

Les trous noirs: des théorèmes aux observations

Partie 2

Éric Gourgoulhon¹ Cécile Huneau²

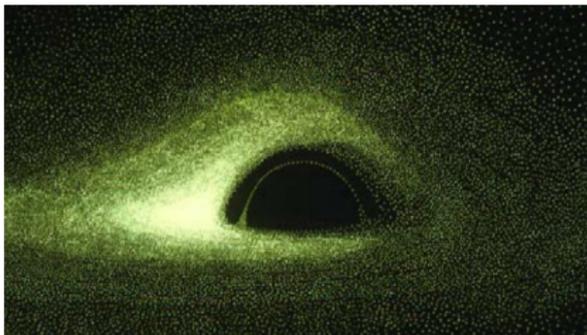
¹ Laboratoire Univers et Théories (LUTH)
CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris Diderot
Université Paris Sciences et Lettres
92190 Meudon, France
<http://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/>

² Centre de Mathématiques Laurent Schwartz
École Polytechnique
91128 Palaiseau
<http://huneau.perso.math.cnrs.fr/>

Festival Pint of Science
La Ruée vers l'Orge, Paris
14 mai 2018

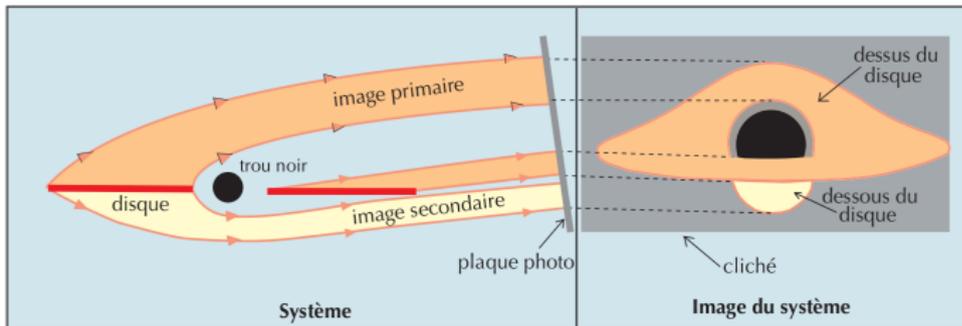
Voir un trou noir ?

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)]

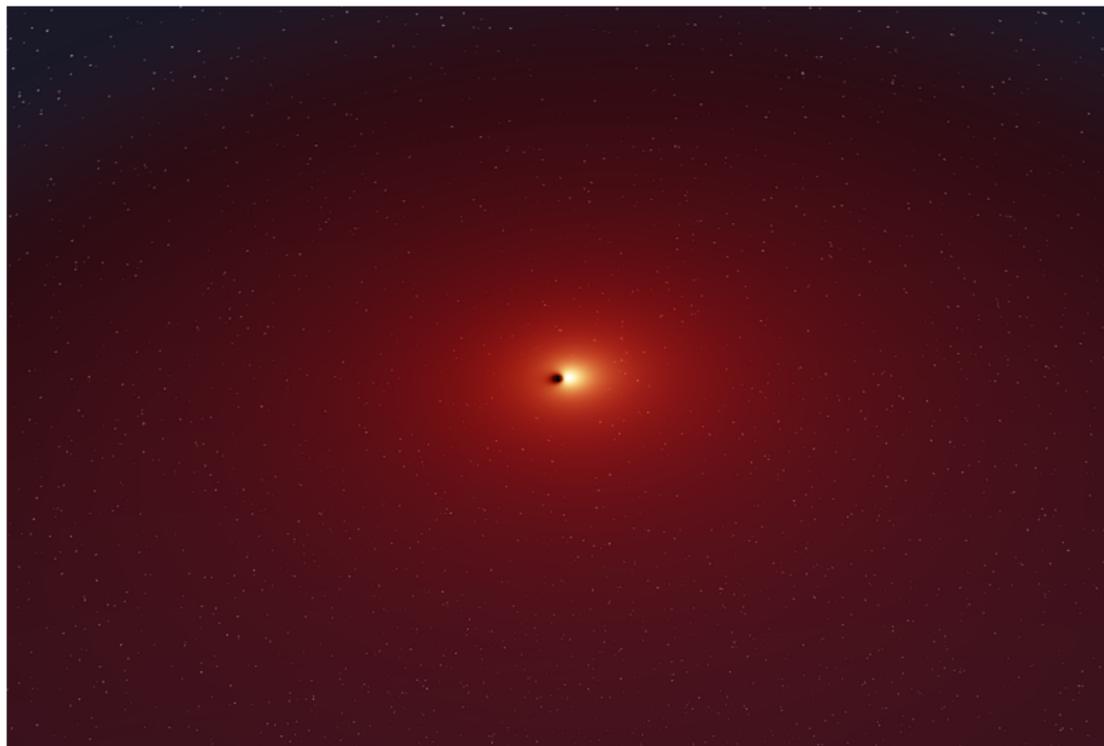


Trajectoire des
rayons lumineux et
formation de l'image

<http://luth.obspm.fr/~luminet/>

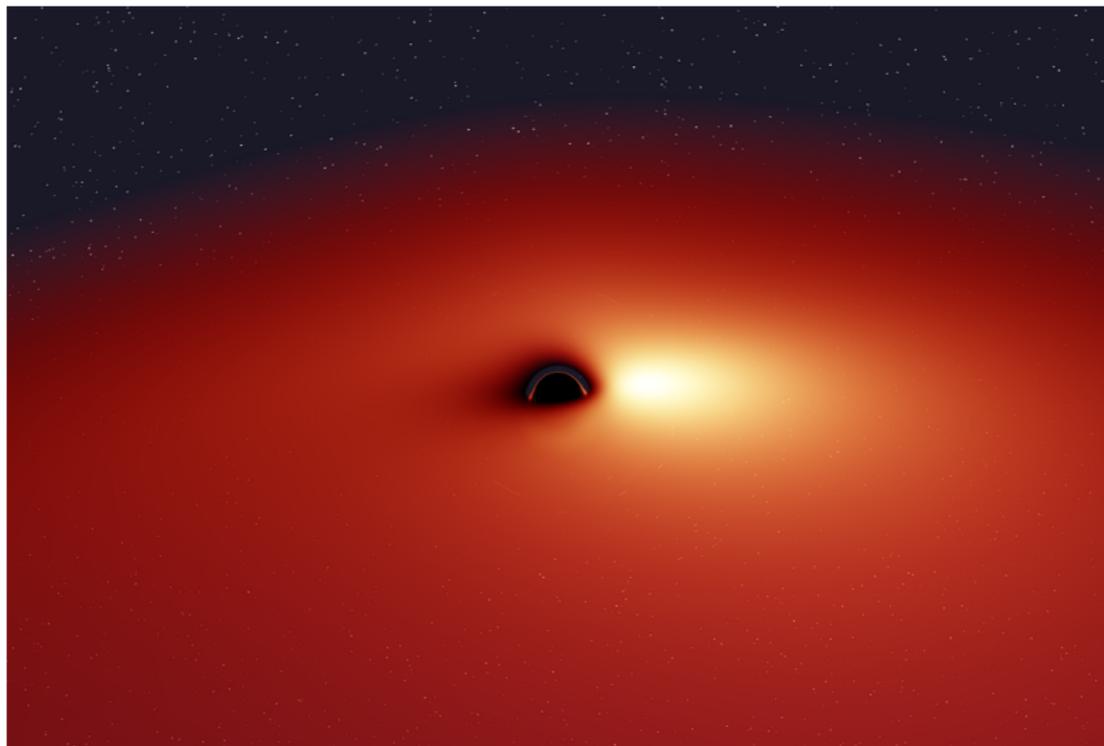
Vol vers un trou noir

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



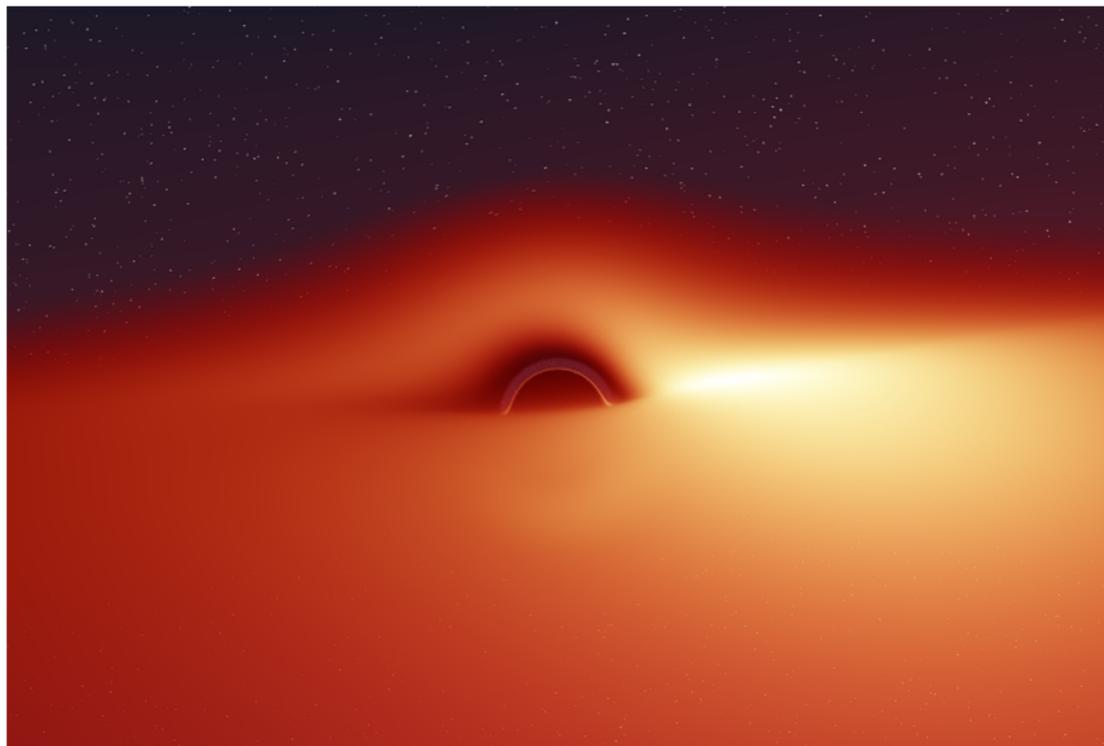
Vol vers un trou noir

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



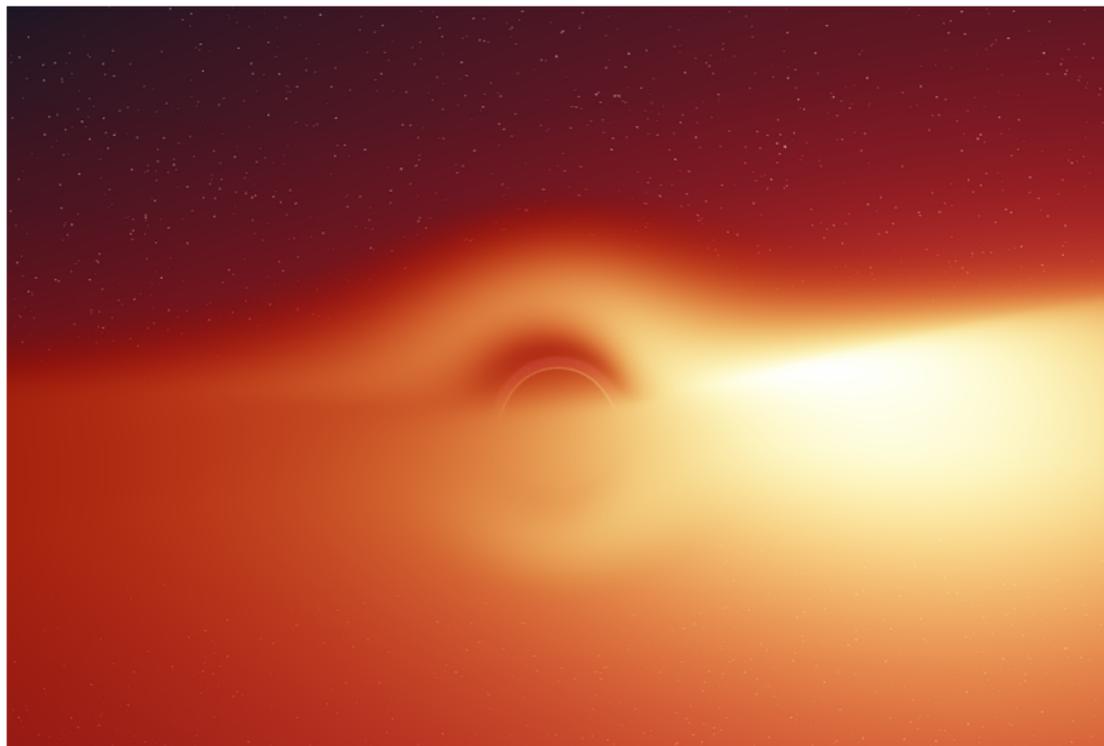
Vol vers un trou noir

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



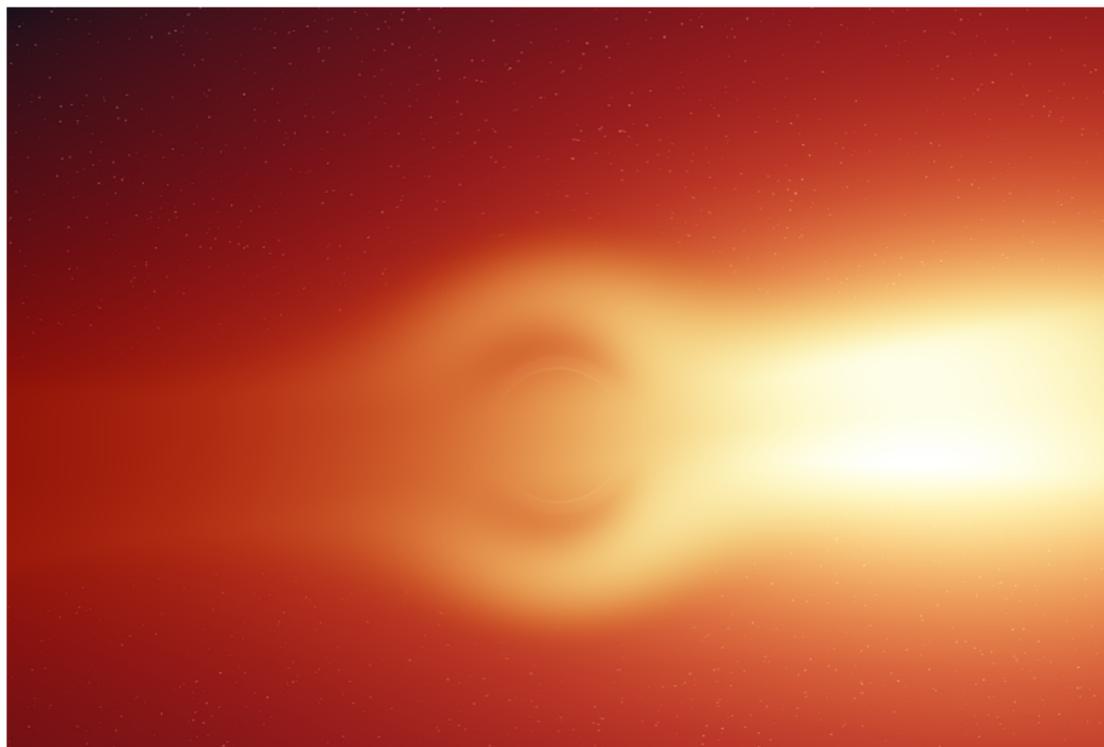
Vol vers un trou noir

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)]



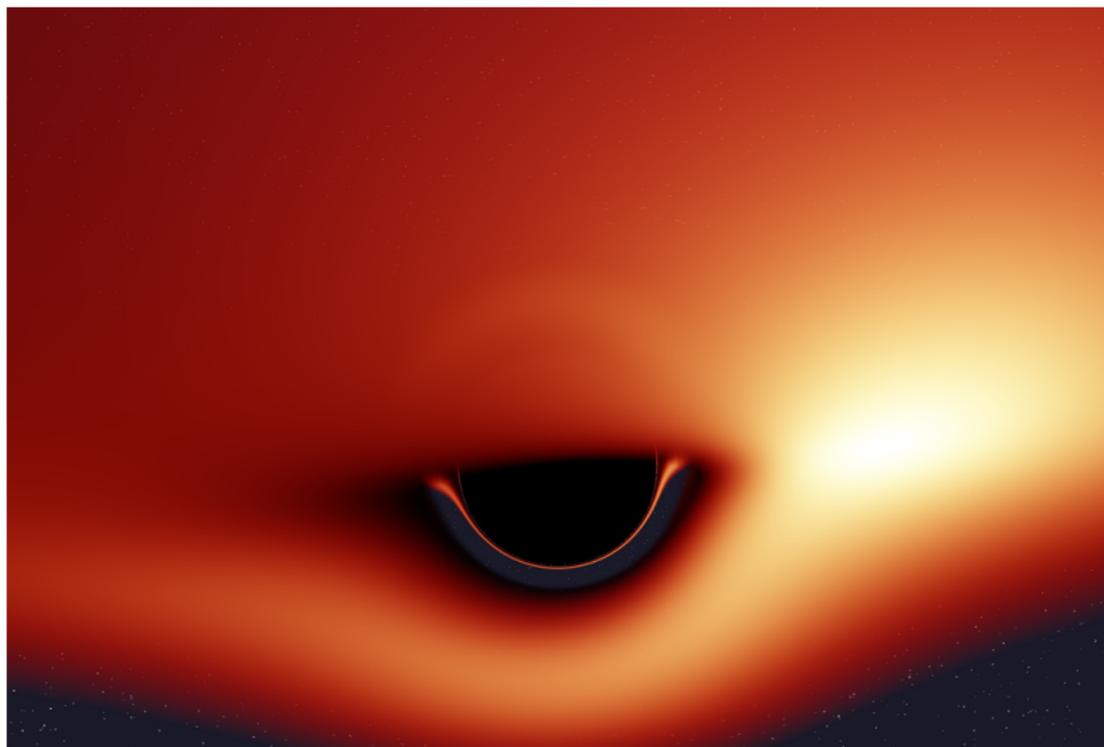
Vol vers un trou noir

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



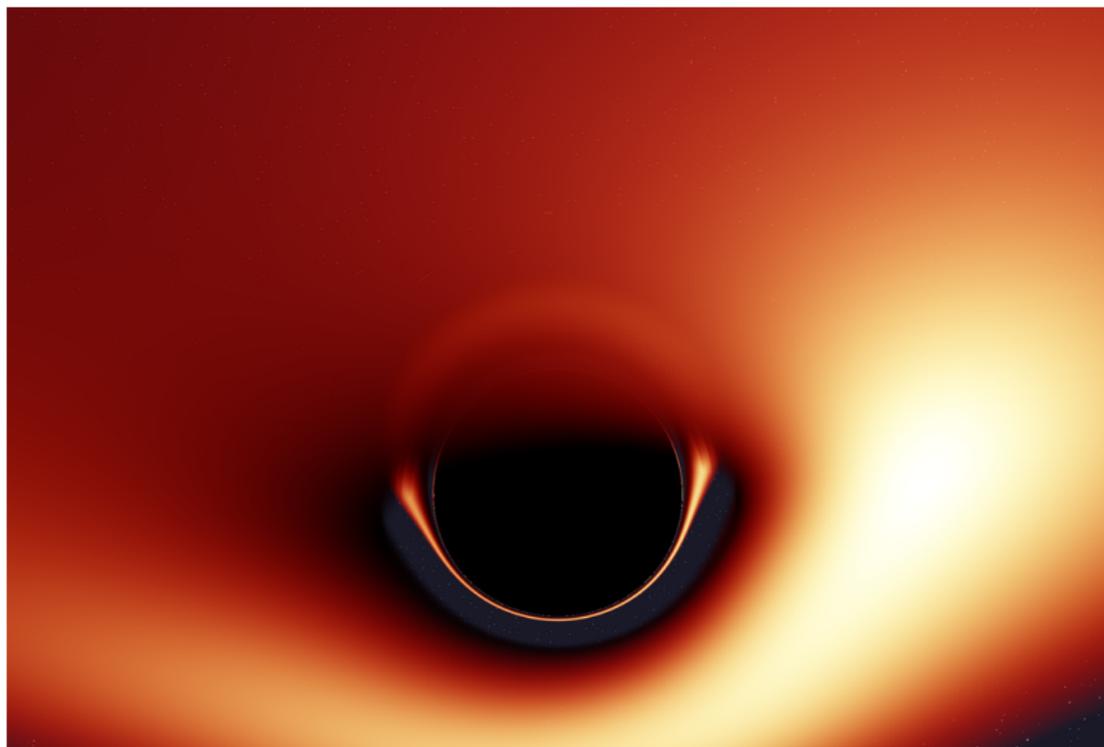
Vol vers un trou noir

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



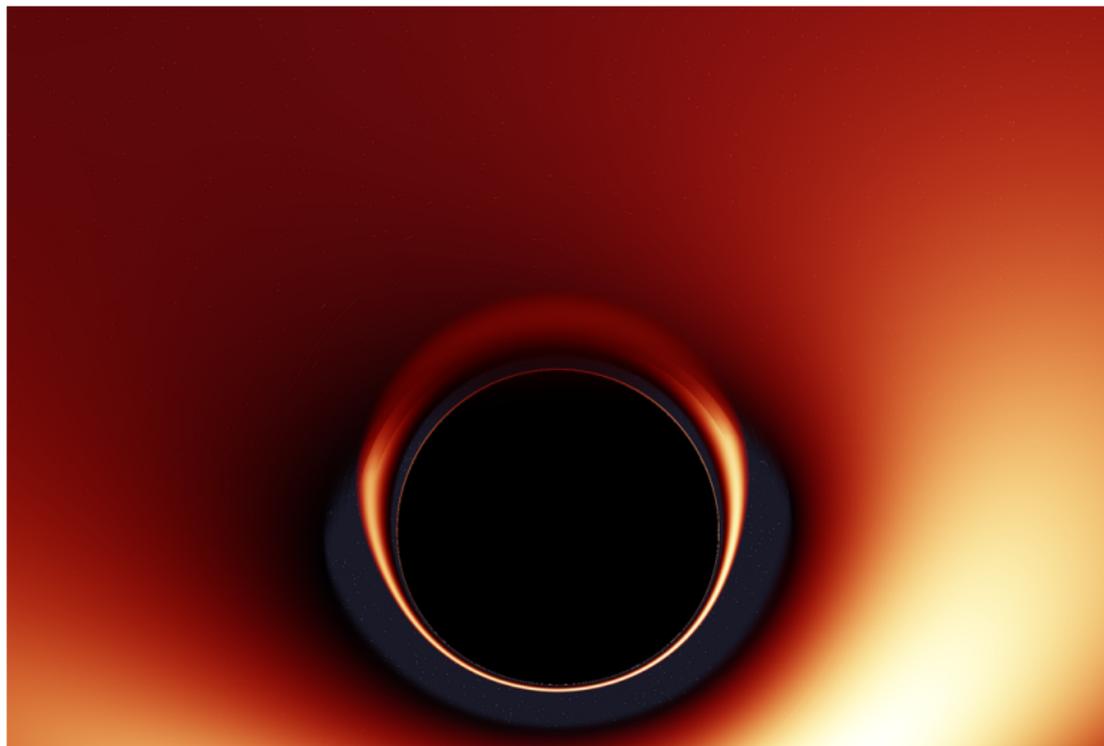
Vol vers un trou noir

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



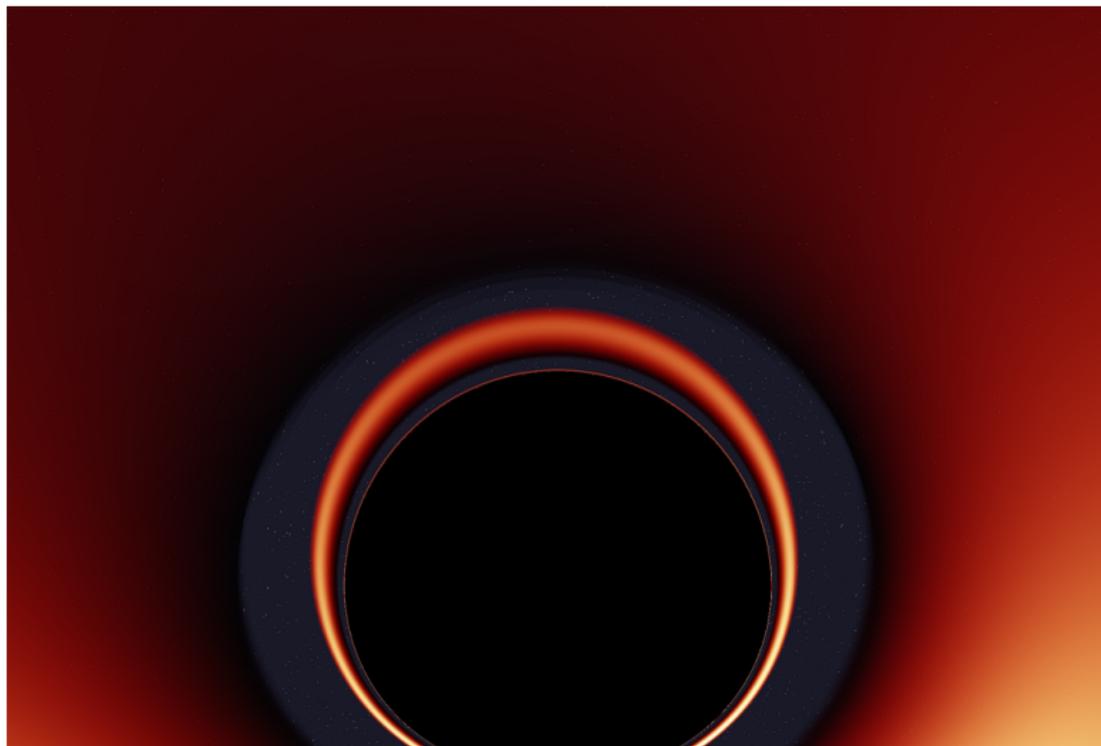
Vol vers un trou noir

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



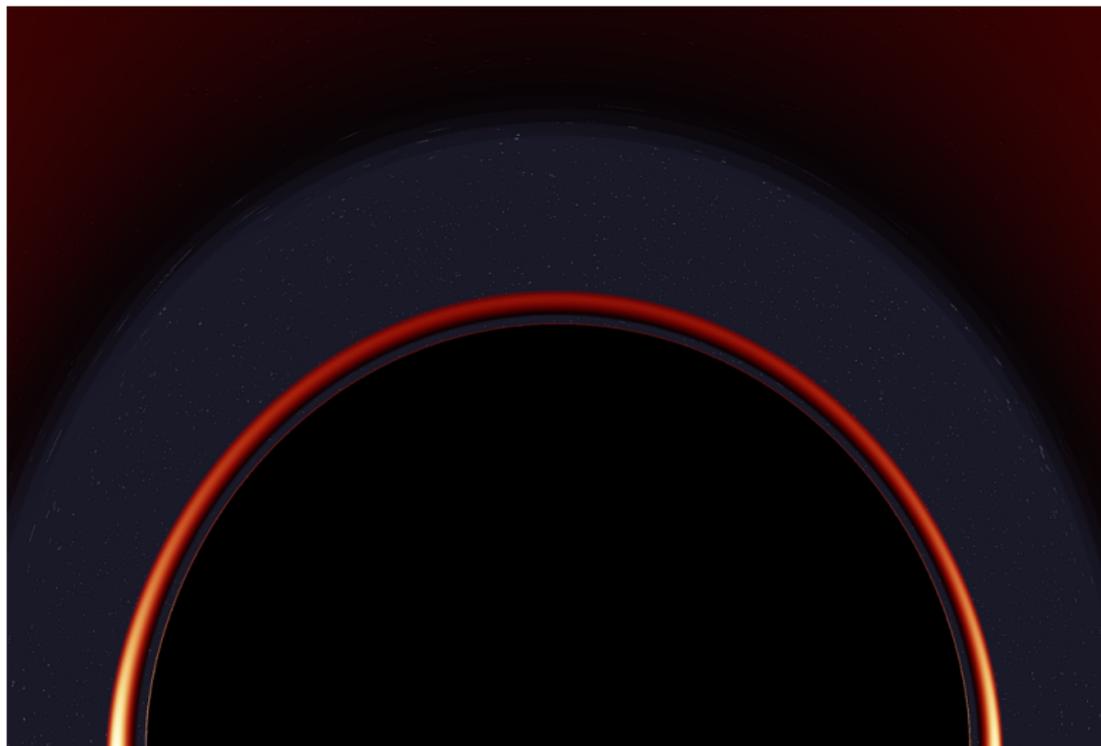
Vol vers un trou noir

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



Vol vers un trou noir

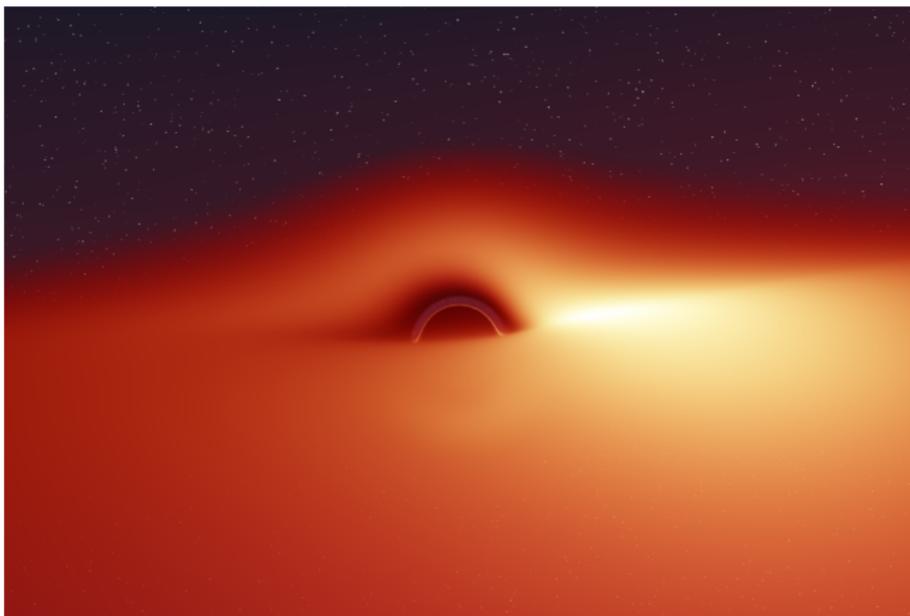
Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



Le trou noir : une source d'énergie formidable !

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



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

[J.-A. Marck (1996)]

Il existe trois grandes catégories de trous noirs astrophysiques :

- les **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 $R = 45 \text{ km}$

- les **trous noirs supermassifs**, au centre des galaxies :
 $M \sim 10^5 \text{ à } 10^{10} M_{\odot}$ et $R \sim 3 \times 10^5 \text{ km à } 200 \text{ UA}^1$

exemple : Sgr A : $M = 4,3 \times 10^6 M_{\odot}$ et
 $R = 13 \times 10^6 \text{ km} = 18 R_{\odot} = 0,09 \text{ UA} = \frac{1}{4} \text{ rayon de l'orbite de Mercure}$*

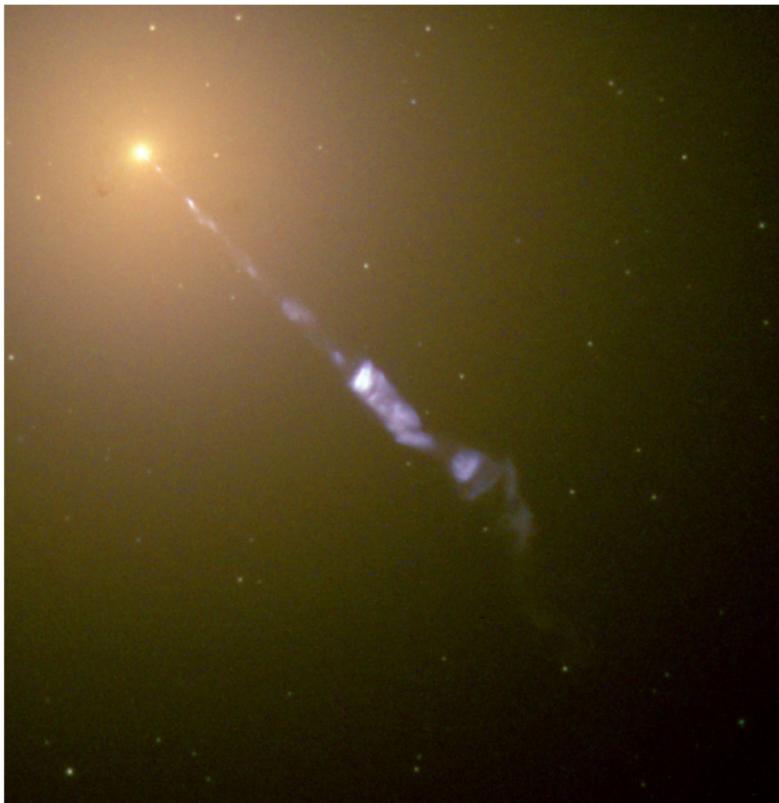
- les **trous noirs de masse intermédiaire**, vus comme des sources X ultra-lumineuses :

$M \sim 10^2 - 10^5 M_{\odot}$ 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

Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

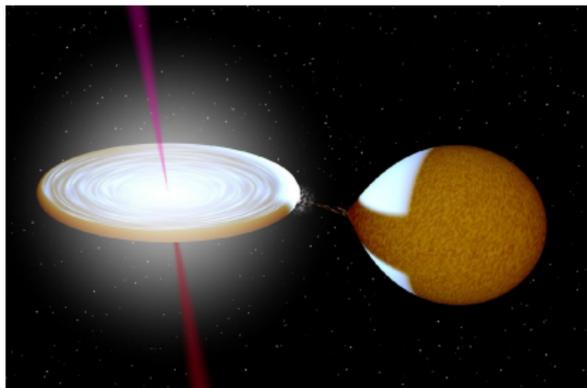
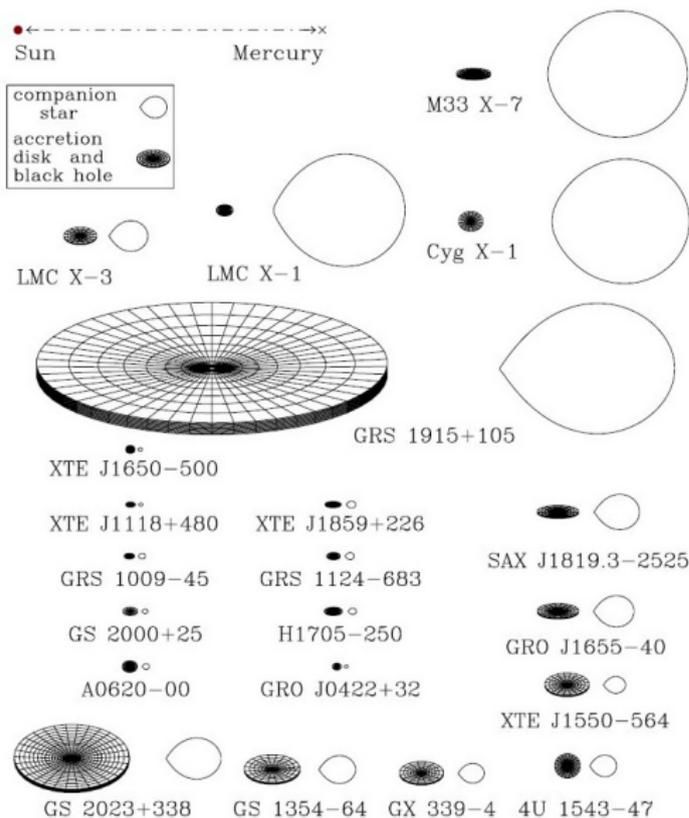


Jet émis par le noyau de la
galaxie elliptique géante M87, au
cœur de l'amas de la Vierge [HST]

$$M_{\text{t.n.}} = 3 \times 10^9 M_{\odot}$$

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

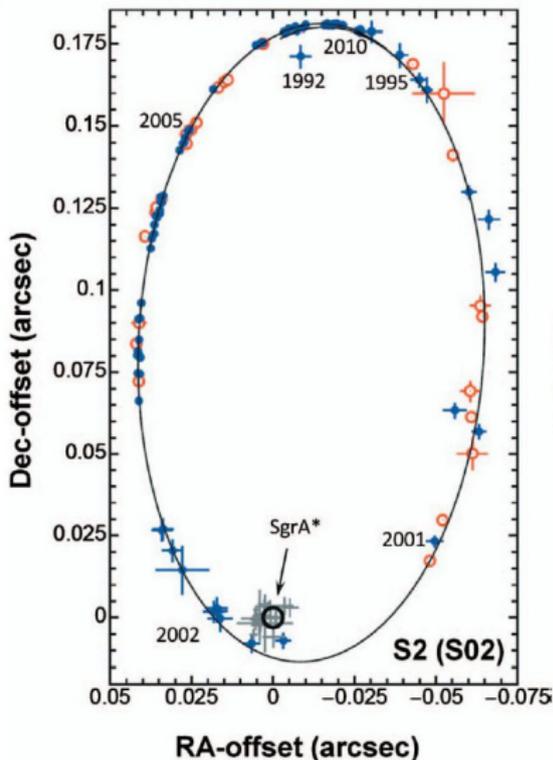
Trous noirs dans les binaires X



Une vingtaine de trous noirs identifiés dans notre galaxie

[McClintock et al. (2011)]

Le trou noir au cœur de notre galaxie : Sgr A*



[ESO (2009)]

Détection via la dynamique stellaire :

$$\Rightarrow M_{t.n.} = 4.3 \times 10^6 M_{\odot}$$

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

$$P = 16 \text{ ans}, \quad r_{\text{per}} = 120 \text{ UA} = 1400 R_{\text{S}},$$

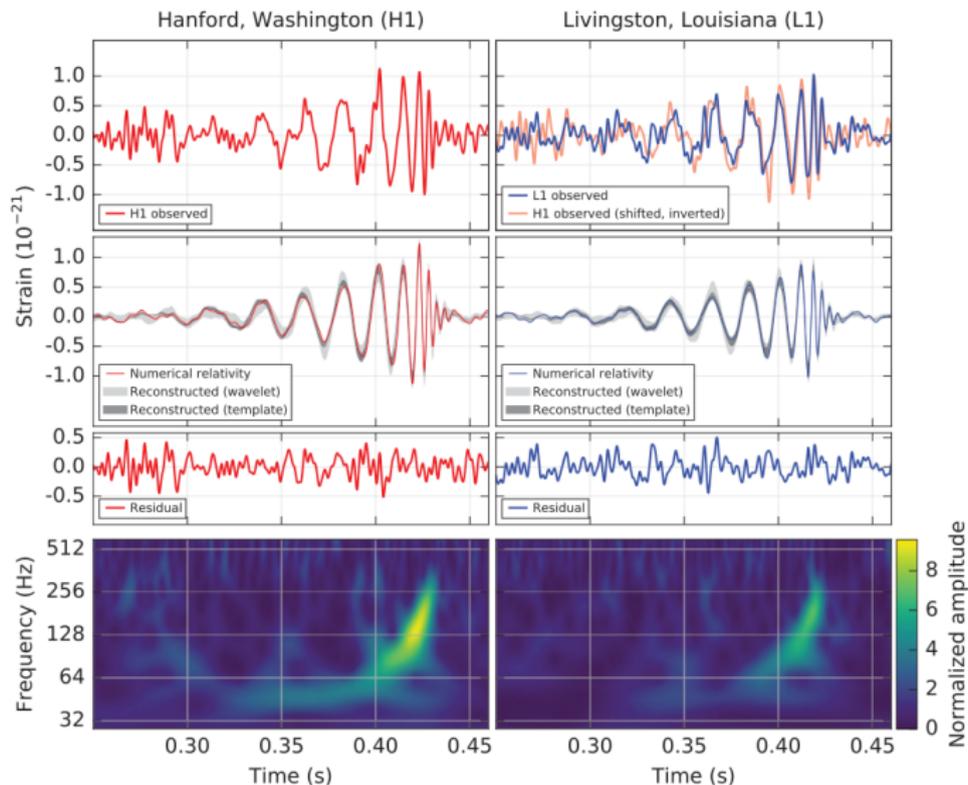
$$V_{\text{per}} = 0.02 c$$

[Genzel, Eisenhauer & Gillessen, RMP 82, 3121 (2010)]

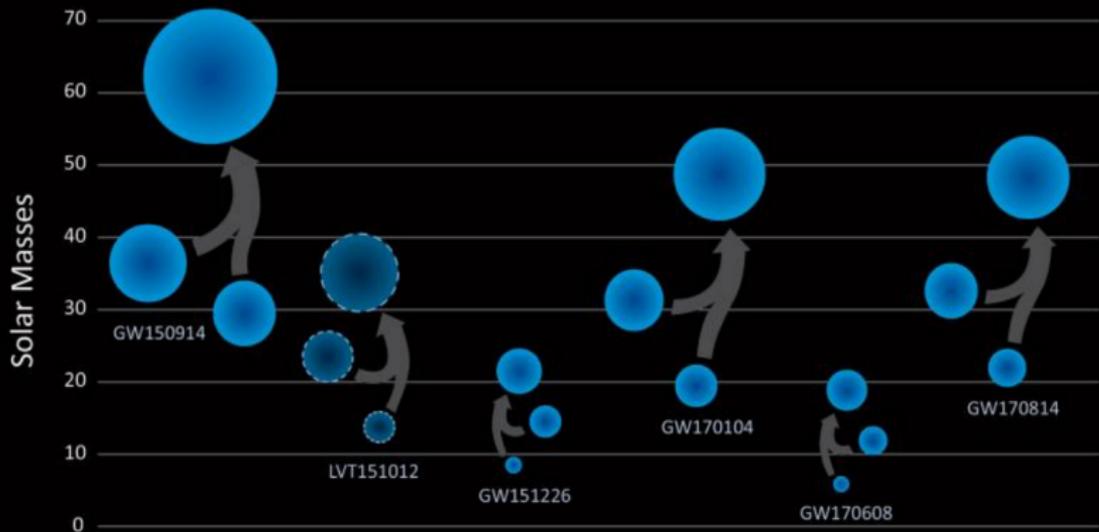
passage au périastre en mai 2018!

Voir les trous noirs en ondes gravitationnelles

Le 14 septembre 2015, à 09 h 50 min 45 s UTC :

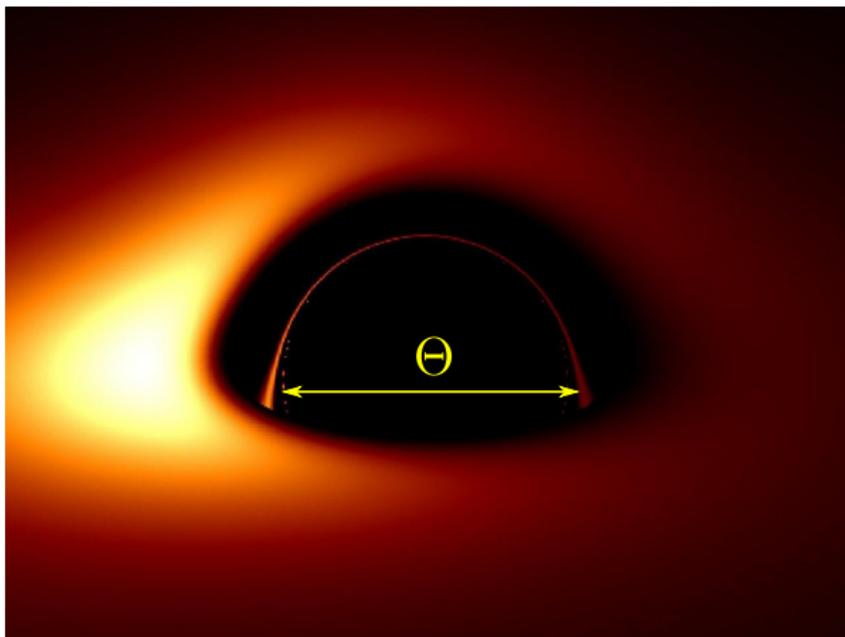


Black Holes of Known Mass



LIGO/VIRGO

Peut-on voir la silhouette des trous noirs ?



Simulation numérique (disque d'accrétion fin)

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

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

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

Viennent ensuite

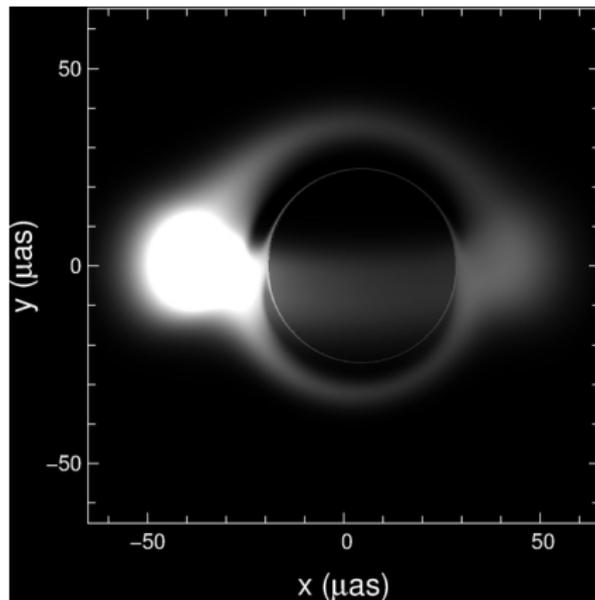
M87 : $\Theta = 21 \mu\text{as}$

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 : $\Theta_{\min} \sim 10^5 \mu\text{as}$!

Peut-on voir la silhouette des trous noirs ?



Simulation numérique (tore ionisé)

[Straub, Vincent, Abramowicz, Gourgoulhon & Paumard, A&A 543, A83 (2012)]

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

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

Viennent ensuite

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

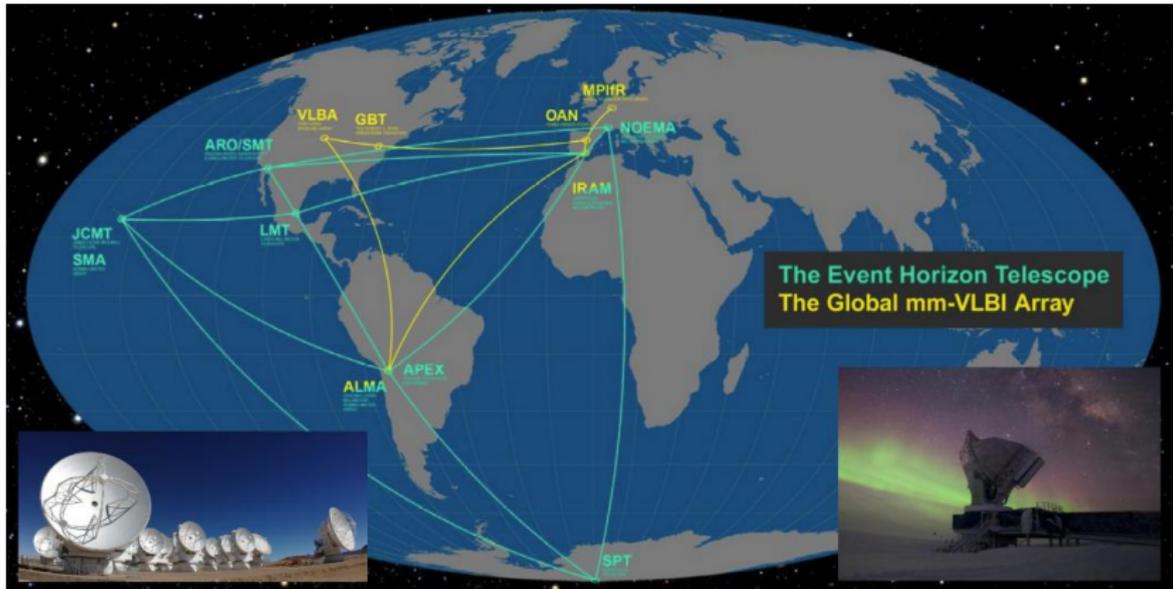
M31 : $\Theta = 20 \mu\text{as}$

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 : $\Theta_{\min} \sim 10^5 \mu\text{as}$!

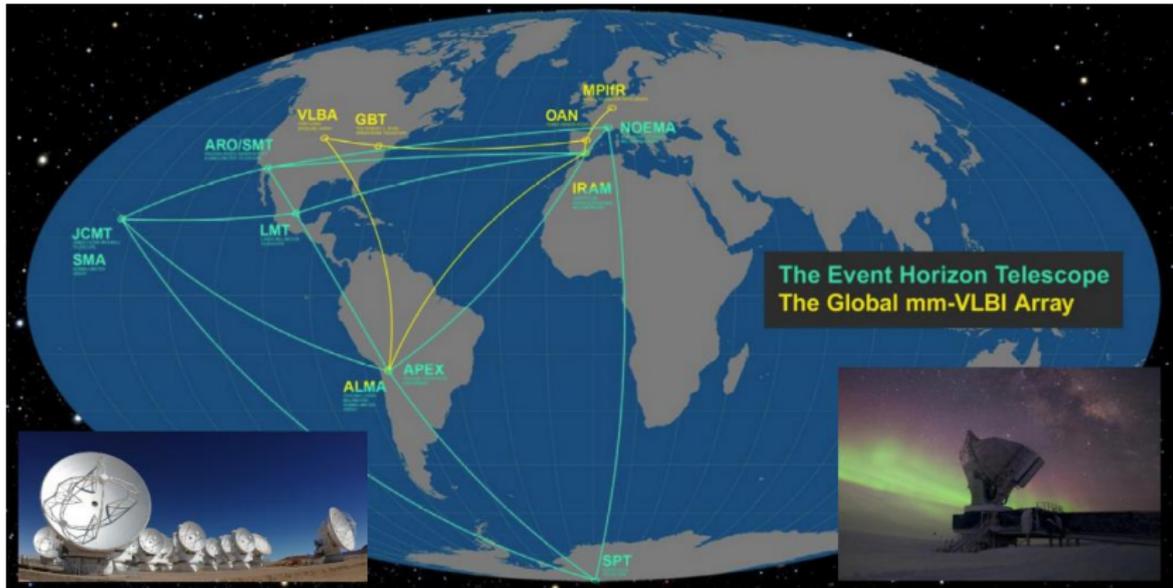
L'Event Horizon Telescope

Interférométrie à très grande base (VLBI) en ondes (sub)millimétriques
⇒ un télescope de taille planétaire !

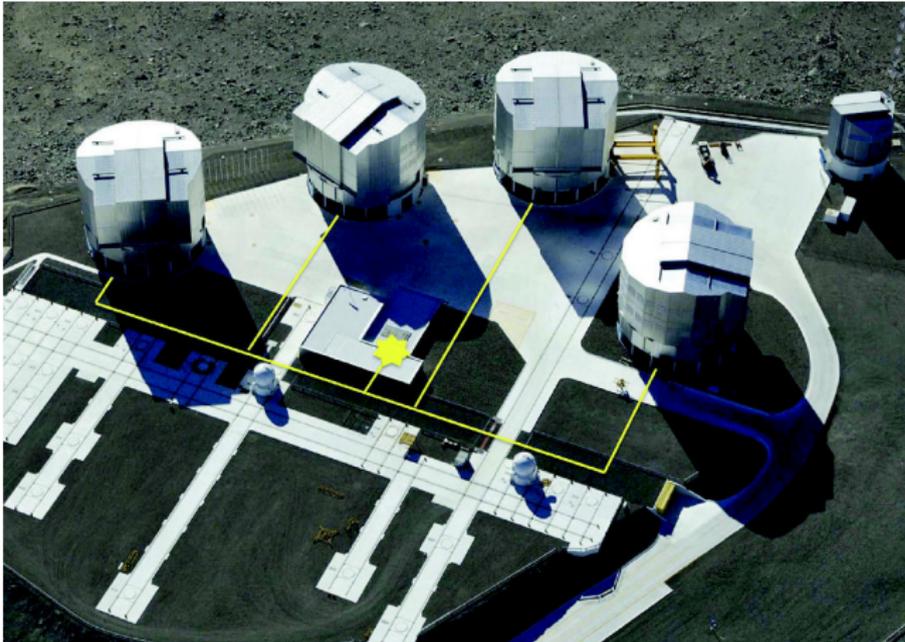


L'Event Horizon Telescope

Interférométrie à très grande base (VLBI) en ondes (sub)millimétriques
⇒ un télescope de taille planétaire !



Campagne d'observation en avril 2017 ⇒ la première image pour bientôt ?



[Gillessen et al. 2010]

Instrument GRAVITY au VLT (2016)

Combiner les faisceaux des 4 télescopes de 8 m et de 4 télescopes auxiliaires

⇒ précision astrométrique de $10 \mu\text{as}$

Observations en cours...

Tester l'absence de chevelure

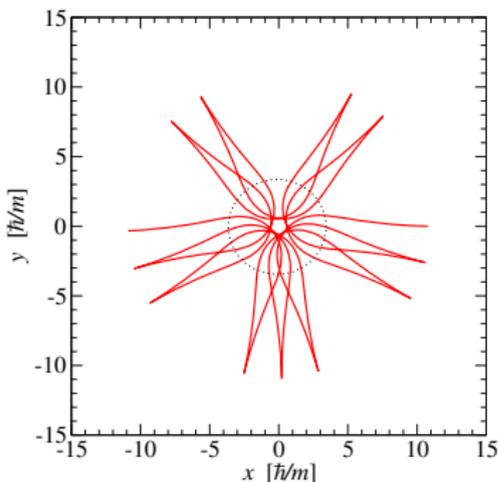
GRAVITY devrait observer des étoiles sur des orbites relativistes (plus serrées que celle de S2)

Mesure des effets relativistes :

- avance du périastre
- précession de Lense-Thirring

⇒ contraintes sur la métrique au voisinage du corps central

⇒ **est-ce bien la métrique de Kerr (a, M) ?**

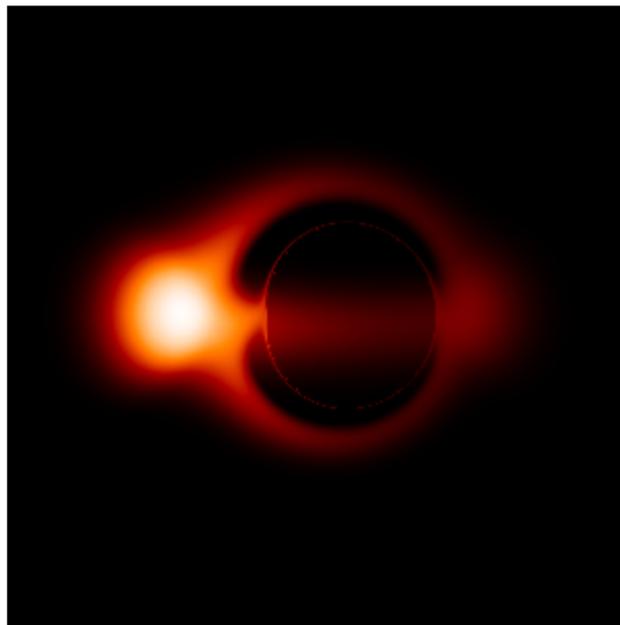


← un exemple d'orbite qui ne peut exister autour d'un trou noir de Kerr : orbite autour d'une étoile bosonique en rotation

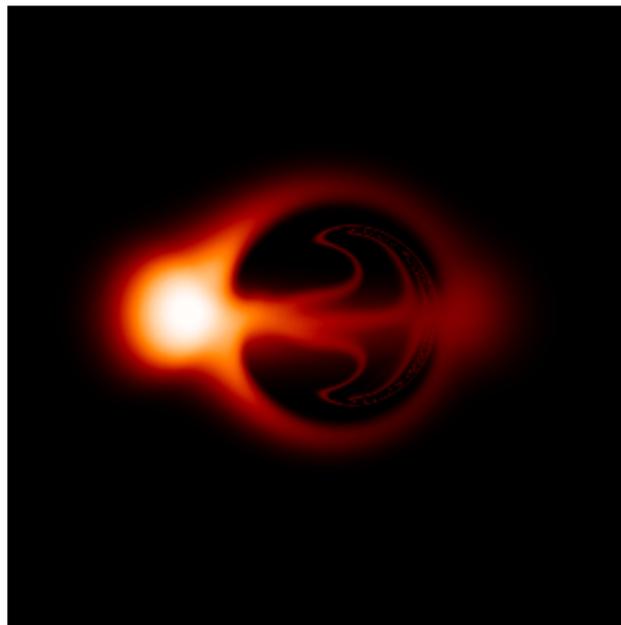
[Granclement, Somé & Gourgoulhon, PRD 90, 024068 (2014)]

Tester l'absence de chevelure : comparaison avec une étoile bosonique

TN de Kerr $a/M = 0.9$

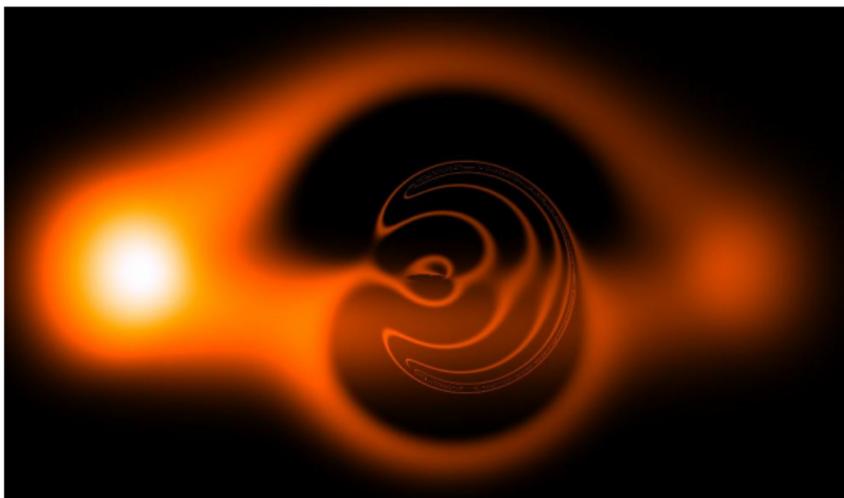


Étoile bosonique $k = 1, \omega = 0.70 m/\hbar$



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

Tester l'absence de chevelure : comparaison avec un trou de ver en rotation



zoom sur la région centrale

[Lamy, Gourgoulhon, Paumard & Vincent, CQG 35, 115009 (2018)]

- Les trous noirs font aujourd'hui partie du **bestiaire standard de l'astrophysique**, au même titre que les planètes, les étoiles et les galaxies

- 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 au voisinage de la Terre ; déviation des rayons lumineux)

- 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 au voisinage de la Terre ; déviation des rayons lumineux)
- Le trou noir le plus étudié aujourd'hui est celui du centre de notre Galaxie, Sgr A* ; on devrait avoir dans les années qui viennent les **premières images de sa silhouette !**

- 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 au voisinage de la Terre ; déviation des rayons lumineux)
- Le trou noir le plus étudié aujourd'hui est celui du centre de notre Galaxie, Sgr A* ; on devrait avoir dans les années qui viennent les **premières images de sa silhouette !**
- Les **ondes gravitationnelles**, détectées pour la première fois en 2015, ouvrent une nouvelle fenêtre observationnelle sur les trous noirs !

Bibliographie

- P. Binétruy, 2015, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, Dunod
- S. Collin-Zahn, 2009, *Des quasars aux trous noirs*, EDP Sciences
- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- 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 : trous noirs et énergie sombre*, Folio
- A. Riazuelo, 2016, *Les trous noirs : à la poursuite de l'invisible*, Vuibert
video : <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/bh/vuibert>
- P. Spagnou, 2017, *Les mystères du temps*, CNRS Éditions
- K.S. Thorne, 1997, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion

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