

L'espace, le temps et les trous noirs

Éric Gourgoulhon

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

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

Art, Culture et Patrimoine

Courpière

28 février 2017

- 1 L'espace-temps
- 2 Les trous noirs
- 3 Simulations numériques de trous noirs
- 4 Observer les trous noirs
- 5 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 6 Conclusion

Outline

- 1 L'espace-temps
- 2 Les trous noirs
- 3 Simulations numériques de trous noirs
- 4 Observer les trous noirs
- 5 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 6 Conclusion

L'espace

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

Le temps ne possède qu'*une seule dimension* : passé / futur

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

Exemple : date basée sur le *jour julien* :

nombre de jours écoulés depuis le 1er janvier 4713 av. J.C. à 12 h 00

Date du début de cette conférence :

28 février 2017, 20 h 30 = 2 457 813, 3125 jours juliens

Le temps

Le temps ne possède qu'une seule dimension : passé / futur

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

Exemple : date basée sur le *jour julien* :

nombre de jours écoulés depuis le 1er janvier 4713 av. J.C. à 12 h 00

Date du début de cette conférence :

28 février 2017, 20 h 30 = 2 457 813, 3125 jours juliens

Pourquoi unifier l'espace et le temps ?

Bien avant Einstein...

d'Alembert (1754) : article *dimension* de l'*Encyclopédie* :



“J’ai dit plus haut qu’il n’étoit pas possible de concevoir plus de trois dimensions. Un homme d’esprit de ma connaissance croit qu’on pourroit cependant regarder la durée comme une quatrième dimension, et que le produit du tems par la solidité, seroit en quelque maniere un produit de quatre dimensions.”

Bien avant Einstein...

d'Alembert (1754) : article *dimension* de l'*Encyclopédie* :



“J’ai dit plus haut qu’il n’étoit pas possible de concevoir plus de trois dimensions. Un homme d’esprit de ma connaissance croit qu’on pourroit cependant regarder la durée comme une quatrième dimension, et que le produit du tems par la solidité, seroit en quelque maniere un produit de quatre dimensions.”

Lagrange (1797) : *Traité des fonctions analytiques* :



“Ainsi on peut regarder la mécanique comme une géométrie à quatre dimensions, et l’analyse mécanique comme une extension de l’analyse géométrique.”

Union mathématique de l'espace et du temps

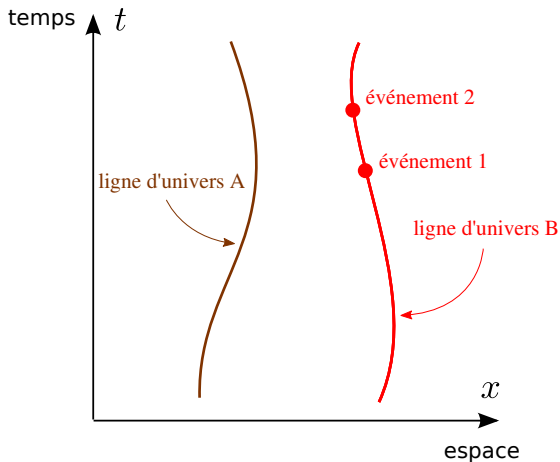
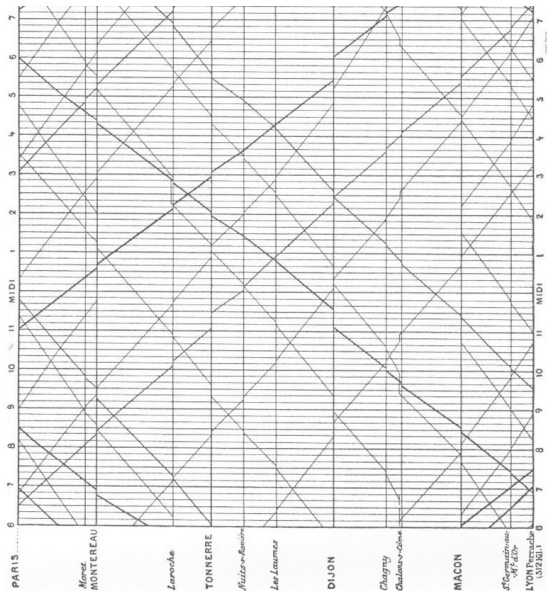


Diagramme d'espace-temps

- Dans l'espace :
→ une particule est représentée par un **point**
- Dans l'espace-temps :
→ une particule est représentée par une **ligne continue**, appelée **ligne d'univers**
→ un **événement** correspond à un **point**

Un diagramme d'espace-temps de 1878 !

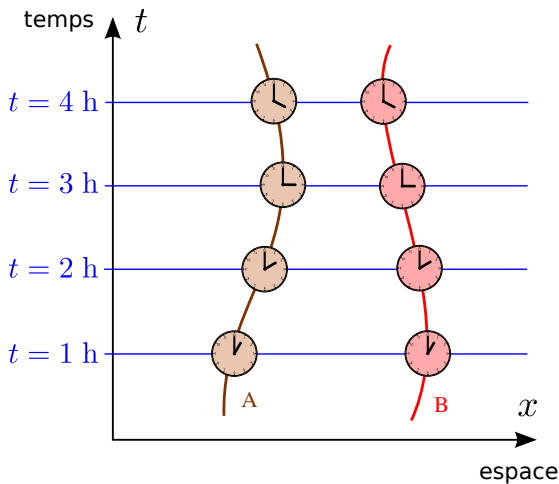


Lignes d'univers des trains Paris-Lyon

Étienne Jules Marey
(1830-1904) : *La Méthode
graphique dans les sciences
expérimentales* (1878)
"d'après la méthode de M. Ibry"

La **pen**te est proportionnelle à
l'inverse de la **vit**esse

L'espace-temps newtonien



L'espace-temps newtonien est doté d'une structure universelle :

temps absolu t

“Le temps absolu, vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, coule uniformément, et s'appelle durée.”



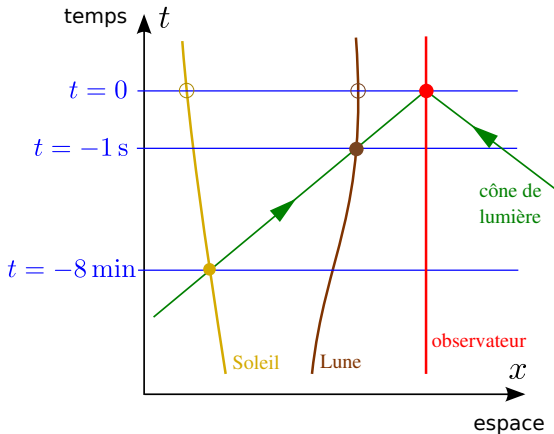
Isaac Newton,
Principia Mathematica
(1687)

Tous les observateurs mesurent le même temps

Description mathématique :

$$\mathcal{E} = \mathbb{R}^4 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}^3$$

Mélanger le temps et l'espace a-t-il un sens physique ?



Percevons-nous l'espace absolu au temps $t = 0$?

Non : nous ne voyons que le **cône de lumière passé**

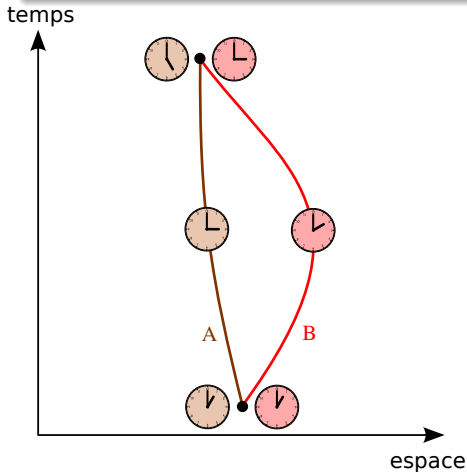
Ainsi, même dans le cadre newtonien, en admettant une vitesse finie de propagation de la lumière, **nous ne percevons pas l'espace indépendamment du temps.**

1905 : une révolution en physique !

Relativité restreinte (Albert Einstein)

Il n'y a pas de temps absolu.

Chaque observateur mesure son **temps propre**.



Deux observateurs en mouvement relatif ne s'accordent pas forcément sur le temps propre écoulé entre deux événements.

relativité du temps

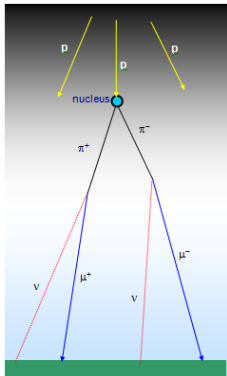
⇒ paradoxe des jumeaux (voyageur de Langevin)

Preuve expérimentale de la relativité du temps

Pourquoi n'avait-on jamais perçu la multiplicité des temps propres ?

C'est parce que dans la vie quotidienne, les vitesses entre les différents observateurs sont faibles devant la vitesse de la lumière :

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$



Mesure de la durée de vie des muons

Muons (μ^-) produits dans les hautes couches de l'atmosphère par l'interaction des rayons cosmiques sur les atomes d'azote et d'oxygène

Durée de vie moyenne d'un muon au repos : $\tau_0 = 2,2 \mu\text{s}$

Distance moyenne parcourue $d = c\tau_0 \simeq 600\text{m}$

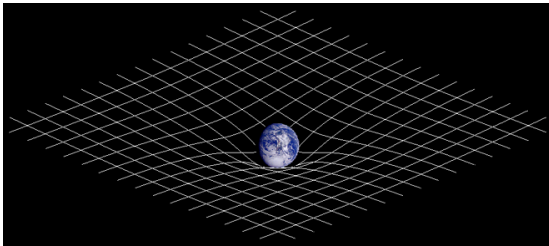
\Rightarrow aucun muon ne devrait atteindre le sol

Frisch & Schmidt (1963) : $\tau_{\text{obs}} \simeq 8\tau_0$ ($V = 0.995 c$)

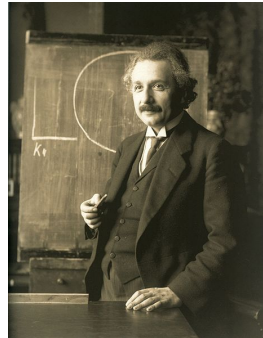
source : Keith Gibbs

L'espace-temps relativiste

- 1915 : Albert Einstein incorpore la gravitation dans la relativité, en construisant la **relativité générale** sur le concept d'espace-temps courbe

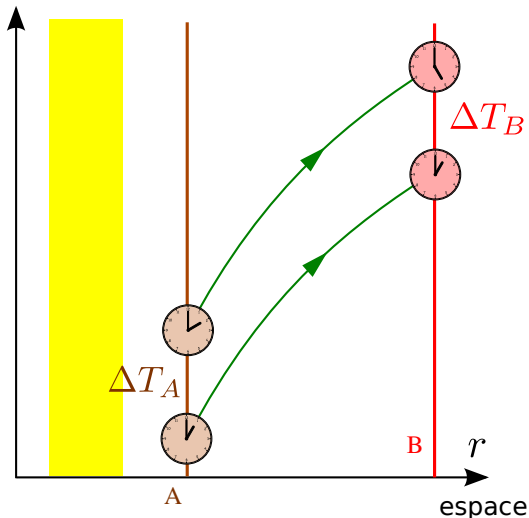


La relativité générale décrit la gravitation comme la **courbure de l'espace-temps**



Dilatation des temps gravitationnelle

temps



Dilatation apparente des temps
au voisinage d'un corps massif

Si B est loin :

$$\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} = \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r_A}}$$

pour des corps peu relativistes
(Terre, Soleil) :

$$\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} \simeq 1 - \frac{GM}{c^2 r_A}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

La gravitation a-t-elle une influence sur le temps ?

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

La gravitation a-t-elle une influence sur le 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 a-t-elle une influence sur le 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 !

La gravitation a-t-elle une influence sur le temps ?

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



Expérience de Hafele et Keating (1971)

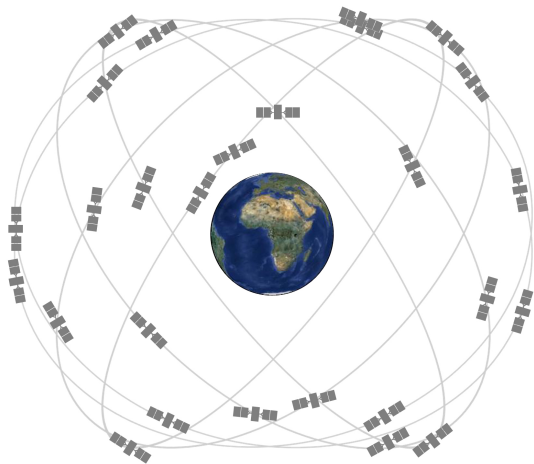
Dans le champ gravitationnel de la Terre :

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 !

Aujourd'hui le décalage temporel gravitationnel est mesuré en laboratoire à l'aide d'**horloges atomiques optiques** pour des différences d'altitude aussi petites que 30 cm !

Le GPS doit tenir compte de la distorsion temporelle !



[gps.gov]

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

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

En un jour, la dérive atteint

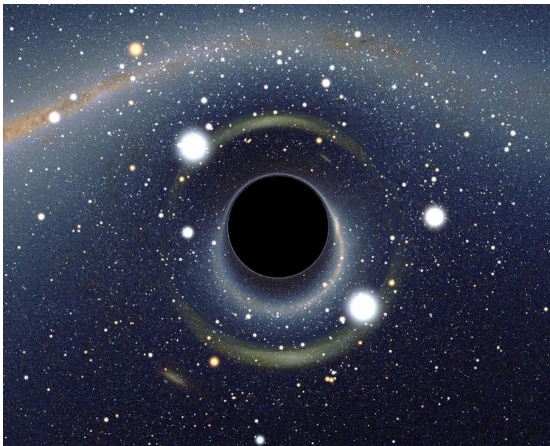
$\delta t = 46 \mu s$

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

Outline

- 1 L'espace-temps
- 2 Les trous noirs**
- 3 Simulations numériques de trous noirs
- 4 Observer les trous noirs
- 5 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 6 Conclusion

Qu'est-ce qu'un trou noir ?



[Alain Riazuelo, 2007]

Une définition en quelques mots :

Un **trou noir** est une région de l'espace-temps d'où rien, pas même 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 pour la mécanique 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 pour la mécanique newtonienne (J. Michell 1783, Laplace 1796) :

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

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

Théorie de Newton de la gravitation :

la **vitesse de libération** d'un corps de masse M et de

rayon R est

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

avec $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ (constante de Newton)

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

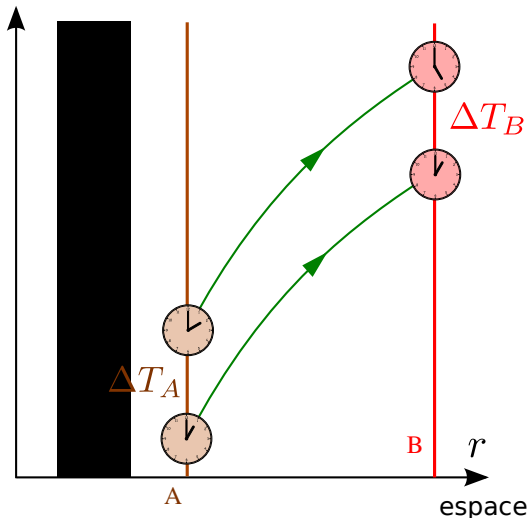
La lumière ne s'échappe pas si

$$V_{\text{lib}} > c \simeq 300\,000 \text{ km/s}$$



Dilatation des temps au voisinage d'un trou noir

temps



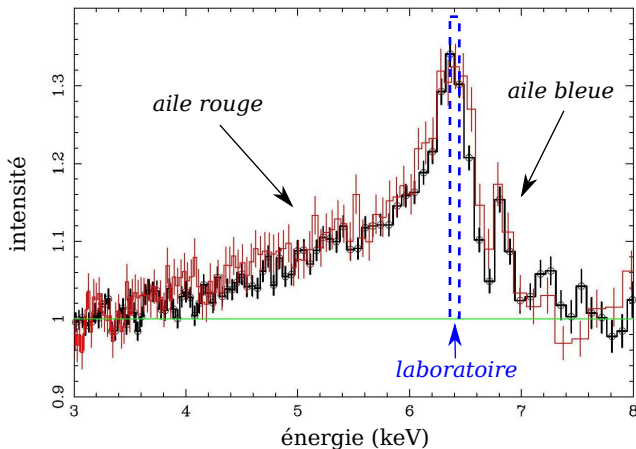
Un observateur éloigné voit un explorateur proche du trou noir vieillir beaucoup moins vite que lui : $\Delta T_A \ll \Delta T_B$

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.

Dilatation des temps au voisinage d'un trou noir

L'effet est mesuré : par exemple, au cœur de la galaxie MCG-6-30-15



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
 \Rightarrow basse fréquence
 \Rightarrow longue période
 \Rightarrow **dilatation des temps**

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

Le futur : **Athena** (ESA)

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*). Si l'on définit une "densité moyenne" par $\bar{\rho} = M/(4/3\pi R^3)$, alors

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*). Si l'on définit une "densité moyenne" par $\bar{\rho} = M/(4/3\pi R^3)$, alors
 - pour le trou noir au centre de notre galaxie (Sgr A*) : $\bar{\rho} \sim 10^6 \text{ kg m}^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \times$ la densité d'une naine blanche

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*). Si l'on définit une "densité moyenne" par $\bar{\rho} = M/(4/3\pi R^3)$, alors
 - pour le trou noir au centre de notre galaxie (Sgr A*) : $\bar{\rho} \sim 10^6 \text{ kg m}^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \times$ la densité d'une naine blanche
 - pour le trou noir au centre de la galaxie M87 : $\bar{\rho} \sim 2 \text{ kg m}^{-3} = 1/500^{\text{e}}$ de la densité de l'eau !

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*). Si l'on définit une "densité moyenne" par $\bar{\rho} = M/(4/3\pi R^3)$, alors
 - pour le trou noir au centre de notre galaxie (Sgr A*) : $\bar{\rho} \sim 10^6 \text{ kg m}^{-3} = 2 \cdot 10^{-4} \times$ la densité d'une naine blanche
 - pour le trou noir au centre de la galaxie M87 : $\bar{\rho} \sim 2 \text{ kg m}^{-3} = 1/500^{\text{e}}$ de la densité de l'eau !
- **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 (2/3)

Théorème d'unicité (absence de chevelure)

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

En relativité générale (en dimension 4), un trou noir stationnaire est entièrement décrit par seulement deux nombres^a :

- sa *masse* M
- son *moment cinétique* J (mesure l'état de rotation)

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

Quelques propriétés des trous noirs (2/3)

Théorème d'unicité (absence de chevelure)

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

En relativité générale (en dimension 4), un trou noir stationnaire est entièrement décrit par seulement deux nombres^a :

- sa *masse* M
- son *moment cinétique* J (mesure l'état de rotation)

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

⇒ Un trou noir est un objet extrêmement régulier :
il "*n'a pas de cheveux*" (John A. Wheeler)

Quelques propriétés des trous noirs (3/3)

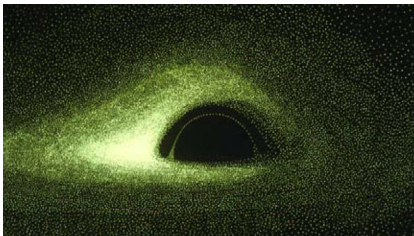
- La **masse d'un trou noir** n'est pas une mesure de la "quantité de matière" à l'intérieur du trou noir, mais un paramètre M qui caractérise son *champ de gravitation externe*. M est mesurable : période orbitale d'un corps d'épreuve en orbite circulaire autour du trou noir.
- Le **moment cinétique** J est également une quantité mesurable : précession d'un gyroscope en orbite autour du trou noir.
- 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 : $R = \frac{2GM}{c^2} \simeq 3 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ km}$

Outline

- 1 L'espace-temps
- 2 Les trous noirs
- 3 Simulations numeriques de trous noirs**
- 4 Observer les trous noirs
- 5 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 6 Conclusion

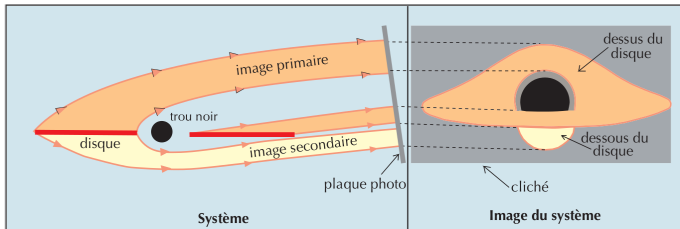
Voir un trou noir ?

Par définition, un trou noir n'est pas *directement* observable, mais sa **silhouette** l'est s'il est entouré de matière (disque d'accrétion) ou est observé sur un fond étoilé



Première image calculée de la silhouette
calculée par J.-P. Luminet

[Luminet, A&A 75, 228 (1979)]

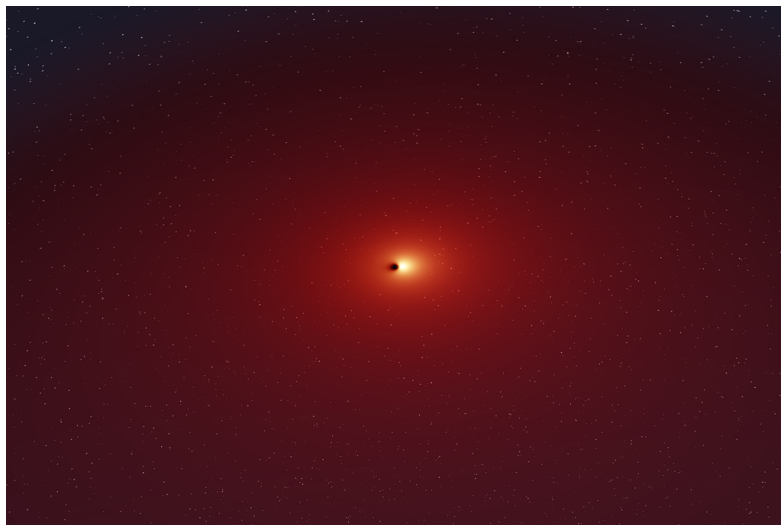


Trajectoire des
rayons lumineux et
formation de l'image

<http://luth.obspm.fr/~luminet/>

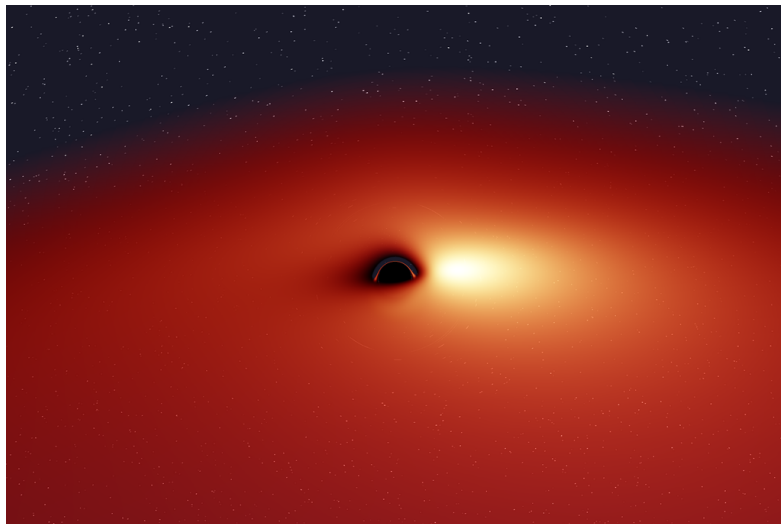
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



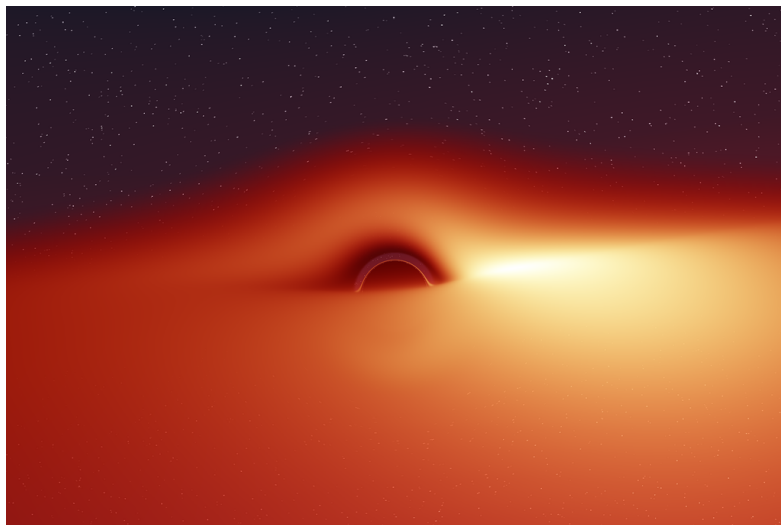
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



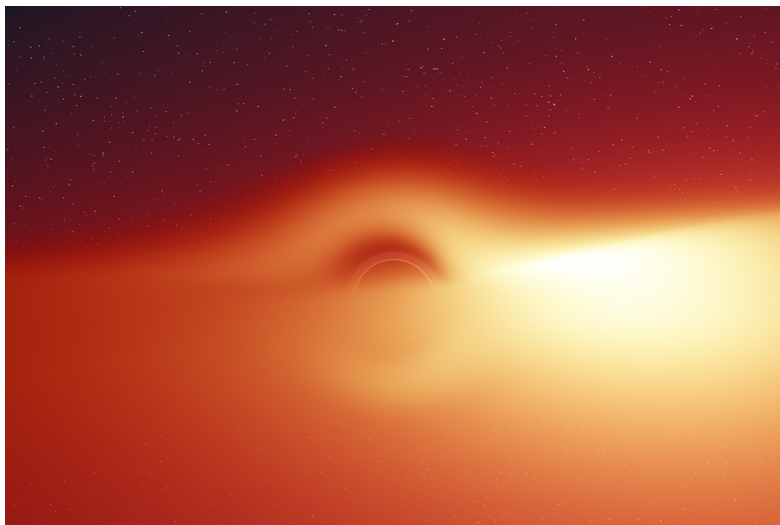
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



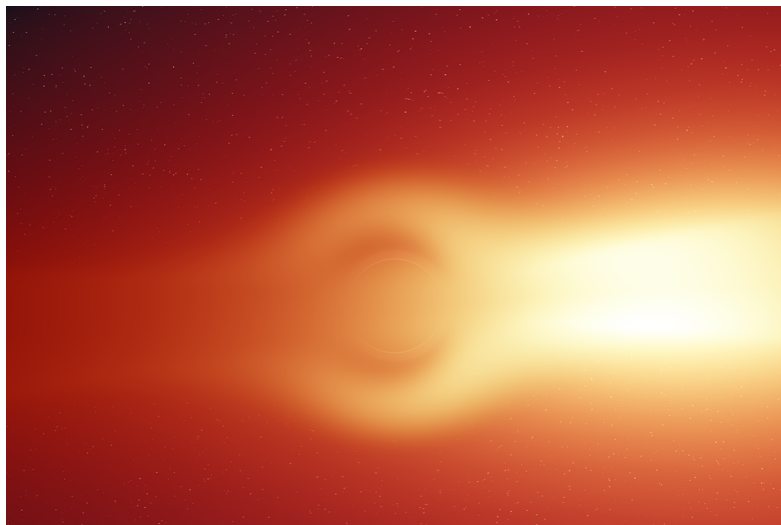
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



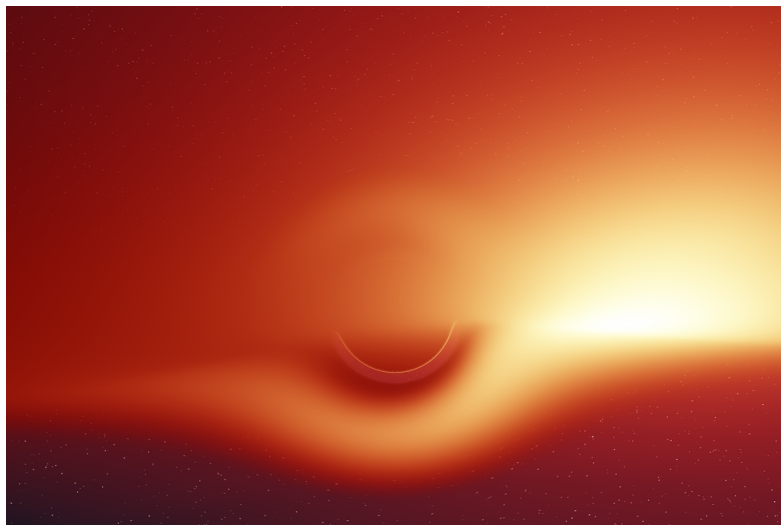
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



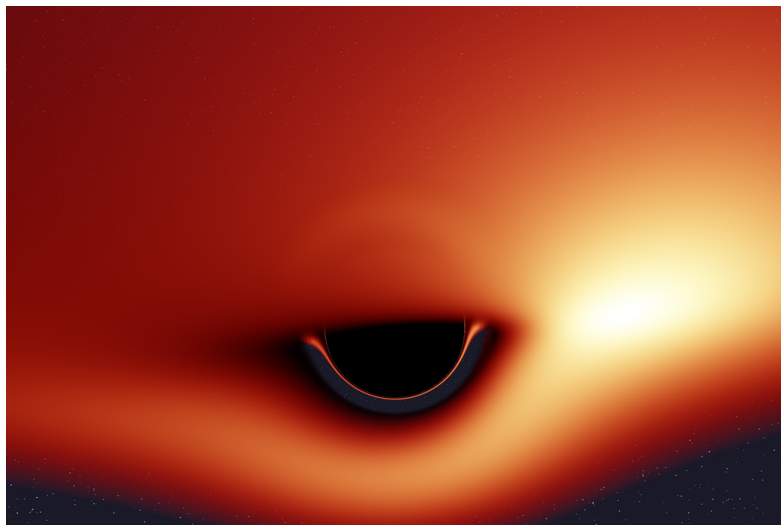
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



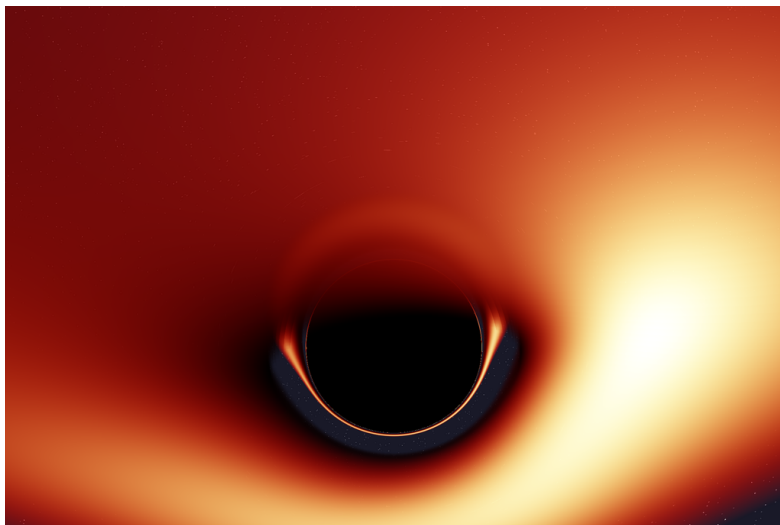
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



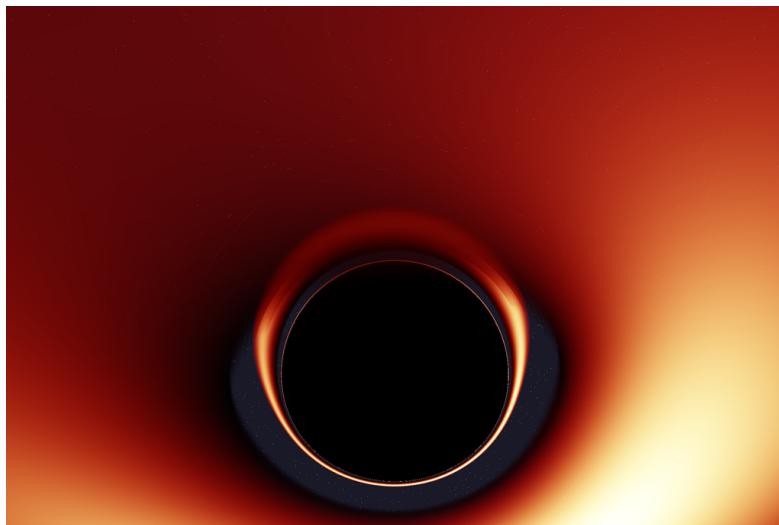
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



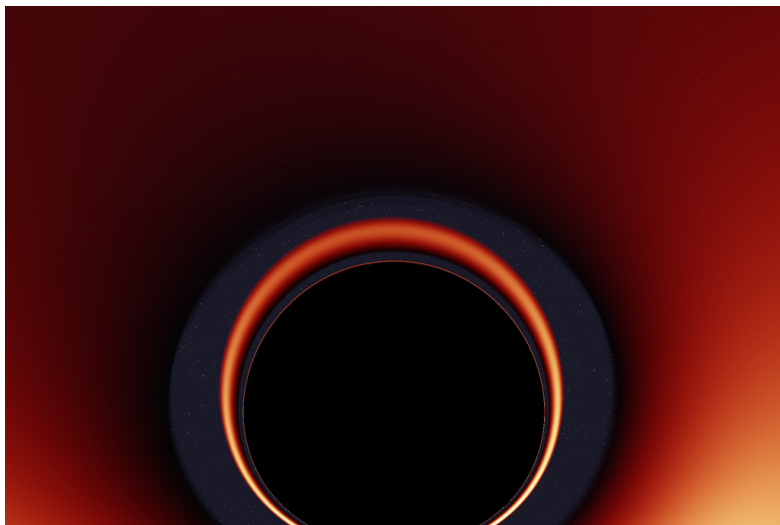
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



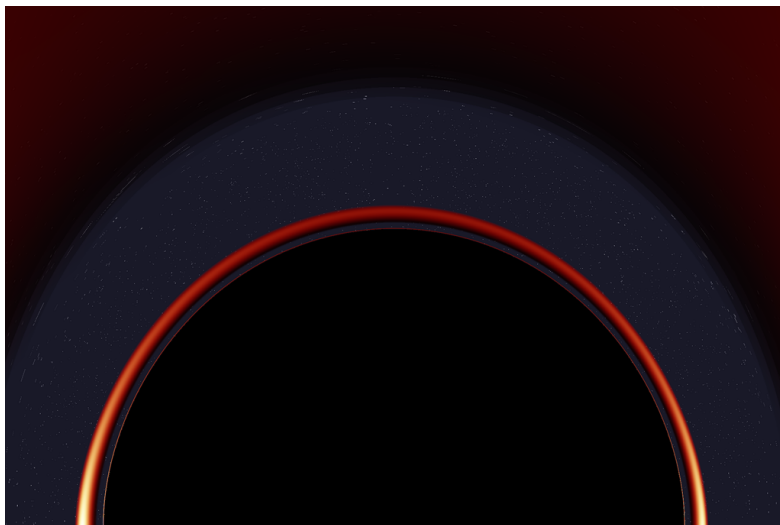
Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]

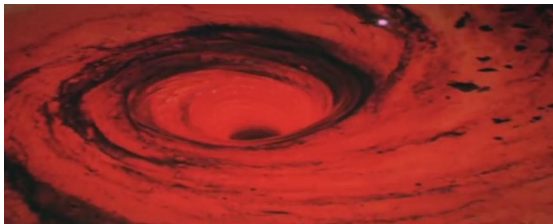


Vol vers un trou noir

Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]



Les trous noirs au cinéma



(c) Walt Disney Pictures

Le Trou Noir

Gary Nelson (1979)

produit par Walt Disney

Image d'un "maelstrom cosmique" très peu réaliste : aucun effet de mirage gravitationnel

→ seul l'effet attractif du trou noir est mis en avant

Les trous noirs au cinéma



(c) Warner Bros. Pictures

Interstellar

Christopher Nolan (2014)

Image calculée suivant les équations de la relativité générale fournies par Kip Thorne (CalTech)

- Tous les effets de mirage gravitationnel sont là
- Les effets de dilatation temporelle sont bien mis en avant dans le film
- Il manque toutefois l'effet Doppler pour que l'image soit pleinement réaliste

Les trous noirs au cinéma

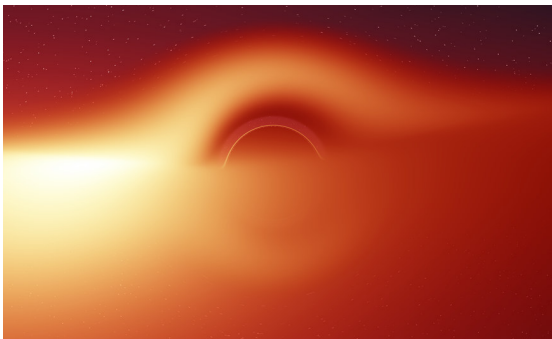


Image calculée par J.-A. Marck (1996)

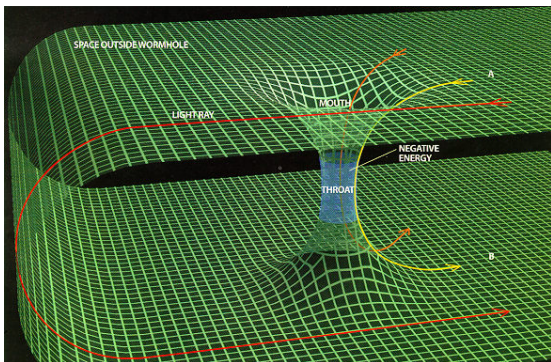
Interstellar
Christopher Nolan (2014)

- Tous les effets de mirage gravitationnel sont là
- Les effets de dilatation temporelle sont bien mis en avant dans le film
- Il manque toutefois l'effet Doppler pour que l'image soit pleinement réaliste

Les trous de ver

Un **trou de ver** est une structure de l'espace-temps, qui relie deux régions distinctes, constituant ainsi un "raccourci".

Bien qu'hypothétique, il s'agit d'une solution parfaitement valide des équations de la relativité générale.



Un trou de ver se distingue d'un trou noir par

- l'**absence d'horizon** : on peut en sortir en faisant demi-tour
- la nécessité de **matière exotique** pour tapisser ses parois
- **pas de processus astrophysique** de formation connu

Matière exotique : matière à densité d'énergie négative

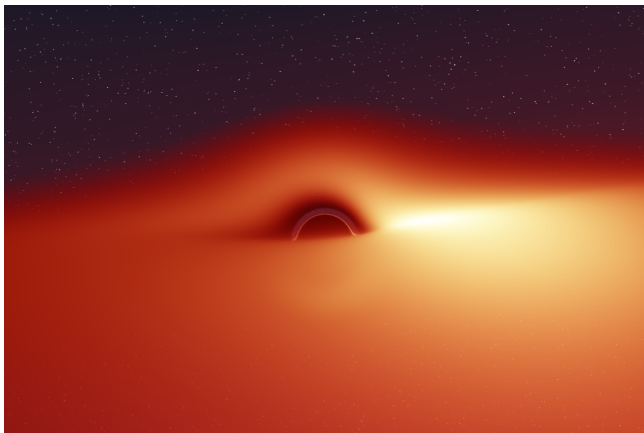
Outline

- 1 L'espace-temps
- 2 Les trous noirs
- 3 Simulations numériques de trous noirs
- 4 Observer les trous noirs**
- 5 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 6 Conclusion

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), Nicolaï Shakura & Rachid Sunayev (1973)]

[J.-A. Marck (1996)]

Les trous noirs dans le ciel

Il existe deux grandes catégories de trous noirs astrophysiques :

- les **trous noirs stellaires**, restes de supernovæ :

$$M \sim 10 \text{ à } 30 M_{\odot} \text{ et } R \sim 30 \text{ à } 90 \text{ km}$$

$$\text{exemple : Cyg X-1 : } M = 15 M_{\odot} \text{ et } R = 45 \text{ km}$$

- les **trous noirs supermassifs**, au centre des galaxies :

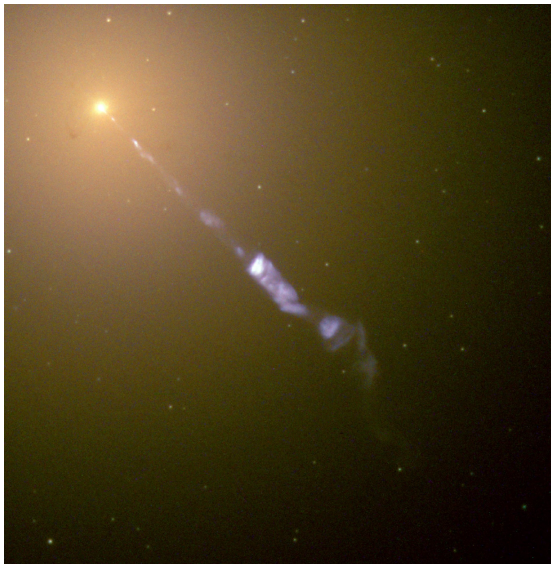
$$M \sim 10^5 \text{ à } 10^{10} M_{\odot} \text{ et } R \sim 3 \times 10^5 \text{ km à } 200 \text{ UA}^1$$

$$\text{exemple : Sgr A* : } M = 4,3 \times 10^6 M_{\odot} \text{ et}$$

$$R = 13 \times 10^6 \text{ km} = 18 R_{\odot} = 0,09 \text{ UA} = \frac{1}{4} \text{ rayon de l'orbite de Mercure}$$

1. UA = unité astronomique \simeq distance Terre-Soleil

Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

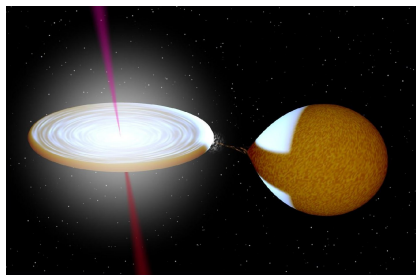
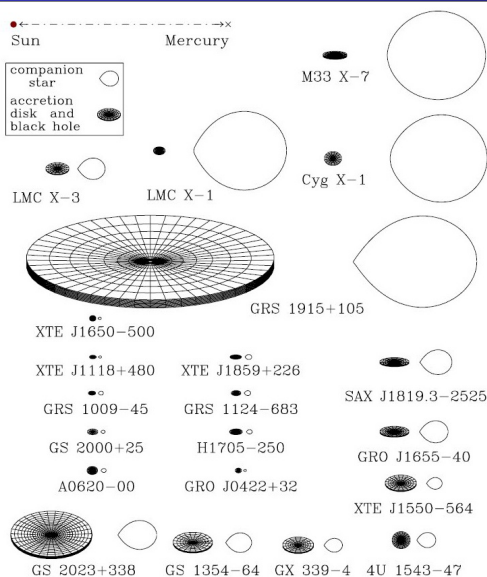


Jet émis par le noyau de la
galaxie elliptique géante M87, au
cœur de l'amas de la Vierge [HST]

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

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

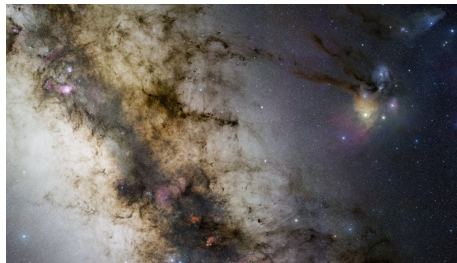
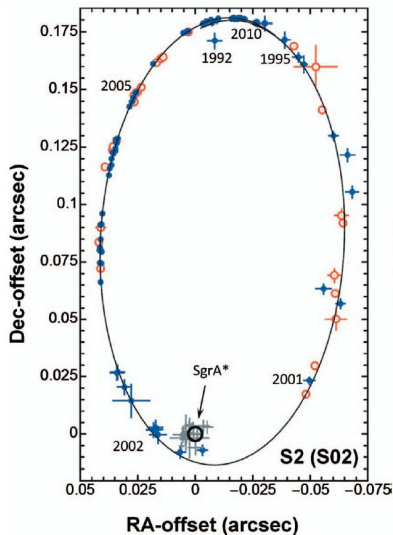
Trous noirs dans les binaires X



Une vingtaine de trous noirs identifiés dans notre galaxie

[McClintock et al. (2011)]

Le trou noir au cœur de notre galaxie : Sgr A*



[ESO (2009)]

Détection via la dynamique stellaire :

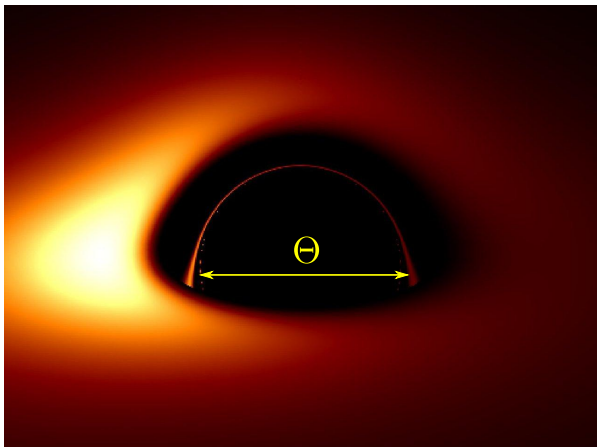
$$\Rightarrow M_{\text{t.n.}} = 4.3 \times 10^6 M_{\odot}$$

← Orbite de l'étoile S2 autour de Sgr A* :

$$P = 16 \text{ ans}, \quad r_{\text{per}} = 120 \text{ UA} = 1400 R_{\text{S}}, \\ V_{\text{per}} = 0.02 c$$

[Genzel, Eisenhauer & Gillessen, RMP 82, 3121 (2010)]

Peut-on 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* : $\Theta = 53 \mu\text{as}$

Viennent ensuite

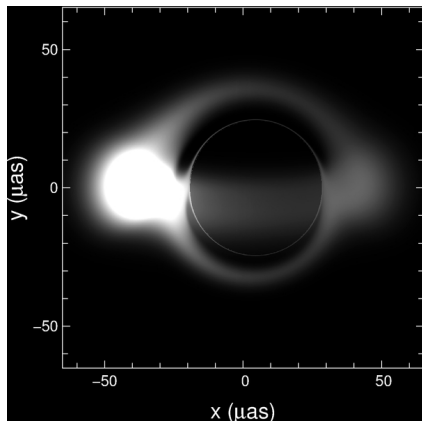
M87 : $\Theta = 21 \mu\text{as}$

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

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

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

Peut-on 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* : $\Theta = 53 \mu\text{as}$

Viennent ensuite

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

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

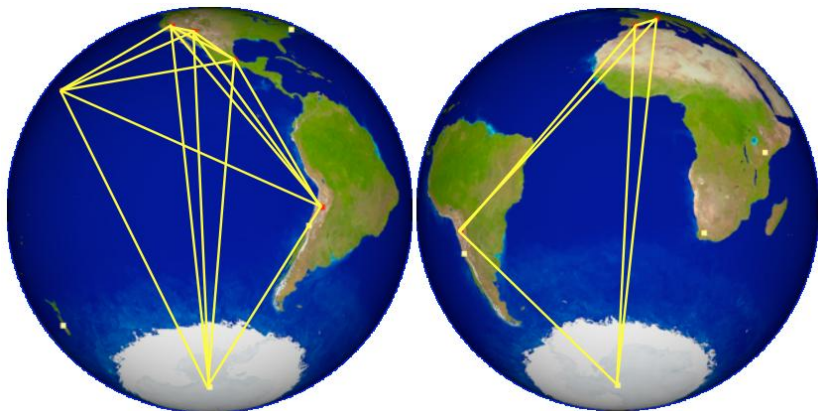
Rem. 1 : Les trous noirs dans les binaires X sont $\sim 10^5$ fois plus petits car $\Theta \propto M/d$

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

L'Event Horizon Telescope

Interférométrie à très grande base (VLBI) en ondes (sub)millimétriques

⇒ un télescope de taille planétaire !

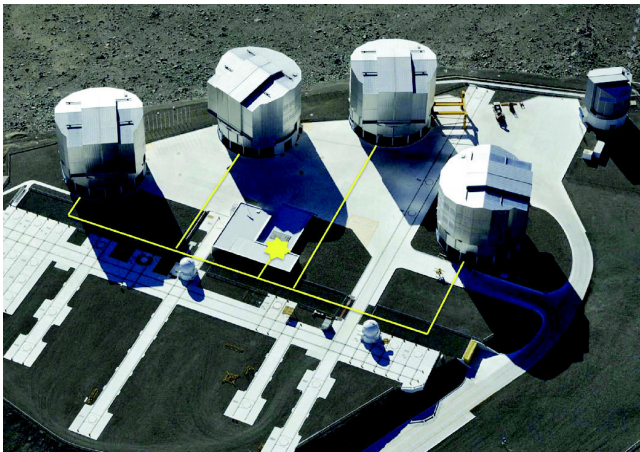


L'Event Horizon Telescope



Atacama Large Millimeter Array (ALMA)
inauguré en mars 2013

Interférométrie optique (infra-rouge)



[Gillessen et al. 2010]

Instrument GRAVITY au VLT (2016)

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

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

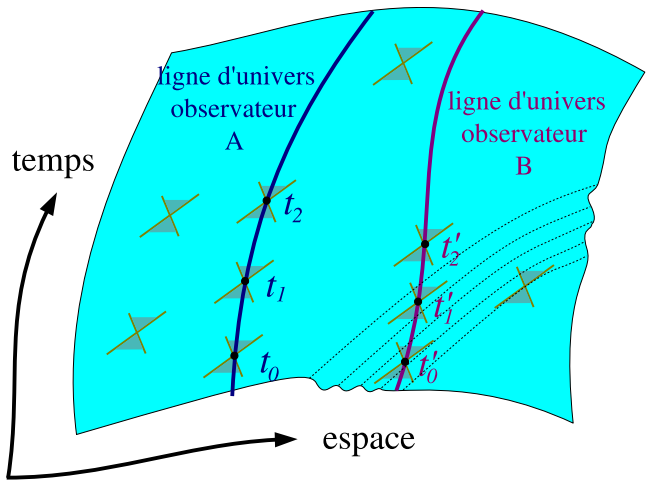
En cours de test !

Outline

- 1 L'espace-temps
- 2 Les trous noirs
- 3 Simulations numériques de trous noirs
- 4 Observer les trous noirs
- 5 “Voir” les trous noirs par les ondes gravitationnelles**
- 6 Conclusion

Les ondes gravitationnelles

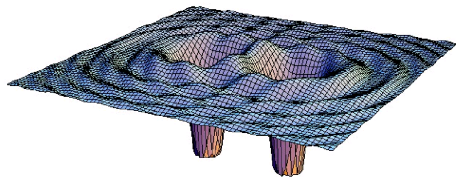
Des petites oscillations dans la courbure...



Les ondes gravitationnelles

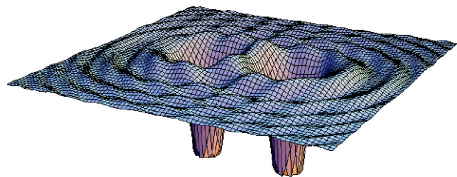
Les **ondes gravitationnelles**

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps



Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

Les ondes gravitationnelles

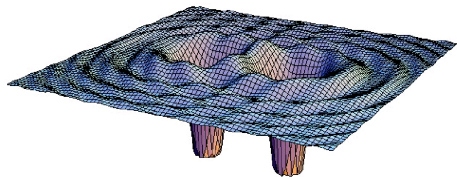


Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

Les **ondes gravitationnelles**

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- sont engendrées par l'accélération de la matière

Les ondes gravitationnelles

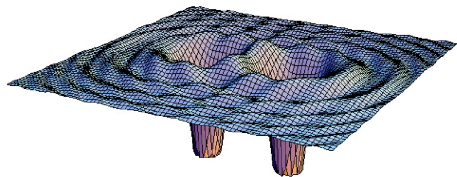


Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

Les **ondes gravitationnelles**

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- sont engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière

Les ondes gravitationnelles

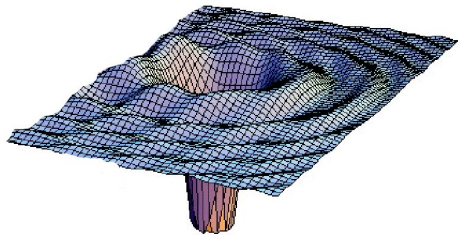


Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

Les **ondes gravitationnelles**

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

Les ondes gravitationnelles pour “voir” les trous noirs



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)

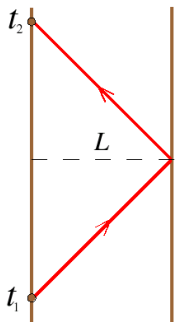
En particulier, trous noirs et ondes gravitationnelles sont tous deux des **solutions du vide** des équations de la Relativité Générale (équations d'Einstein)

Effets du passage d'une onde gravitationnelle



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** : $h \sim 10^{-21}$!!!

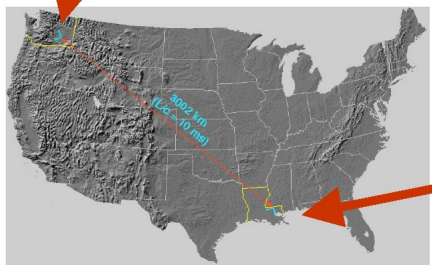
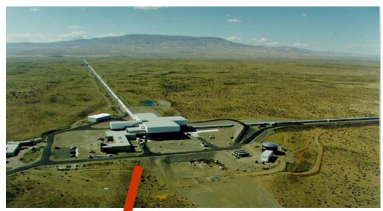
Détection des ondes gravitationnelles sur Terre



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

Interféromètres LIGO

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

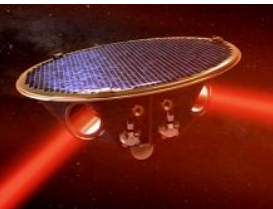


Livingston (L1=4km)



Projet spatial LISA (ESA)

Détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles dans l'espace



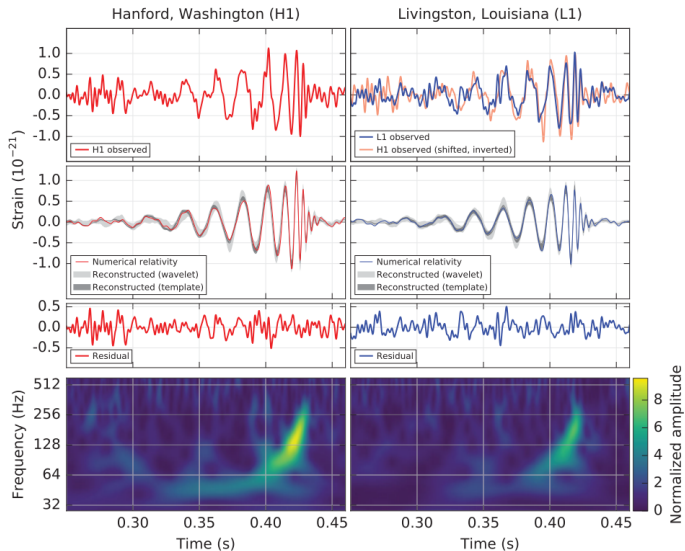
[eLISA / NGO]

- sélectionné par l'ESA en 2013 (mission L3^a)
- lancement vers 2028
- démonstrateur technologique **LISA Pathfinder** lancé le 3 décembre 2015 ; résultats annoncés en juin 2016 : **succès !**

a. mission L2 : Athena \implies également les trous noirs comme objectif !

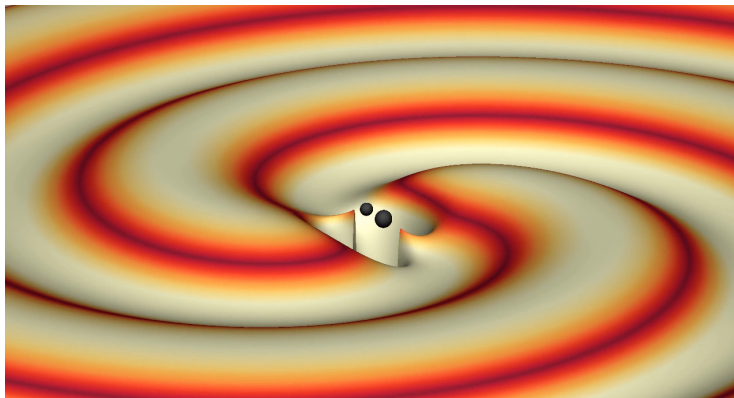


14 septembre 2015, 09 h 50 min 45 s UTC



[Abbott et al., PRL 116, 061102 (2016)]

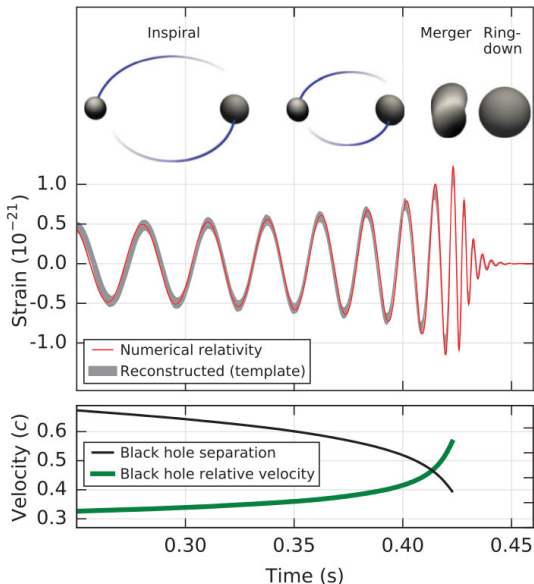
L'événement GW150914



Simulation numérique réalisée en résolvant les équations d'Einstein par ordinateur

[SXS Project]

L'événement GW150914



Signal :

$$\Delta t = 0.2 \text{ s}$$

$$f : 35 \rightarrow 250 \text{ Hz}$$

$$h_{\text{max}} = 1.0 \cdot 10^{-21}$$

Filtre adapté :

$$S/N = 24$$

$$F_{\text{f.al.}} = 1/203,000 \text{ yr}$$

$$M_1 = 36 \pm 5 M_{\odot}$$

$$M_2 = 29 \pm 4 M_{\odot}$$

$$d = 410 \pm 180 \text{ Mpc}$$

$$z = 0.09 \pm 0.04$$

$$M_{\text{final}} = 62 \pm 4 M_{\odot}$$

$$\Rightarrow E_{\text{rad}}^{\text{GW}} = 3.0 \pm 0.5 M_{\odot} c^2$$

$$a_1 < 0.7, a_2 < 0.9$$

$$a_{\text{final}} = 0.67 \pm 0.07$$

[Abbott et al., PRL 116, 061102

(2016)]

Outline

- 1 L'espace-temps
- 2 Les trous noirs
- 3 Simulations numériques de trous noirs
- 4 Observer les trous noirs
- 5 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 6 Conclusion**

Conclusion

- Les trous noirs font aujourd'hui partie du **bestiaire standard de l'astrophysique**, au même titre que les planètes, les étoiles et les galaxies

Conclusion

- Les trous noirs font aujourd'hui partie du **bestiaire standard de l'astrophysique**, au même titre que les planètes, les étoiles et les galaxies
- La théorie des trous noirs, qui repose sur la **relativité générale**, est très bien établie ; elle conduit à des prédictions étonnantes, mais **vérifiées expérimentalement** dans des conditions moins extrêmes (dilatation des temps au voisinage de la Terre ; déviation des rayons lumineux)

Conclusion

- Les trous noirs font aujourd'hui partie du **bestiaire standard de l'astrophysique**, au même titre que les planètes, les étoiles et les galaxies
- La théorie des trous noirs, qui repose sur la **relativité générale**, est très bien établie ; elle conduit à des prédictions étonnantes, mais **vérifiées expérimentalement** dans des conditions moins extrêmes (dilatation des temps au voisinage de la Terre ; déviation des rayons lumineux)
- Le trou noir le plus étudié aujourd'hui est celui du centre de notre Galaxie, Sgr A* (VLT/GRAVITY) ; on devrait avoir dans les années qui viennent les **premières images de sa silhouette !** (EHT)

Conclusion

- Les trous noirs font aujourd'hui partie du **bestiaire standard de l'astrophysique**, au même titre que les planètes, les étoiles et les galaxies
- La théorie des trous noirs, qui repose sur la **relativité générale**, est très bien établie ; elle conduit à des prédictions étonnantes, mais **vérifiées expérimentalement** dans des conditions moins extrêmes (dilatation des temps au voisinage de la Terre ; déviation des rayons lumineux)
- Le trou noir le plus étudié aujourd'hui est celui du centre de notre Galaxie, Sgr A* (VLT/GRAVITY) ; on devrait avoir dans les années qui viennent les **premières images de sa silhouette** ! (EHT)
- Les **ondes gravitationnelles**, détectées pour la première fois en 2015, ouvrent une nouvelle fenêtre observationnelle sur les trous noirs !

Bibliographie

- P. Binétruy, 2015, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, Dunod
- S. Collin-Zahn, 2009, *Des quasars aux trous noirs*, EDP Sciences
- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- N. Deruelle, 2015, *De Pythagore à Einstein, tout est nombre*, Belin
- 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
- A. Riazuelo, 2016, *Les trous noirs : à la poursuite de l'invisible*, Vuibert
video : <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/bh/vuibert>
- P. Spagnou, 2017, *Les mystères du temps*, CNRS Éditions
- K.S. Thorne, 1997, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion

À propos de ce document

Cette présentation a été réalisée entièrement à l'aide de **logiciels libres** :



Linux

système d'exploitation (Ubuntu)



traitement de texte



Inkscape

dessin vectoriel

April : <https://www.april.org/>
Promouvoir et défendre le logiciel libre