

# Le trou noir: un objet astrophysique (désormais) ordinaire

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/>

*2009, Année Mondiale de l'Astronomie*

**Rencontres interdisciplinaires**

Université Paris Diderot

18 juin 2009

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

# Outline

- 1 Les prédictions théoriques
- 2 Les trous noirs comme objets astrophysiques
- 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”**

# 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”**

**compacité** :  $\Xi := \frac{GM}{c^2 R} = \frac{V_{\text{lib}}^2}{2c^2}$  : trou noir  $\iff \Xi > \frac{1}{2}$

# 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  $\Xi \sim 1$  et  $|E_{\text{grav}}| \sim Mc^2$  : 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)



# 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)).

# Gravitation newtonienne et relativité générale

## Gravitation newtonienne :

équation fondamentale : équation de Poisson pour le potentiel gravitationnel  $\Phi$  :

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

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

# Gravitation newtonienne et relativité générale

## Gravitation newtonienne :

équation fondamentale : **équation de Poisson** pour le potentiel gravitationnel  $\Phi$  :

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

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

## 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

# Gravitation newtonienne et relativité générale

## Gravitation newtonienne :

équation fondamentale : **équation de Poisson** pour le potentiel gravitationnel  $\Phi$  :

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

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

## 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  $0 \equiv 0$ ).

# 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 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 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 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 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 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 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 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)



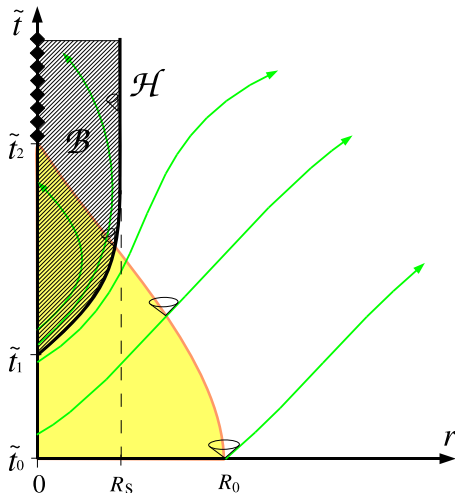
# Histoire du concept de trou noir en relativité générale

- **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

- 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 :

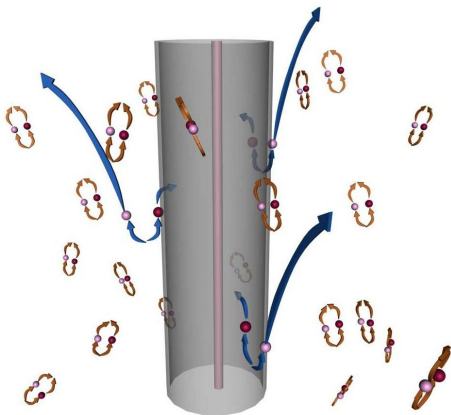
- masse totale  $M$
- moment cinétique total  $J$
- charge électrique totale  $Q$

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

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

# 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<sup>a)</sup> :

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 :  $\kappa = c^3/4GM \Rightarrow$

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

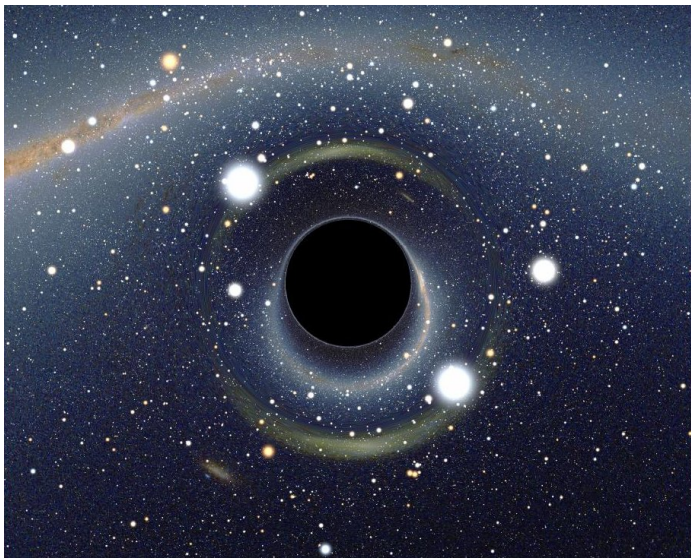
<sup>a)</sup>le champ gravitationnel n'est pas quantifié : il s'agit donc d'une approche semi-classique



# Outline

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

# Ce qu'on ne voit pas encore...

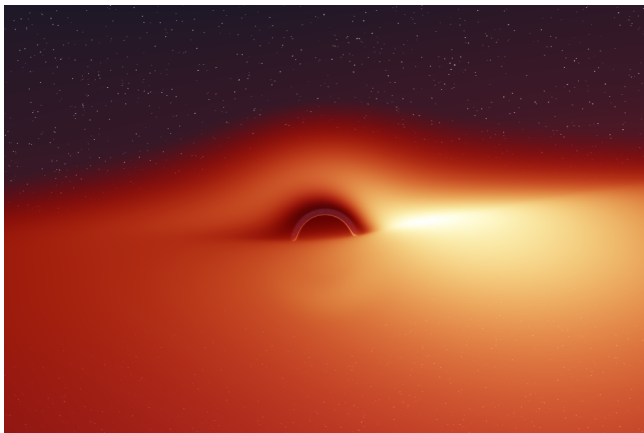


[Alain Riazuelo, 2007]

# 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  $mc^2$

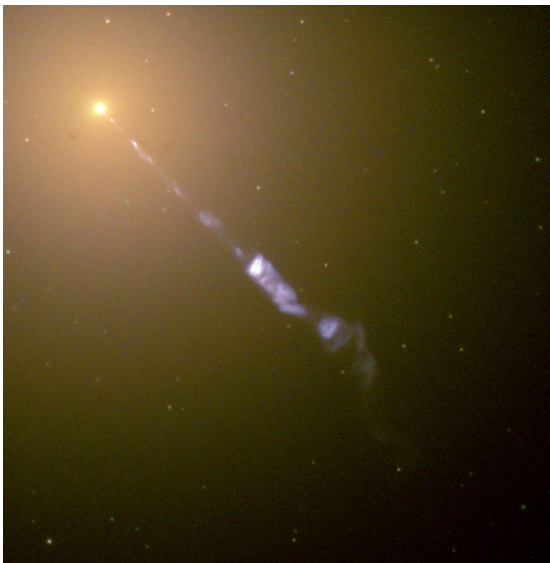


La matière qui tombe sur un trou noir forme un **disque d'accrétion** [Donald Lynden-Bell (1969), Nicolai Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]



# Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

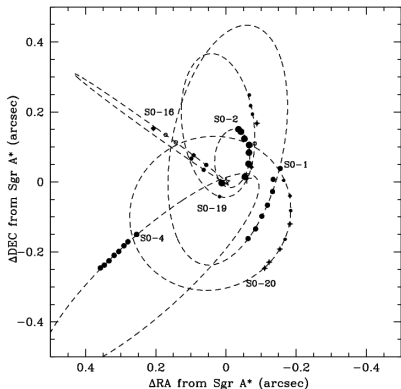


Jet émis par le noyau de la galaxie elliptique géante M87, au cœur de l'amas de la Vierge

[HST]

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

# Le trou noir au cœur de notre galaxie



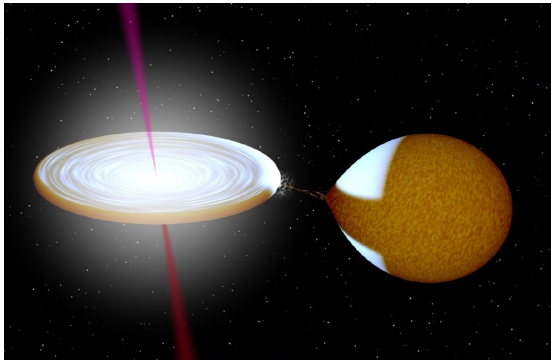
- détection via la dynamique stellaire

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

[Ghez (2004)]

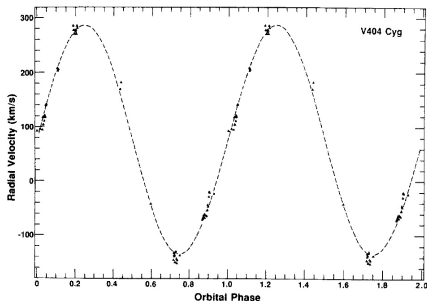
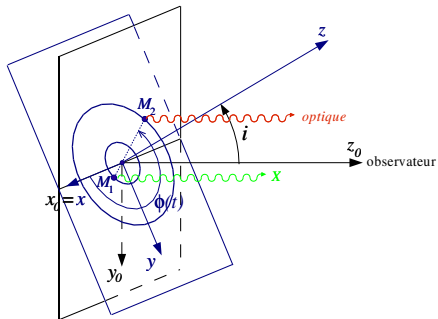
$$M_{\text{t.n.}} = 3.6 \times 10^6 M_{\odot}$$

# 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  $M_1$  :  $M_1 > f$

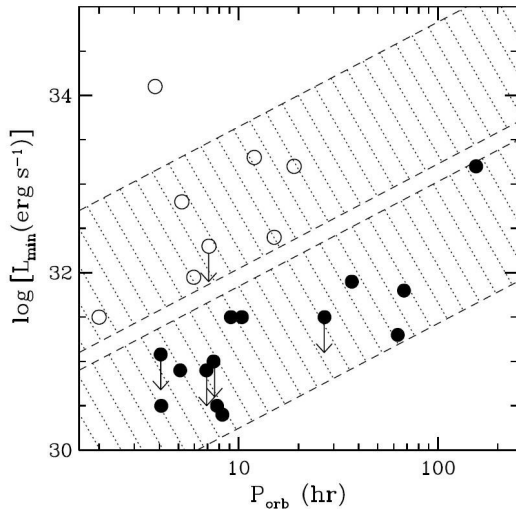
critère de masse :  $M_1 > M_{\text{max}}(\text{étoile neut.}) \simeq 3 M_{\odot}$



## 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	$10 \pm 5$
GS 2023+338	V404 Cyg	1992	6.5 j	0.6	$12 \pm 2$
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	$10 \pm 0.4$
GRO J0422+32	XN Per 92	1995	5.1 h	0.3	$10 \pm 5$
H 1705-250	XN Oph 77	1996	12.5 h	0.3	$6 \pm 2$
4U 1543-47	IL Lup	1998	27.0 h	2.5	$5.0 \pm 2.5$
GRS 1009-45	XN Vel 93	1999	6.8 h		6 – 8
XTE J1859+226	V406 Vul	2001	9.2 h		$10 \pm 3$
XTE J1550-564	V381 Nor	2001	37.0 h		$> 7.4$
SAX J1819.3-2525	V4641 Sgr	2001	2.8 j		$10 \pm 1.5$
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	$1.2 \pm 0.2$	$14 \pm 4$
GX 339-4	V821 Ara	2003	42.1 h		

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



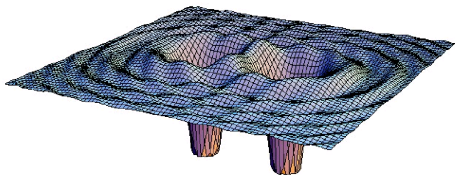
Luminosité dans la période de quiescence des binaires X :  
 les systèmes avec trou noir (●)  
 sont  $\sim 100$  fois moins lumineux  
 que ceux avec étoile à neutrons  
 (○)

[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**
- 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

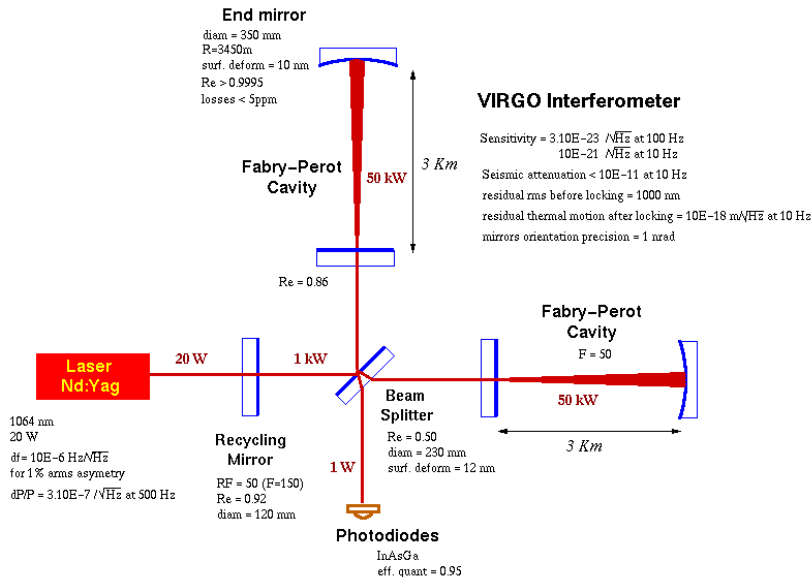
- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière
- NB : les **ondes électromagnétiques** (ondes radio, IR, optique, UV, X et gamma) sont des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent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

# Détection sur Terre des ondes gravitationnelles



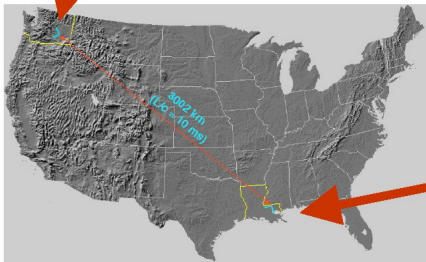
Détecteur interférométrique **VIRGO** sur le site de Cascina, près de Pise [CNRS/INFN]

## Schéma optique de l'interféromètre VIRGO



# Interféromètres LIGO

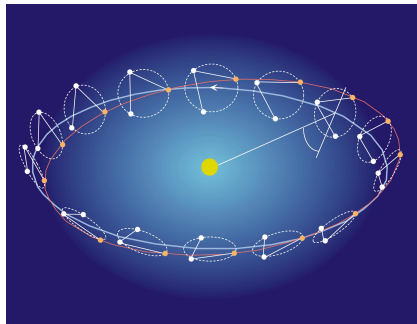
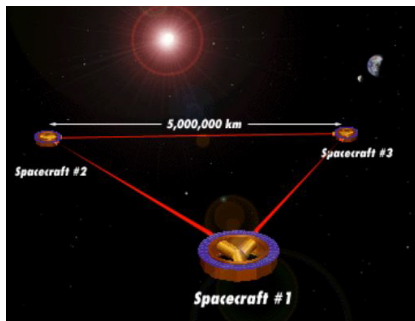
## Hanford (H1=4km, H2=2km)



## Livingston (L1=4km)



# Projet spatial LISA (ESA/NASA)



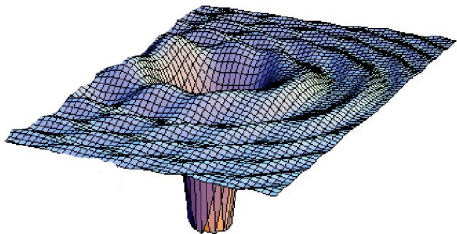
Bande de fréquences : 0,1 mHz  $\rightarrow$  0,1 Hz

Mission LISA Pathfinder : 2011

Lancement LISA  $\sim$  2020



# Trous noirs et ondes gravitationnelles



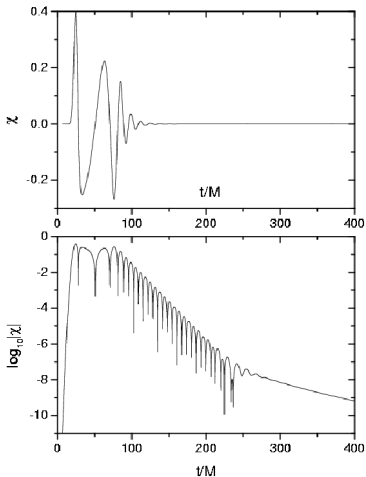
Lien intime entre les trous noirs et les ondes gravitationnelles :

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*))

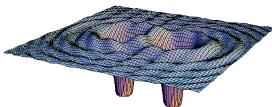
Désexcitation par émission d'ondes gravitationnelles sous forme de **modes quasi-normaux**.

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

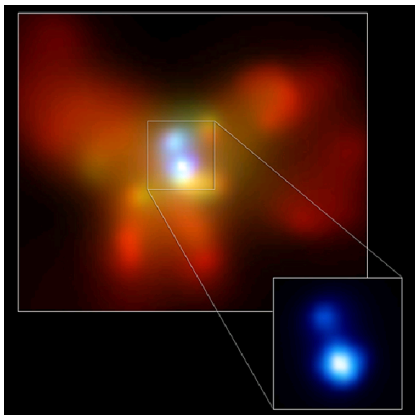
**Intérêt théorique :**

- 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

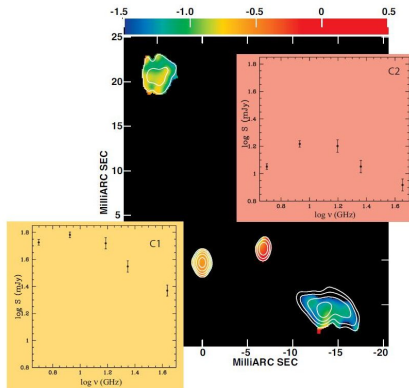
## Systèmes binaires de trous noirs dans l'Univers



Binary BH in galaxy NGC 6240

 $d = 1.4 \text{ kpc}$ 

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

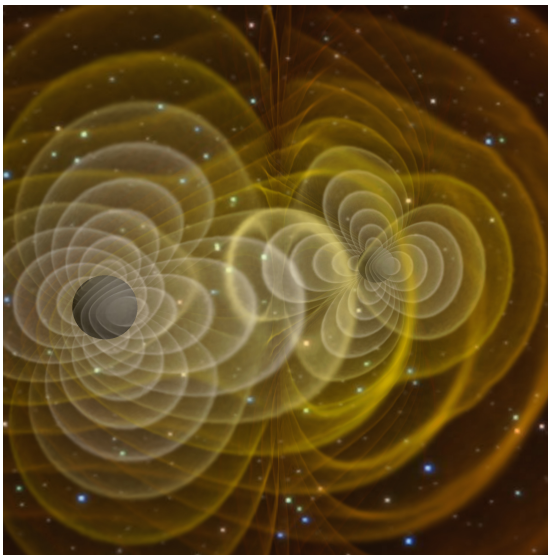


Binary BH in radio galaxy 0402+379

 $d = 7.3 \text{ pc}$ 

[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 :  
 $\sim 1$  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  $> 10$ ) :  $\sim 1$  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 :  $\sim 1$  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  $> 10$ ) :  $\sim 1$  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 Les prédictions théoriques
- 2 Les trous noirs comme objets astrophysiques
- 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