

# Les trous noirs

dans l'astrophysique contemporaine

Éric Gourgoulhon

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

[eric.gourgoulhon@obspm.fr](mailto:eric.gourgoulhon@obspm.fr)

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

**Université Inter-Âge de Versailles**  
15 mai 2012

- 1 Le trou noir : un concept d'abord théorique
- 2 Observations actuelles
- 3 Vers une nouvelle ère observationnelle

# Outline

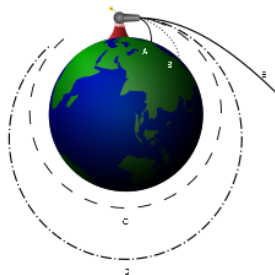
- 1 Le trou noir : un concept d'abord théorique
- 2 Observations actuelles
- 3 Vers une nouvelle ère observationnelle

# 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...

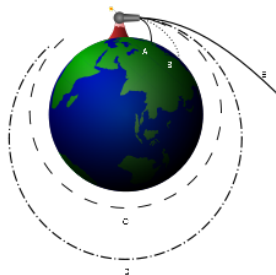
Dans la théorie de Newton de la gravitation :  
**vitesse de libération** d'un corps de masse  $M$  et

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

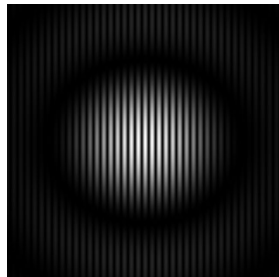
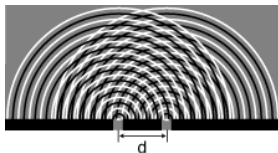
## Pierre Simon de Laplace (1796)

*“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

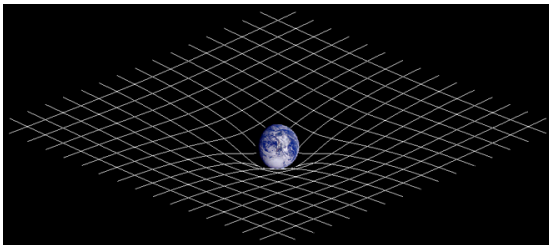
- En théorie newtonienne, la vitesse de la lumière ne joue pas de rôle privilégié : rien n'interdit  $V_{\text{lib}} > c$
- Si  $V_{\text{lib}} \sim c$ , l'énergie du champ gravitationnel est du même ordre de grandeur que l'énergie de masse  $Mc^2$  : une théorie relativiste de la gravitation est nécessaire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

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



# 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**  $C = \left( \frac{V_{\text{lib}}}{c} \right)^2$

	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

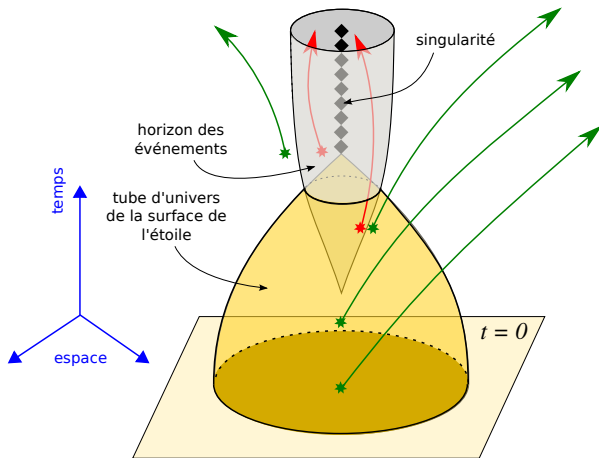


Diagramme d'espace-temps montrant la formation d'un trou noir par **effondrement gravitationnel** d'une étoile  
*cf. exposé de Jérôme Novak (3 avril 2012)*

Un **trou noir** est une région de l'espace-temps d'où les photons ne peuvent sortir pour atteindre des régions infiniment éloignées.

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*).

# 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 :

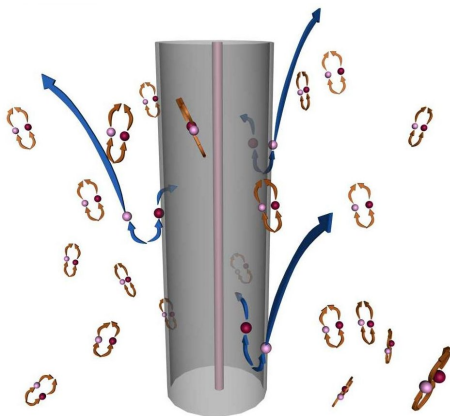
le champ électrique mesuré loin du trou noir est

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

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

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

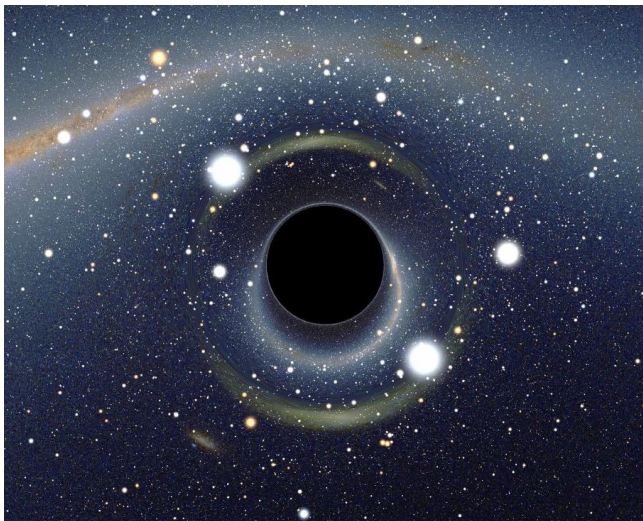
a. le champ gravitationnel n'est pas quantifié : il est classique

# Outline

- 1 Le trou noir : un concept d'abord théorique
- 2 Observations actuelles
- 3 Vers une nouvelle ère observationnelle

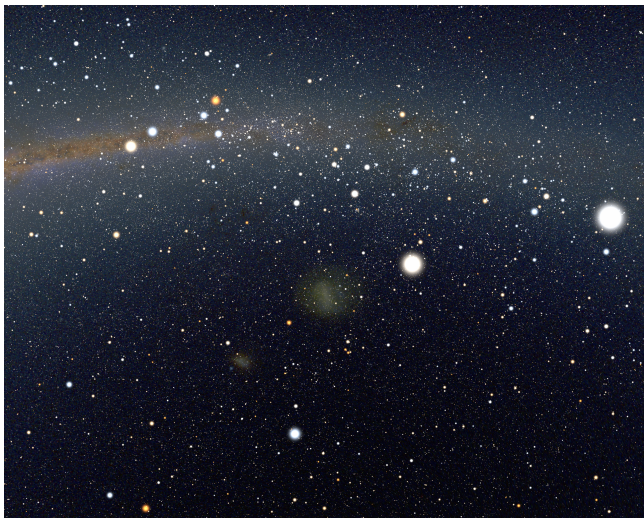


# Ce qu'on ne voit pas encore...



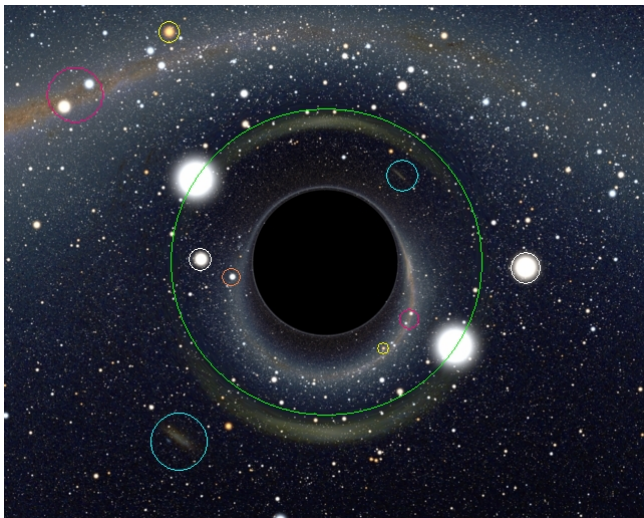
[Alain Riazuelo, 2007]

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



[Alain Riazuelo, 2007]

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

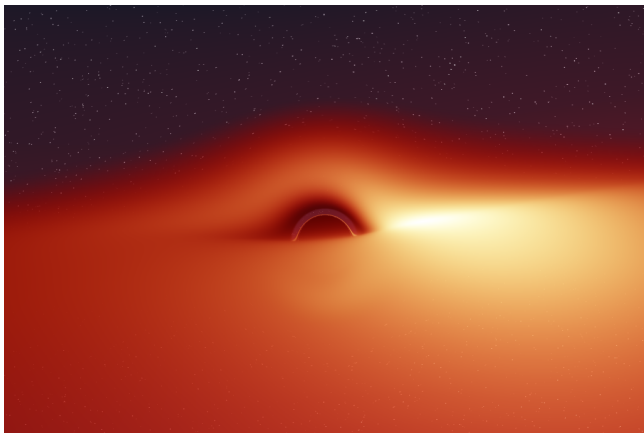


[Alain Riazuelo, 2007]

# 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 !

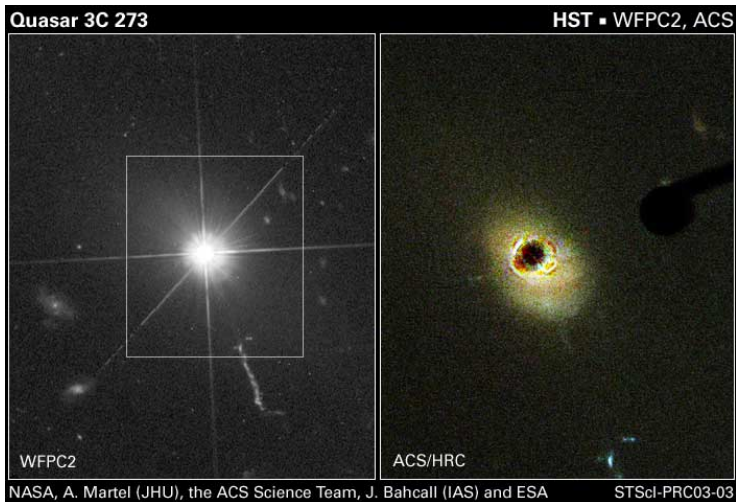
NB : les réactions thermonucléaires libèrent moins de 1% de  $mc^2$



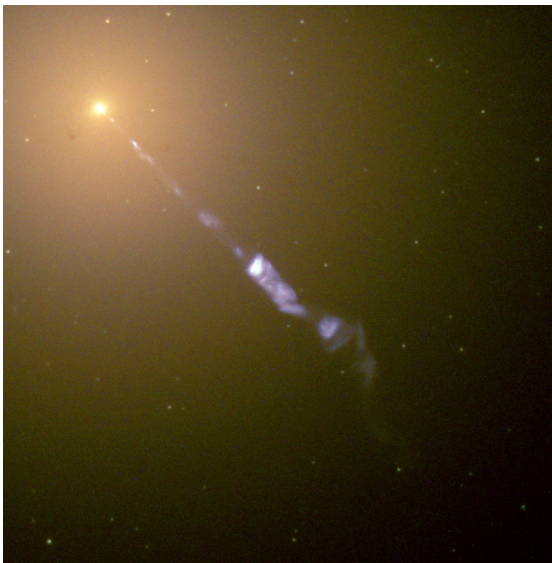
La matière qui tombe sur un trou noir forme un **disque d'accrétion** [Donald Lynden-Bell (1969), Nicolai Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]

# Les trous noirs au cœur des quasars



# Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif



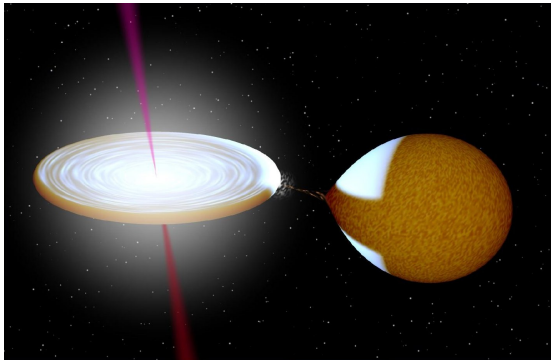
Jet émis par le noyau de la  
galaxie elliptique géante M87, au  
cœur de l'amas de la Vierge

[HST]

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

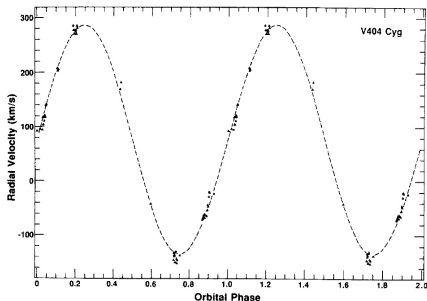
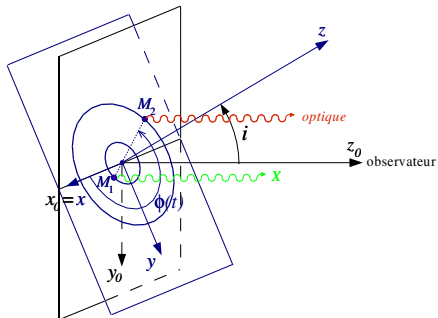
$$V_{\text{jet}} \simeq 0.99 c$$

# 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

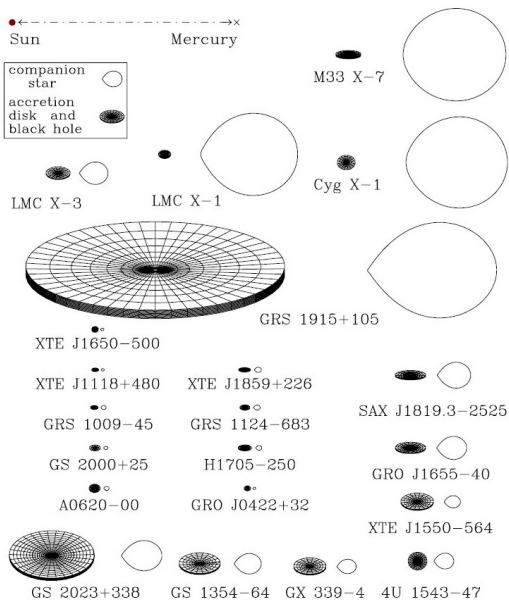
Le premier trou noir mis en évidence par le critère de masse est *Cygnus X-1* en 1972.

Depuis on en a identifié une vingtaine

## Sélection de 5 trous noirs dans des binaires X

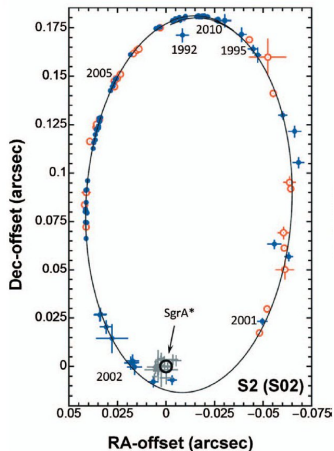
Nom	Masse [ $M_{\odot}$ ]	Spin $a = cJ / (GM^2)$	Distance [1000 al]	Période orbitale [j]	Fonction de masse [ $M_{\odot}$ ]	Masse du compagnon [ $M_{\odot}$ ]
Cyg X-1 HDE 226868	$14,8 \pm 1,0$	$> 0,97$ (?)	$6,1 \pm 0,3$	5,6	0,24	$19,2 \pm 1,9$
A 0620-00	$6,6 \pm 0,25$	$0,12 \pm 0,18$ (?)	$3,4 \pm 0,4$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

## Trous noirs dans les binaires X



[McClintock et al. (2011)]

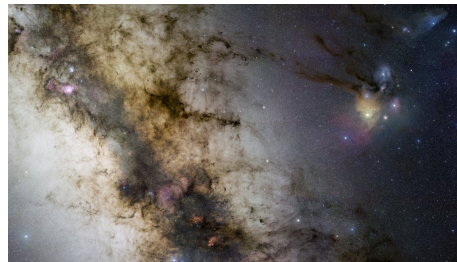
# Le trou noir au cœur de notre galaxie



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

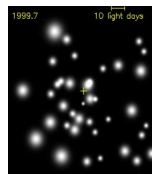
[Genzel et al. (2010)]

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



[ESO (2009)]

Détection via la dynamique stellaire

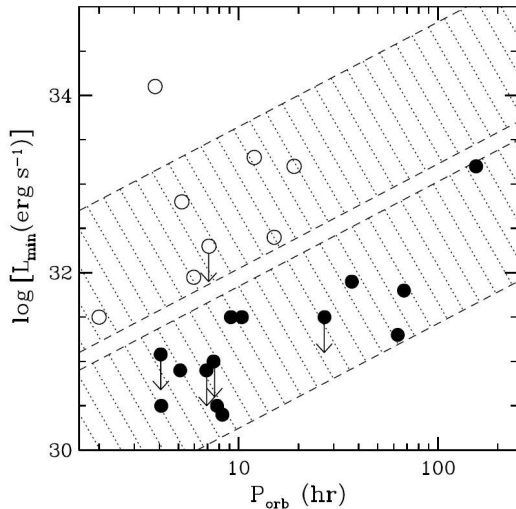


# Trous noirs supermassifs

## 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

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



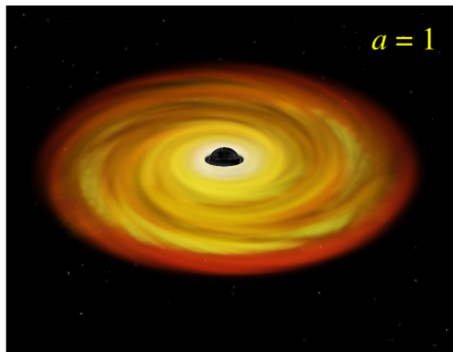
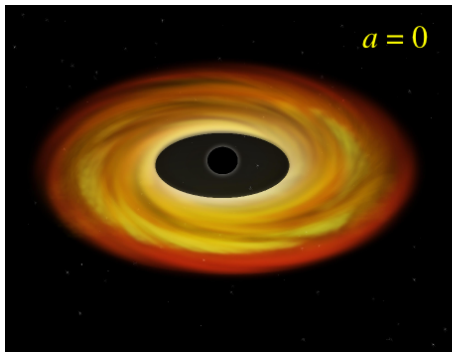
Luminosité dans la période de quiescence des binaires X :  
 les systèmes avec trou noir (●)  
 sont  $\sim 100$  fois moins lumineux  
 que ceux avec étoile à neutrons  
 (○)

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

# Au delà de la masse : mesurer le spin

Dernière orbite stable (ISCO) :  $R_{\text{ISCO}}(a = 0) = \frac{6GM}{c^2}$  et  $R_{\text{ISCO}}(a = 1) = \frac{GM}{c^2}$

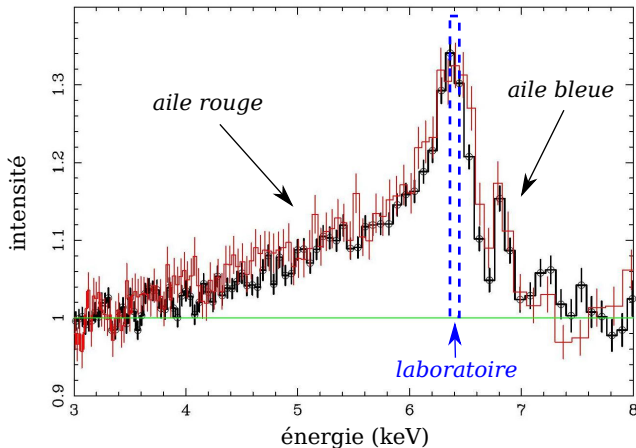
Le bord interne du disque d'accrétion est à l'ISCO



[NASA/CXC/M. Weiss]

L'analyse du spectre du rayonnement X reçu, comparée à un modèle d'émission, permet d'estimer  $a$

# Une autre mesure du spin : la raie $K\alpha$ du fer



**Raie  $K\alpha$**  : raie de fluorescence X des atomes de fer du disque d'accrétion excités par les rayons X de haute énergie émis depuis la couronne de plasma qui entoure le disque.

La forme de l'aile rouge dépend de  $a$

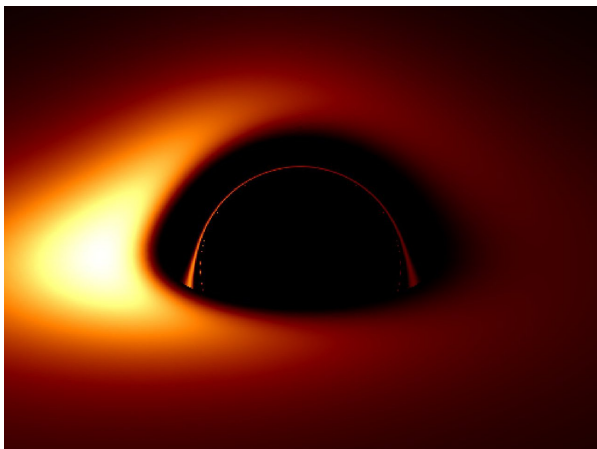
Raie  $K\alpha$  dans le spectre X du noyau de la galaxie MCG-6-30-15 observée par les satellites XMM-Newton (rouge) et Suzaku (noir) (adapté de [Miller (2007)])

# Outline

- 1 Le trou noir : un concept d'abord théorique
- 2 Observations actuelles
- 3 Vers une nouvelle ère observationnelle



# Voir la silhouette des trous noirs



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

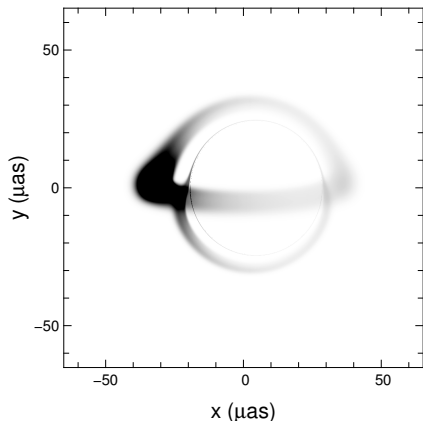
**M87** :  $D = 21 \mu\text{as}$

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

# Voir la silhouette des trous noirs



Tore ionisé

[Straub, Vincent, Abramowicz, Gourgoulhon & Paumard,  
arXiv :1203.2618 (2012)]

Le plus gros trou noir en  
taille apparente sur le ciel :

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

Viennent ensuite

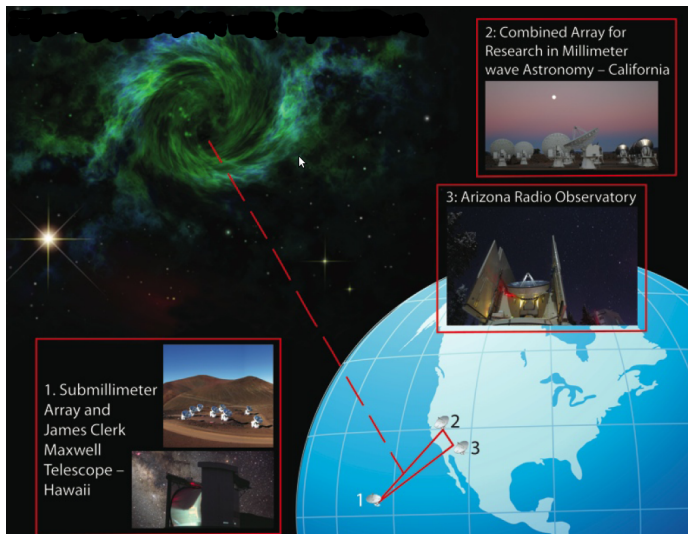
**M87** :  $D = 21 \mu\text{as}$

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

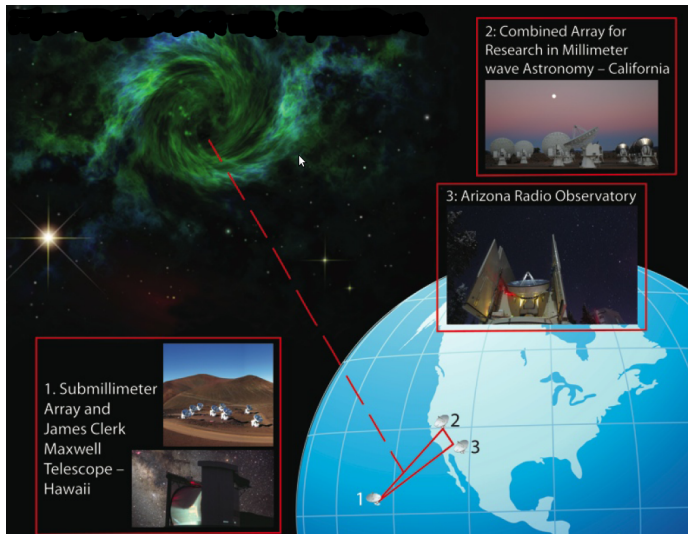
# La solution : l'interférométrie !



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  $37 \mu\text{as}$ .

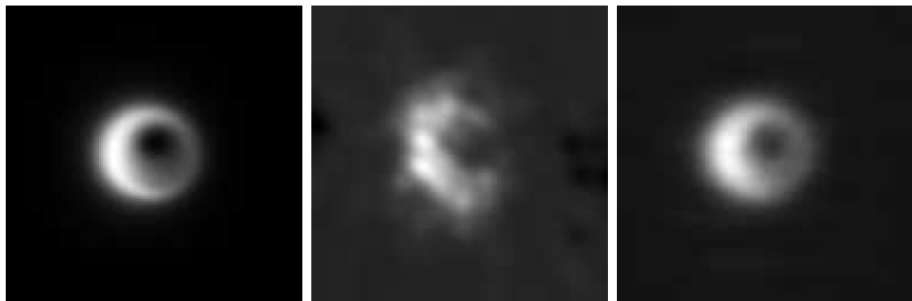
Réseau VLBI américain existant [Doeleman et al. 2011]

# Le futur proche : l'Event Horizon Telescope



Atacama Large Millimeter Array (ALMA)  
Fin de construction : 2012

# Le futur proche : l'Event Horizon Telescope

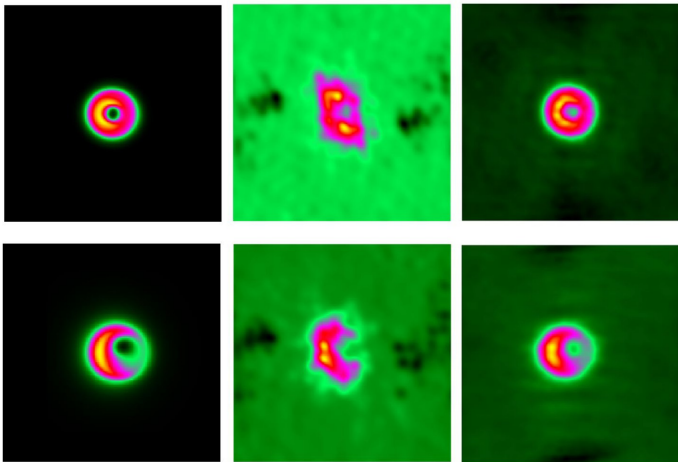


Simulations d'observations VLBI de Sgr A\* à  $\lambda = 0.8$  mm

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

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

# Le futur proche : l'Event Horizon Telescope



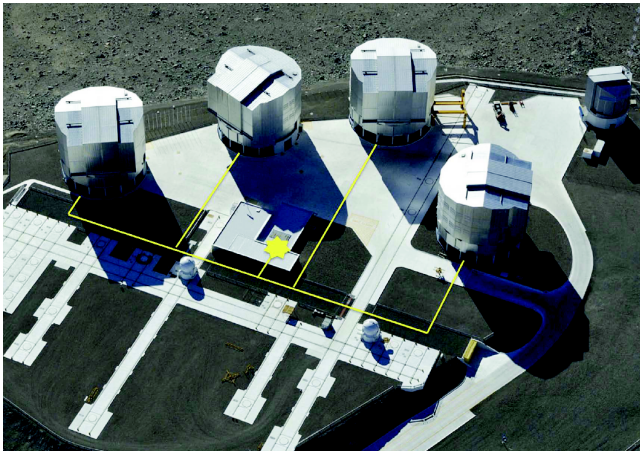
Simulations d'observations VLBI de Sgr A\* à  $\lambda = 0.8$  mm

*gauche* : image parfaite, *milieu* : 7 stations ( $\sim 2015$ ), *droite* : 13 stations ( $\sim 2020$ )

*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]

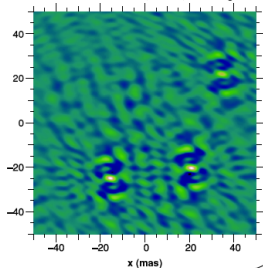
## Projet GRAVITY au VLT (2014)

Combiner les faisceaux des 4 télescopes de 8 m et de 4 télescopes auxiliaires

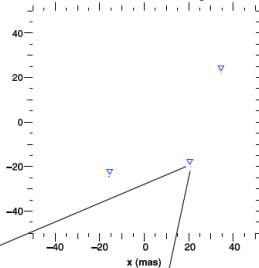
⇒ précision astronomique de  $10 \mu\text{as}$



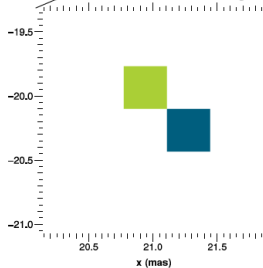
# Simulations d'observation de GRAVITY

Simulated observation of 3 stars,  $m = 15$ , whole night integration

Associated CLEANed image



Zoom on the associated CLEANed image



Observation de 3 étoiles de magnitude 15 pendant une nuit complète.

[Vincent et al., MNRAS 412, 2653 (2011)]

# Tester l'absence de chevelure

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

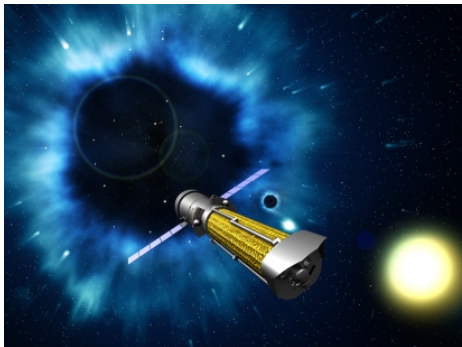
Mesure des effets relativistes :

- avance du périastre
- précession de Lense-Thirring

⇒ contraintes sur la métrique au voisinage du corps central

⇒ **est-ce bien la métrique de Kerr ( $a, M$ ) ?**

# Futures observations en X

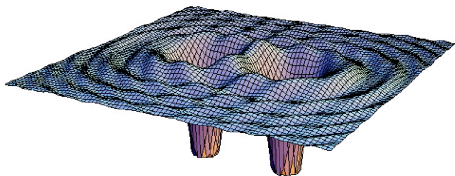


Athena [ESA]

Prochains observatoires X en orbite :

- NuSTAR (CalTech) : 2012
- ASTROSAT (Indian Space Research Org.) : 2012
- ASTRO-H (JAXA) : 2014
- GEMS (NASA) : 2014
- Athena (ex IXO) (ESA) : 20??

# 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

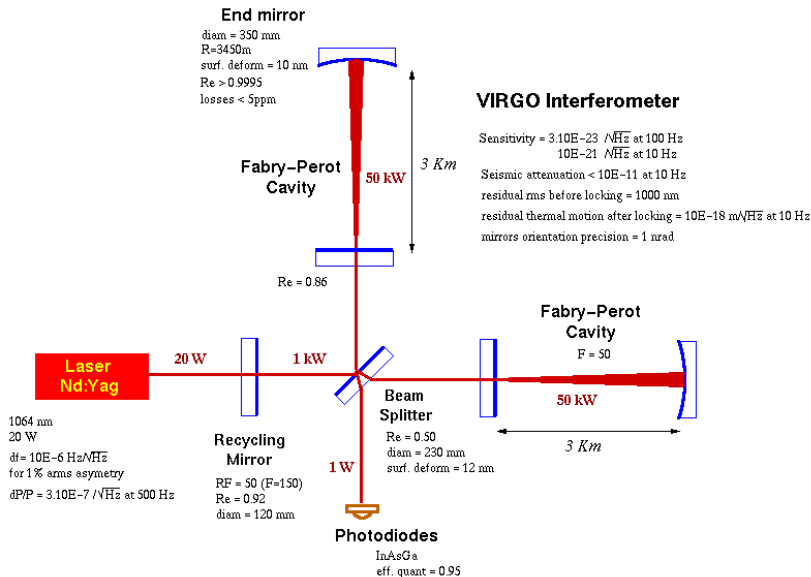
- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière
- NB : les **ondes électromagnétiques** (ondes radio, IR, optique, UV, X et gamma) sont des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent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

# Détection sur Terre des ondes gravitationnelles



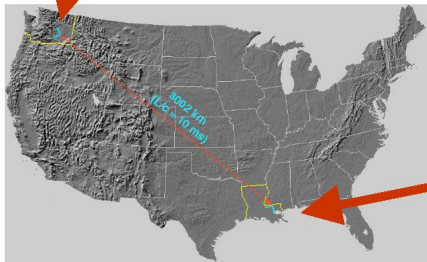
Détecteur interférométrique **VIRGO** sur le site de Cascina, près de Pise [CNRS/INFN]

## Schéma optique de l'interféromètre VIRGO



# Interféromètres LIGO

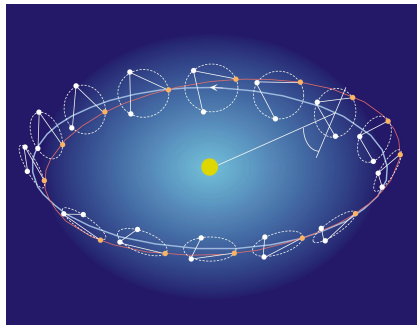
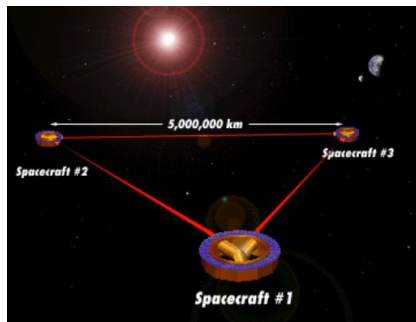
## Hanford (H1=4km, H2=2km)



## Livingston (L1=4km)



# Projet spatial LISA/NGO (ESA)



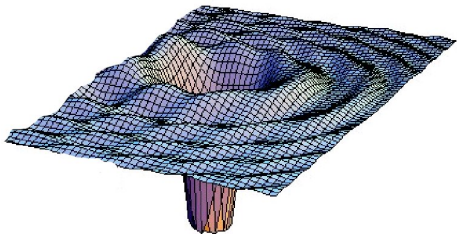
Bande de fréquences : 0,1 mHz  $\rightarrow$  0,1 Hz

Mission LISA Pathfinder : 2014

Lancement LISA/NGO : 20???



# Trous noirs et ondes gravitationnelles



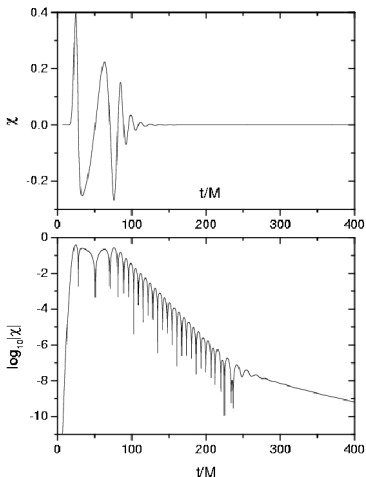
Lien intime entre les trous noirs et les ondes gravitationnelles :

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*))

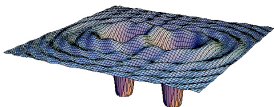
Désexcitation par émission d'ondes gravitationnelles sous forme de **modes quasi-normaux**.

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

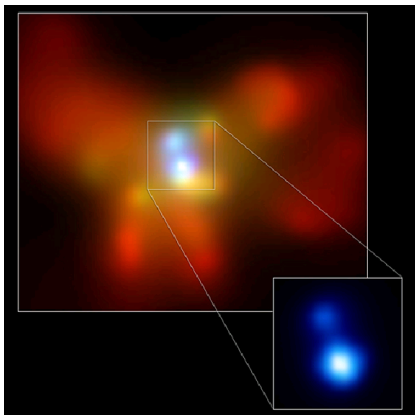
**Intérêt théorique :**

- 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

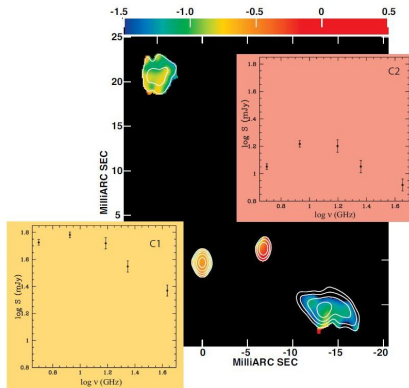
## Systèmes binaires de trous noirs dans l'Univers



Binary BH in galaxy NGC 6240

 $d = 1.4 \text{ kpc}$ 

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

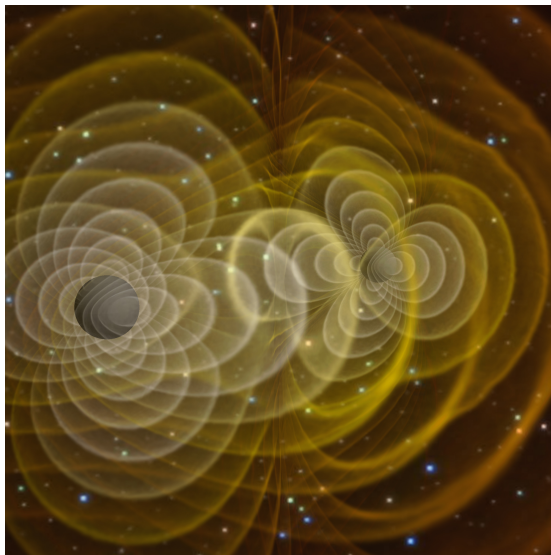


Binary BH in radio galaxy 0402+379

 $d = 7.3 \text{ pc}$ 

[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.

# 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.ourgoulhon, 2011, *Trous noirs : à la veille d'une nouvelle ère observationnelle*, L'Astronomie **125**, novembre 2011, p. 16
- J.-P. Lasota, 2010, *La science des trous noirs*, Odile Jacob
- J.-P. Luminet, 2006, *Le destin de l'Univers : trous noirs et énergie sombre*, Folio
- 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