

Dernières nouvelles des trous noirs

Éricourgoulhon

Laboratoire d'étude de l'Univers et des phénomènes eXtrêmes (LUX)
Observatoire de Paris - PSL, CNRS, Sorbonne Université
Meudon, France

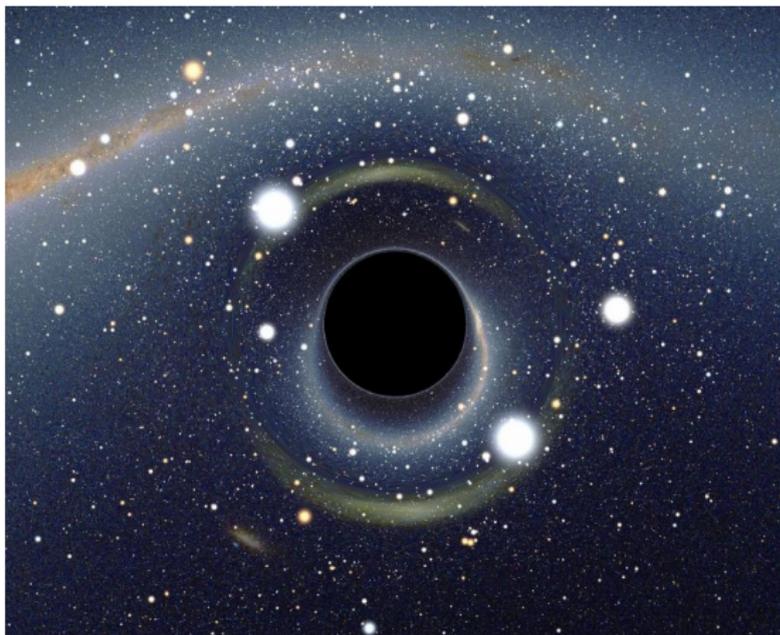
et

Laboratoire de Mathématiques de Bretagne Atlantique
CNRS, Université de Bretagne Occidentale
Brest, France

<https://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon>

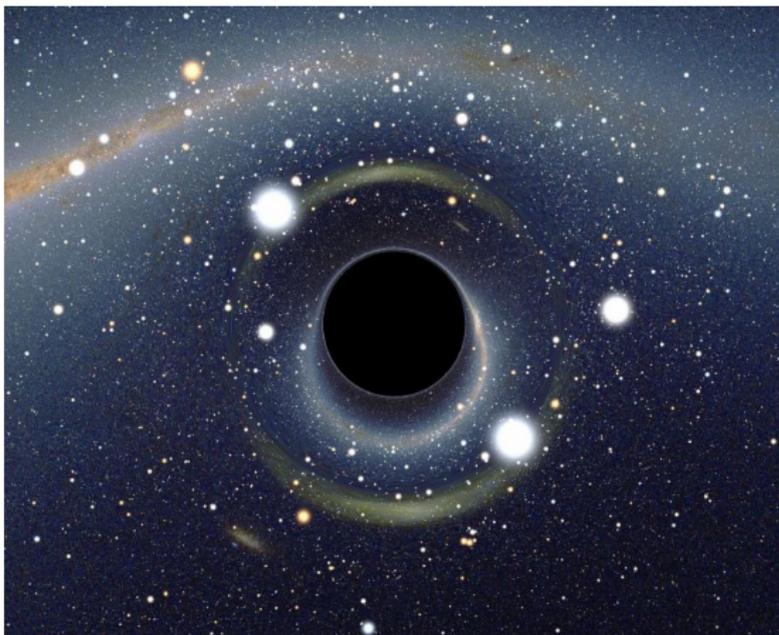
Pint of Science
Bistrot des Artistes, Paris
19 mai 2025

Qu'est-ce qu'un trou noir ?



[Alain Riazuelo, 2007]

Qu'est-ce qu'un trou noir ?



[Alain Riazuelo, 2007]

Une définition en quelques mots :

Un **trou noir** est une région de l'Univers d'où rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper.

La frontière (immatérielle) entre l'intérieur du trou noir et le reste de l'Univers est appelée **horizon des événements**.

Pourquoi la lumière ne peut-elle s'échapper ?

Réponse pour la mécanique newtonienne (J. Michell 1784, Laplace 1796) :

C'est en raison de la **gravitation** :

la **vitesse de libération** dépasse la vitesse de la lumière

Pourquoi la lumière ne peut-elle s'échapper ?

Réponse pour la mécanique newtonienne (J. Michell 1784, Laplace 1796) :

C'est en raison de la **gravitation** :
la **vitesse de libération** dépasse la vitesse de la lumière

Théorie de Newton de la gravitation :

La **vitesse de libération** d'un corps sphérique de masse M

et de rayon R est $V_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$

avec $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ (constante de Newton)

- Terre : $V_{\text{lib}} = 11 \text{ km/s}$
- Soleil : $V_{\text{lib}} = 617 \text{ km/s}$

La lumière ne s'échappe pas si
 $V_{\text{lib}} > c = 299\,792\,458 \text{ km/s}$



La préhistoire des trous noirs au XVIIIe siècle...

$$V_{\text{lib}} > c \iff \frac{2GM}{R} > c^2 \iff \frac{2G}{R} \times \frac{4}{3}\pi R^3 \rho > c^2 \iff R > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G\rho}}$$

John Michell (1784)

"If there should really exist in nature any bodies, whose density is not less than that of the sun, and whose diameters are more than 500 times the diameter of the sun, since their light could not arrive at us, ..., we could have no information from sight" [Phil. Trans. R. Soc. Lond. 74, 35 (1784)]



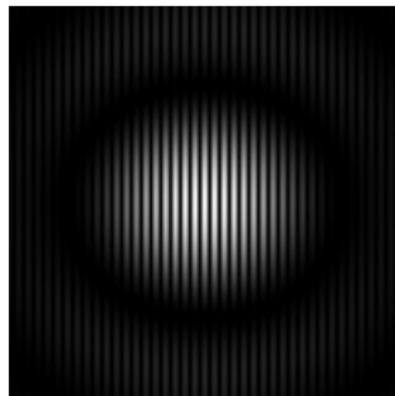
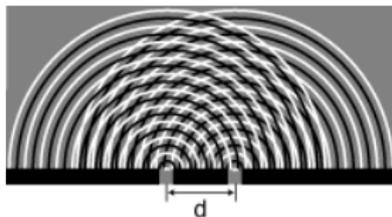
Pierre Simon de Laplace (1796)

"Un astre lumineux, de la même densité que la Terre, et dont le diamètre serait 250 fois plus grand que le Soleil, ne permettrait, en vertu de son attraction, à aucun de ses rayons de parvenir jusqu'à nous. Il est dès lors possible que les plus grands corps lumineux de l'univers puissent, par cette cause, être invisibles." [Exposition du système du monde (1796)]



Les «corps invisibles» tombent dans l'oubli...

- Mention des «corps invisibles» par Laplace dans les deux premières éditions de son *Exposition du système du Monde* (1796 et 1799)
- Suppression dans la troisième édition (1808) et les suivantes : prédominance de la **théorie ondulatoire de la lumière** sur la théorie corpusculaire après les expériences de Thomas Young (1801)



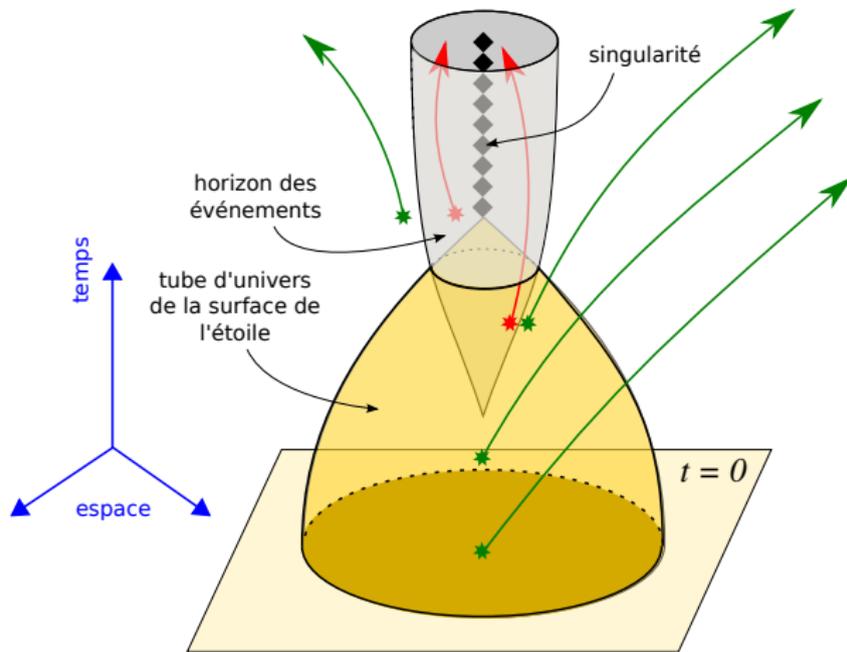
[R. Taillet]

Limites du concept newtonien de trou noir

- Pas de rôle privilégié de la vitesse de la lumière en théorie newtonienne : rien n'interdit $V > c \implies$ une "super-fusée" pourrait s'échapper des corps invisibles de Michell et Laplace
- $V_{\text{lib}} \sim c \implies$ énergie du champ gravitationnel \sim énergie de masse Mc^2
 \implies théorie *relativiste* de la gravitation nécessaire !

\implies le traitement correct des trous noirs ne peut se faire qu'en **relativité générale** (ou dans l'une de ses généralisations)

Effondrement gravitationnel d'une étoile



← Diagramme d'espace-temps représentant la formation d'un trou noir par effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive (phénomène de *supernova*)

singularité : courbure $\rightarrow \infty$

Théorème de Penrose (1965)

Au delà d'un certain stade de l'effondrement, caractérisé par l'apparition de **surfaces piégées**, la formation d'une singularité est inévitable.

La singularité centrale

- La singularité centrale est une **singularité de courbure** : la courbure de l'espace-temps devient infiniment grande à cet endroit.
- Physiquement, cela veut dire que les **forces de marées divergent** (*force de marée* \equiv attraction gravitationnelle différentielle)
- La singularité centrale marque une **limite du domaine d'applicabilité de la relativité générale** : pour la décrire, il faudrait utiliser une théorie plus «fine», sans doute une **théorie quantique de la gravitation** (pistes actuellement explorées : *théorie des cordes* et *gravité quantique à boucles*).
- La singularité centrale est **inaccessible à l'observation** : elle est cachée sous l'horizon des événements.

Le théorème d'absence de chevelure

Un des plus beaux résultats de la relativité générale :

Théorème d'unicité («absence de chevelure»)

Dorochkevitch, Novikov & Zeldovitch (1965), Israel (1967), Carter (1971), Hawking (1972), Robinson (1975)

En relativité générale (et en dimension d'espace-temps égale à 4), un trou noir stationnaire est entièrement décrit par seulement deux nombres^a :

- sa *masse* M (caractérise le champ gravitationnel loin du trou noir)
- son *moment cinétique* J (mesure l'état de rotation)

La solution correspondante de l'équation d'Einstein est la **solution de Kerr (1963)**. Pour $J = 0$, elle se réduit à la **solution de Schwarzschild (1916)**.

a. trois si on considère une charge électrique Q non nulle, mais ce n'est pas pertinent d'un point de vue astrophysique

Le théorème d'absence de chevelure

Un des plus beaux résultats de la relativité générale :

Théorème d'unicité («absence de chevelure»)

Dorochkevitch, Novikov & Zeldovitch (1965), Israel (1967), Carter (1971), Hawking (1972), Robinson (1975)

En relativité générale (et en dimension d'espace-temps égale à 4), un trou noir stationnaire est entièrement décrit par seulement deux nombres^a :

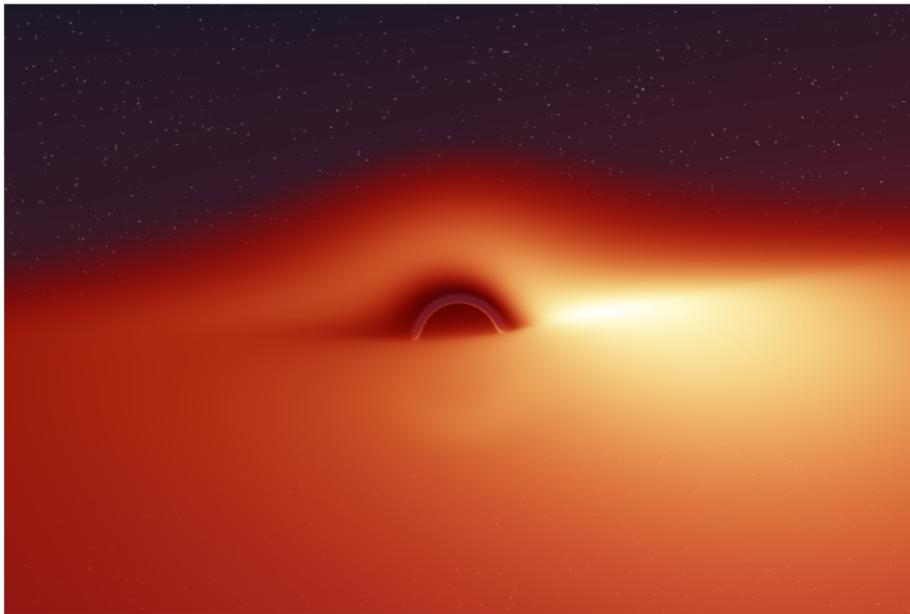
- sa *masse* M (caractérise le champ gravitationnel loin du trou noir)
- son *moment cinétique* J (mesure l'état de rotation)

La solution correspondante de l'équation d'Einstein est la *solution de Kerr (1963)*. Pour $J = 0$, elle se réduit à la *solution de Schwarzschild (1916)*.

a. trois si on considère une charge électrique Q non nulle, mais ce n'est pas pertinent d'un point de vue astrophysique

⇒ Un trou noir est un objet extrêmement régulier :
il "*n'a pas de cheveux*" (John A. Wheeler)

Le trou noir : une source d'énergie formidable !



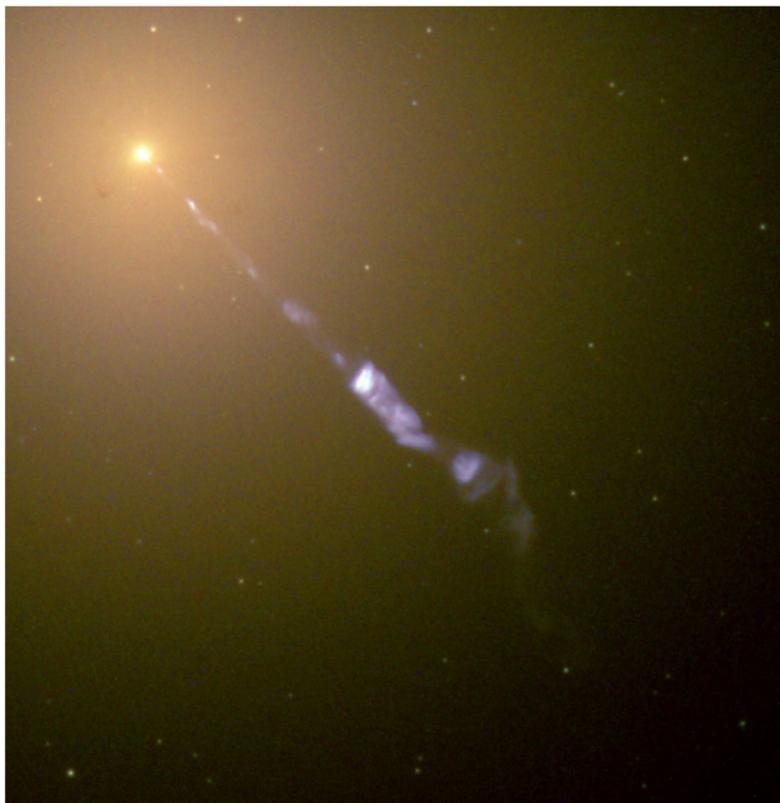
La matière qui tombe sur un trou noir forme un **disque d'accrétion**, de température élevée
⇒ forte émission électromagnétique
[Donald Lynden-Bell (1969), Nicolaï Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]

Libération d'énergie potentielle gravitationnelle par **accrétion** sur un trou noir : jusqu'à 42% de l'énergie de masse mc^2 de la matière accrétée !

NB : les réactions thermonucléaires libèrent moins de 1% de mc^2 .

Le trou noir : une source d'énergie formidable !



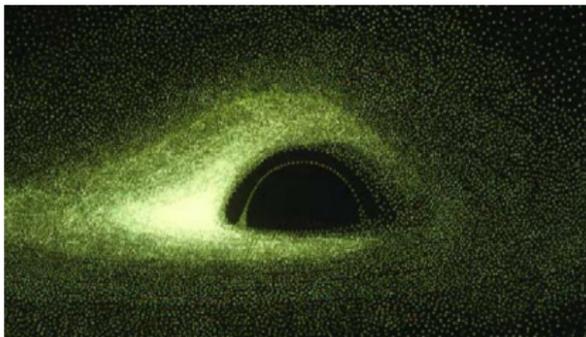
Jet émis par le noyau de la galaxie elliptique géante M87, au centre de l'amas Virgo [HST]

$$M_{\text{TN}} = 6 \times 10^9 M_{\odot}$$

$$V_{\text{jet}} \simeq 0.99 c$$

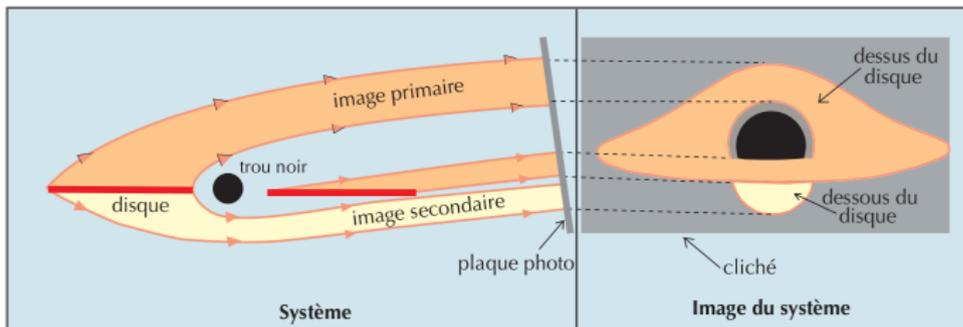
Image d'un trou noir

Par définition, un trou noir n'est pas *directement* observable, mais sa **silhouette** l'est s'il est entouré de matière (disque d'accrétion) ou est observé sur un fond étoilé



Première image calculée de la silhouette
calculée par J.-P. Luminet

[Luminet, A&A 75, 228 (1979)]

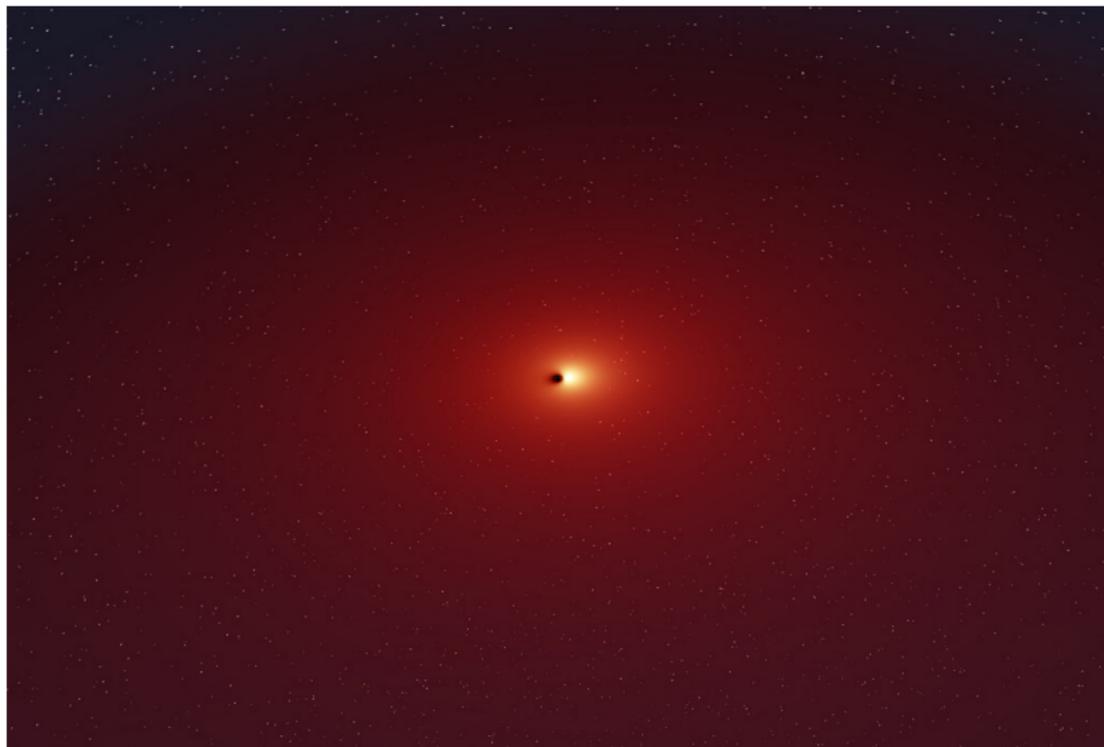


Trajectoire des
rayons lumineux et
formation de l'image

[https://luth.
obspm.fr/~luminet/](https://luth.obspm.fr/~luminet/)

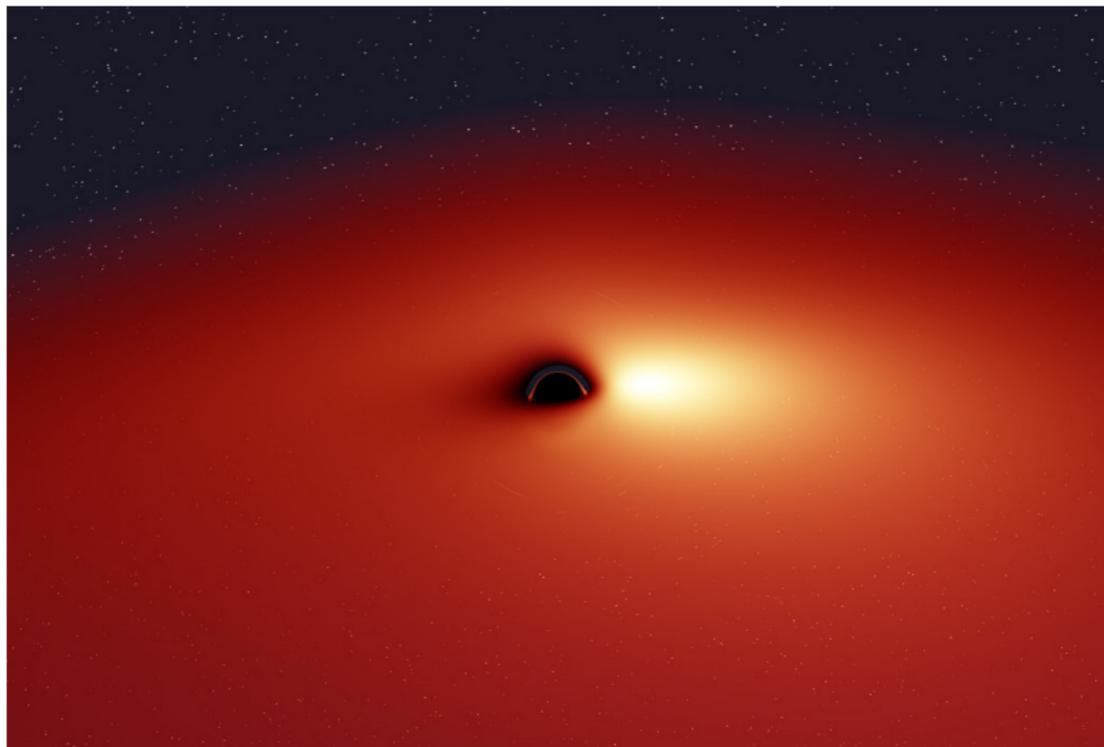
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



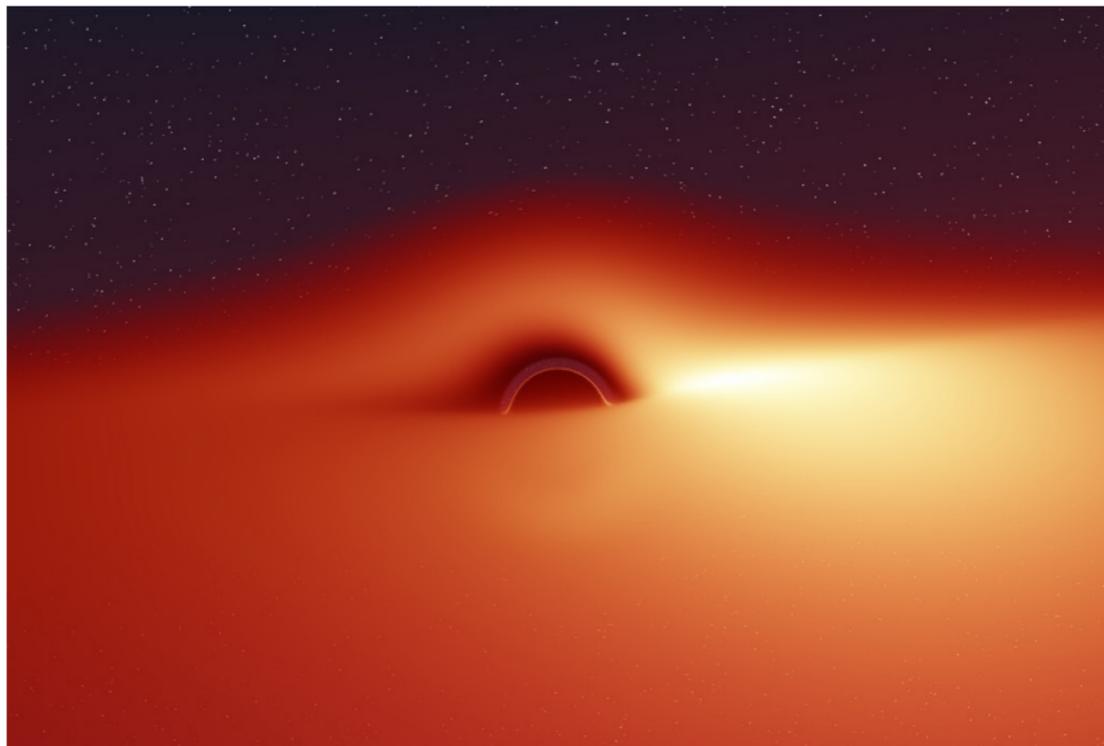
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



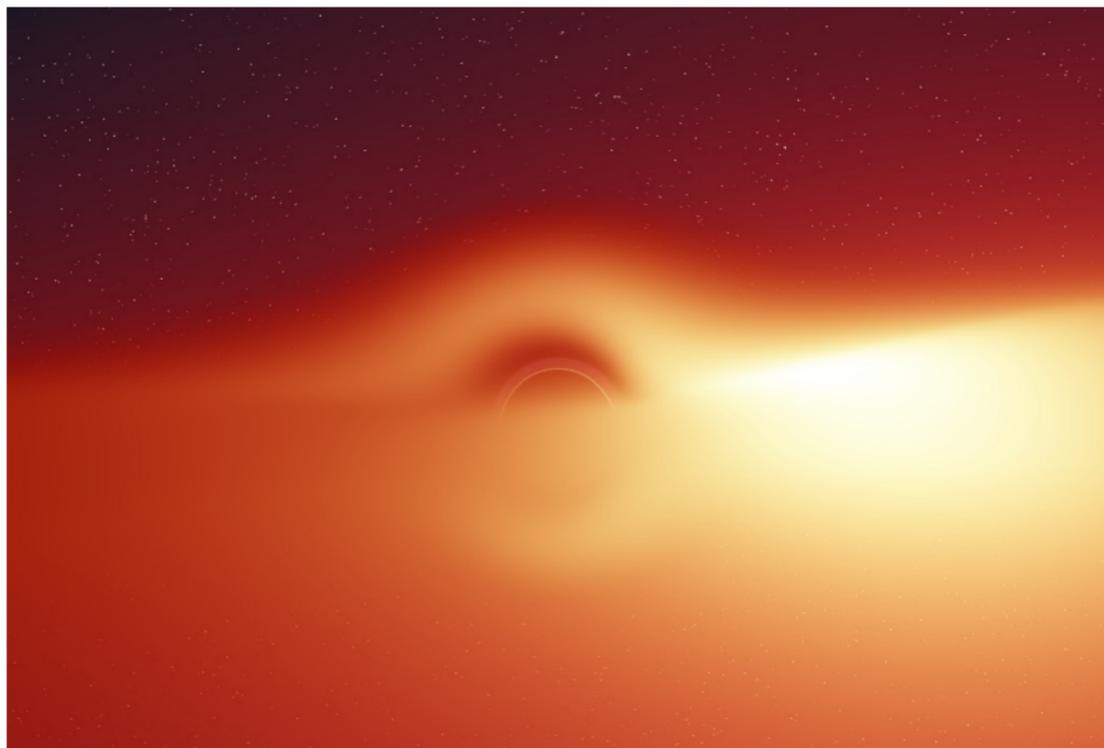
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [[Marck, CQG 13, 393 \(1996\)](#)]



Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



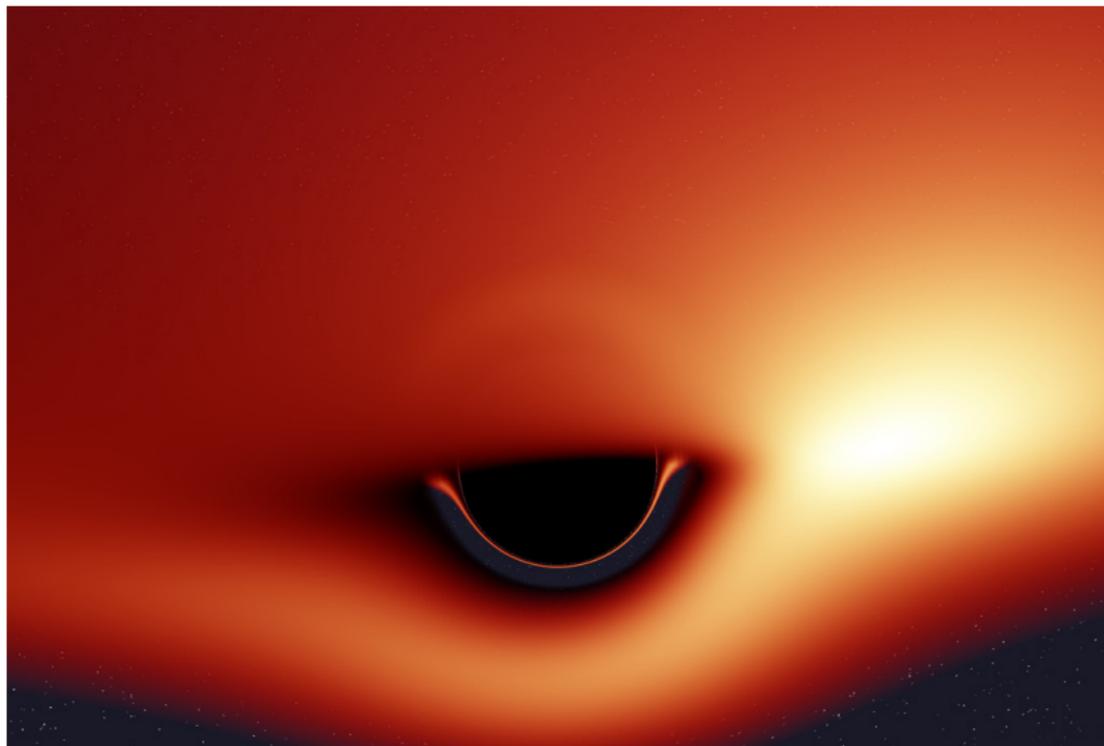
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



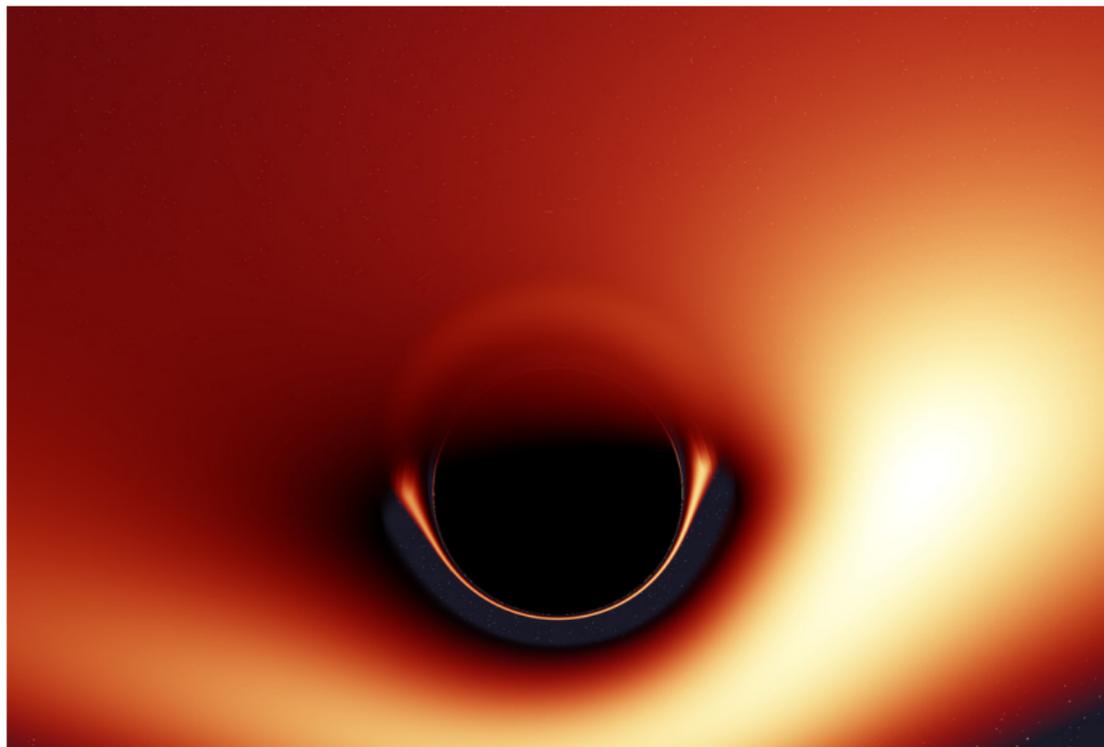
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [[Marck, CQG 13, 393 \(1996\)](#)]



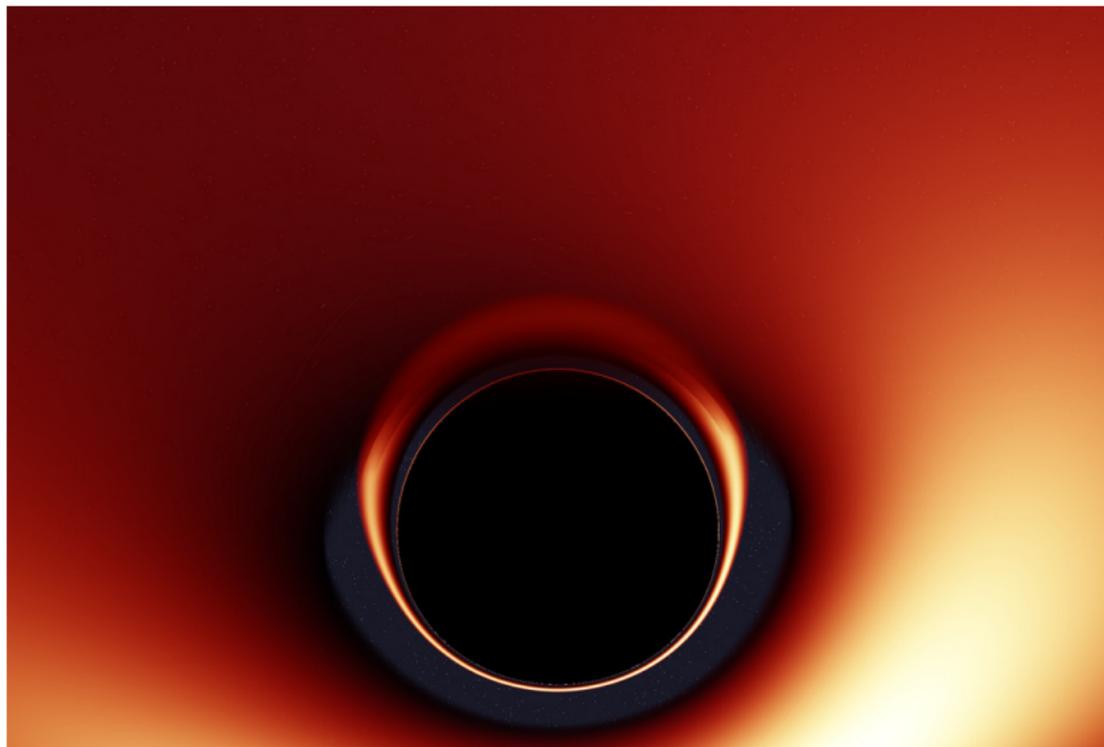
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



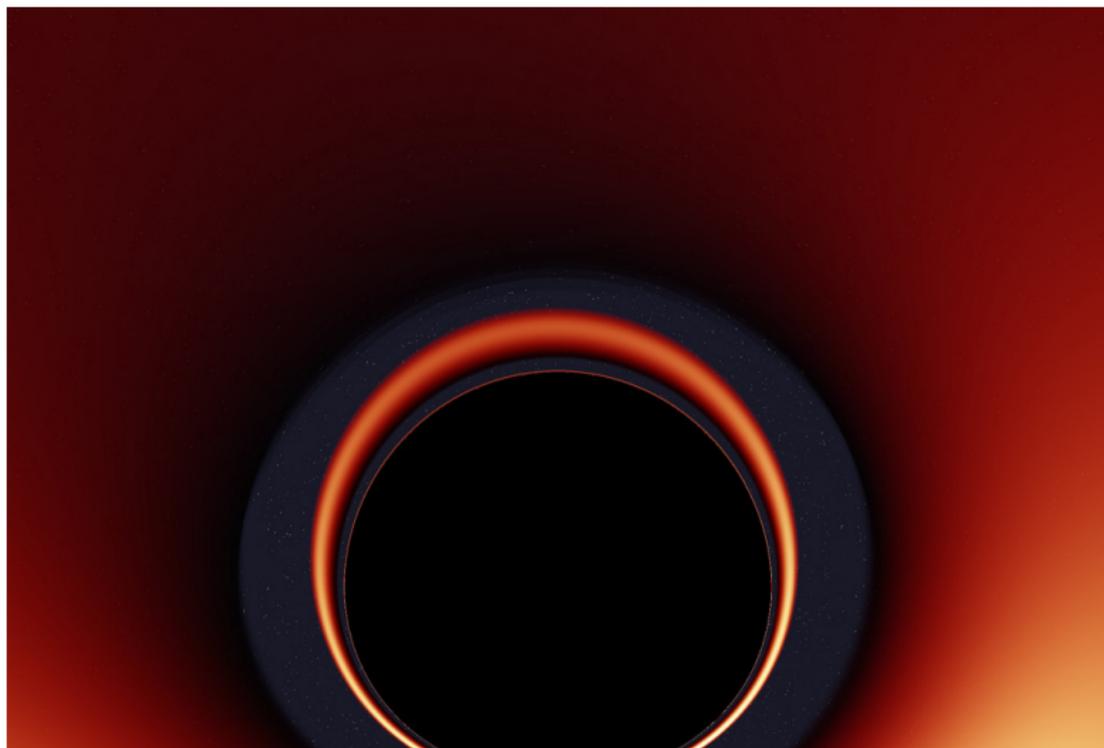
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [[Marck, CQG 13, 393 \(1996\)](#)]



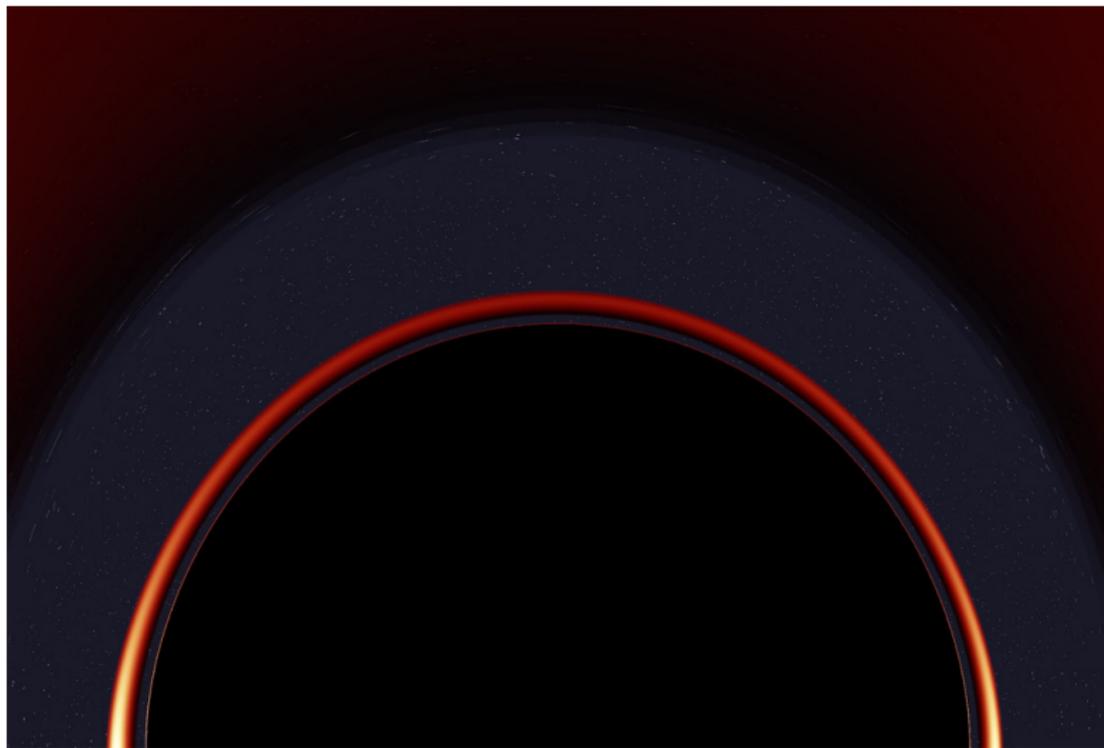
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



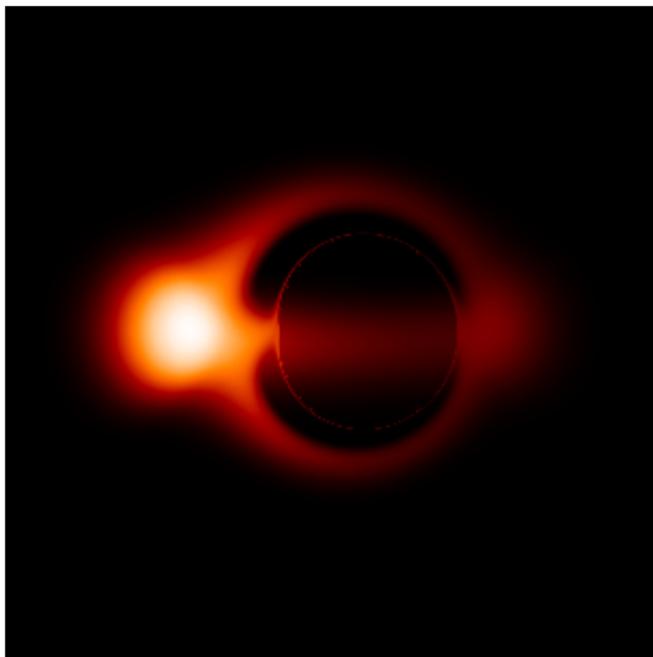
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]

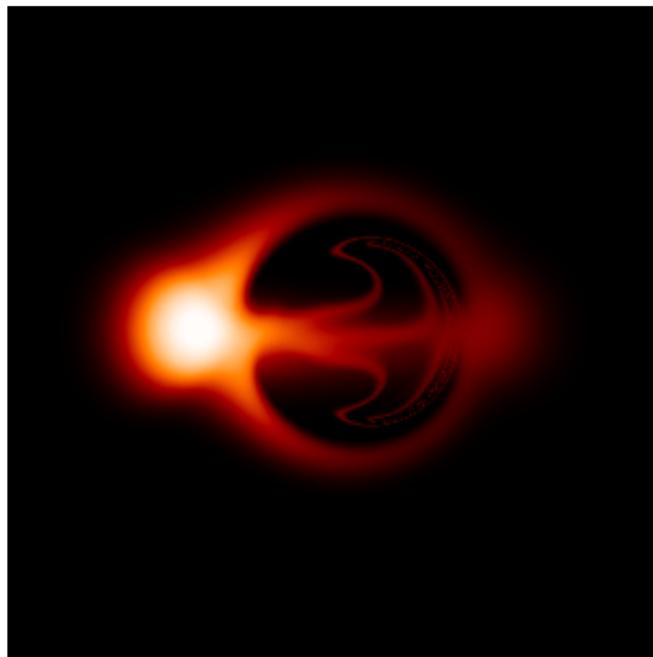


Images d'objets alternatifs au trou noir de Kerr

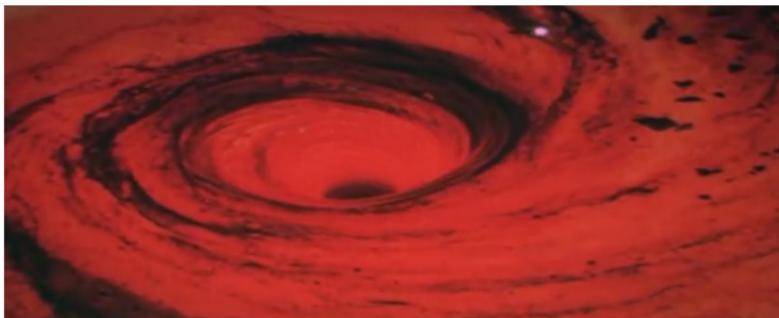
trou noir de Kerr $a/M = 0.9$



étoile bosonique $k = 1, \omega = 0.70 m/\hbar$



[Vincent, Meliani, Grandclément, Gourgoulhon & Straub, CQG 33, 105015 (2016)]



(c) Walt Disney Pictures

Le Trou Noir

Gary Nelson (1979)

produit par Walt Disney

Image d'un "maelstrom cosmique" **très peu réaliste** : aucun effet de mirage gravitationnel

→ seul l'effet attractif du trou noir est mis en avant



(c) Warner Bros. Pictures

Interstellar

Christopher Nolan (2014)

Image calculée suivant les équations de la relativité générale fournies par Kip Thorne (Prix Nobel de physique 2017)

- Tous les effets de mirage gravitationnel sont là
- Les effets de dilatation temporelle sont bien mis en avant dans le film
- Il manque toutefois l'effet Doppler pour que l'image soit pleinement réaliste

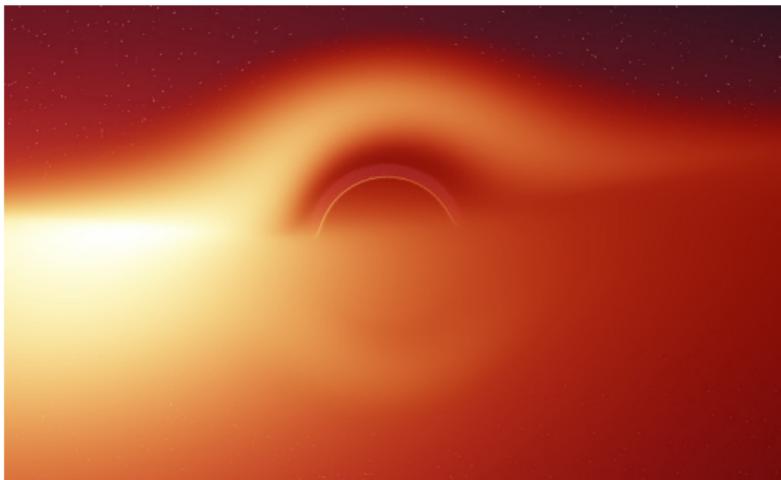


Image calculée par J.-A. Marck (1996)

Interstellar

Christopher Nolan (2014)

Comparaison avec une image
scientifiquement exacte

- Tous les effets de mirage gravitationnel sont là
- Les effets de dilatation temporelle sont bien mis en avant dans le film
- Il manque toutefois l'effet Doppler pour que l'image soit pleinement réaliste

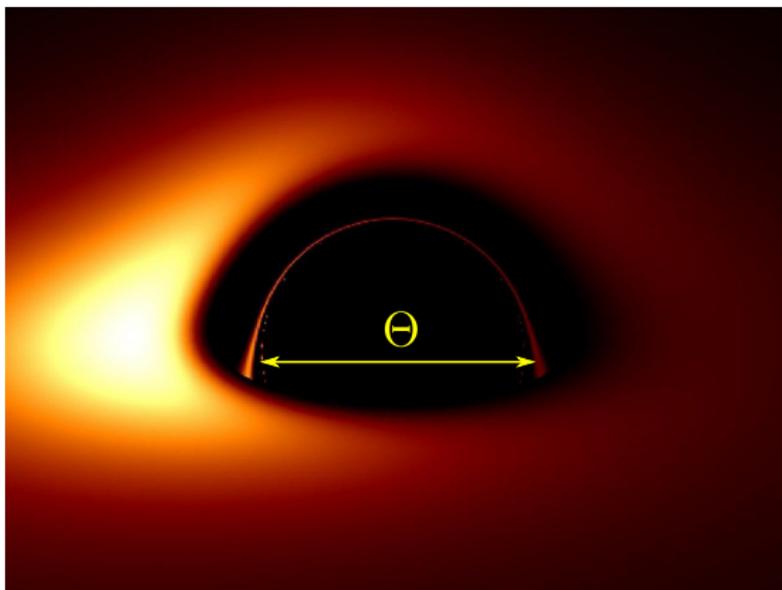
Les trous noirs dans l'Univers

Trois catégories de trous noirs astrophysiques :

- **trous noirs stellaires**, restes d'étoiles massives (supernovæ) :
 $M \sim 10 \text{ à } 30 M_{\odot}$ et $R \sim 30 \text{ à } 90 \text{ km}$
exemple : Cyg X-1 : $M = 15 M_{\odot}$ et $R = 45 \text{ km}$
- **trous noirs supermassifs**, au centre des galaxies :
 $M \sim 10^5 \text{ à } 10^{10} M_{\odot}$ et $R \sim 3 \times 10^5 \text{ km à } 200 \text{ UA}^1$
exemples : Sgr A : $M = 4,3 \times 10^6 M_{\odot}$ et $R = 13 \times 10^6 \text{ km}$
M 87* : $M = 6,2 \times 10^9 M_{\odot}$ et $R = 120 \text{ UA}$*
- **trous noirs de masse intermédiaire**, vus comme des sources X ultra-lumineuses :
 $M \sim 10^2 - 10^5 M_{\odot}$ et $R \sim 300 \text{ km} - 3 \times 10^5 \text{ km}$
exemple : ESO 243-49 HLX-1 : $M \sim 10^4 M_{\odot}$; $R \sim 3 \times 10^4 \text{ km}$

1. UA = unité astronomique \simeq distance Terre-Soleil

Taille apparente des trous noirs vus depuis la Terre



Simulation d'image (disque d'accrétion fin)

[Vincent, Paumard, Gourgoulhon & Perrin, CQG 28, 225011
(2011)]

Le plus gros trou noir en taille apparente dans le ciel :

$$\text{Sgr A}^* : \Theta = 53 \mu\text{as}^a$$

Viennent ensuite

$$\text{M87} : \Theta = 21 \mu\text{as}$$

$$\text{M31} : \Theta = 20 \mu\text{as}$$

Rem. 1 : Les trous noirs dans les binaires X sont $\sim 10^5$ fois plus petits car $\Theta \propto M/d$

Rem. 2 : résolution angulaire du HST et du JWST :

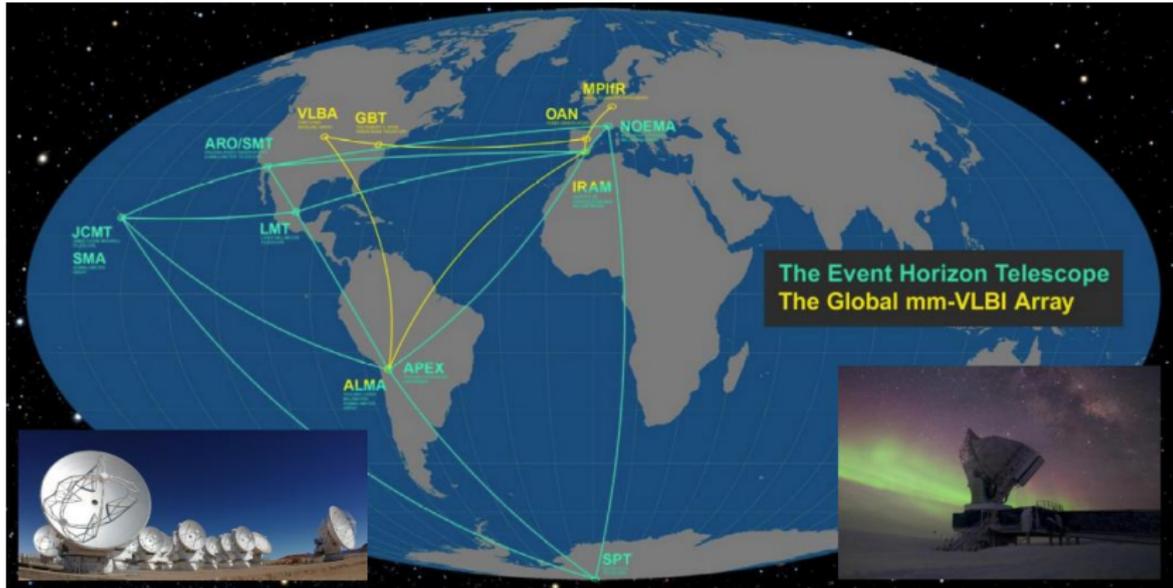
$$\Theta_{\min} \sim 0.1'' = 10^5 \mu\text{as}!$$

$$a. 1\mu\text{as} = \frac{1''}{10^6} = \frac{1^\circ}{3.6 \cdot 10^6}$$

L'Event Horizon Telescope

Interférométrie à très grande base (VLBI) en ondes (sub)millimétriques

⇒ un télescope de taille planétaire !



Campagne d'observation en avril 2017 ⇒ première image dévolée en 2019

10 avril 2019 : la toute première image observée !

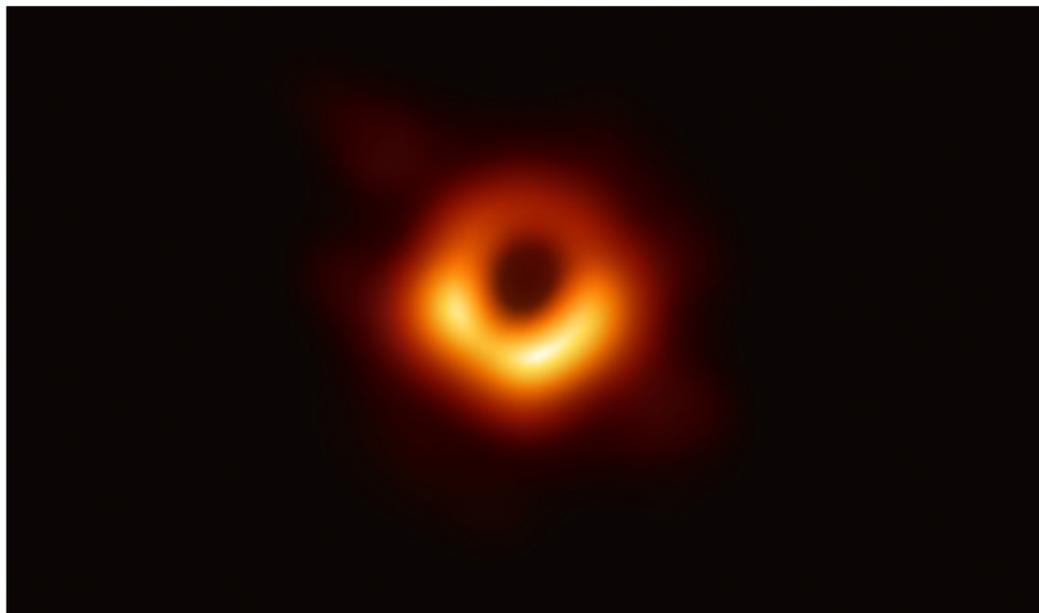
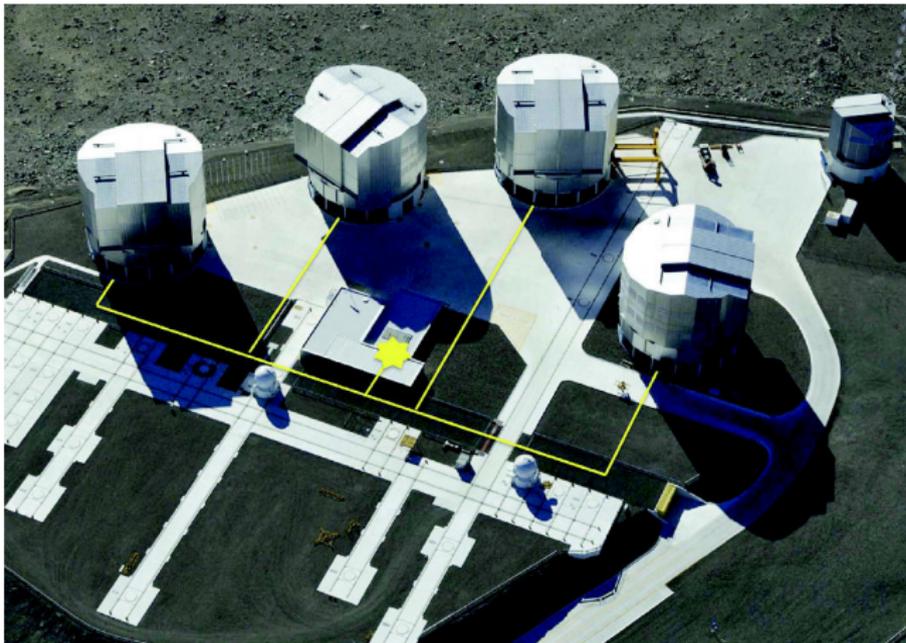


Image du trou noir M87* par la collaboration *Event Horizon Telescope*

[EHT Collaboration, ApJ 875, L1 (2019)]

Observations en interférométrie infra-rouge

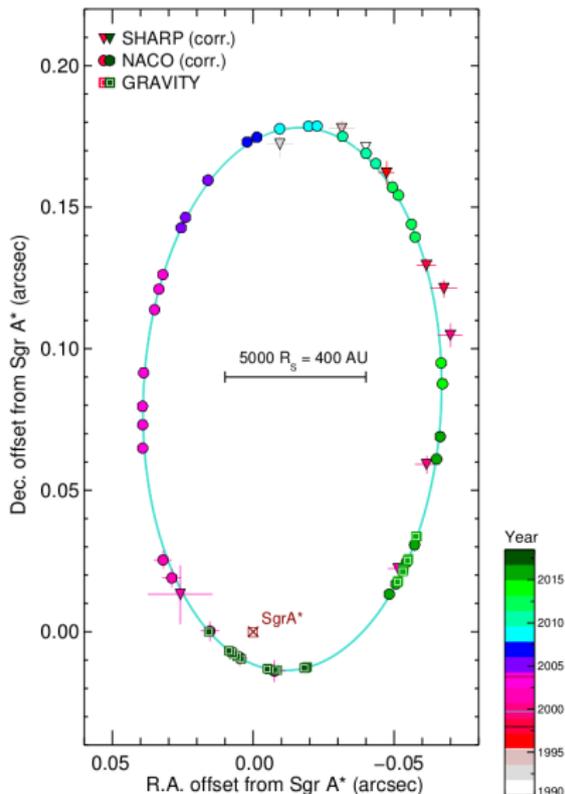


[Gillessen et al. 2010]

Instrument GRAVITY au
VLT (2016)

Combine les faisceaux
des 4 télescopes de 8 m
et de 4 télescopes
auxiliaires
⇒ précision
astrométrique de $10 \mu\text{as}$

Le trou noir du centre de notre galaxie : Sgr A*



Trou noir Sgr A* :

- distance : $d = 26\,000$ années-lumière

- masse :

$$\begin{aligned} M &= 4.10 \times 10^6 M_{\odot} \\ &= 20.2 \text{ s} \quad (c = G = 1) \\ &= 6.06 \times 10^9 \text{ m} \end{aligned}$$

- spin $J = aM$ pas encore connu...

⇒ taille de l'ombre $\Theta \sim 53 \mu\text{as}$

← **Orbite de l'étoile S2 autour de Sgr A***

S2 : étoile de type B

période orbitale : $P = 16.05$ an

périastre (mai 2018) :

- $r_{\text{per}} = 120 \text{ UA} = 3 \times 10^3 M$

- $v_{\text{per}} = 7650 \text{ km s}^{-1} = 0.025 c$

[GRAVITY team, A&A 615, L15 (2018)]

Mai 2022 : image de Sgr A* (données EHT de 2017)

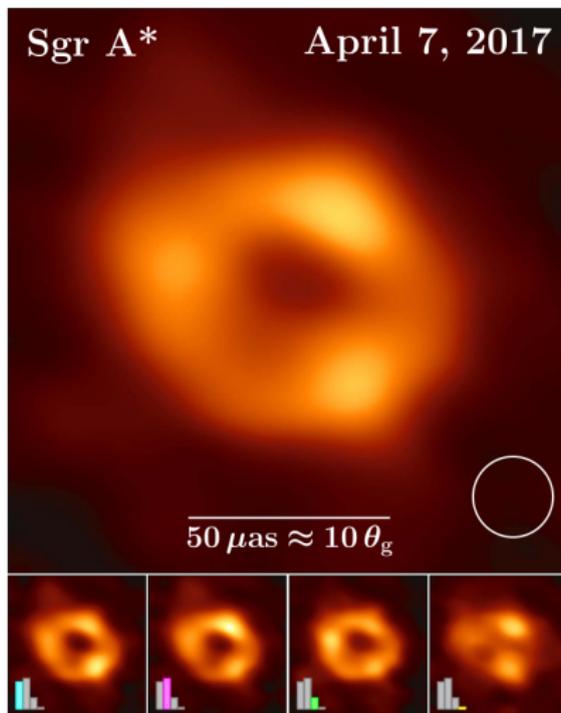


Image du trou noir Sgr A* par la collaboration *Event Horizon Telescope*

[EHT Collaboration, ApJ 930, L12 (2022)]

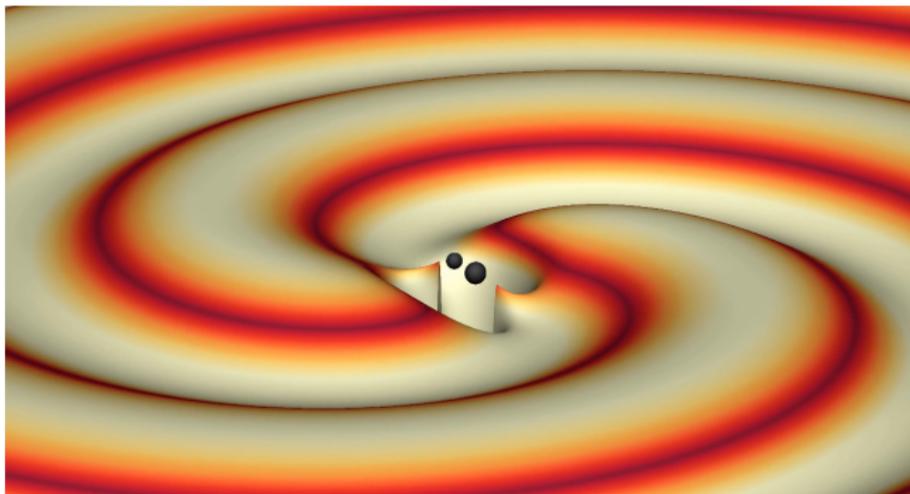
James Webb ST : des trous noirs supermassifs très tôt dans l'histoire de l'Univers



[Larson et al, ApJL 953 L29 (2023)]

CEERS 1019 : $z = 8.7$ (570 M_{an} après le Big-Bang), $M \sim 9 \times 10^6 M_{\odot}$

Un autre canal d'observation des trous noirs : les ondes gravitationnelles !



cf. l'exposé de Laura Bernard

Les messages à ramener à la maison...

- Les trous noirs font aujourd'hui partie du **bestiaire standard de l'astrophysique**, au même titre que les planètes, les étoiles et les galaxies.
- La théorie des trous noirs, qui repose sur la **relativité générale**, est très bien établie ; elle conduit à des prédictions étonnantes, mais **vérifiées expérimentalement** dans des conditions moins extrêmes (dilatation des temps ; déviation des rayons lumineux).
- On a récemment obtenu les toutes **premières images** des trous noirs **M87*** (2019) et **Sgr A*** (2022).
- Les **ondes gravitationnelles**, détectées pour la première fois en 2015, ont ouvert une nouvelle fenêtre observationnelle sur les trous noirs.
- Ces différents canaux d'observation des trous noirs permettent des **tests de la relativité générale**, affinant ainsi notre connaissance de l'espace-temps.

- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- S. Collion, 2019, *Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps*, EDP Sciences
- N. Deruelle, 2015, *De Pythagore à Einstein, tout est nombre*, Belin
- N. Deruelle & J.-P. Lasota, 2018, *Les Ondes gravitationnelles*, Odile Jacob
- J.-P. Lasota, 2010, *La science des trous noirs*, Odile Jacob
- J.-P. Luminet, 2006, *Le Destin de l'Univers II*, Folio Essais
- A. Riazuelo, 2016, *Les trous noirs : à la poursuite de l'invisible*, Vuibert
video : <https://www2.iap.fr/users/riazuelo/bh/vuibert>
- M. Smerlak, 2016, *Les trous noirs*, Que sais-je?, PUF
- P. Spagnou, 2017, *Les mystères du temps*, CNRS Éditions
- K.S. Thorne, 1997, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion
- K.S. Thorne, 2014, *The Science of Interstellar*, Norton

À propos de ce document

Cette présentation a été réalisée entièrement à l'aide de **logiciels libres** :



Linux

système d'exploitation (Ubuntu)



traitement de texte



Inkscape

dessin vectoriel

April : <https://www.april.org/>
Promouvoir et défendre le logiciel libre