

Les trous noirs à l'aube d'une nouvelle ère observationnelle

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/>

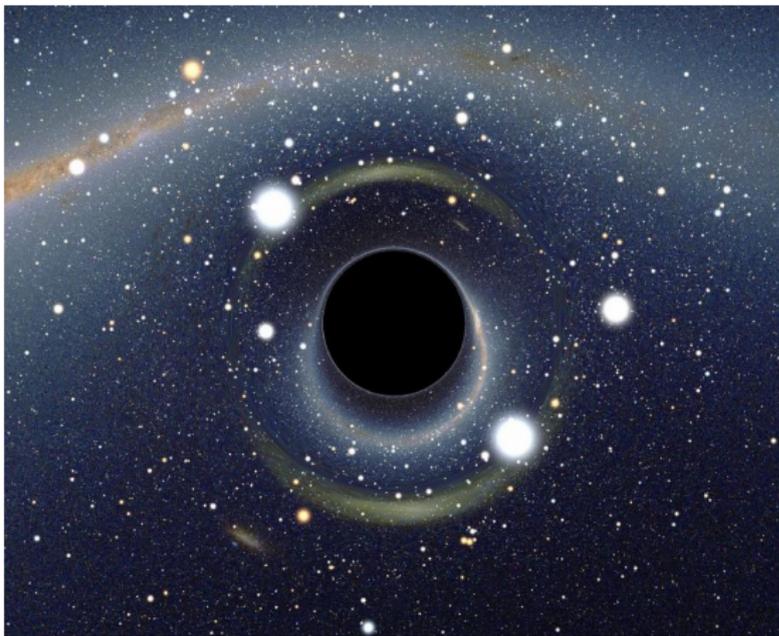
Institut de Recherche sur l'Enseignement des Mathématiques
Université de Bretagne Occidentale
Brest, 19 mars 2013

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Observations actuelles
- 3 Une nouvelle ère observationnelle

Outline

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Observations actuelles
- 3 Une nouvelle ère observationnelle

Qu'est-ce qu'un trou noir ?



[Alain Riazuelo, 2007]

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 "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 "newtonienne" (J. Michell 1783, Laplace 1796) :

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

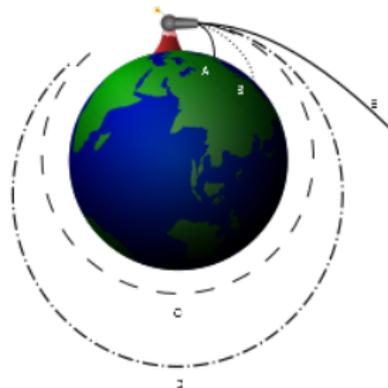
la **vitesse de libération** dépasse la vitesse de la lumière

Dans la théorie de Newton de la gravitation :

la **vitesse de libération** d'un corps de masse M

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

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



Pourquoi la lumière ne peut s'échapper ?

Réponse "newtonienne" (J. Michell 1783, Laplace 1796) :

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

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

Dans la théorie de Newton de la gravitation :

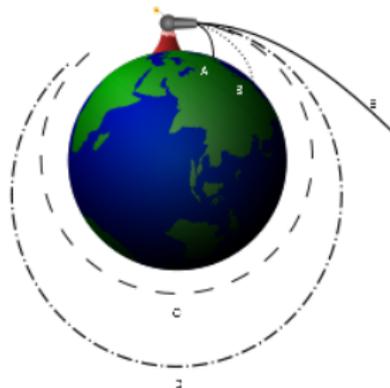
la **vitesse de libération** d'un corps de masse M

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

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

La lumière ne s'échappe pas si $V_{\text{lib}} > c \simeq 300\,000 \text{ km/s}$

$$\iff \frac{2GM}{R} > c^2 \iff R > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G\rho}} \quad (M = \frac{4}{3}\pi R^3\rho)$$



La préhistoire des trous noirs...

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

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

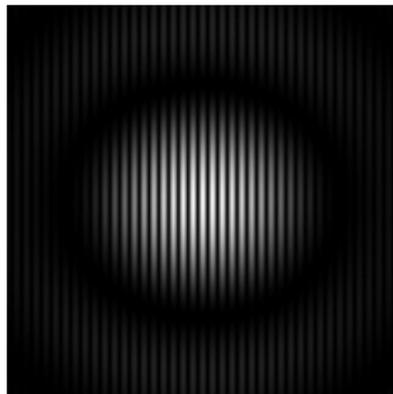
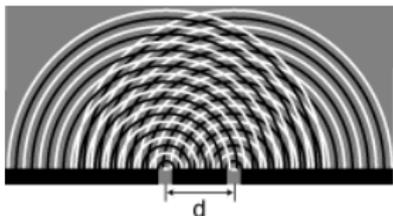
Pierre Simon de Laplace (1796)

"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]

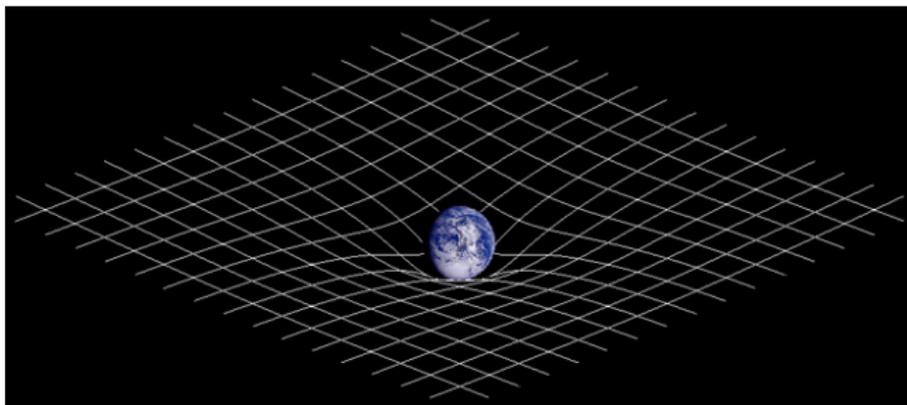
Limites du concept newtonien de trou noir

- En théorie newtonienne, la vitesse de la lumière ne joue pas de rôle privilégié : rien n'interdit $V > c$
- Si $V_{\text{lib}} \sim c$, l'énergie du champ gravitationnel est du même ordre de grandeur que l'énergie de masse Mc^2 : une théorie relativiste de la gravitation est nécessaire !

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

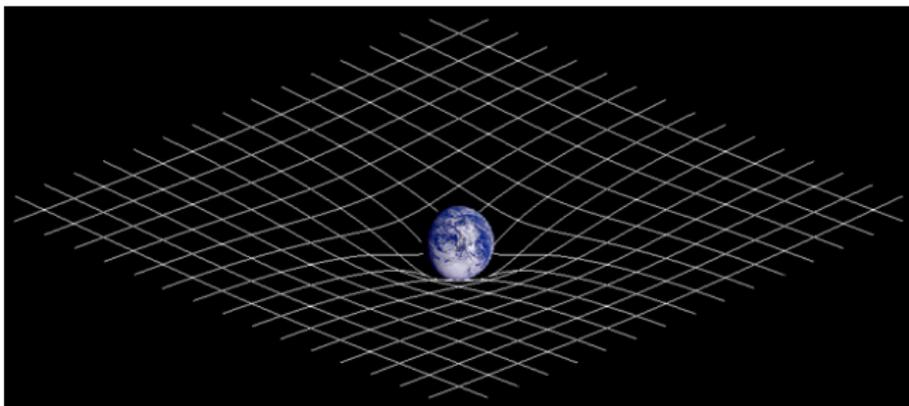
La relativité générale

La relativité générale (A. Einstein, 1915) décrit la gravitation coumme une **courbure de l'espace-temps**



La relativité générale

La relativité générale (A. Einstein, 1915) décrit la gravitation coumme une **courbure de l'espace-temps**



La gravitation **dévie les rayons lumineux** et a un effet sur **l'écoulement du temps**

Les déviations par rapport à la théorie newtonienne se mesurent par

le **paramètre de compacité** $C = (V_{\text{lib}}/c)^2 \sim GM/(c^2 R)$

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

La page mathématique...

Gravitation newtonienne :

équation fondamentale : équation de Poisson pour le potentiel gravitationnel Φ :

$$\Delta\Phi = 4\pi G\rho$$

- équation scalaire
- équation linéaire
- équation elliptique
(\Rightarrow propagation instantanée)
- seule source : la densité de masse ρ

La page mathématique...

Gravitation newtonienne :

équation fondamentale : **équation de Poisson** pour le potentiel gravitationnel

Φ :

$$\Delta\Phi = 4\pi G\rho$$

- équation scalaire
- équation linéaire
- équation elliptique
(\Rightarrow propagation instantanée)
- seule source : la densité de masse ρ

Relativité générale :

équation fondamentale : **équation d'Einstein** pour le tenseur métrique g :

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

- équation tensorielle (10 équations scalaires)
- équation non-linéaire
- propagation à vitesse finie (c)
- source : énergie-impulsion T de la matière et du champ électromagnétique

La page mathématique...

Gravitation newtonienne :

équation fondamentale : **équation de Poisson** pour le potentiel gravitationnel Φ :

$$\Delta\Phi = 4\pi G\rho$$

- équation scalaire
- équation linéaire
- équation elliptique
(\Rightarrow propagation instantanée)
- seule source : la densité de masse ρ

Relativité générale :

équation fondamentale : **équation d'Einstein** pour le tenseur métrique g :

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

- équation tensorielle (10 équations scalaires)
- équation non-linéaire
- propagation à vitesse finie (c)
- source : énergie-impulsion T de la matière et du champ électromagnétique

Remarque : en champ gravitationnel faible, une des 10 composantes de l'équation d'Einstein se réduit à l'équation de Poisson (et les 9 autres se réduisent à $0 \equiv 0$).

La gravitation influe sur l'écoulement du temps ?

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

La gravitation influe sur 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 influe sur l'écoulement du temps ?

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



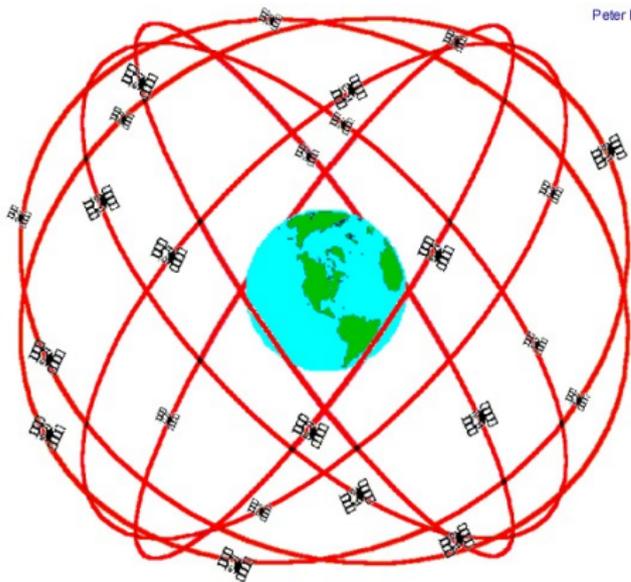
Expérience de Hafele et Keating (1971)

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 !



Peter H. Dana 9/22/98

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

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

En un jour, la dérive atteint

$\delta t = 46 \mu s$

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

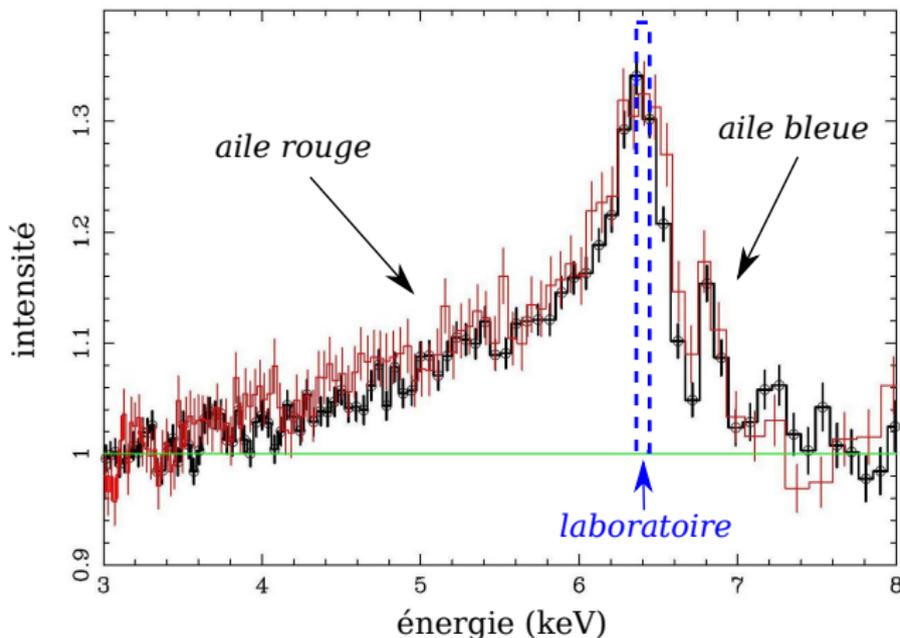
Au voisinage d'un trou noir, l'effet est beaucoup plus marqué !

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**

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*).

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*).
- **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 (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*).
- **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*).
- **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*).

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*).
- **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*).
- **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 (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 de son 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 lointaine 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 : $R = \frac{2GM}{c^2} \simeq 3 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ km}$
- Il existe deux grandes catégories de trous noirs astrophysiques :
 - les **trous noirs stellaires**, restes de 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 $R \sim 3 \times 10^5 \text{ km à } 200 \text{ UA}^2$
 exemple : Sgr A* : $M = 4,3 \times 10^6 M_{\odot}$ et
 $R = 13 \times 10^6 \text{ km} = 18 R_{\odot} = 0,09 \text{ UA} = \frac{1}{4} \text{ rayon de l'orbite de Mercure}$

Formation d'un trou noir stellaire

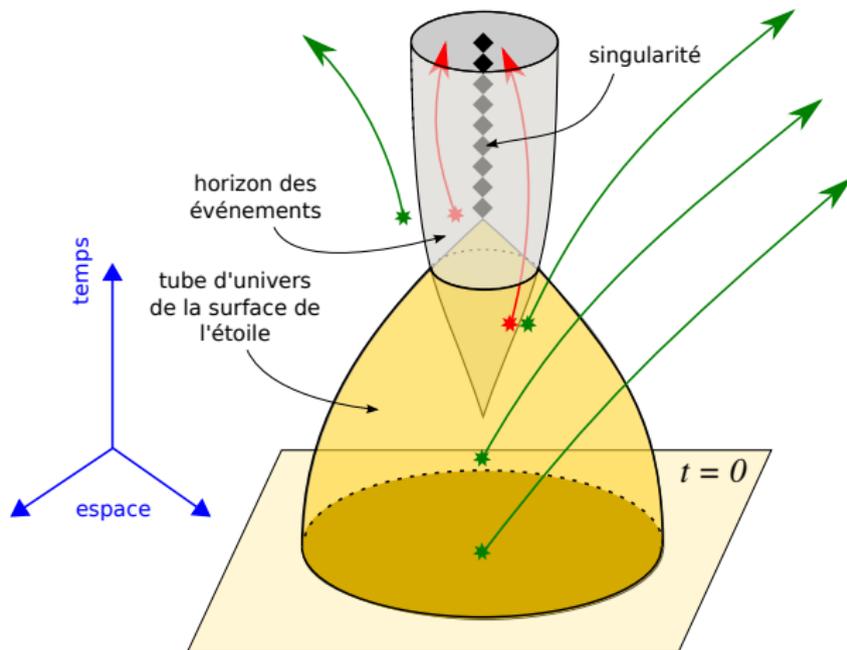


Diagramme d'espace-temps d'un effondrement gravitationnel

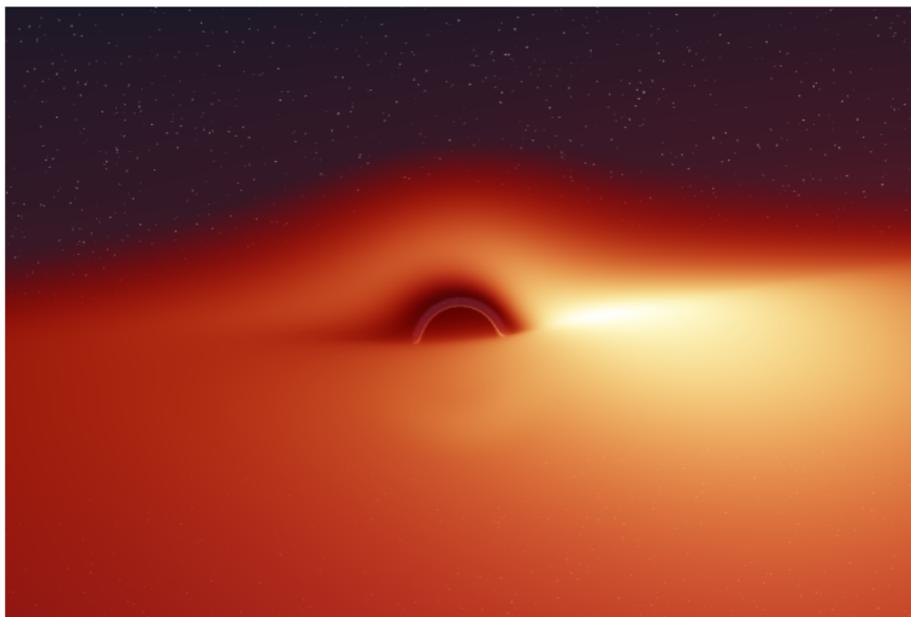
Les étoiles massives terminent leur vie en **supernova** : ce phénomène est déclenché par l'**effondrement gravitationnel** de leur cœur de fer, via un rebond.

Suivant les conditions initiales (masse du cœur de fer), l'effondrement peut être stoppé par l'*interaction forte* (le résidu est alors une *étoile à neutrons*) ou bien être complet et conduire à un trou noir.

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



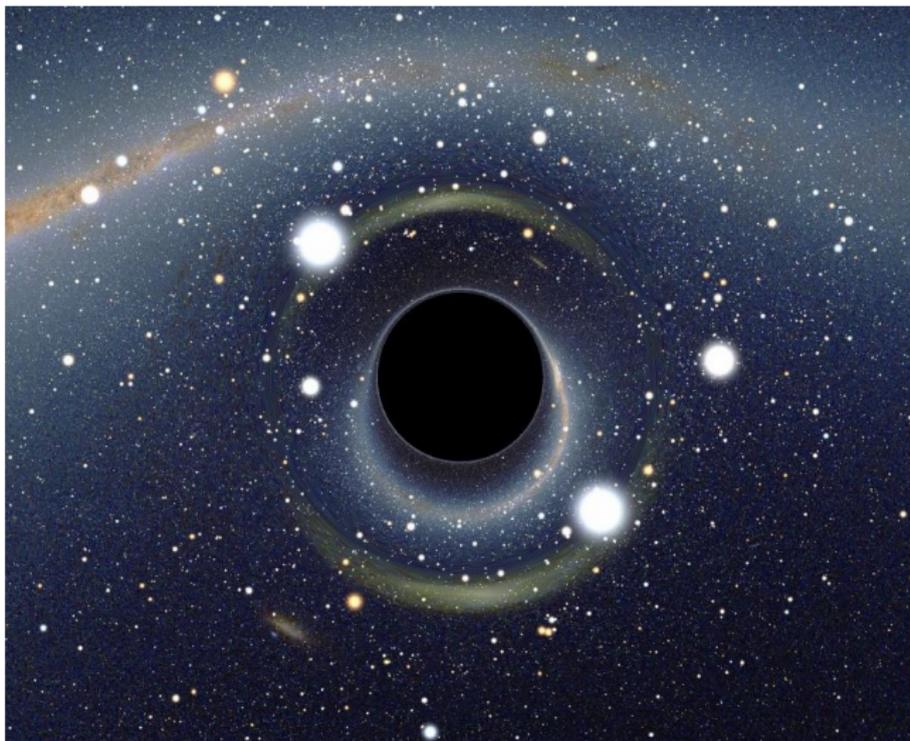
La matière qui tombe sur un trou noir forme un **disque d'accrétion** [Donald Lynden-Bell (1969), Nicolai Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]

Outline

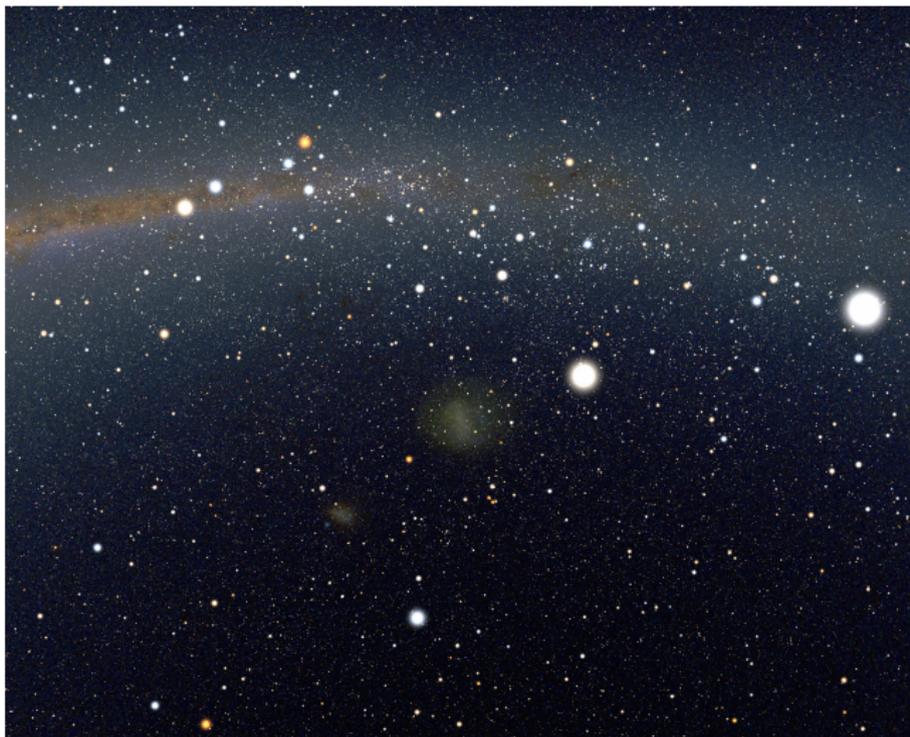
- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Observations actuelles
- 3 Une nouvelle ère observationnelle

Ce qu'on ne voit pas encore...



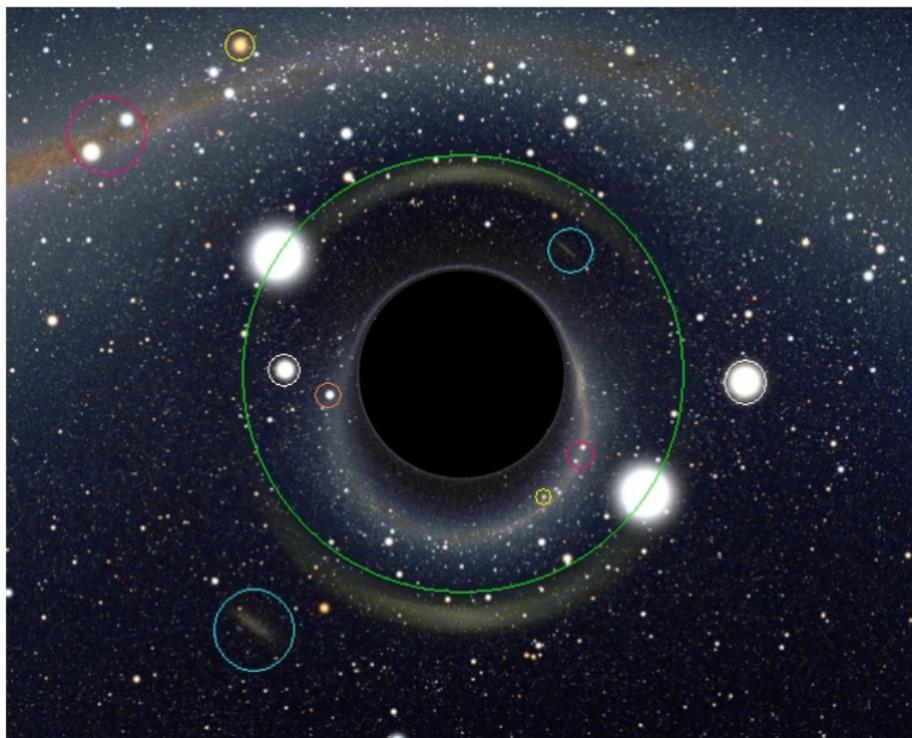
[Alain Riazuelo, 2007]

Ce qu'on ne voit pas encore...



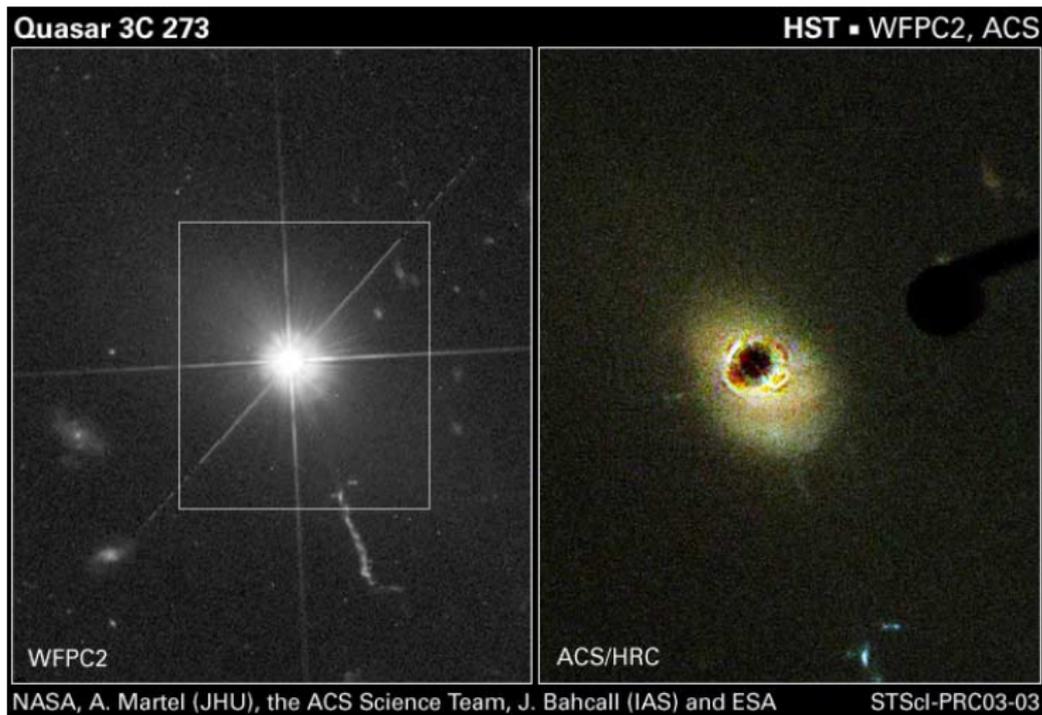
[Alain Riazuelo, 2007]

Ce qu'on ne voit pas encore...

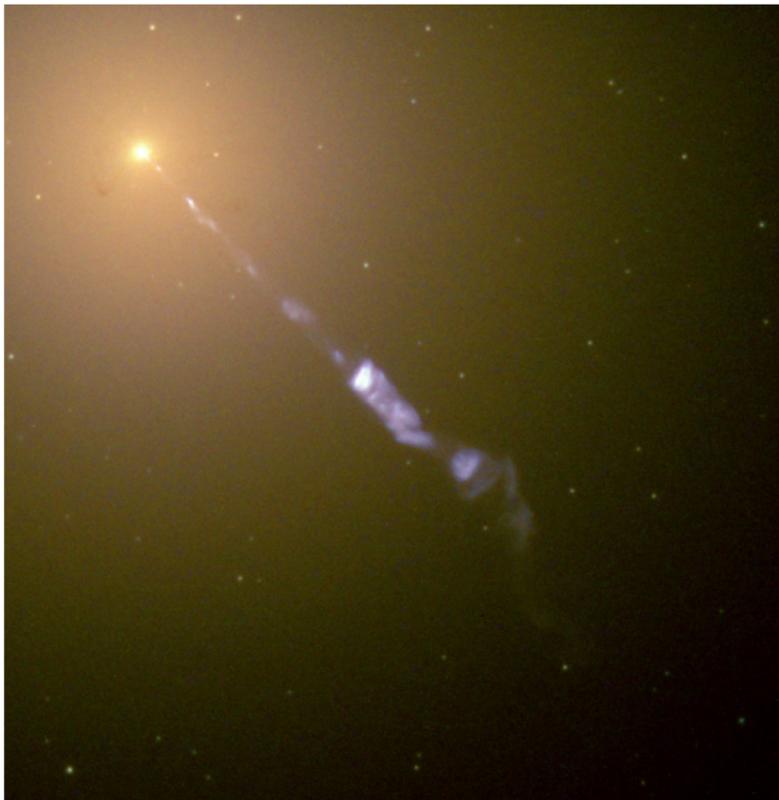


[Alain Riazuelo, 2007]

Les trous noirs au cœur des quasars



Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

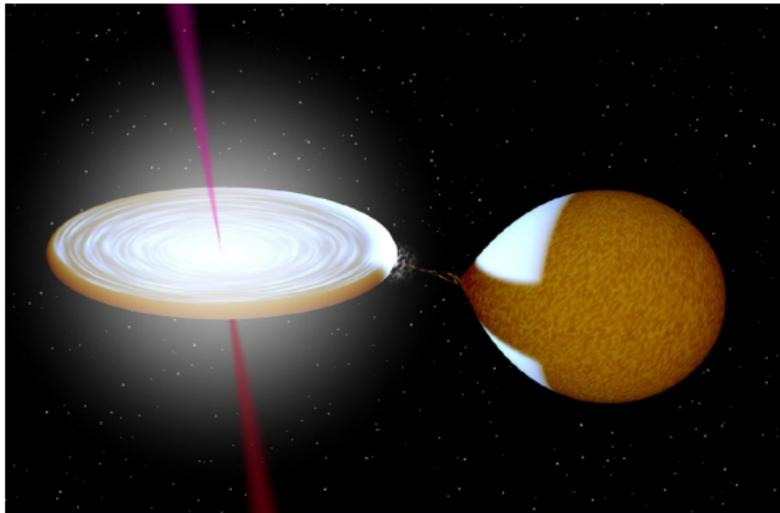


Jet émis par le noyau de la
galaxie elliptique géante M87, au
cœur de l'amas de la Vierge [HST]

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

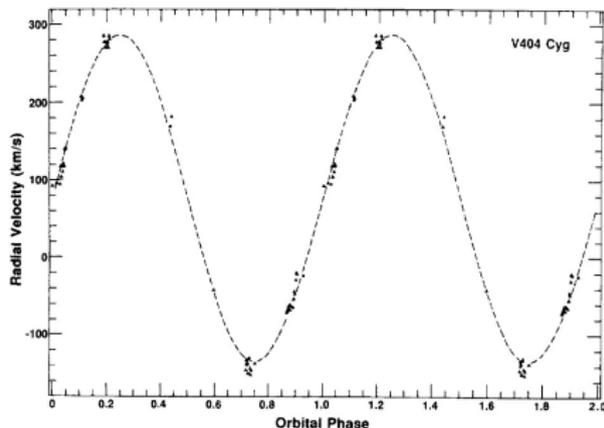
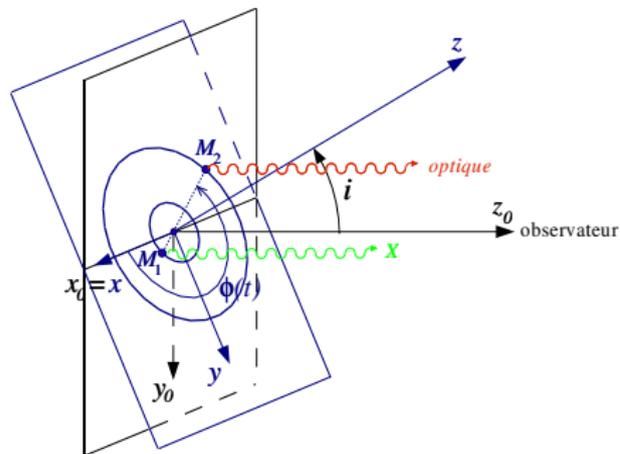
$$V_{\text{jet}} \simeq 0.99 c$$

Trous noirs dans les binaires X



Une vingtaine de trous noirs identifiés dans notre galaxie (la Voie Lactée)

Détection d'un trou noir dans une binaire X



$$V_{\text{rad}}(t) = K_2 \cos(2\pi t/P) + V_0 \Rightarrow K_2, P$$

Troisième loi de Kepler : $f := \frac{M_1^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{K_2^3 P}{2\pi G}$

f est une borne inférieure sur M_1 : $M_1 > f$

critère de masse : $M_1 > M_{\text{max}}(\text{étoile neut.}) \simeq 3 M_{\odot}$

Trous noirs dans les binaires X

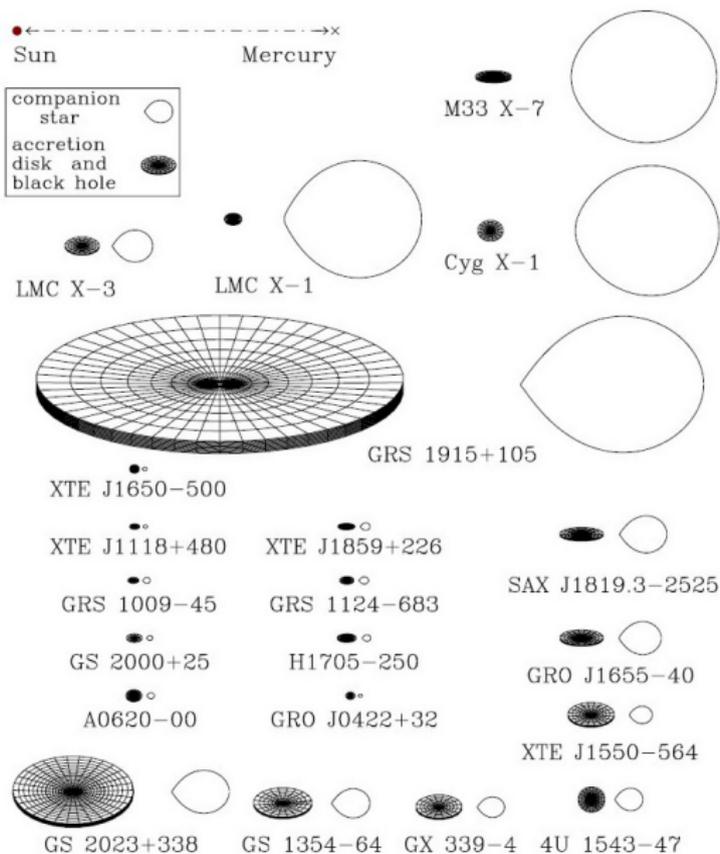
Le premier trou noir mis en évidence par le critère de masse est *Cygnus X-1* en 1972.

Depuis on a identifié une vingtaine

Sélection de 5 trous noirs dans des binaires X

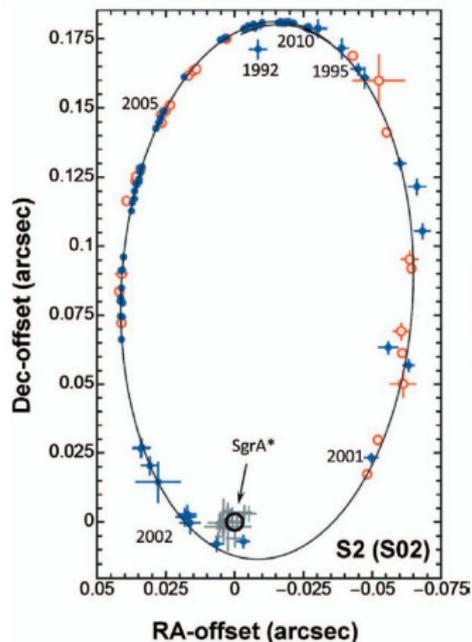
Nom	Masse [M_{\odot}]	Spin $a = cJ / (GM^2)$	Distance [1000 al]	Période orbitale [j]	Fonction de masse [M_{\odot}]	Masse du compagnon [M_{\odot}]
Cyg X-1 HDE 226868	$14,8 \pm 1,0$	$> 0,97$ (?)	$6,1 \pm 0,3$	5,6	0,24	$19,2 \pm 1,9$
A 0620-00	$6,6 \pm 0,25$	$0,12 \pm 0,18$ (?)	$3,4 \pm 0,4$	0,32	$2,76 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,03$
V 404 Cyg GS 2023+338	12 ± 2	?	7.8 ± 0.4	6,5	$6,08 \pm 0,06$	$0,70 \pm 0,05$
GRS 1915+105 V1487 Aql	$14,4 \pm 4,4$	$> 0,98$ (?)	32 ± 12	30,8	$9,5 \pm 3,0$	$1,2 \pm 0,2$
GRO J1655-40 XN Sco 94	$6,3 \pm 0,3$	$0,70 \pm 0,05$ (?)	10 ± 2	2,6	$2,73 \pm 0,09$	$2,50 \pm 0,15$

Trous noirs dans les binaires X



[McClintock et al. (2011)]

Le trou noir au cœur de notre galaxie



Orbite de l'étoile S2 autour du trou noir
Sgr A*

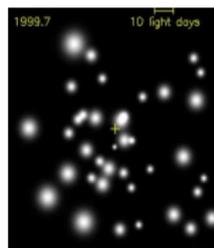
[Genzel et al. (2010)]

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



[ESO (2009)]

Détection via la dynamique stellaire



Trous noirs supermassifs

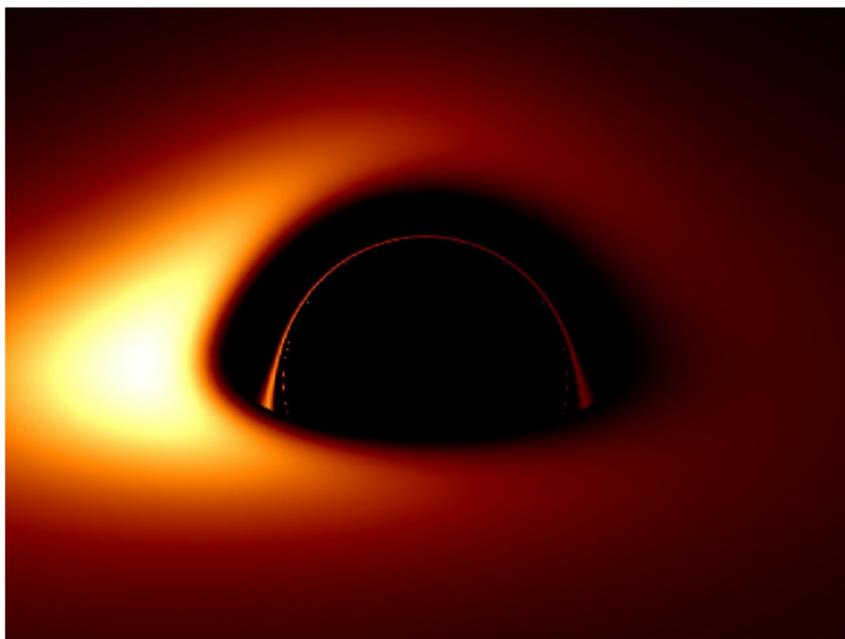
Sélection de 6 trous noirs supermassifs

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 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 Observations actuelles
- 3 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* : $D = 53 \mu\text{as}$

Viennent ensuite

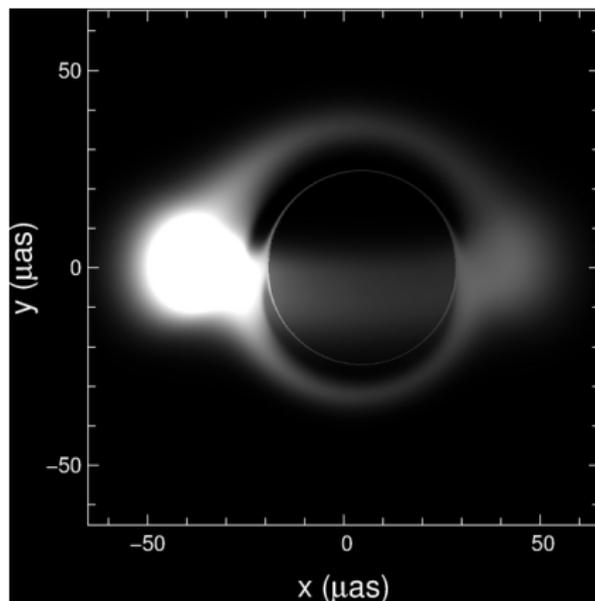
M87 : $D = 21 \mu\text{as}$

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

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

Rem. 2 : résolution angulaire du HST : $D_{\text{min}} \sim 10^5 \mu\text{as}!$

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* : $D = 53 \mu\text{as}$

Viennent ensuite

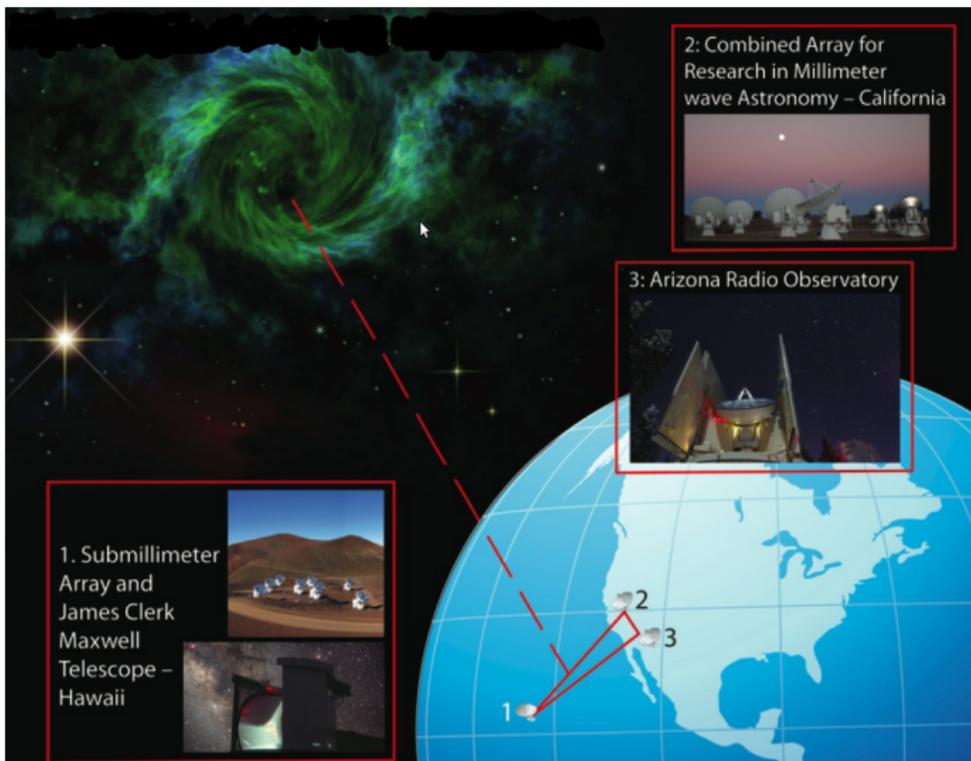
M87 : $D = 21 \mu\text{as}$

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

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

Rem. 2 : résolution angulaire
du HST : $D_{\min} \sim 10^5 \mu\text{as}!$

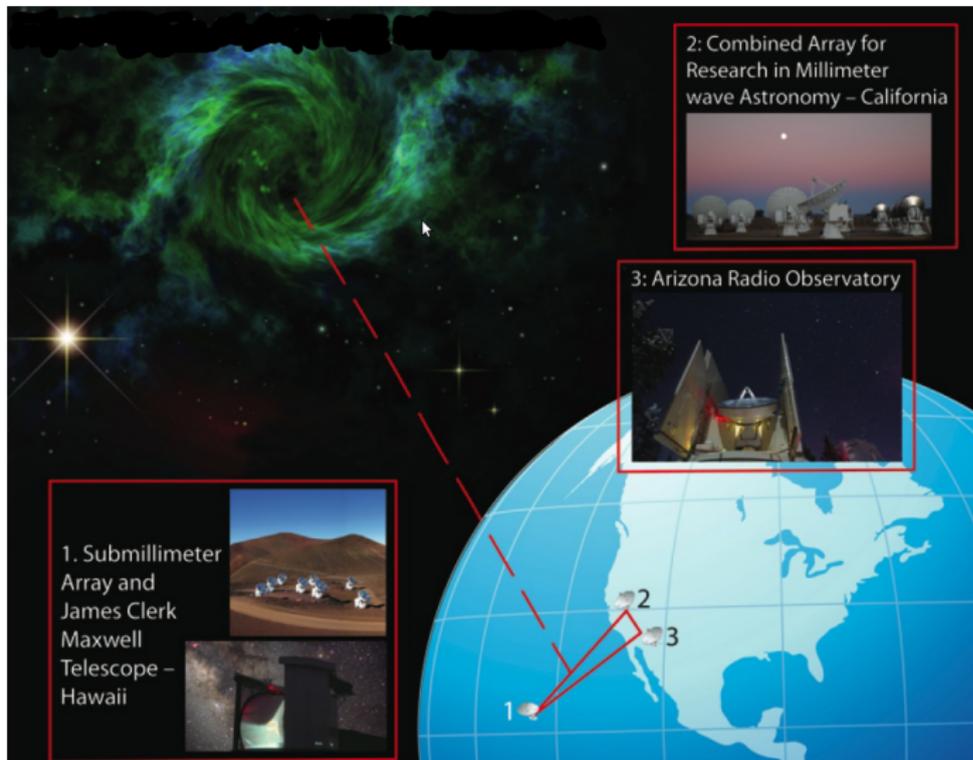
La solution : l'interférométrie !



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 $37 \mu\text{as}$.

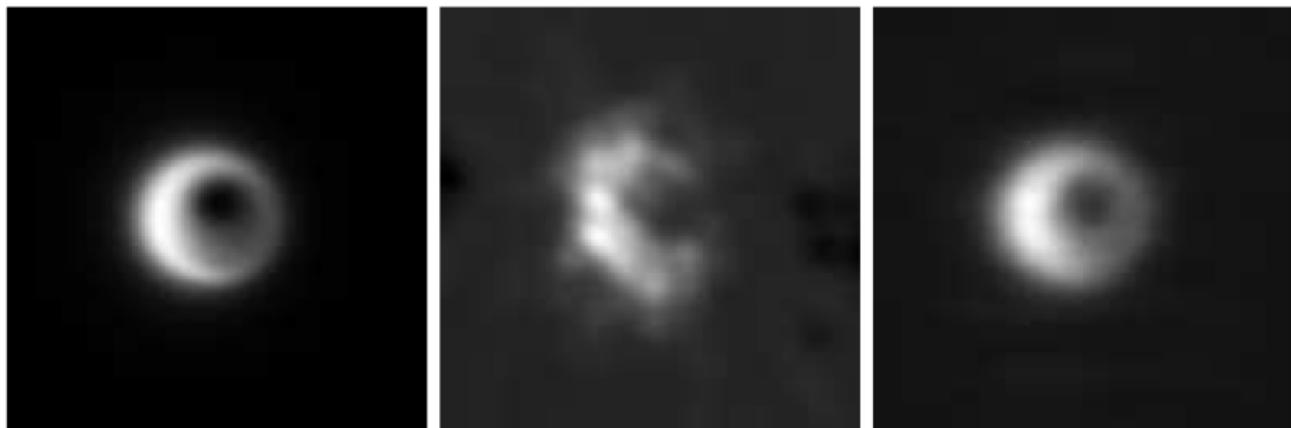
Réseau VLBI américain existant [Doeleman et al. 2011]

Le futur proche : l'Event Horizon Telescope



Atacama Large Millimeter Array (ALMA)
inauguré en mars 2013

Le futur proche : l'Event Horizon Telescope

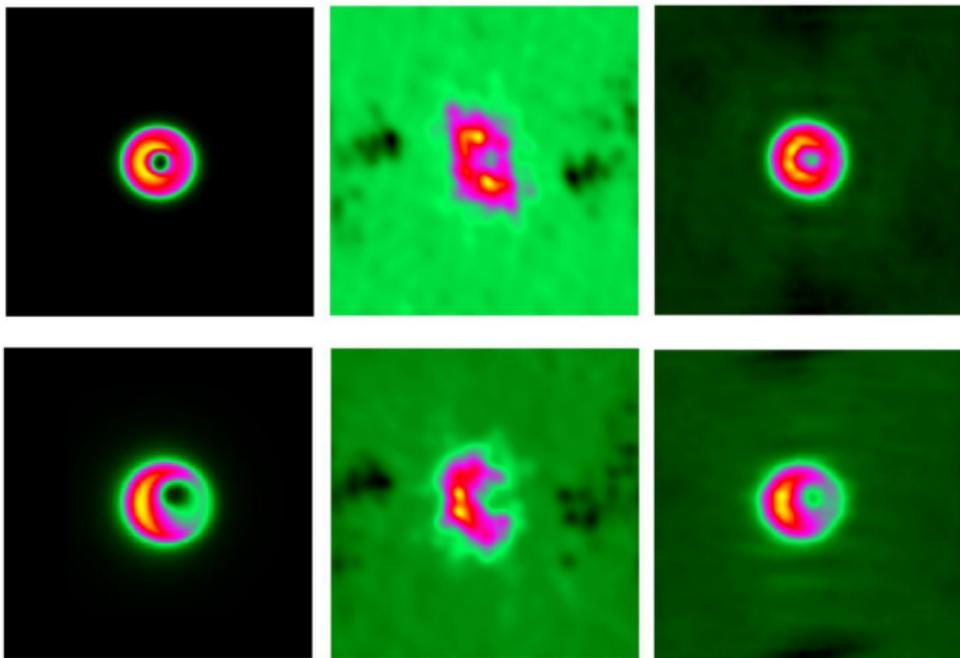


Simulations d'observations VLBI de Sgr A* à $\lambda = 0.8$ mm

gauche : image parfaite, *milieu* : 7 stations (~ 2015), *droite* : 13 stations (~ 2020)
 $a = 0$, $i = 30^\circ$

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

Le futur proche : l'Event Horizon Telescope



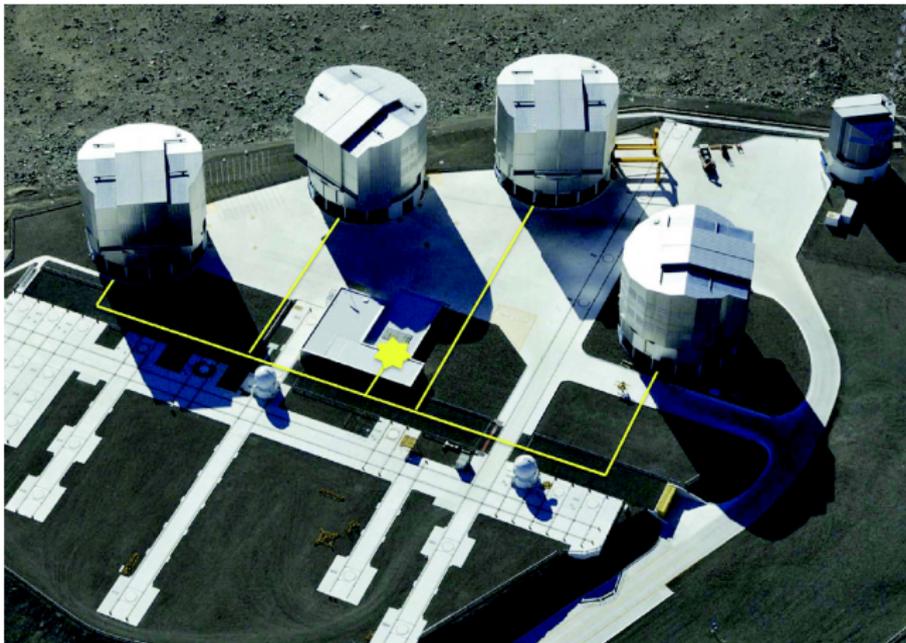
Simulations d'observations VLBI de Sgr A* à $\lambda = 0.8 \text{ mm}$

gauche : image parfaite, *milieu* : 7 stations (~ 2015), *droite* : 13 stations (~ 2020)

haut : $a = 0.5$, $i = 85^\circ$; *bas* : $a = 0$, $i = 60^\circ$

[Doeleman et al. (2009)]

Interférométrie optique (infra-rouge proche)



[Gillessen et al. 2010]

Projet GRAVITY au VLT (2014)

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)

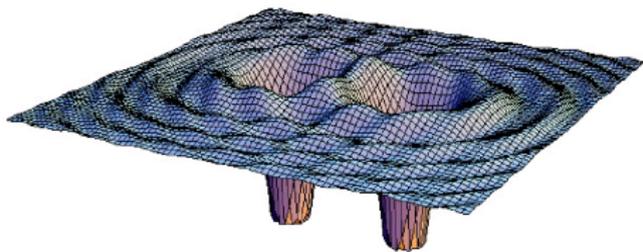
Mesure des effets relativistes :

- 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 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

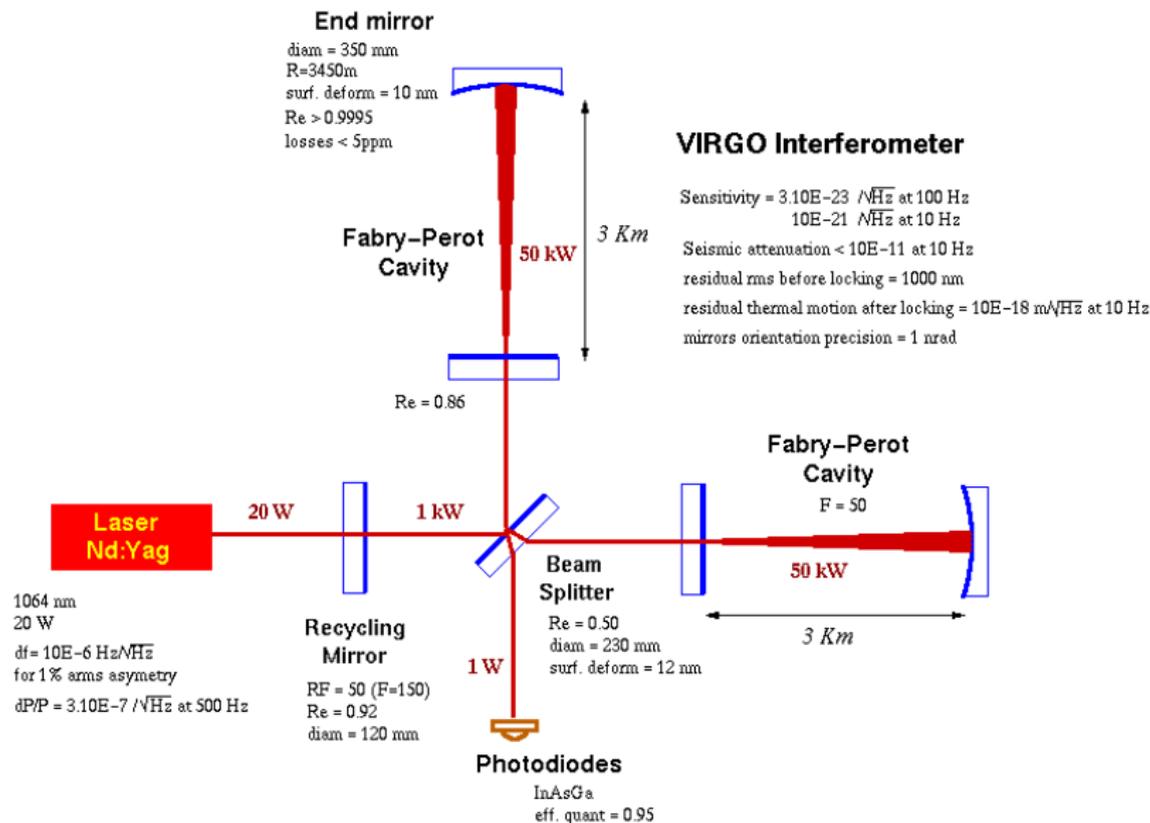
- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière
- NB : les **ondes électromagnétiques** (ondes radio, IR, optique, UV, X et gamma) sont des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent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

Schéma optique de l'interféromètre VIRGO



Interféromètres LIGO

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



Livingston (L1=4km)



Projet spatial eLISA (ESA)

Détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles dans l'espace

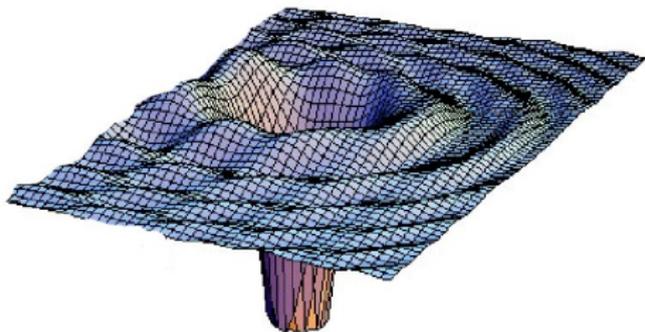


[eLISA / NGO]

- Sélection en 2013 ? (ESA mission L2)
- Lancement vers 2025 ?
- Démonstrateur technologique **LISA Pathfinder** lancé en 2016



Trous noirs et ondes gravitationnelles



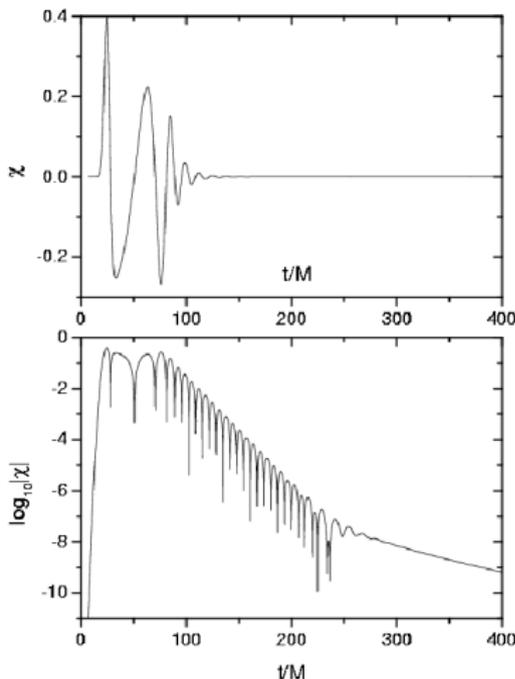
Lien intime entre les trous noirs et les ondes gravitationnelles :

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)

Oscillations des trous noirs



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

Trous noirs hors d'équilibre :

- trou noir nouvellement formé : *cœur de supernova, coalescence d'un système binaire d'objets compacts*
- trou noir excité par la *chute de matière* (étoile ou accréation de plasma (*microquasars*))

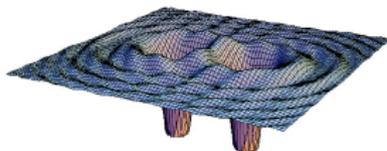
Désexcitation par émission d'ondes gravitationnelles sous forme de **modes quasi-normaux**.

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

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

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

Coalescence d'un système binaire de trous noirs



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

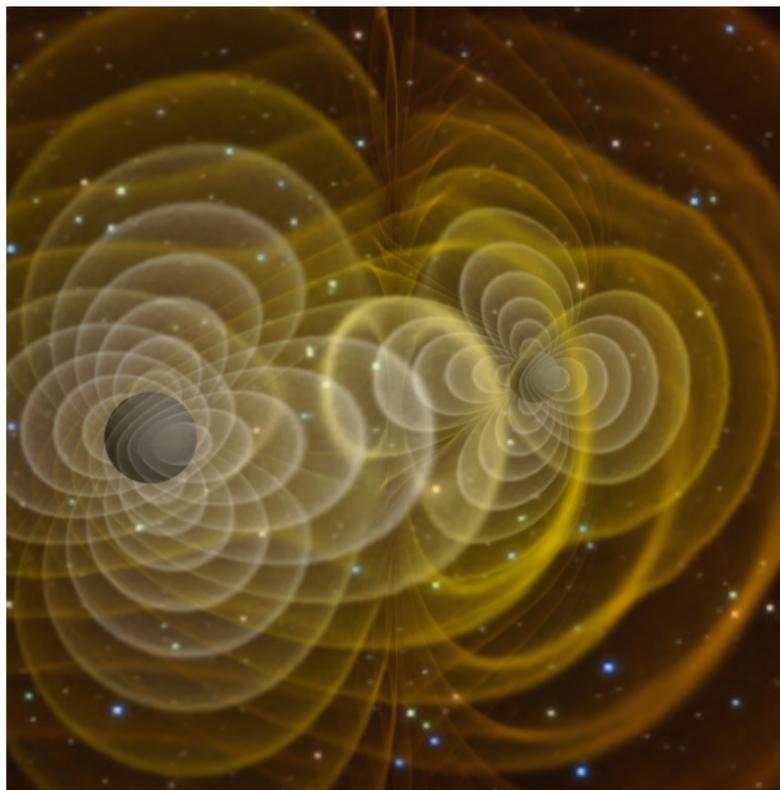
Intérêt théorique :

- 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

Preuve définitive de l'existence des trous noirs

Chute en spirale d'un trou noir stellaire $m = 5 M_{\odot}$ dans un trou noir supermassif en rotation rapide $M = 10^6 M_{\odot}$:

- Temps écoulé entre le rayon orbital $r = 8M$ et la dernière orbite stable : ~ 1 an
- Nombre de cycles dans l'onde gravitationnelle : 10^5
- Bande de fréquences balayée par le signal gravitationnel : $3 \text{ mHz} \leq f \leq 30 \text{ mHz}$
- Distance maximale de détectabilité par **LISA** (rapport signal sur bruit > 10) : ~ 1 Gpc

Preuve définitive de l'existence des trous noirs

Chute en spirale d'un trou noir stellaire $m = 5 M_{\odot}$ dans un trou noir supermassif en rotation rapide $M = 10^6 M_{\odot}$:

- Temps écoulé entre le rayon orbital $r = 8M$ et la dernière orbite stable : ~ 1 an
- Nombre de cycles dans l'onde gravitationnelle : 10^5
- Bande de fréquences balayée par le signal gravitationnel : $3 \text{ mHz} \leq f \leq 30 \text{ mHz}$
- Distance maximale de détectabilité par **LISA** (rapport signal sur bruit > 10) : ~ 1 Gpc

Mesure d'un grand nombre de cycles \Rightarrow cartographie détaillée de l'espace-temps autour de l'objet central

Comparaison avec l'espace-temps d'un trou noir en rotation (Kerr) \Rightarrow preuve irréfutable de l'existence de trous noirs dans notre univers

Taux de détection attendu pour LISA : 1 à 10 par an jusqu'à 1 Gpc.

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