

Un nouveau regard sur les trous noirs

Éric Gourgoulhon

Laboratoire Univers et Théories (LUTH)
CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris Diderot
92190 Meudon, France

eric.gourgoulhon@obspm.fr

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

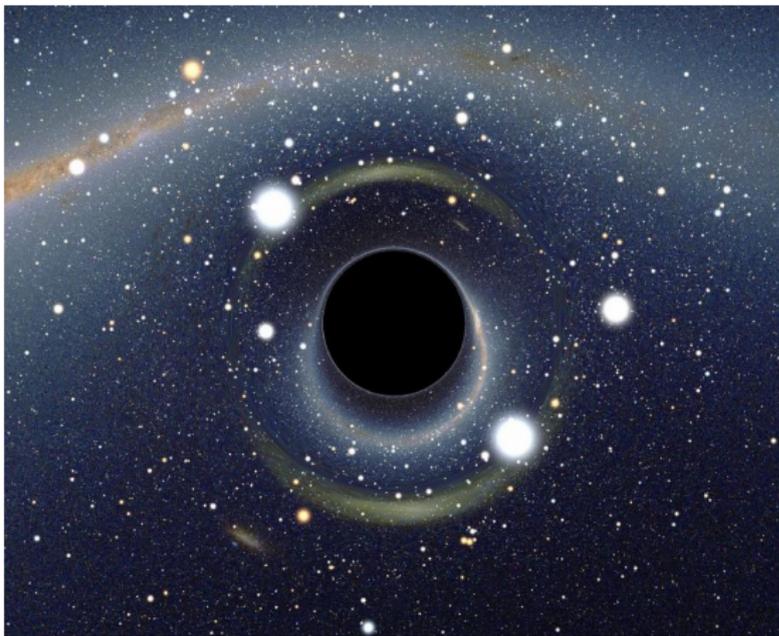
Rencontres du Ciel et de l'Espace
Cité des Sciences et de l'Industrie - Paris
9 novembre 2014

- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Simulations d'images de trous noirs
- 3 Les observations actuelles
- 4 Une nouvelle ère observationnelle

Outline

- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Simulations d'images de trous noirs
- 3 Les observations actuelles
- 4 Une nouvelle ère observationnelle

Qu'est-ce qu'un trou noir ?



[Alain Riazuelo, 2007]

Une définition en quelques mots :

Un **trou noir** est une région de l'espace-temps 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 s'échapper ?

Réponse pour la mécanique newtonienne (J. Michell 1783, Laplace 1796) :

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

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

Pourquoi la lumière ne peut s'échapper ?

Réponse pour la mécanique newtonienne (J. Michell 1783, 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 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

$$V_{\text{lib}} > c \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$



Compacité et densité

$$V_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \implies \frac{V_{\text{lib}}}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2 R}} = \sqrt{2C}$$

avec $C = \frac{GM}{c^2 R}$ ← **compacité**

≠ densité $\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$

Compacité et densité

$$V_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \implies \frac{V_{\text{lib}}}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2 R}} = \sqrt{2\mathcal{C}}$$

avec $\mathcal{C} = \frac{GM}{c^2 R}$ ← **compacité**

≠ densité $\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$

	proton	Terre	Soleil	naine blanche	ét. à neutrons	trou noir
ρ [kg m ⁻³]	2 10 ¹⁷	5 10 ³	10 ³	10 ¹⁰	10 ¹⁷	0
\mathcal{C}	10 ⁻³⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁶	10 ⁻³	0.2	0.5

Compacité et densité

$$V_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \implies \frac{V_{\text{lib}}}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{c^2 R}} = \sqrt{2\mathcal{C}}$$

avec $\mathcal{C} = \frac{GM}{c^2 R}$ ← **compacité**

≠ densité $\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$

	proton	Terre	Soleil	naine blanche	ét. à neutrons	trou noir
ρ [kg m ⁻³]	2 10 ¹⁷	5 10 ³	10 ³	10 ¹⁰	10 ¹⁷	0
\mathcal{C}	10 ⁻³⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁶	10 ⁻³	0.2	0.5

Critère d'“emprisonnement” de la lumière : $\frac{V_{\text{lib}}}{c} > 1 \iff \mathcal{C} > \frac{1}{2}$

Ce n'est pas parce qu'un objet est dense qu'il retient la lumière, mais parce qu'il est **compact**.

La préhistoire des trous noirs...

$$\boxed{V_{\text{lib}} > c} \iff \underbrace{\frac{GM}{c^2 R}}_C > \frac{1}{2} \iff \frac{G}{c^2 R} \times \underbrace{\frac{4}{3}\pi R^3 \rho}_M > \frac{1}{2} \iff \boxed{R > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G \rho}}}$$

John Michell (1783)

Un corps de même densité que le Soleil, mais de rayon 500 fois plus grand ne laisserait pas s'échapper la lumière

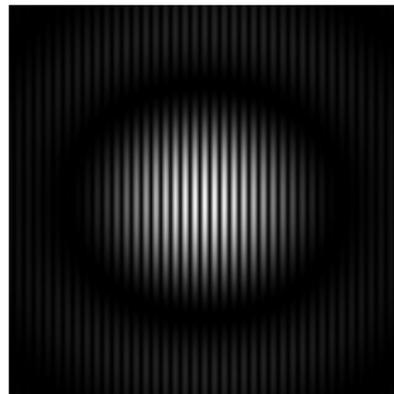
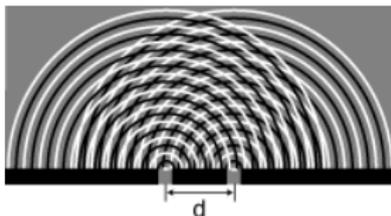
Pierre Simon de Laplace (1796)

“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.”



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 $V > c$
- $V_{\text{lib}} \sim c \implies$ 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)

Limites du concept newtonien de trou noir

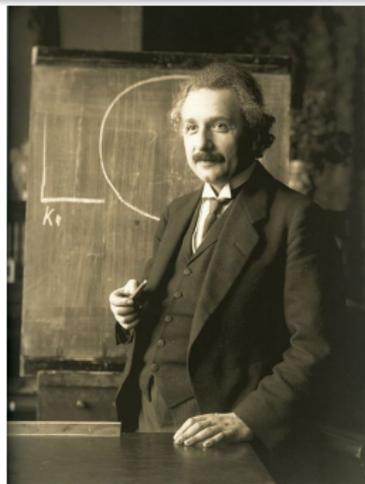
- Pas de rôle privilégié de la vitesse de la lumière en théorie newtonienne : rien n'interdit $V > c$
- $V_{\text{lib}} \sim c \implies$ énergie du champ gravitationnel \sim énergie de masse Mc^2
 \implies théorie *relativiste* de la gravitation nécessaire !

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

$$R - \frac{1}{2}Rg = \frac{8\pi G}{c^4}T$$

(A. Einstein, 1915)

La relativité générale décrit la gravitation comme la **courbure de l'espace-temps**



Mais au fait, qu'est-ce que *l'espace-temps* ?

Nous vivons dans un espace à **trois dimensions** :

- devant / derrière,
- gauche / droite,
- haut / bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

Mais au fait, qu'est-ce que *l'espace-temps*?

Nous vivons dans un espace à **trois dimensions** :

- devant / derrière,
- gauche / droite,
- haut / bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

Le temps ne possède qu'**une seule dimension** : passé / futur

⇒ 1 seul nombre t (*date*) pour localiser un événement dans le temps.

Mais au fait, qu'est-ce que *l'espace-temps* ?

Nous vivons dans un espace à **trois dimensions** :

- devant / derrière,
- gauche / droite,
- haut / bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

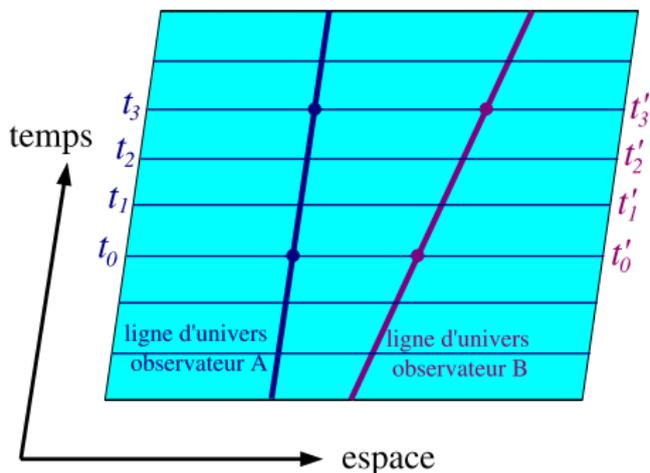
Le temps ne possède qu'**une seule dimension** : passé / futur

⇒ 1 seul nombre t (*date*) pour localiser un événement dans le temps.

On peut unifier l'espace et le temps dans un continuum mathématique à *quatre dimensions* : ***l'espace-temps***.

Concept dû à Albert Einstein, Henri Poincaré et Herman Minkowski au début du XX^e siècle.

L'espace-temps



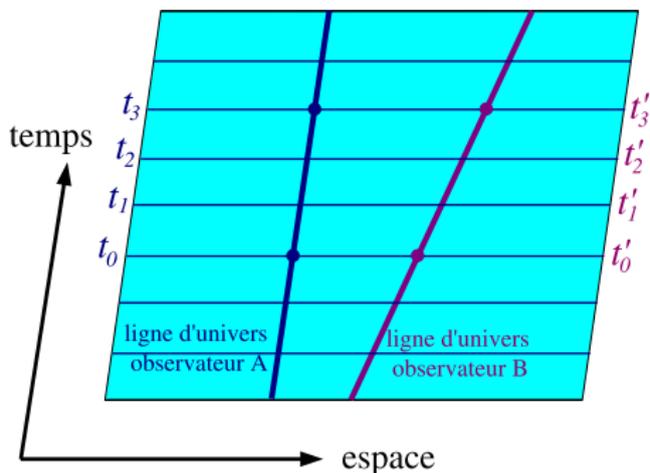
Espace-temps newtonien :

description math. : espace affine \mathbb{R}^4

structure absolue : temps universel

Tous les observateurs mesurent le même temps

L'espace-temps

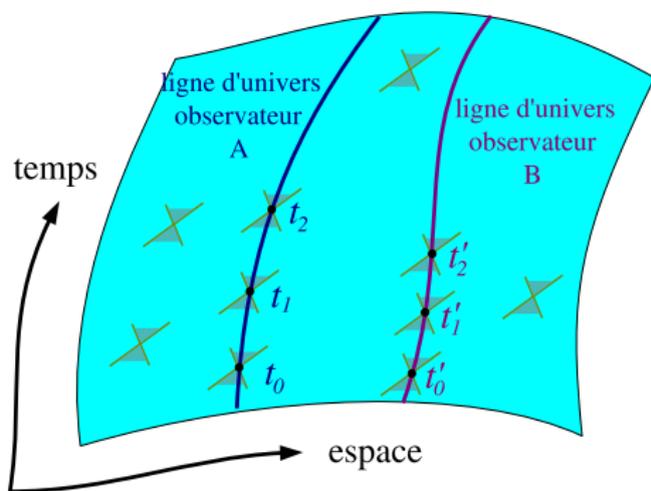


Espace-temps newtonien :

description math. : espace affine \mathbb{R}^4

structure absolue : **temps universel**

Tous les observateurs mesurent le même temps



Espace-temps relativiste :

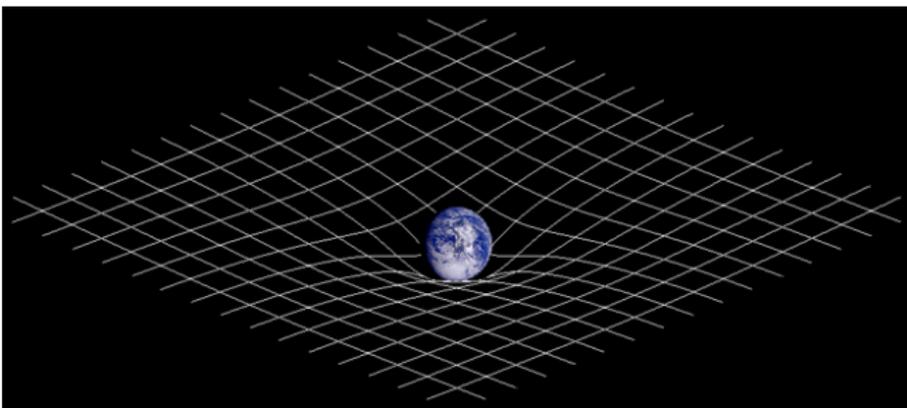
description math. : espace courbe (variété) de dimension 4

structure absolue : **cônes de lumière**

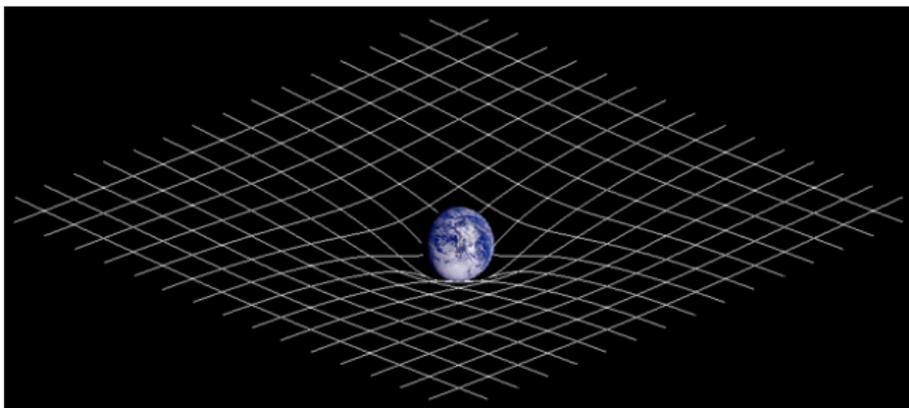
Pas de temps universel

\implies *dilatation des temps*

La relativité générale



La relativité générale



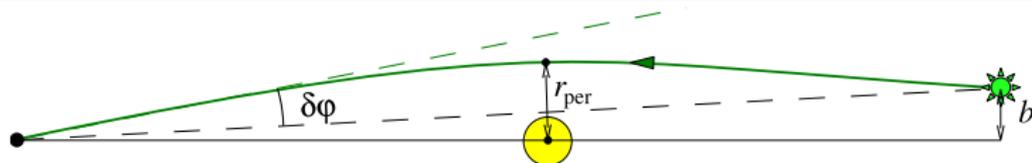
La gravitation **dévie les rayons lumineux** et influence **l'écoulement du temps**

Déviations par rapport à la théorie newtonienne mesurées par la **compacité** :

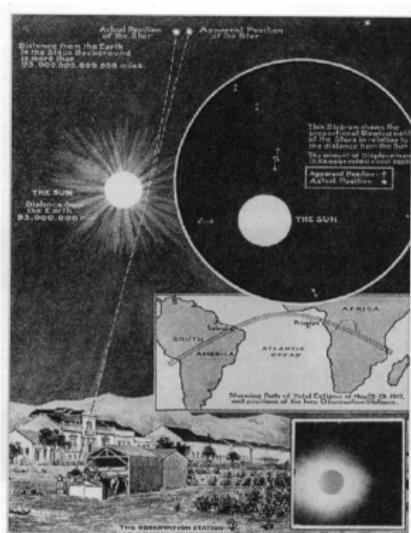
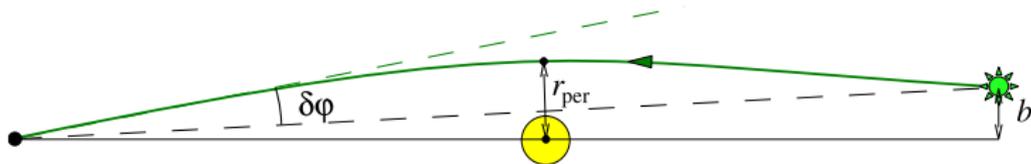
$$C = GM/(c^2 R) \sim (V_{\text{lib}}/c)^2$$

	proton	Terre	Soleil	naine blanche	étoile à neutrons	trou noir
C	10^{-39}	10^{-10}	10^{-6}	10^{-3}	2×10^{-1}	0.5

Déviatiun des rayons lumineux

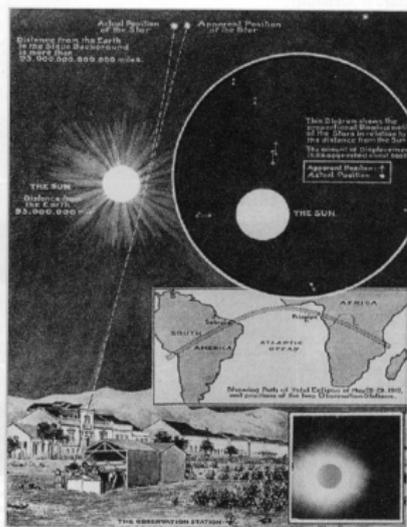
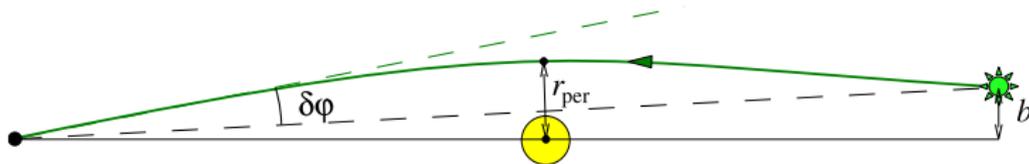


Déviatiun des rayons lumineux

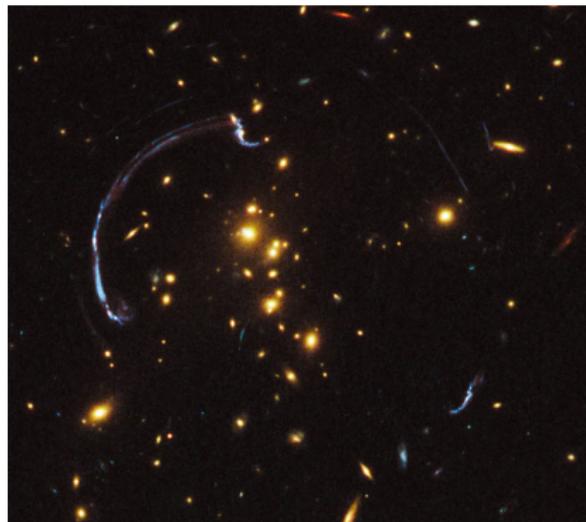


Éclipse de Soleil de 1919
(observée par A. Eddington)

Déviatiun des rayons lumineux



Éclipse de Soleil de 1919
(observée par A. Eddington)



[HST (Nasa/ESA/STSCI)]
Mirage gravitationnel

La gravitation influence l'écoulement du temps ?

La théorie newtonienne dit *non*, la relativité générale dit *oui*...

La gravitation influence l'écoulement du temps ?

La théorie newtonienne dit *non*, la relativité générale dit *oui*...



Expérience de Hafele et Keating (1971)

Dans le champ gravitationnel de la Terre :

Une horloge atomique à 9 km d'altitude (avion) pendant 48 h a vieilli de 0,15 microseconde de plus qu'une horloge atomique identique restée au sol.

La gravitation influence l'écoulement du temps ?

La théorie newtonienne dit *non*, la relativité générale dit *oui*...



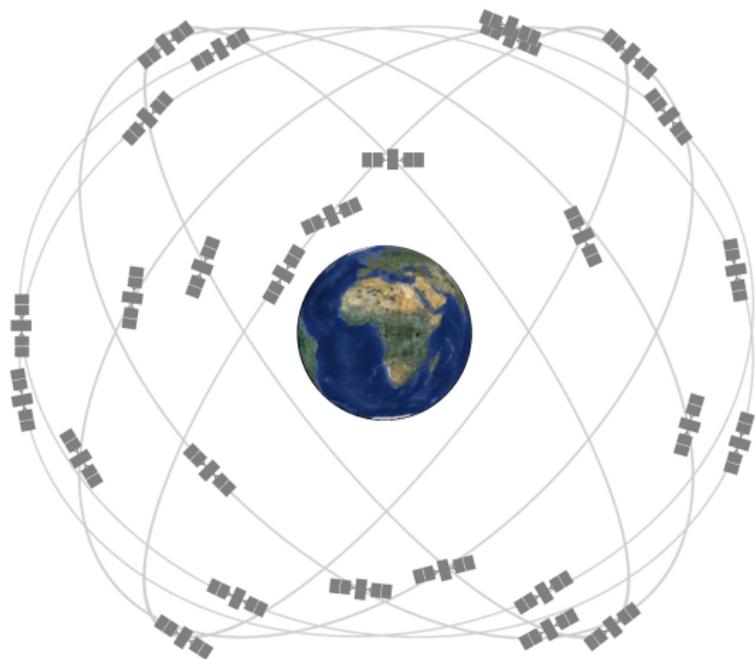
Expérience de Hafele et Keating (1971)

Dans le champ gravitationnel de la Terre :

Une horloge atomique à 9 km d'altitude (avion) pendant 48 h a vieilli de 0,15 microseconde de plus qu'une horloge atomique identique restée au sol.

C'est la relativité générale qui a raison !

Le GPS doit tenir compte de la distorsion temporelle !



[gps.gov]

Altitude $h = 2 \times 10^4$ km

Relat. gen. $\Rightarrow \delta t/t = 5 \times 10^{-10}$

En un jour, la dérive atteint

$\delta t = 46 \mu\text{s}$

ce qui correspondrait à une
erreur de positionnement de
28 km si aucune correction
n'était appliquée !

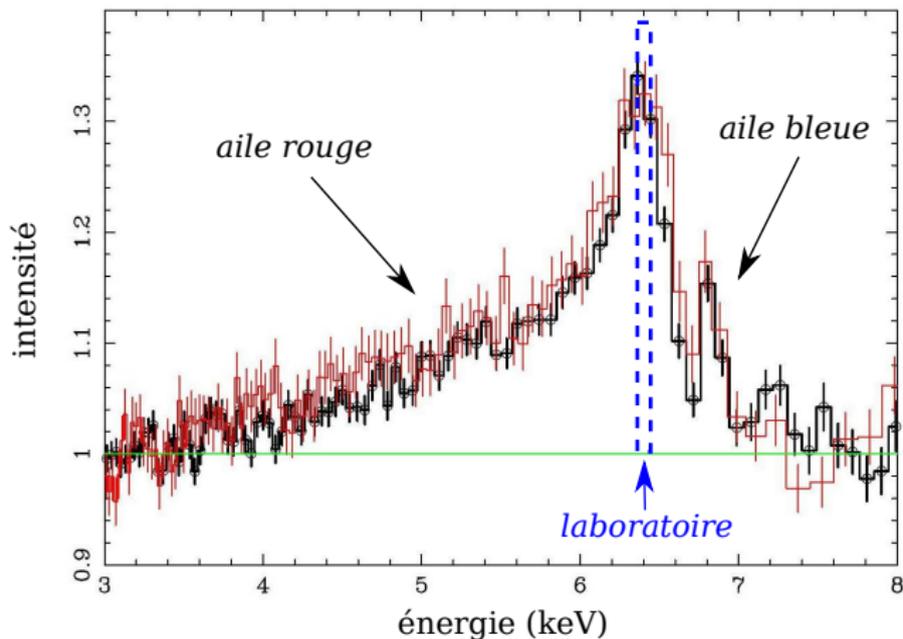
Au voisinage d'un trou noir, l'effet est beaucoup plus marqué !

Un observateur éloigné voit un explorateur proche du trou noir vieillir beaucoup moins vite que lui.

Si l'explorateur décide de franchir l'horizon, l'observateur éloigné le verra "se figer" tout près de l'horizon et ne jamais le traverser. Par contre, du point de vue de l'explorateur, l'horizon est franchi sans encombre en un temps fini.

... et mesuré !

par exemple pour le trou noir supermassif au cœur de la galaxie MCG-6-30-15

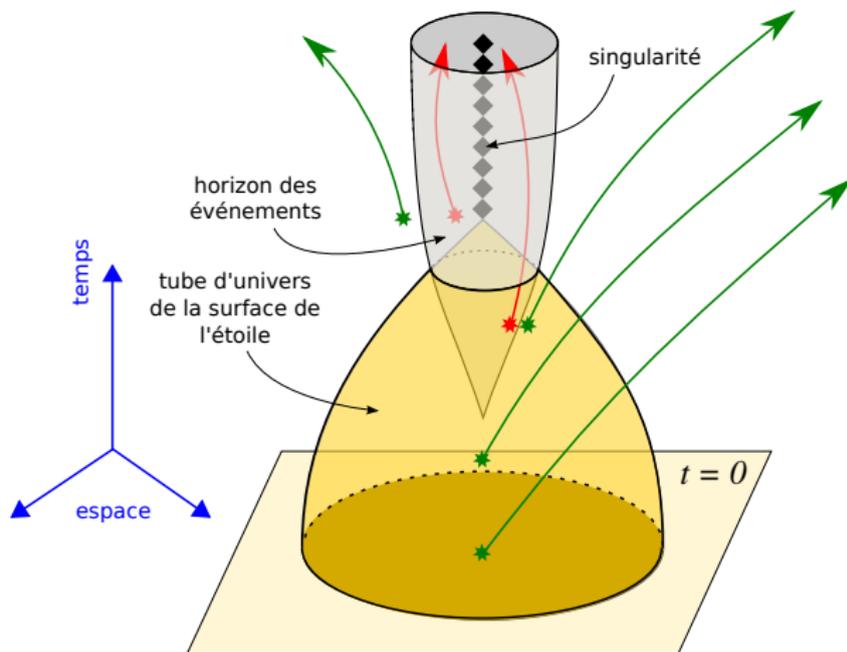


Raie $K\alpha$ observée par les satellites XMM-Newton (rouge) et Suzaku (noir) (adapté de [Miller (2007)])

Raie $K\alpha$: raie de fluorescence X des atomes de fer du disque d'accrétion entourant le trou noir (les atomes de fer sont excités par les rayons X de haute énergie émis depuis la couronne de plasma qui entoure le disque).

Décalage vers le rouge
 ⇒ basse fréquence
 ⇒ longue période
 ⇒ **dilatation des temps**

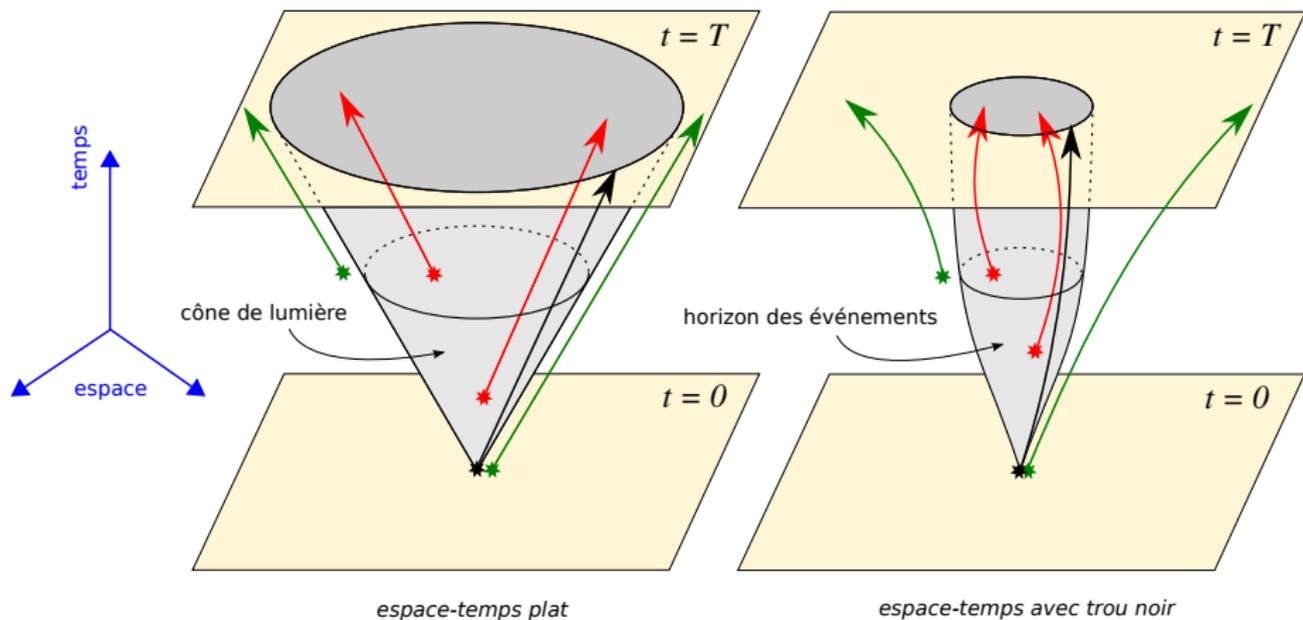
Le trou noir de la relativité générale...



...vu dans un **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 $\rightarrow \infty$

L'horizon comme un cône de lumière



La singularité centrale

- La singularité centrale est une **singularité de courbure** : la courbure de l'espace-temps diverge (tend vers l'infini) à cet endroit.
- La **singularité centrale marque la 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.

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.
- **Un trou noir n'est pas un "objet extrêmement dense"** : au contraire, il est fait de **vide** (l'horizon est une frontière immatérielle), sauf peut-être en son centre (*singularité*). Si l'on définit une "densité moyenne" par $\bar{\rho} = M/(4/3\pi R^3)$, alors

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.
- **Un trou noir n'est pas un "objet extrêmement dense"** : au contraire, il est fait de **vide** (l'horizon est une frontière immatérielle), sauf peut-être en son centre (*singularité*). Si l'on définit une "densité moyenne" par $\bar{\rho} = M/(4/3\pi R^3)$, alors
 - pour le trou noir au centre de notre galaxie (Sgr A*) : $\bar{\rho} \sim 10^6 \text{ kg m}^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \times$ la densité d'une naine blanche

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.
- **Un trou noir n'est pas un "objet extrêmement dense"** : au contraire, il est fait de **vide** (l'horizon est une frontière immatérielle), sauf peut-être en son centre (*singularité*). Si l'on définit une "densité moyenne" par $\bar{\rho} = M/(4/3\pi R^3)$, alors
 - pour le trou noir au centre de notre galaxie (Sgr A*) : $\bar{\rho} \sim 10^6 \text{ kg m}^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \times$ la densité d'une naine blanche
 - pour le trou noir au centre de la galaxie M87 : $\bar{\rho} \sim 2 \text{ kg m}^{-3} = 1/500^{\text{e}}$ de la densité de l'eau !

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.
- **Un trou noir n'est pas un "objet extrêmement dense"** : au contraire, il est fait de **vide** (l'horizon est une frontière immatérielle), sauf peut-être en son centre (*singularité*). Si l'on définit une "densité moyenne" par $\bar{\rho} = M/(4/3\pi R^3)$, alors
 - pour le trou noir au centre de notre galaxie (Sgr A*) : $\bar{\rho} \sim 10^6 \text{ kg m}^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \times$ la densité d'une naine blanche
 - pour le trou noir au centre de la galaxie M87 : $\bar{\rho} \sim 2 \text{ kg m}^{-3} = 1/500^{\text{e}}$ de la densité de l'eau !
- **On peut, en théorie, former un trou noir dans un univers vide de toute matière** : par effondrement d'un paquet d'ondes d'espace-temps (*les ondes gravitationnelles*).

Quelques propriétés des trous noirs (2/3)

- **Théorème d'unicité** : en relativité générale, un trou noir est un objet extrêmement régulier : s'il est stationnaire, deux nombres suffisent à le décrire entièrement¹ :
 - sa masse M
 - son moment cinétique J (mesure l'état de rotation)
 ⇒ *“un trou noir n'a pas de cheveux”* (John A. Wheeler)
- La **masse d'un trou noir** n'est pas une mesure de la “quantité de matière” à l'intérieur du trou noir, mais un paramètre M qui caractérise son champ de gravitation externe. Elle est mesurable à partir de la période orbitale d'un corps d'épreuve en orbite circulaire à grande distance autour du trou noir.
- Le **moment cinétique** J est également une quantité mesurable, par la précession d'un gyroscope embarqué dans un satellite en orbite autour du trou noir.

1. La solution mathématique des équations d'Einstein correspondante s'appelle la **solution de Kerr** (1963) ; pour $J = 0$, elle se réduit à la **solution de Schwarzschild** (1916)

Quelques propriétés des trous noirs (3/3)

- Le **rayon d'un trou noir** n'est pas un concept bien défini ; en aucun cas, il ne correspond à la distance entre le "centre" du trou noir (la singularité) et l'horizon. Il vaut mieux le définir à partir de l'aire A de l'horizon. Pour un trou noir statique, $R = \sqrt{A/4\pi}$. Le rayon ainsi défini est proportionnel à la masse : $R = \frac{2GM}{c^2} \simeq 3 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ km}$

Outline

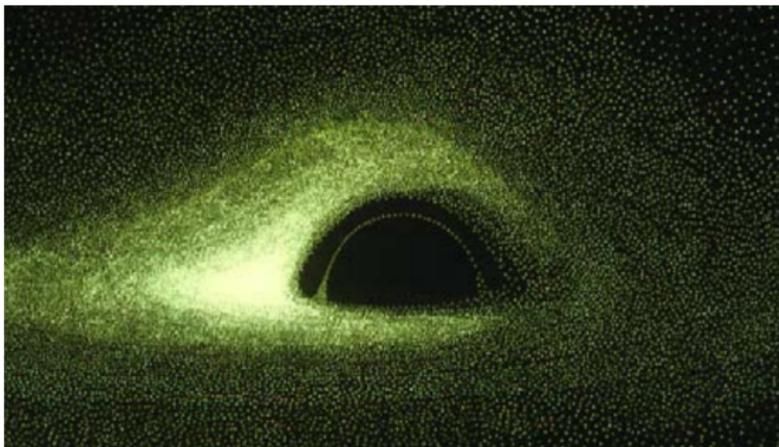
- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Simulations d'images de trous noirs**
- 3 Les observations actuelles
- 4 Une nouvelle ère observationnelle

Voir un trou noir ?

Par définition, un trou noir n'est pas directement observable, mais sa **silhouette** l'est

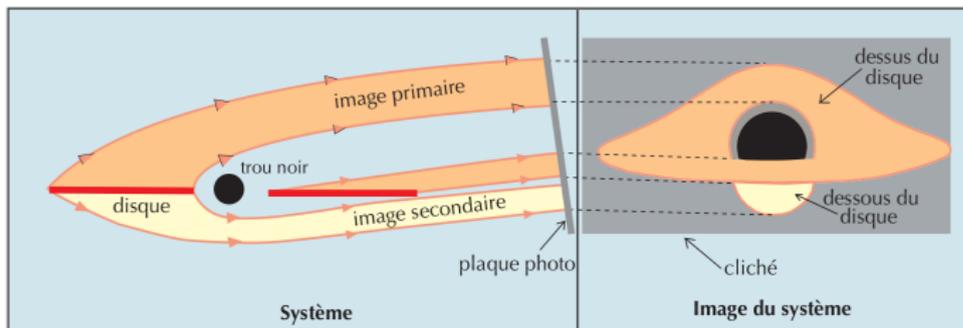
- s'il est entouré de matière (disque d'accrétion)
- s'il est observé sur un fond étoilé

Silhouette avec disque d'accrétion



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

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

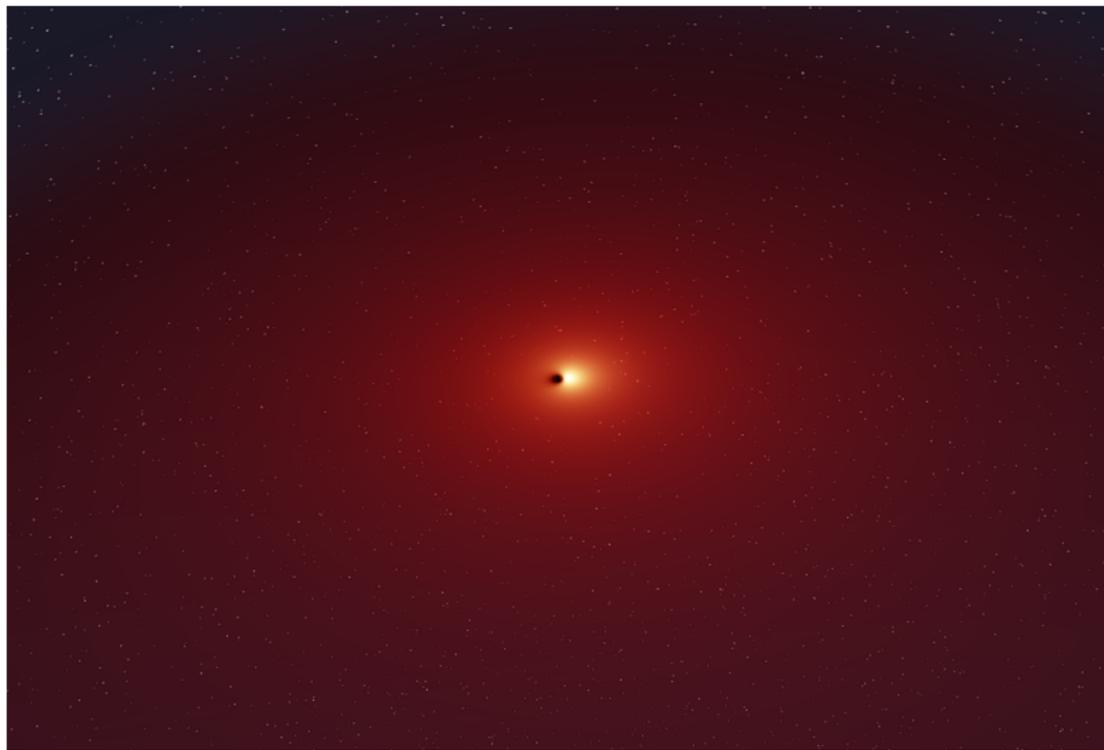


Trajectoire des rayons lumineux et formation de l'image

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

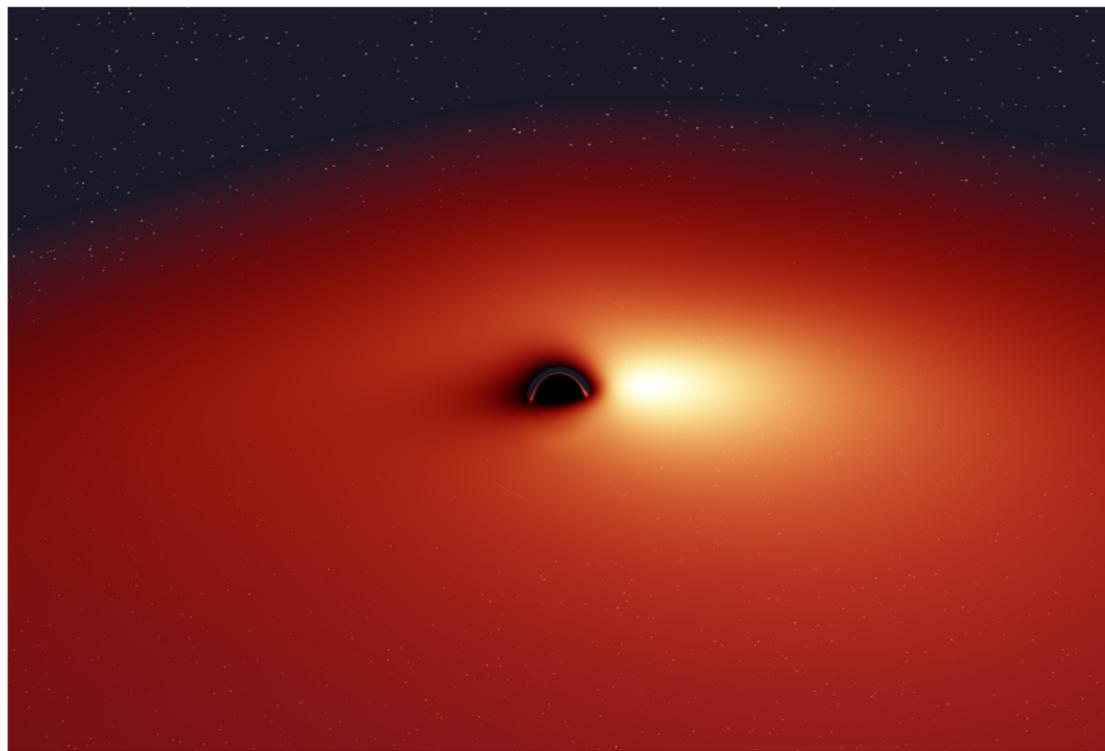
Vol vers un trou noir

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



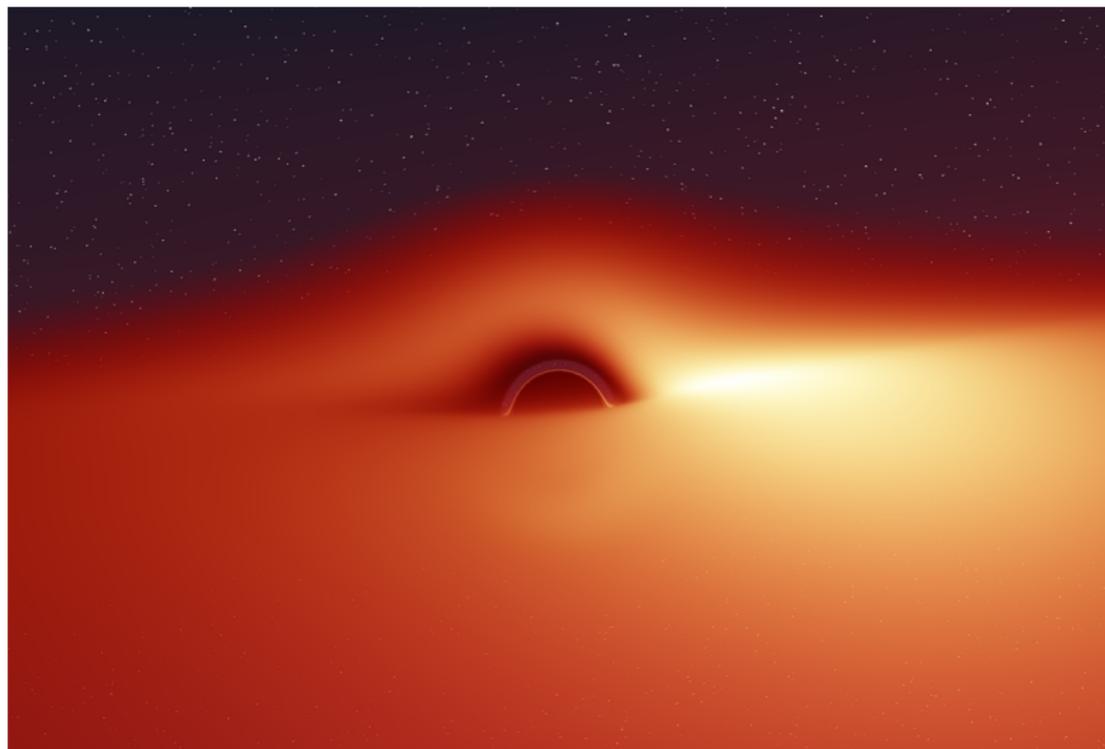
Vol vers un trou noir

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



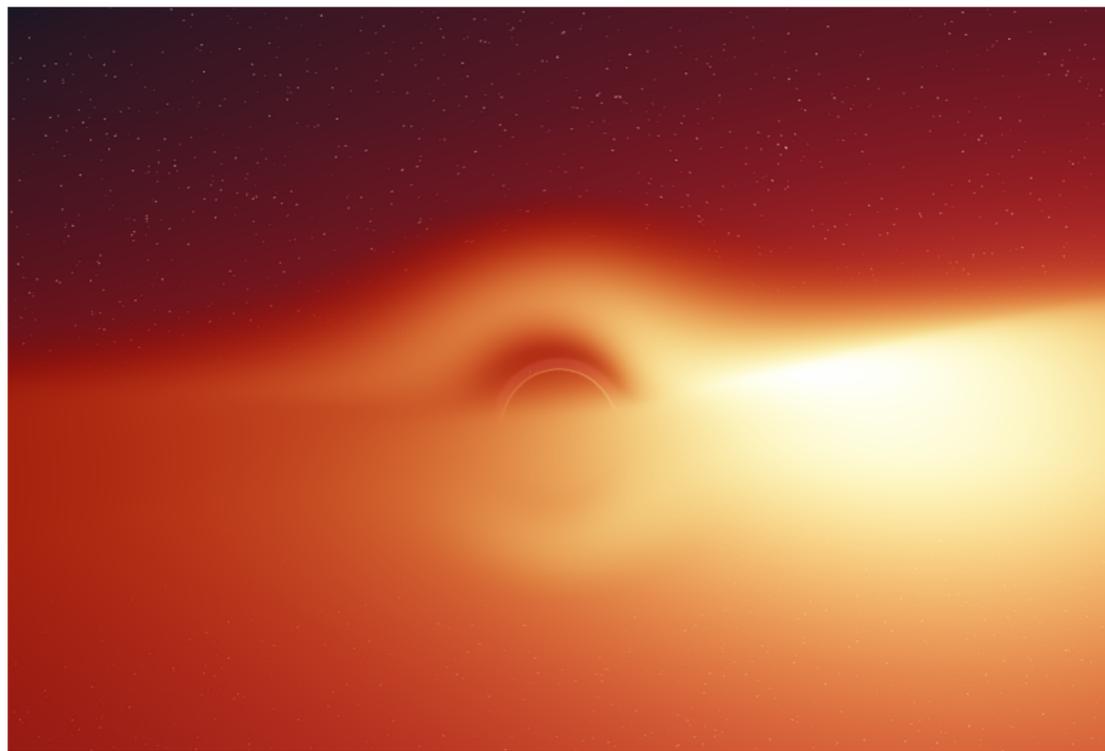
Vol vers un trou noir

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)]



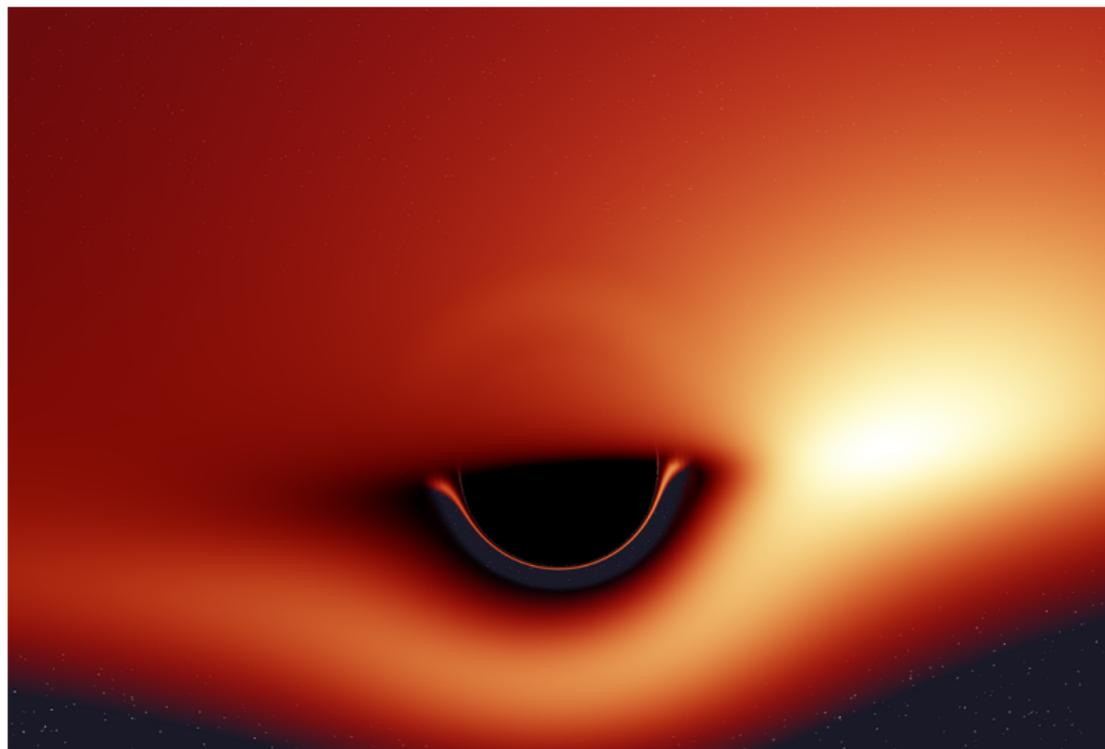
Vol vers un trou noir

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



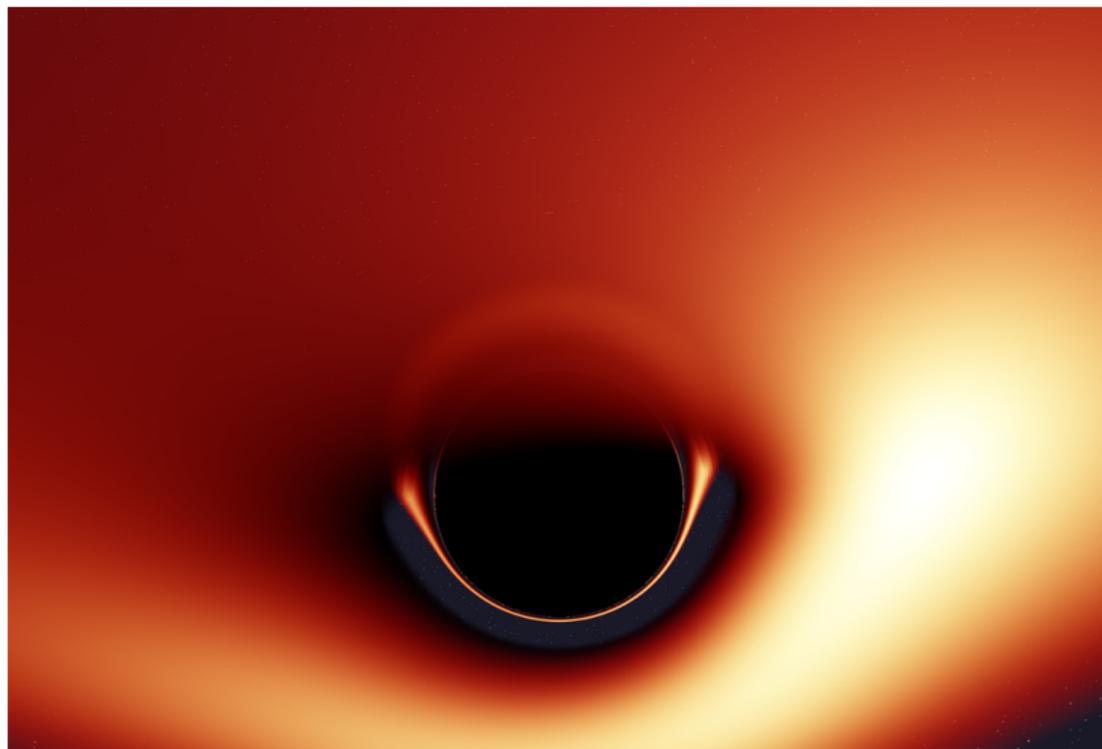
Vol vers un trou noir

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



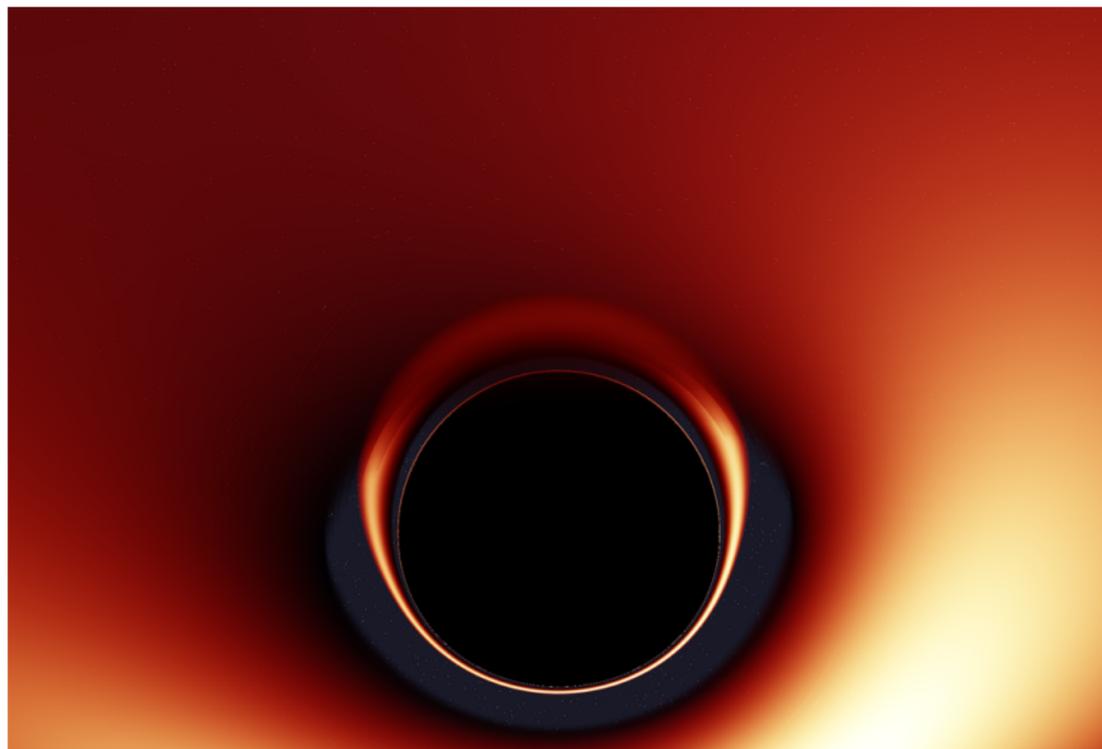
Vol vers un trou noir

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



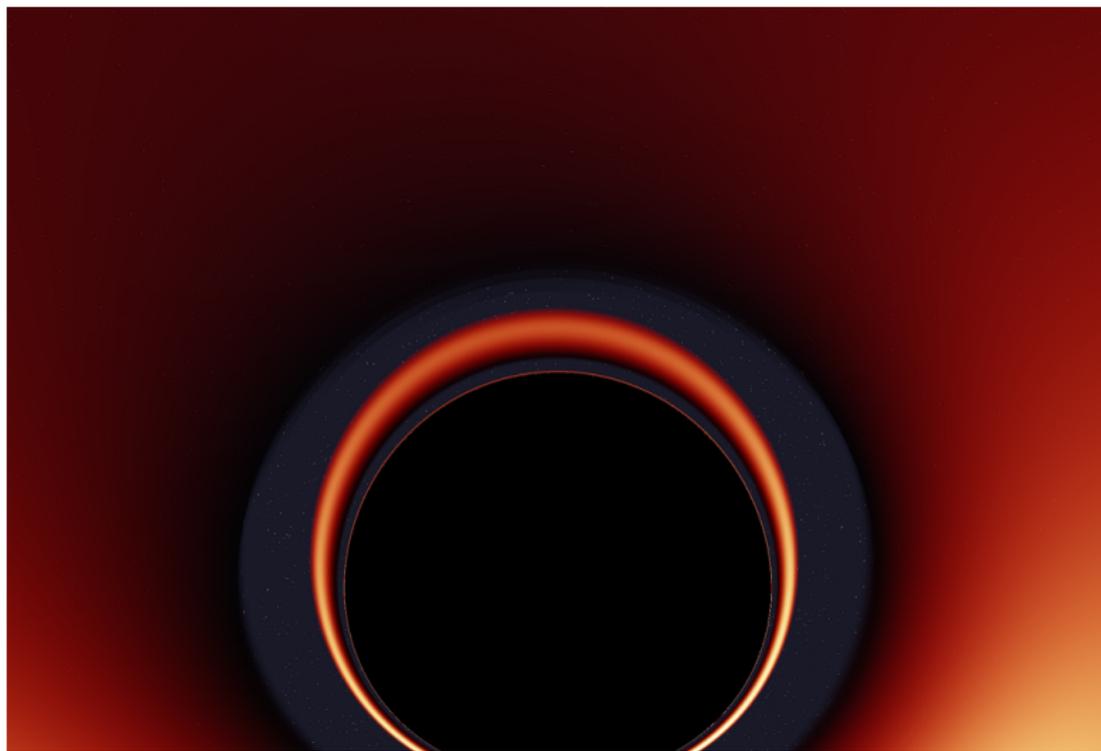
Vol vers un trou noir

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



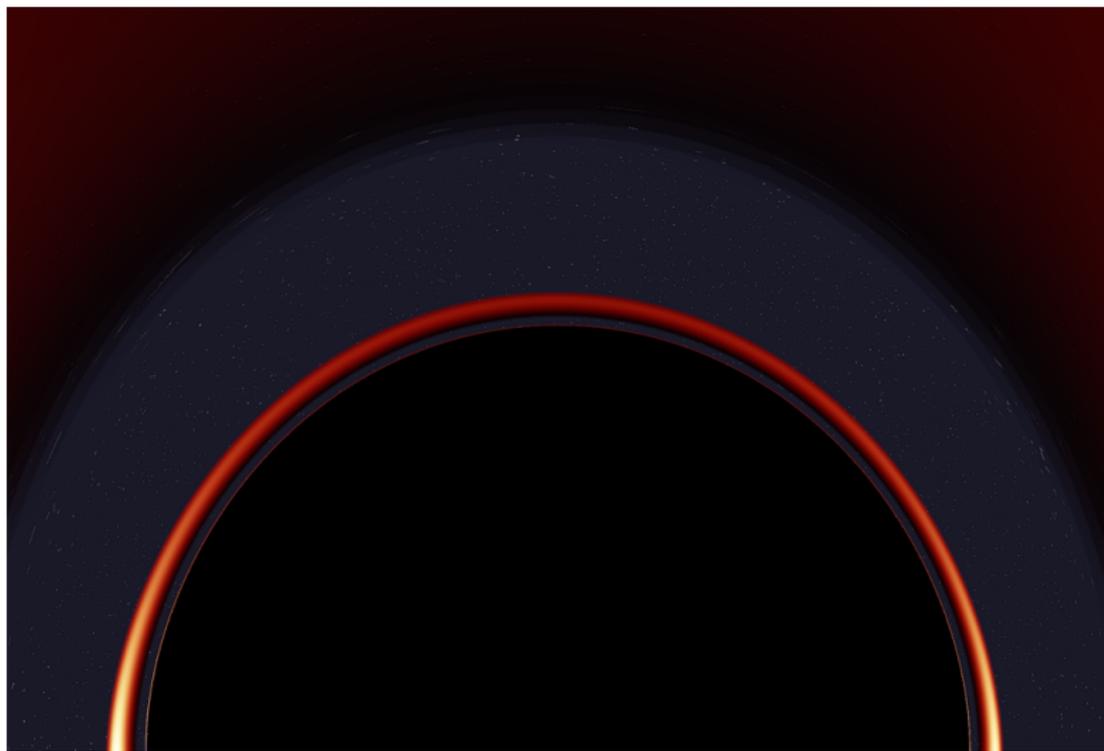
Vol vers un trou noir

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



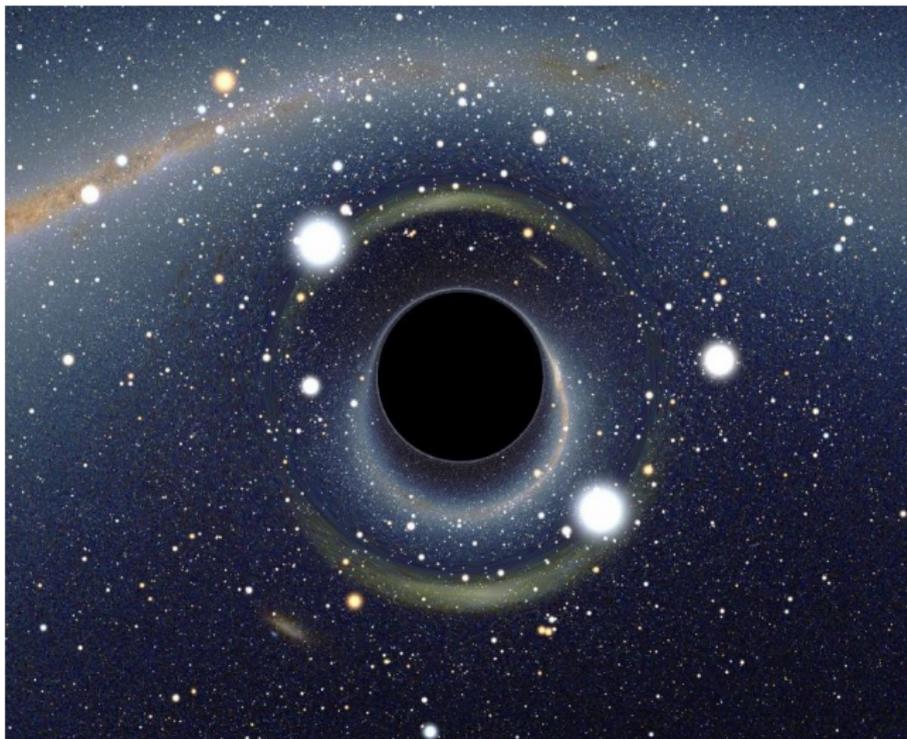
Vol vers un trou noir

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



Silhouette devant un fond étoilé

Image calculée par A. Riazuelo [Riazuelo, 2007]



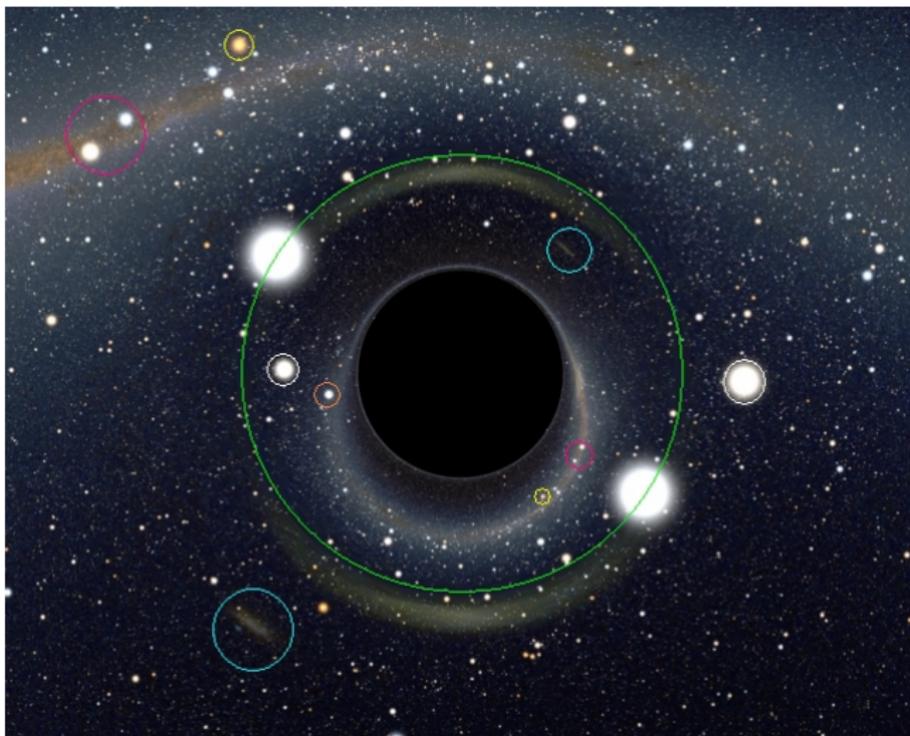
Silhouette devant un fond étoilé

Image calculée par A. Riazuello [Riazuelo, 2007]



Silhouette devant un fond étoilé

Image calculée par A. Riazuelo [Riazuelo, 2007]



Un trou noir devant la Tour Eiffel !

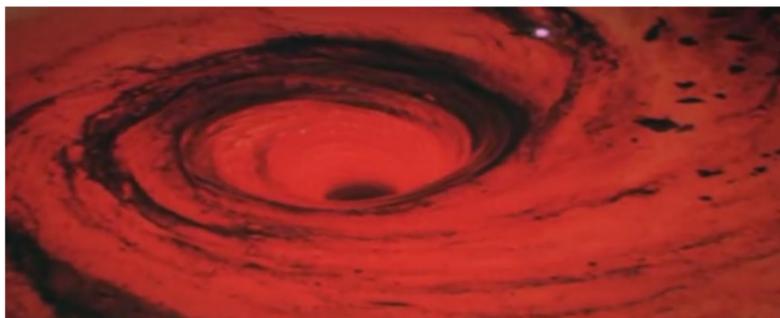


Ce que l'on verrait s'il y avait un trou noir de même masse que la Terre (rayon ~ 1 cm) à 5 m de nous.

Image réalisée par T. Paumard (LESIA, Obs. Paris) (2014), via le logiciel de calcul de géodésiques **GYOTO**, à partir de la photo *Paris s'éveille* prise par A. Duret-Lutz

<http://gyoto.obspm.fr>

Les trous noirs au cinéma



(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

Les trous noirs au cinéma



(c) Warner Bros. Pictures

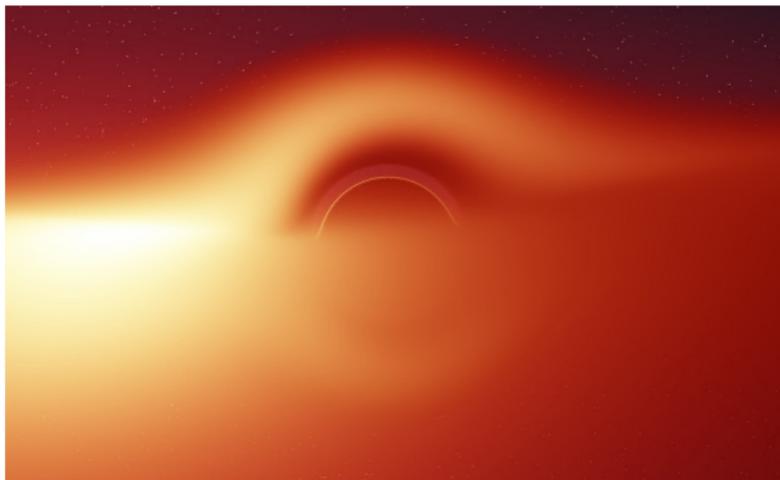
Interstellar

Christopher Nolan (2014)

Image calculée suivant les équations de la relativité générale fournies par Kip Thorne (CalTech)

- 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 au cinéma



Interstellar
Christopher Nolan (2014)

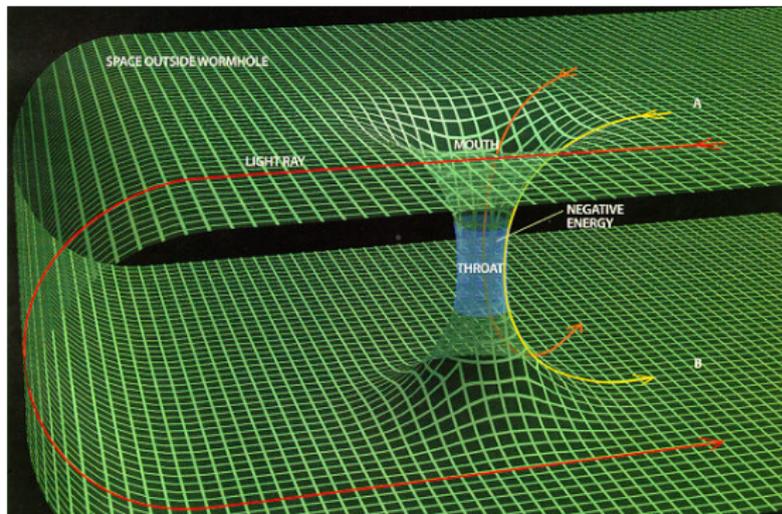
Image calculée par J.-A. Marck (1996)

- 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 de ver

Un **trou de ver** est une structure de l'espace-temps, qui relie deux régions distinctes, constituant ainsi un "raccourci".

Bien qu'hypothétique, il s'agit d'une solution parfaitement valide des équations de la relativité générale.



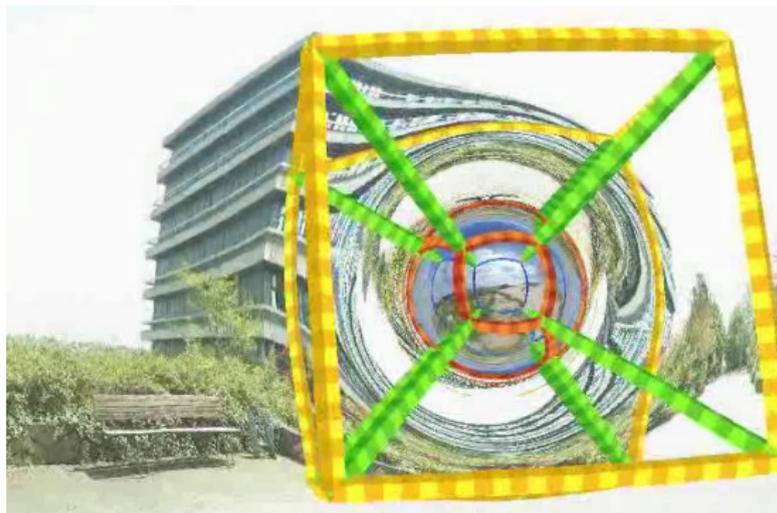
Un trou de ver se distingue d'un trou noir par

- l'**absence d'horizon** : on peut en sortir en faisant demi-tour
- la nécessité de **matière exotique** pour tapisser ses parois
- **pas de processus astrophysique** de formation connu

Matière exotique : matière à densité d'énergie négative

Voyage à travers un trou de ver

Entre l'Université de Tübingen (Allemagne) et une plage de Boulogne sur Mer



Film réalisé par C. Zahn (2008)

<http://www.spacetime-travel.org/>

Outline

- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Simulations d'images de trous noirs
- 3 Les observations actuelles**
- 4 Une nouvelle ère observationnelle

Trous noirs astrophysiques

Il existe deux grandes catégories de trous noirs astrophysiques :

- les **trous noirs stellaires**, restes de supernovæ :

$$M \sim 10 \text{ à } 30 M_{\odot} \text{ et } R \sim 30 \text{ à } 90 \text{ km}$$

$$\text{exemple : Cyg X-1 : } M = 15 M_{\odot} \text{ et } R = 45 \text{ km}$$

- les **trous noirs supermassifs**, au centre des galaxies :

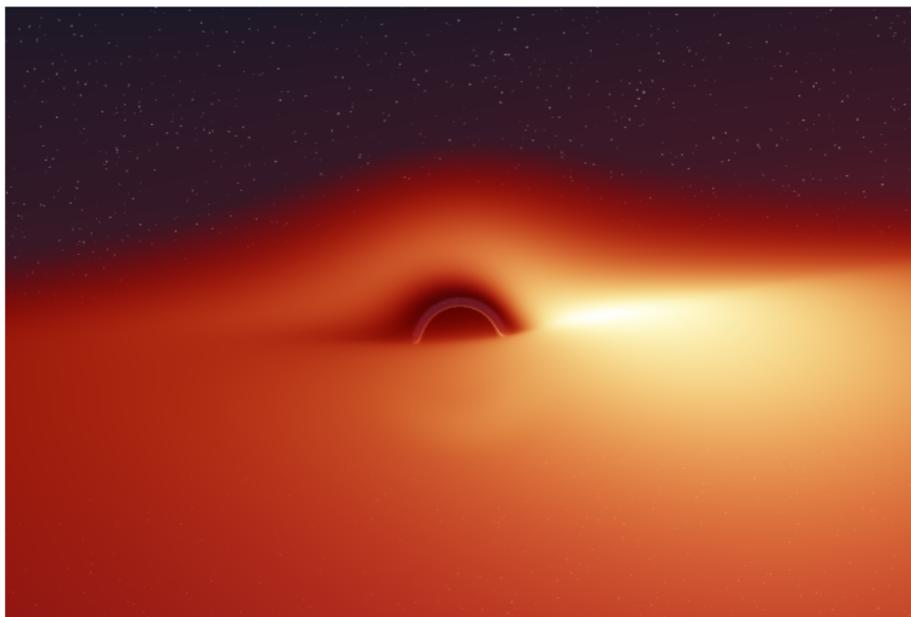
$$M \sim 10^5 \text{ à } 10^{10} M_{\odot} \text{ et } R \sim 3 \times 10^5 \text{ km à } 200 \text{ UA}^2$$

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

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 !

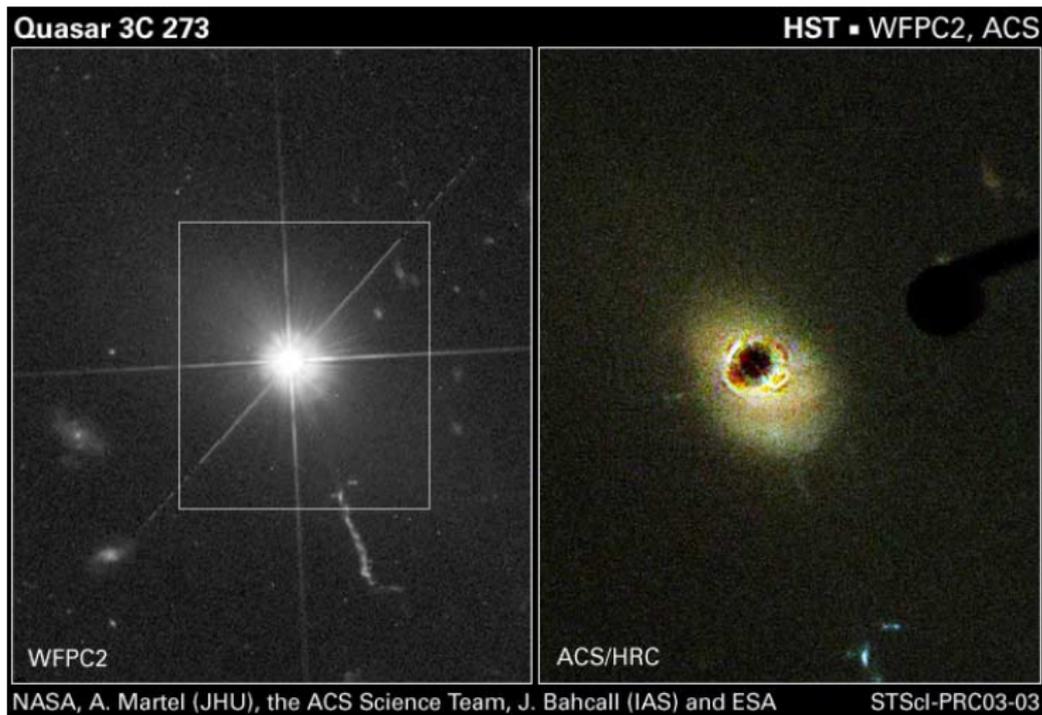
NB : les réactions thermonucléaires libèrent moins de 1% de mc^2



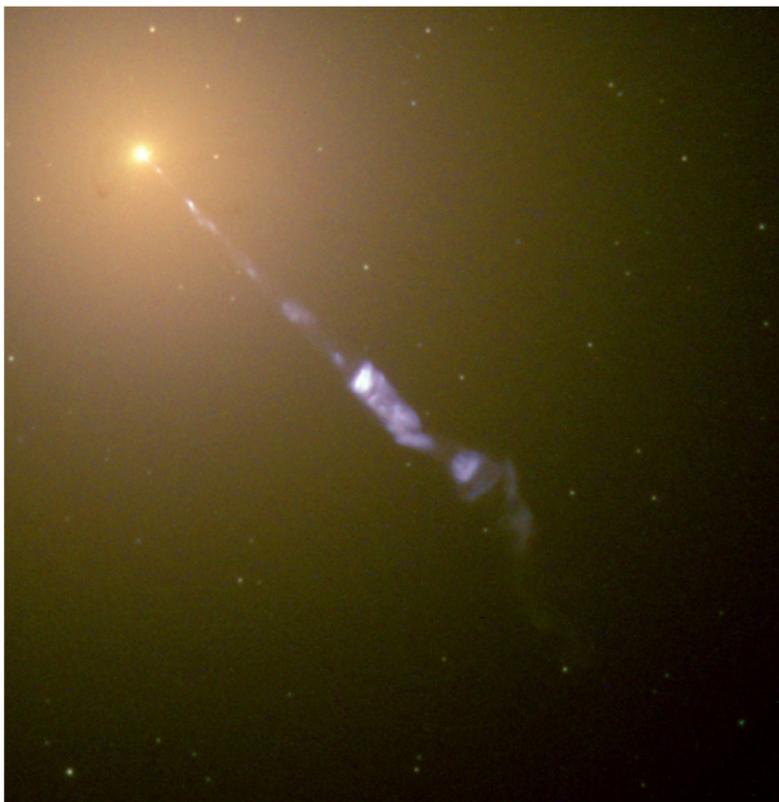
La matière qui tombe sur un trou noir forme un **disque d'accrétion** [Donald Lynden-Bell (1969), Nicolai Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]

Les trous noirs au cœur des quasars



Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

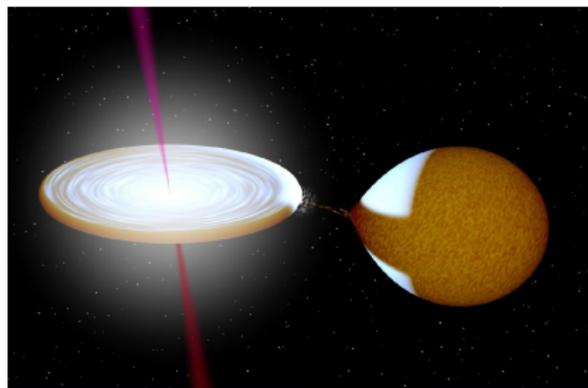
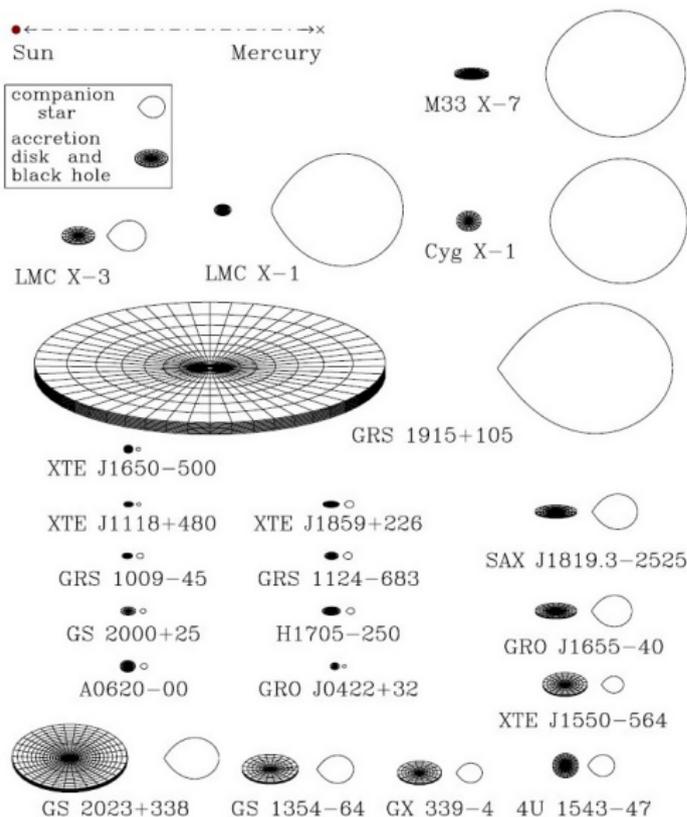


Jet émis par le noyau de la
galaxie elliptique géante M87, au
cœur de l'amas de la Vierge [HST]

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

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

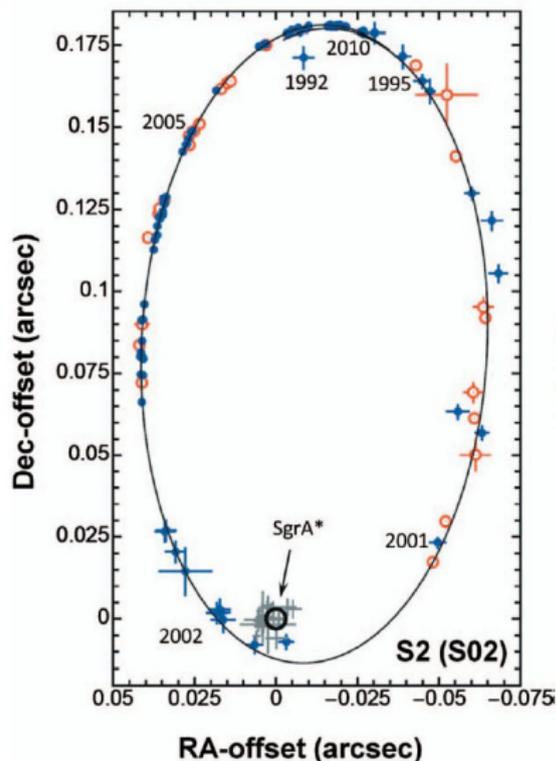
Trous noirs dans les binaires X



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 :

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

← 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)]

Trous noirs supermassifs

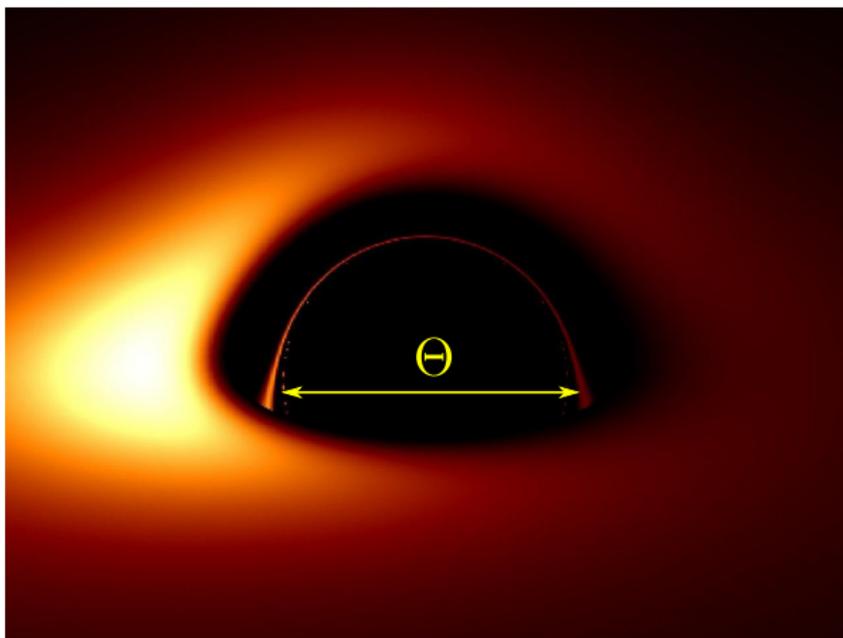
Sélection de 6 trous noirs supermassifs

Nom	Masse [M_{\odot}]	Spin $a = cJ / (GM^2)$	Distance [10^6 al]	Diamètre apparent [10^{-6} "']
Sgr A*	$4,3 \pm 0,3 \cdot 10^6$?	0,027	53
M31	$1,6 \pm 0,5 \cdot 10^8$?	2,5	20
M81	$8 \pm 2 \cdot 10^7$?	13	2
NGC 4258	$3,78 \pm 0,01 \cdot 10^7$?	23	0,5
M87	$3,6 \pm 1,0 \cdot 10^9$?	55	21
MCG-6-30-15	$4 \pm 2 \cdot 10^6$	$0,989 \pm 0,009$	120	0,01

Outline

- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Simulations d'images de trous noirs
- 3 Les observations actuelles
- 4 Une nouvelle ère observationnelle

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

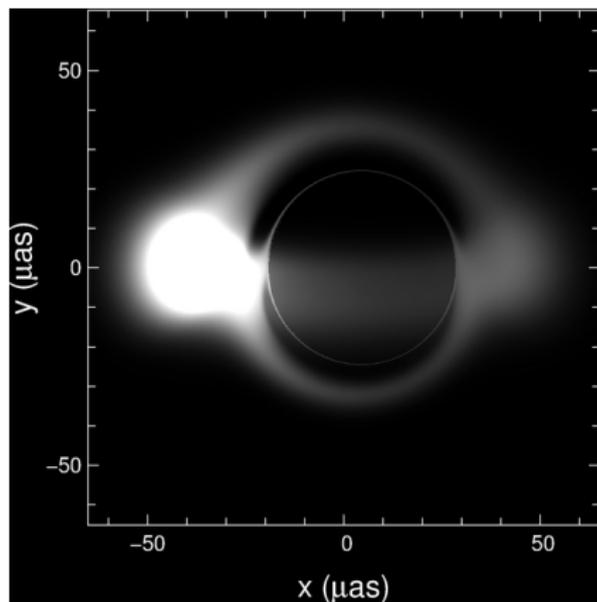
M87 : $\Theta = 21 \mu\text{as}$

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

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

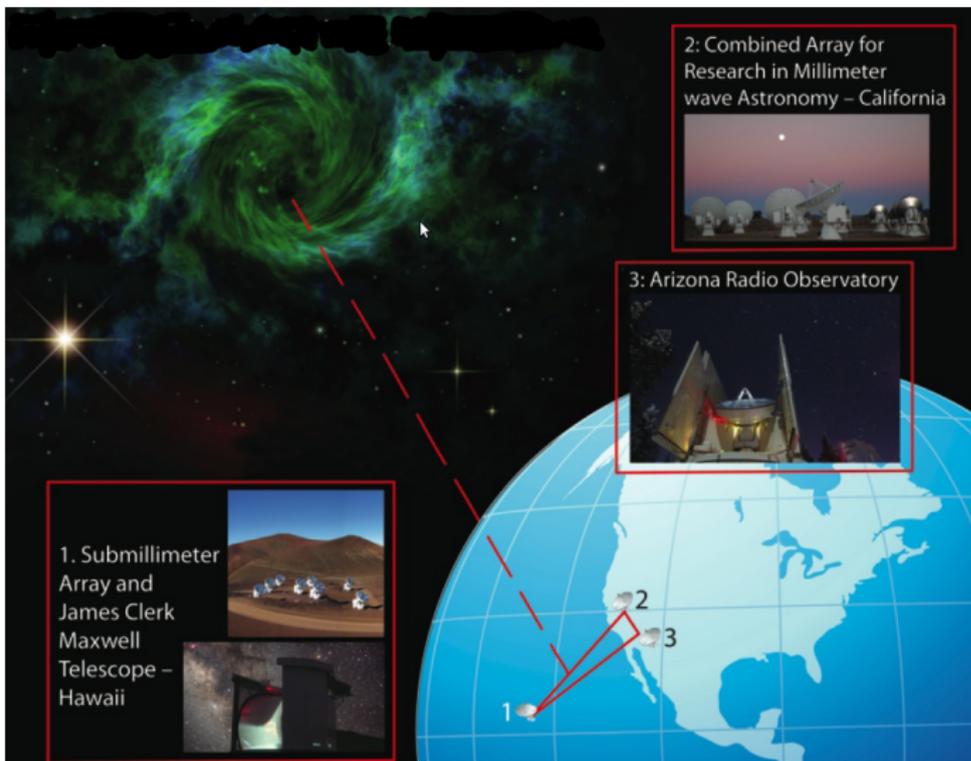
M87 : $\Theta = 21 \mu\text{as}$

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

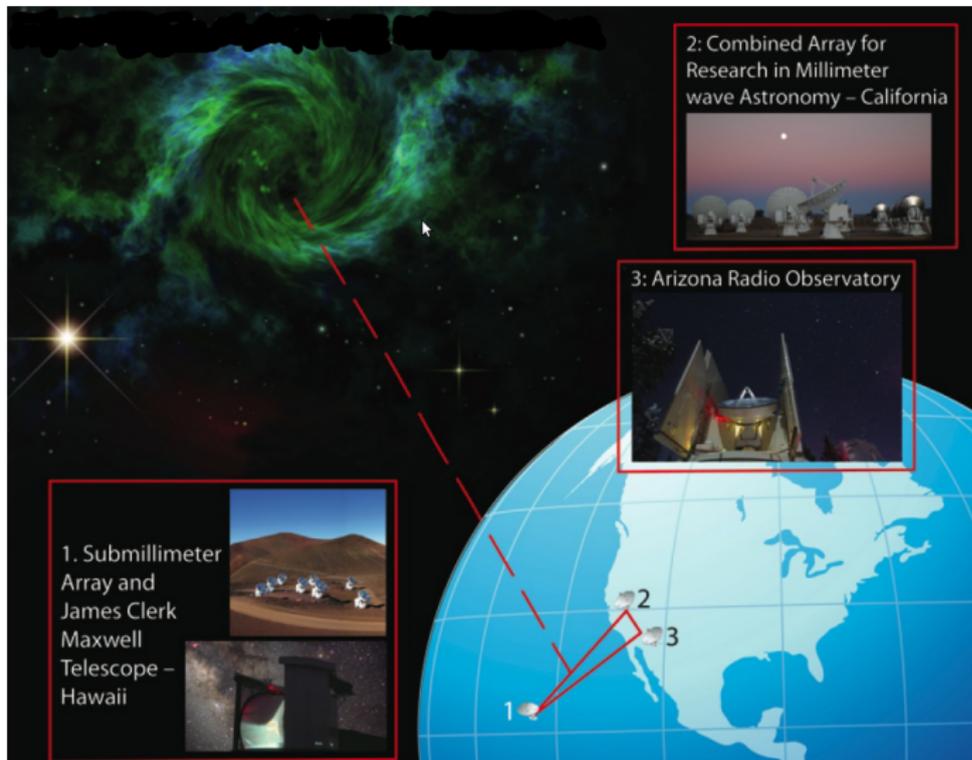
La solution : l'interférométrie !



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

Réseau VLBI américain existant [Doeleman et al. 2011]

La solution : l'interférométrie !



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

Le meilleur résultat actuel : les observations VLBI à 1.3 mm ont montré que la taille de la région émettrice de Sgr A* n'est que de $37 \mu\text{as}$.

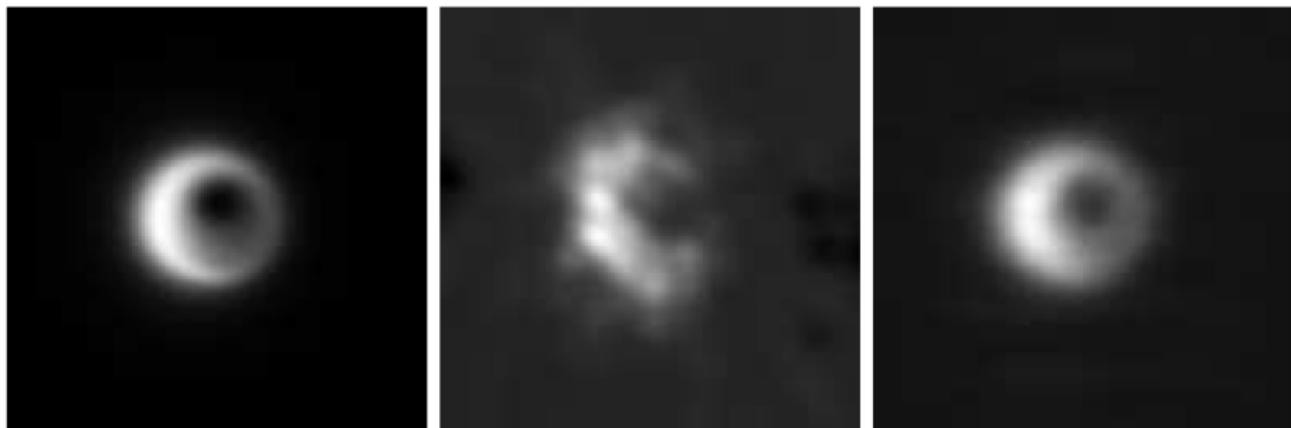
Réseau VLBI américain existant [Doeleman et al. 2011]

Le futur proche : l'Event Horizon Telescope



Atacama Large Millimeter Array (ALMA)
inauguré en mars 2013

Le futur proche : l'Event Horizon Telescope

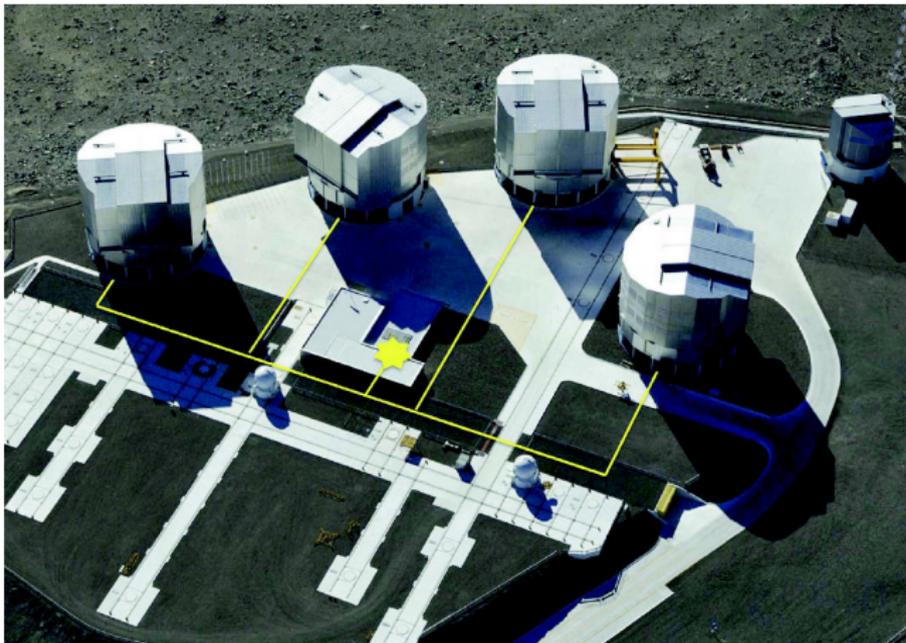


Simulations d'observations VLBI de Sgr A* à $\lambda = 0.8 \text{ mm}$

gauche : image parfaite, *milieu* : 7 stations (~ 2016), *droite* : 13 stations (~ 2020)
 $a = 0$, $i = 30^\circ$

[Fish & Doeleman, arXiv:0906.4040 (2009)]

Interférométrie optique (infra-rouge proche)



[Gillessen et al. 2010]

Projet GRAVITY au VLT (2015)

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

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

Tester l'absence de chevelure

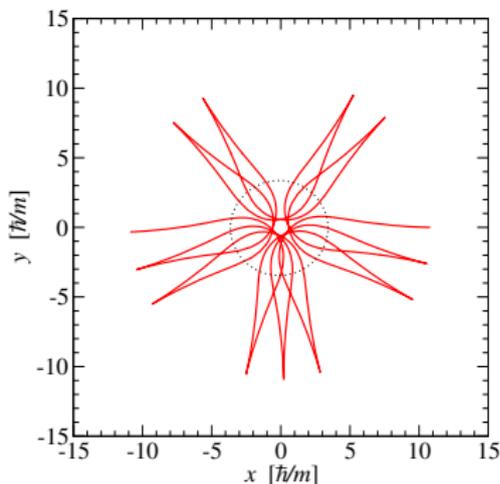
GRAVITY devrait observer des étoiles sur des orbites relativistes (plus serrées que celle de S2)

Mesure des effets relativistes :

- avance du périastre
- précession de Lense-Thirring

⇒ contraintes sur la métrique au voisinage du corps central

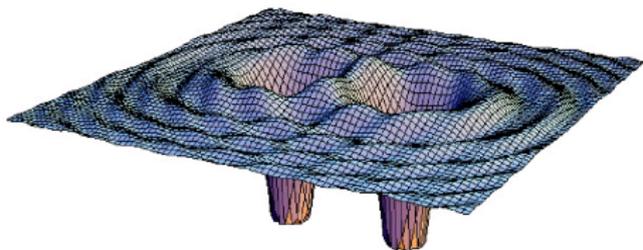
⇒ **est-ce bien la métrique de Kerr (a, M) ?**



← 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)]

Un autre futur moyen d'observation : les ondes gravitationnelles



Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

ondes gravitationnelles = perturbations dans la courbure de l'espace-temps

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière
- NB : les **ondes électromagnétiques** (ondes radio, IR, optique, UV, X et gamma) sont des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent *dans* l'espace-temps, alors que les **ondes gravitationnelles** sont des ondes de l'espace-temps *lui-même*

Détection sur Terre des ondes gravitationnelles



Détecteur interférométrique **VIRGO** sur le site de Cascina, près de Pise [CNRS/INFN]

Interféromètres LIGO

Hanford (H1=4km, H2=2km)



Livingston (L1=4km)



Projet spatial eLISA (ESA)

Détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles dans l'espace

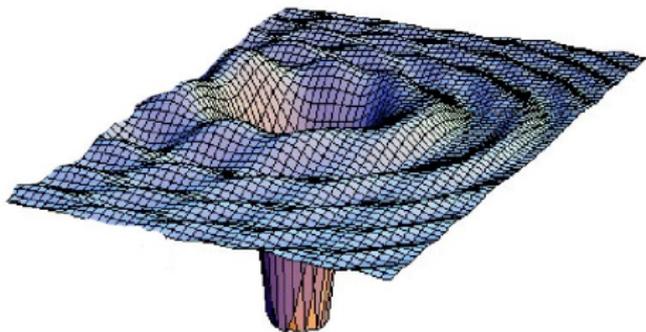


[eLISA / NGO]

- Sélectionné par l'ESA en novembre 2013 (mission L3)
- Lancement vers 2030
- Démonstrateur technologique **LISA Pathfinder**, sera lancé en 2015



Trous noirs et ondes gravitationnelles



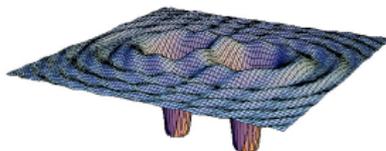
Lien intime entre les trous noirs et les ondes gravitationnelles :

Les trous noirs et les ondes gravitationnelles sont tous deux des **distorsions de l'espace-temps** :

- distorsions extrêmes (trous noirs)
- distorsions minimales (ondes gravitationnelles)

En particulier, trous noirs et ondes gravitationnelles sont tous deux des **solutions du vide** des équations de la Relativité Générale (équations d'Einstein)

Coalescence d'un système binaire de trous noirs



Intérêt pour la détection : la source principale attendue pour VIRGO et LIGO

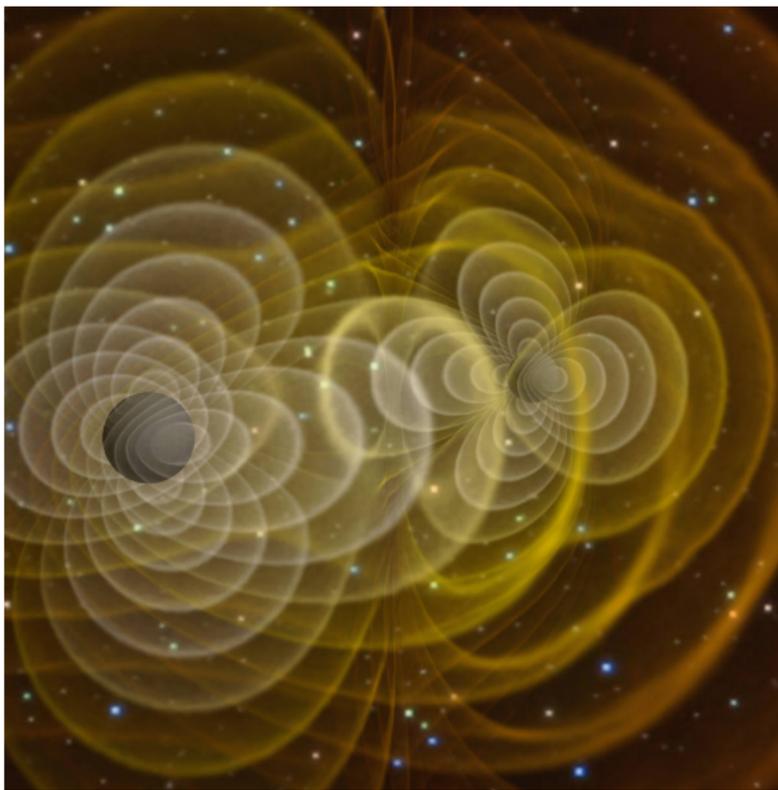
Intérêt théorique :

- trou noir binaire : le problème à deux corps par excellence de la Relativité Générale
- test de la Relativité Générale dans un régime dynamique et en champ fort

Intérêt astrophysique :

- taux de coalescences \implies évolution des étoiles massives
- signal gravitationnel de la phase spirale \implies mesure de la constante de Hubble H_0
- observations des trous noirs supermassifs à grand $z \implies$ formation des galaxies

Coalescence d'un système binaire de trous noirs



Baker et al., 2006

Bibliographie

- S. Collin-Zahn, 2009, *Des quasars aux trous noirs*, EDP Sciences
- G. Chardin, 2009, *Le LHC peut-il produire des trous noirs ?*, Le Pommier
- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- E. Gourgoulhon, 2011, *Trous noirs : à la veille d'une nouvelle ère observationnelle*, L'Astronomie **125**, novembre 2011, p. 16
- 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
- J. Paul, 1998, *L'homme qui courait après son étoile*, Odile Jacob
- A. Riazuelo, 2008, *Voyage au cœur d'un trou noir*, DVD Sciences et Avenir ; <http://tinyurl.com/riazuelo>
- K.S. Thorne, 1997, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion
- *Trous noirs*, Dossier Pour la Science **75**, avril-juin 2012