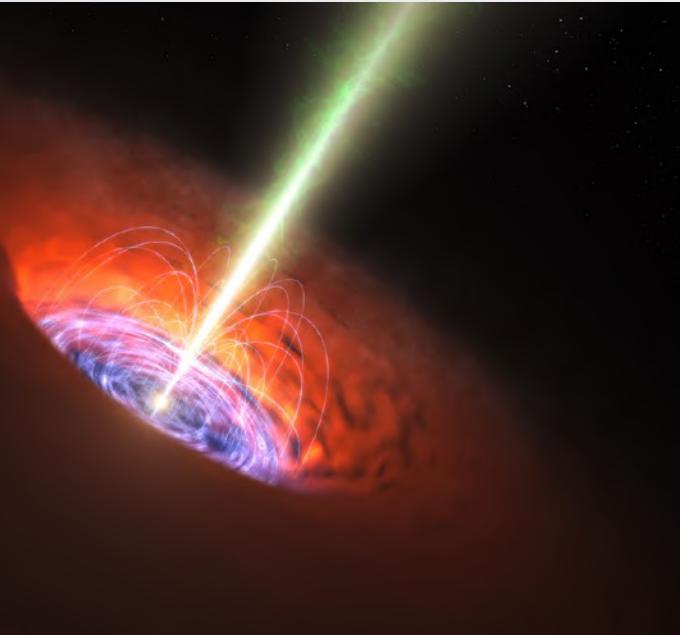
$$L_E = \frac{4\pi G cm_p}{\sigma_e} M$$

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

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

# Deux “modes” d'accrétion...

Mode “cinétique” ( $L \ll L_E$ )



Mode “radiatif” ( $L \sim L_E$ )



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

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

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

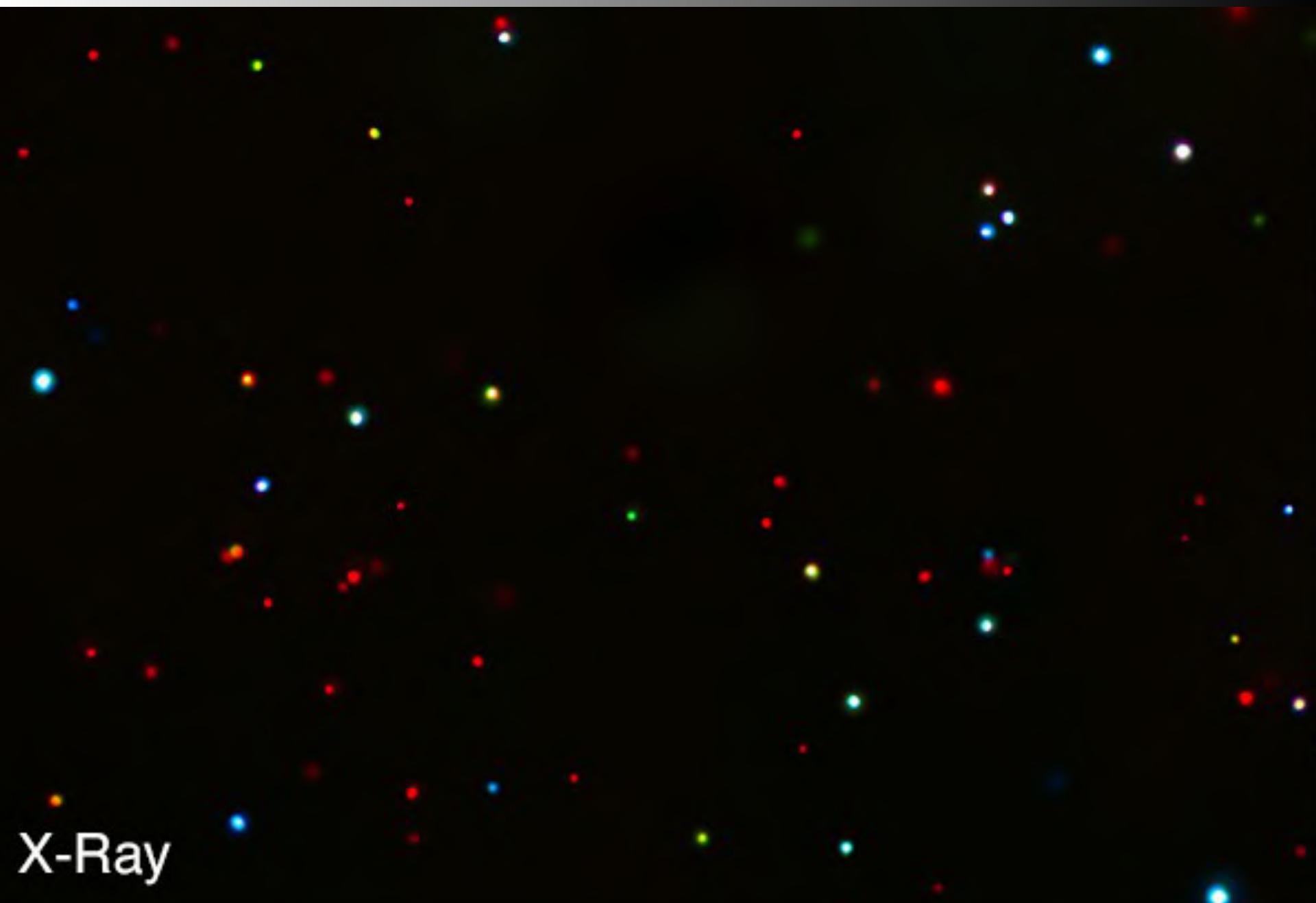


Le ciel en rayons X...



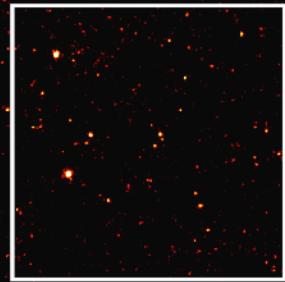
Optical

Le ciel en rayons X...

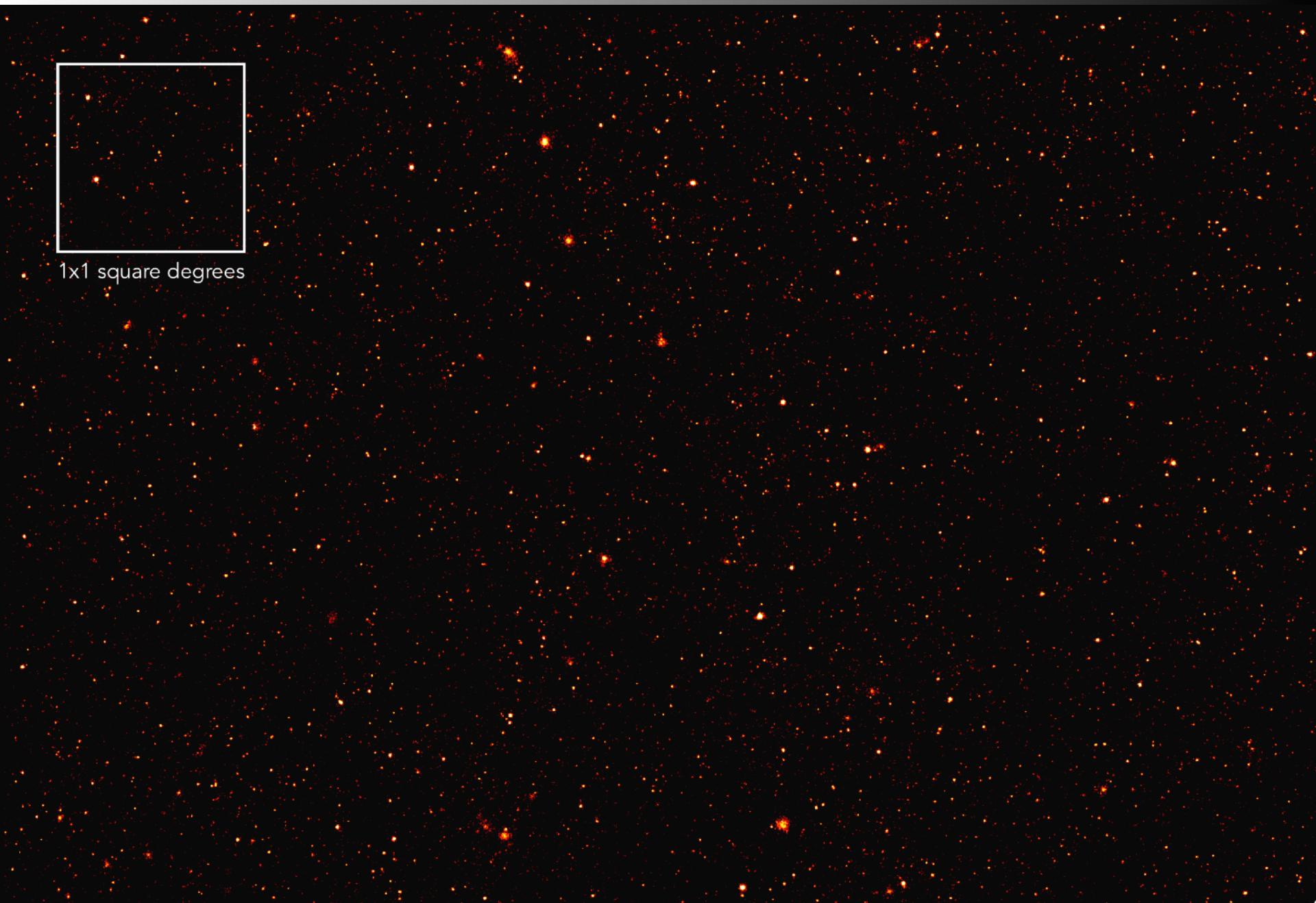


X-Ray

# Le ciel en rayons X...



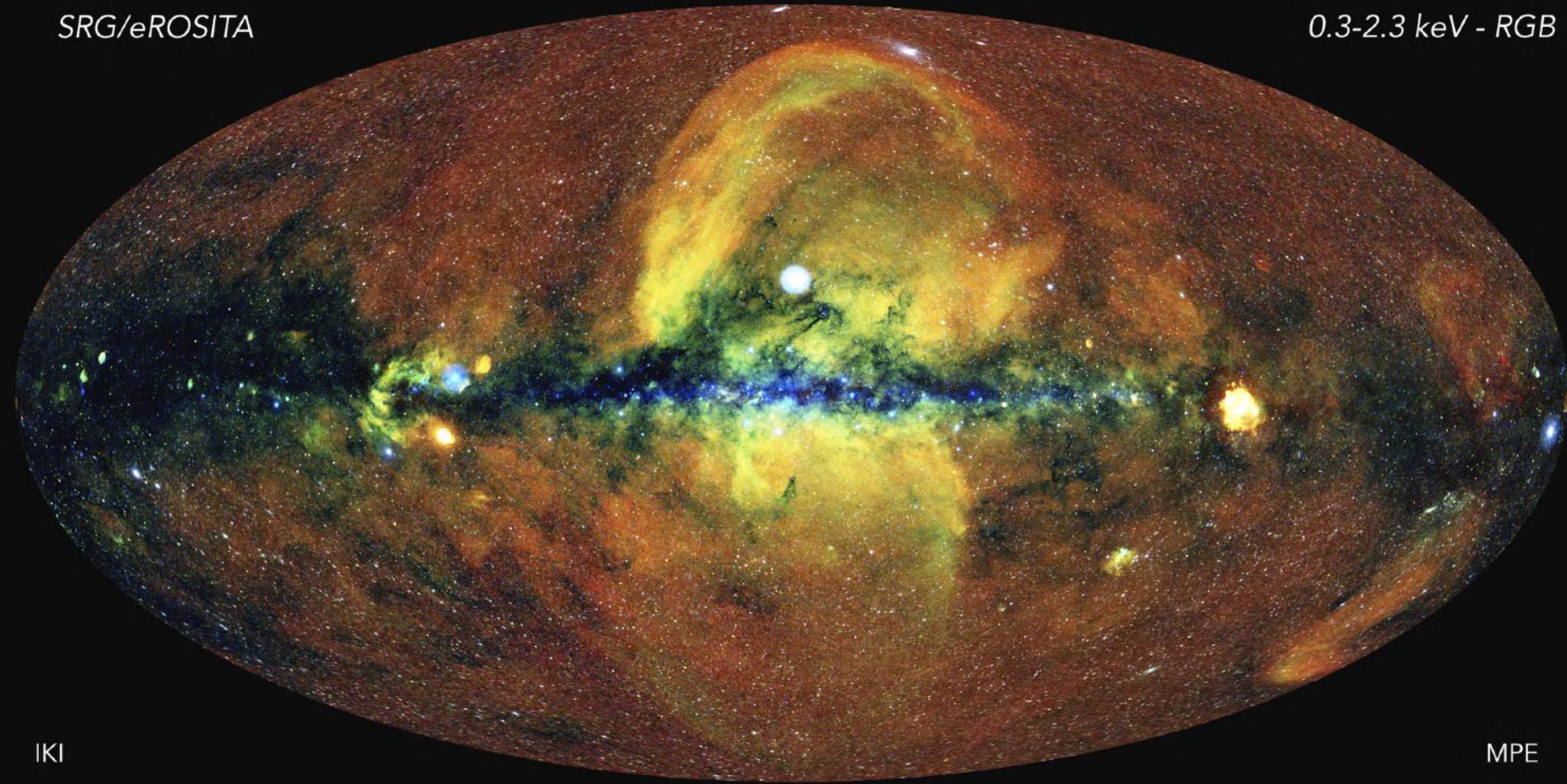
1x1 square degrees



# Le ciel en rayons X...

SRG/eROSITA

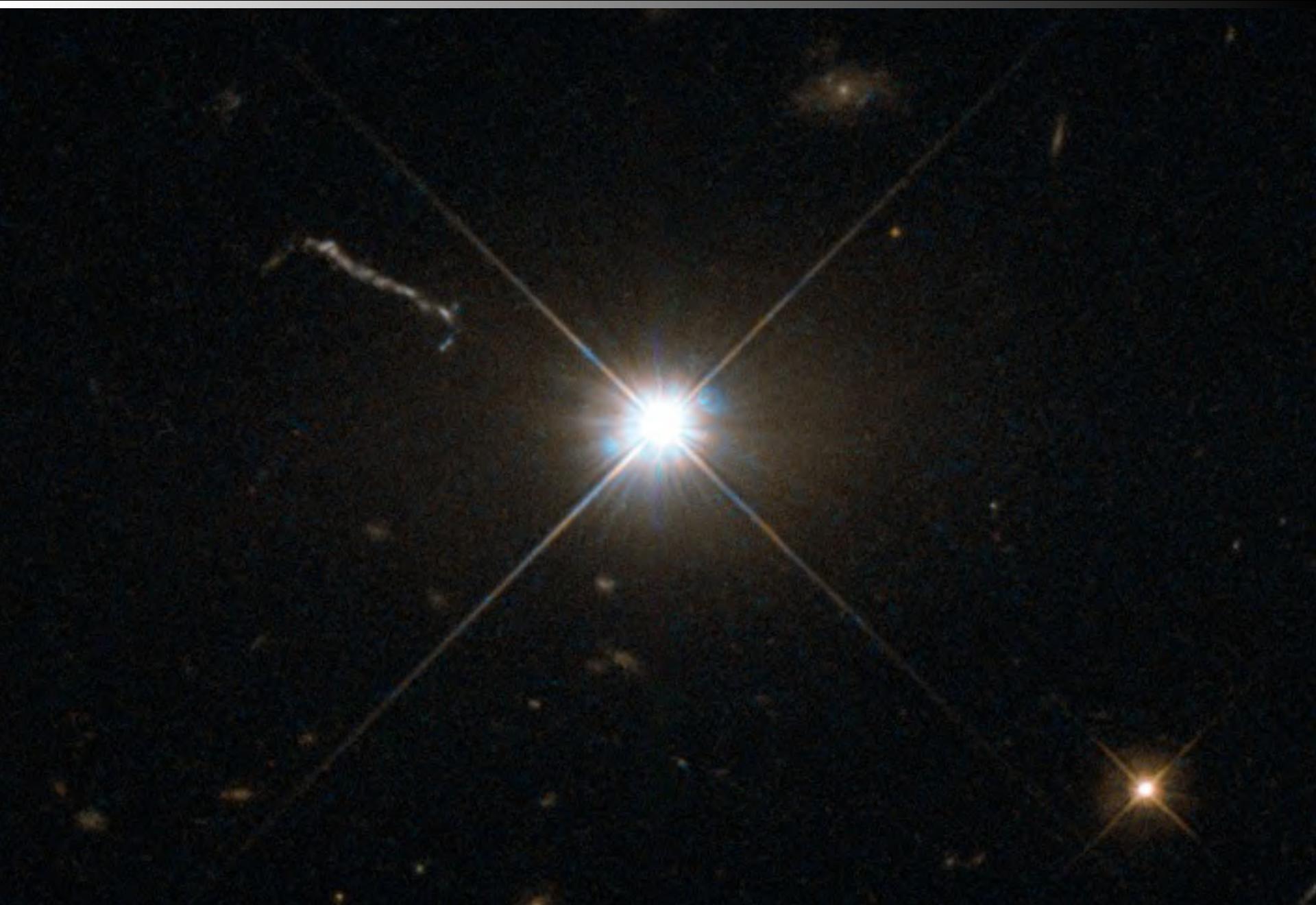
0.3-2.3 keV - RGB



IKI

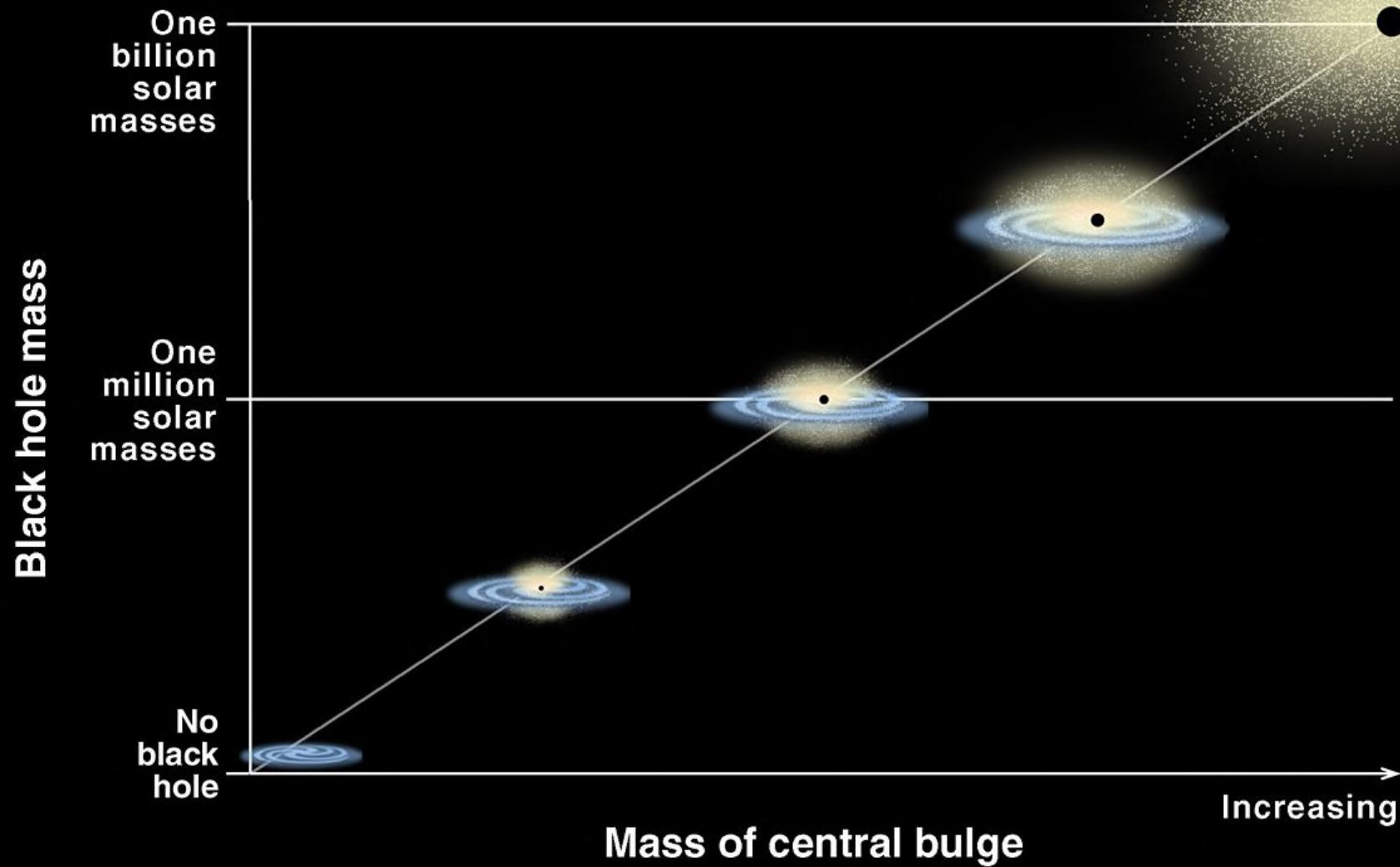
MPE

# 3C 273, un quasar typique

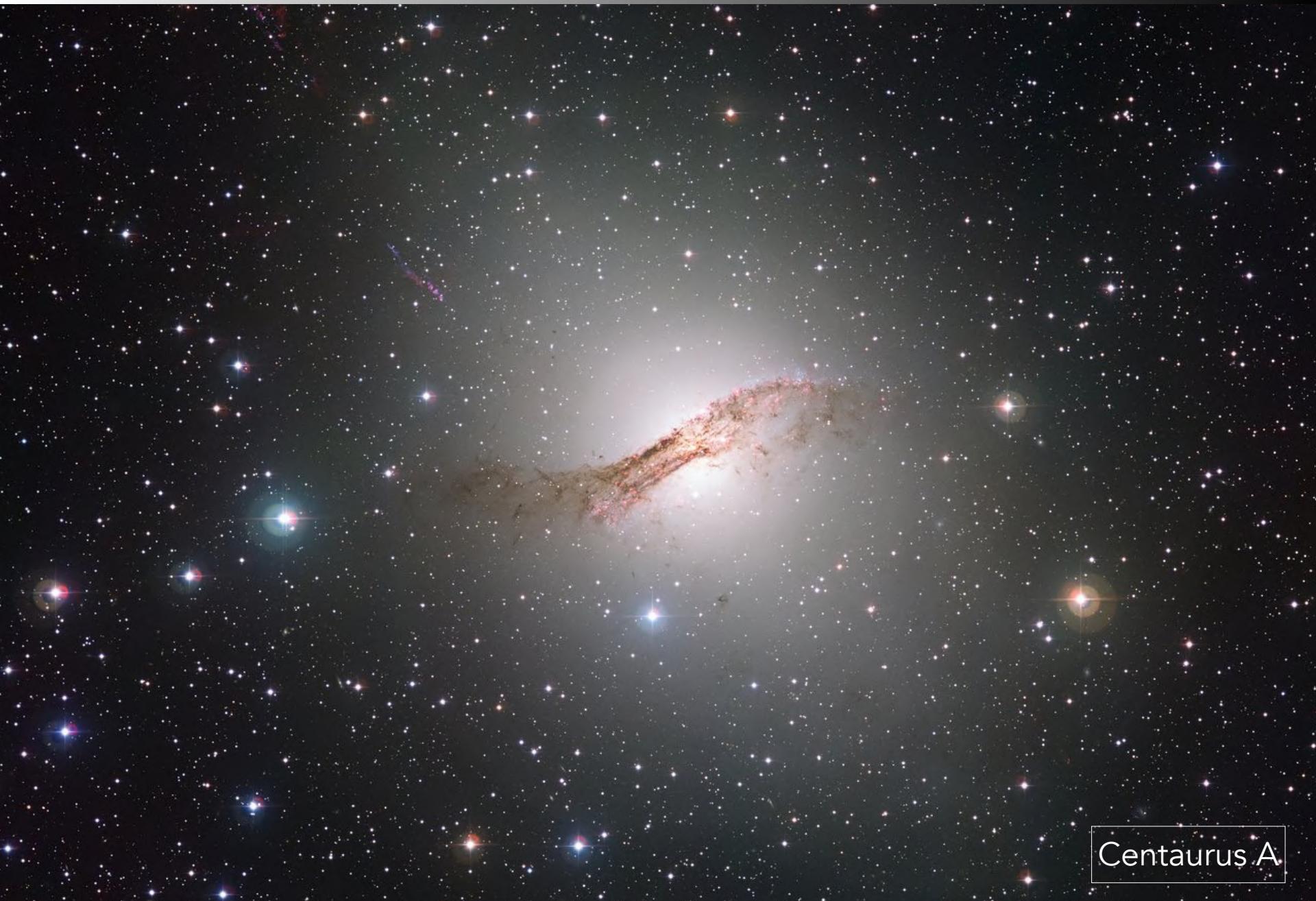


# L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

## Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass

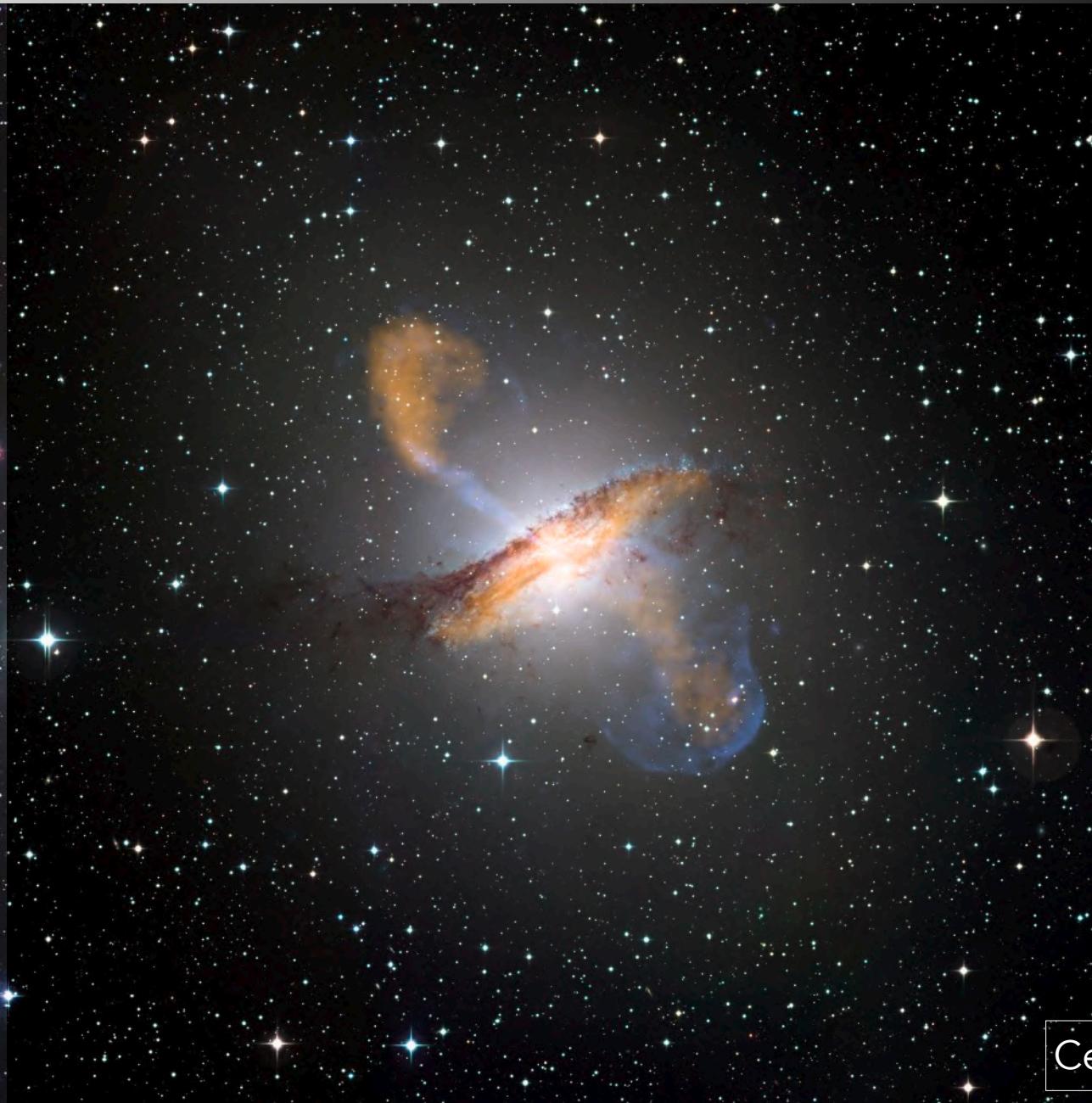


# L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



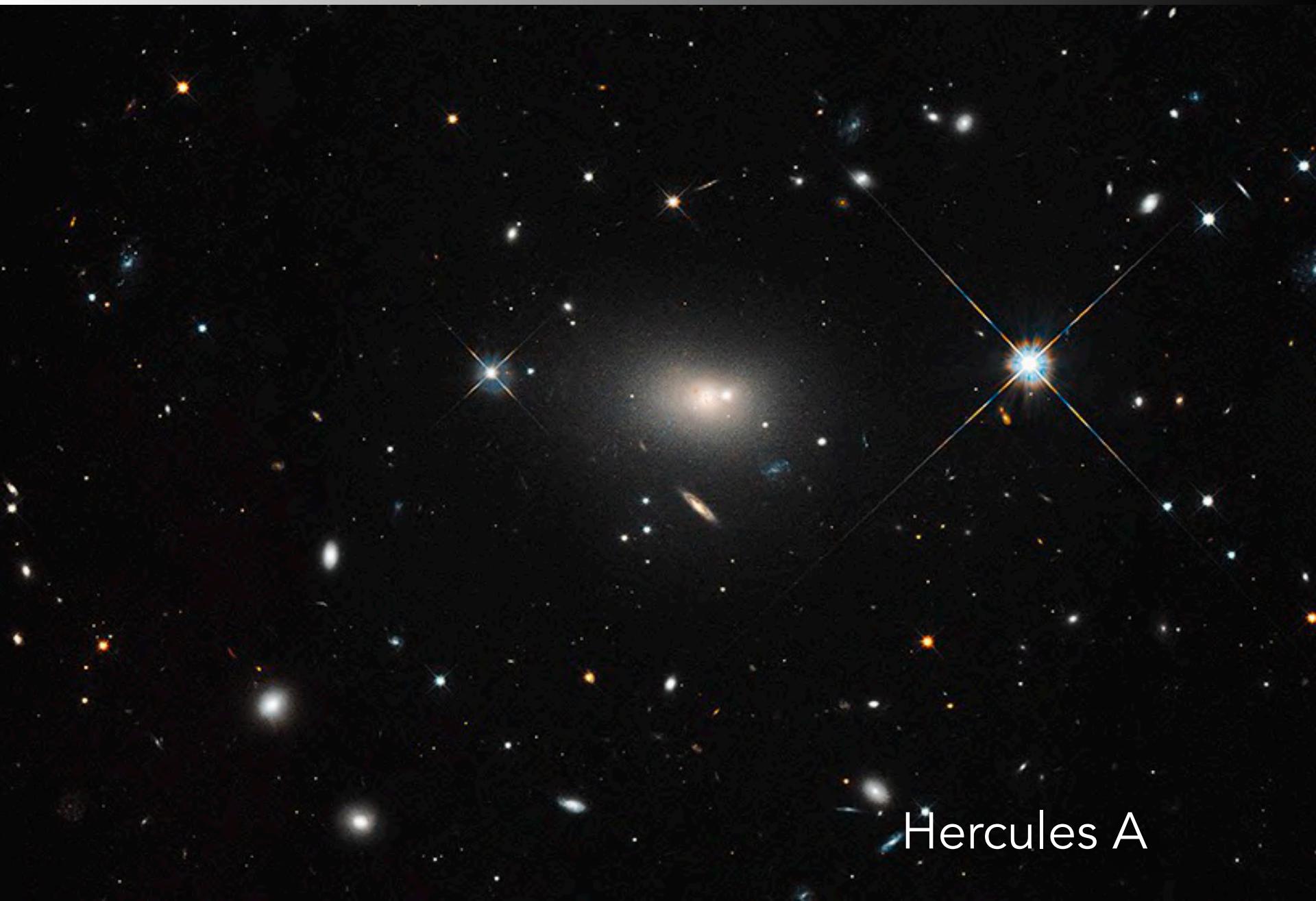
Centaurus A

# 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

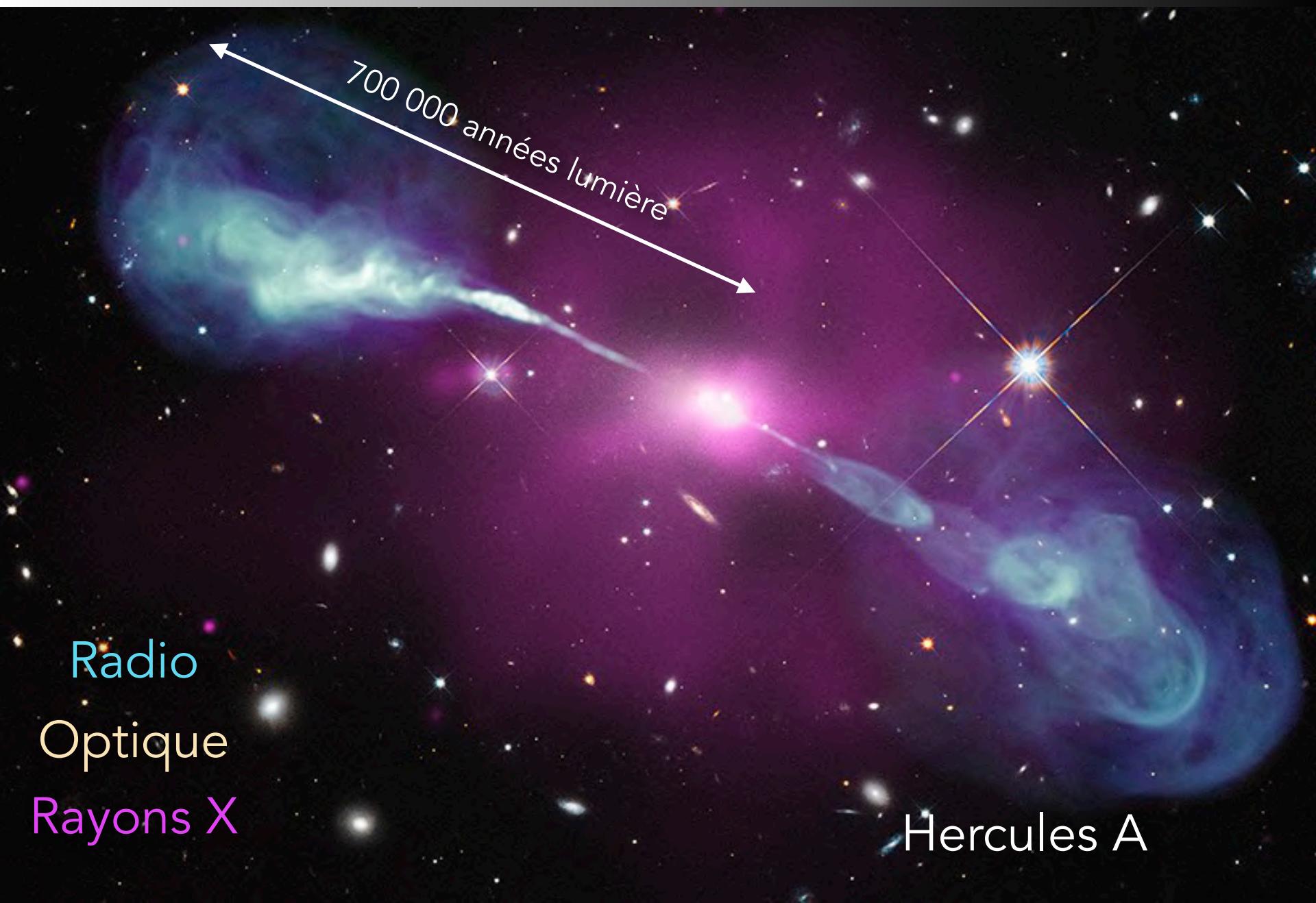
# L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



Rayons X

Hercules A

# L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



# L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

Optique

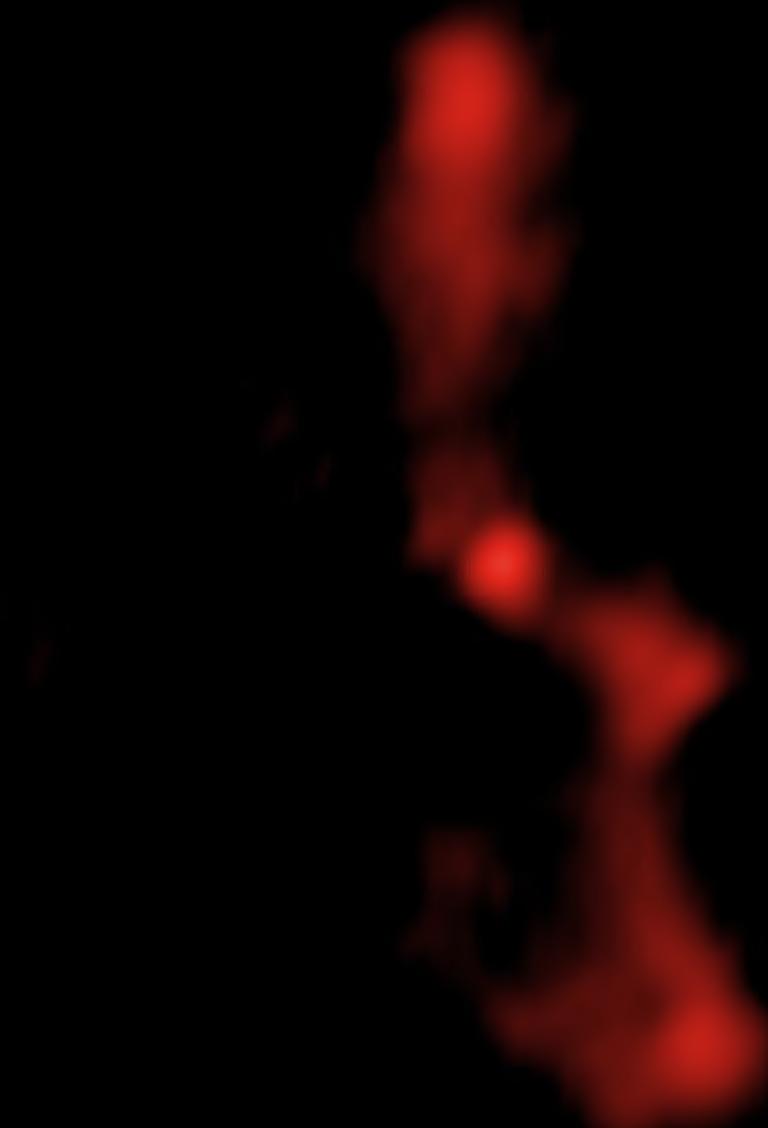


MS 0735.6+7421 (2.6 milliards d'années lumière)

# L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

Radio

Rayons X



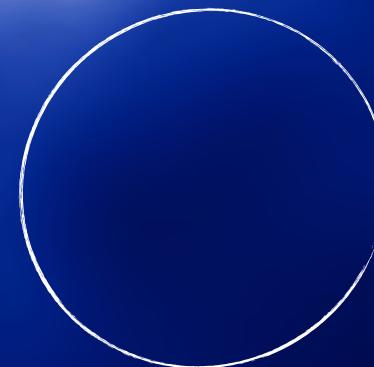
MS 0735.6+7421 (2.6 milliards d'années lumière)

# L'influence des trous noirs sur leurs galaxies

Rayons X

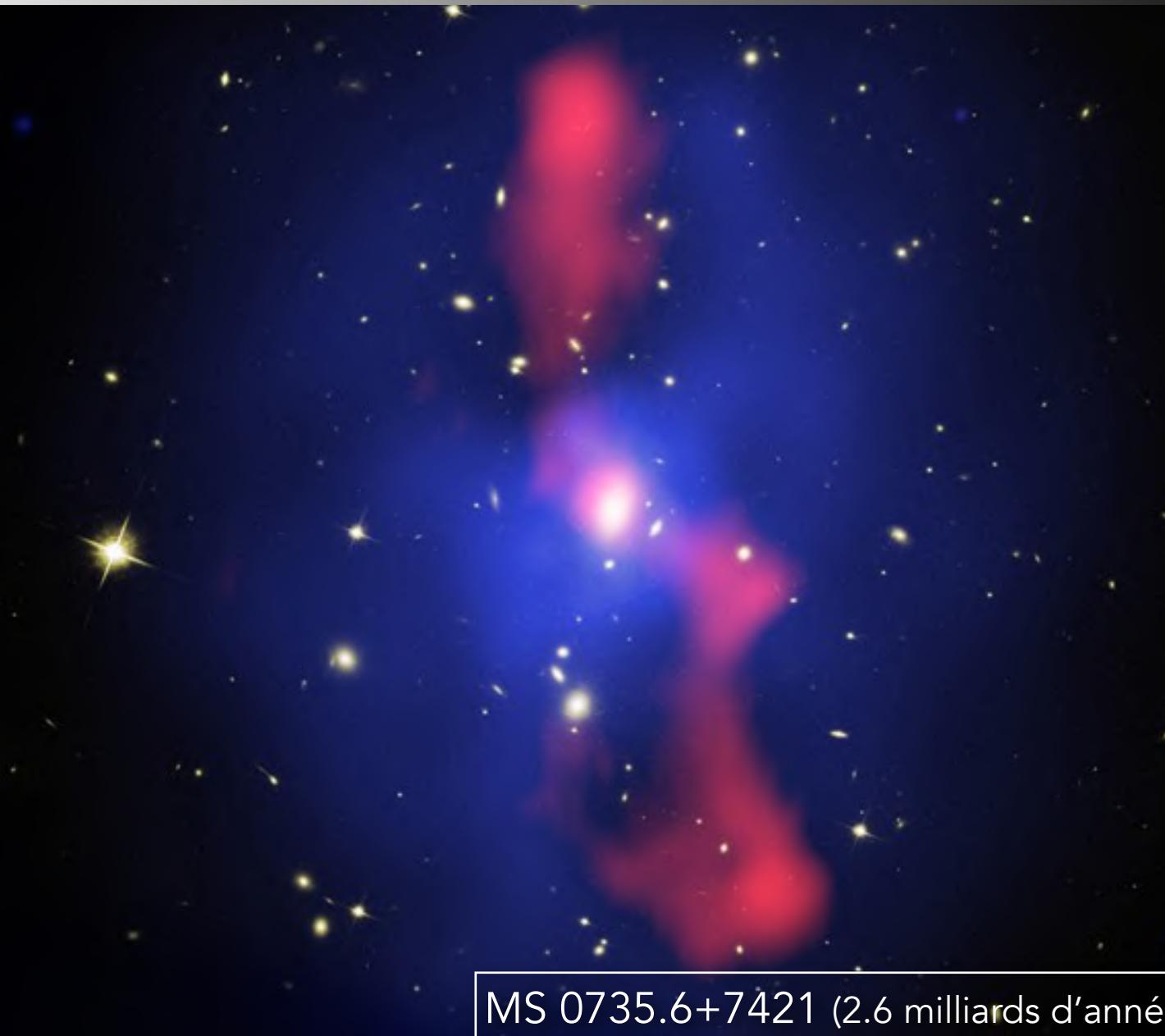


cavités!



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

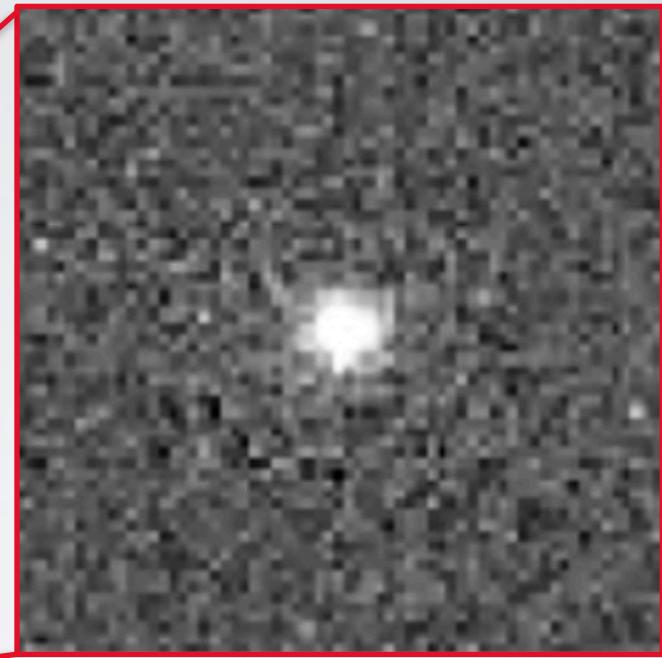
# L'influence des trous noirs sur leurs galaxies



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

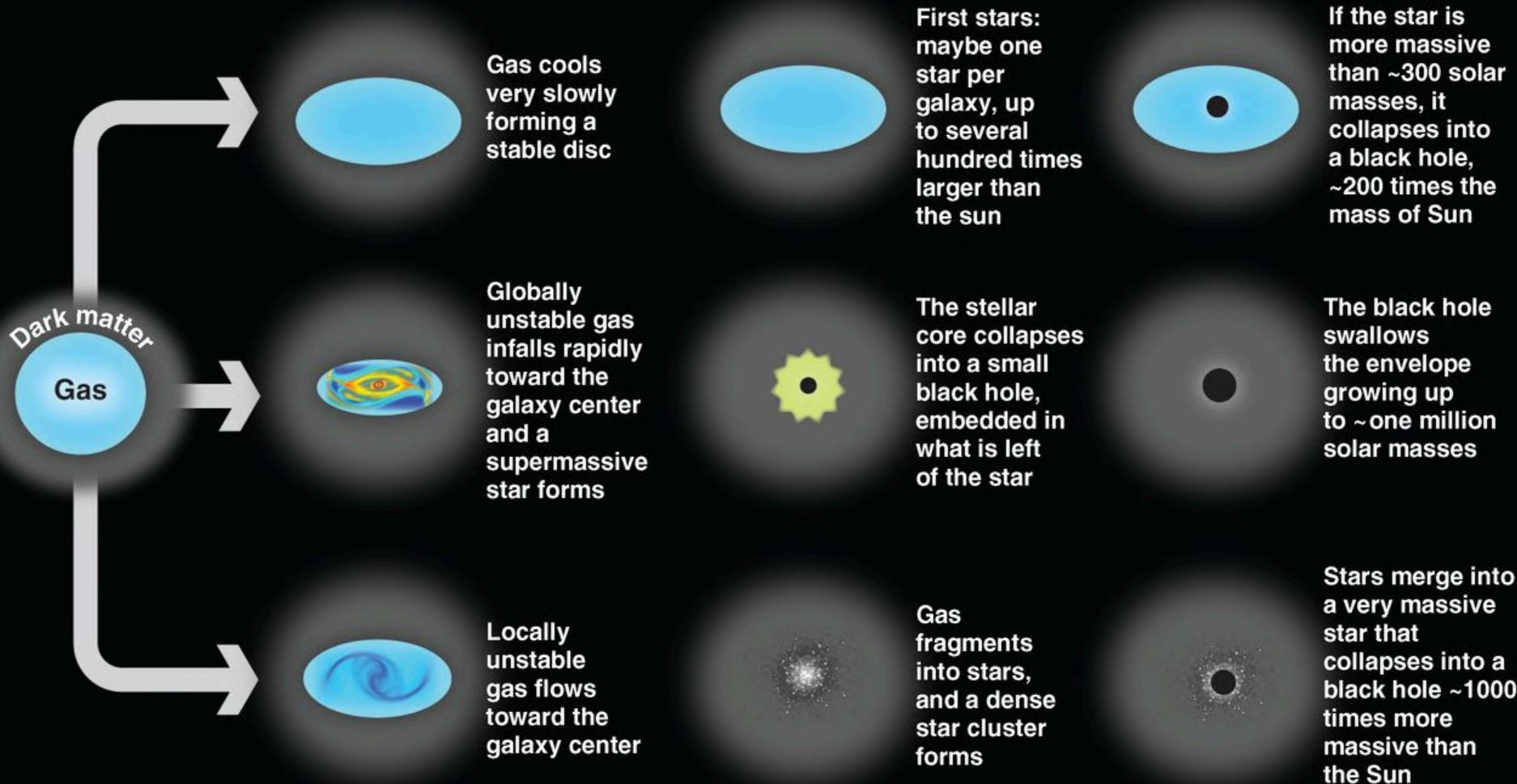
Eduardo Bañados<sup>1</sup>, Bram P. Venemans<sup>2</sup>, Chiara Mazzucchelli<sup>2</sup>, Emanuele P. Farina<sup>2</sup>, Fabian Walter<sup>2</sup>, Feige Wang<sup>3,4</sup>, Roberto Decarli<sup>2,5</sup>, Daniel Stern<sup>6</sup>, Xiaohui Fan<sup>7</sup>, Frederick B. Davies<sup>8</sup>, Joseph F. Hennawi<sup>8</sup>, Robert A. Simcoe<sup>9</sup>, Monica L. Turner<sup>9,10</sup>, Hans-Walter Rix<sup>2</sup>, Jinyi Yang<sup>3,4</sup>, Daniel D. Kelson<sup>1</sup>, Gwen C. Rudie<sup>1</sup> & Jan Martin Winters<sup>11</sup>

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 decade<sup>1</sup>. 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  $4 \times 10^{13}$  times the luminosity of the Sun and a black-hole mass of  $8 \times 10^8$  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  $10^7$  solar masses<sup>2,3</sup> or episodic hyper-Eddington accretion<sup>4,5</sup>. We see strong evidence of absorption of the spectrum of the quasar redwards of the Lyman  $\alpha$  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 Explorer<sup>6</sup> (WISE), the United Kingdom Infrared Telescope Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS) Large Area Survey<sup>7</sup> and the DECam Legacy Survey (DECaLS; <http://legacysurvey.org/decamls>). At redshifts of more than about 7, residual neutral hydrogen in the intergalactic medium (IGM) absorbs virtually all flux bluewards of the

# Formation



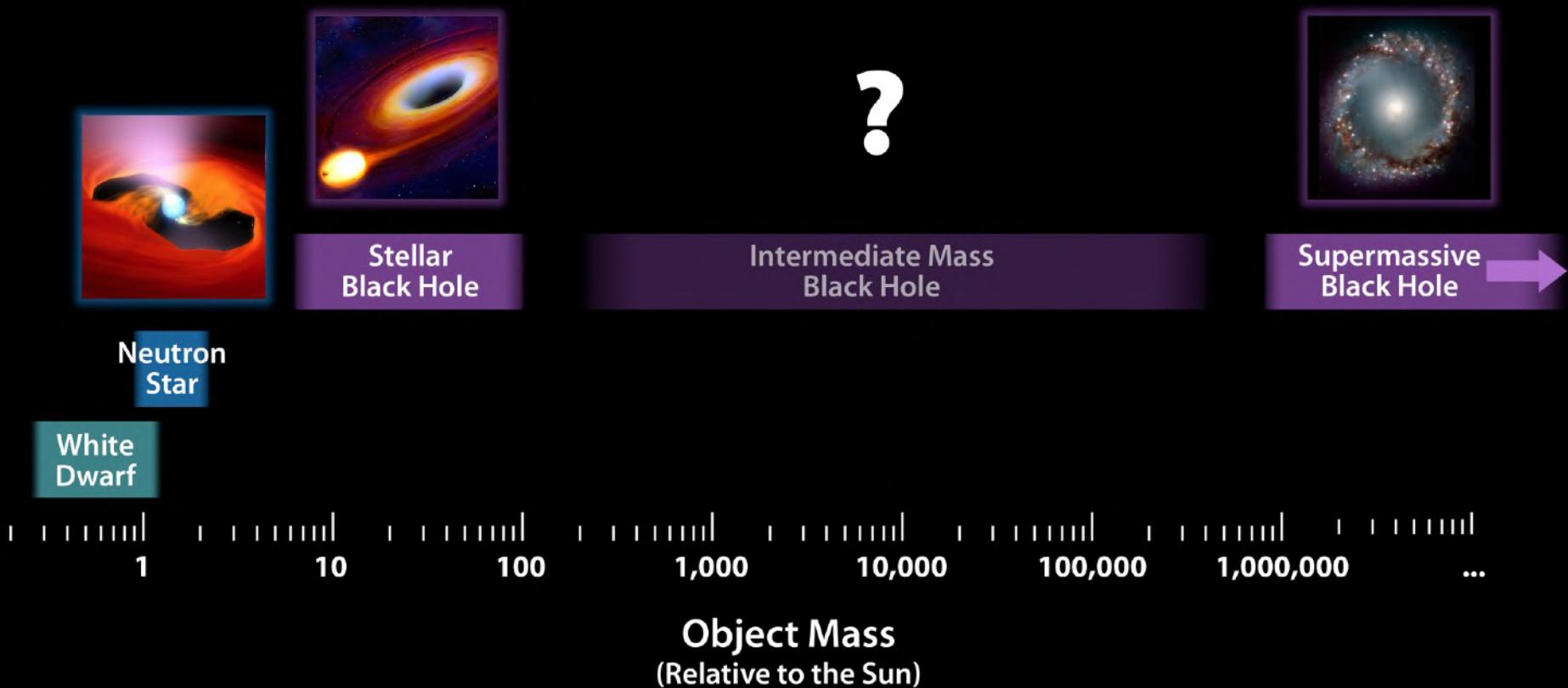
Comment les trous noirs supermassifs se sont-ils formés?



3) Trou noir de masse intermédiaire

# Existent-ils?

## Observed Mass Ranges of Compact Objects

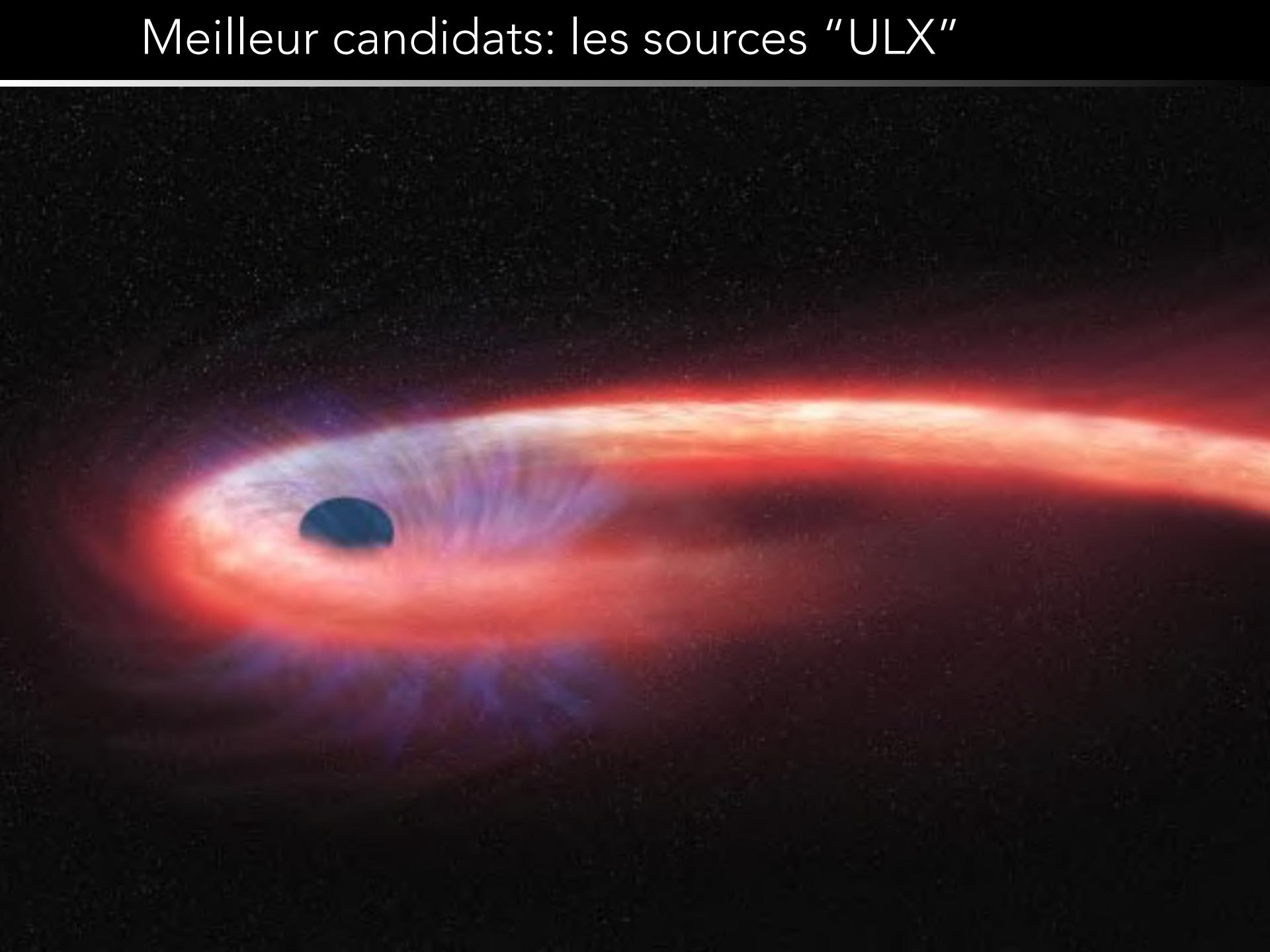


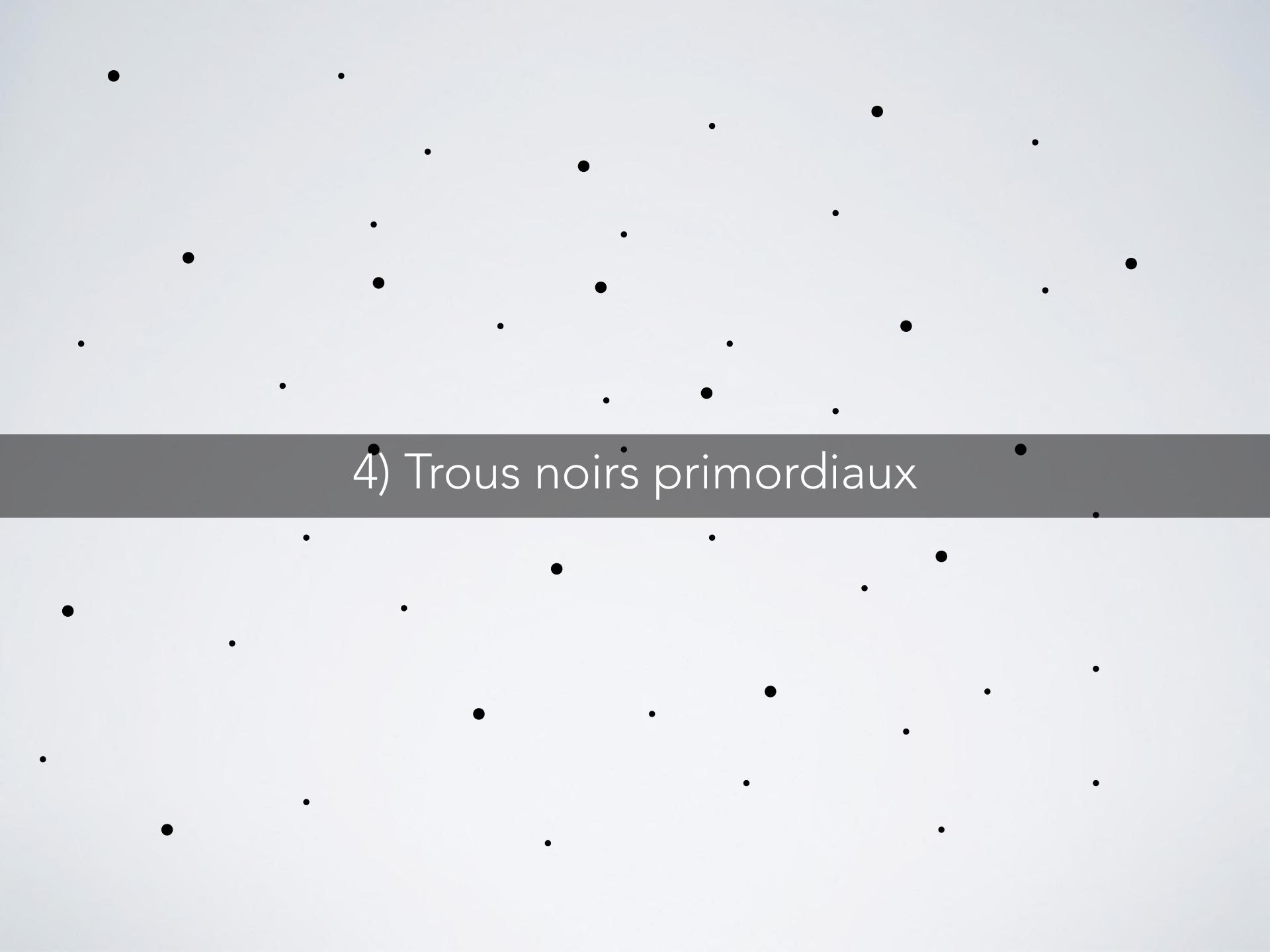
# Meilleur candidats: les sources "ULX"

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



# Meilleur candidats: les sources "ULX"





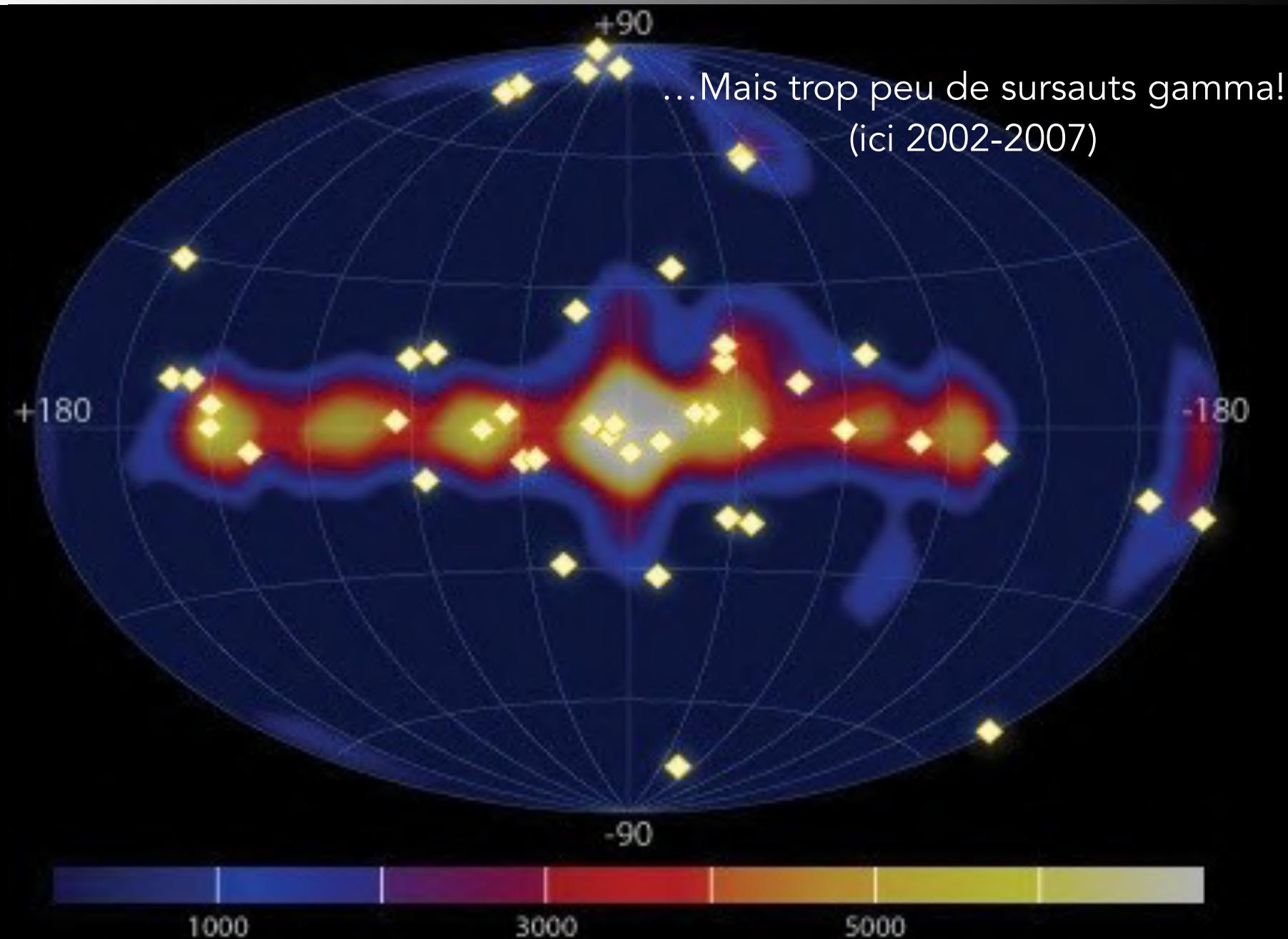
4) Trous noirs primordiaux

## 4) Trous noirs primordiaux

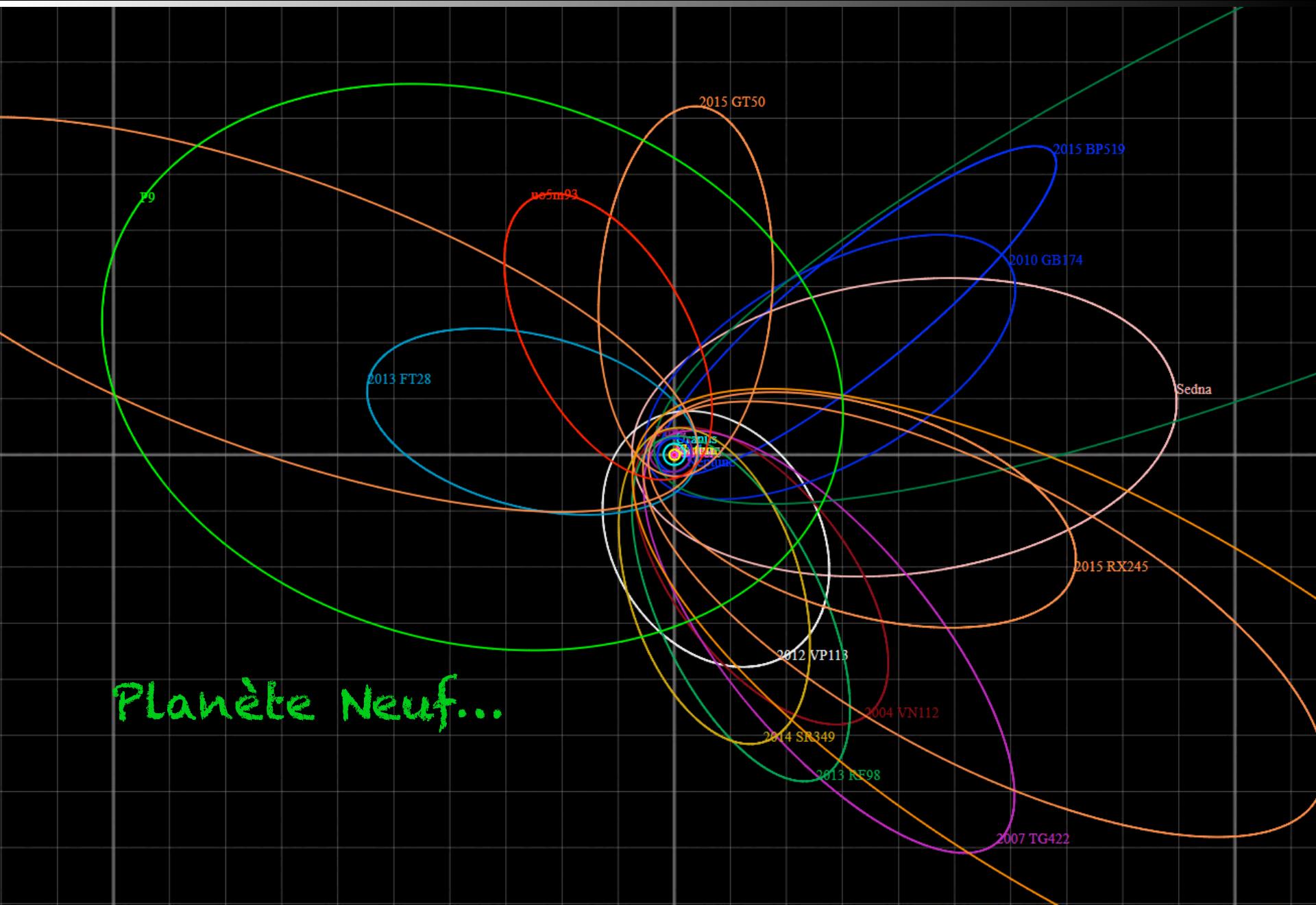
- Potentiellement formés juste après le Big Bang...
- Leurs tailles et nombre devraient dépendre de l'inflation cosmique
- Devraient émettre des sursauts gammas!



#### 4) Trous noirs primordiaux



# Une neuvième planète?



# 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 Scholtz<sup>1</sup> and James Unwin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Particle Physics Phenomenology, Durham University, Durham DH1 3LE, United Kingdom*  
<sup>2</sup>*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

---

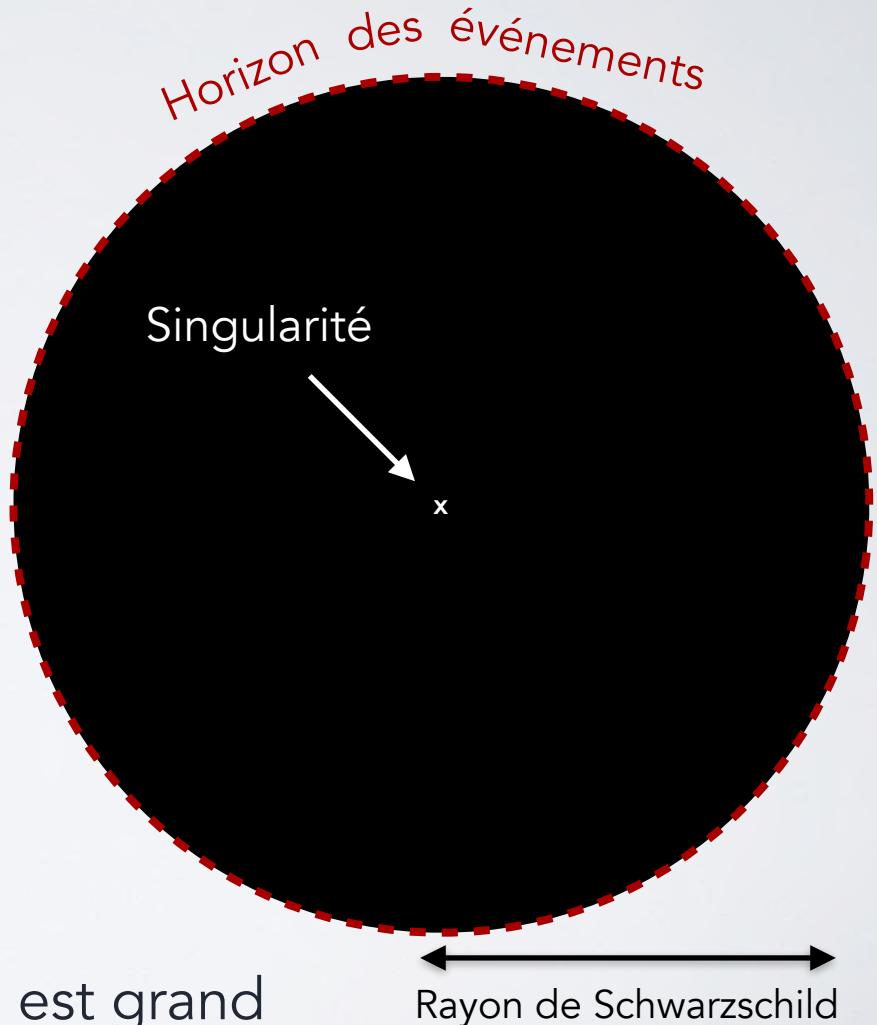
# 3. trous noirs et physique fondamentale

---

# Anatomie d'un trou noir

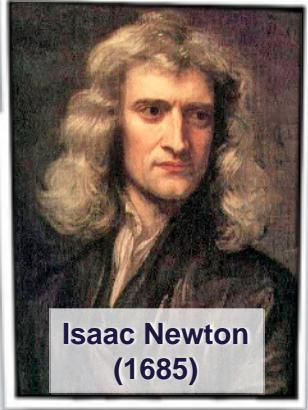
Rayon de Schwarzschild:

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



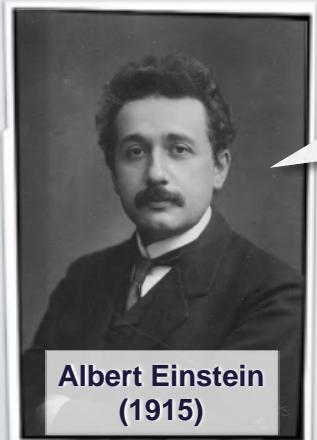
**Plus** un trou noir est massif,  
**plus** son rayon de Schwarzschild est grand

# Relativité générale



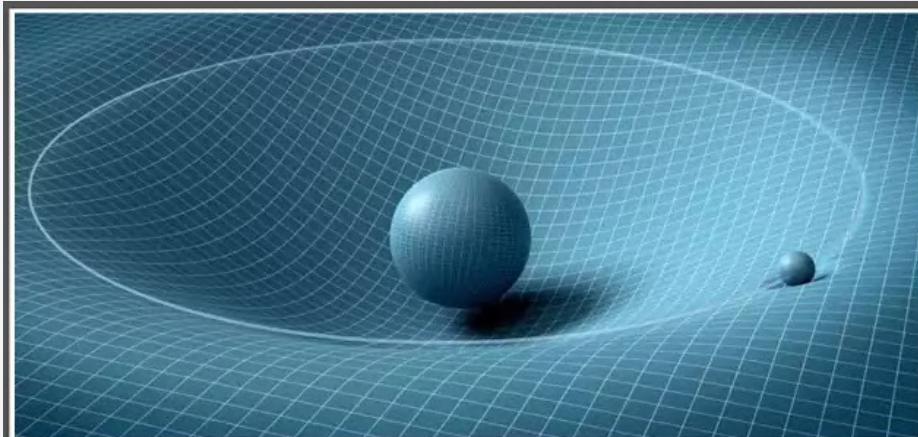
Isaac Newton  
(1685)

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

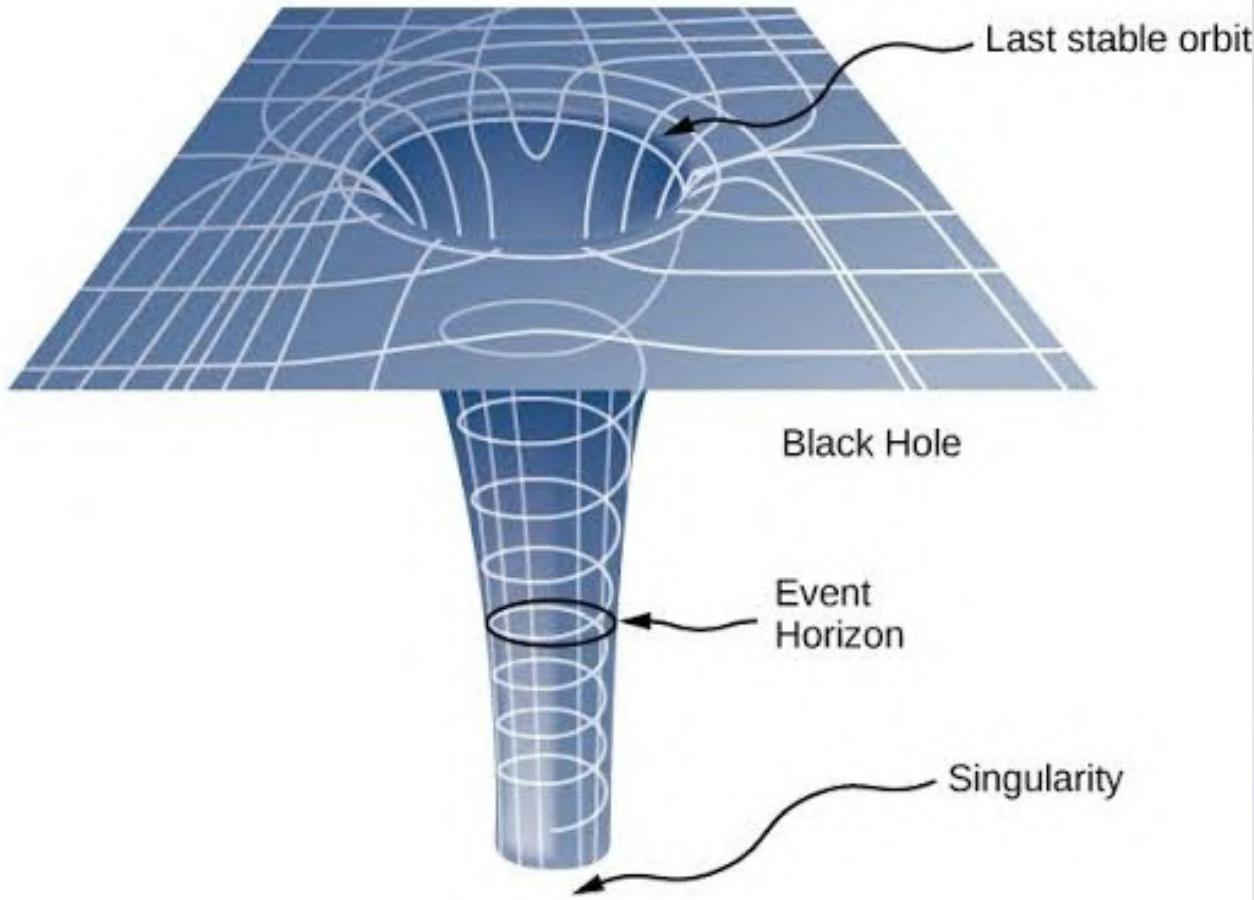
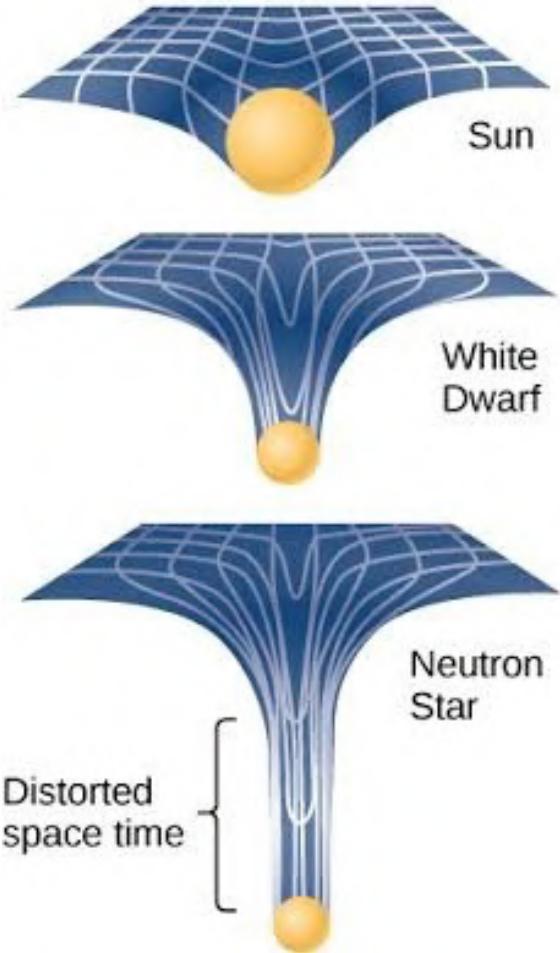


Albert Einstein  
(1915)

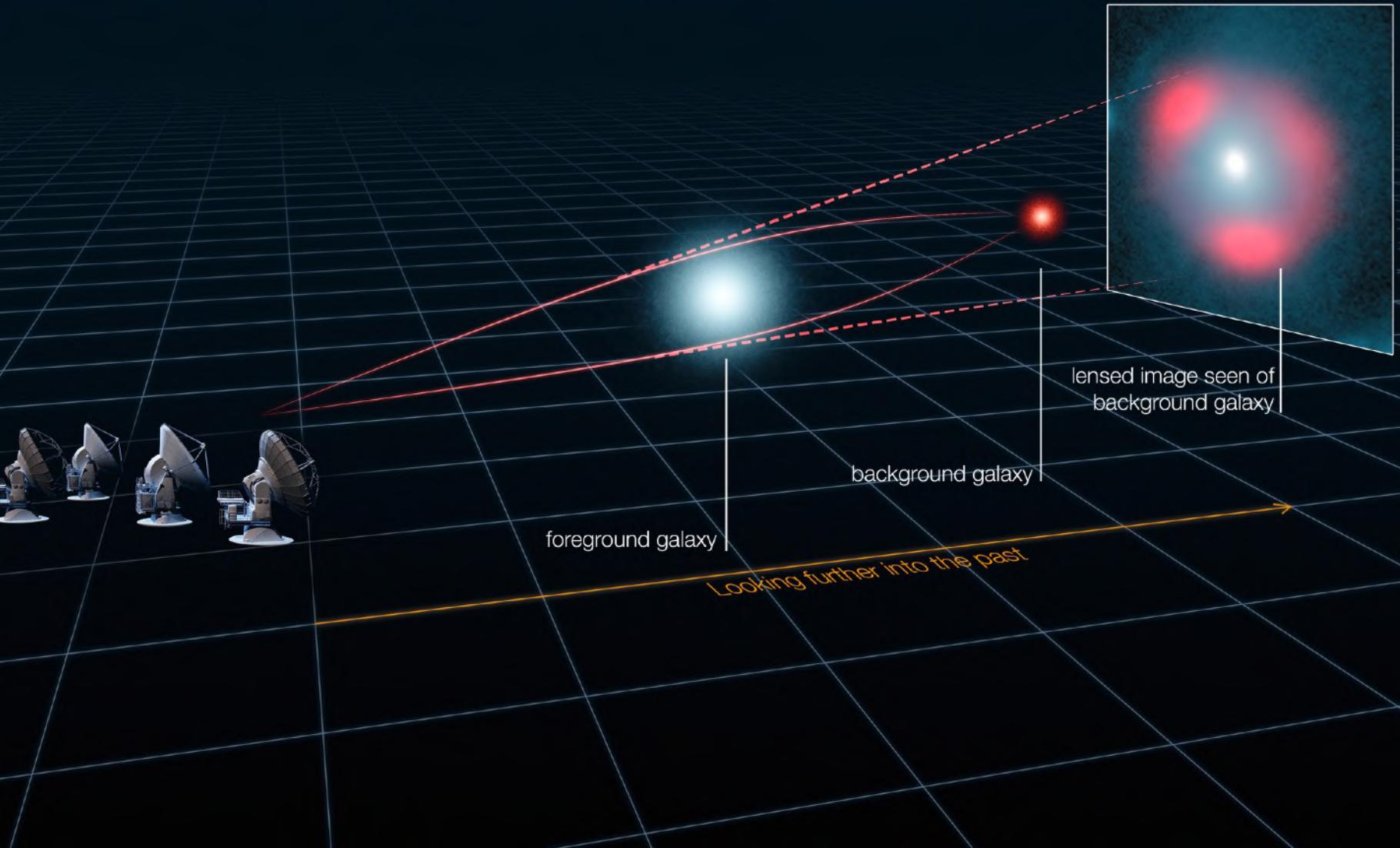
La gravité est une distortion de l'espace-temps causé par un corps massif qui “attire” (le long de géodésiques) **tout** autre corps (massif ou non).



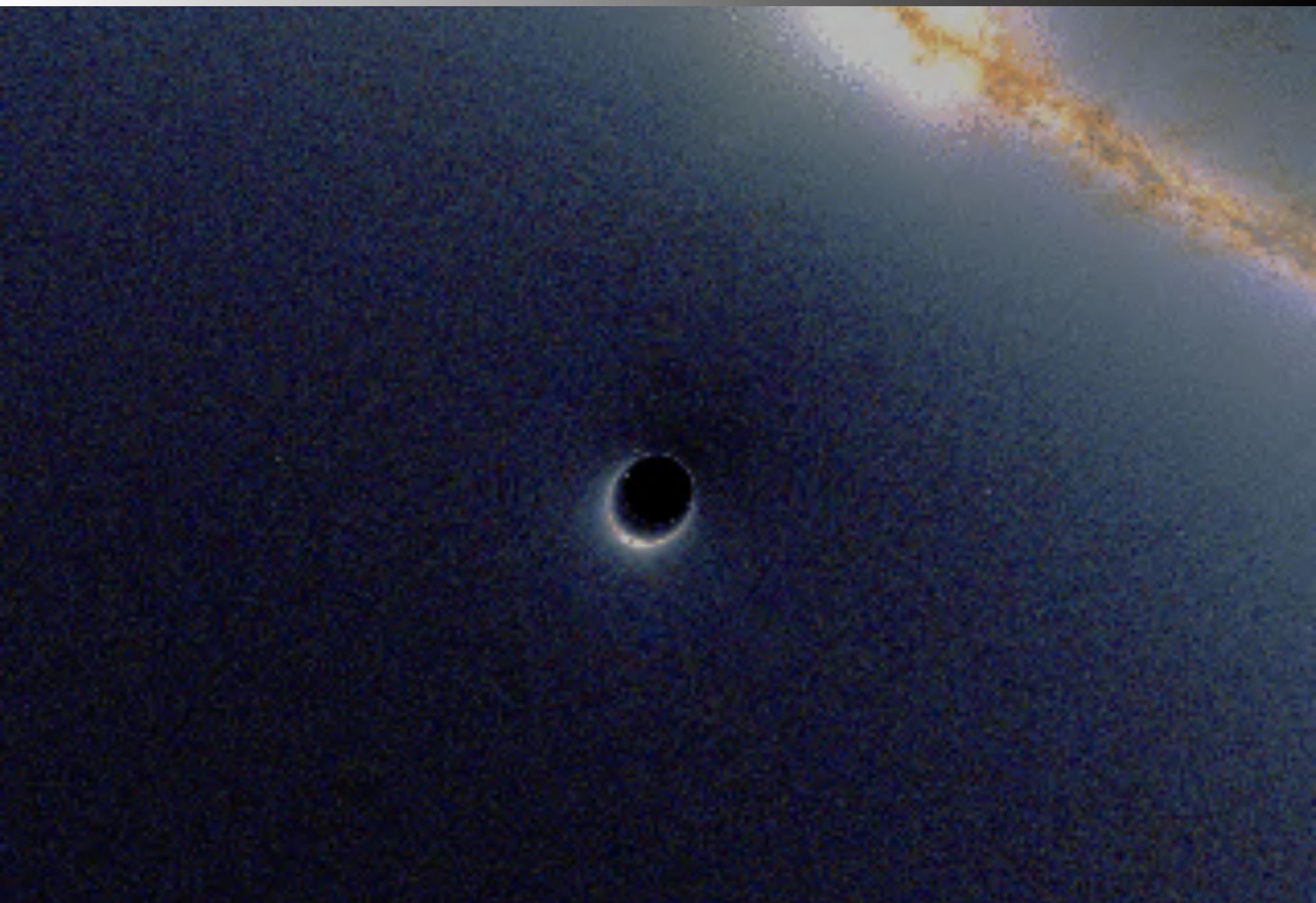
# Relativité générale



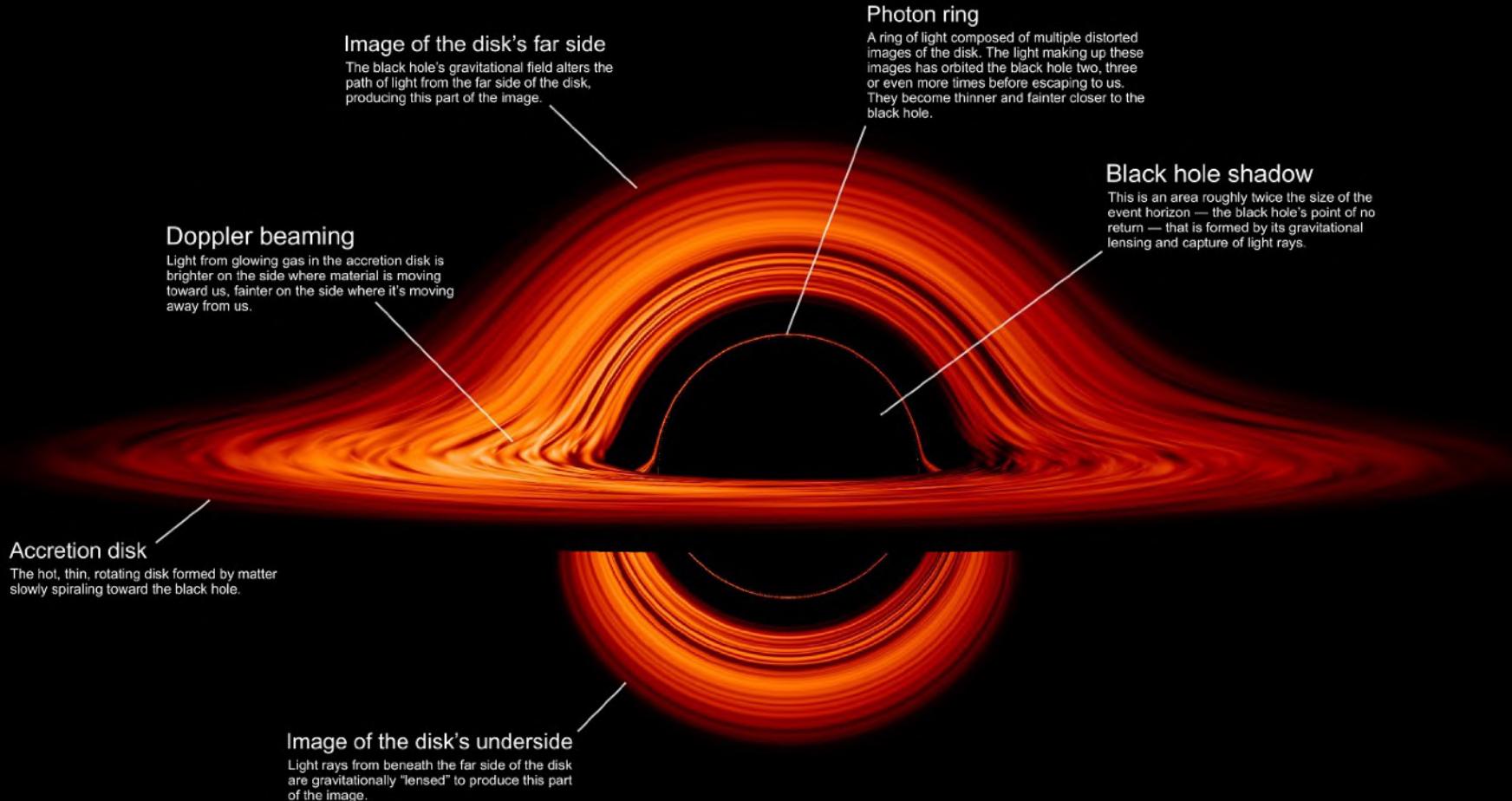
# Relativité générale



# Relativité générale



# Relativité générale



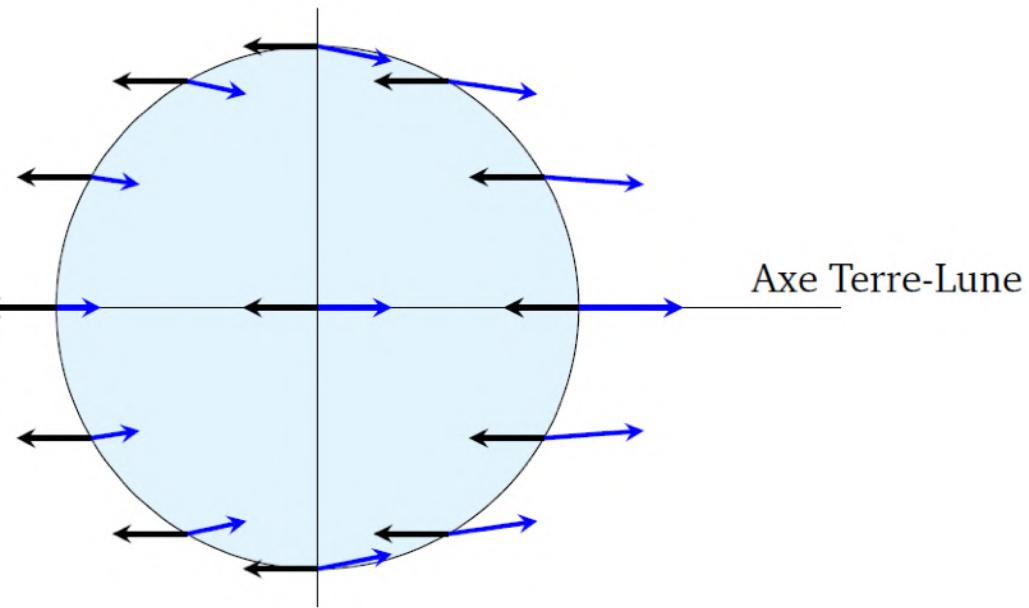
# Spaghettification



Axe Terre-Lune

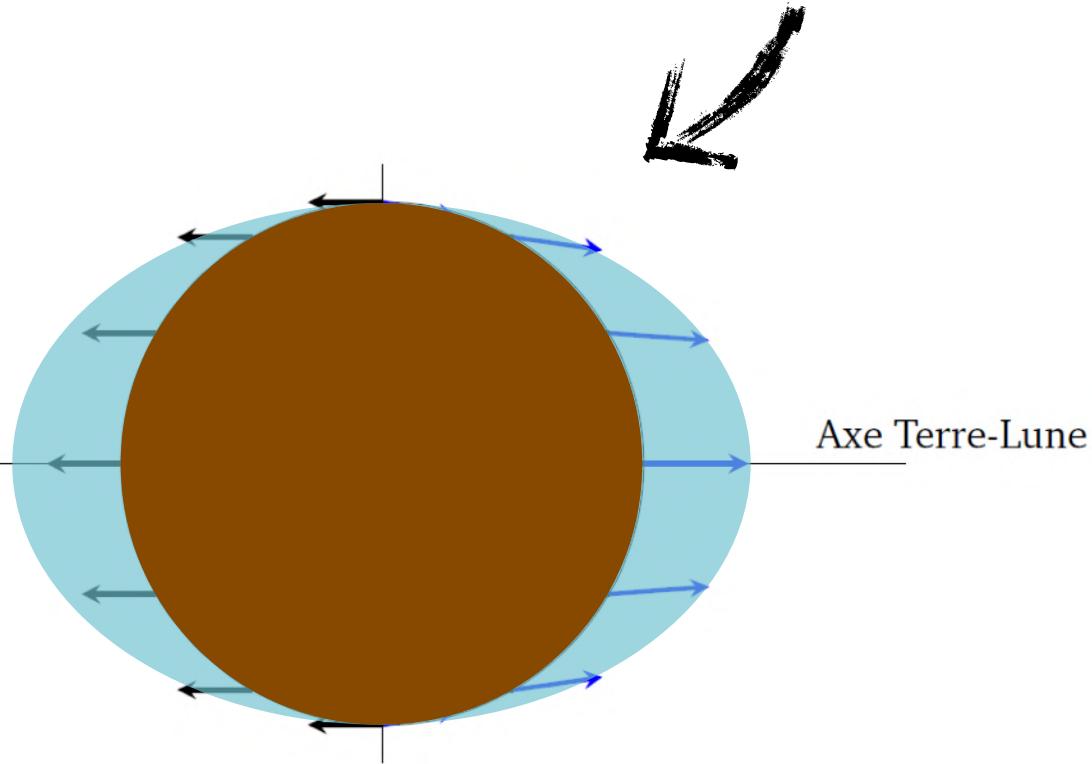


# Spaghettification

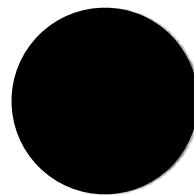
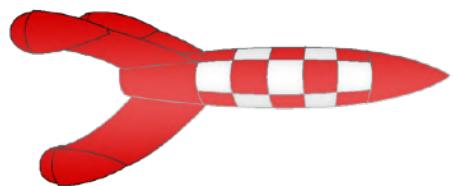


# Spaghettification

Effet de marée

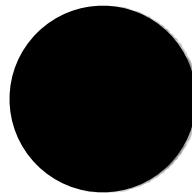


# Spaghettification

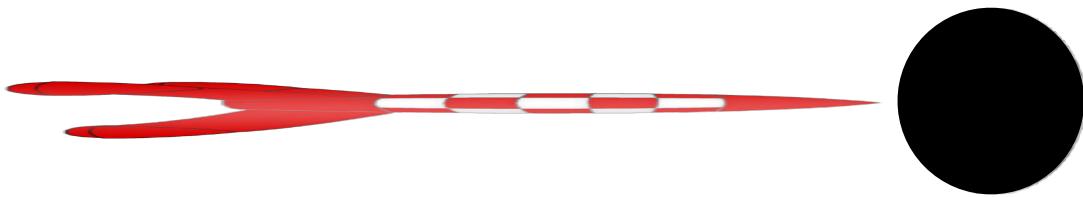


Trou noir stellaire

# Spaghettification

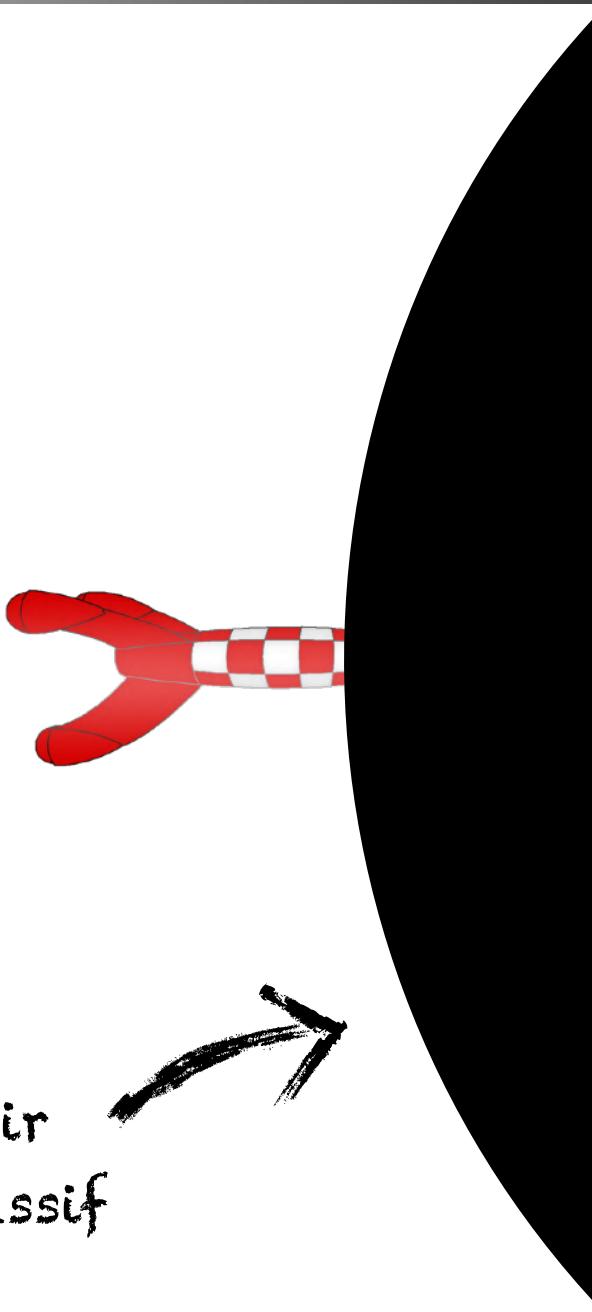


# Spaghettification



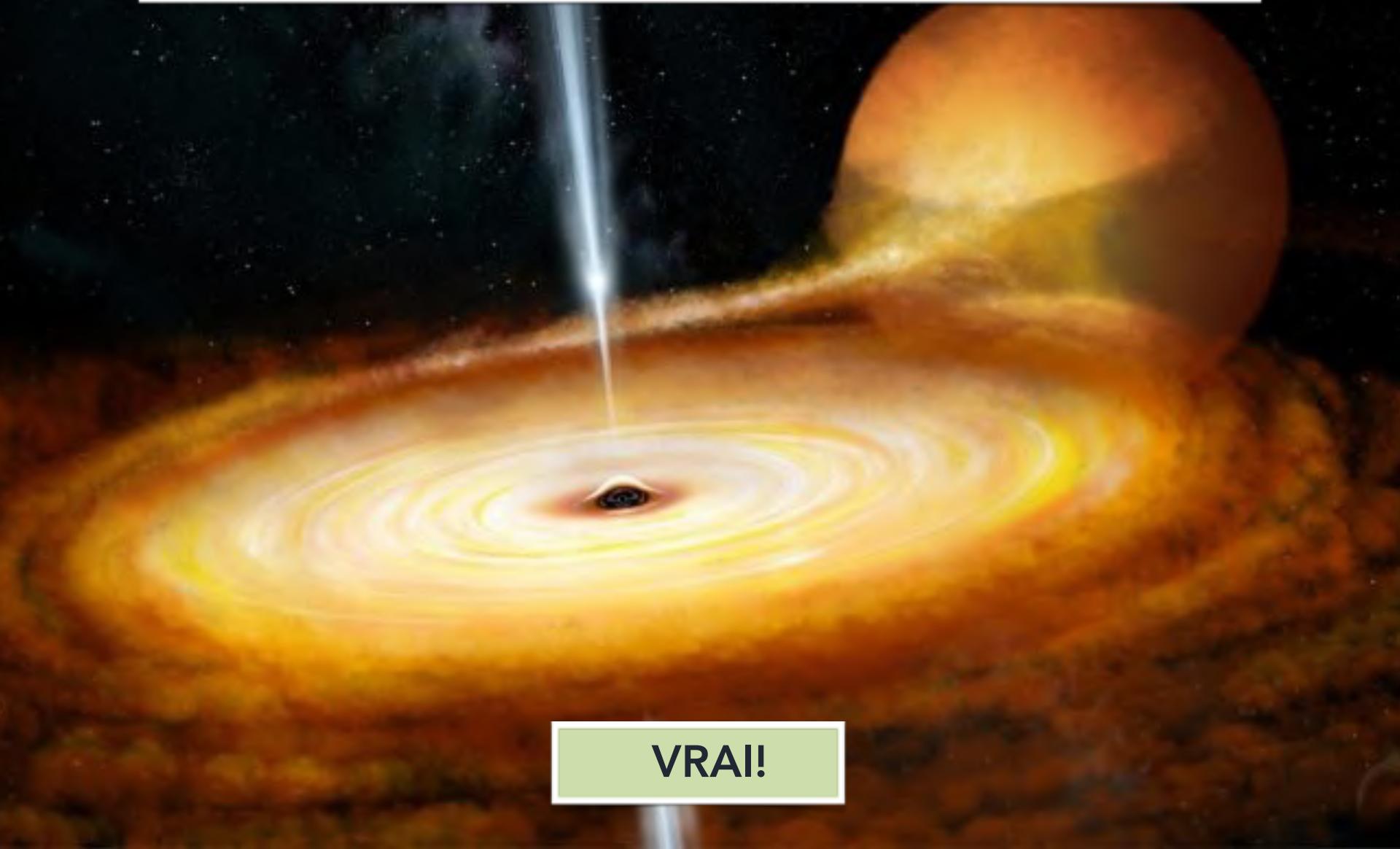
# Spaghettification

Trou noir  
supermassif



# Vrai ou faux?

4) Les trous noirs peuvent disparaître.



**VRAI!**

# Évaporation



(vidé)

# Évaporation



(vidé)

# Évaporation



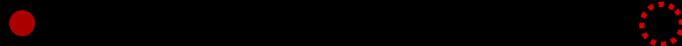
(vidé)

# Évaporation

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

...donc émettant de l'énergie...

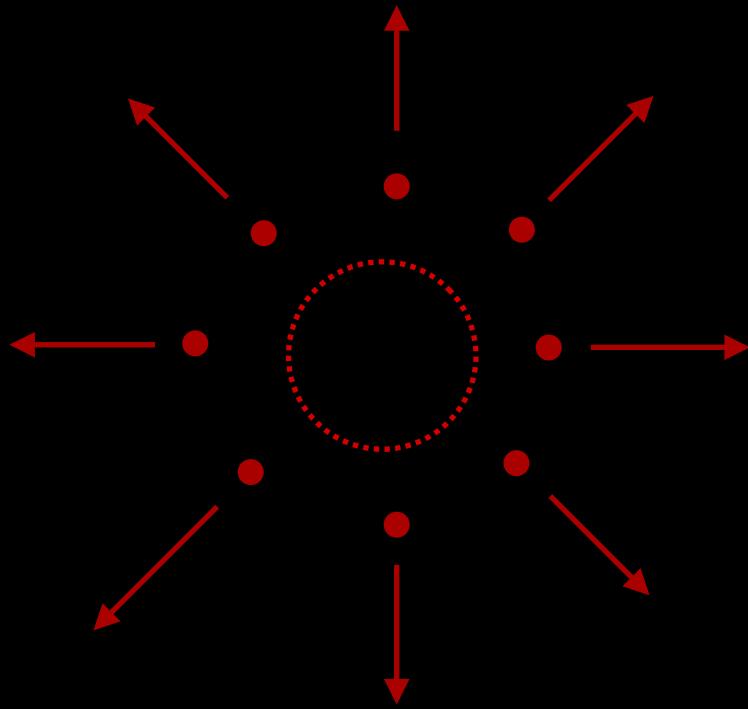
...donc perdant de la masse!



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

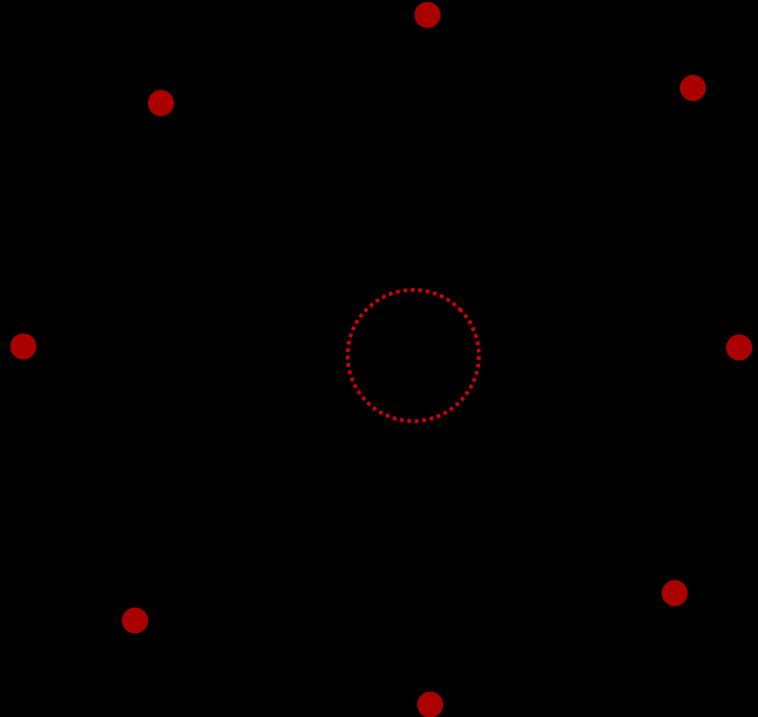
(vidé)

# Évaporation



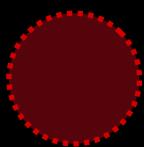
(vidé)

# Évaporation



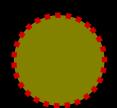
(vidé)

# Évaporation



(vidé)

# Évaporation



(vidé)

# Évaporation



(vidé)

# Évaporation

(vidé)

# Évaporation

## Rayonnement de Hawking

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



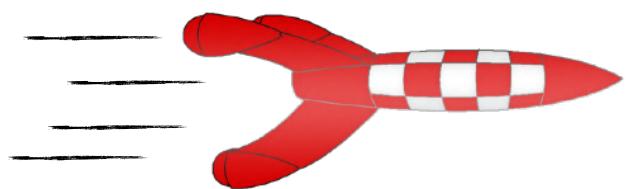
Stephen Hawking

"Température" associée au trou noir

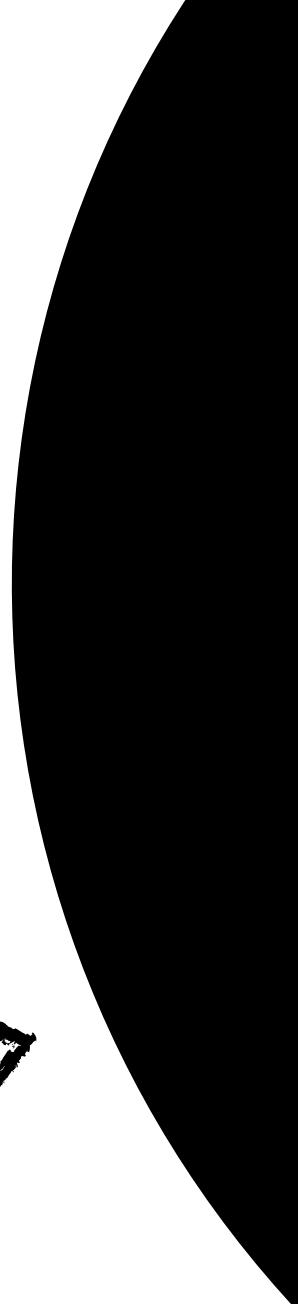
(plus un trou noir est petit, plus il est  
"chaud", donc "bleu")

(vidé)

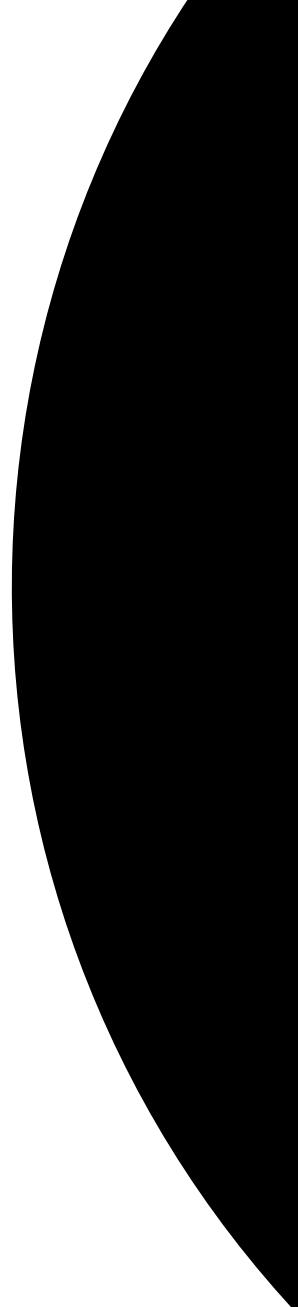
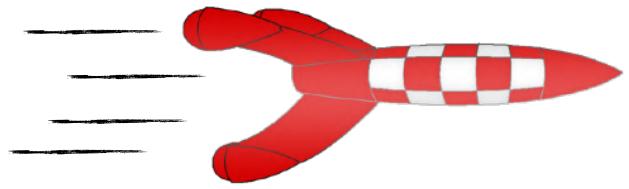
# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



Trou noir  
supermassif



# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?

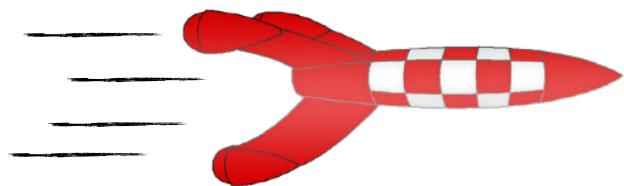
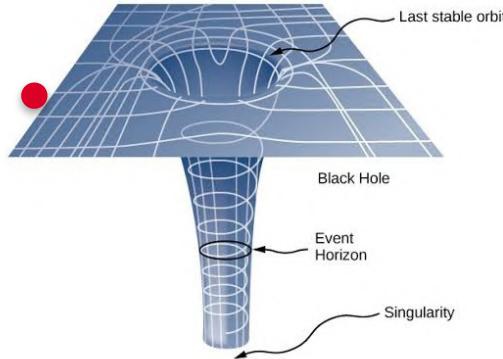


# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



- 046 250

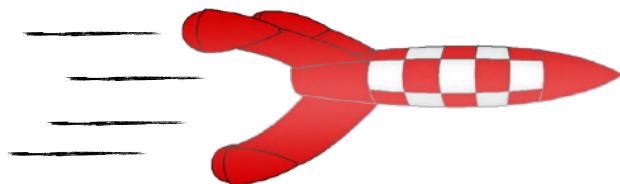
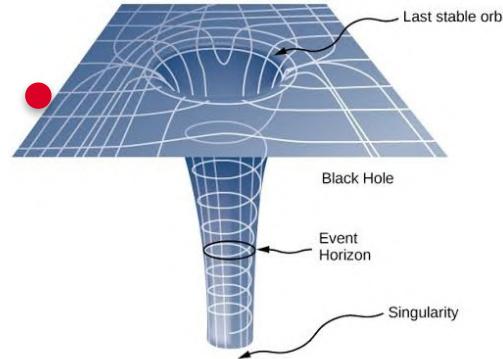
# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



Trou noir  
supermassif



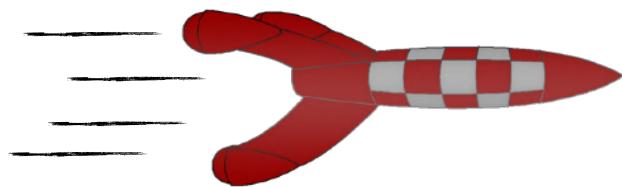
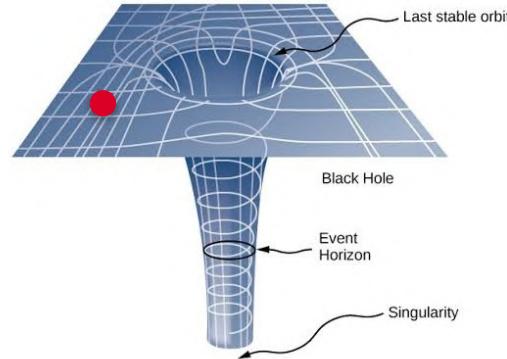
# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



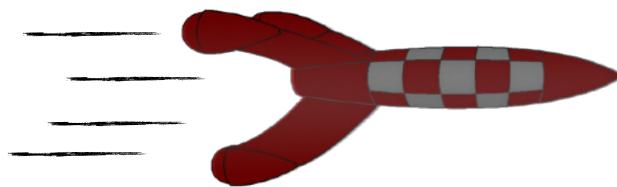
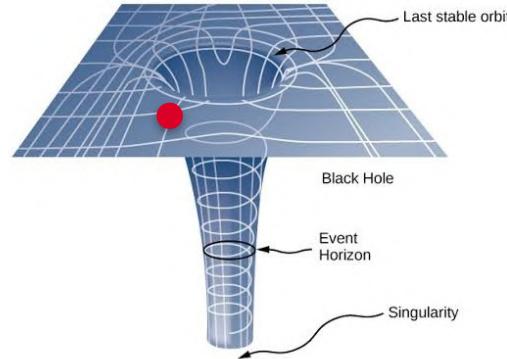
Trou noir  
supermassif



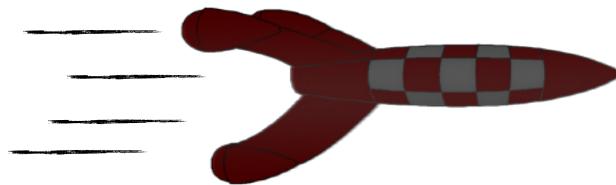
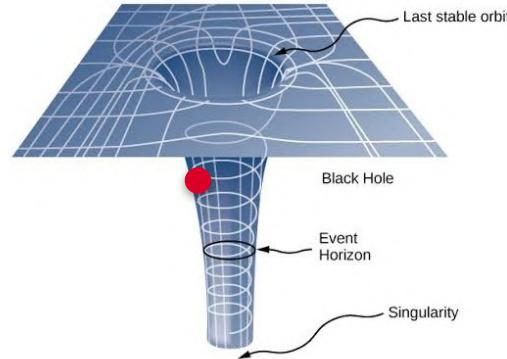
# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



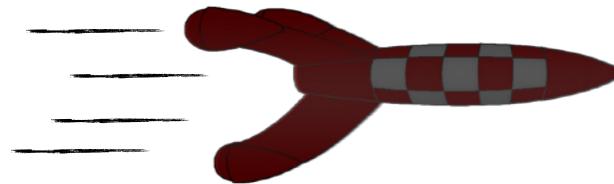
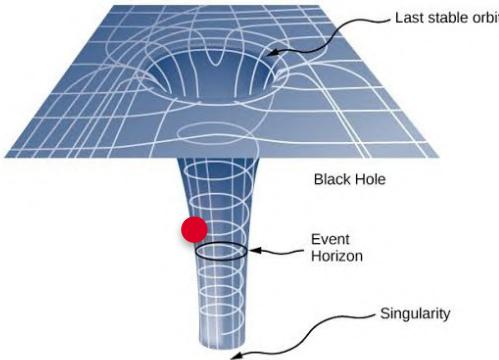
# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



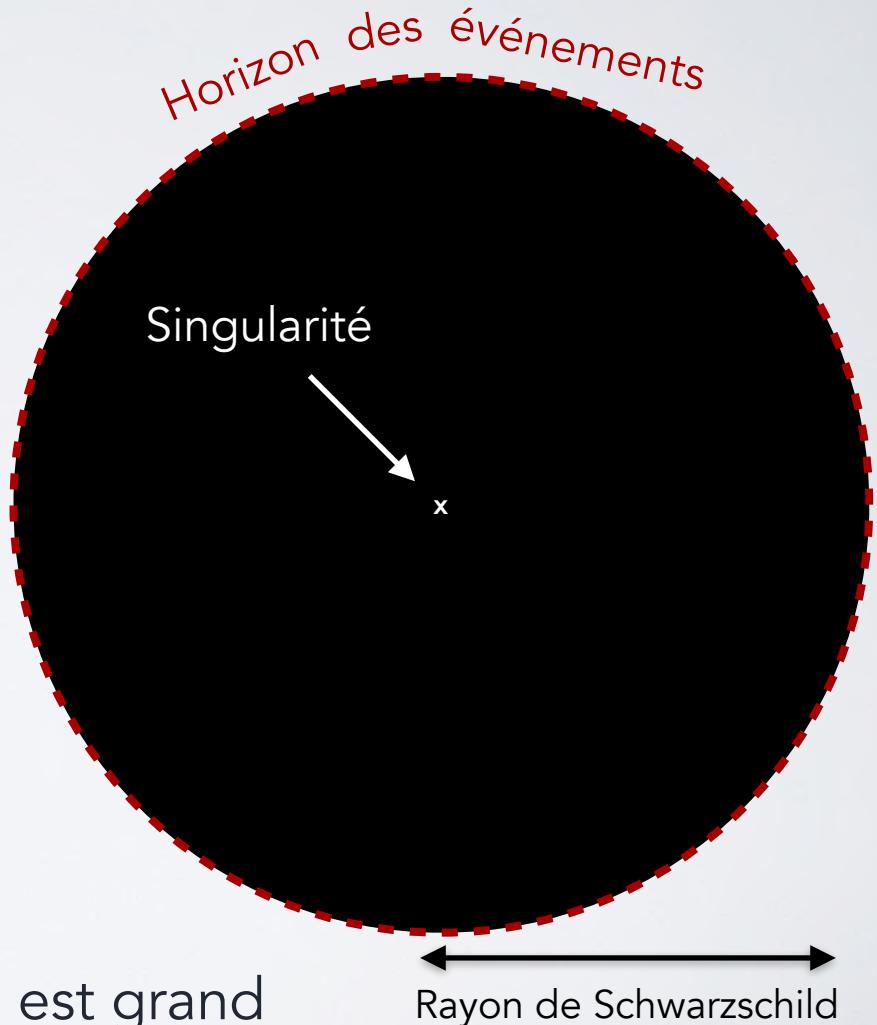
# Voyage vers un trou noir: acteur ou spectateur?



# Singularité

Rayon de Schwarzschild:

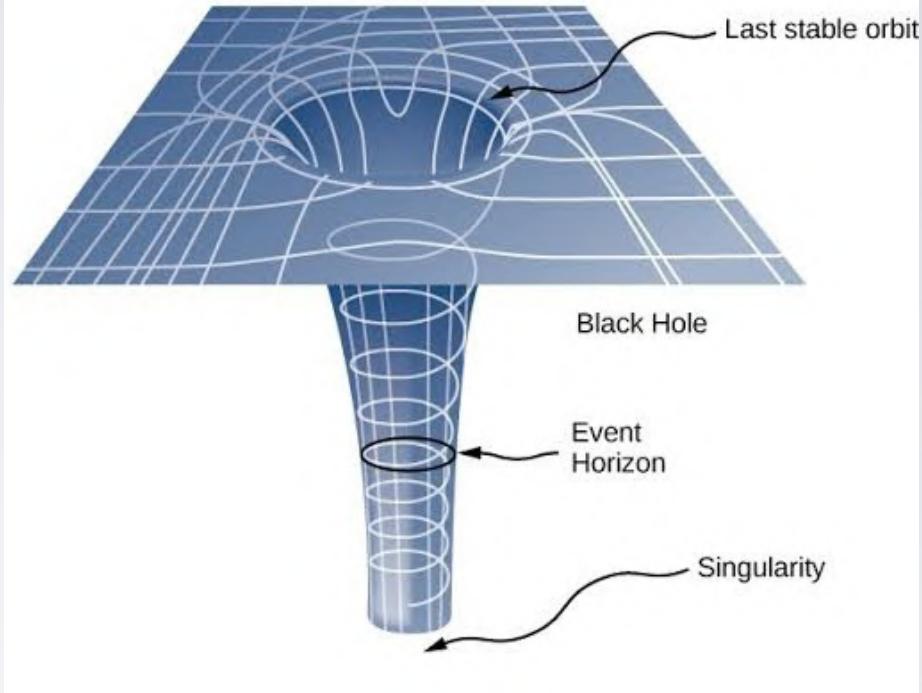
$$R_s \equiv \frac{2GM}{c^2}$$



**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!**



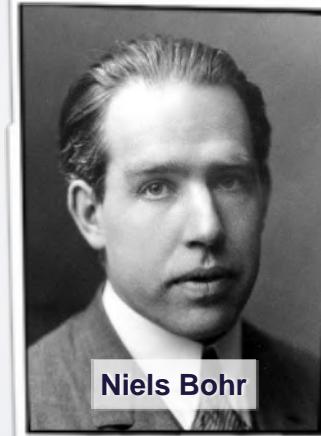
Relativité générale



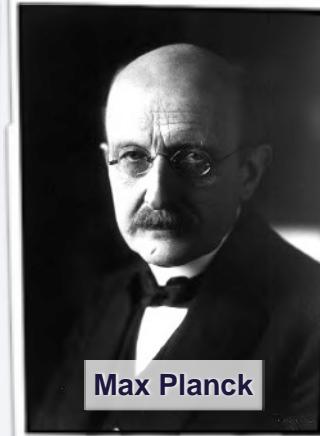
VS

Albert Einstein

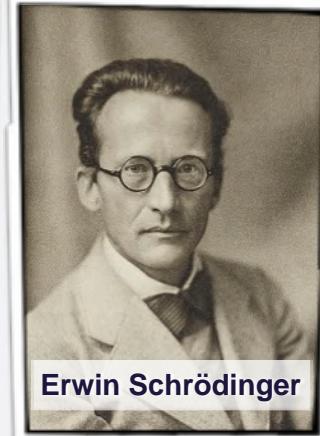
Mécanique quantique



Niels Bohr



Max Planck



Erwin Schrödinger



Werner Heisenberg

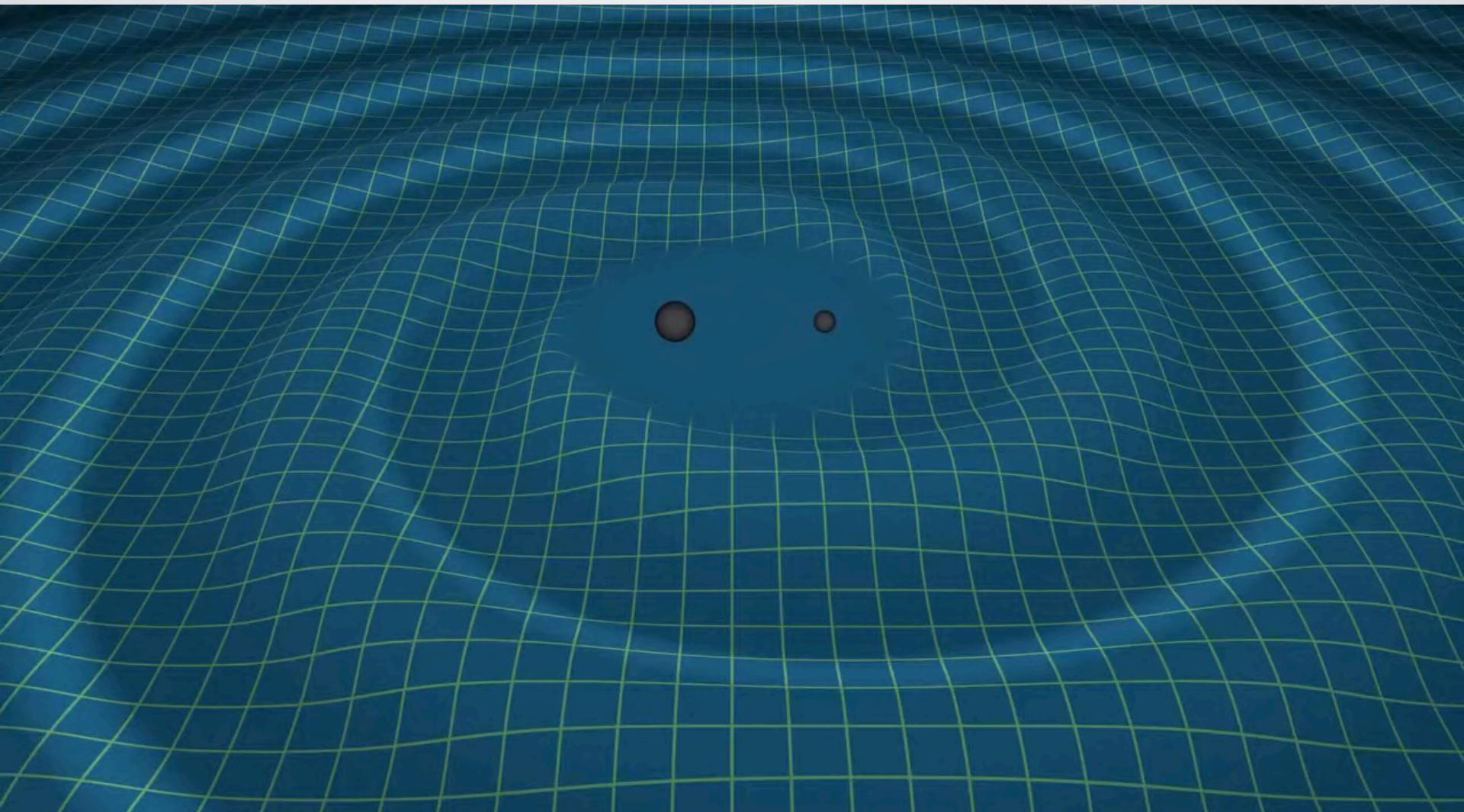
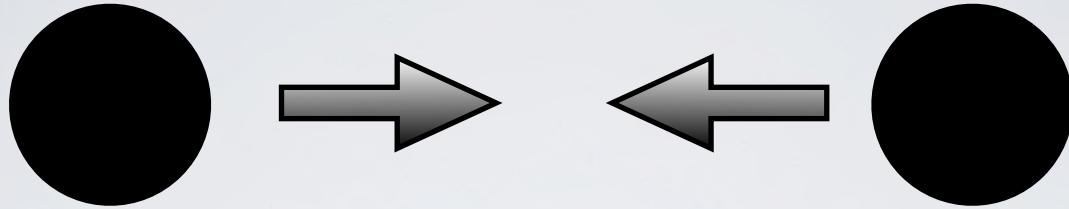
# Singularité

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

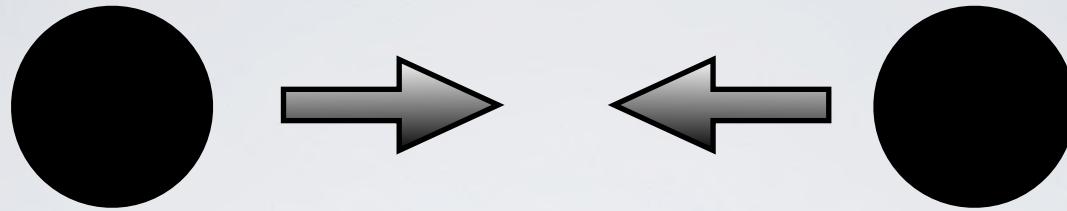
Mais cela suppose des trous noirs qui tournent très  
(trop?) vite...



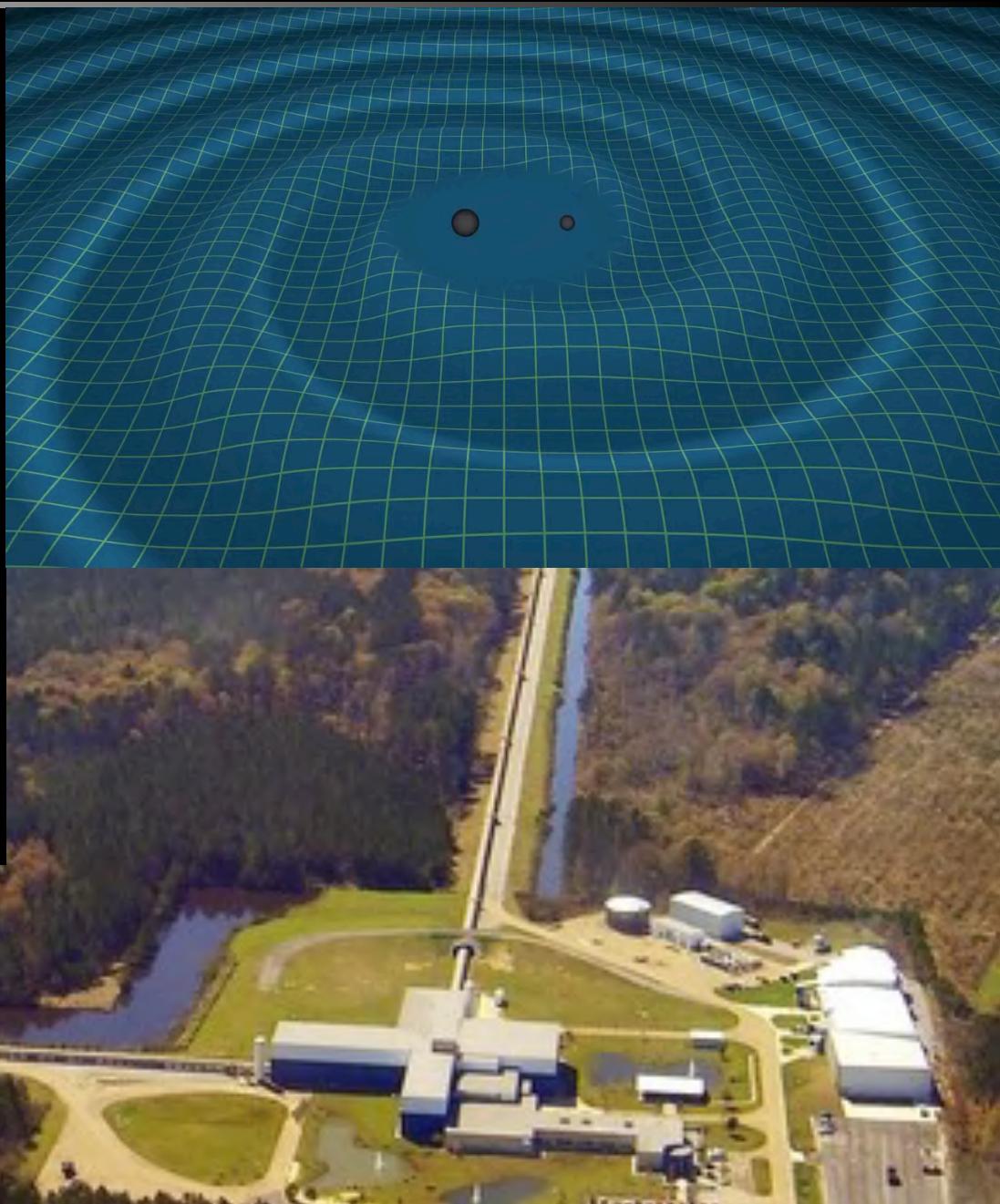
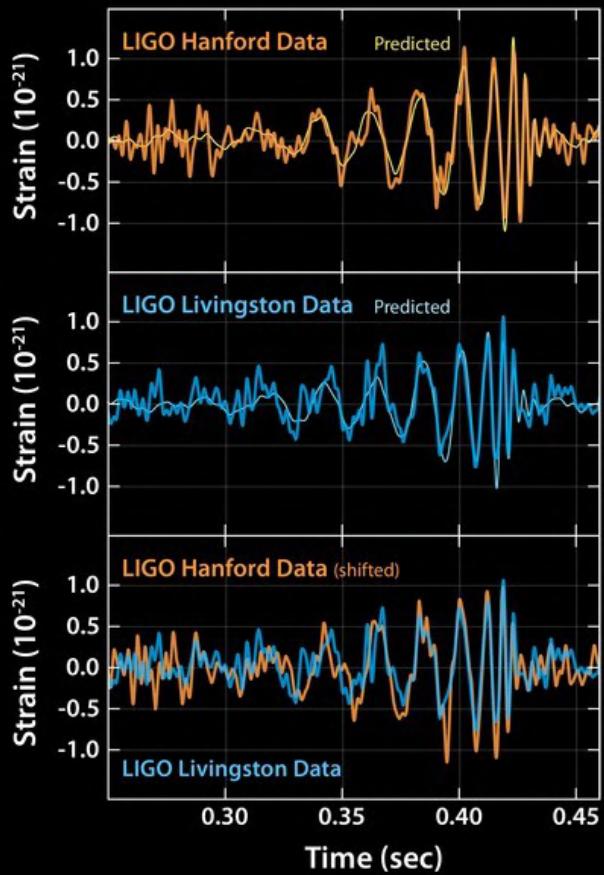
# Fusion de trous noirs



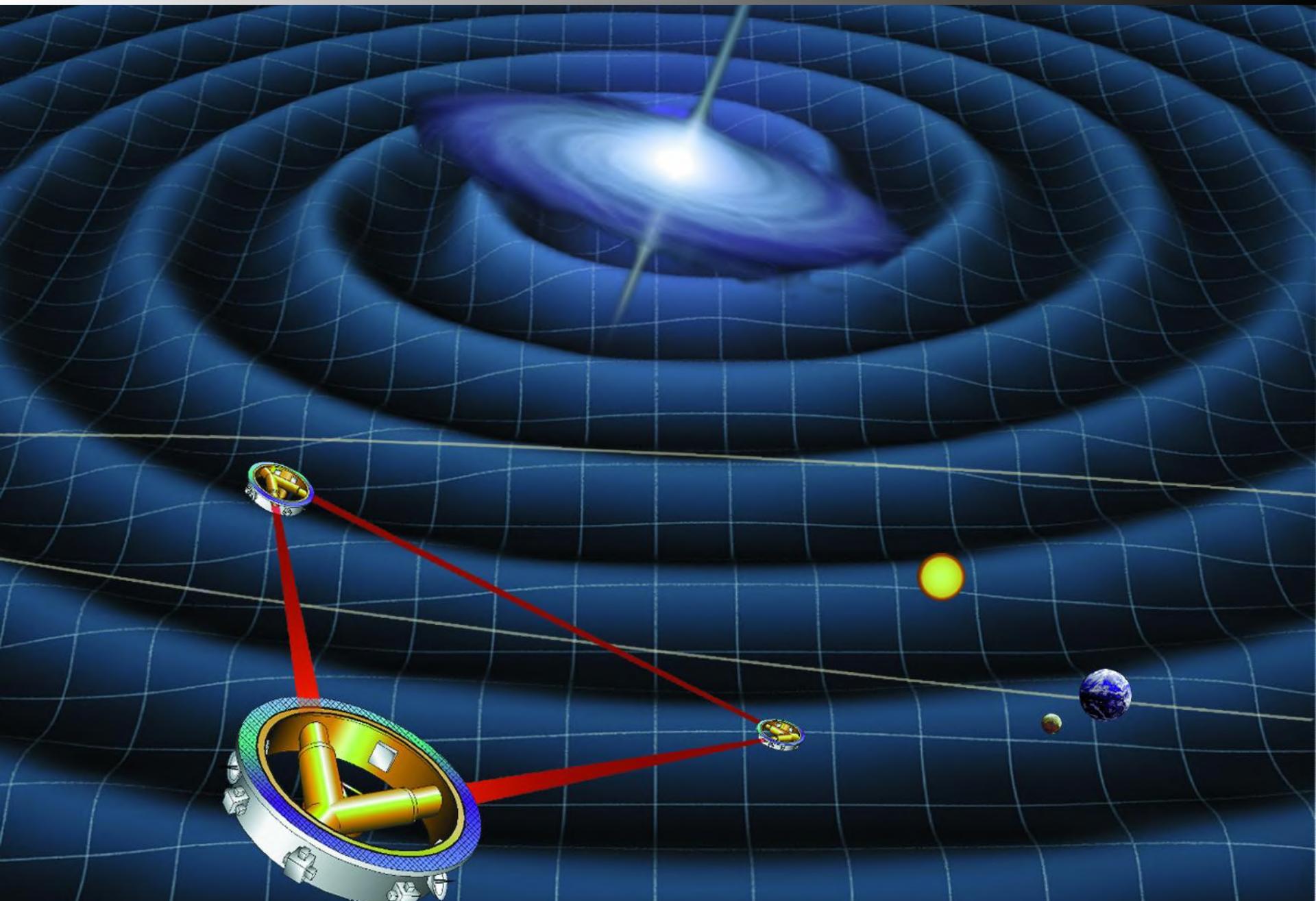
# Fusion de trous noirs



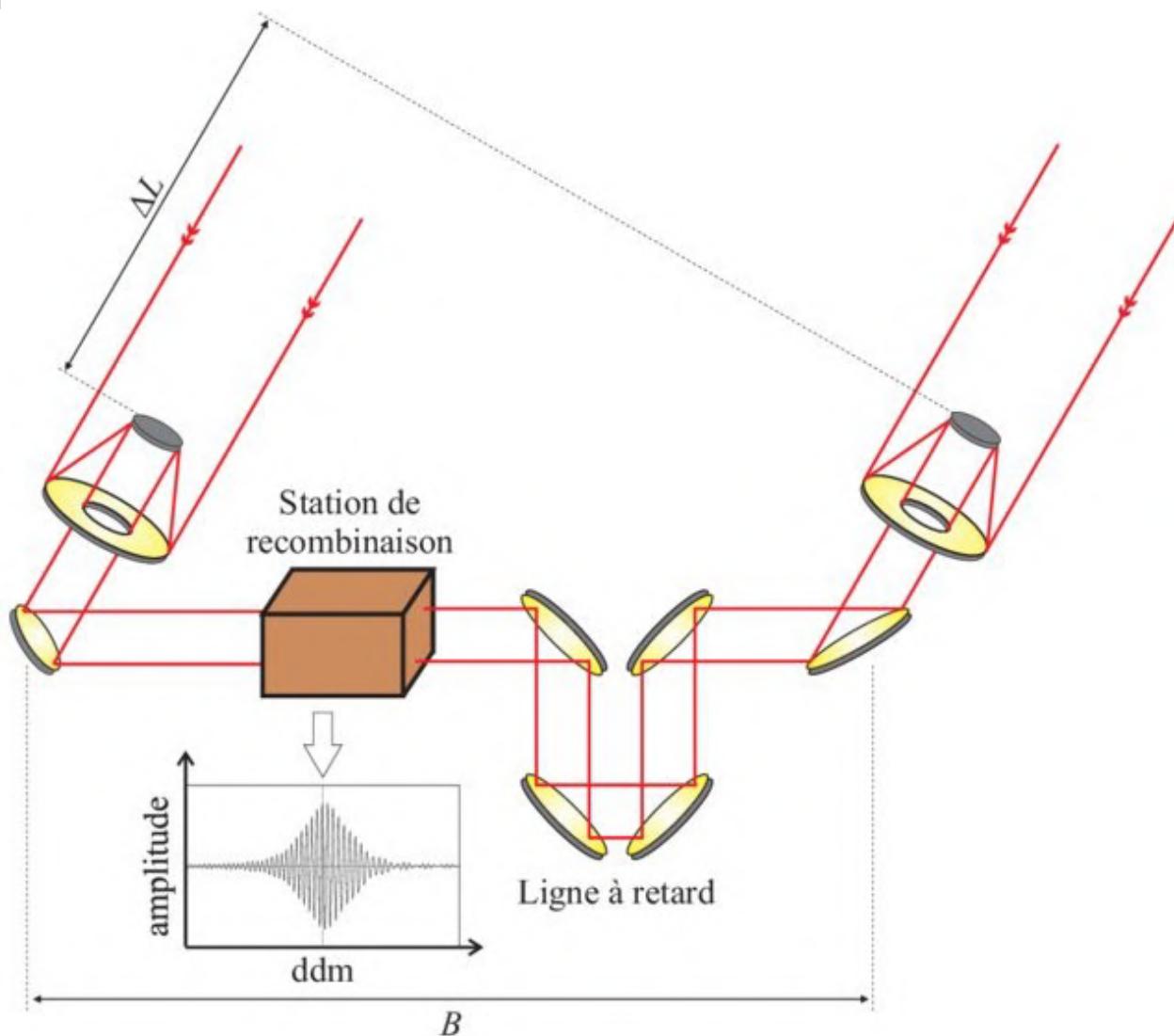
# LIGO



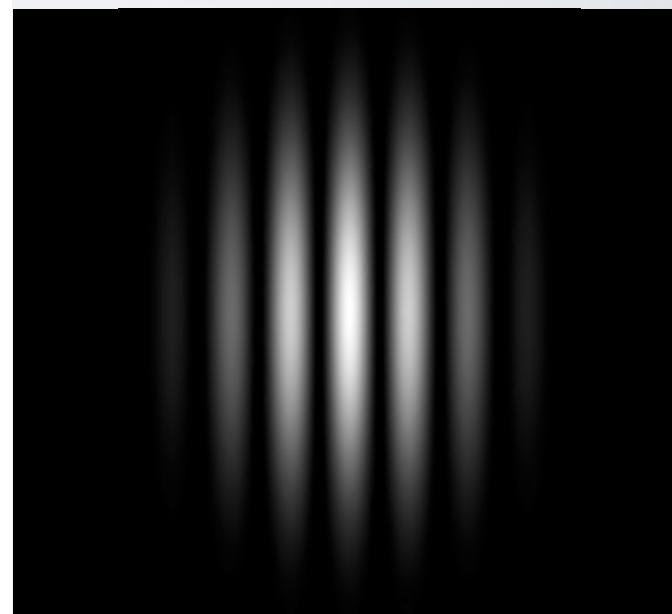
# LISA



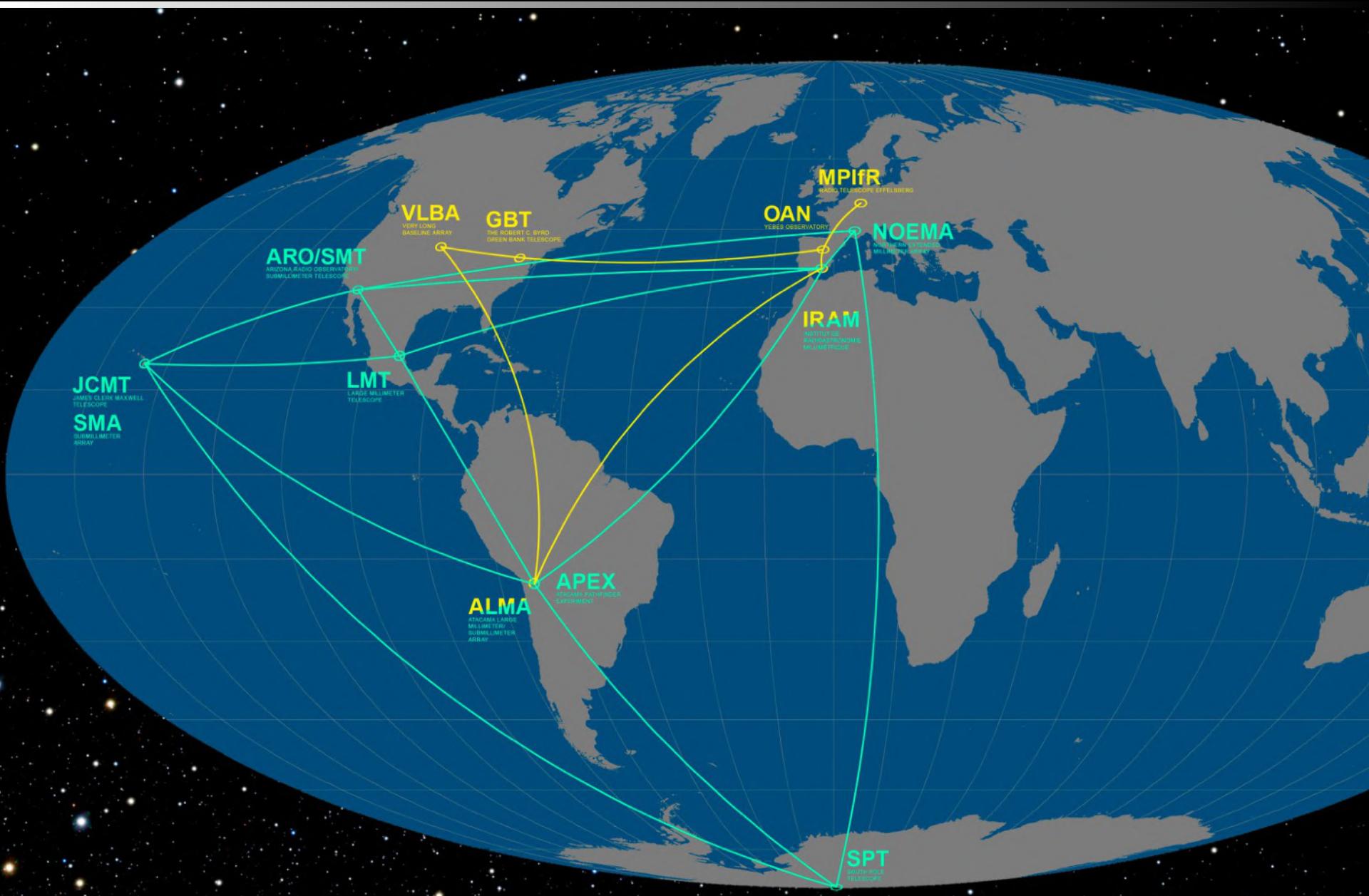
# L'Event Horizon Telescope et M87



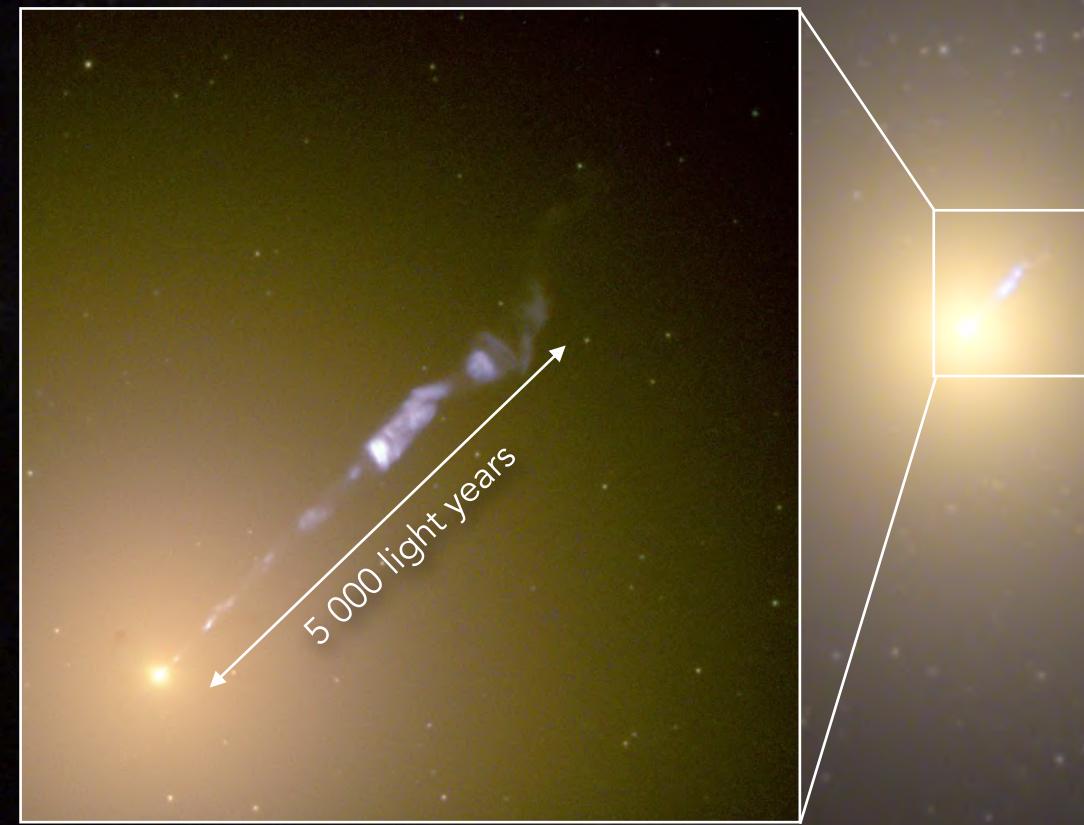
- Connecter 2 télescope par interférométrie d'une distance  $B$ , c'est comme avoir un télescope de taille  $B$ !
- Plus il y a de télescopes connectés, plus l'image devient précise...



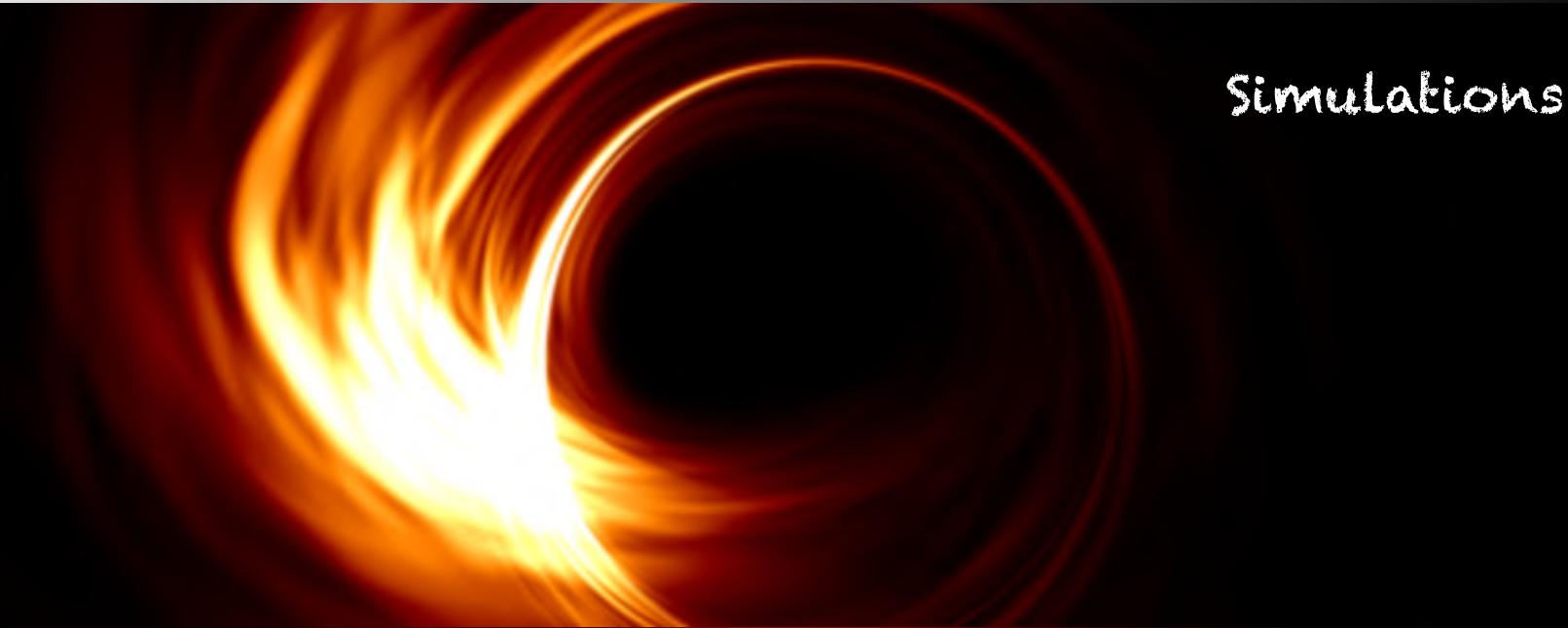
# L'Event Horizon Telescope et M87



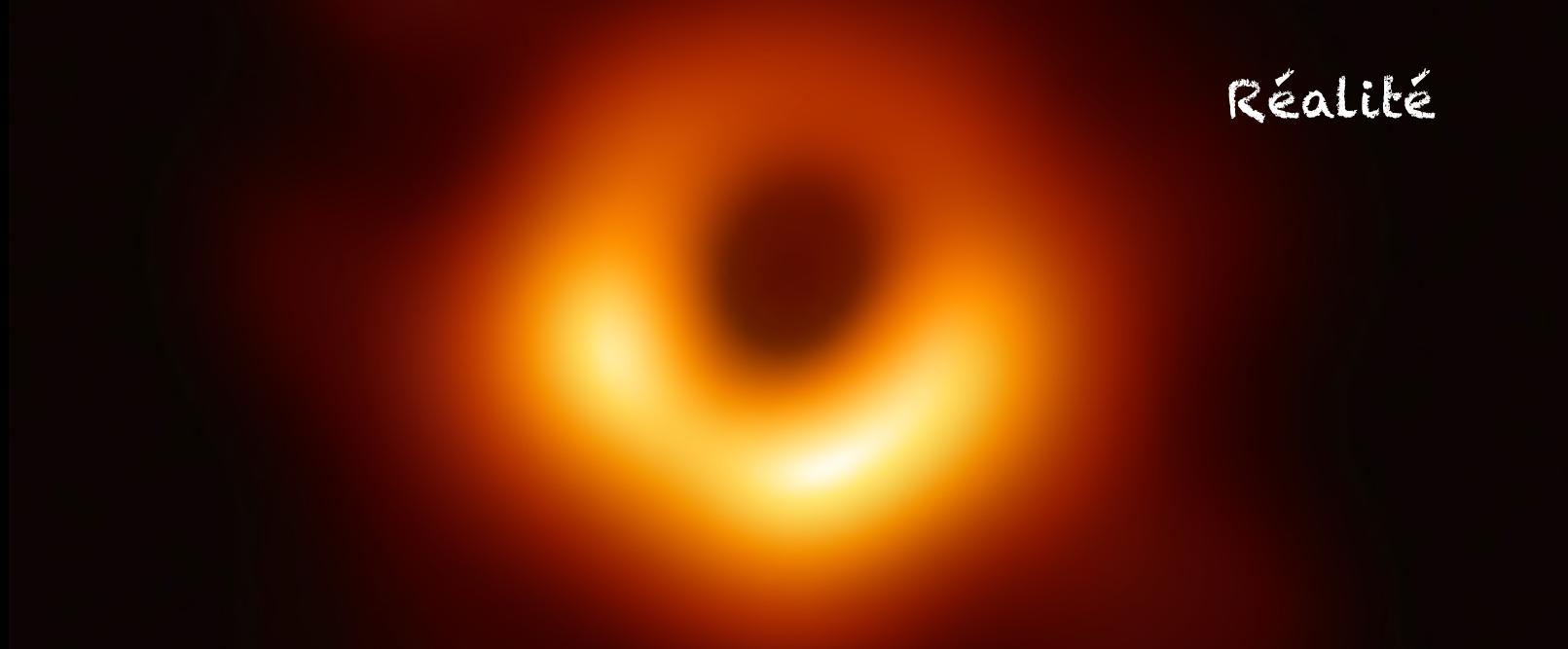
# M87



# L'Event Horizon Telescope et M87

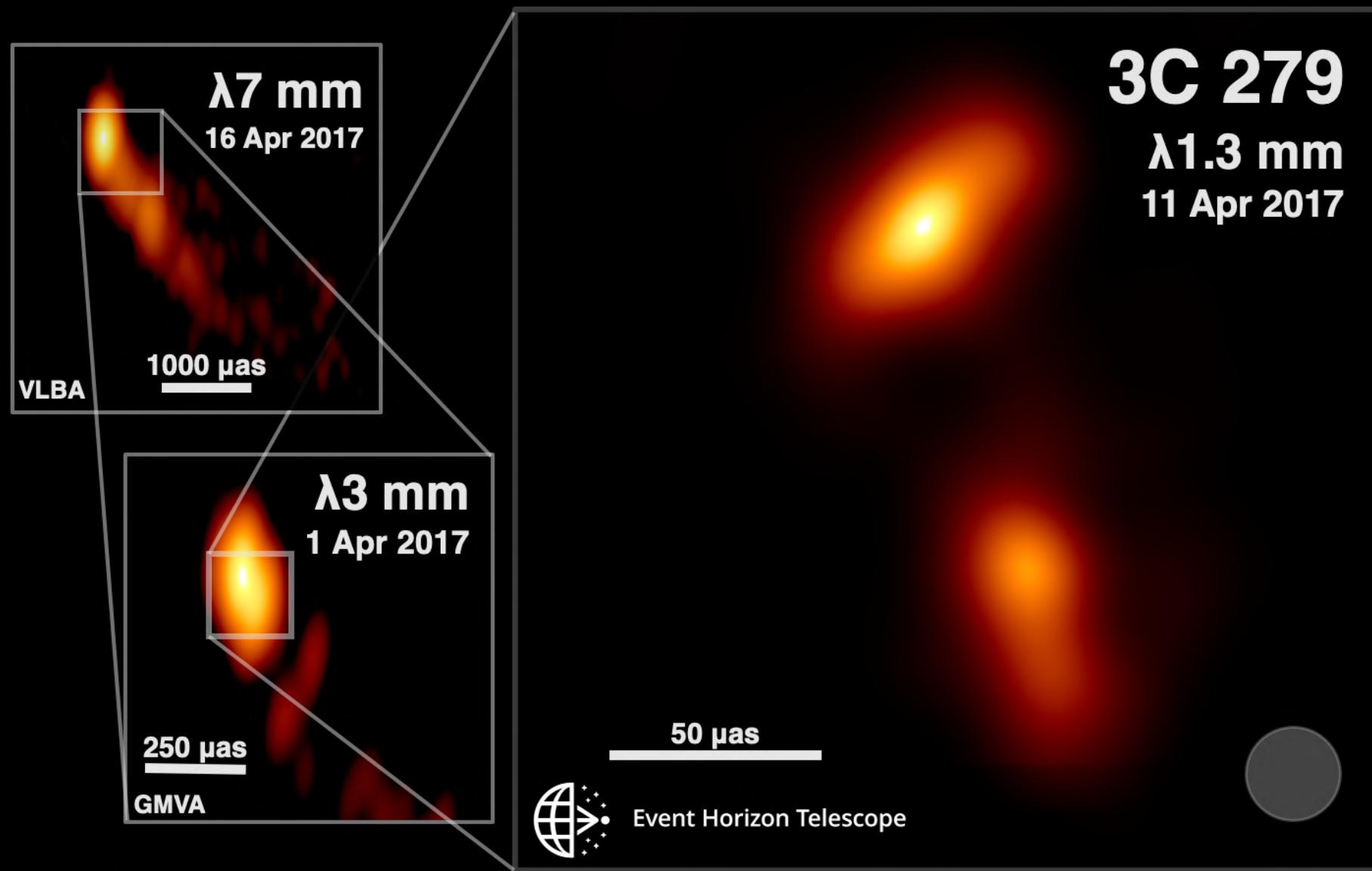


Simulations

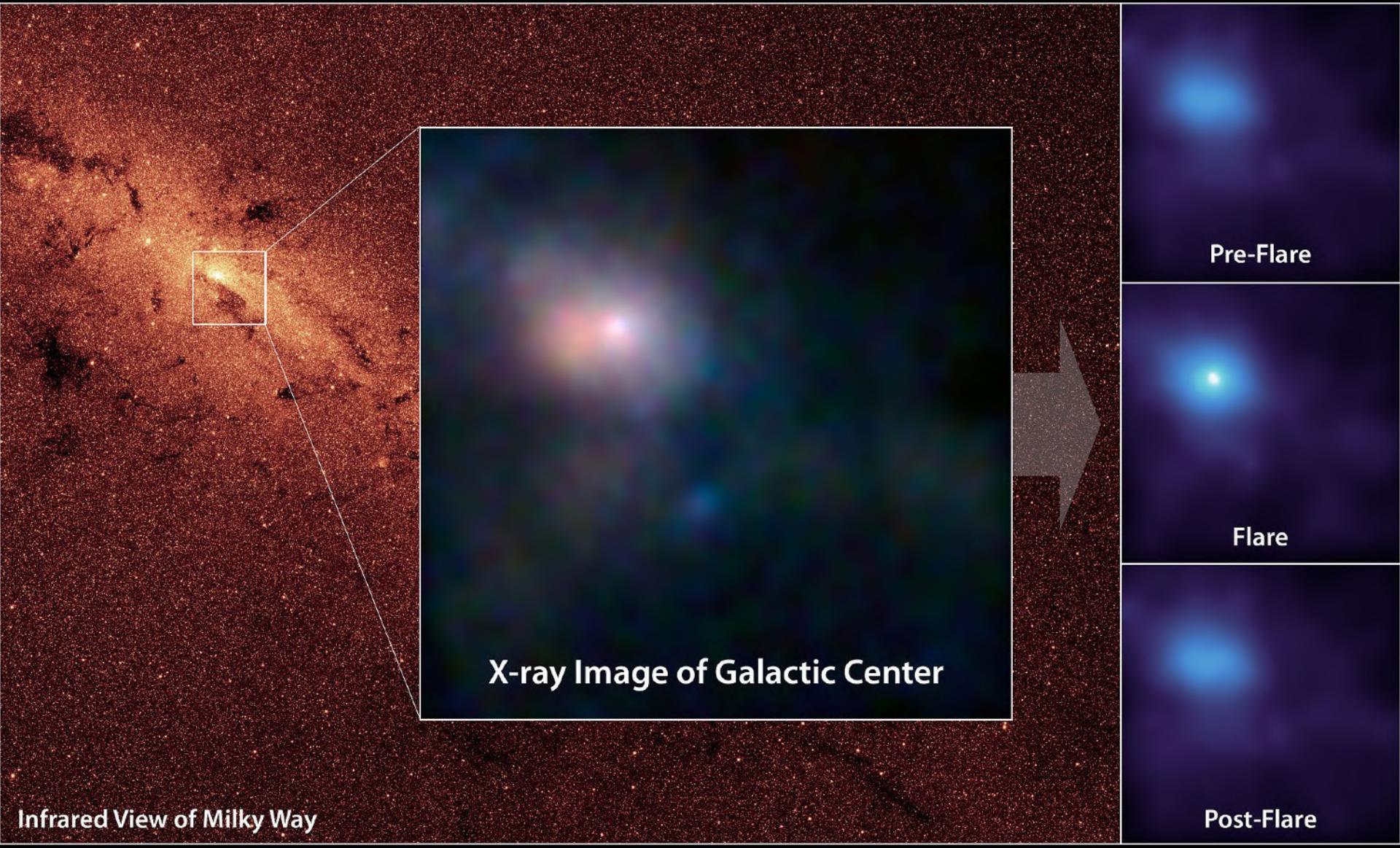


Réalité

# L'Event Horizon Telescope et 3C 279



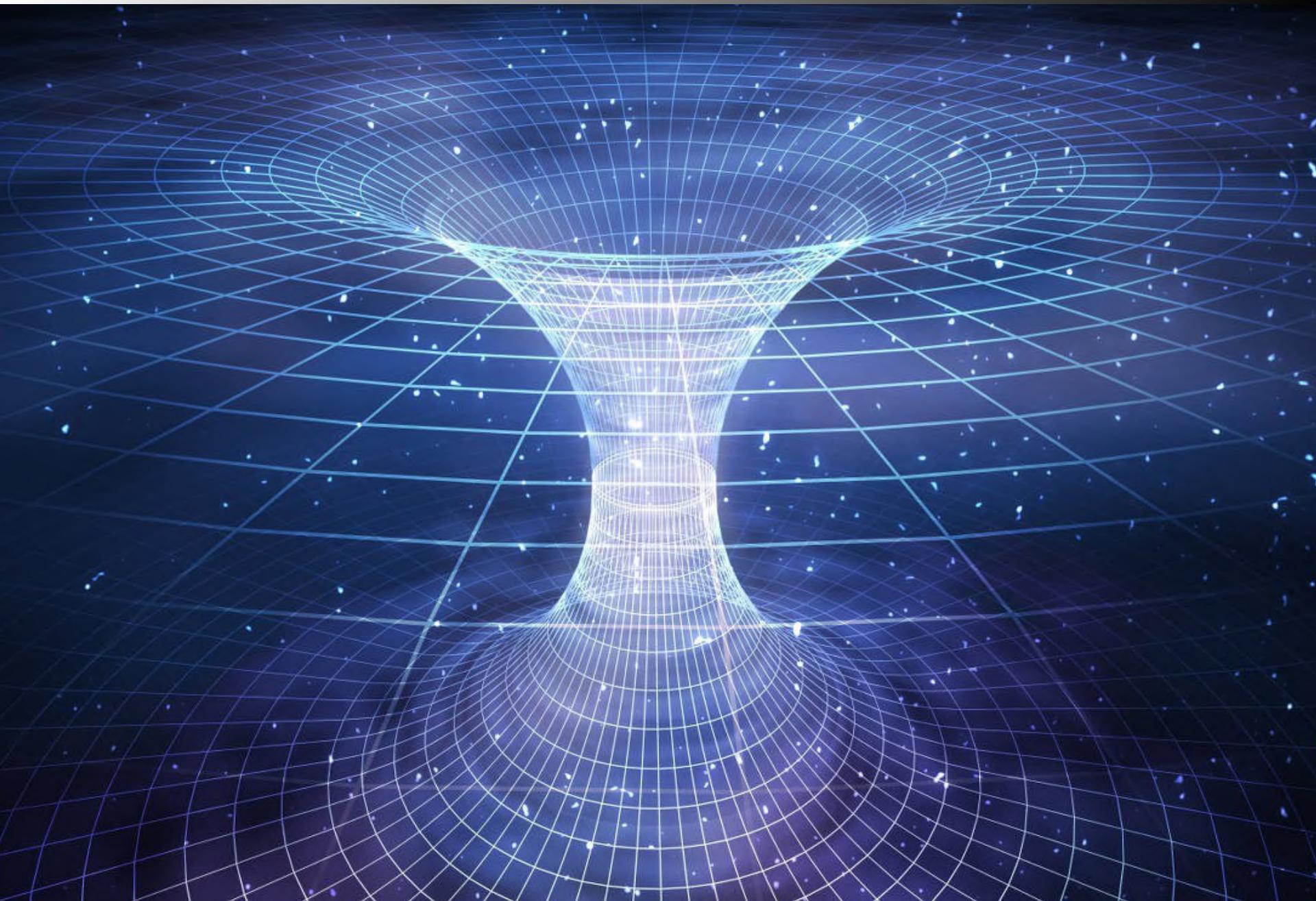
# L'Event Horizon Telescope et Sgr A\*



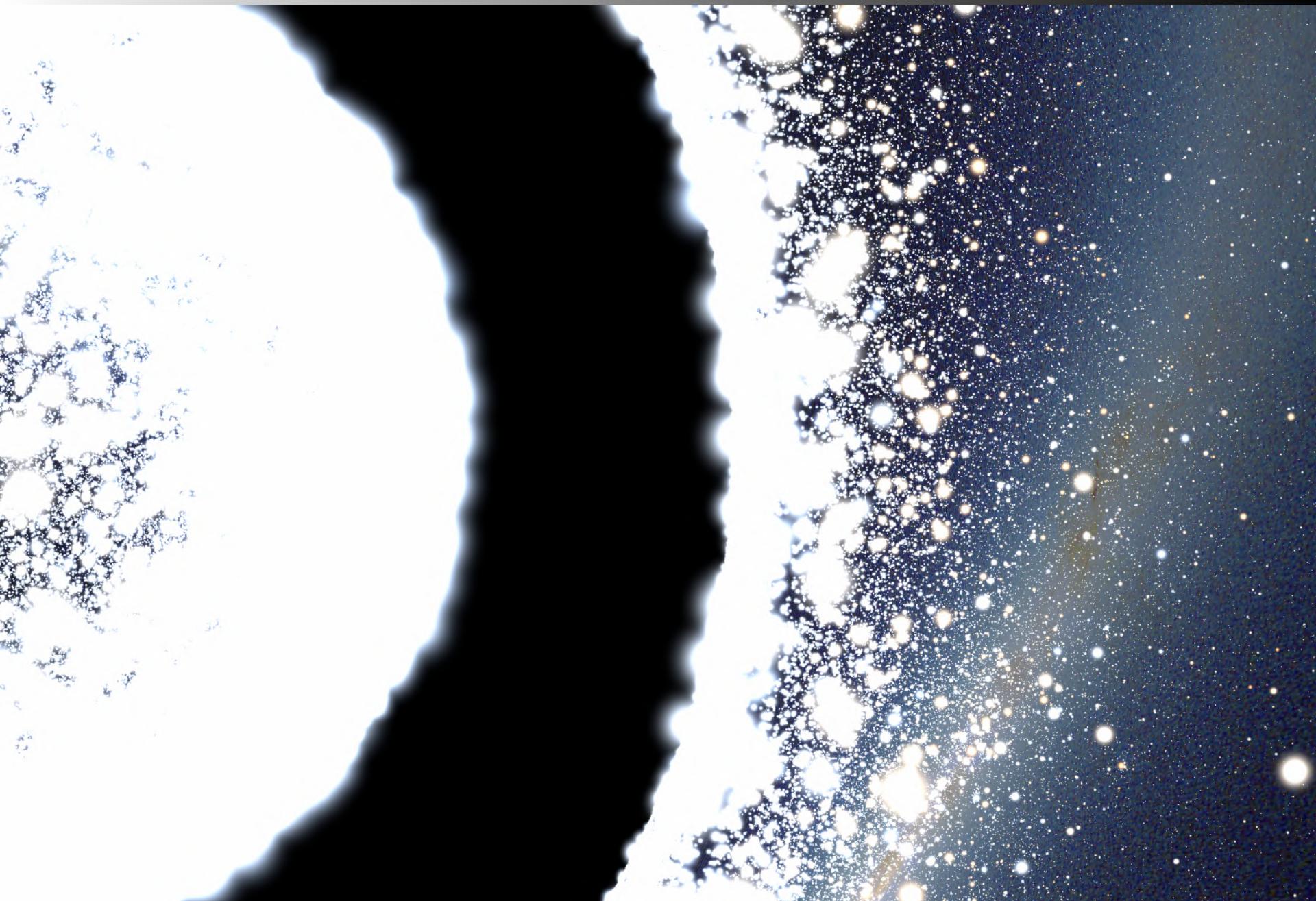
# L'Event Horizon Telescope et Sgr A\*



# 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!