

# La relativité générale à l'épreuve des trous noirs

Éricourgoulhon

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/>

**Palais de la Découverte**

Paris

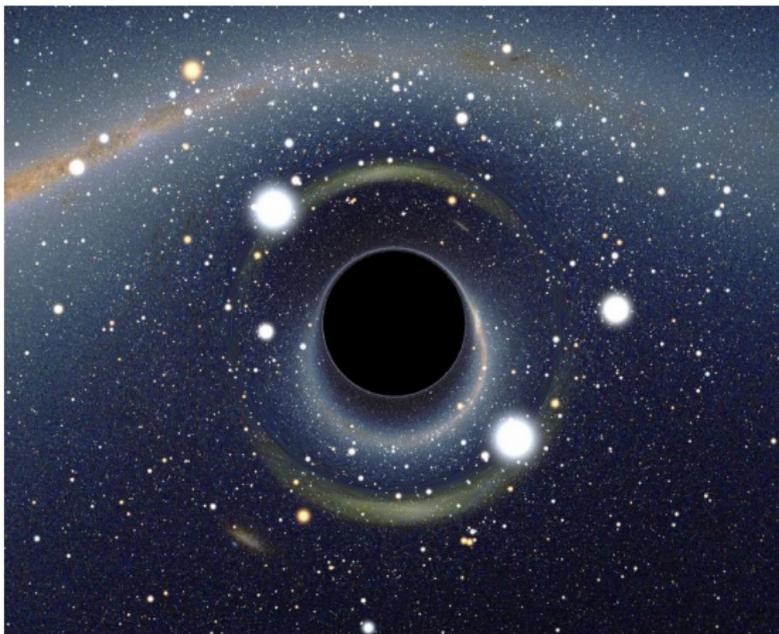
19 novembre 2015

- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Voir un trou noir ?
- 3 Les observations actuelles
- 4 Tester la relativité générale

# Outline

- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Voir un trou noir ?
- 3 Les observations actuelles
- 4 Tester la relativité générale

# 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

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



# 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

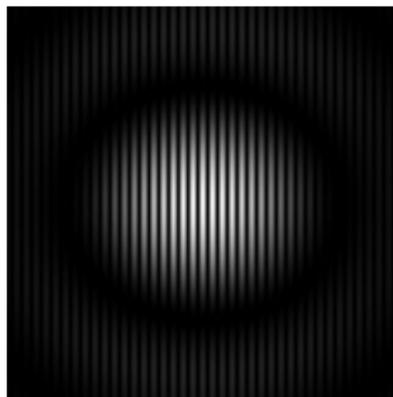
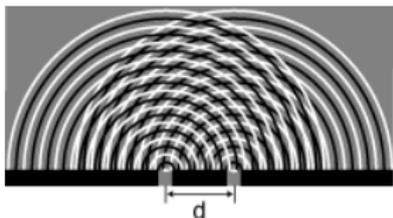
## Pierre Simon de Laplace (1796)

*“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

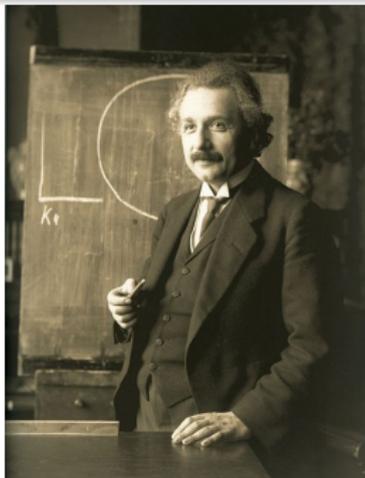
- Pas de rôle privilégié de la vitesse de la lumière en théorie newtonienne : rien n'interdit  $V > c$
- $V_{\text{lib}} \sim c \implies$  énergie du champ gravitationnel  $\sim$  énergie de masse  $Mc^2$   
 $\implies$  théorie *relativiste* de la gravitation nécessaire !

$\implies$  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, **novembre** 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.

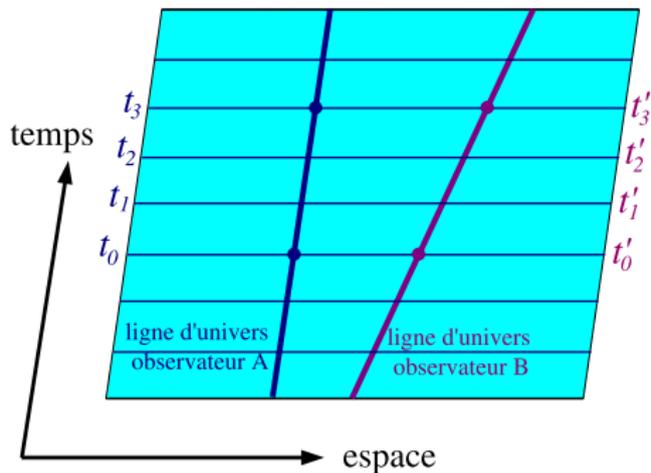
Le temps ne possède qu'*une seule dimension* : passé / futur

⇒ 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<sup>e</sup> siècle.

# L'espace-temps



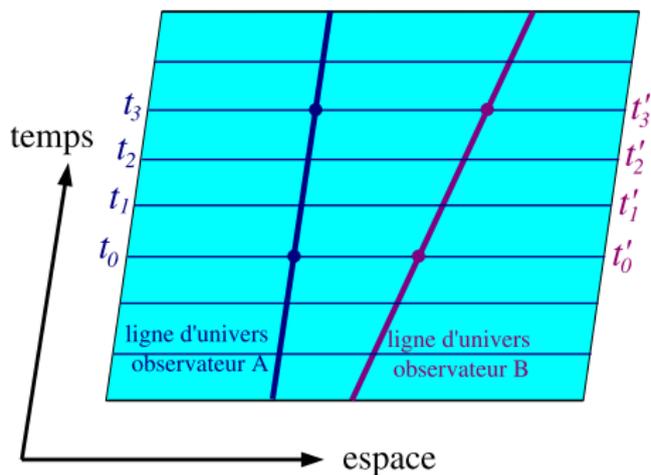
## Espace-temps newtonien :

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

*structure absolue* : **temps universel**

Tous les observateurs mesurent le même temps

# L'espace-temps

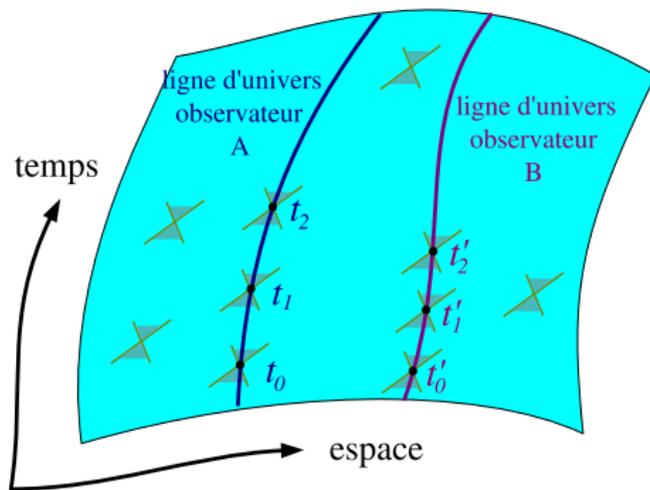


## Espace-temps newtonien :

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

*structure absolue* : **temps universel**

Tous les observateurs mesurent le même temps



## Espace-temps relativiste :

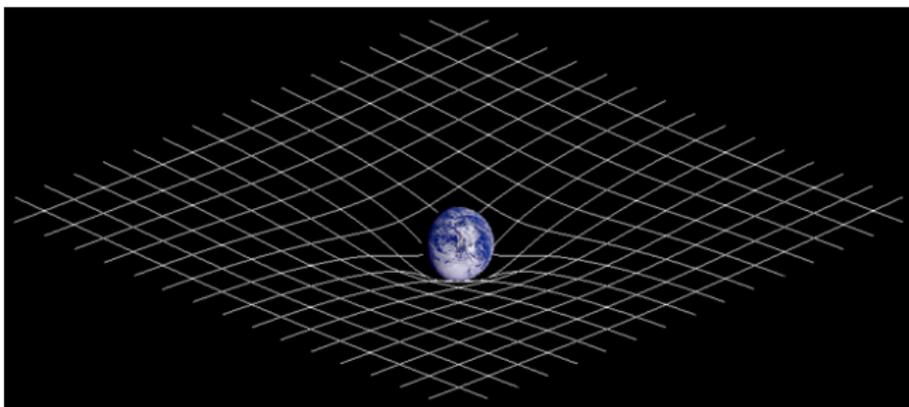
*description math.* : espace courbe (variété) de dimension 4

*structure absolue* : **cônes de lumière**

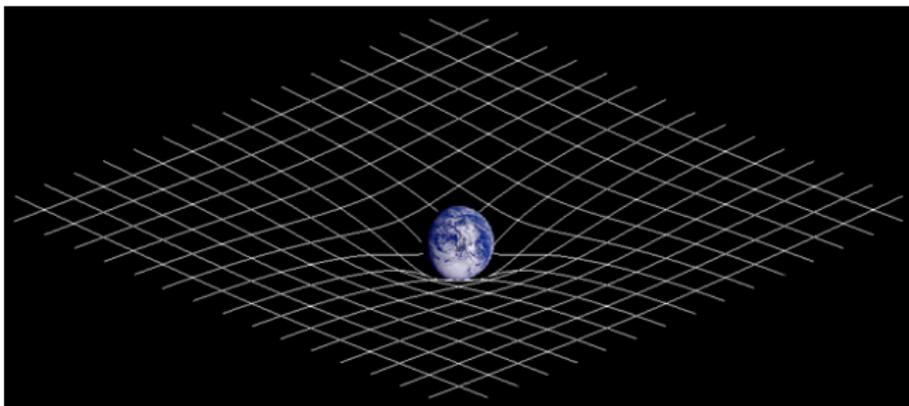
Pas de temps universel

$\implies$  *dilatation des temps*

# La relativité générale



# La relativité générale



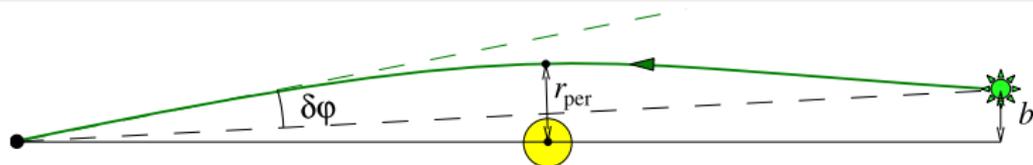
La gravitation **dévie les rayons lumineux** et influence **l'écoulement du temps**

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

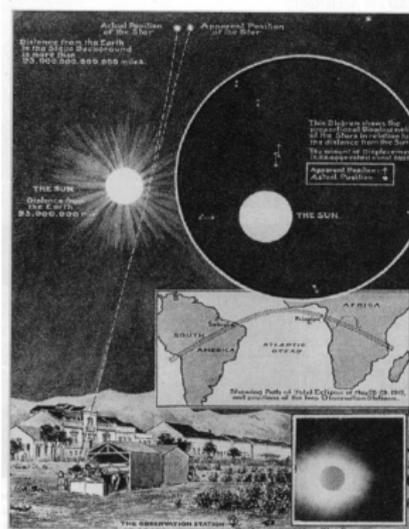
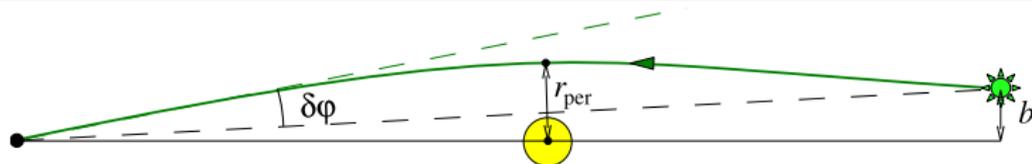
$$C = GM/(c^2 R) \sim (V_{\text{lib}}/c)^2$$

	proton	Terre	Soleil	naine blanche	étoile à neutrons	trou noir
$C$	$10^{-39}$	$10^{-10}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	0.2	0.5

# Déviation des rayons lumineux

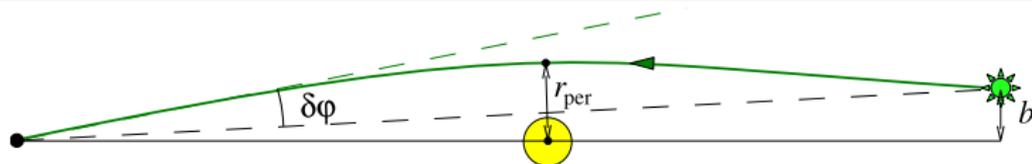


# Déviations des rayons lumineux



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

# Déviations des rayons lumineux



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



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

# La gravitation a-t-elle une influence sur le temps ?

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

# La gravitation a-t-elle une influence sur le 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 a-t-elle une influence sur le 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 !**

# La gravitation a-t-elle une influence sur le temps ?

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



## Expérience de Hafele et Keating (1971)

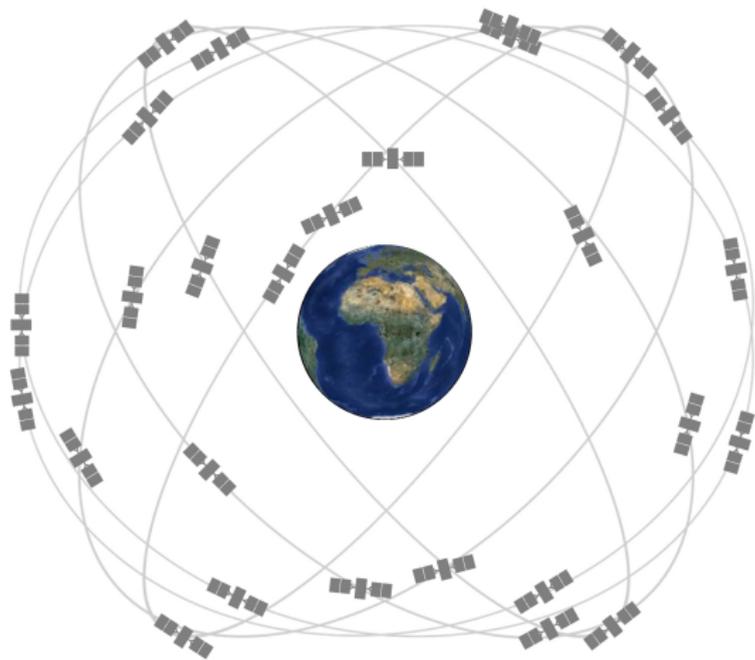
Dans le champ gravitationnel de la Terre :

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 !**

Aujourd'hui le décalage temporel gravitationnel est mesuré en laboratoire à l'aide d'**horloges atomiques optiques** pour des différences d'altitude aussi petites que 30 cm !

# Le GPS doit tenir compte de la distorsion temporelle !



[gps.gov]

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

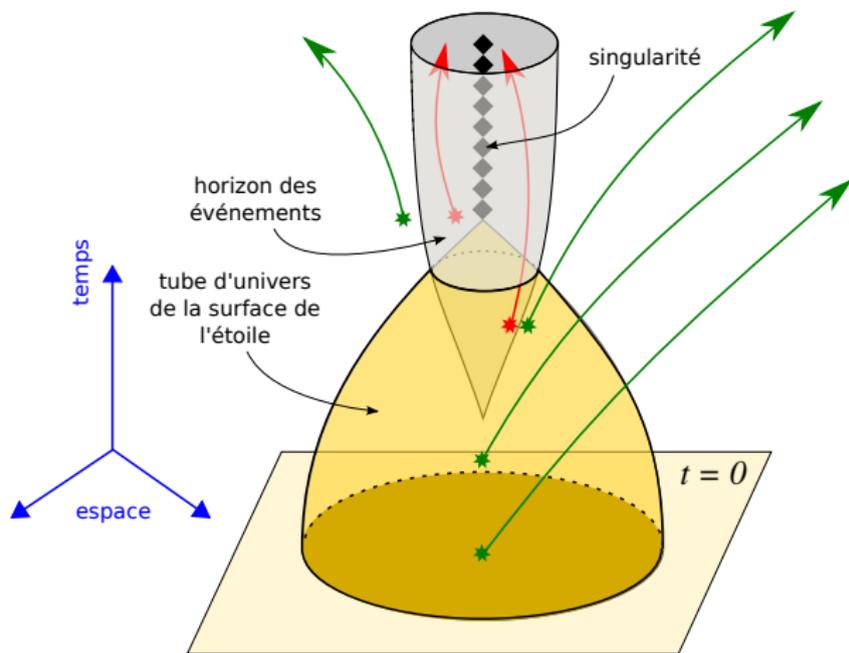
Relat. gen.  $\Rightarrow \delta t/t = 5 \times 10^{-10}$

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 !

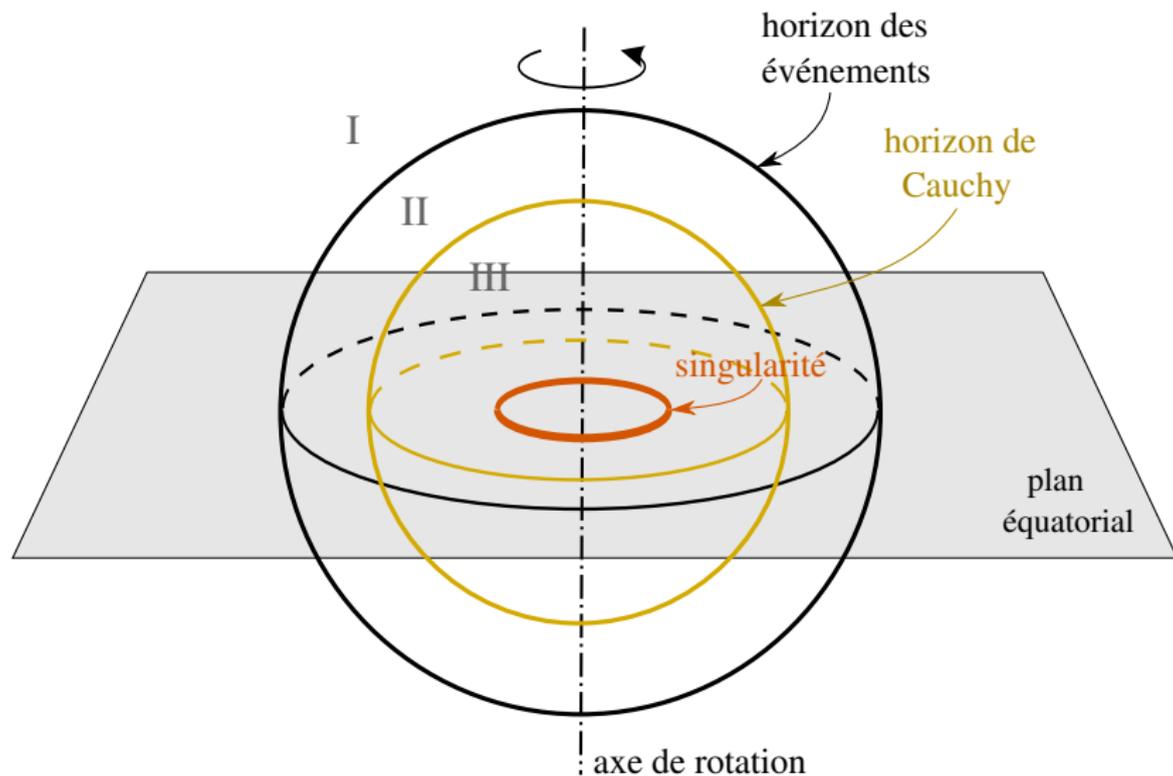
## Le trou noir de la relativité générale...



...vu dans un **diagramme d'espace-temps** représentant sa formation par l'effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive (phénomène de *supernova*)

singularité : courbure  $\rightarrow \infty$

# Structure d'un trou noir en rotation

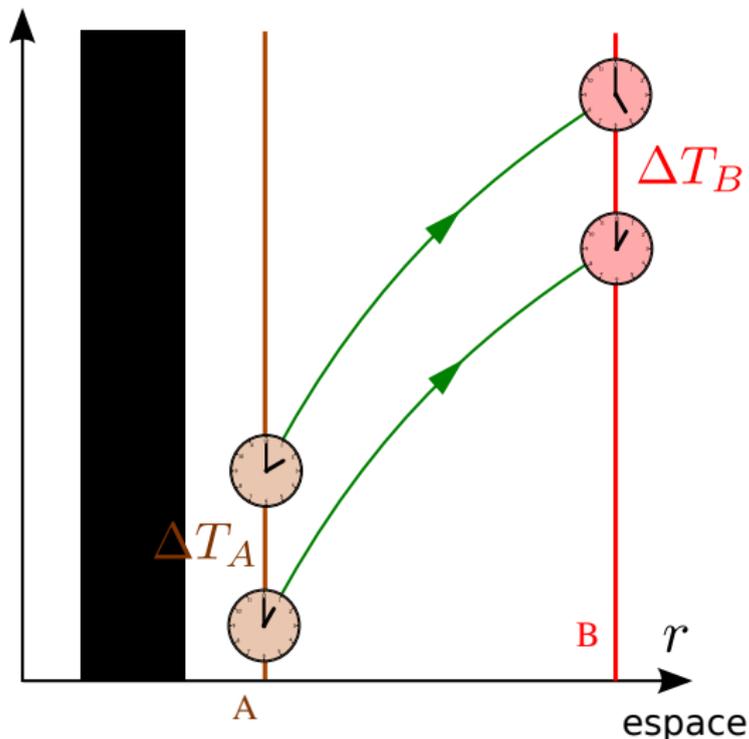


# La singularité centrale

- 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.

## Dilatation des temps au voisinage d'un trou noir

temps

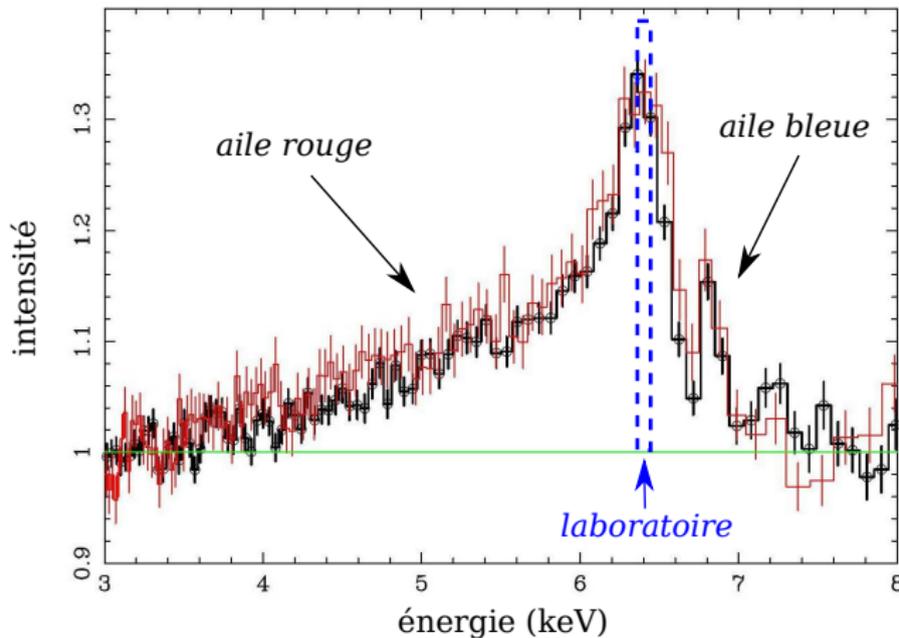


Un observateur éloigné voit un explorateur proche du trou noir vieillir beaucoup moins vite que lui :  $\Delta T_A \ll \Delta T_B$

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.

# L'effet est 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**

# 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 (absence de chevelure)

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

Dans le cadre de la relativité générale et en 4 dimensions, un trou noir stationnaire est entièrement décrit par seulement deux nombres<sup>a</sup> :

- sa masse  $M$
- son moment cinétique  $J$  (mesure l'état de rotation)

---

a. 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 (2/3)

## Théorème d'unicité (absence de chevelure)

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

Dans le cadre de la relativité générale et en 4 dimensions, un trou noir stationnaire est entièrement décrit par seulement deux nombres<sup>a</sup> :

- sa masse  $M$
- son moment cinétique  $J$  (mesure l'état de rotation)

a. 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)

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

# Quelques propriétés des trous noirs (3/3)

- 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.
- 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

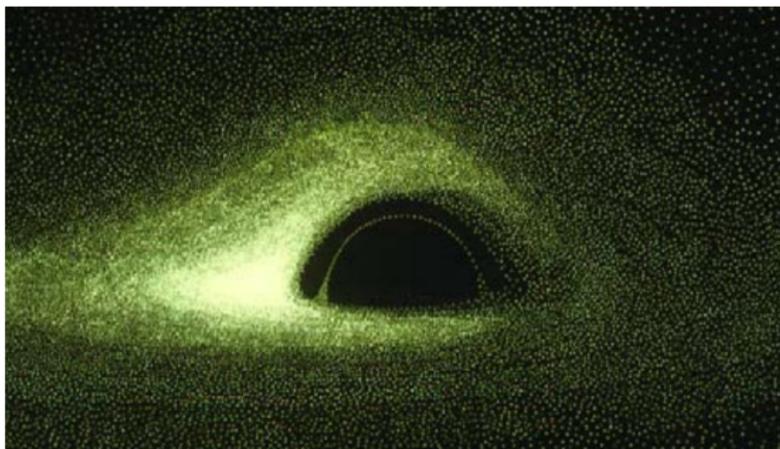
- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Voir un trou noir ?
- 3 Les observations actuelles
- 4 Tester la relativité générale

# Voir un trou noir ?

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

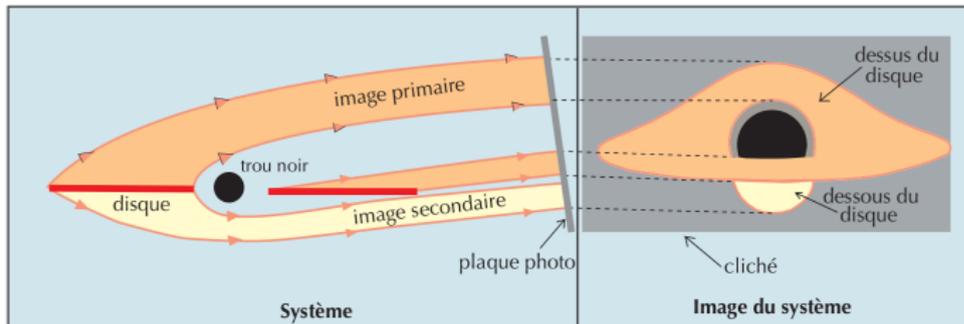
- s'il est entouré de matière (disque d'accrétion)
- s'il est observé sur un fond étoilé

# Silhouette avec disque d'accrétion



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

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

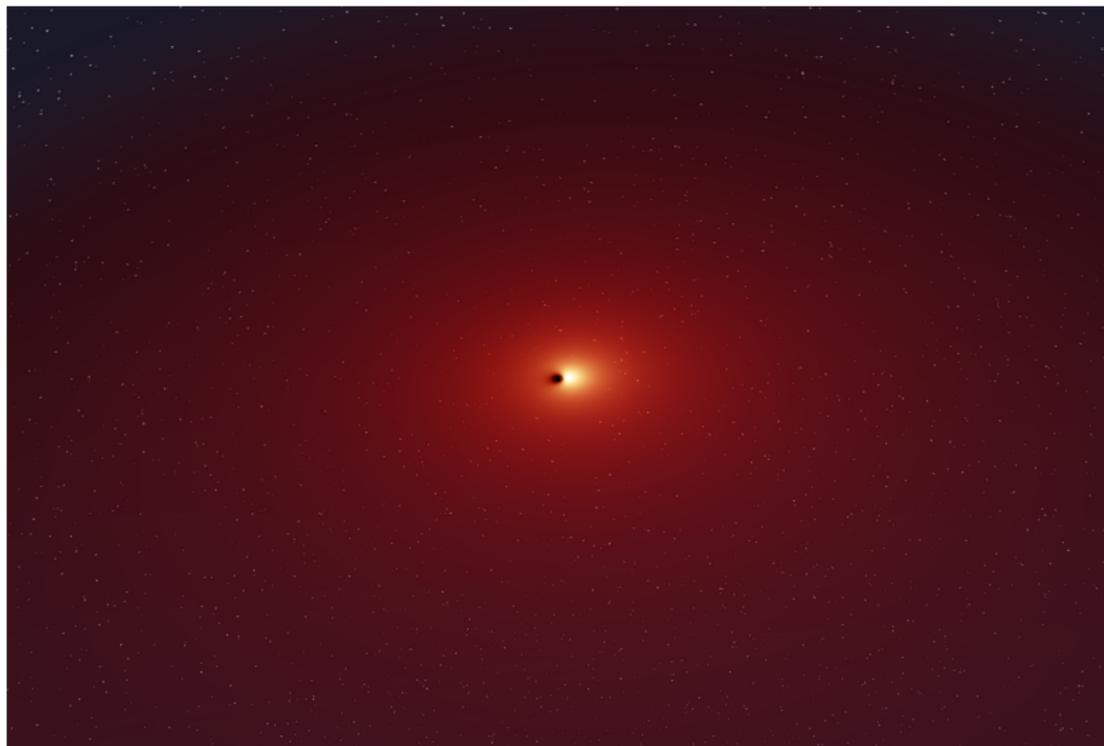


Trajectoire des rayons lumineux et formation de l'image

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

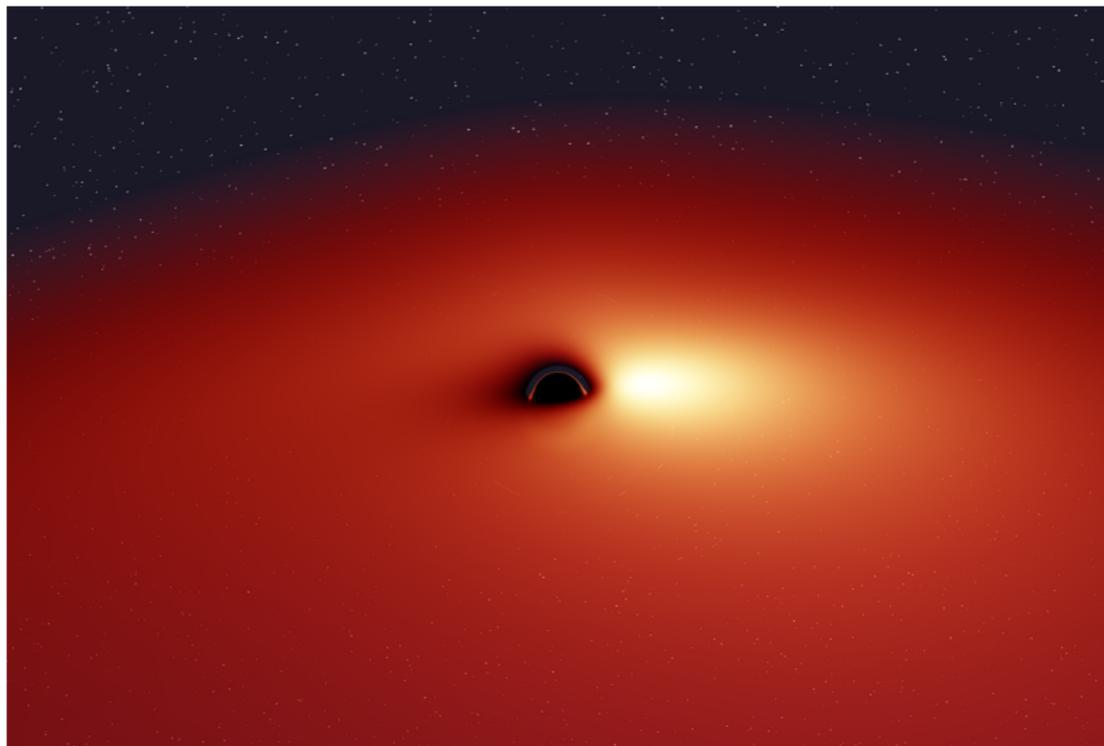
# Vol vers un trou noir

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



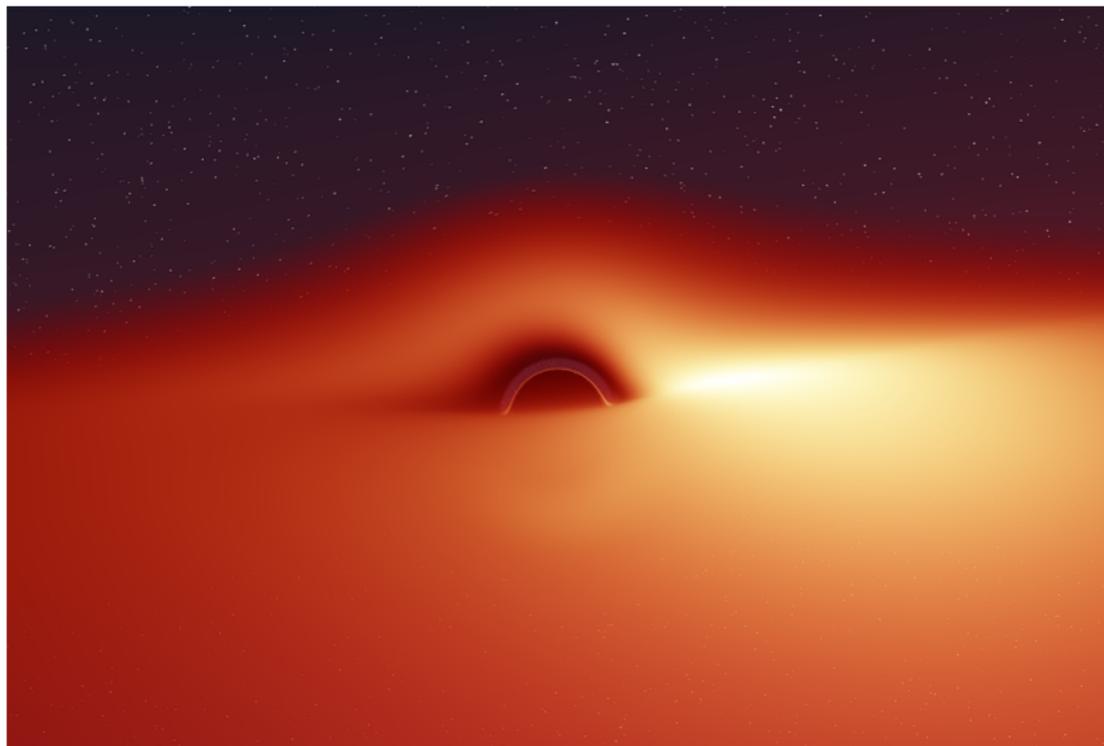
# Vol vers un trou noir

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



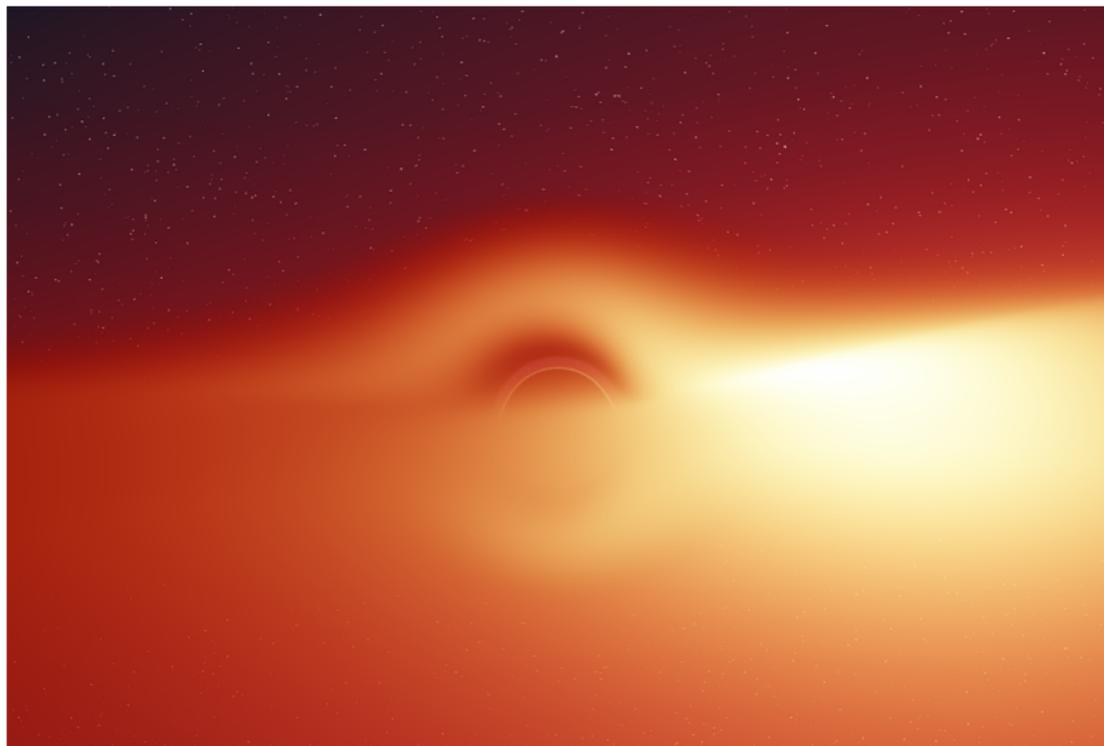
# Vol vers un trou noir

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



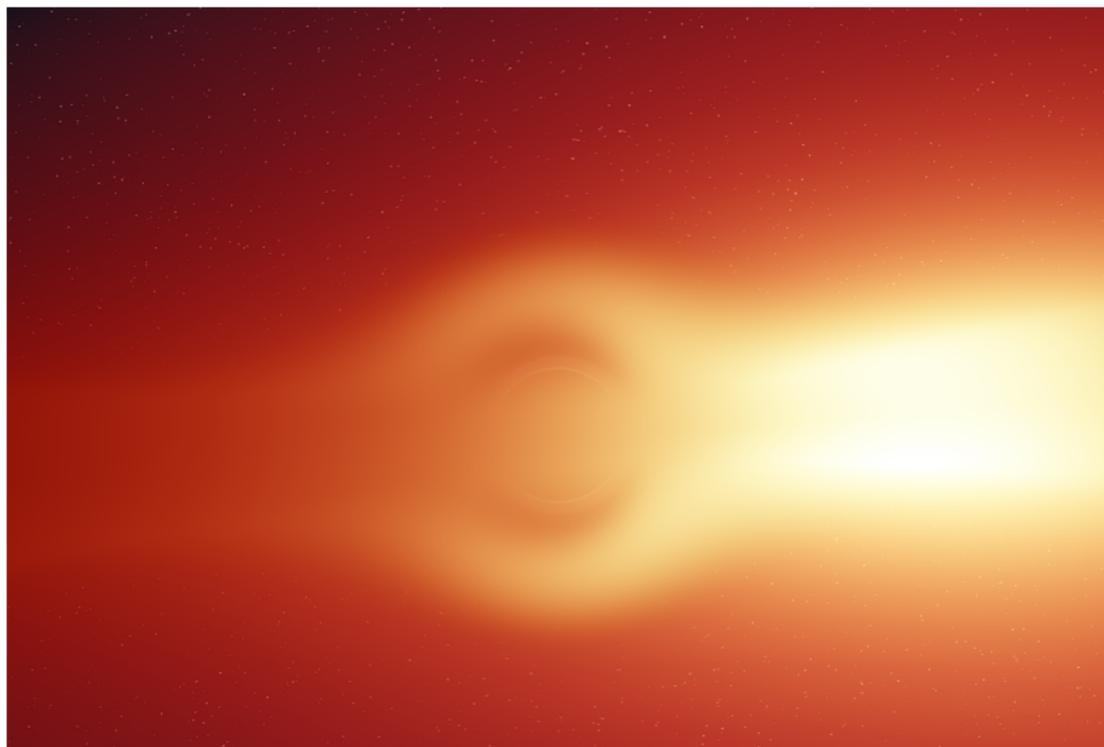
# Vol vers un trou noir

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)]



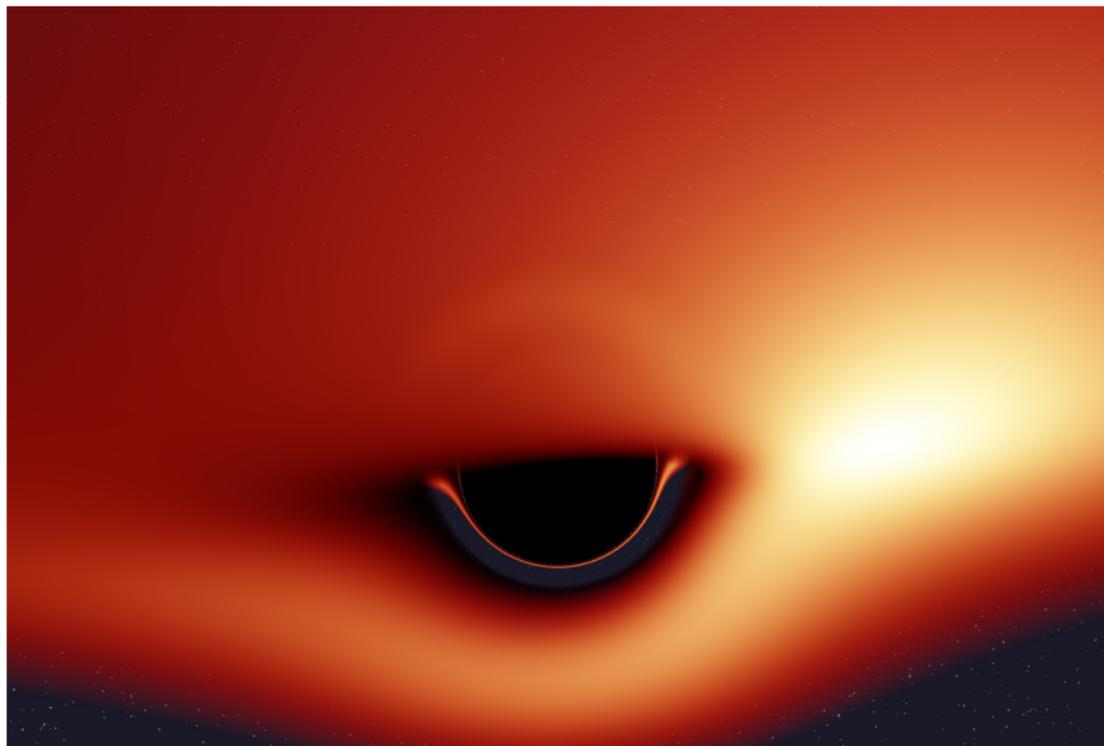
# Vol vers un trou noir

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



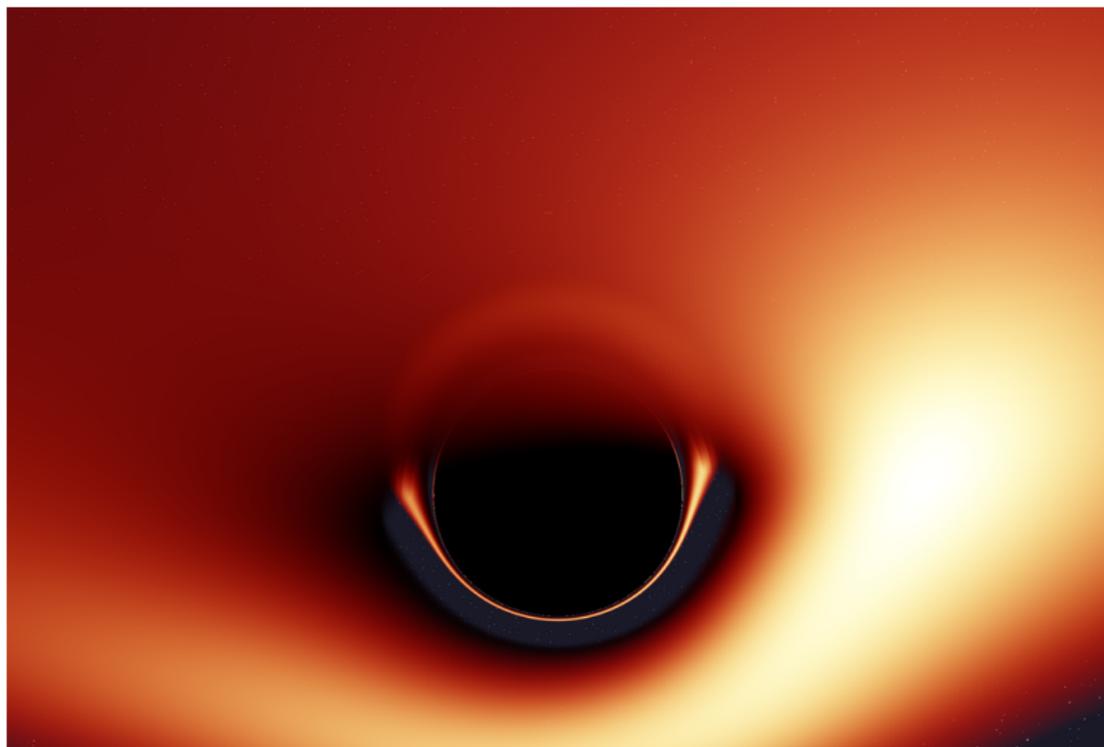
# Vol vers un trou noir

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



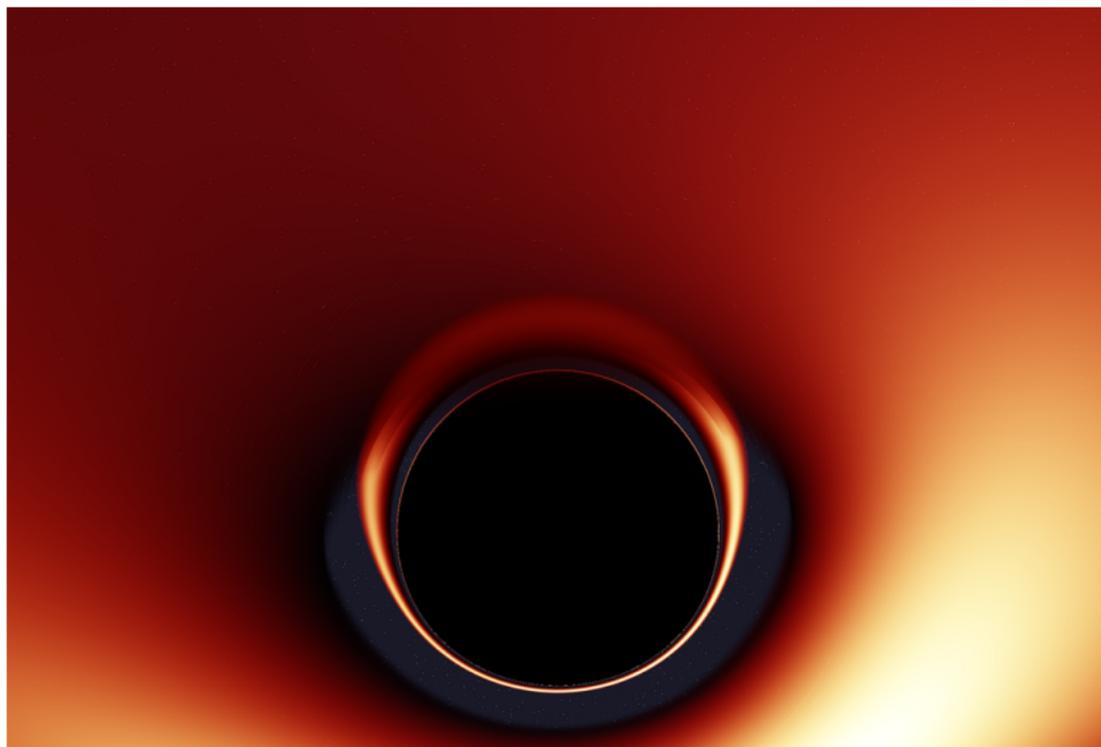
# Vol vers un trou noir

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



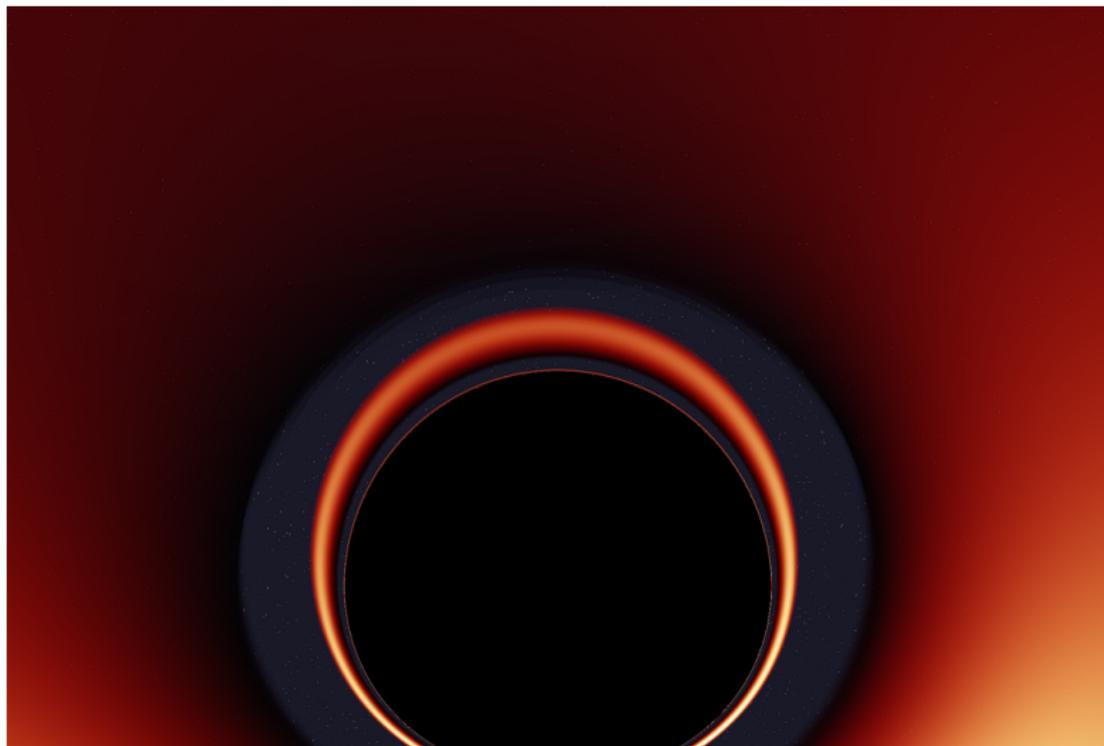
# Vol vers un trou noir

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



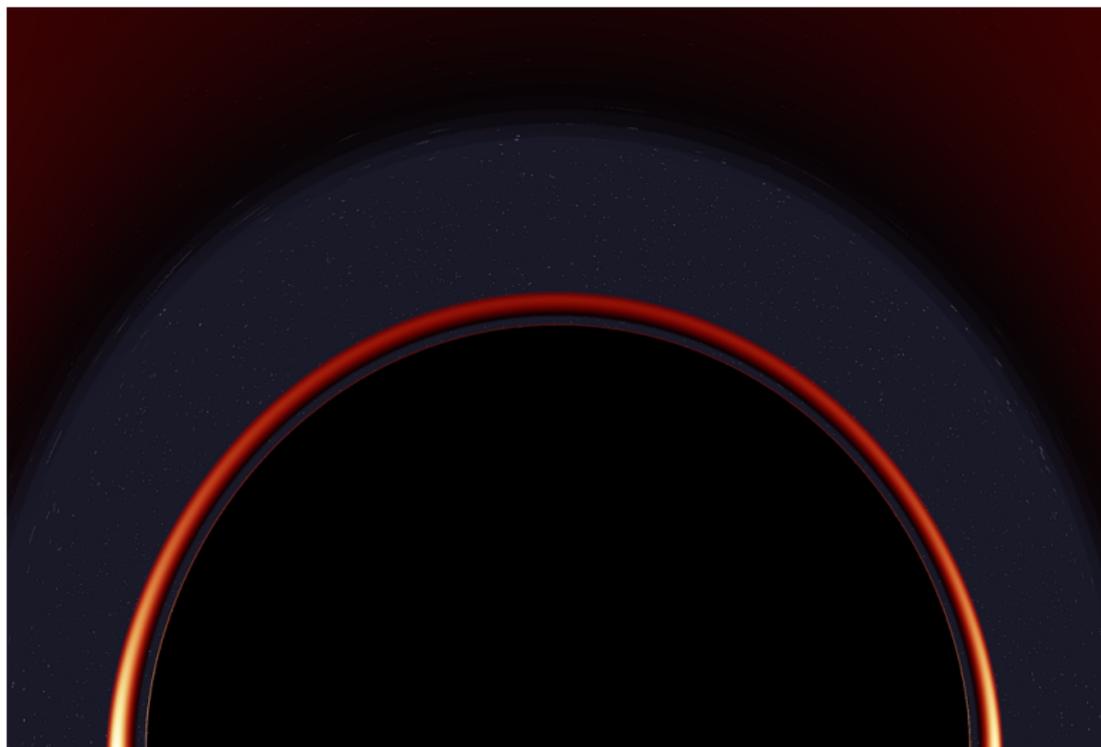
# Vol vers un trou noir

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)]



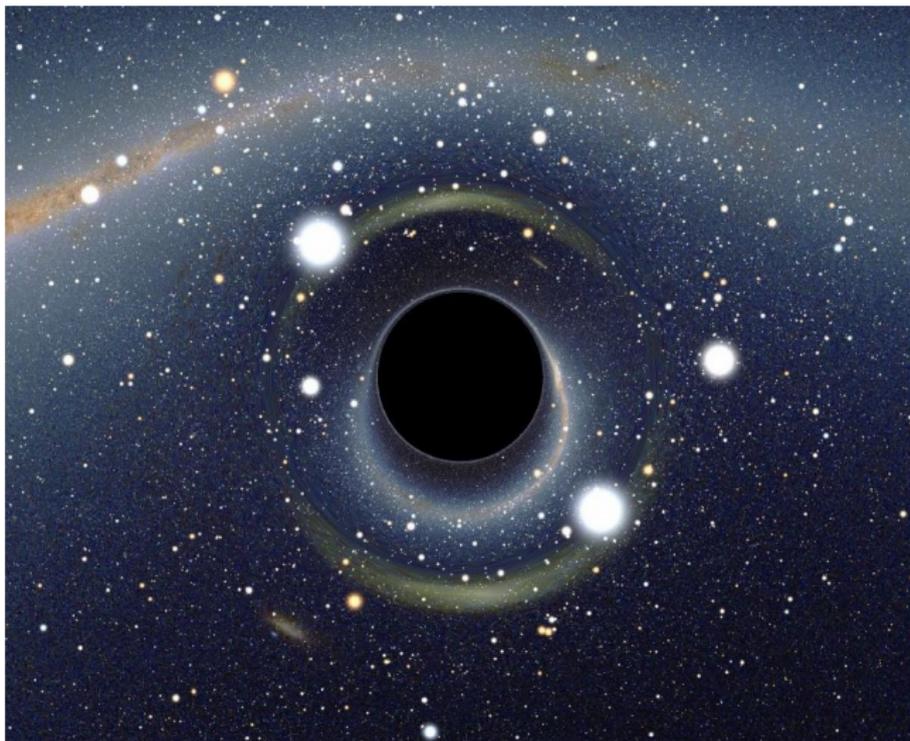
# Silhouette devant un fond étoilé

Image calculée par A. Riazuelo [Riazuelo, 2007]



# Silhouette devant un fond étoilé

Image calculée par A. Riazuelo [Riazuelo, 2007]



# Un trou noir devant la Tour Eiffel !

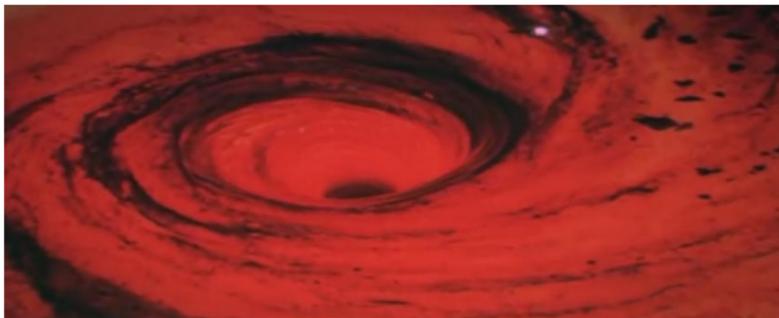


Ce que l'on verrait s'il y avait un trou noir de même masse que la Terre (rayon  $\sim 1$  cm) à 5 m de nous.

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



## Le Trou Noir

Gary Nelson (1979)

produit par Walt Disney

(c) Walt Disney Pictures

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

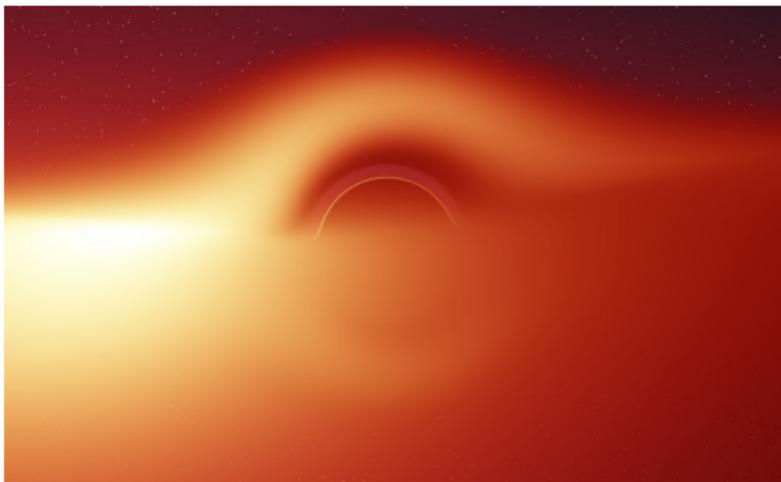


Image calculée par J.-A. Marck (1996)

**Interstellar**  
Christopher Nolan (2014)

- 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

# Outline

- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Voir un trou noir ?
- 3 Les observations actuelles**
- 4 Tester la relativité générale

# 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 :

$$M \sim 10^5 \text{ à } 10^{10} M_{\odot} \text{ et } R \sim 3 \times 10^5 \text{ km à } 200 \text{ UA}^1$$

$$\text{exemple : Sgr A* : } M = 4,3 \times 10^6 M_{\odot} \text{ et}$$

$$R = 13 \times 10^6 \text{ km} = 18 R_{\odot} = 0,09 \text{ UA} = \frac{1}{4} \text{ rayon de l'orbite de Mercure}$$

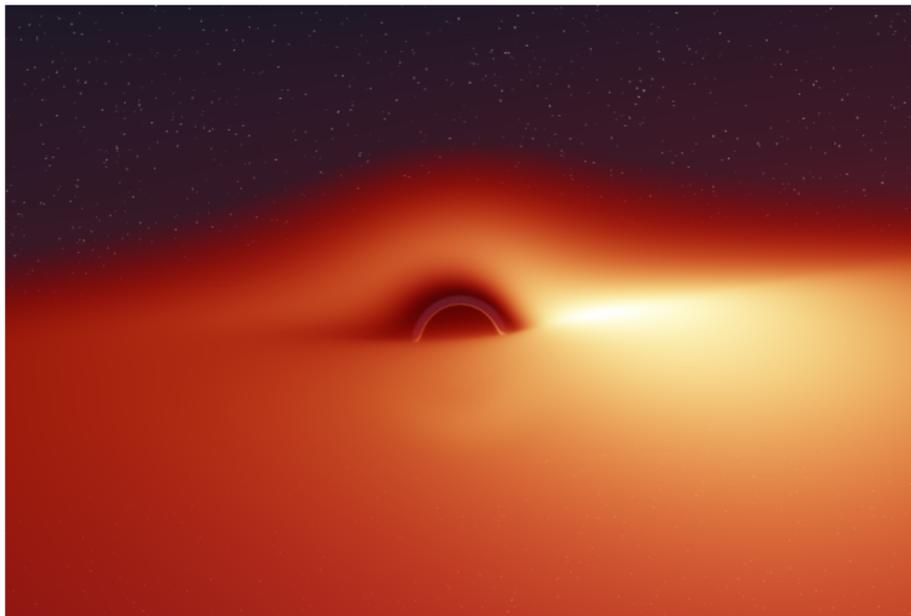
---

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

# 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 !

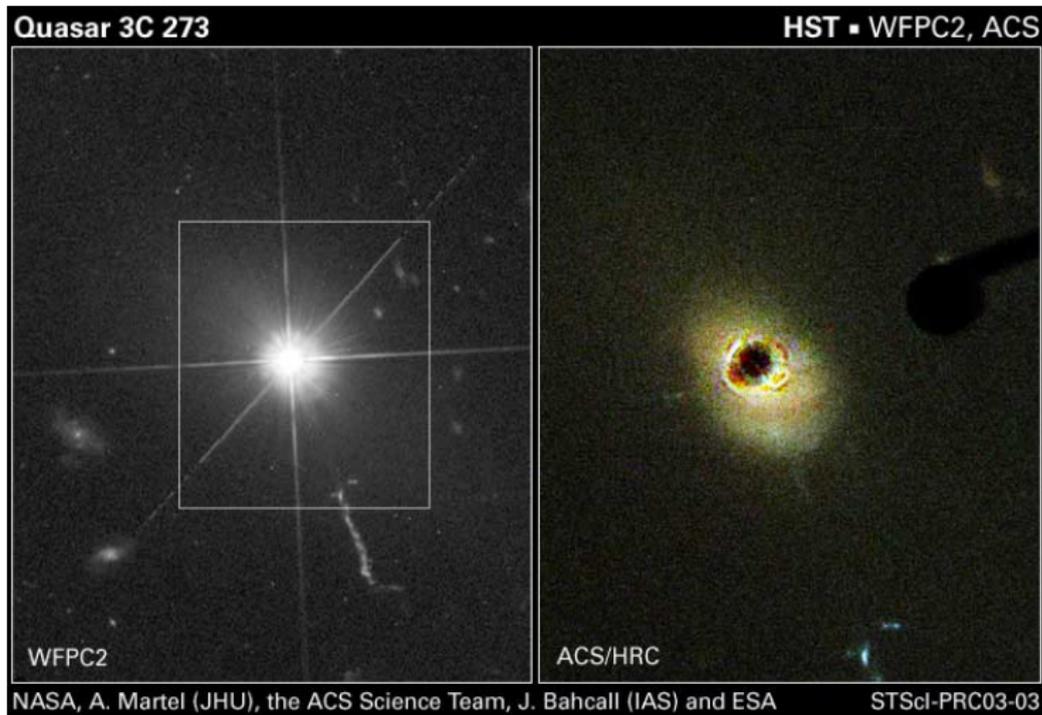
NB : les réactions thermonucléaires libèrent moins de 1% de  $mc^2$



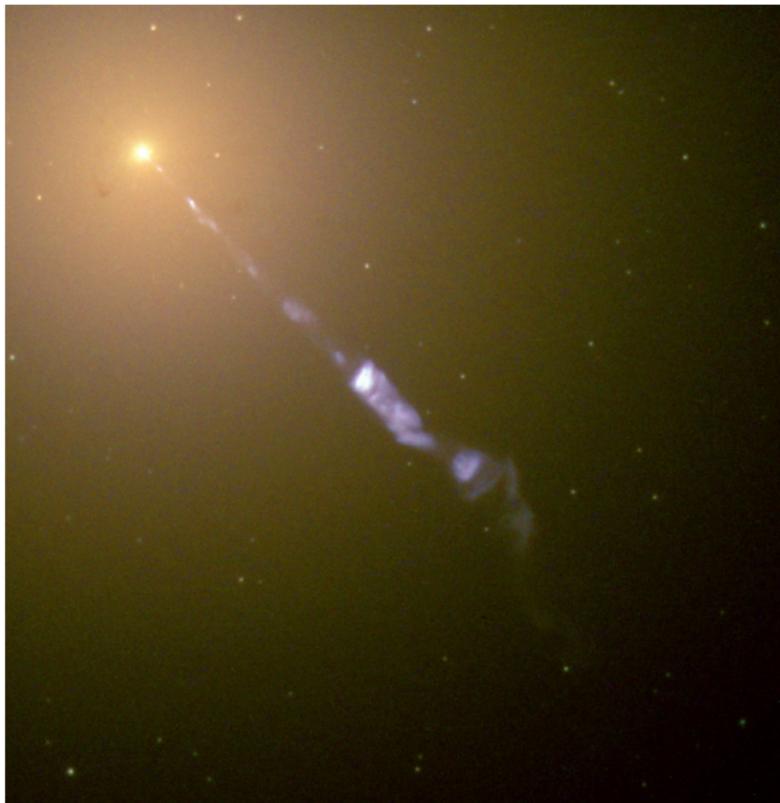
La matière qui tombe sur un trou noir forme un **disque d'accrétion** [Donald Lynden-Bell (1969), Nicolaï Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]

# Les trous noirs au cœur des quasars



# Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

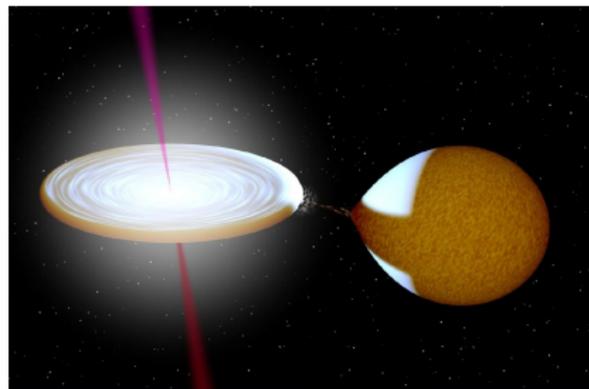
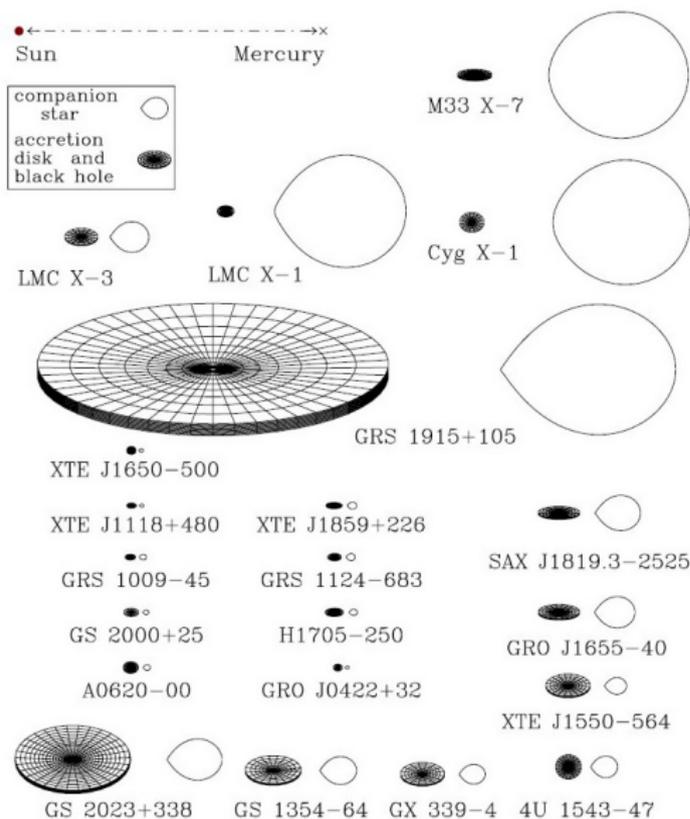


Jet émis par le noyau de la  
galaxie elliptique géante M87, au  
cœur de l'amas de la Vierge [HST]

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

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

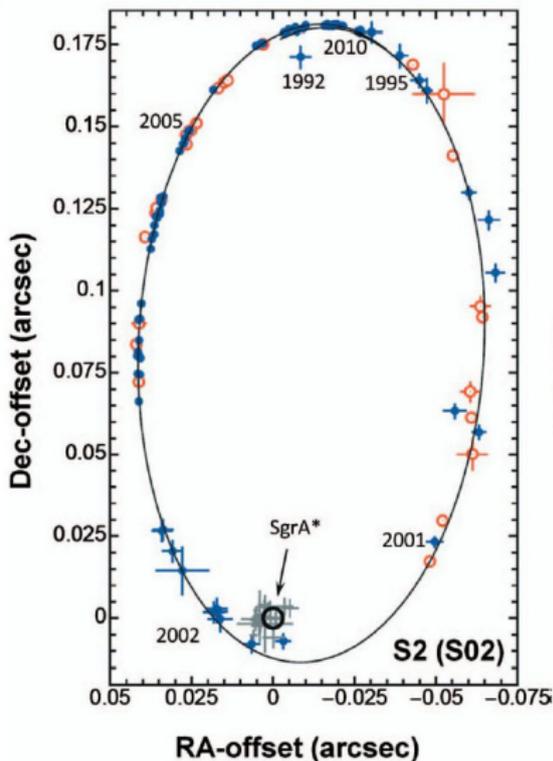
# Trous noirs dans les binaires X



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 :

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

← Orbite de l'étoile S2 autour de Sgr A\* :  
 $P = 16$  ans,  $r_{per} = 120$  UA =  $1400 R_S$ ,  
 $V_{per} = 0.02 c$

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

# Outline

- 1 La théorie : qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Voir un trou noir ?
- 3 Les observations actuelles
- 4 Tester la relativité générale

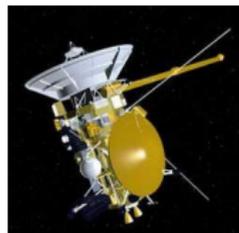
# Tester la relativité générale

Cf. la conférence de *Gilles Esposito-Farèse* du 29 octobre

La relativité générale est aujourd'hui très bien testée

- en **champ faible**  $\mathcal{C} = \frac{GM}{c^2 R} \sim 10^{-6}$  : système solaire
- en **champ moyen**  $\mathcal{C} \sim 10^{-2}$  : pulsars binaires

Mais elle n'a pas encore été testée en **champ fort**  $\mathcal{C} \sim 1$   
 $\implies$  voisinage des **trous noirs**



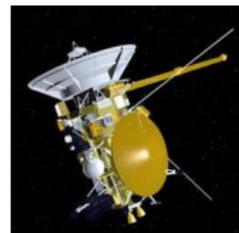
signaux Cassini  
 $\implies$  test :  $10^{-5}$

# Tester la relativité générale

Cf. la conférence de *Gilles Esposito-Farèse* du 29 octobre

La relativité générale est aujourd'hui très bien testée

- en **champ faible**  $\mathcal{C} = \frac{GM}{c^2 R} \sim 10^{-6}$  : système solaire
- en **champ moyen**  $\mathcal{C} \sim 10^{-2}$  : pulsars binaires



signaux Cassini  
 $\implies$  test :  $10^{-5}$

Mais elle n'a pas encore été testée en **champ fort**  $\mathcal{C} \sim 1$   
 $\implies$  voisinage des **trous noirs**

La relativité générale n'est pas la théorie ultime de la gravitation

- la relativité générale a englobé la théorie newtonienne
- elle sera elle-même englobée un jour par une théorie plus fine, qui prendra en compte la mécanique quantique
- les principales pistes actuellement explorées sont la **théorie des cordes** et la **gravité quantique à boucles**

# Alternatives au trou noir standard (*trou noir de Kerr*)

## Dans le cadre de la relativité générale

L'objet compact n'est pas un trou noir mais

- une étoile bosonique
- un "gravastar"
- ...

## Au delà de la relativité générale

L'objet compact est un trou noir mais dans une extension de la relativité générale :

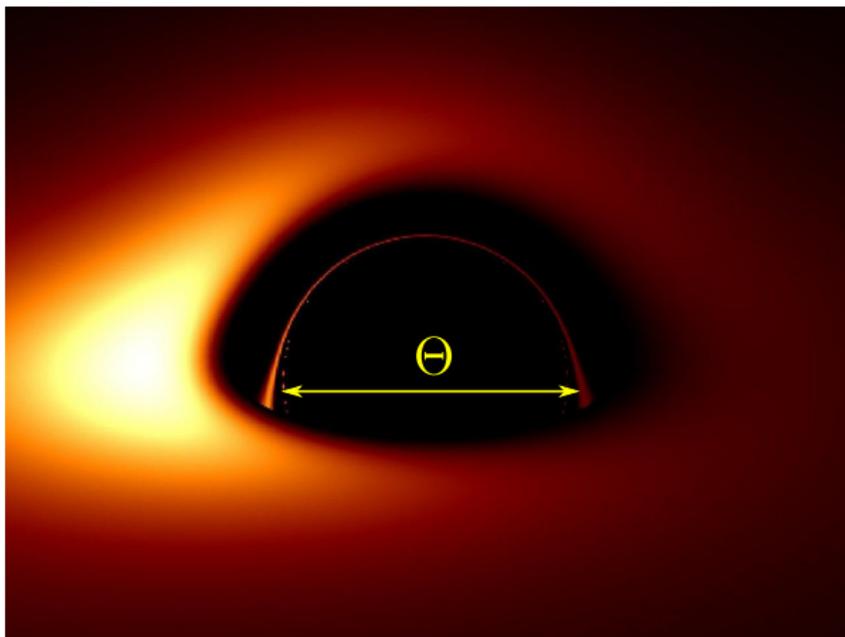
- théorie d'Einstein-Gauss-Bonnet avec dilaton ← **théorie des cordes**
- gravité de Chern-Simons ← **théorie des cordes** et **grav. quant. boucles**
- gravité de Hořava-Lifshitz
- théorie d'Einstein-Yang-Mills
- ...

# À l'épreuve des trous noirs

Recherche d'écarts à la prédiction de la relativité générale (**trou noir de Kerr** en vertu du théorème d'absence de chevelure) :

- **mouvement orbitaux** autour de l'objet compact (étoiles, point chaud d'un disque d'accrétion)
- **spectre du disque d'accrétion**
- forme de l'**image de la silhouette** du trou noir

# 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

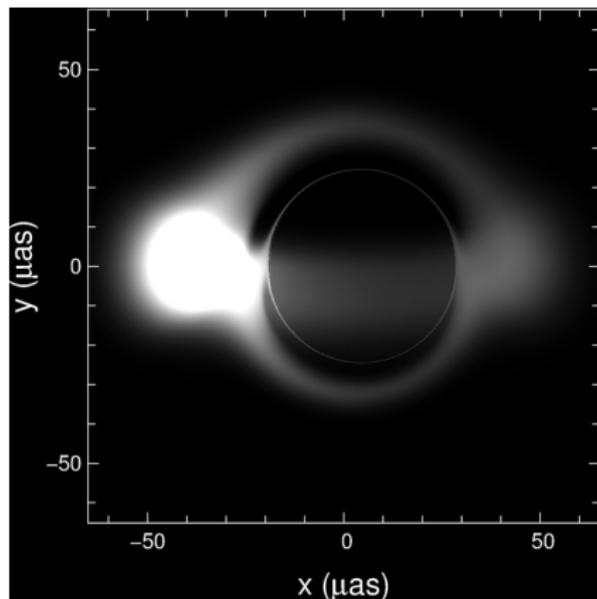
**M87** :  $\Theta = 21 \mu\text{as}$

**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

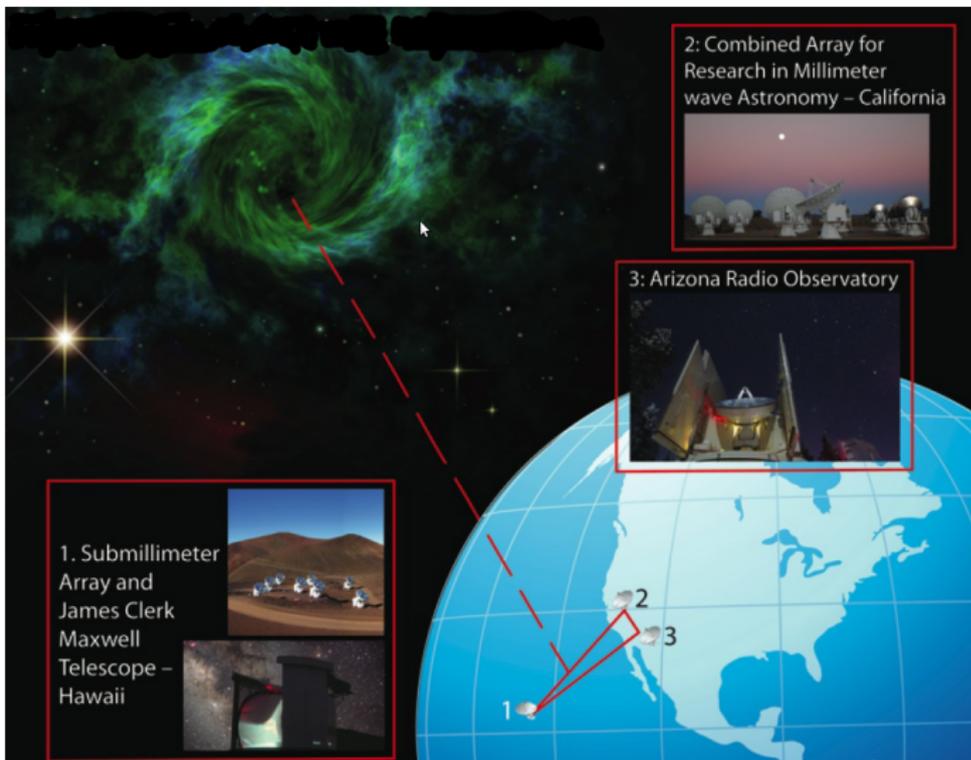
**M87** :  $\Theta = 21 \mu\text{as}$

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

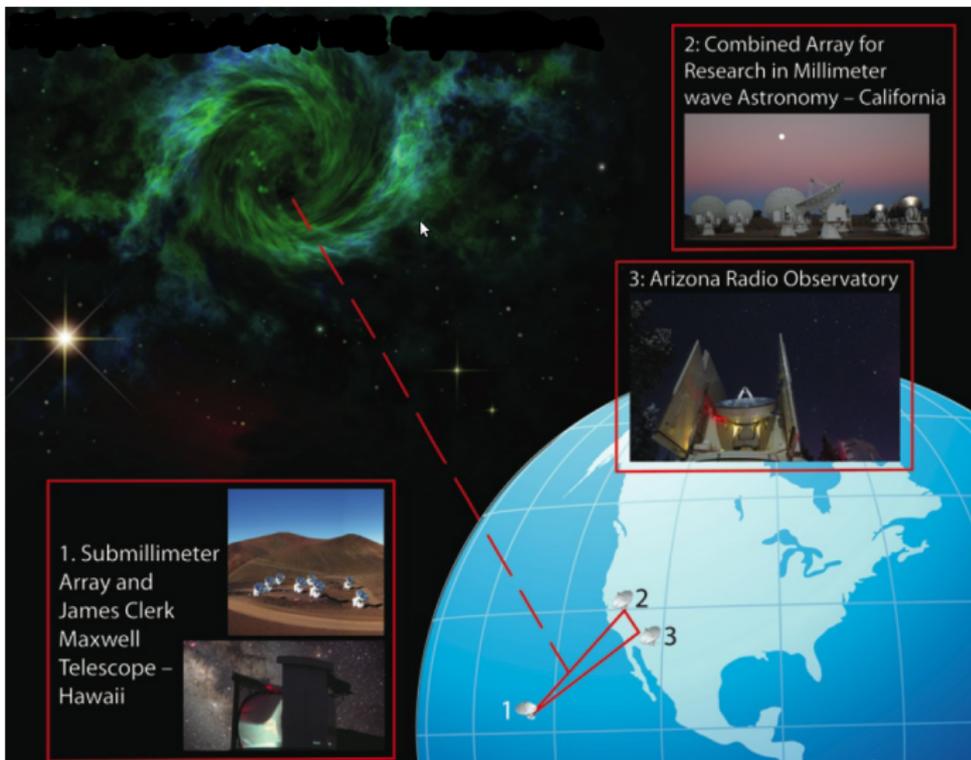
# La solution : l'interférométrie !



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

Réseau VLBI américain existant [Doeleman et al. 2011]

# La solution : l'interférométrie !



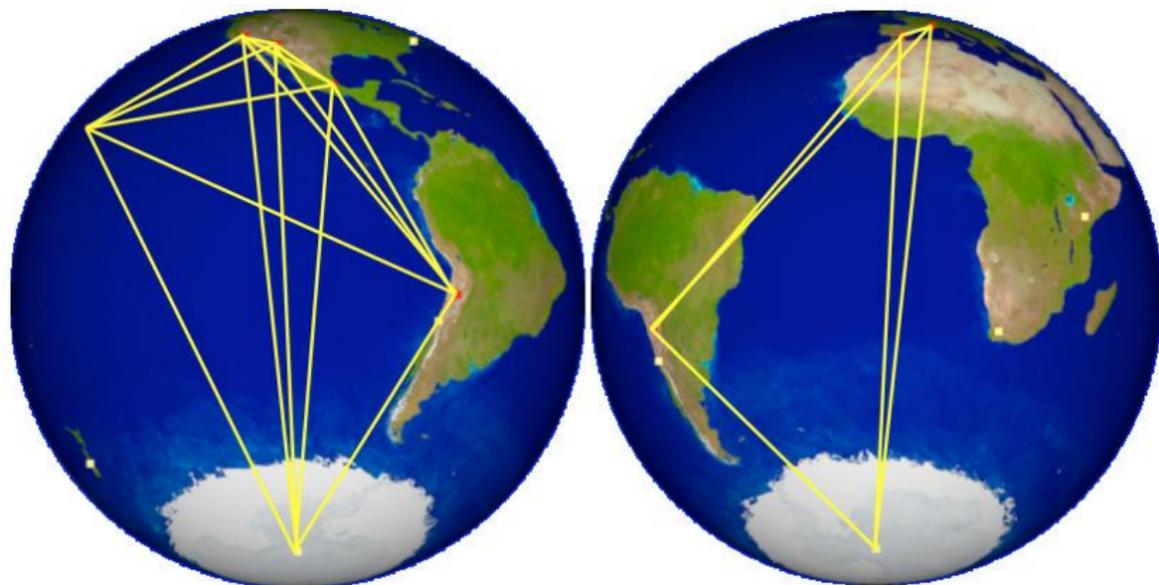
Interférométrie à très grande base (VLBI) en ondes (sub)millimétriques

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]

# L'Event Horizon Telescope

Un télescope taille planétaire !

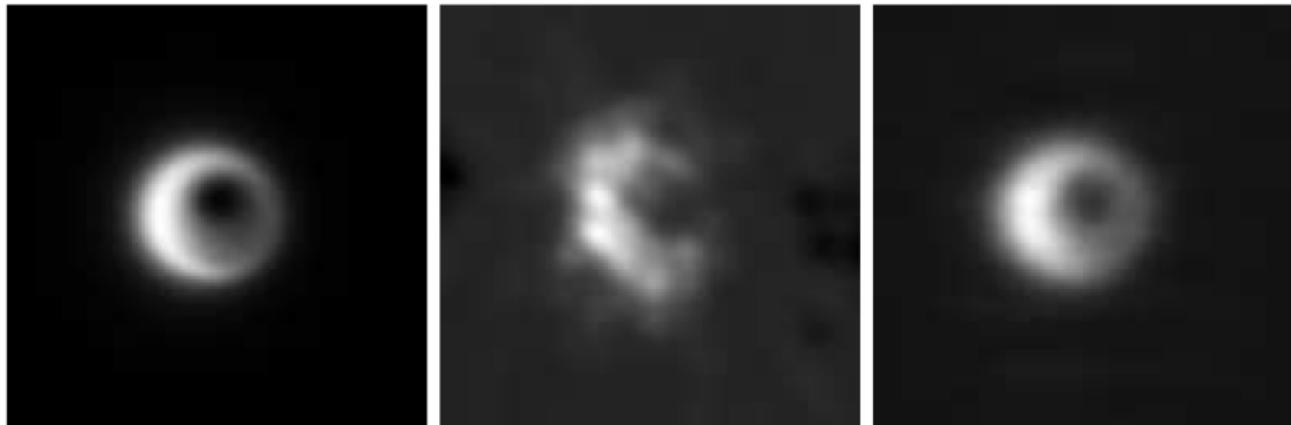


# L'Event Horizon Telescope



Atacama Large Millimeter Array (ALMA)  
inauguré en mars 2013

# L'Event Horizon Telescope



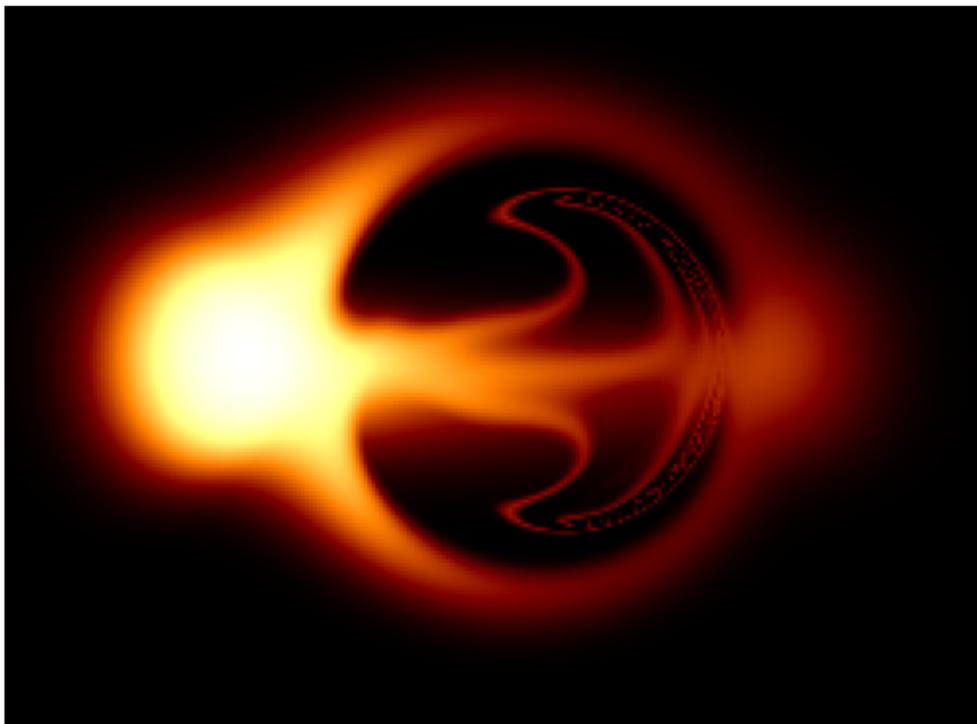
Simulations d'observations VLBI de Sgr A\* à  $\lambda = 0.8 \text{ mm}$

*gauche* : image parfaite, *milieu* : 7 stations ( $\sim 2016$ ), *droite* : 13 stations ( $\sim 2020$ )

$a = 0$ ,  $i = 30^\circ$

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

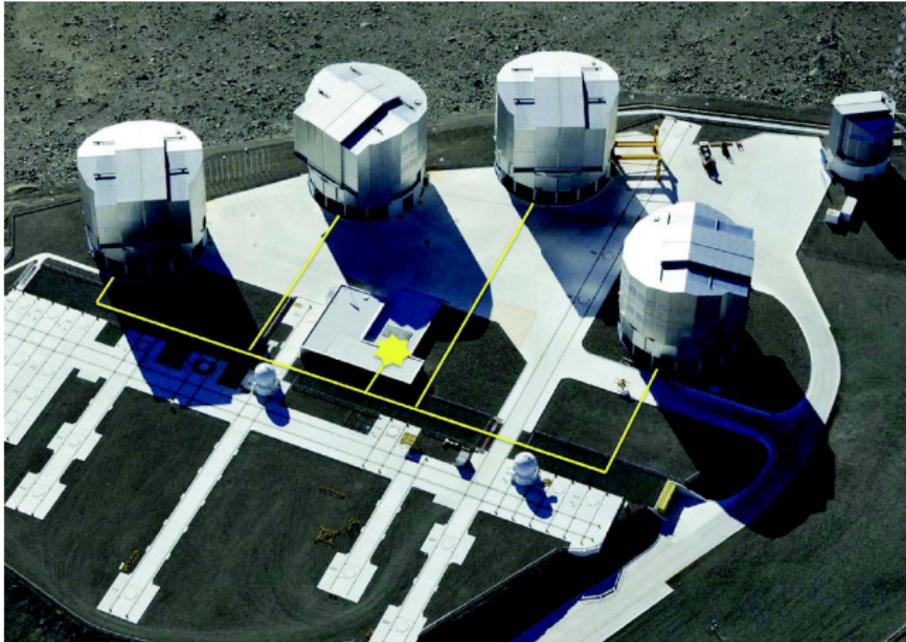
# Prédiction pour une alternative au trou noir de Kerr



Disque d'accrétion autour d'une étoile bosonique en rotation rapide

[Vincent, Meliani, Grandclément, Gourgoulhon & Straub, preprint arXiv:1510.04170 (2015)]

# Interférométrie optique (infra-rouge proche)



[Gillessen et al. 2010]

## Instrument GRAVITY au VLT (2016)

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

En cours d'installation !

# Tester l'absence de chevelure

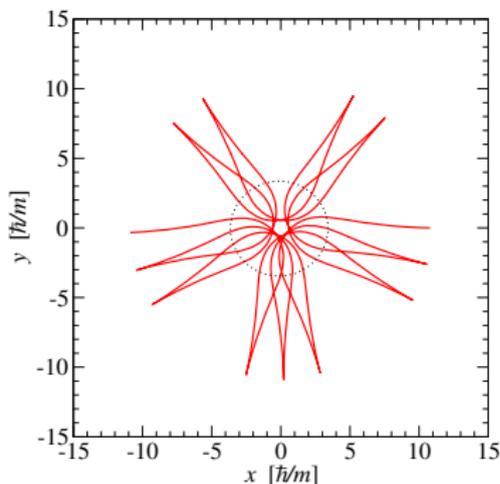
GRAVITY devrait observer des étoiles sur des orbites relativistes (plus serrées que celle de S2)

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 ( $a, M$ ) ?**

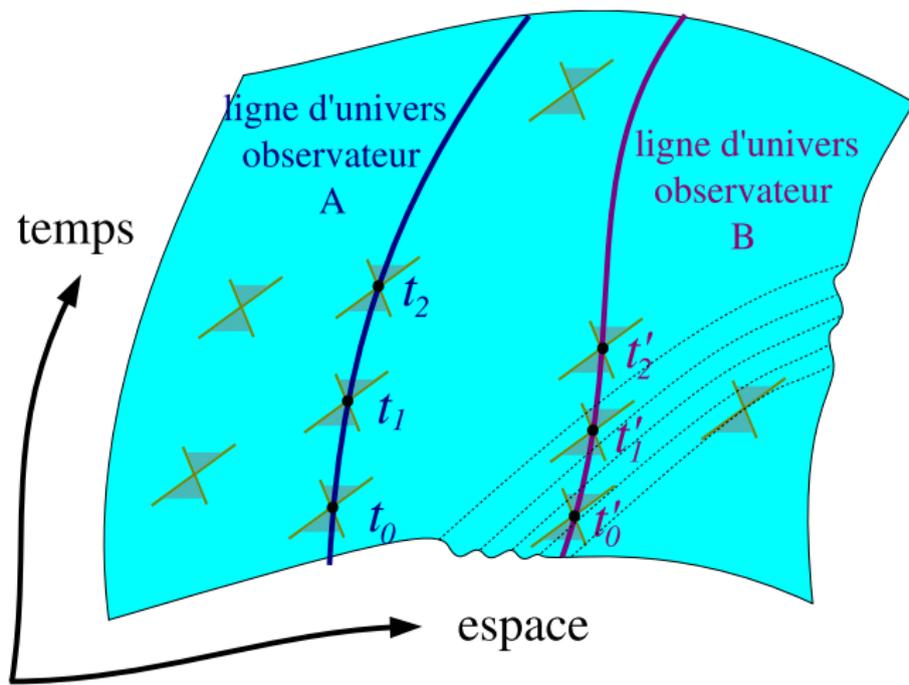


← un exemple d'orbite qui ne peut exister autour d'un trou noir de Kerr : orbite autour d'une étoile bosonique en rotation

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

# Un autre moyen d'observation : les ondes gravitationnelles

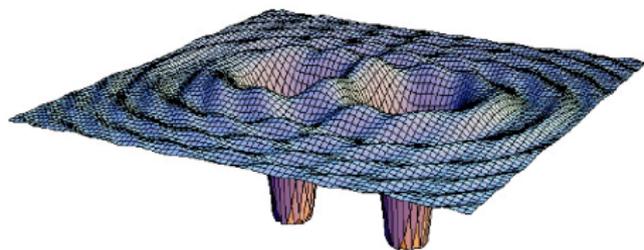
Des petites oscillations dans la courbure...



# Les ondes gravitationnelles

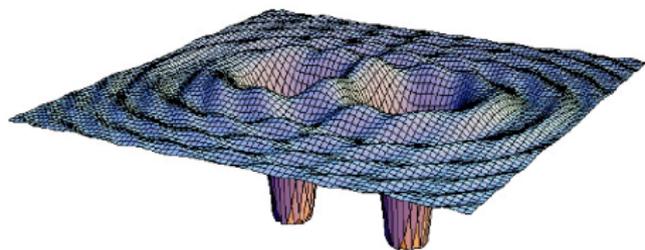
## Les **ondes gravitationnelles**

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps



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

# Les ondes gravitationnelles

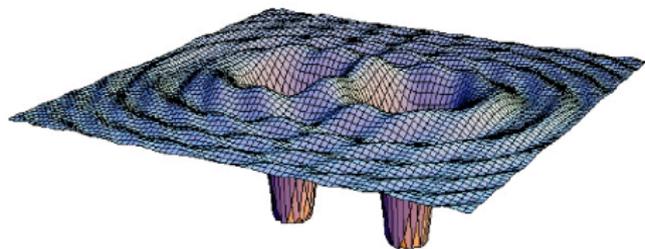


Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

## Les **ondes gravitationnelles**

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- sont engendrées par l'accélération de la matière

# Les ondes gravitationnelles

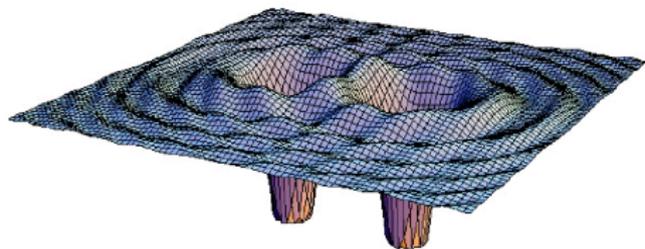


Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

## Les **ondes gravitationnelles**

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- sont engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière

# Les ondes gravitationnelles



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

## Les **ondes gravitationnelles**

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

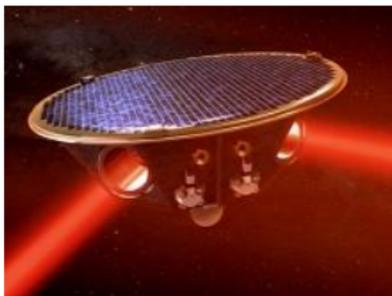


## Livingston (L1=4km)



# Projet spatial eLISA (ESA)

Détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles dans l'espace

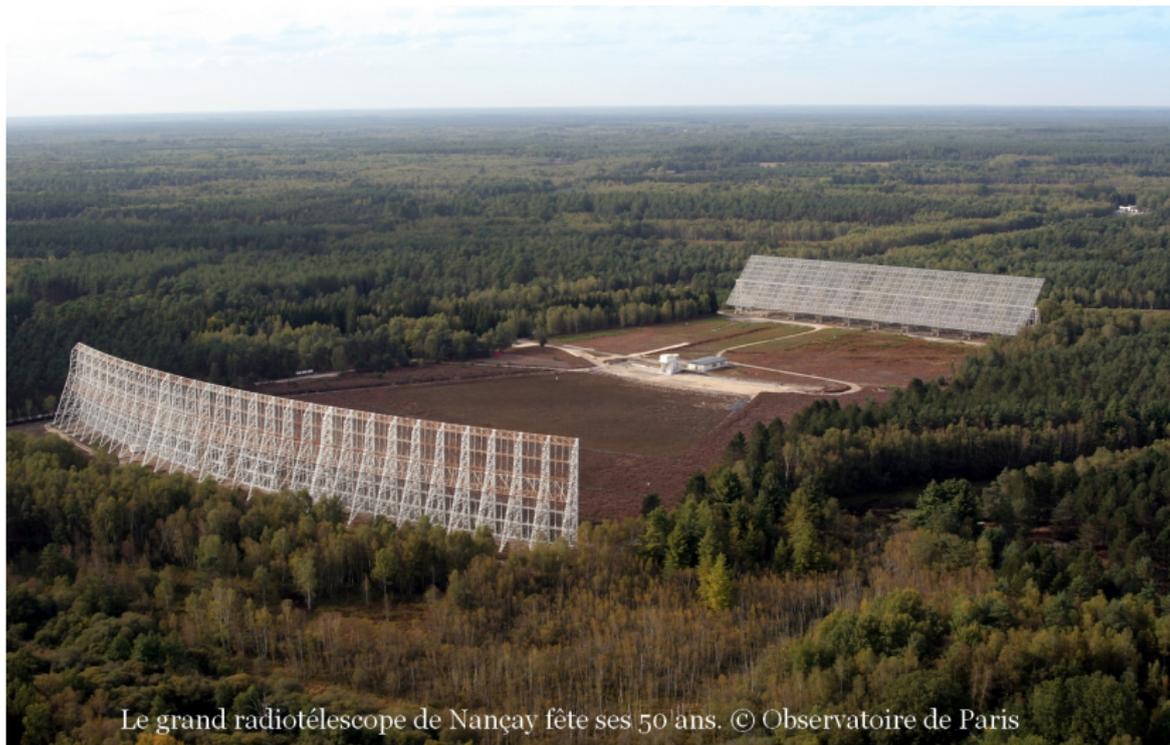


[eLISA / NGO]

- sélectionné par l'ESA en 2013 (mission L3)
- lancement vers 2030
- démonstrateur technologique **LISA Pathfinder** lancé le 2 décembre 2015

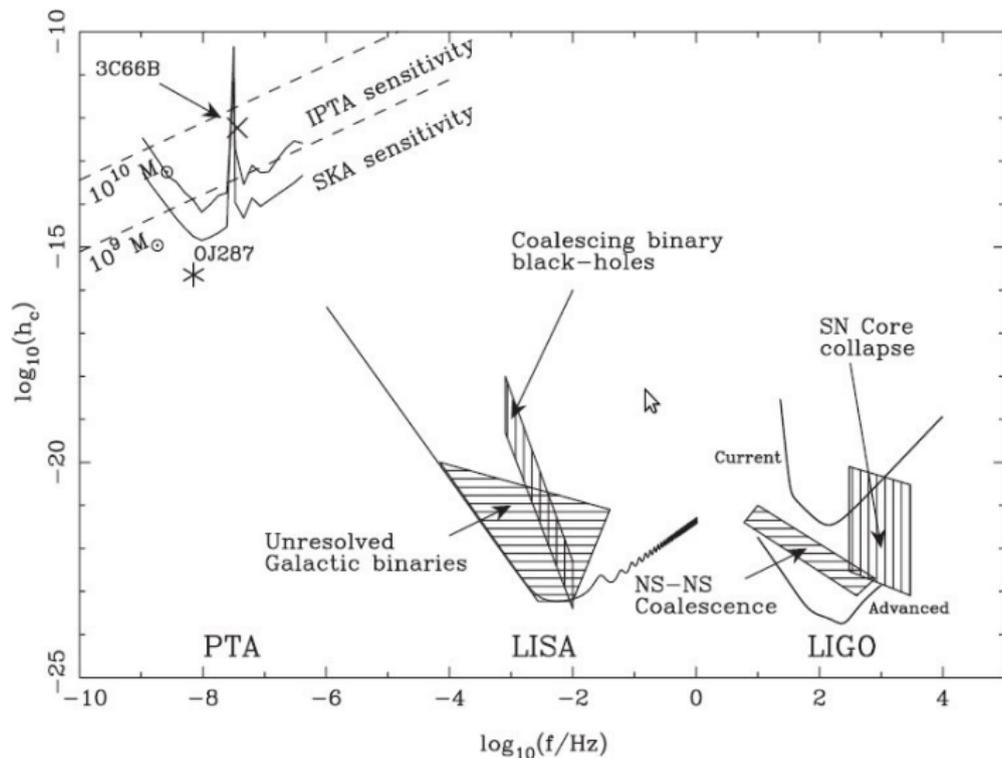


# Détecter les ondes gravitationnelles par le chronométrage des pulsars

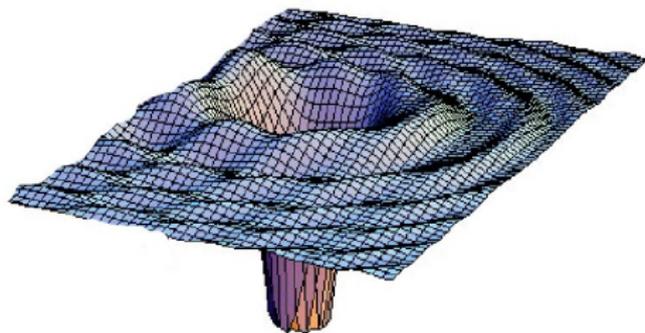


Le grand radiotélescope de Nançay fête ses 50 ans. © Observatoire de Paris

# Détecter les ondes gravitationnelles par le chronométrage des pulsars



# Les ondes gravitationnelles pour “voir” les trous noirs



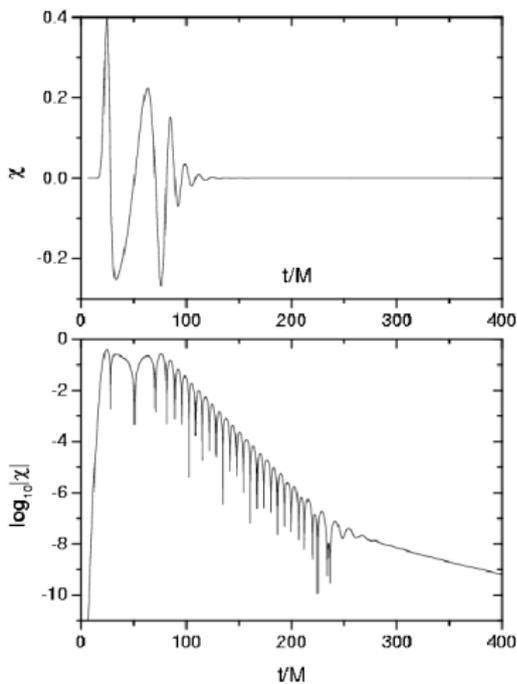
Lien intime entre les trous noirs et les ondes gravitationnelles :

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)

# Oscillations des trous noirs



[Kokkotas & Schmidt, Liv. Rev. Relat. 2, 2 (1999)]

## Trous noirs hors d'équilibre :

- trou noir nouvellement formé
- trou noir excité par la chute de matière

Désexcitation par émission d'ondes gravitationnelles sous forme de **modes quasi-normaux**.

La détection de ces ondes gravitationnelles permet la mesure directe de la masse  $M$  et du moment cinétique  $J$  du trou noir.

$$M = 10 M_{\odot} \Rightarrow \begin{cases} f = 1.2 \text{ kHz} & (\text{VIRGO}) \\ \tau = 0.55 \text{ ms} \end{cases}$$

$$M = 10^6 M_{\odot} \Rightarrow \begin{cases} f = 12 \text{ mHz} & (\text{eLISA}) \\ \tau = 55 \text{ s} \end{cases}$$

# 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
- N. Deruelle, 2015, *De Pythagore à Einstein, tout est nombre*, Belin
- E.ourgoulhon, 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
- 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