

Le trou noir supermassif au centre de la Voie Lactée

1^{ère} partie:

Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Éric Gourgoulhon

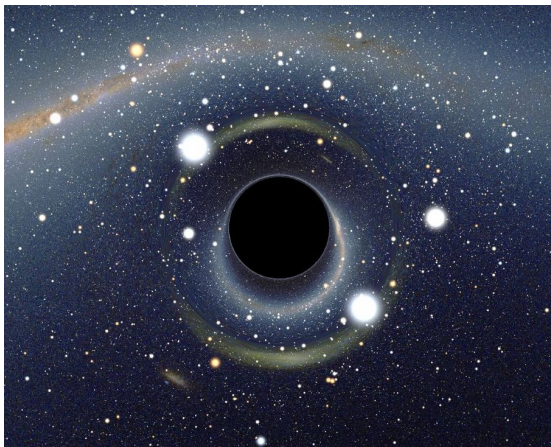
Laboratoire Univers et Théories (LUTH)
CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris Diderot
92190 Meudon, France

eric.gourgoulhon@obspm.fr

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

Fête de la Science
Observatoire de Paris
13 octobre 2012

Qu'est-ce qu'un trou noir ?



[Alain Riazuelo, 2007]

Un **trou noir** est une région de l'espace-temps d'où rien, même pas la lumière, ne peut s'échapper.

La frontière (immatérielle) entre l'intérieur du trou noir et le reste de l'Univers est appelée **horizon des événements**.

Pourquoi la lumière ne peut s'échapper ?

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

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

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

Pourquoi la lumière ne peut s'échapper ?

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

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

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

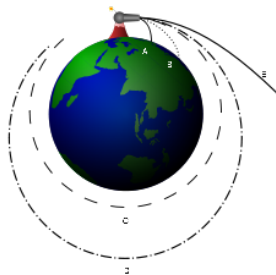
Dans la théorie de Newton de la gravitation :

vitesse de libération d'un corps de masse M et

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

($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

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



Pourquoi la lumière ne peut s'échapper ?

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

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

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

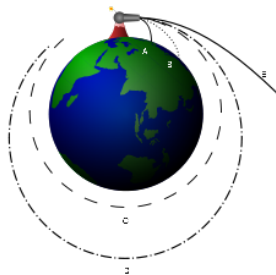
Dans la théorie de Newton de la gravitation :

vitesse de libération d'un corps de masse M et

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

($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)

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



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

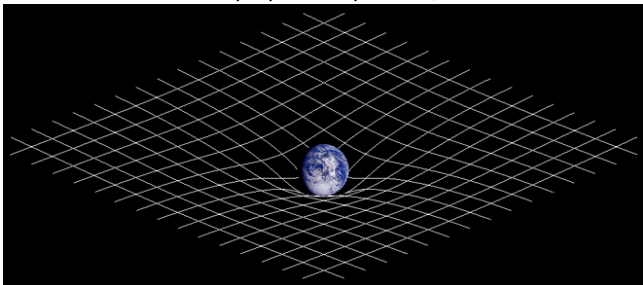
$$\iff \frac{2GM}{R} > c^2 \iff R > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G\rho}} \quad (M = \frac{4}{3}\pi R^3\rho)$$

Une description relativiste est nécessaire

La théorie newtonienne de la gravitation n'est pas suffisante pour décrire correctement un corps pour lequel $V_{\text{lib}} \sim c$

Une description relativiste est nécessaire

La théorie newtonienne de la gravitation n'est pas suffisante pour décrire correctement un corps pour lequel $V_{\text{lib}} \sim c$



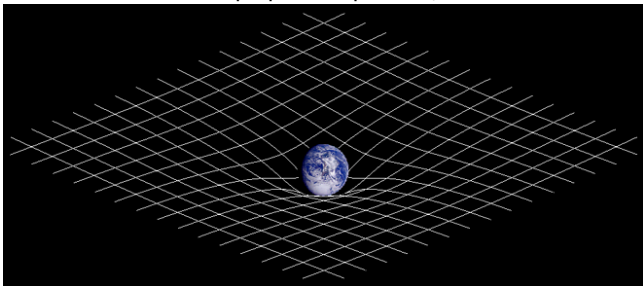
Il faut utiliser la

Relativité générale
(A. Einstein, 1915)

Gravitation = courbure
de l'espace-temps

Une description relativiste est nécessaire

La théorie newtonienne de la gravitation n'est pas suffisante pour décrire correctement un corps pour lequel $V_{\text{lib}} \sim c$



Il faut utiliser la

Relativité générale
(A. Einstein, 1915)

Gravitation = courbure
de l'espace-temps

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

Les déviations par rapport à la théorie newtonienne se mesurent par

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

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

La gravitation influe sur l'écoulement du temps ?

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

La gravitation influe sur l'écoulement du temps ?

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



Expérience de Hafele et Keating (1971)

Dans le champ gravitationnel de la Terre :

Une horloge atomique à 9 km d'altitude (avion) pendant 48 h a vieilli de 0,15 microseconde de plus qu'une horloge atomique identique restée au sol.

La gravitation influe sur l'écoulement du temps ?

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



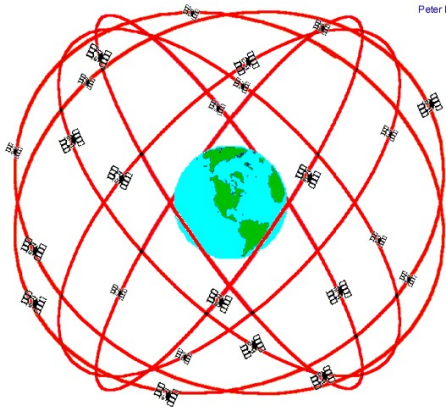
Expérience de Hafele et Keating (1971)

Dans le champ gravitationnel de la Terre :

Une horloge atomique à 9 km d'altitude (avion) pendant 48 h a vieilli de 0,15 microseconde de plus qu'une horloge atomique identique restée au sol.

C'est la relativité générale qui a raison !

Le GPS doit tenir compte de la distorsion temporelle !



Peter H. Dana 9/22/98

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

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

En un jour, la dérive atteint

$\delta t = 46 \mu\text{s}$

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

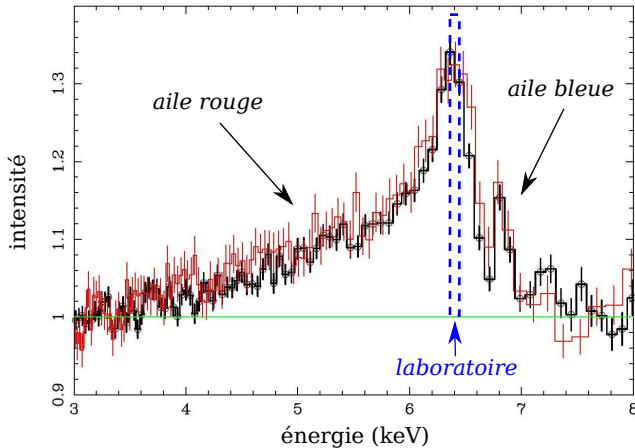
Au voisinage d'un trou noir, l'effet est beaucoup plus marqué !

Un observateur éloigné voit un explorateur proche du trou noir vieillir beaucoup moins vite que lui.

Si l'explorateur décide de franchir l'horizon, l'observateur éloigné le verra "se figer" tout près de l'horizon et ne jamais le traverser. Par contre, du point de vue de l'explorateur, l'horizon est franchi sans encombre en un temps fini.

... et mesuré!

par exemple pour le trou noir supermassif au cœur de la galaxie MCG-6-30-15



Raie $K\alpha$ observée par les satellites XMM-Newton (rouge) et Suzaku (noir) (adapté de [Miller (2007)])

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

Décalage vers le rouge
⇒ basse fréquence
⇒ longue période
⇒ **dilatation des temps**

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel" : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.
- Un trou noir n'est pas un "objet extrêmement dense" : au contraire, il est fait de **vide** (l'horizon est une frontière immatérielle), sauf peut-être en son centre (*singularité*).

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.
- **Un trou noir n'est pas un "objet extrêmement dense"** : au contraire, il est fait de **vide** (l'horizon est une frontière immatérielle), sauf peut-être en son centre (*singularité*).
- **On peut, en théorie, former un trou noir dans un univers vide de toute matière** : par effondrement d'un paquet d'ondes d'espace-temps (*les ondes gravitationnelles*).

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.
- **Un trou noir n'est pas un "objet extrêmement dense"** : au contraire, il est fait de **vide** (l'horizon est une frontière immatérielle), sauf peut-être en son centre (*singularité*).
- **On peut, en théorie, former un trou noir dans un univers vide de toute matière** : par effondrement d'un paquet d'ondes d'espace-temps (*les ondes gravitationnelles*).
- **La singularité centrale marque la limite du domaine d'applicabilité de la relativité générale** : pour la décrire, il faudrait utiliser une théorie plus "fine", sans doute une théorie quantique de la gravitation (pistes actuellement explorées : *théorie des cordes* et *gravité quantique à boucles*).

Quelques propriétés des trous noirs (1/3)

- **Un trou noir n'est pas un "aspirateur universel"** : au delà d'une certaine distance (de l'ordre de grandeur de la taille de l'horizon), la matière peut tout à fait rester en orbite stable autour du trou noir.
- **Un trou noir n'est pas un "objet extrêmement dense"** : au contraire, il est fait de **vide** (l'horizon est une frontière immatérielle), sauf peut-être en son centre (*singularité*).
- **On peut, en théorie, former un trou noir dans un univers vide de toute matière** : par effondrement d'un paquet d'ondes d'espace-temps (*les ondes gravitationnelles*).
- **La singularité centrale marque la limite du domaine d'applicabilité de la relativité générale** : pour la décrire, il faudrait utiliser une théorie plus "fine", sans doute une théorie quantique de la gravitation (pistes actuellement explorées : *théorie des cordes* et *gravité quantique à boucles*).
- **La singularité centrale est inaccessible à l'observation** : elle est cachée sous l'horizon des événements.

Quelques propriétés des trous noirs (2/3)

- **Théorème d'unicité** : en relativité générale, un trou noir est un objet extrêmement régulier : s'il est stationnaire, deux nombres suffisent à le décrire entièrement¹ :
 - sa masse M
 - son moment cinétique J (mesure de son état de rotation)

⇒ “un trou noir n'a pas de cheveux” (John A. Wheeler)
- La **masse d'un trou noir** n'est pas une mesure de la “quantité de matière” à l'intérieur du trou noir, mais un paramètre M qui caractérise son champ de gravitation externe. Elle est mesurable à partir de la période orbitale d'un corps d'épreuve en orbite circulaire à grande distance autour du trou noir.
- Le **moment cinétique** J est également une quantité mesurable, par la précession d'un gyroscope embarqué dans un satellite en orbite lointaine autour du trou noir.

1. La solution mathématique des équations d'Einstein correspondante s'appelle la **solution de Kerr** (1963) ; pour $J = 0$, elle se réduit à la **solution de Schwarzschild** (1916)

Quelques propriétés des trous noirs (3/3)

- Le **rayon d'un trou noir** n'est pas un concept bien défini ; en aucun cas, il ne correspond à la distance entre le "centre" du trou noir (la singularité) et l'horizon. Il vaut mieux le définir à partir de l'aire A de l'horizon. Pour un trou noir statique, $R = \sqrt{A/4\pi}$. Le rayon ainsi défini est proportionnel à la masse : $R = \frac{2GM}{c^2} \simeq 3 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ km}$
- Il existe deux grandes catégories de trous noirs astrophysiques :
 - les **trous noirs stellaires**, restes de supernovæ :
 $M \sim 10 \text{ à } 30 M_{\odot}$ et $R \sim 30 \text{ à } 90 \text{ km}$
exemple : Cyg X-1 : $M = 15 M_{\odot}$ et $R = 45 \text{ km}$
 - les **trous noirs supermassifs**, au centre des galaxies :
 $M \sim 10^5 \text{ à } 10^{10} M_{\odot}$ et $R \sim 3 \times 10^5 \text{ km à } 200 \text{ UA}^2$
exemple : Sgr A* : $M = 4,3 \times 10^6 M_{\odot}$ et
 $R = 13 \times 10^6 \text{ km} = 18 R_{\odot} = 0,09 \text{ UA} = \frac{1}{4} \text{ rayon de l'orbite de Mercure}$

Formation d'un trou noir stellaire

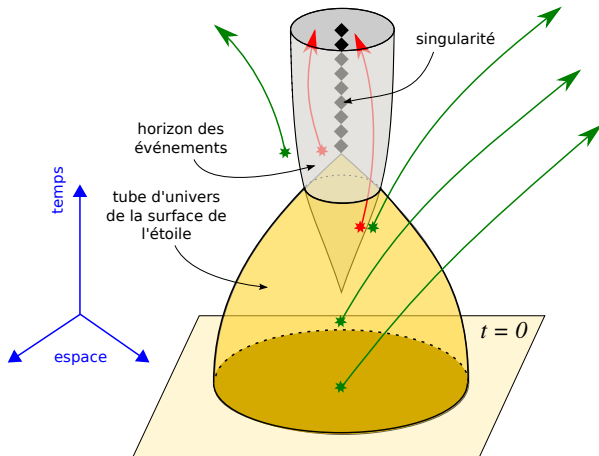


Diagramme d'espace-temps d'un effondrement gravitationnel

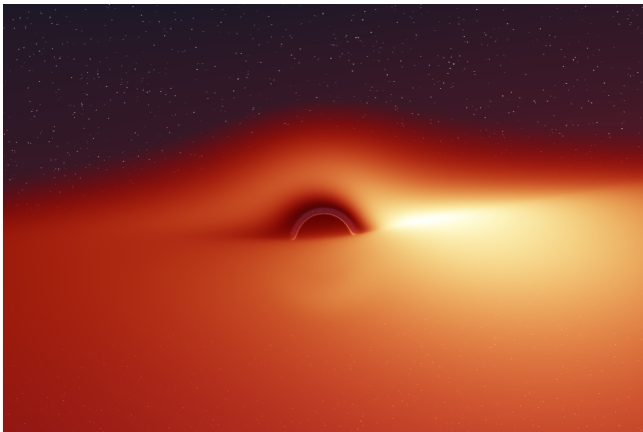
Les étoiles massives terminent leur vie en **supernova** : ce phénomène est déclenché par l'**effondrement gravitationnel** de leur cœur de fer, via un rebond.

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

Le trou noir : une source d'énergie formidable !

Libération d'énergie potentielle gravitationnelle par **accrétion** sur un trou noir : jusqu'à 42% de l'énergie de masse mc^2 de la matière accrétée !

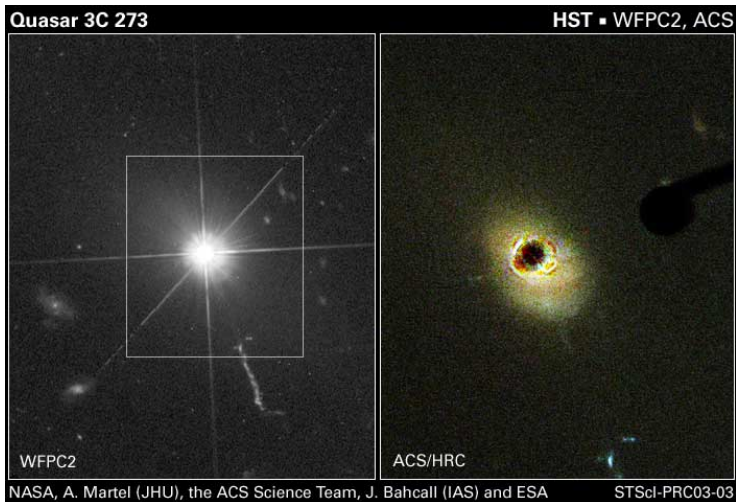
NB : les réactions thermonucléaires libèrent moins de 1% de mc^2



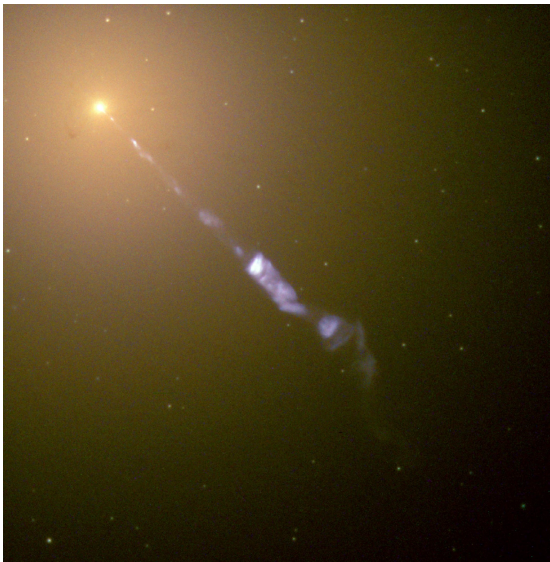
La matière qui tombe sur un trou noir forme un **disque d'accrétion** [Donald Lynden-Bell (1969), Nicolai Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]

Les trous noirs au cœur des quasars



Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

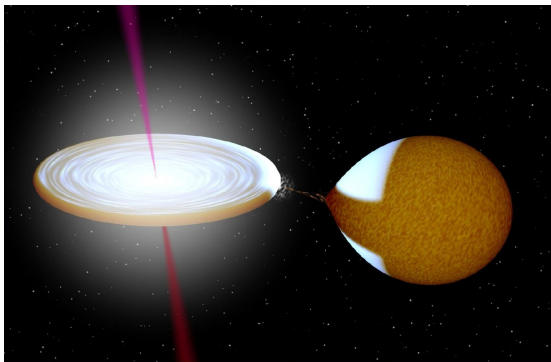


Jet émis par le noyau de la
galaxie elliptique géante M87, au
cœur de l'amas de la Vierge [HST]

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

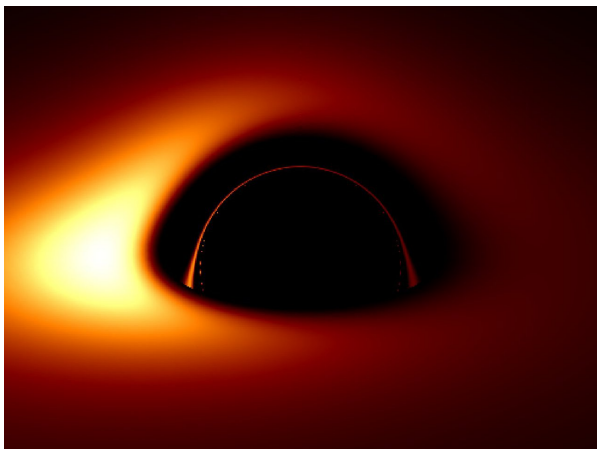
$$V_{\text{jet}} \simeq 0.99 c$$

Trous noirs dans les binaires X



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

Voir la silhouette des trous noirs



Simulation numérique (disque d'accrétion fin)

[Vincent, Paumard, Gourgoulhon & Perrin, CQG 28, 225011 (2011)]

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

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

Viennent ensuite

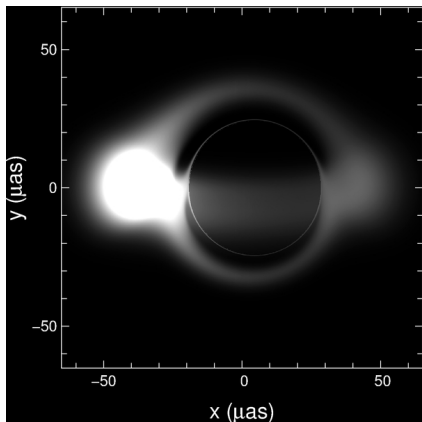
M87 : $D = 21 \mu\text{as}$

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

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

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

Voir la silhouette des trous noirs



Simulation numérique (tore ionisé)

[Straub, Vincent, Abramowicz, Gourgoulhon & Paumard, A&A 543,
A83 (2012)]

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

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

Viennent ensuite

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

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

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

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

Bibliographie

- S. Collin-Zahn, 2009, *Des quasars aux trous noirs*, EDP Sciences
- G. Chardin, 2009, *Le LHC peut-il produire des trous noirs ?*, Le Pommier
- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- E. Gourgoulhon, 2011, *Trous noirs : à la veille d'une nouvelle ère observationnelle*, L'Astronomie **125**, novembre 2011, p. 16
- J.-P. Lasota, 2010, *La science des trous noirs*, Odile Jacob
- J.-P. Luminet, 2006, *Le destin de l'Univers : trous noirs et énergie sombre*, Folio
- J. Paul, 1998, *L'homme qui courait après son étoile*, Odile Jacob
- A. Riazuelo, 2008, *Voyage au cœur d'un trou noir*, DVD Sciences et Avenir ; <http://tinyurl.com/riazuelo>
- K.S. Thorne, 1997, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion
- *Trous noirs*, Dossier Pour la Science **75**, avril-juin 2012