

Les ondes gravitationnelles et les trous noirs: voir l'invisible

Eric Gourgoulhon

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

eric.gourgoulhon@obspm.fr

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

L'Univers invisible
UNESCO, Paris
8 juillet 2009

- 1 Le trou noir : un objet né de la théorie
- 2 Le trou noir : un objet astrophysique (désormais) ordinaire
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles
- 4 Bibliographie

Outline

- 1 Le trou noir : un objet né de la théorie
- 2 Le trou noir : un objet astrophysique (désormais) ordinaire
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles
- 4 Bibliographie

Trou noir en gravitation newtonienne

John Michell 1783, Pierre Simon de Laplace 1796

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 : $V_{\text{lib}} = 617 \text{ km/s}$

Trou noir en gravitation newtonienne

John Michell 1783, Pierre Simon de Laplace 1796

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 $V_{\text{lib}} > c \simeq 300\,000 \text{ km/s} \iff R > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G\rho}}$

Trou noir en gravitation newtonienne

John Michell 1783, Pierre Simon de Laplace 1796

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 $V_{\text{lib}} > c \simeq 300\,000 \text{ km/s} \iff R > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G\rho}}$

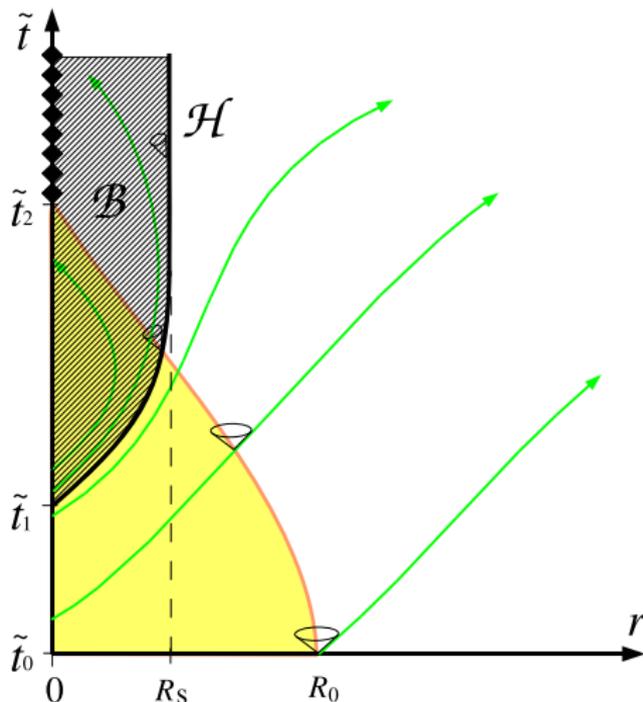
Un corps de même densité que le Soleil, mais de rayon 500 fois plus grand ne laisserait pas s'échapper la lumière \implies **“corps obscur”**

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 $V_{\text{lib}} \sim c$, alors $|E_{\text{grav}}| \sim Mc^2$: 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)

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

- 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

- 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

- 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**

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 ($T = 0$) décrite par seulement trois paramètres :

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

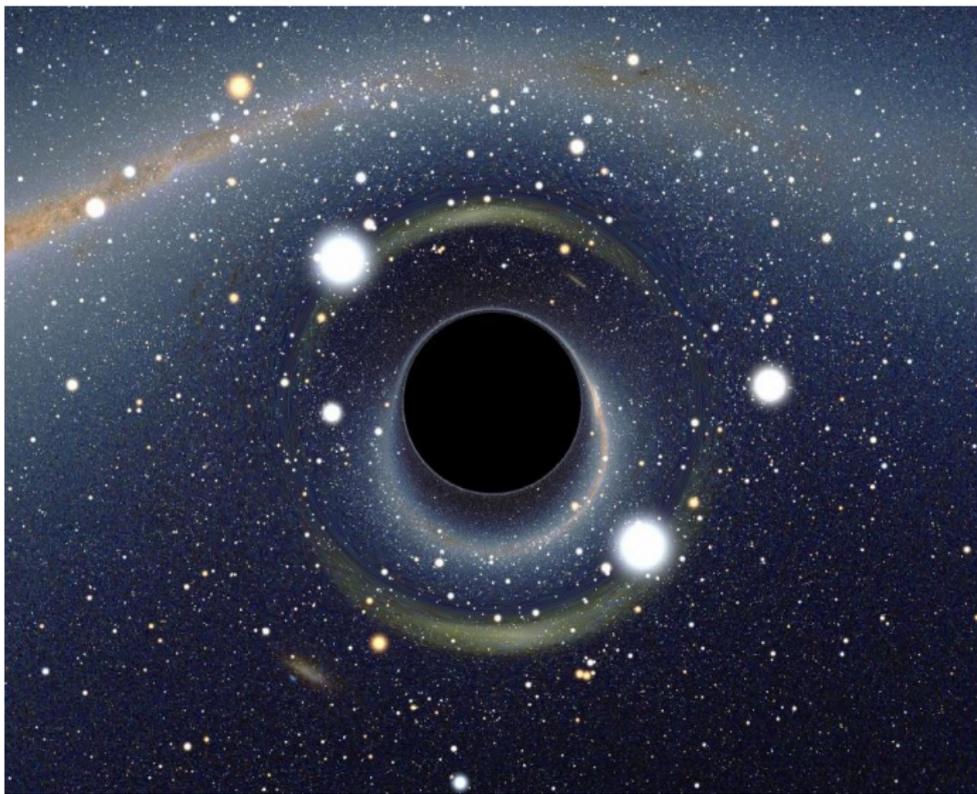
⇒ *“un trou noir n'a pas de cheveux”* (Wheeler)

$Q = 0$: **sol. de Kerr** (1963); $Q = 0$ et $J = 0$: **sol. de Schwarzschild** (1916)

Outline

- 1 Le trou noir : un objet né de la théorie
- 2 Le trou noir : un objet astrophysique (désormais) ordinaire
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles
- 4 Bibliographie

Ce qu'on ne voit pas encore...

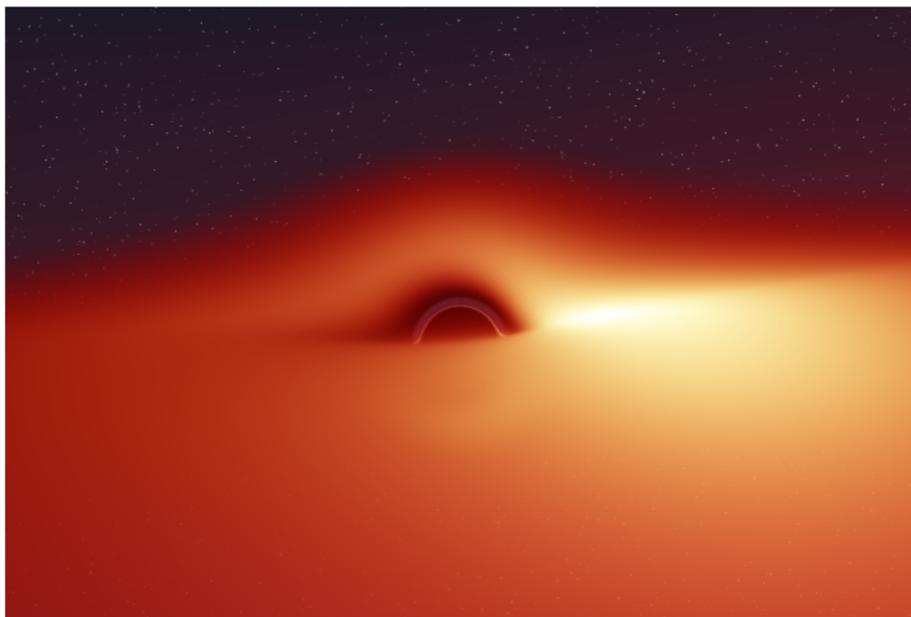


[Alain Riazuelo, 2007]

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 !

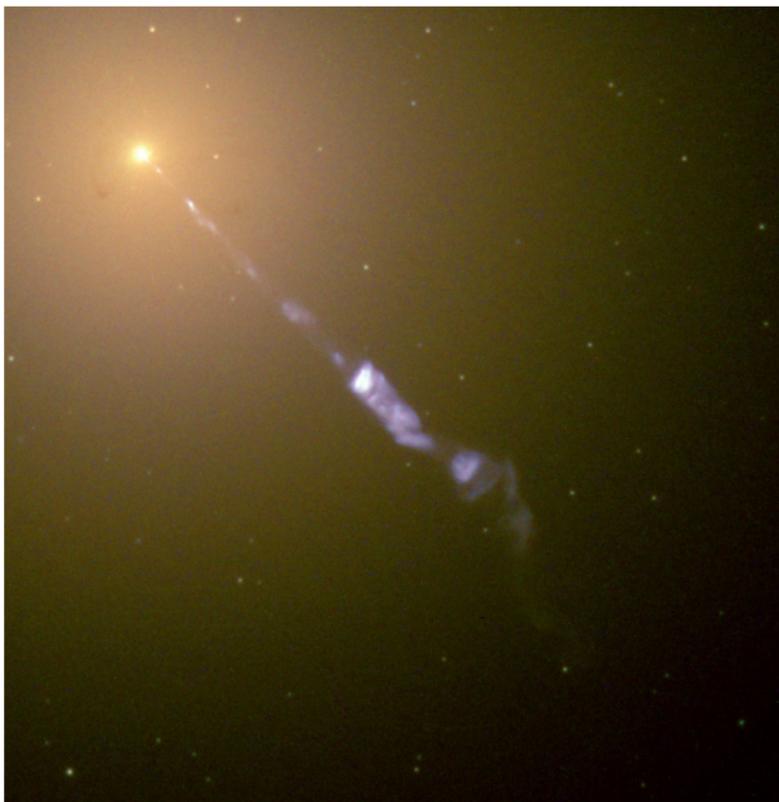
NB : les réactions thermonucléaires libèrent moins de 1% de mc^2



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 galaxies à noyau actif

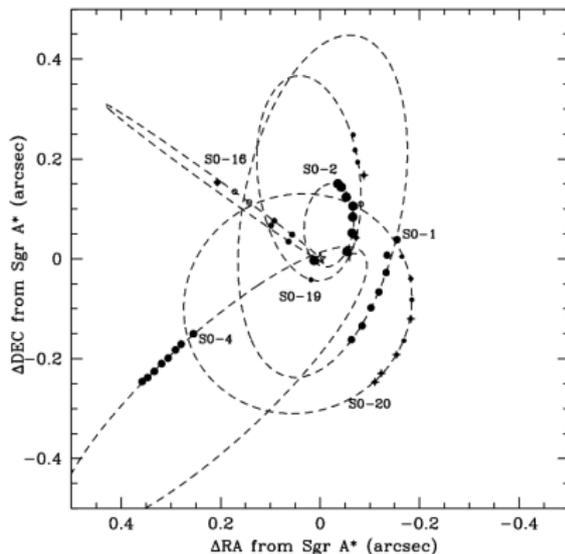


Jet émis par le noyau de la galaxie elliptique géante M87, au cœur de l'amas de la Vierge

[HST]

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

Le trou noir au cœur de notre galaxie



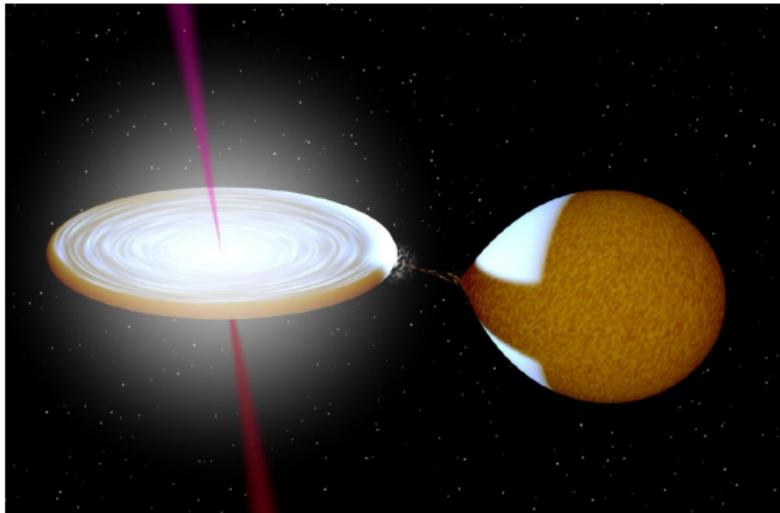
- détection via la dynamique stellaire :
orbite de S2

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

[Ghez (2004)]

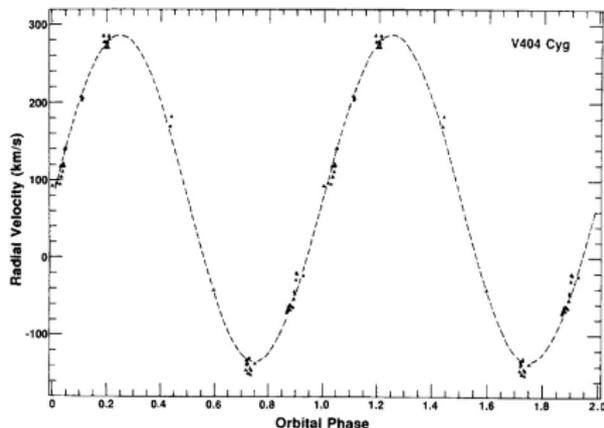
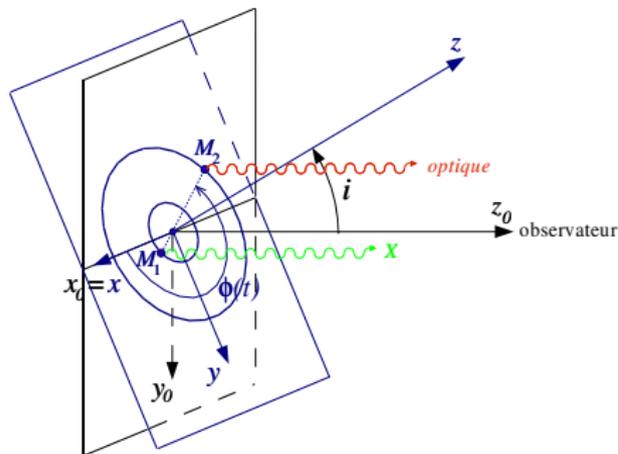
$$M_{\text{t.n.}} = 3.6 \times 10^6 M_{\odot}$$

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

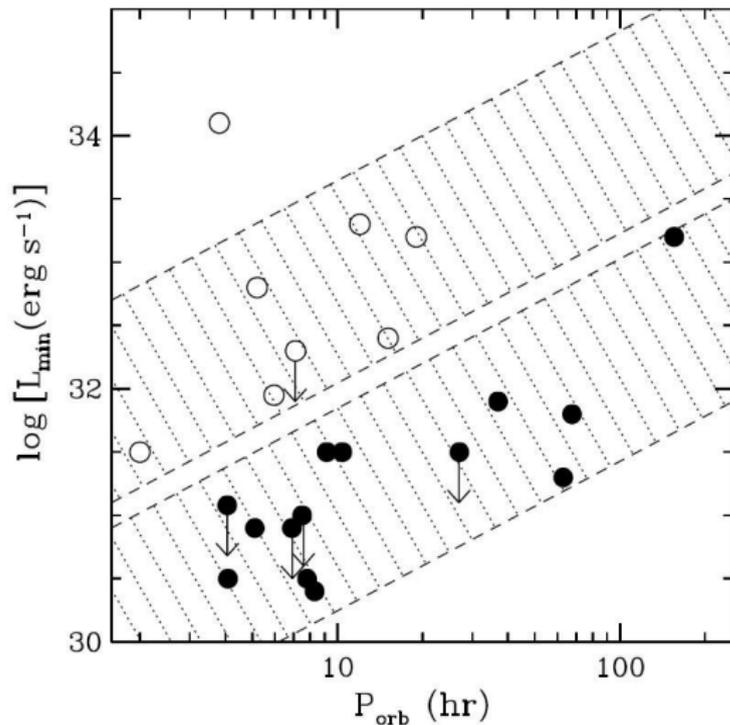
f est une borne inférieure sur M_1 : $M_1 > f$

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 !



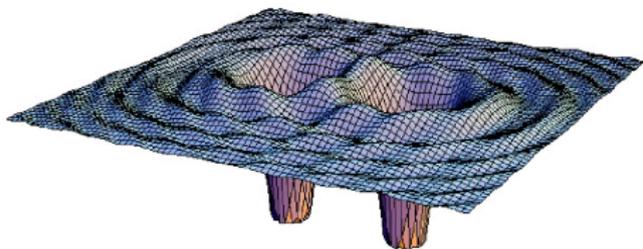
Luminosité dans la période de quiescence des binaires X :
 les systèmes avec trou noir (●)
 sont ~ 100 fois moins lumineux
 que ceux avec étoile à neutrons
 (○)

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

Outline

- 1 Le trou noir : un objet né de la théorie
- 2 Le trou noir : un objet astrophysique (désormais) ordinaire
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles**
- 4 Bibliographie

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

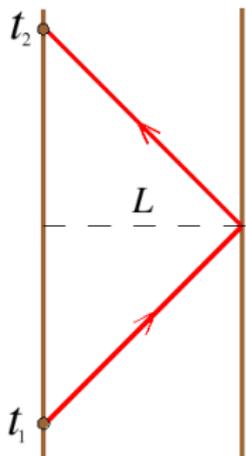
- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière
- NB : les **ondes électromagnétiques** (ondes radio, IR, optique, UV, X et gamma) sont des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent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

Effets du passage d'une onde gravitationnelle (1)



Mesure la distance L entre deux masses libres par la méthode "radar" :

$$L = \frac{1}{2} c(t_2 - t_1)$$



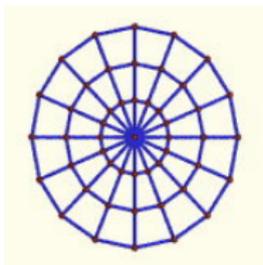
Variation de la longueur L au passage d'une onde gravitationnelle :

$$\delta L \simeq h L$$

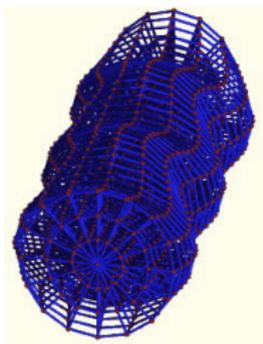
h = amplitude de l'onde gravitationnelle

En pratique h est si petit que nos sens n'y sont pas sensibles :
pour les principales **sources astrophysiques** : $h \sim 10^{-21}$!!!

Effets du passage d'une onde gravitationnelle (2)



← déplacement de particules tests dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde

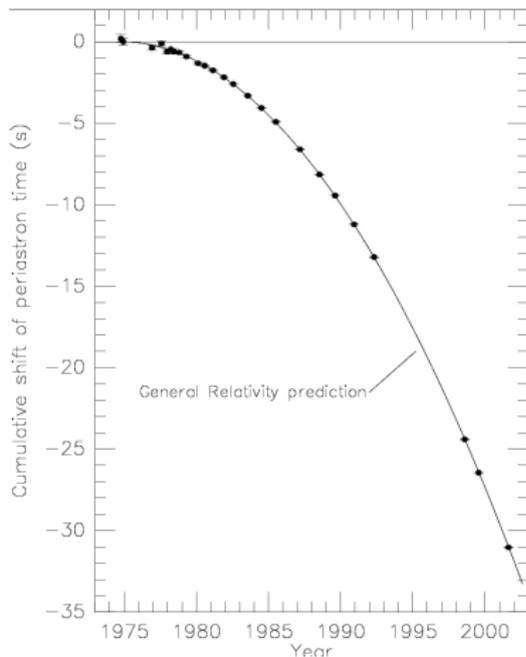


← propagation de l'onde

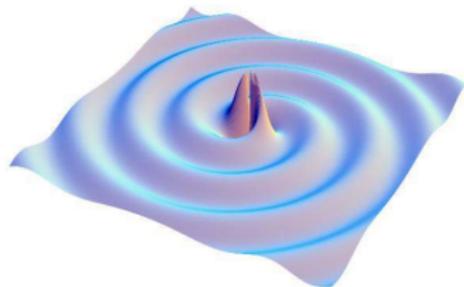
[<http://www.einstein-online.info/>]

Les ondes gravitationnelles existent !

Émission d'ondes gravitationnelles par le système binaire d'étoiles à neutrons PSR B1913+16 (*pulsar binaire*)



[Weisber & Taylor (2002)]



← Décroissance observée de la période orbitale $P = 7 \text{ h } 45 \text{ min}$ du pulsar binaire PSR B1913+16 sous l'effet de la *réaction au rayonnement gravitationnel*

⇒ coalescence dans 140 millions d'années.

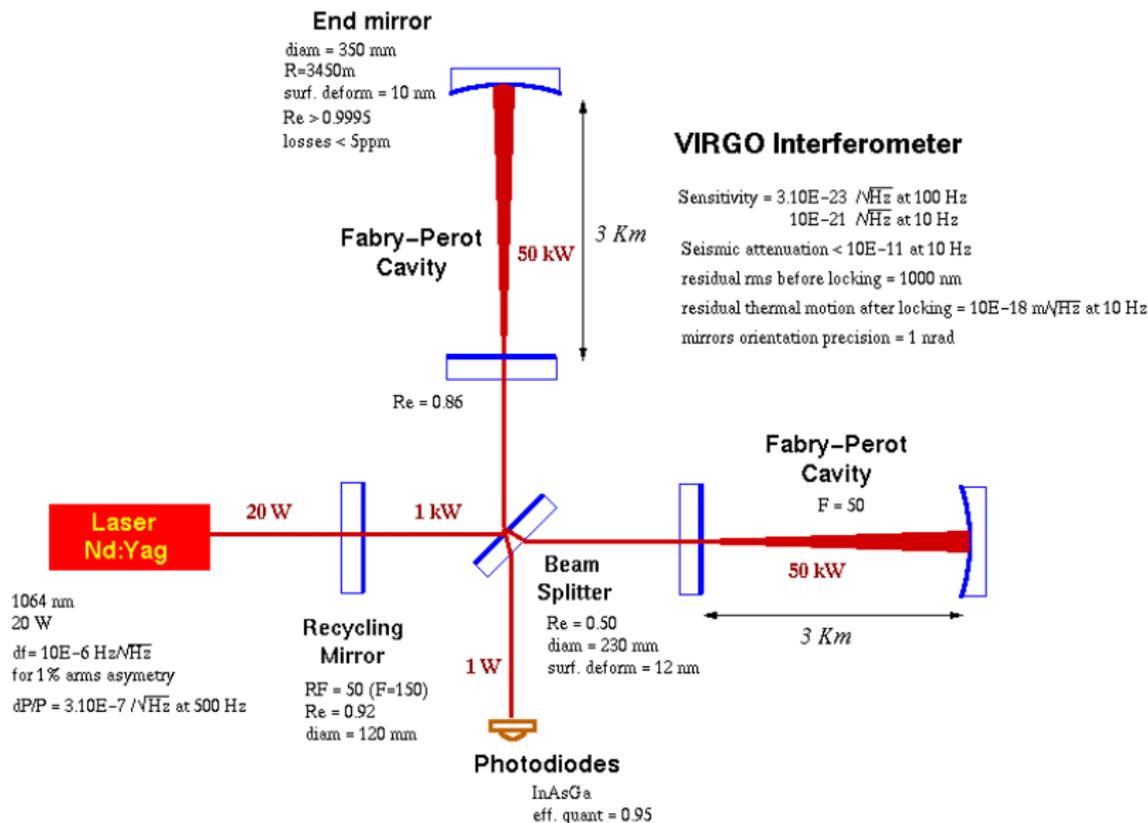
Prix Nobel de Physique 1993
à R. Hulse & J. Taylor

Détection sur Terre des ondes gravitationnelles

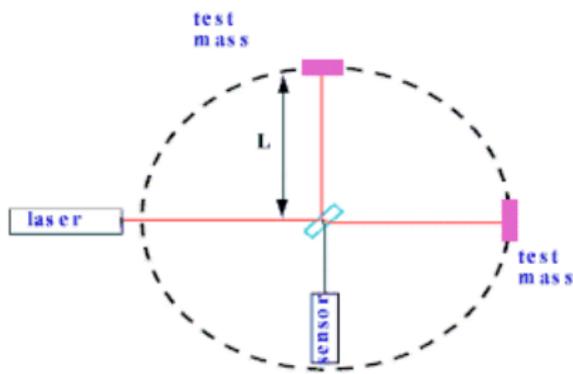


Détecteur interférométrique **VIRGO** sur le site de Cascina, près de Pise [CNRS/INFN]

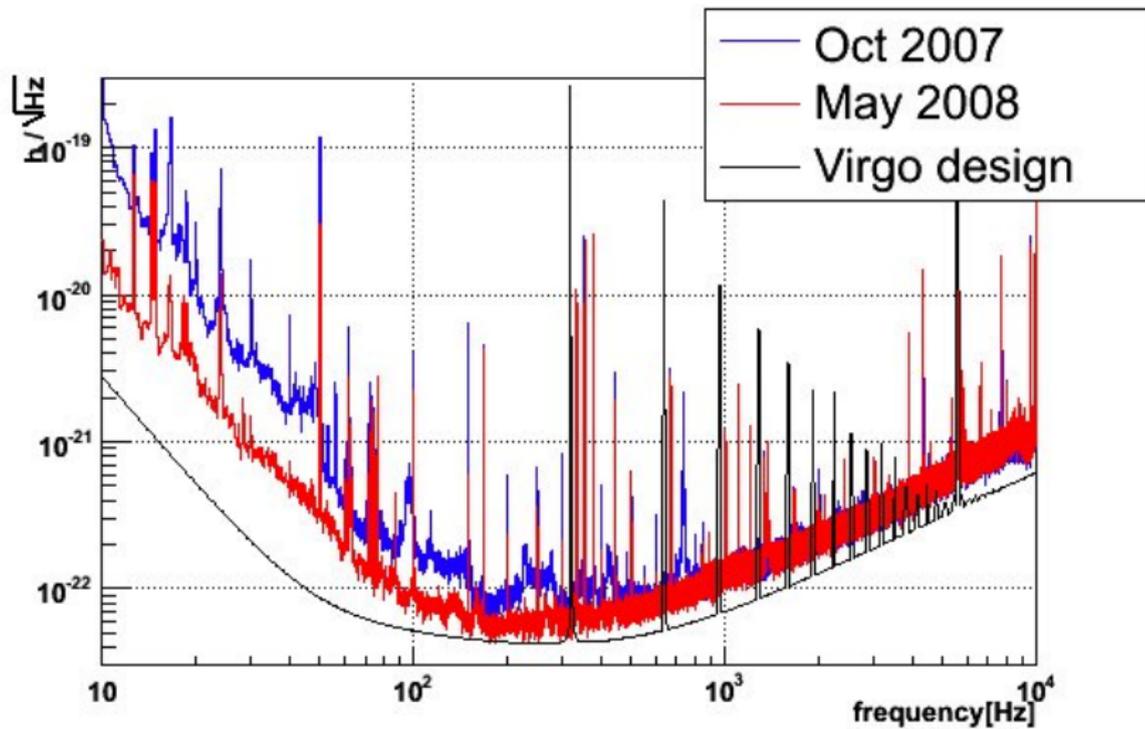
Schéma optique de l'interféromètre VIRGO



Réponse de l'interféromètre au passage d'une onde gravitationnelle



Courbe de sensibilité de VIRGO



Interféromètres LIGO

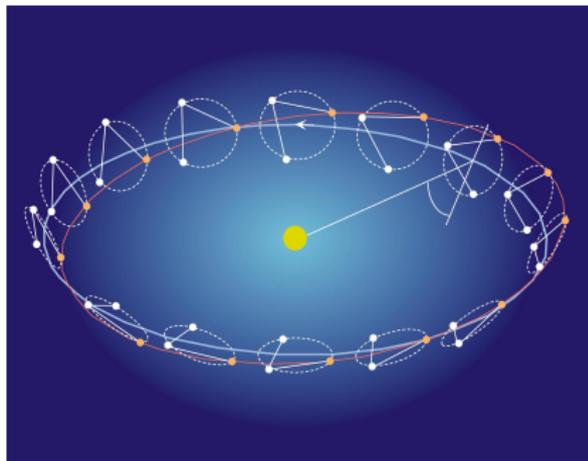
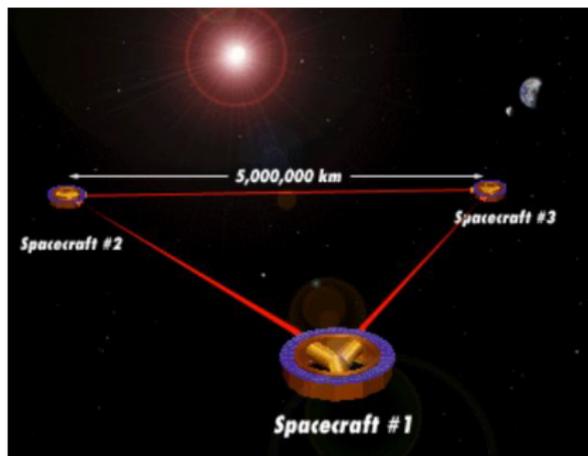
Hanford (H1=4km, H2=2km)



Livingston (L1=4km)



Projet spatial LISA (ESA/NASA)

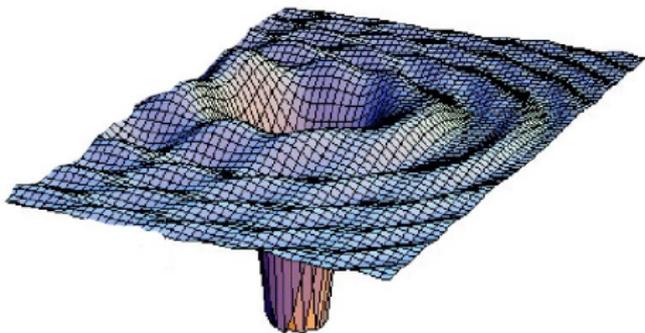


Bande de fréquences : 0,1 mHz \rightarrow 0,1 Hz

Mission LISA Pathfinder : 2011

Lancement LISA \sim 2020

Trous noirs et ondes gravitationnelles



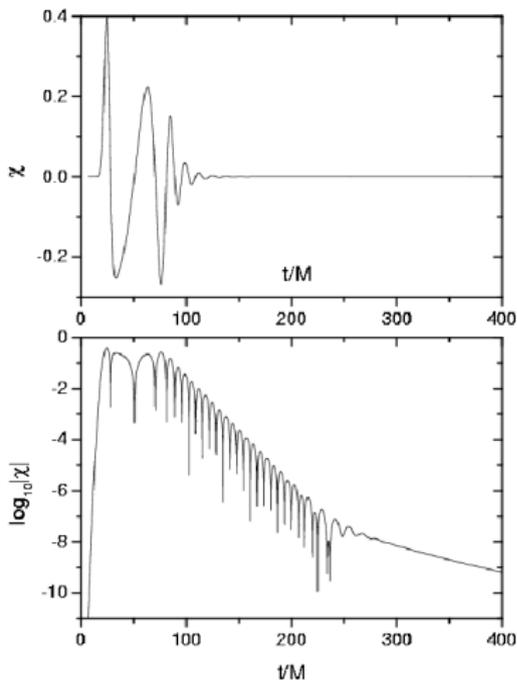
Lien intime entre les trous noirs et les ondes gravitationnelles :

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*))

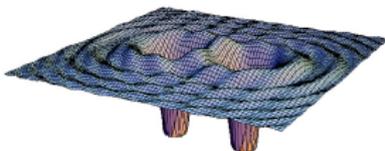
Désexcitation par émission d'ondes gravitationnelles sous forme de **modes quasi-normaux**.

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

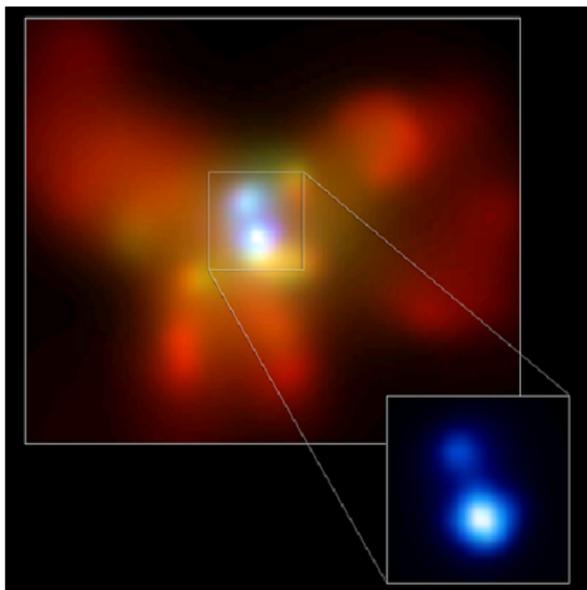
Intérêt théorique :

- 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 :

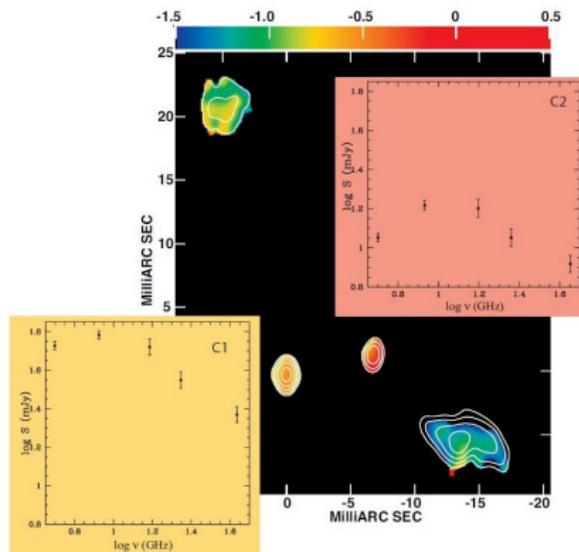
- taux de coalescences \implies évolution des étoiles massives
- signal gravitationnel de la phase spirale \implies mesure de la constante de Hubble H_0
- observations des trous noirs supermassifs à grand $z \implies$ formation des galaxies

Systèmes binaires de trous noirs dans l'Univers



Binary BH in galaxy NGC 6240
 $d = 1.4 \text{ kpc}$

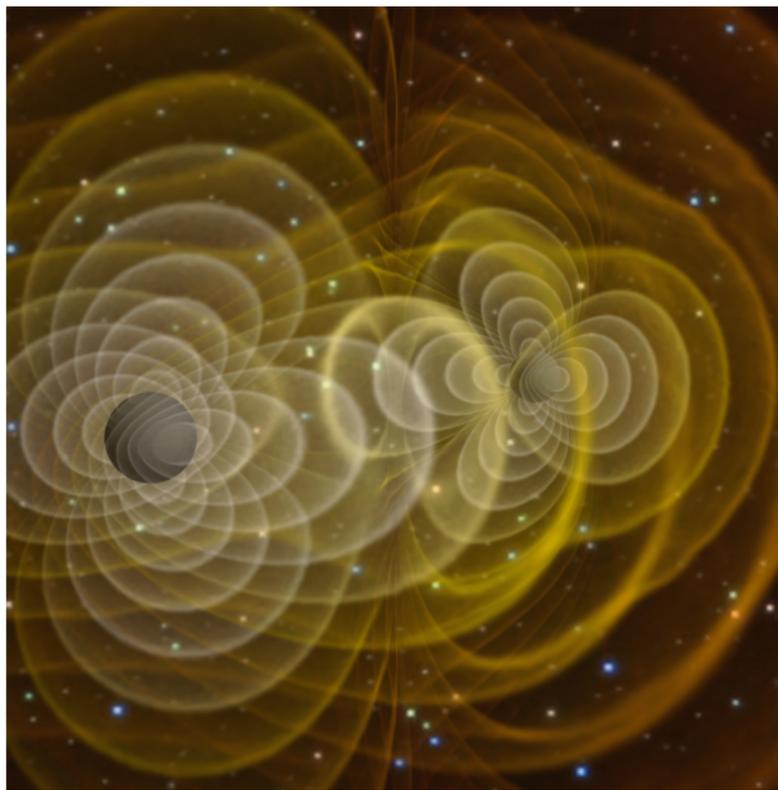
[Komossa et al., ApJ 582, L15 (2003)]



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.

Outline

- 1 Le trou noir : un objet né de la théorie
- 2 Le trou noir : un objet astrophysique (désormais) ordinaire
- 3 Observer les trous noirs en ondes gravitationnelles
- 4 Bibliographie

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
- J. Paul, 1998, *L'homme qui courait après son étoile*, Odile Jacob
- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- G. Chardin, 2009, *Le LHC peut-il produire des trous noirs ?*, Le Pommier