

# Trous noirs et ondes gravitationnelles

Éric Gourgoulhon

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

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

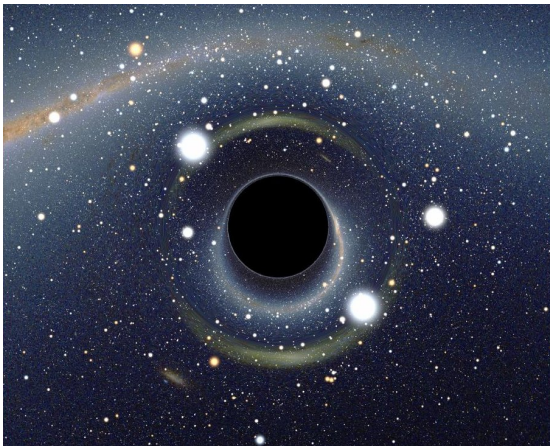
**Fête de la Science**  
Tours  
13 octobre 2016

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 L'espace-temps
- 3 Les trous noirs en relativité générale
- 4 Simulations d'images de trous noirs
- 5 Observer les trous noirs
- 6 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 7 Conclusion

# Outline

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 L'espace-temps
- 3 Les trous noirs en relativité générale
- 4 Simulations d'images de trous noirs
- 5 Observer les trous noirs
- 6 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 7 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

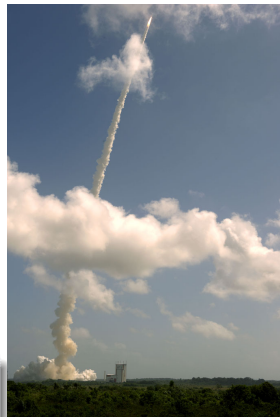
$$V_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

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

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



# La préhistoire des trous noirs...

$$\boxed{V_{\text{lib}} > c} \iff \underbrace{\frac{GM}{c^2 R}}_C > \frac{1}{2} \iff \frac{G}{c^2 R} \times \underbrace{\frac{4}{3}\pi R^3 \rho}_M > \frac{1}{2} \iff \boxed{R > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G \rho}}}$$

## 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

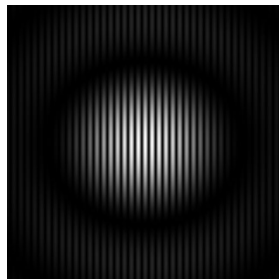
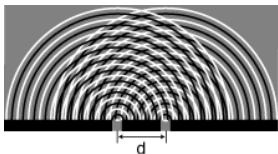
## Pierre Simon de Laplace (1796)

*“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

- Pas de rôle privilégié de la vitesse de la lumière en théorie newtonienne : rien n'interdit  $V > c$
- $V_{\text{lib}} \sim c \implies$  énergie du champ gravitationnel  $\sim$  énergie de masse  $Mc^2$   
 $\implies$  théorie *relativiste* de la gravitation nécessaire !

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

# Limites du concept newtonien de trou noir

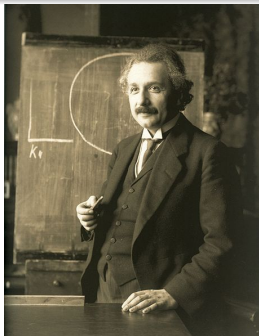
- Pas de rôle privilégié de la vitesse de la lumière en théorie newtonienne : rien n'interdit  $V > c$
- $V_{\text{lib}} \sim c \implies$  énergie du champ gravitationnel  $\sim$  énergie de masse  $Mc^2$   
 $\implies$  théorie *relativiste* de la gravitation nécessaire !

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

$$R - \frac{1}{2}Rg = \frac{8\pi G}{c^4} T$$

(A. Einstein, novembre 1915)

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



# Outline

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 L'espace-temps**
- 3 Les trous noirs en relativité générale
- 4 Simulations d'images de trous noirs
- 5 Observer les trous noirs
- 6 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 7 Conclusion

# Qu'est-ce que *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.

# Qu'est-ce que *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.

# Qu'est-ce que *l'espace-temps* ?

Nous vivons dans un espace à *trois dimensions* :

- devant / derrière,
- gauche / droite,
- haut / bas

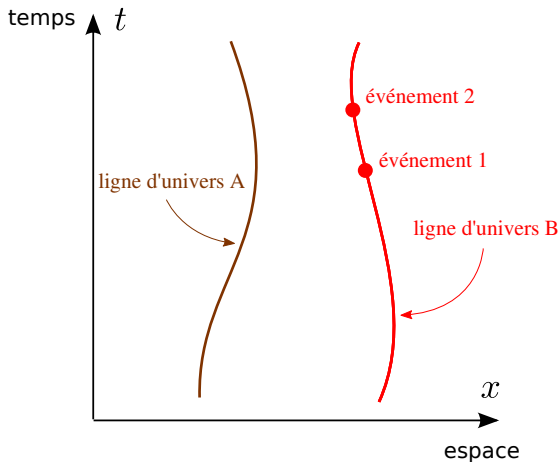
⇒ 3 nombres  $(x, y, z)$  (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

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

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

Pourquoi unifier l'espace et le temps ?

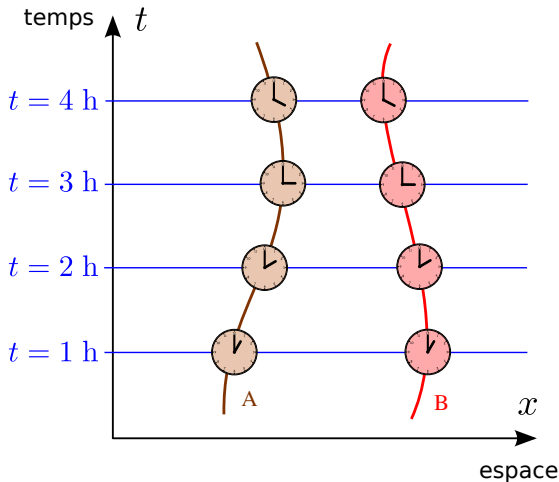
# Union mathématique de l'espace et du temps



## 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**

# 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)

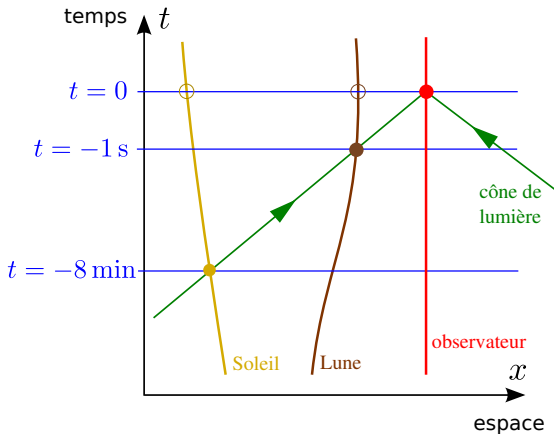
Tous les observateurs mesurent le même temps

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.**

# L'espace-temps relativiste

- 1898 : Henri Poincaré fait remarquer la notion de **simultanéité** de deux événements n'est pas donnée a priori

# L'espace-temps relativiste

- 1898 : Henri Poincaré fait remarquer la notion de **simultanéité** de deux événements n'est pas donnée a priori
- 1905 : Albert Einstein élabore la **relativité restreinte** pour décrire "*l'électrodynamique des corps en mouvements*"

# L'espace-temps relativiste

- 1898 : Henri Poincaré fait remarquer la notion de **simultanéité** de deux événements n'est pas donnée a priori
- 1905 : Albert Einstein élabore la **relativité restreinte** pour décrire "*l'électrodynamique des corps en mouvements*"
- 1905 : Henri Poincaré introduit des concepts **quadridimensionnels** pour la cinématique relativiste

# L'espace-temps relativiste

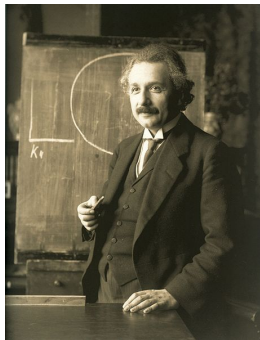
- 1898 : Henri Poincaré fait remarquer la notion de **simultanéité** de deux événements n'est pas donnée a priori
- 1905 : Albert Einstein élabore la **relativité restreinte** pour décrire *"l'électrodynamique des corps en mouvements"*
- 1905 : Henri Poincaré introduit des concepts **quadridimensionnels** pour la cinématique relativiste
- 1908 : Hermann Minkowski développe le concept d'**espace-temps** : *"L'espace indépendant du temps, le temps indépendant de l'espace ne sont plus que des ombres vaines; une sorte d'union des deux doit seule subsister encore."*

# 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

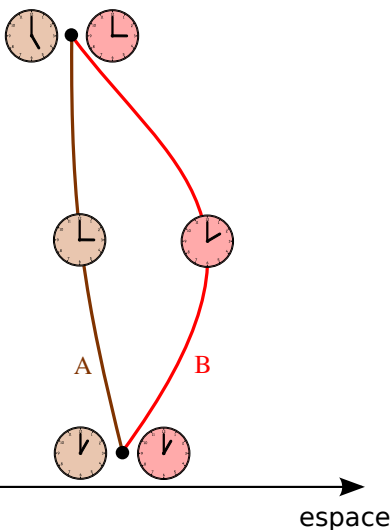
$$R - \frac{1}{2}Rg = \frac{8\pi G}{c^4} T$$

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



# L'espace-temps relativiste

temps



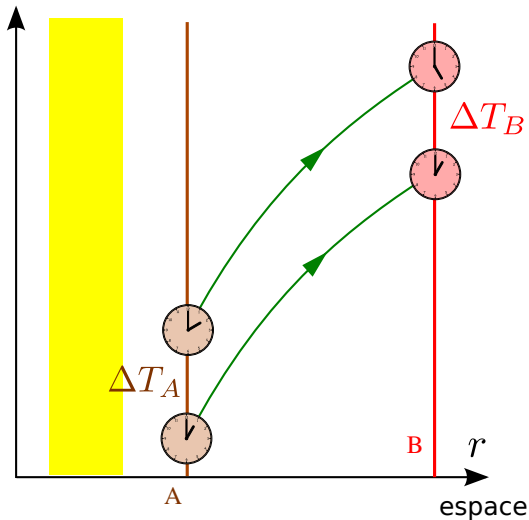
Il n'y a plus de temps absolu :  
chaque observateur mesure son  
temps propre

relativité du temps

⇒ paradoxe des jumeaux  
(voyageur de Langevin)

## 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 une influence sur le temps ?

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

# La gravitation a 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 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 une influence sur le temps ?

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



## Expérience de Hafele et Keating (1971)

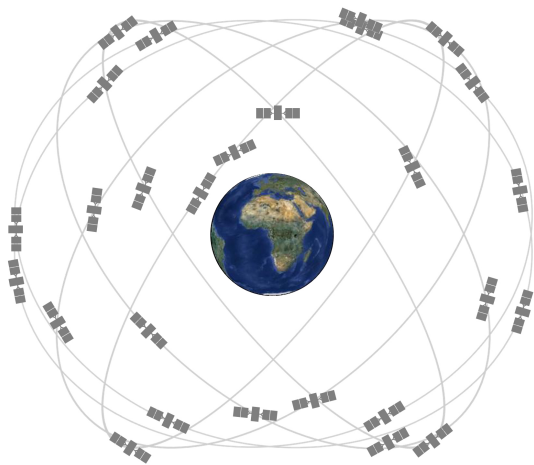
Dans le champ gravitationnel de la Terre :

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

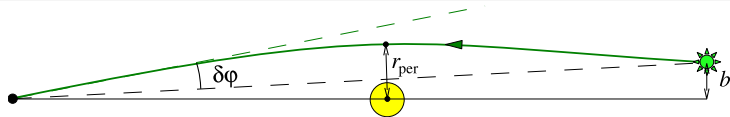
Relat. gen.  $\Rightarrow \delta t/t = 5 \times 10^{-10}$

En un jour, la dérive atteint

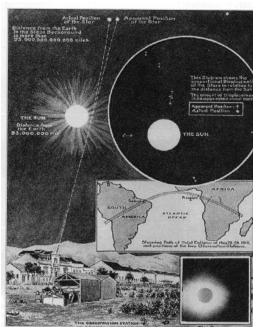
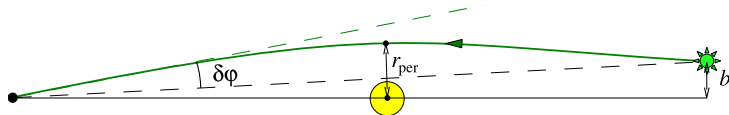
$\delta t = 46 \mu s$

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

# Un autre effet de la gravitation : la déviation des rayons lumineux

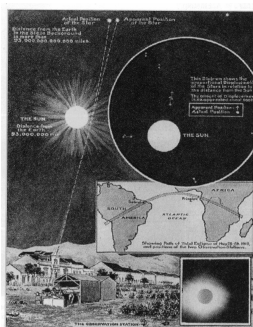
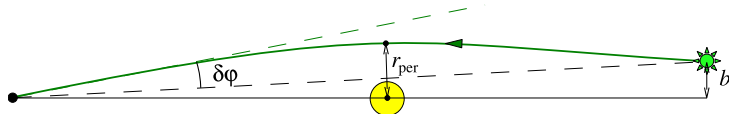


# Un autre effet de la gravitation : la déviation des rayons lumineux



Éclipse de Soleil de 1919  
(observée par A. Eddington)

# Un autre effet de la gravitation : la déviation des rayons lumineux



Éclipse de Soleil de 1919  
(observée par A. Eddington)



[HST (Nasa/ESA/STSCI)]

Mirage gravitationnel



# Outline

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 L'espace-temps
- 3 Les trous noirs en relativité générale**
- 4 Simulations d'images de trous noirs
- 5 Observer les trous noirs
- 6 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 7 Conclusion

## Espace-temps avec trou noir

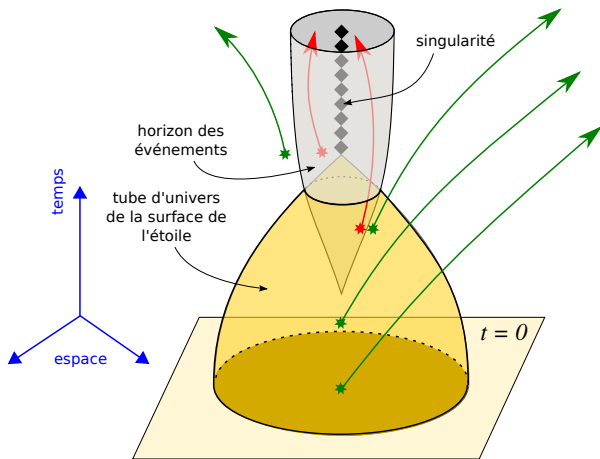


Diagramme d'espace-temps représentant la formation d'un trou noir par effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive (phénomène de *supernova*)

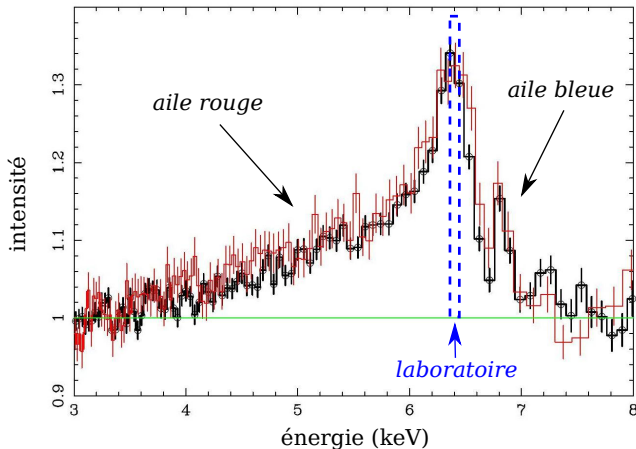
singularité : courbure  $\rightarrow \infty$

# La singularité centrale

- La singularité centrale est une **singularité de courbure** : la courbure de l'espace-temps diverge (tend vers l'infini) à cet endroit.
- 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.

# 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  $K\alpha$  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  
 $\Rightarrow$  basse fréquence  
 $\Rightarrow$  longue période  
 $\Rightarrow$  dilatation des temps

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<sup>a</sup> :

- 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<sup>a</sup> :

- 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)

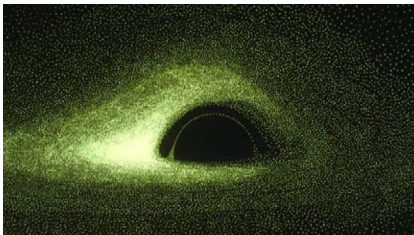
- La **masse d'un trou noir** n'est pas une mesure de la "quantité de matière" à l'intérieur du trou noir, mais un paramètre  $M$  qui caractérise son *champ de gravitation externe*.  $M$  est mesurable : période orbitale d'un corps d'épreuve en orbite circulaire autour du trou noir.
- Le **moment cinétique**  $J$  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 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 L'espace-temps
- 3 Les trous noirs en relativité générale
- 4 Simulations d'images de trous noirs**
- 5 Observer les trous noirs
- 6 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 7 Conclusion

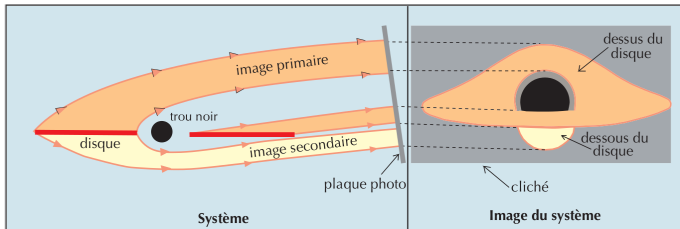
# Voir un trou noir ?

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)]

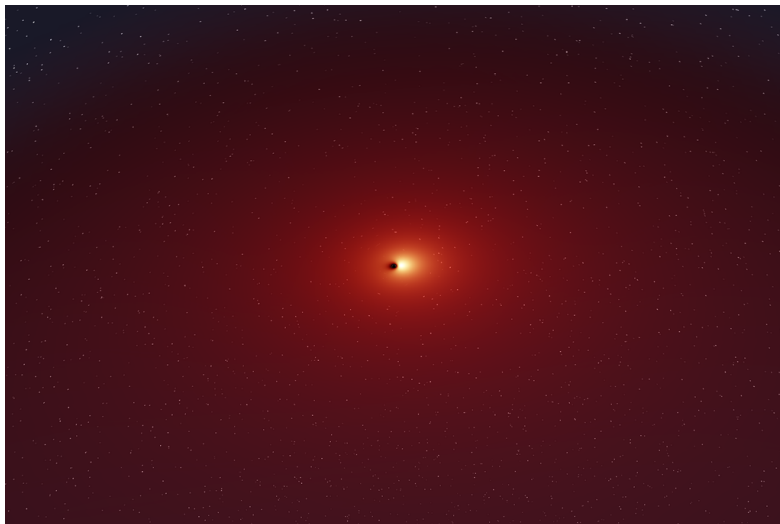


Trajectoire des rayons lumineux et formation de l'image

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

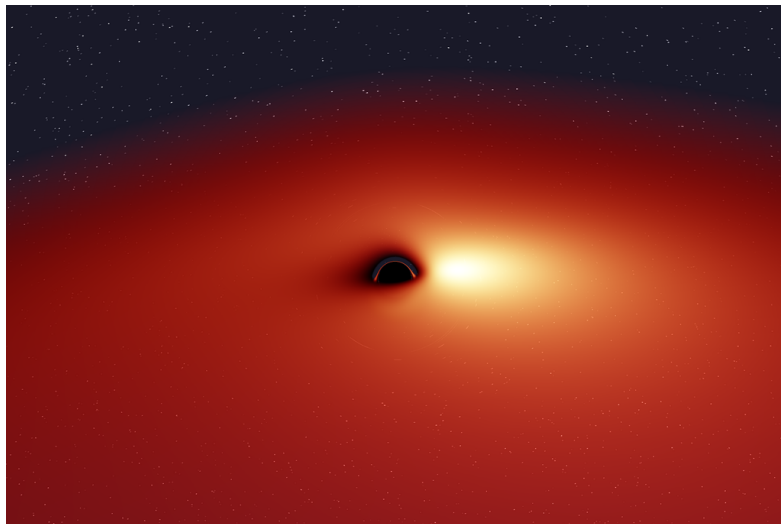
# Vol vers un trou noir

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



# Vol vers un trou noir

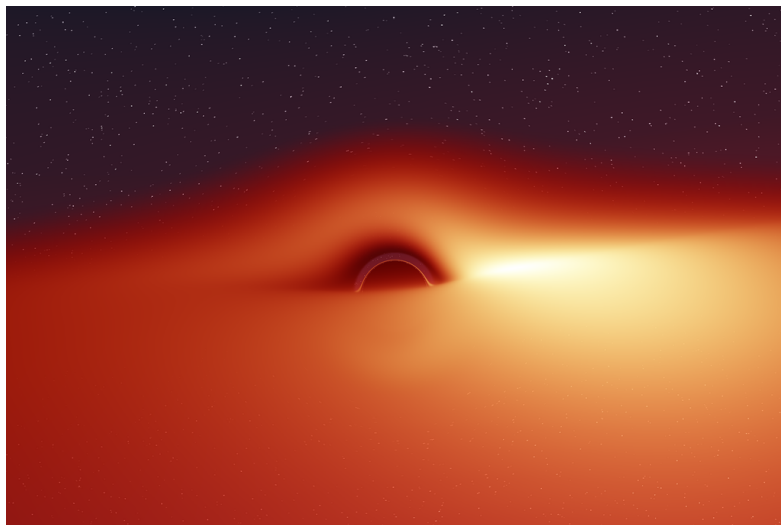
Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]





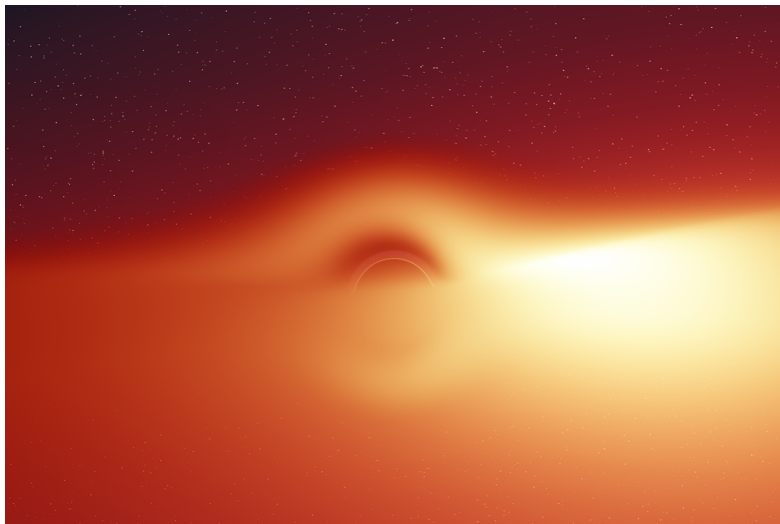
# Vol vers un trou noir

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



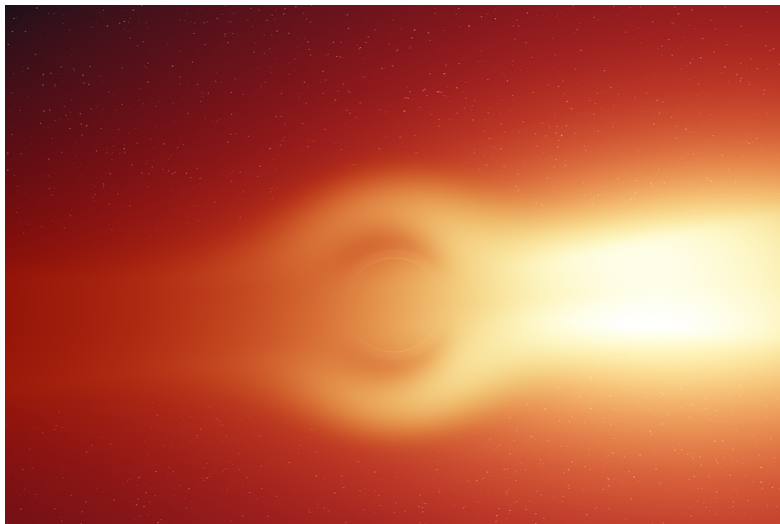
# Vol vers un trou noir

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



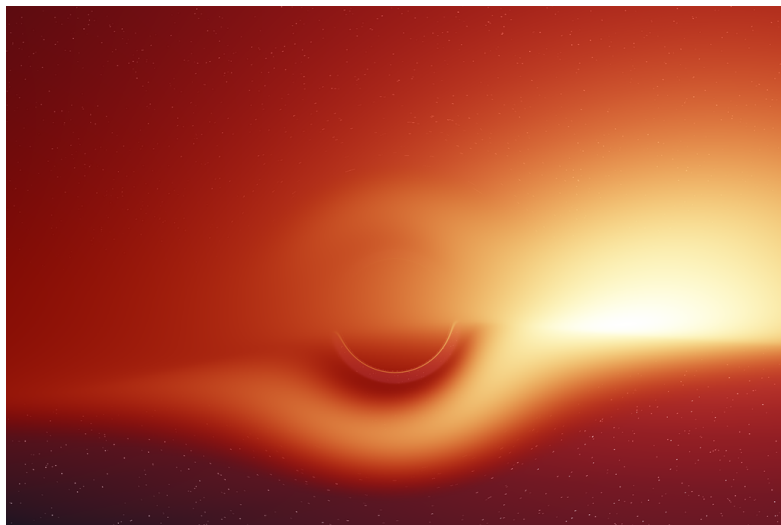
# Vol vers un trou noir

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



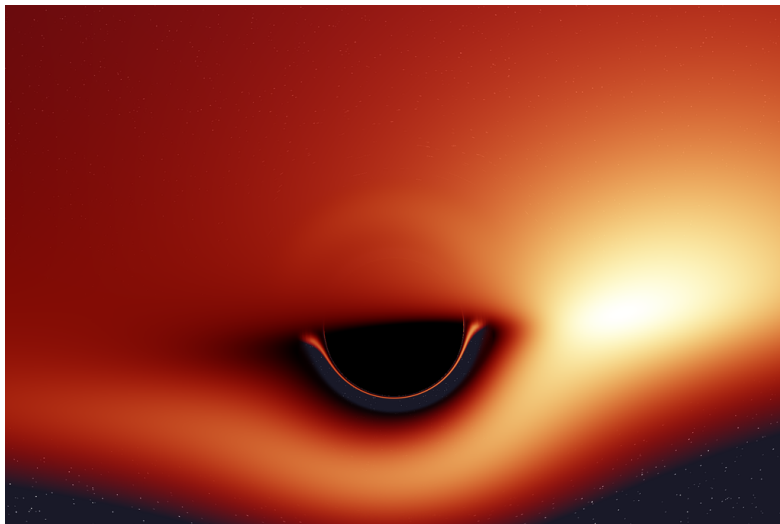
# Vol vers un trou noir

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



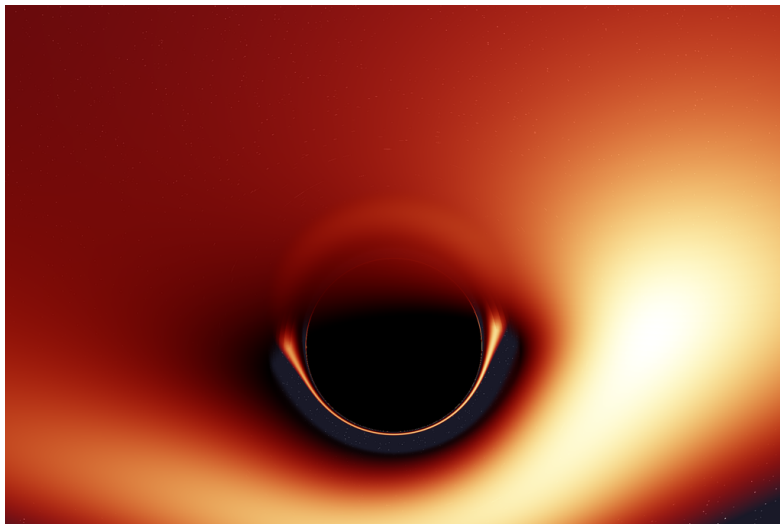
# Vol vers un trou noir

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



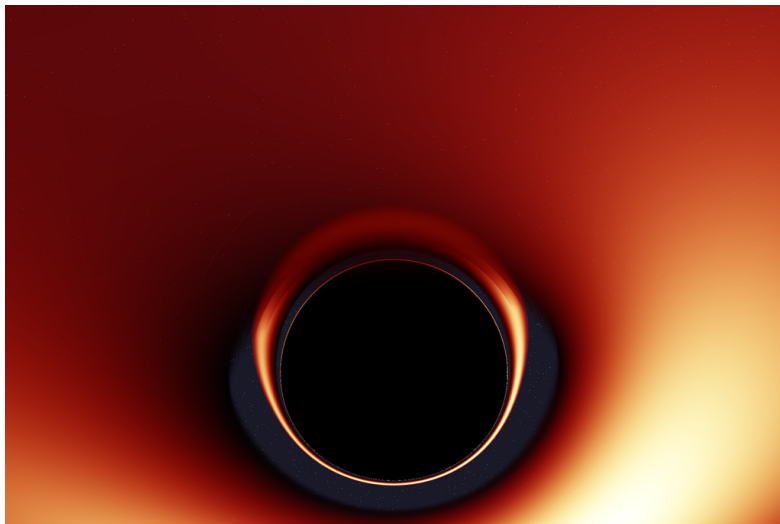
# Vol vers un trou noir

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



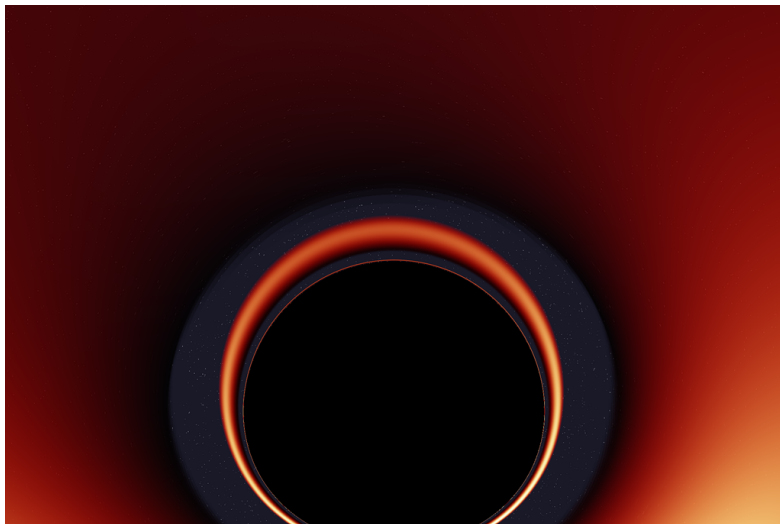
# Vol vers un trou noir

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



# Vol vers un trou noir

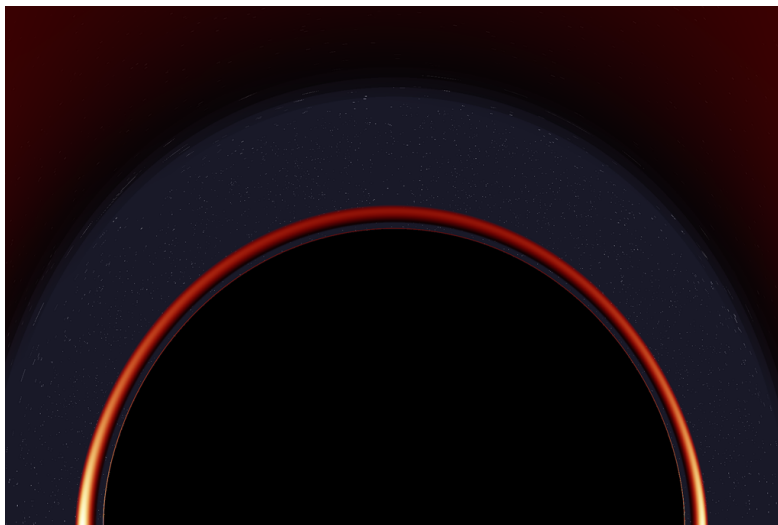
Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]





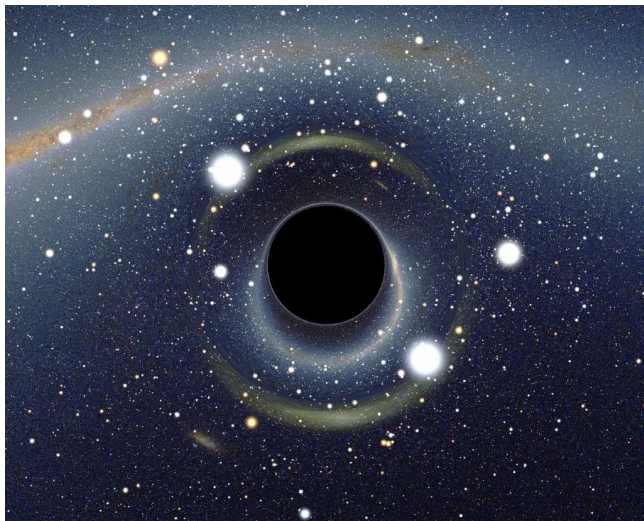
# Vol vers un trou noir

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



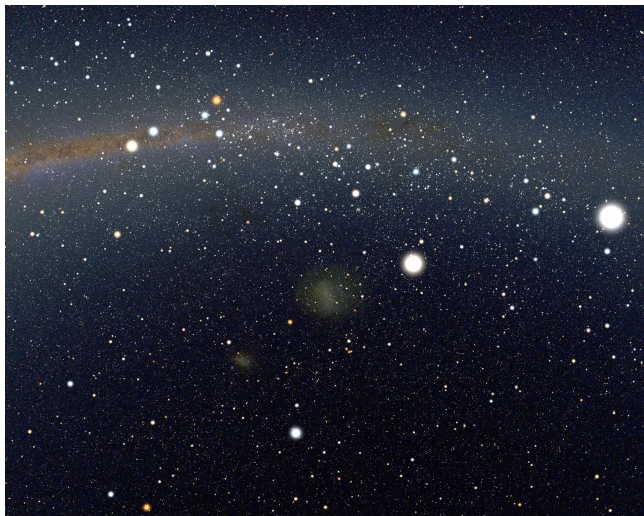
# Silhouette devant un fond étoilé

Image calculée par A. Riazuelo [Riazuelo, 2007]



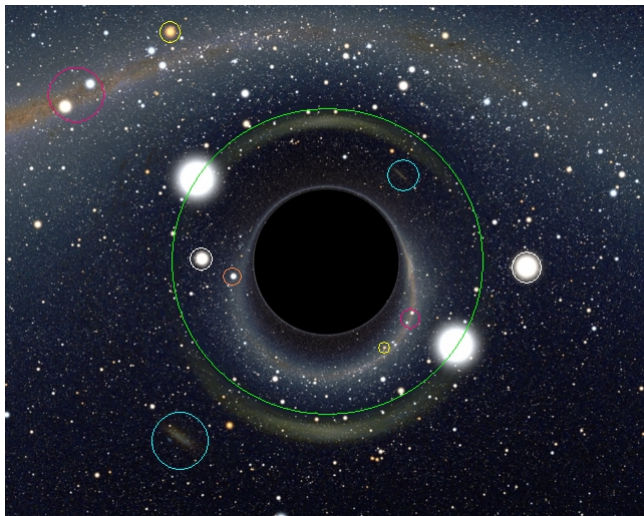
# Silhouette devant un fond étoilé

Image calculée par A. Riazuelo [Riazuelo, 2007]

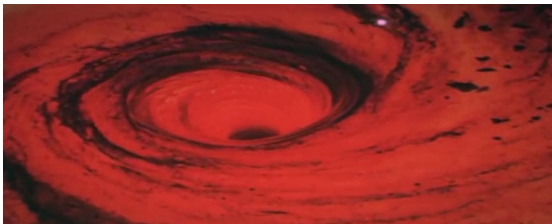


# Silhouette devant un fond étoilé

Image calculée par A. Riazuelo [Riazuelo, 2007]



# 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

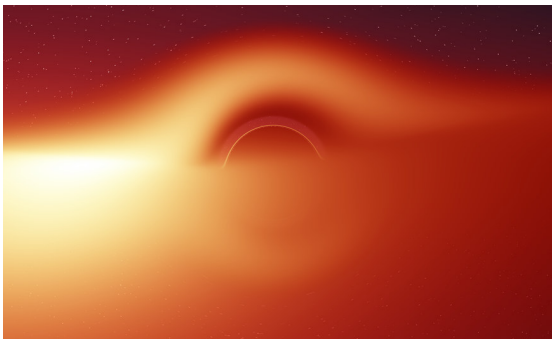
## Interstellar

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



**Interstellar**  
Christopher Nolan (2014)

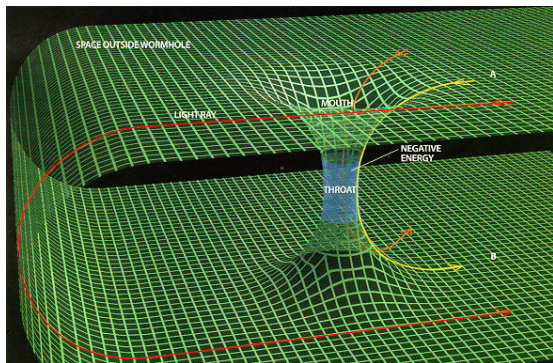
Image calculée par J.-A. Marck (1996)

- 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



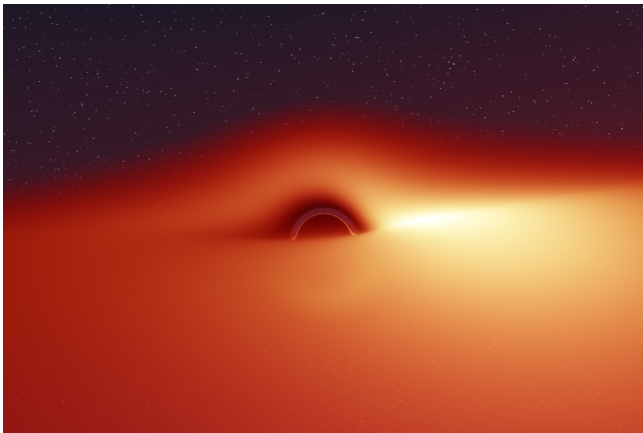
# Outline

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 L'espace-temps
- 3 Les trous noirs en relativité générale
- 4 Simulations d'images de trous noirs
- 5 Observer les trous noirs**
- 6 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 7 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 :

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

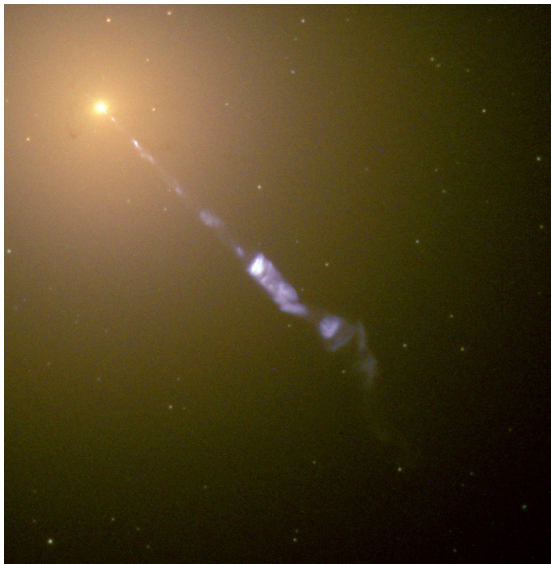
$$\text{exemple : Sgr A* : } M = 4,3 \times 10^6 M_{\odot} \text{ et}$$

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

---

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

# Les trous noirs au cœur des galaxies à noyau actif

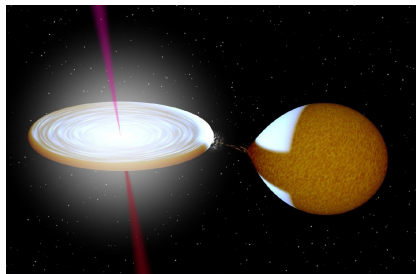
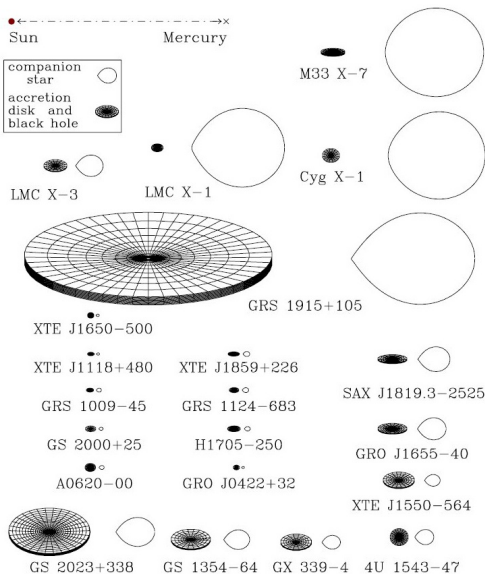


Jet émis par le noyau de la  
galaxie elliptique géante M87, au  
cœur de l'amas de la Vierge [HST]

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

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

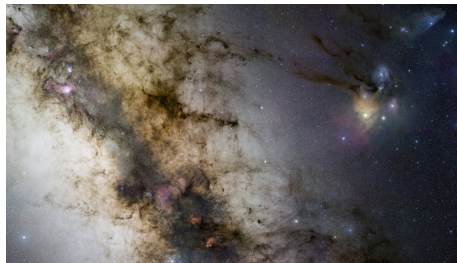
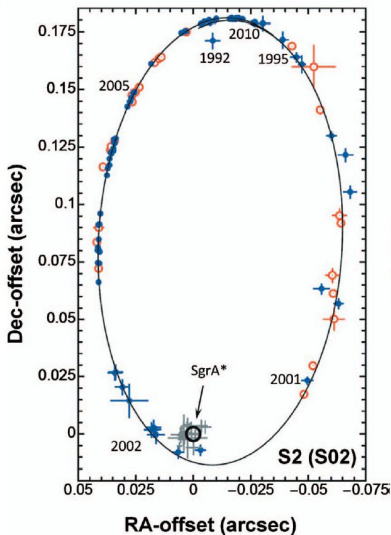
# Trous noirs dans les binaires X



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)]

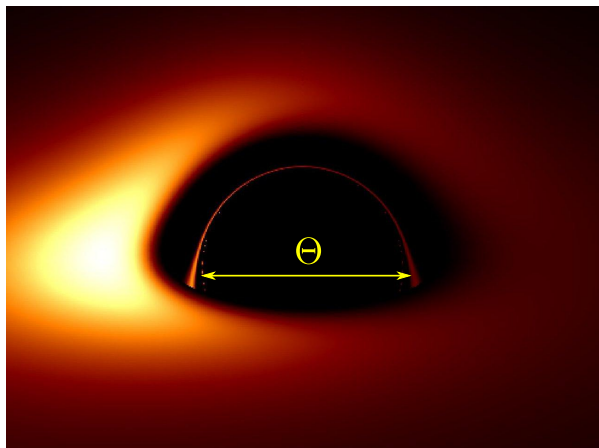
Détection via la dynamique stellaire :

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

← Orbite de l'étoile S2 autour de Sgr A\* :  
 $P = 16$  ans,  $r_{\text{per}} = 120$  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

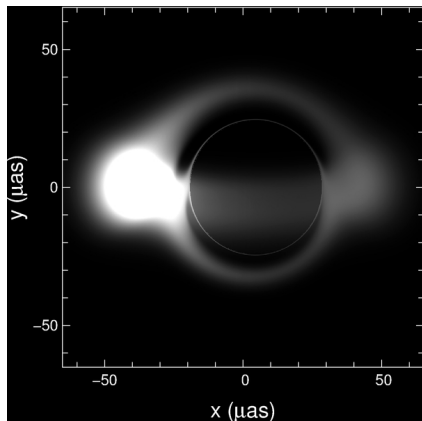
**M87** :  $\Theta = 21 \mu\text{as}$

**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  $\Theta \propto M/d$

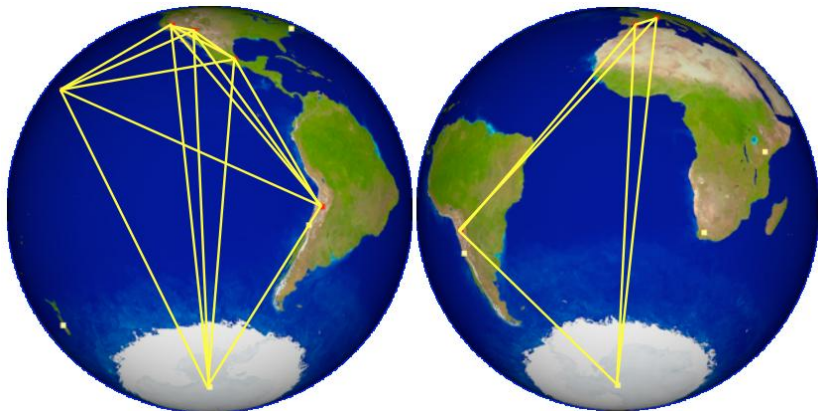
*Rem. 2* : résolution angulaire du HST :  $\Theta_{\min} \sim 10^5 \mu\text{as}$  !



# L'Event Horizon Telescope

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

⇒ un télescope de taille planétaire !

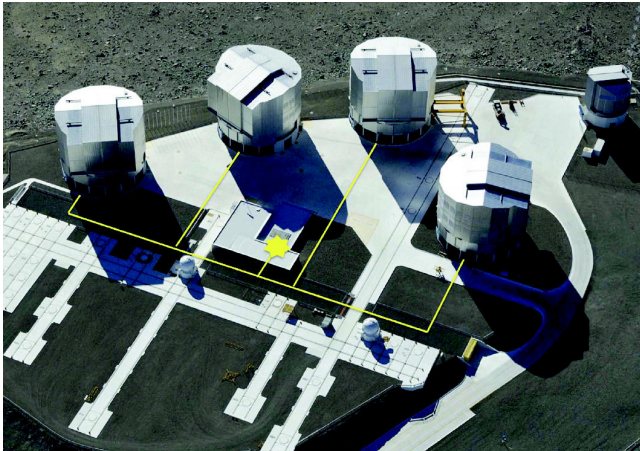


# L'Event Horizon Telescope



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  $10 \mu\text{as}$

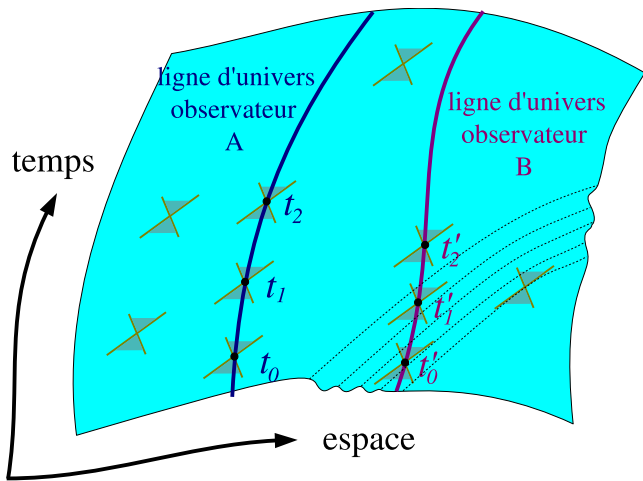
En cours de test !

# Outline

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 L'espace-temps
- 3 Les trous noirs en relativité générale
- 4 Simulations d'images de trous noirs
- 5 Observer les trous noirs
- 6 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles**
- 7 Conclusion

# Les ondes gravitationnelles

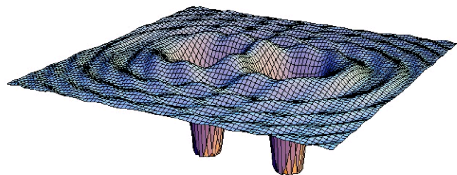
Des petites oscillations dans la courbure...



# Les ondes gravitationnelles

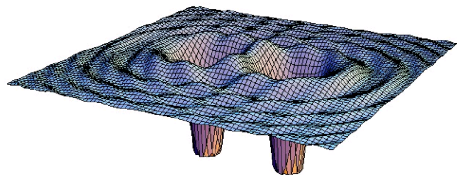
## Les **ondes gravitationnelles**

- 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

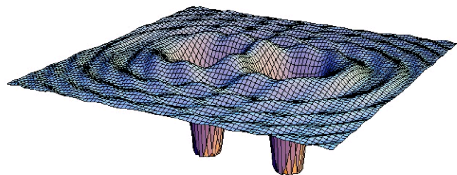


Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

## Les **ondes gravitationnelles**

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

# Les ondes gravitationnelles



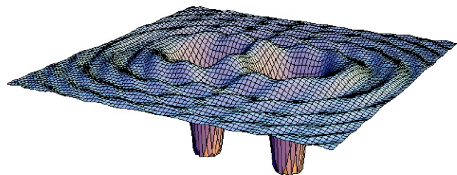
Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

## 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

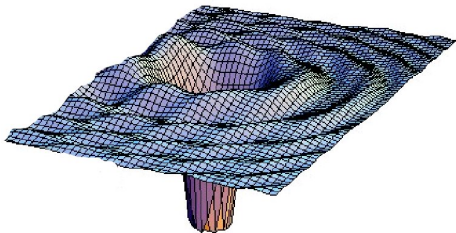


Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

## 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)

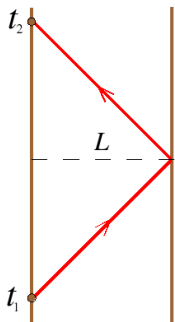
En particulier, trous noirs et ondes gravitationnelles sont tous deux des **solutions du vide** des équations de la Relativité Générale (équations d'Einstein)

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

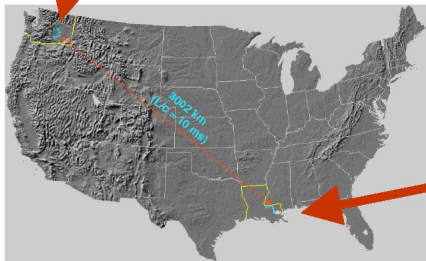
# Détection des ondes gravitationnelles sur Terre



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

# Interféromètres LIGO

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

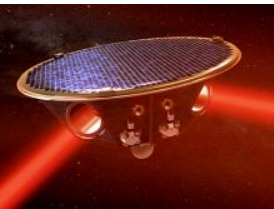


## Livingston (L1=4km)



# Projet spatial LISA (ESA)

## Détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles dans l'espace



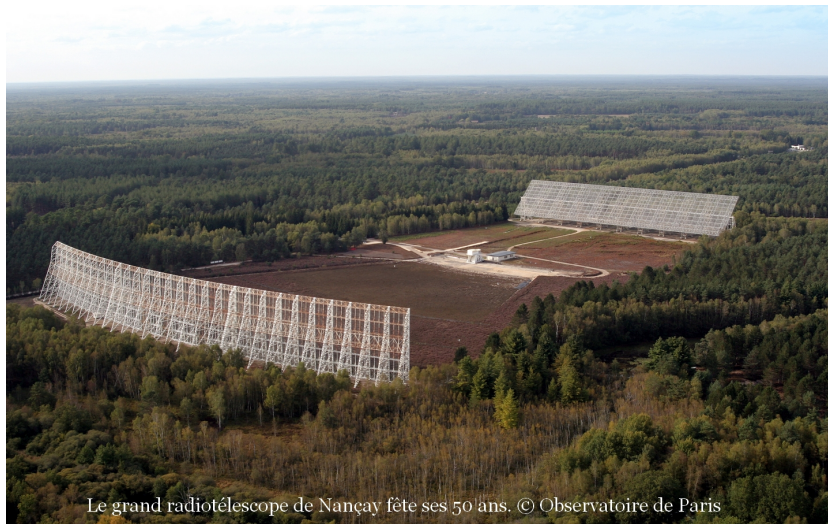
[eLISA / NGO]

- sélectionné par l'ESA en 2013 (mission L3<sup>a</sup>)
- 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 !

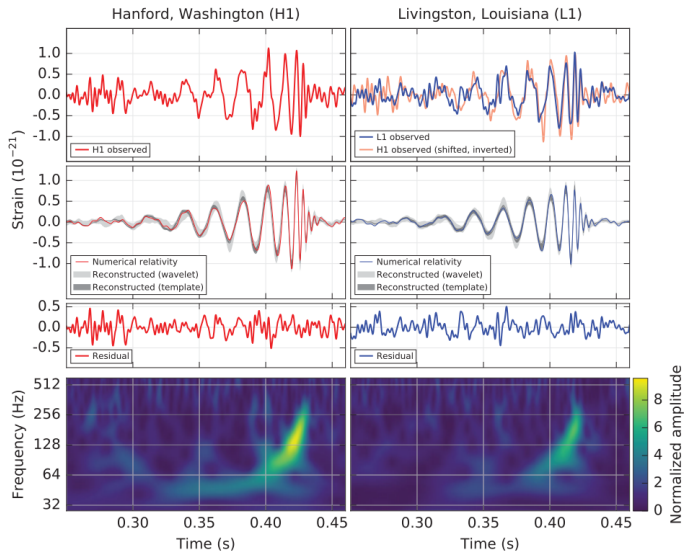


# Détecter les ondes gravitationnelles par le chronométrage des pulsars



Le grand radiotélescope de Nançay fête ses 50 ans. © Observatoire de Paris

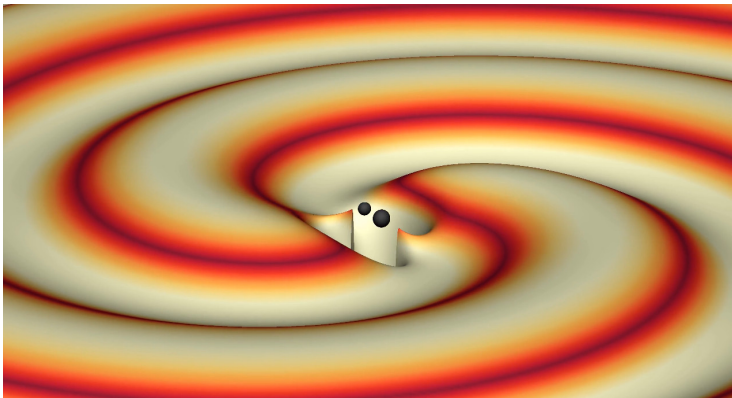
# 14 septembre 2015, 09 h 50 min 45 s UTC



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



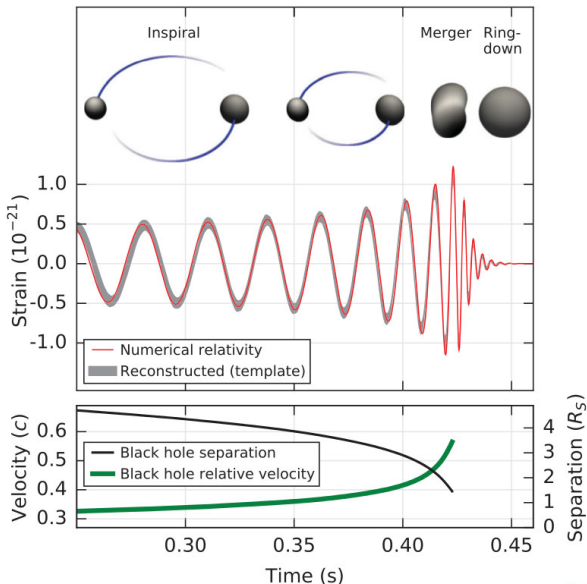
# L'événement GW150914



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 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 2 L'espace-temps
- 3 Les trous noirs en relativité générale
- 4 Simulations d'images de trous noirs
- 5 Observer les trous noirs
- 6 "Voir" les trous noirs par les ondes gravitationnelles
- 7 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
- G. Chardin, 2009, *Le LHC peut-il produire des trous noirs ?*, Le Pommier
- 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, 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



# 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*