

Les trous noirs

Des premières prédictions aux observations contemporaines

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/>

Les mystères de l'Univers

Jardins du Trocadéro, Paris

23 octobre 2009

- 1 Les prédictions théoriques
- 2 Les trous noirs comme objets astrophysiques
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles

Outline

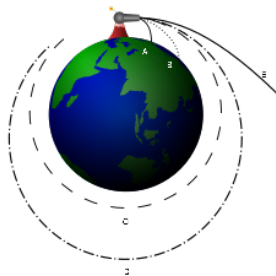
- 1 Les prédictions théoriques
- 2 Les trous noirs comme objets astrophysiques
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles

La préhistoire des trous noirs...

Dans la théorie de Newton de la gravitation :
vitesse de libération d'un corps de masse M et

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

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



La préhistoire des trous noirs...

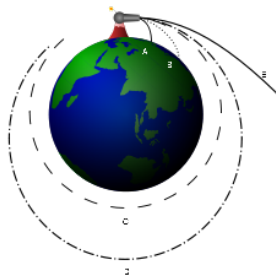
Dans la théorie de Newton de la gravitation :
vitesse de libération d'un corps de masse M et

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

- 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

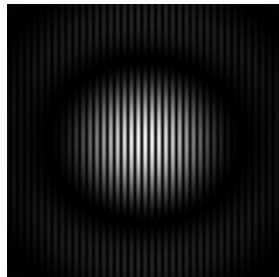
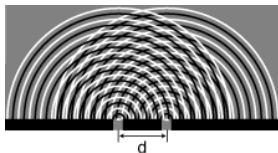
Pierre Simon de Laplace (1796)

“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 $V_{\text{lib}} > c$
- 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)

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.

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.

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

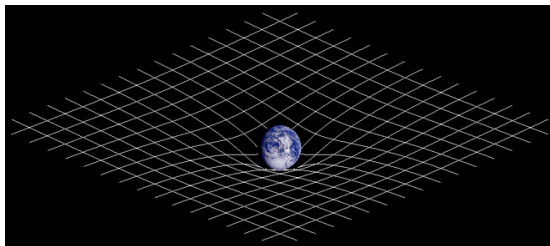
⇒ 1 seul nombre t (*date*) pour localiser un événement dans le temps.

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

Concept dû à Hermann Minkowski (1908) (prémices chez Henri Poincaré (1906)).

La relativité générale (Einstein 1915)

Théorie qui décrit la gravitation comme une **courbure de l'espace-temps**



- la gravitation a un effet sur l'écoulement du temps (\rightarrow GPS)
- la gravitation dévie les rayons lumineux

Les déviations par rapport à la théorie de Newton se mesurent par

le **paramètre de compacité** $C = \left(\frac{V_{\text{lib}}}{c} \right)^2$

<i>corps</i>	proton	Terre	Soleil	naine blanche	ét. neutrons	trou noir
C	10^{-39}	10^{-10}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-1}	1

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Albert Einstein (1915)** : théorie de la relativité générale

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Albert Einstein (1915)** : théorie de la relativité générale
- **Karl Schwarzschild (1916)** : première solution exacte de l'équation d'Einstein : statique et à symétrie sphérique ; singularité en $r = 0$ et $r = R_s := 2GM/c^2$

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Albert Einstein (1915)** : théorie de la relativité générale
- **Karl Schwarzschild (1916)** : première solution exacte de l'équation d'Einstein : statique et à symétrie sphérique ; singularité en $r = 0$ et $r = R_s := 2GM/c^2$
- **Johannes Droste (1916)** : orbite circulaire des photons pour $r = 3R_s/2$

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Albert Einstein (1915)** : théorie de la relativité générale
- **Karl Schwarzschild (1916)** : première solution exacte de l'équation d'Einstein : statique et à symétrie sphérique ; singularité en $r = 0$ et $r = R_s := 2GM/c^2$
- **Johannes Droste (1916)** : orbite circulaire des photons pour $r = 3R_s/2$
- **Arthur Eddington, A. Anderson (1920)** : la lumière ne peut s'échapper d'un corps qui aurait $R < R_s$

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Albert Einstein (1915)** : théorie de la relativité générale
- **Karl Schwarzschild (1916)** : première solution exacte de l'équation d'Einstein : statique et à symétrie sphérique ; singularité en $r = 0$ et $r = R_s := 2GM/c^2$
- **Johannes Droste (1916)** : orbite circulaire des photons pour $r = 3R_s/2$
- **Arthur Eddington, A. Anderson (1920)** : la lumière ne peut s'échapper d'un corps qui aurait $R < R_s$
- **George Birkhoff (1923)** : à l'extérieur de tout corps à symétrie sphérique, la métrique est nécessairement celle de Schwarzschild

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Albert Einstein (1915)** : théorie de la relativité générale
- **Karl Schwarzschild (1916)** : première solution exacte de l'équation d'Einstein : statique et à symétrie sphérique ; singularité en $r = 0$ et $r = R_s := 2GM/c^2$
- **Johannes Droste (1916)** : orbite circulaire des photons pour $r = 3R_s/2$
- **Arthur Eddington, A. Anderson (1920)** : la lumière ne peut s'échapper d'un corps qui aurait $R < R_s$
- **George Birkhoff (1923)** : à l'extérieur de tout corps à symétrie sphérique, la métrique est nécessairement celle de Schwarzschild
- **Georges Lemaître (1932)** : montre que la singularité en $r = R_s$ est factice (*singularité de coordonnées*)

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Albert Einstein (1915)** : théorie de la relativité générale
- **Karl Schwarzschild (1916)** : première solution exacte de l'équation d'Einstein : statique et à symétrie sphérique ; singularité en $r = 0$ et $r = R_s := 2GM/c^2$
- **Johannes Droste (1916)** : orbite circulaire des photons pour $r = 3R_s/2$
- **Arthur Eddington, A. Anderson (1920)** : la lumière ne peut s'échapper d'un corps qui aurait $R < R_s$
- **George Birkhoff (1923)** : à l'extérieur de tout corps à symétrie sphérique, la métrique est nécessairement celle de Schwarzschild
- **Georges Lemaître (1932)** : montre que la singularité en $r = R_s$ est factice (*singularité de coordonnées*)
- **Albert Einstein (1939)** : article (faux) pour montrer qu'aucun corps ne peut avoir $R < R_s$

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Albert Einstein (1915)** : théorie de la relativité générale
- **Karl Schwarzschild (1916)** : première solution exacte de l'équation d'Einstein : statique et à symétrie sphérique ; singularité en $r = 0$ et $r = R_s := 2GM/c^2$
- **Johannes Droste (1916)** : orbite circulaire des photons pour $r = 3R_s/2$
- **Arthur Eddington, A. Anderson (1920)** : la lumière ne peut s'échapper d'un corps qui aurait $R < R_s$
- **George Birkhoff (1923)** : à l'extérieur de tout corps à symétrie sphérique, la métrique est nécessairement celle de Schwarzschild
- **Georges Lemaître (1932)** : montre que la singularité en $r = R_s$ est factice (*singularité de coordonnées*)
- **Albert Einstein (1939)** : article (faux) pour montrer qu'aucun corps ne peut avoir $R < R_s$
- **Robert Oppenheimer & Hartland Snyder (1939)** : effondrement gravitationnel en relativité générale : pour un observateur extérieur $R \rightarrow R_s$ lorsque $t \rightarrow +\infty$ (\Rightarrow "liste d'or" de Lev D. Landau)

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Martin Kruskal, John A. Wheeler (1960)** : vision mathématique complète de l'espace-temps de Schwarzschild

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Martin Kruskal, John A. Wheeler (1960)** : vision mathématique complète de l'espace-temps de Schwarzschild
- **Roy Kerr (1963)** : solution exacte de l'équation d'Einstein généralisant la solution de Schwarzschild (rotation)

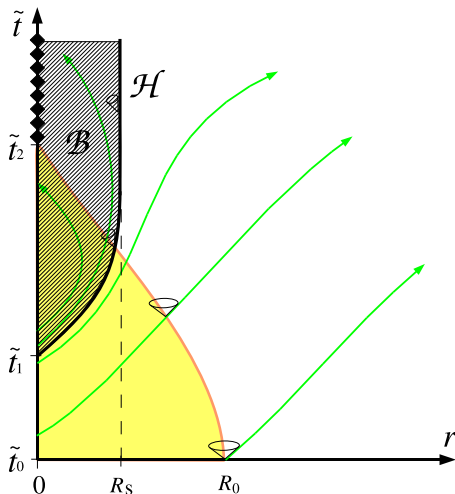
Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Martin Kruskal, John A. Wheeler (1960)** : vision mathématique complète de l'espace-temps de Schwarzschild
- **Roy Kerr (1963)** : solution exacte de l'équation d'Einstein généralisant la solution de Schwarzschild (rotation)
- **Edwin Salpeter, Yakov Zeldovitch (1964)** : les quasars (découverts en 1963) tirent leur énergie de trous noirs supermassifs

Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **Martin Kruskal, John A. Wheeler (1960)** : vision mathématique complète de l'espace-temps de Schwarzschild
- **Roy Kerr (1963)** : solution exacte de l'équation d'Einstein généralisant la solution de Schwarzschild (rotation)
- **Edwin Salpeter, Yakov Zeldovitch (1964)** : les quasars (découverts en 1963) tirent leur énergie de trous noirs supermassifs
- **John A. Wheeler (1967)** : invente le terme **trou noir**

Le trou noir en relativité générale



Un **trou noir** est une région \mathcal{B} de l'espace-temps depuis laquelle aucun photon ne peut atteindre l'infini.

\implies les événements se produisant dans \mathcal{B} n'ont *aucune influence causale* sur le reste de l'espace-temps.

La frontière (immatérielle) \mathcal{H} entre le trou noir et le reste de l'univers est appelée **horizon des événements**. Il s'agit d'une partie tridimensionnelle de l'espace-temps (*hypersurface*). De plus, \mathcal{H} est du genre lumière.

\leftarrow diagramme d'espace-temps montrant la formation d'un trou noir par **effondrement gravitationnel** d'une étoile

Principales propriétés des trous noirs (1/2)

- Le trou noir contient une région où la courbure de l'espace-temps diverge : la **singularité** (*NB : ce n'est pas la définition première d'un trou noir*)

Principales propriétés des trous noirs (1/2)

- Le trou noir contient une région où la courbure de l'espace-temps diverge : la **singularité** (*NB : ce n'est pas la définition première d'un trou noir*)
- L'horizon des événements \mathcal{H} est une **structure globale** de l'espace-temps : aucune expérience de physique locale peut révéler le passage par \mathcal{H} ; un voyageur imprudent ne peut déceler l'instant où il franchit l'horizon

Principales propriétés des trous noirs (1/2)

- Le trou noir contient une région où la courbure de l'espace-temps diverge : la **singularité** (*NB : ce n'est pas la définition première d'un trou noir*)
- L'horizon des événements \mathcal{H} est une **structure globale** de l'espace-temps : aucune expérience de physique locale peut révéler le passage par \mathcal{H} ; un voyageur imprudent ne peut déceler l'instant où il franchit l'horizon
- Vue par un observateur distant, l'approche de l'horizon se traduit par un **décalage spectral vers le rouge infini**, ou de manière équivalente, par une **dilatation des temps infinie**

Principales propriétés des trous noirs (2/2)

Théorème d'unicité

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

un trou noir en équilibre est nécessairement un **trou noir de Kerr-Newmann**, qui est une **solution du vide** de l'équation d'Einstein décrite par seulement trois paramètres :

- masse totale M
- moment cinétique total J
- charge électrique totale Q

⇒ *“un trou noir n'a pas de cheveux”* (John A. Wheeler)

- $Q = 0$ et $J = 0$: **solution de Schwarzschild** (1916)
- $Q = 0$: **solution de Kerr** (1963)

Définitions de M , J et Q

- **masse M** : orbite d'un corps d'épreuve autour du trou noir :
suffisamment loin du trou noir, l'approximation de gravitation newtonienne est valable et l'on peut définir M comme le coefficient qui intervient dans la

troisième loi de Kepler :

$$r^3 = GM \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

r = rayon de l'orbite (circulaire), $r \gg GM/c^2 = 1.5 \left(\frac{M}{M_\odot} \right)$ km

T = période orbitale

Définitions de M , J et Q

- **masse M** : orbite d'un corps d'épreuve autour du trou noir :
suffisamment loin du trou noir, l'approximation de gravitation newtonienne est valable et l'on peut définir M comme le coefficient qui intervient dans la

troisième loi de Kepler :

$$r^3 = GM \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

r = rayon de l'orbite (circulaire), $r \gg GM/c^2 = 1.5 \left(\frac{M}{M_\odot} \right)$ km

T = période orbitale

- **moment cinétique J** : effet "gravito-magnétique" (Lense-Thirring) :
un gyroscope embarqué dans un satellite en orbite (rayon r) autour du trou noir précesse (par rapport aux étoiles lointaines) à la fréquence

$$\Omega_{\text{LT}} = \frac{2GJ}{c^2 r^3}$$

Définitions de M , J et Q

- **masse M** : orbite d'un corps d'épreuve autour du trou noir :
suffisamment loin du trou noir, l'approximation de gravitation newtonienne est valable et l'on peut définir M comme le coefficient qui intervient dans la

troisième loi de Kepler :

$$r^3 = GM \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

r = rayon de l'orbite (circulaire), $r \gg GM/c^2 = 1.5 \left(\frac{M}{M_\odot} \right)$ km

T = période orbitale

- **moment cinétique J** : effet "gravito-magnétique" (Lense-Thirring) :
un gyroscope embarqué dans un satellite en orbite (rayon r) autour du trou noir précesse (par rapport aux étoiles lointaines) à la fréquence

$$\Omega_{\text{LT}} = \frac{2GJ}{c^2 r^3}$$

- **charge électrique Q** : théorème de Gauss :

le champ électrique mesuré loin du trou noir est

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r$$

Définitions de M , J et Q

- **masse M** : orbite d'un corps d'épreuve autour du trou noir :
suffisamment loin du trou noir, l'approximation de gravitation newtonienne est valable et l'on peut définir M comme le coefficient qui intervient dans la

troisième loi de Kepler :

$$r^3 = GM \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

r = rayon de l'orbite (circulaire), $r \gg GM/c^2 = 1.5 \left(\frac{M}{M_\odot} \right)$ km

T = période orbitale

- **moment cinétique J** : effet "gravito-magnétique" (Lense-Thirring) :
un gyroscope embarqué dans un satellite en orbite (rayon r) autour du trou noir précesse (par rapport aux étoiles lointaines) à la fréquence

$$\Omega_{\text{LT}} = \frac{2GJ}{c^2 r^3}$$

- **charge électrique Q** : théorème de Gauss :

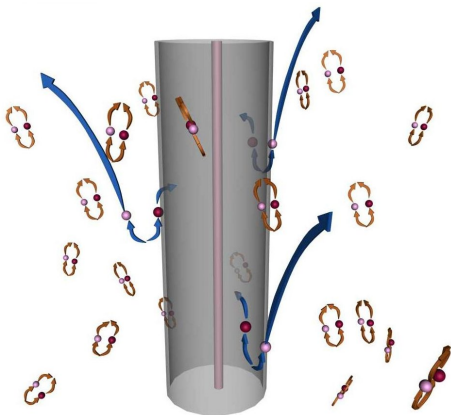
le champ électrique mesuré loin du trou noir est

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r$$

Dans tout ce qui suit, $Q = 0$.

Rayonnement de Hawking

Zeldovitch 1971, Hawking 1974, 1975



[<http://library.thinkquest.org/>]

Étude des **fluctuations du vide** au voisinage d'un trou noir (théorie quantique des champs en espace courbe^{a)} :

création de paires de particules virtuelles près de l'horizon

⇒ le trou noir rayonne comme un **corps noir** à une température proportionnelle à

la gravité de surface : $T = \frac{\hbar}{2\pi k} \kappa$

t.n. de Schwarzschild : $\kappa = c^3/4GM \Rightarrow$

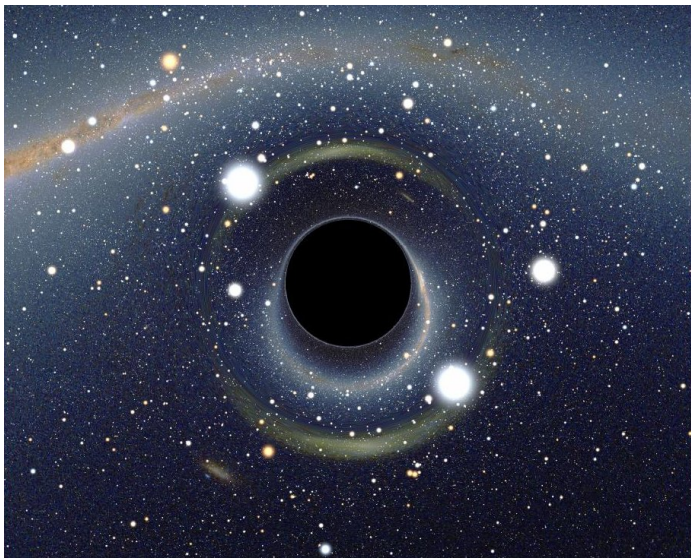
$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi Gk} \frac{1}{M} = 6.1 \cdot 10^{-8} \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right) \text{ K}$$

^{a)}le champ gravitationnel n'est pas quantifié : il s'agit donc d'une approche semi-classique

Outline

- 1 Les prédictions théoriques
- 2 Les trous noirs comme objets astrophysiques**
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles

Ce qu'on ne voit pas encore...

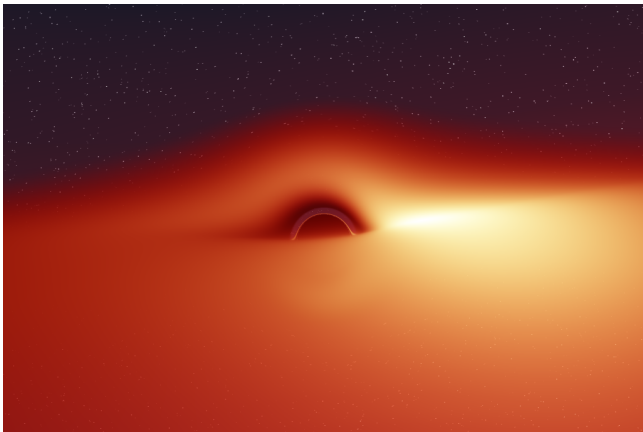


[Alain Riazuelo, 2007]

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 !

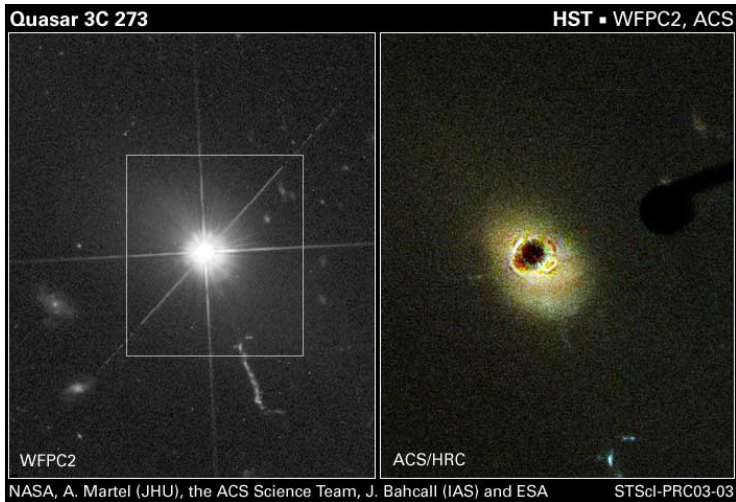
NB : les réactions thermonucléaires libèrent moins de 1% de mc^2



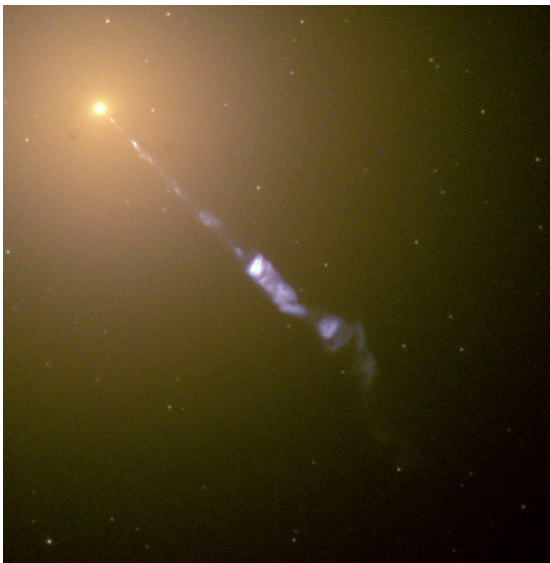
La matière qui tombe sur un trou noir forme un **disque d'accrétion** [Donald Lynden-Bell (1969), Nicolai Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]

Les trous noirs au cœur des quasars



Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

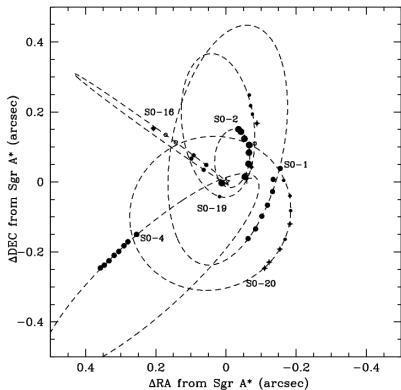


Jet émis par le noyau de la galaxie elliptique géante M87, au cœur de l'amas de la Vierge

[HST]

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

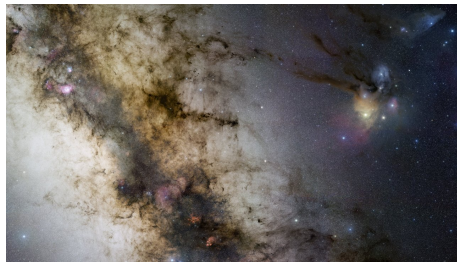
Le trou noir au cœur de notre galaxie



Orbites d'étoiles autour du trou noir
Sgr A* au centre de notre galaxie

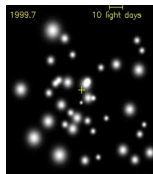
[Ghez (2004)]

$$M_{\text{t.n.}} = 3.6 \times 10^6 M_{\odot}$$

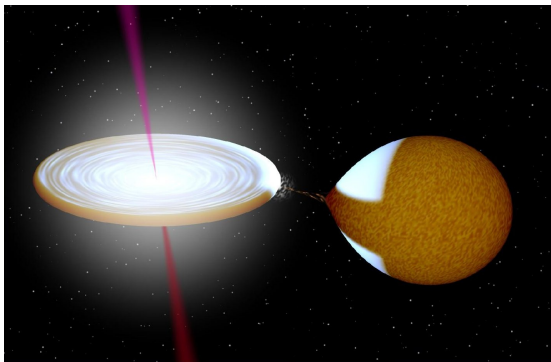


[ESO (2009)]

Détection via la dynamique stellaire

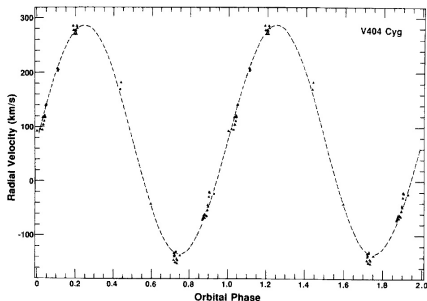
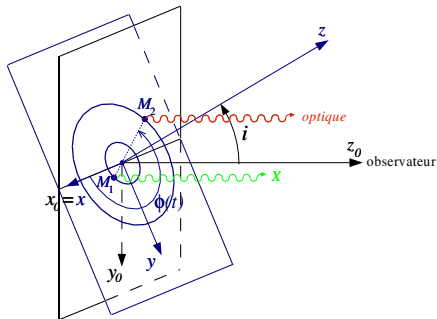


Trous noirs dans les binaires X



une vingtaine de trous noirs
identifiés dans notre galaxie

Détection d'un trou noir dans une binaires X



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

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

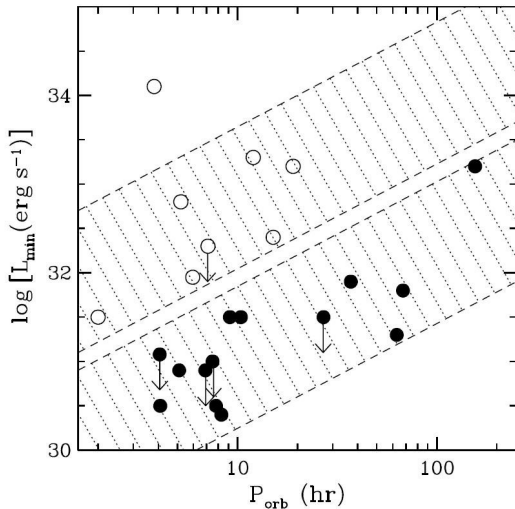
f est une borne inférieure sur M_1 : $M_1 > f$

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

Trous noirs dans les binaires X

source X	autre nom	année découverte	période orbitale	M_2 [M_\odot]	M_1 [M_\odot]
Cyg X-1		1972	5.6 j	33	7 – 20
LMC X-3		1983	1.7 j	6	7 – 14
LMC X-1		1987	4.2 j	6	4 – 10
A 0620-00	XN Mon 75	1986	7.8 h	0.6	10 ± 5
GS 2023+338	V404 Cyg	1992	6.5 j	0.6	12 ± 2
GRS 1124-683	XN Mus 91	1992	10.4 h	0.8	6_{-2}^{+5}
GRO J1655-40	XN Sco 94	1995	2.6 j	1.7 – 3.3	5.5 – 7.9
GS 2000+250	XN Vul 88	1995	8.3 h	0.5	10 ± 0.4
GRO J0422+32	XN Per 92	1995	5.1 h	0.3	10 ± 5
H 1705-250	XN Oph 77	1996	12.5 h	0.3	6 ± 2
4U 1543-47	IL Lup	1998	27.0 h	2.5	5.0 ± 2.5
GRS 1009-45	XN Vel 93	1999	6.8 h		6 – 8
XTE J1859+226	V406 Vul	2001	9.2 h		10 ± 3
XTE J1550-564	V381 Nor	2001	37.0 h		> 7.4
SAX J1819.3-2525	V4641 Sgr	2001	2.8 j		10 ± 1.5
XTE J1118+480	KV UMa	2001	4.1 h	0.09 – 0.5	6.0 – 7.7
GRS 1915+105	V1487 Aql	2001	33.5 j	1.2 ± 0.2	14 ± 4
GX 339-4	V821 Ara	2003	42.1 h		

Mieux que le critère de masse : détecter l'horizon !



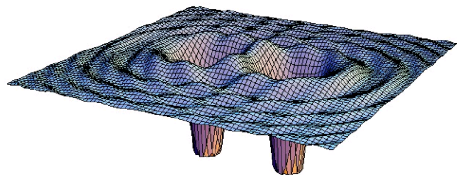
Luminosité dans la période de quiescence des binaires X :
 les systèmes avec trou noir (●)
 sont ~ 100 fois moins lumineux
 que ceux avec étoile à neutrons
 (○)

[Narayan & McClintock, *New Astron. Rev.* **51**, 733 (2008)]

Outline

- 1 Les prédictions théoriques
- 2 Les trous noirs comme objets astrophysiques
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles

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

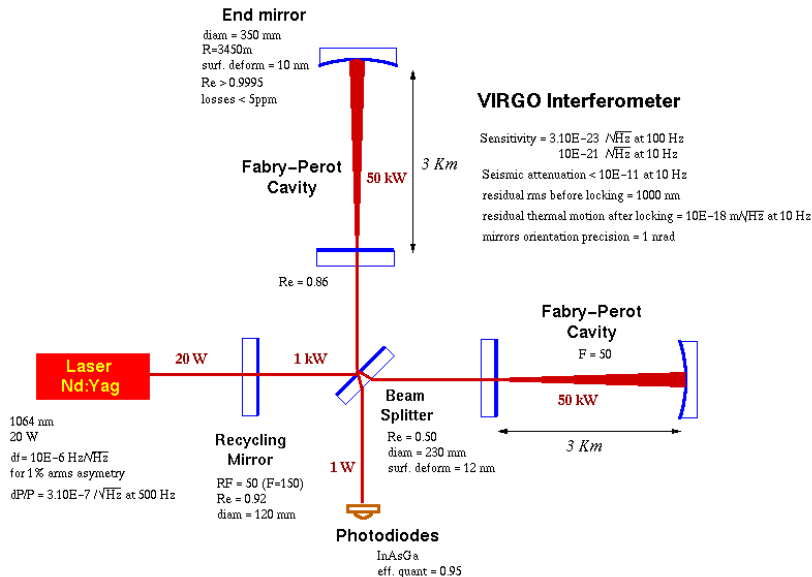
- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière
- NB : les **ondes électromagnétiques** (ondes radio, IR, optique, UV, X et gamma) sont des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent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

Détection sur Terre des ondes gravitationnelles



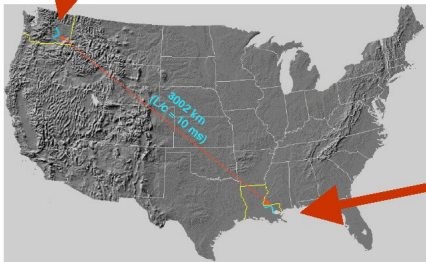
Détecteur interférométrique **VIRGO** sur le site de Cascina, près de Pise [CNRS/INFN]

Schéma optique de l'interféromètre VIRGO



Interféromètres LIGO

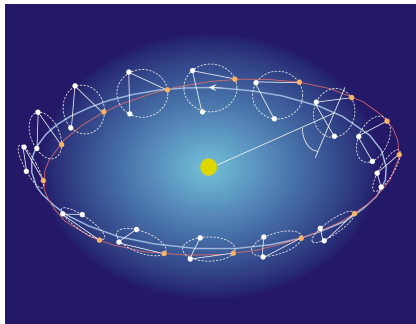
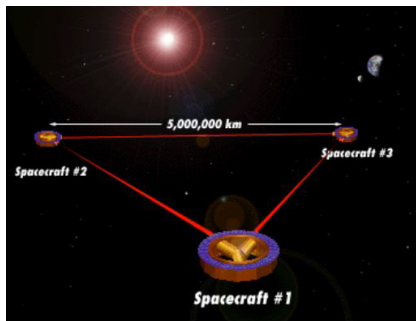
Hanford (H1=4km, H2=2km)



Livingston (L1=4km)



Projet spatial LISA (ESA/NASA)

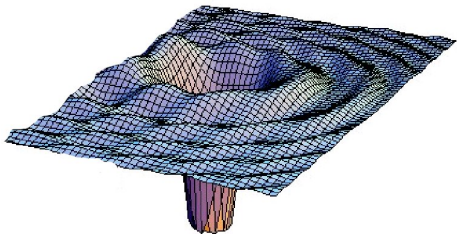


Bande de fréquences : 0,1 mHz \rightarrow 0,1 Hz

Mission LISA Pathfinder : 2011

Lancement LISA \sim 2020

Trous noirs et ondes gravitationnelles



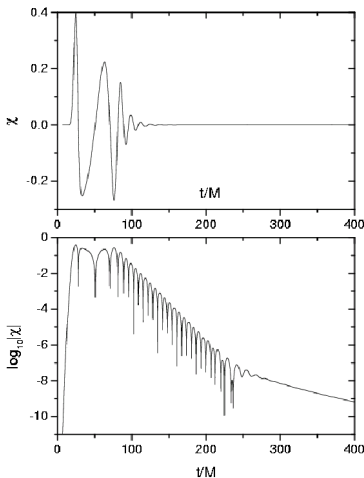
Lien intime entre les trous noirs et les ondes gravitationnelles :

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*))

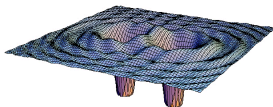
Désexcitation par émission d'ondes gravitationnelles sous forme de **modes quasi-normaux**.

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

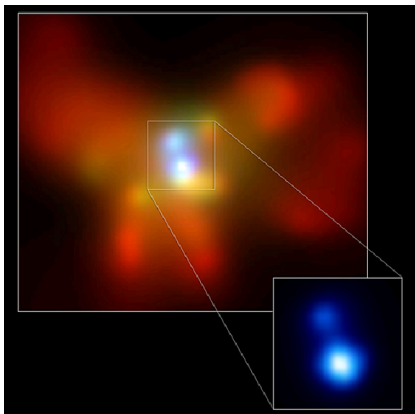
Intérêt théorique :

- 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

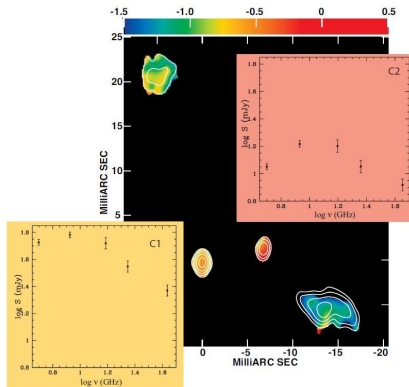
Systèmes binaires de trous noirs dans l'Univers



Binary BH in galaxy NGC 6240

 $d = 1.4 \text{ kpc}$

[Komossa et al., ApJ 582, L15 (2003)]

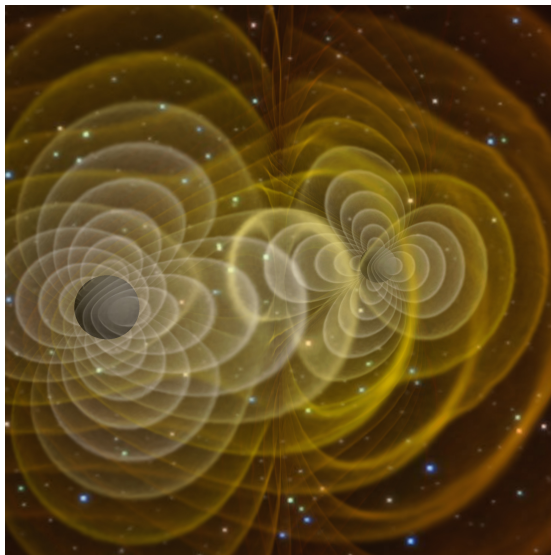


Binary BH in radio galaxy 0402+379

 $d = 7.3 \text{ pc}$

[Rodriguez et al., ApJ 646, 49 (2006)]

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
- K.S. Thorne, 1997, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion
- J.-P. Luminet, 1992, *Les trous noirs*, Seuil
- G. Chardin, 2009, *Le LHC peut-il produire des trous noirs ?*, Le Pommier
- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- J. Paul, 1998, *L'homme qui courait après son étoile*, Odile Jacob