

# Trous noirs, trous blancs et trous de ver: entre science et science-fiction

Éric Gourgoulhon

Laboratoire Univers et Théories  
Observatoire de Paris, CNRS, Université PSL, Université de Paris  
92190 Meudon, France

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

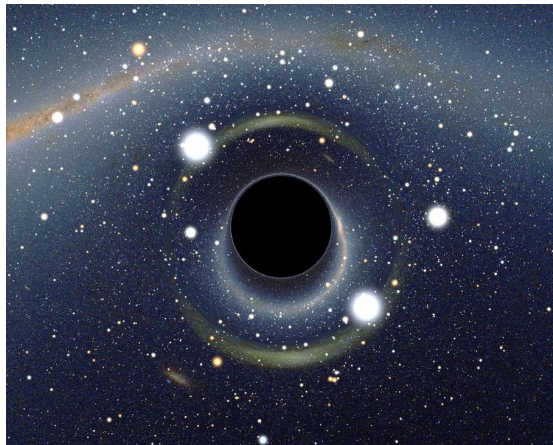
**IDEE Université Populaire, Belfort**  
1er février 2022

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir, un trou blanc et un trou de ver ?
- 2 L'espace-temps relativiste
- 3 Propriétés des trous noirs
- 4 Les trous noirs dans l'Univers
- 5 Les trous blancs : science ou fiction ?
- 6 Les trous de vers : science ou fiction ?
- 7 Conclusions

# Plan

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir, un trou blanc et un trou de ver ?
- 2 L'espace-temps relativiste
- 3 Propriétés des trous noirs
- 4 Les trous noirs dans l'Univers
- 5 Les trous blancs : science ou fiction ?
- 6 Les trous de vers : science ou fiction ?
- 7 Conclusions

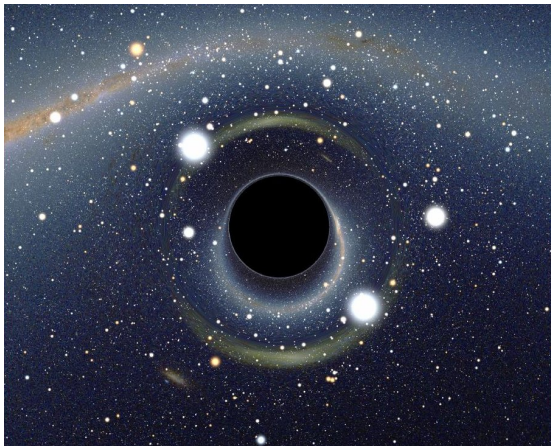
# Qu'est-ce qu'un trou noir ?



[Alain Riazuelo, 2007]



# 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 1784, 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 1784, 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 :

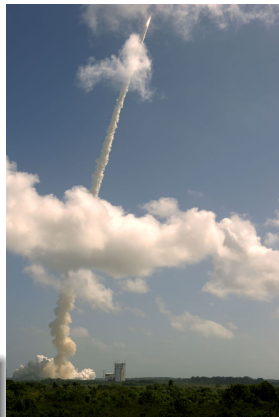
la **vitesse de libération** d'un corps de masse  $M$  et de

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...

$$V_{\text{lib}} > c$$

$$\iff \frac{2GM}{R} > c^2 \iff \frac{2G}{R} \times \frac{4}{3}\pi R^3 \rho > c^2$$

$$\iff R > \sqrt{\frac{3c^2}{8\pi G\rho}}$$

John Michell (1784)

*"If there should really exist in nature any bodies, whose density is not less than that of the sun, and whose diameters are more than 500 times the diameter of the sun, since their light could not arrive at us, ..., we could have no information from sight"* [Phil. Trans. R. Soc. Lond. 74, 35 (1784)]

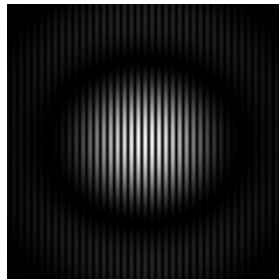
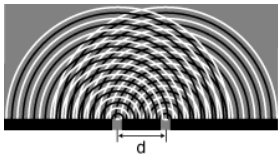
Pierre Simon de Laplace (1796)

*"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."* [Exposition du système du monde (1796)]



# 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  $V > c \implies$  les corps invisibles de Michell et Laplace restent causalement connectés au reste de l'Univers
- $V_{\text{lib}} \sim c \implies$  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

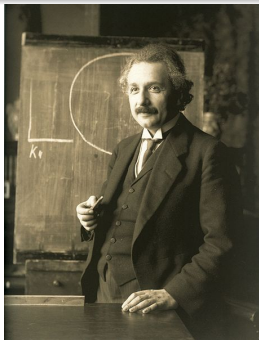
- Pas de rôle privilégié de la vitesse de la lumière en théorie newtonienne : rien n'interdit  $V > c \implies$  les corps invisibles de Michell et Laplace restent causalement connectés au reste de l'Univers
- $V_{\text{lib}} \sim c \implies$  énergie du champ gravitationnel  $\sim$  énergie de masse  $Mc^2 \implies$  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)

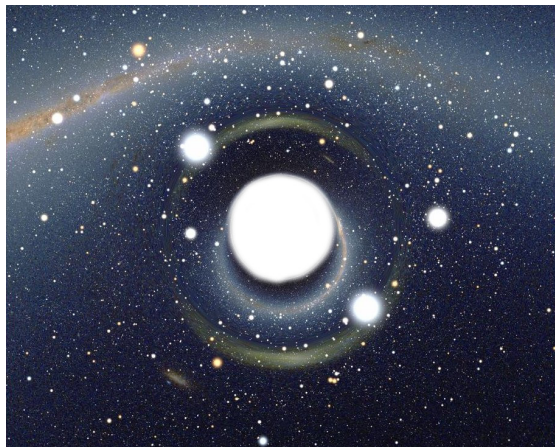
$$R - \frac{1}{2}Rg = \frac{8\pi G}{c^4} T$$

(A. Einstein, novembre 1915)

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

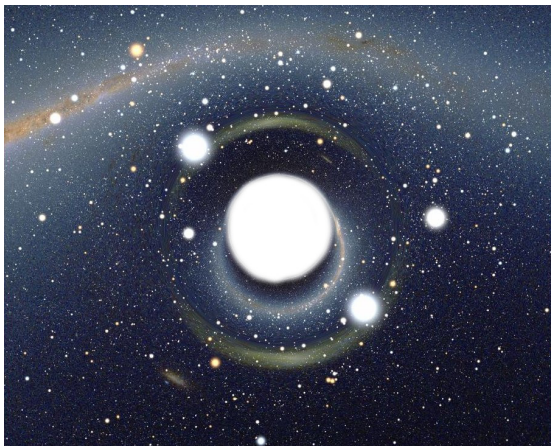


# Qu'est qu'un trou blanc ?





# Qu'est qu'un trou blanc ?



Une définition en quelques mots :

Un **trou blanc** est une région de l'espace-temps dans laquelle rien ne peut pénétrer, mais tout peut en sortir.

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

# Pourquoi rien ne peut pénétrer dans un trou blanc ?

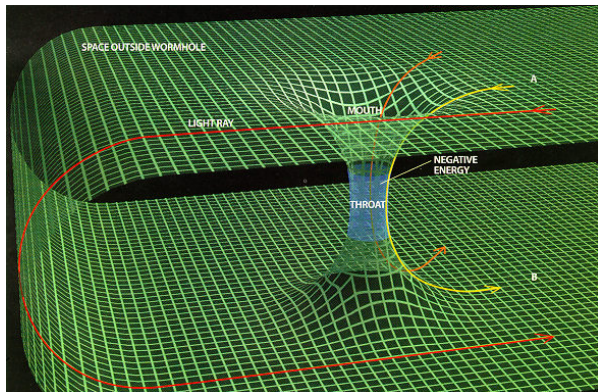
Pas de réponse de la physique newtonienne (physique pré-relativiste)...

En fait, il n'existe pas de trou blanc en physique newtonienne.

Un trou blanc n'est possible qu'en **gravitation relativiste** (relativité générale)

# Qu'est qu'un trou de ver ?

# Qu'est qu'un trou de ver ?



Une définition en quelques mots :

Un **trou de ver** est un "raccourci" qui connecte deux régions distantes de l'espace-temps.

Un trou de ver n'a pas de frontière infranchissable : on peut y pénétrer ou en sortir par n'importe quelle extrémité.

# Qu'est-ce qu'un raccourci dans l'espace-temps ?

Pas de réponse de la physique pré-relativiste : l'espace-temps absolu de Newton ( $\sim \mathbb{R}^4$ ) n'admet pas de raccourci...

En fait, il n'existe pas de trou de ver en physique newtonienne.

Un trou de ver n'est possible qu'en **gravitation relativiste** (relativité générale)

# Plan

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir, un trou blanc et un trou de ver ?
- 2 L'espace-temps relativiste**
- 3 Propriétés des trous noirs
- 4 Les trous noirs dans l'Univers
- 5 Les trous blancs : science ou fiction ?
- 6 Les trous de vers : science ou fiction ?
- 7 Conclusions

# L'espace

Nous vivons dans un espace à *trois dimensions* :

- devant  $\leftrightarrow$  derrière,
- gauche  $\leftrightarrow$  droite,
- haut  $\leftrightarrow$  bas

$\implies$  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  $\rightarrow$  futur

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



# Le temps

Le temps ne possède qu'une seule dimension : passé  $\rightarrow$  futur

$\Rightarrow$  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 :

1er février 2022, 18 h 15  $\Rightarrow t = 2\,459\,612,21875$  jours juliens

# Le temps

Le temps ne possède qu'une seule dimension : passé  $\rightarrow$  futur

$\Rightarrow$  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 :

1er février 2022, 18 h 15  $\Rightarrow t = 2\,459\,612,21875$  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* :



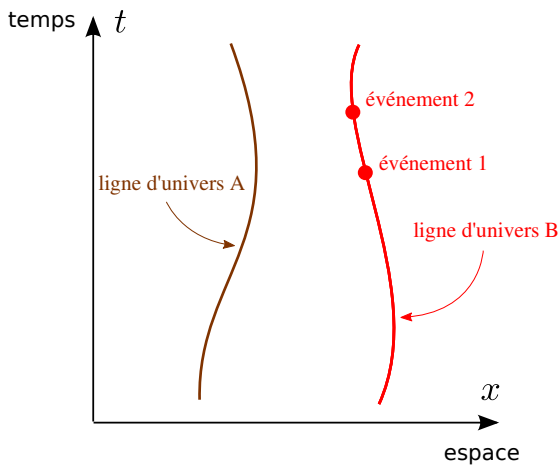
*“J’ai dit plus haut qu’il n’étoit pas possible de concevoir plus de trois dimensions. Un homme d’esprit de ma connaissance croit qu’on pourroit cependant regarder la durée comme une quatrième dimension, et que le produit du tems par la solidité, serait en quelque maniere un produit de quatre dimensions.”*

**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.”*

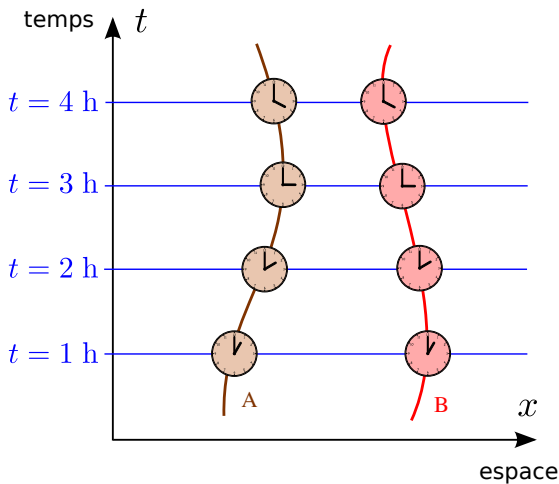
## Union mathématique de l'espace et du temps



## 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**

## 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."*



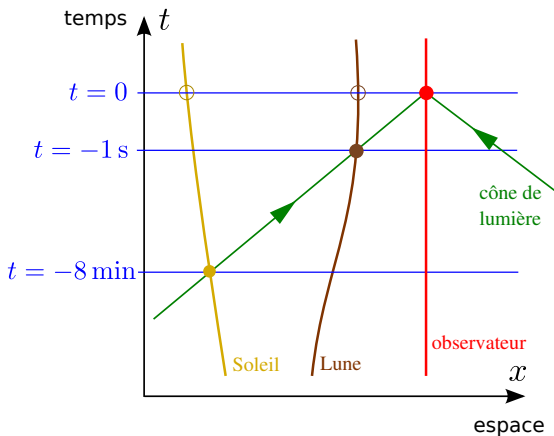
Isaac Newton,  
*Principia Mathematica*  
(1687)

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**

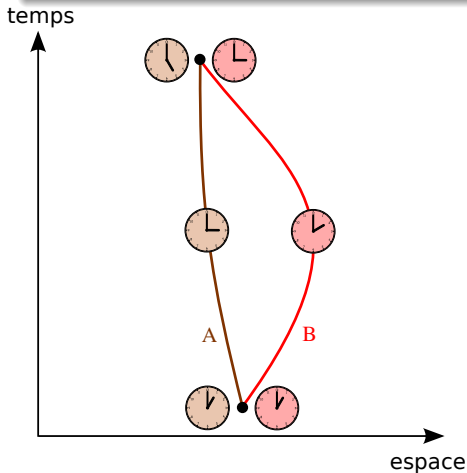
Ainsi, même dans le cadre newtonien, en admettant une vitesse finie de propagation de la lumière, **nous ne percevons pas l'espace indépendamment du temps.**

## 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)

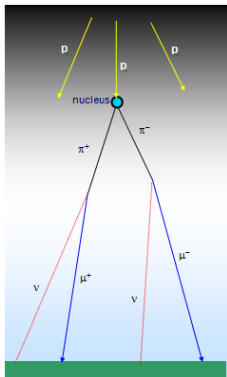


# Preuve expérimentale de la relativité du temps

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 ( $\mu^-$ ) 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

- 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

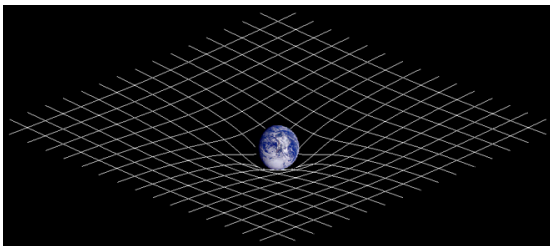
- 1898 : Henri Poincaré fait remarquer la notion de **simultanéité** de deux événements n'est pas donnée a priori
- 1905 : Albert Einstein élabore la **relativité restreinte** pour décrire *"l'électrodynamique des corps en mouvements"*
- 1905 : Henri Poincaré introduit des concepts **quadridimensionnels**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

# L'espace-temps relativiste

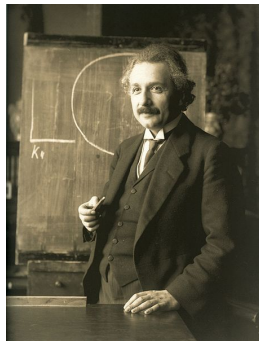
- 1898 : Henri Poincaré fait remarquer la notion de **simultanéité** de deux événements n'est pas donnée a priori
- 1905 : Albert Einstein élabore la **relativité restreinte** pour décrire *"l'électrodynamique des corps en mouvements"*
- 1905 : Henri Poincaré introduit des concepts **quadridimensionnels**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

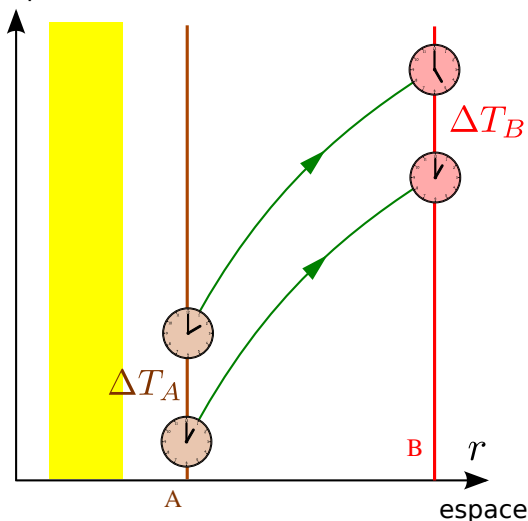


La relativité générale décrit la gravitation comme la **courbure de l'espace-temps**



## Dilatation des temps gravitationnelle

temps



Dilatation apparente des temps  
au voisinage d'un corps massif

Si  $B$  est loin :

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

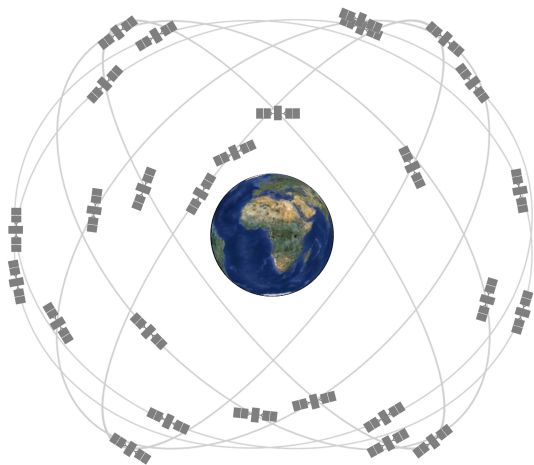
pour des corps peu relativistes  
(Terre, Soleil) :

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

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

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

# Le GPS doit tenir compte de la distorsion temporelle !



[gps.gov]

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

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

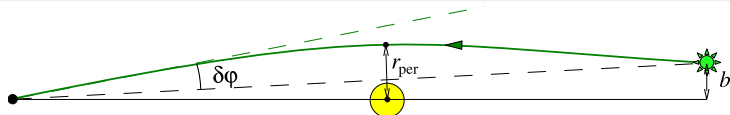
En un jour, la dérive atteint

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

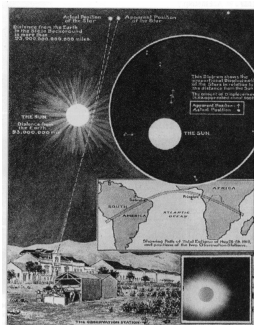
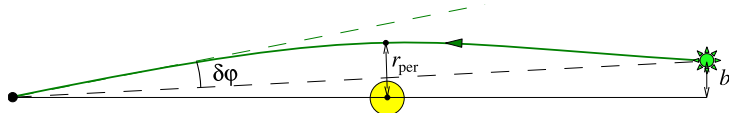
ce qui correspondrait à une  
erreur de positionnement de  
28 km si aucune correction  
n'était appliquée !



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

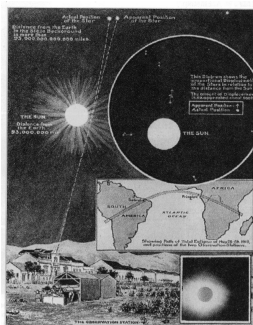
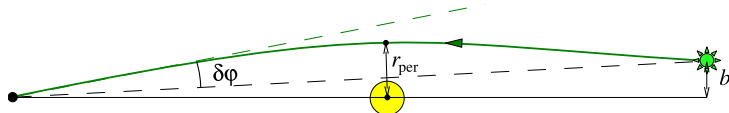


# Un autre effet de la gravitation : la déviation des rayons lumineux



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)



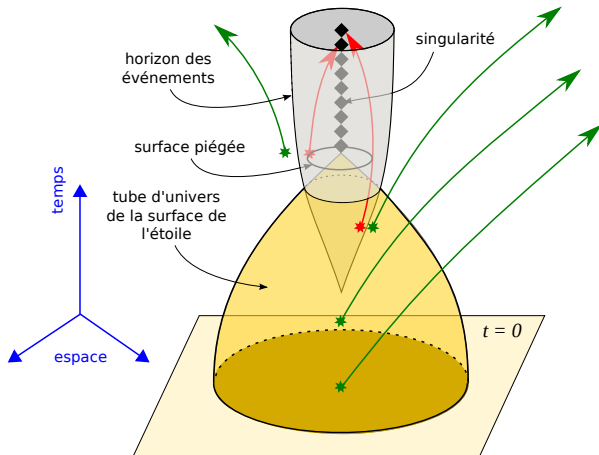
[HST (Nasa/ESA/STSCI)]

Mirage gravitationnel

# Plan

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir, un trou blanc et un trou de ver ?
- 2 L'espace-temps relativiste
- 3 Propriétés des trous noirs**
- 4 Les trous noirs dans l'Univers
- 5 Les trous blancs : science ou fiction ?
- 6 Les trous de vers : science ou fiction ?
- 7 Conclusions

# Formation d'un trou noir par effondrement gravitationnel



← 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  $\rightarrow \infty$

## Théorème de Penrose (1965)

Au delà d'un certain stade de l'effondrement, caractérisé par l'apparition de **surfaces piégées**, la formation d'une singularité est inévitable.

# 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.
- Physiquement, cela signifie que les **forces de marées** subies par tout corps étendu (gravité "différentielle") deviennent infinies.
- **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.
- *Remarque* : la définition d'un trou noir ne repose pas sur le concept de singularité.

# Les trous noirs de la relativité générale

## Théorème d'unicité ("absence de chevelure")

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

En relativité générale (et 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)

La solution correspondante l'équation d'Einstein est la **solution de Kerr (1963)**. Pour  $J = 0$ , elle se réduit à la **solution de Schwarzschild (1916)**.

---

a. trois si on considère une charge électrique  $Q$  non nulle, mais ce n'est pas pertinent d'un point de vue astrophysique

# Les trous noirs de la relativité générale

## Théorème d'unicité ("absence de chevelure")

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

En relativité générale (et 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)

La solution correspondante l'équation d'Einstein est la **solution de Kerr (1963)**. Pour  $J = 0$ , elle se réduit à la **solution de Schwarzschild (1916)**.

a. trois si on considère une charge électrique  $Q$  non nulle, mais ce n'est pas pertinent d'un point de vue astrophysique

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



# Quelques propriétés des trous noirs (1/2)

- **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 (1/2)

- **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 (1/2)

- **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 (1/2)

- **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 M 87 (M 87\*) :  $\bar{\rho} \sim 2 \text{ kg m}^{-3} = 1/500^{\text{e}}$  de la densité de l'eau !

# Quelques propriétés des trous noirs (1/2)

- **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 M 87 (M 87\*) :  $\bar{\rho} \sim 2 \text{ kg m}^{-3} = 1/500^{\text{e}}$  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 (2/2)

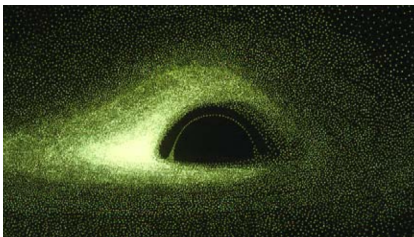
- La **masse**  $M$  n'est pas une mesure de la "quantité de matière" à l'intérieur du trou noir, mais un paramètre qui caractérise son *champ de gravitation externe*.  $M$  est mesurable, via la période orbitale d'un corps d'épreuve en orbite circulaire autour du trou noir.
- Le **moment cinétique**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

# Plan

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir, un trou blanc et un trou de ver ?
- 2 L'espace-temps relativiste
- 3 Propriétés des trous noirs
- 4 Les trous noirs dans l'Univers**
- 5 Les trous blancs : science ou fiction ?
- 6 Les trous de vers : science ou fiction ?
- 7 Conclusions

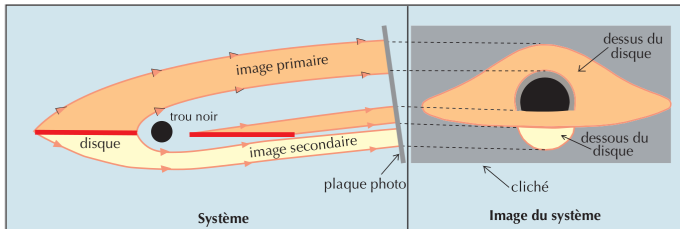
# Voir un trou noir ?

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)]



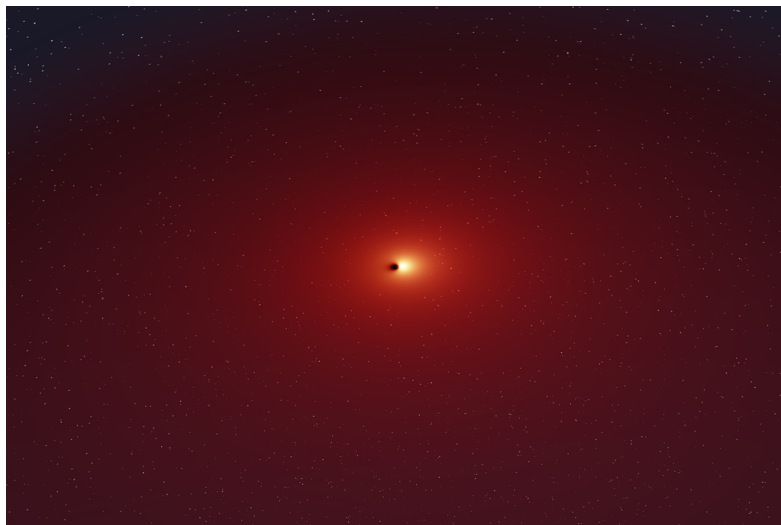
Trajectoire des  
rayons lumineux et  
formation de l'image

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



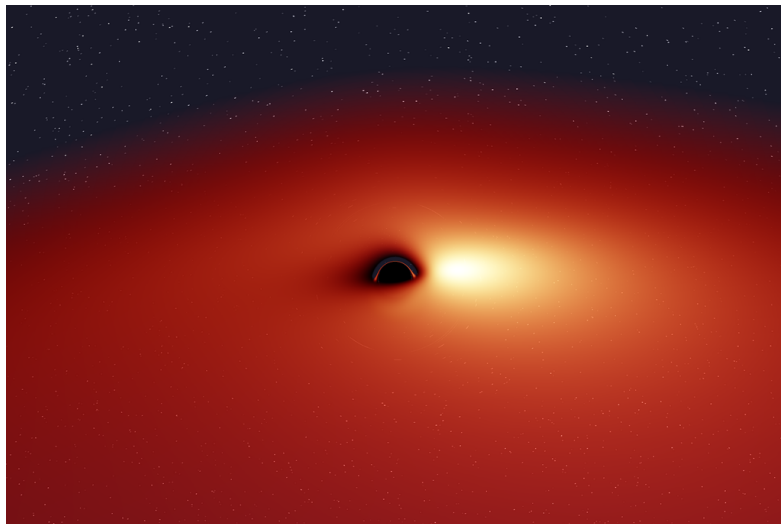
# Vol vers un trou noir

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



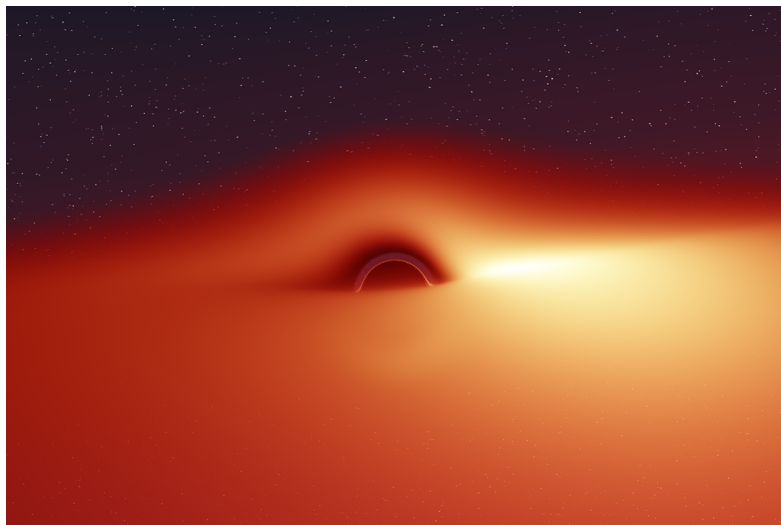
# Vol vers un trou noir

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



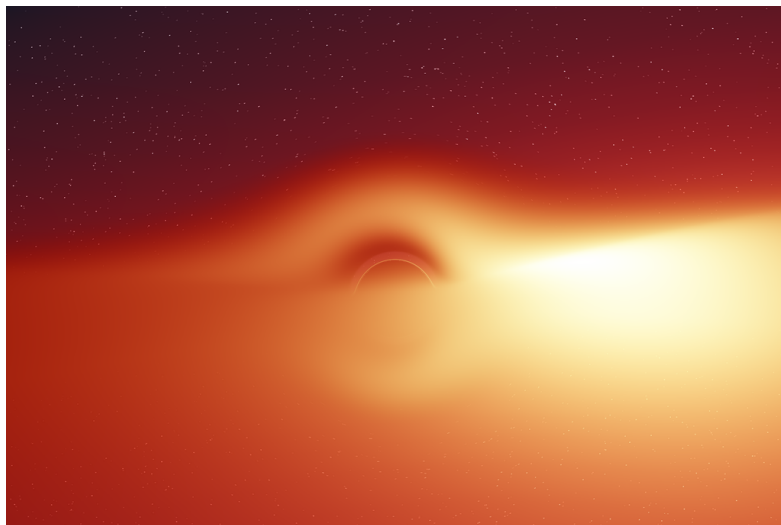
# Vol vers un trou noir

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



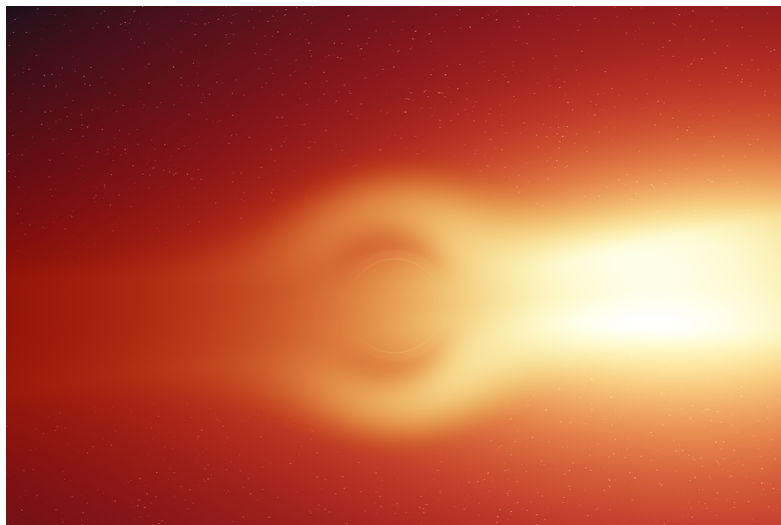
# Vol vers un trou noir

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



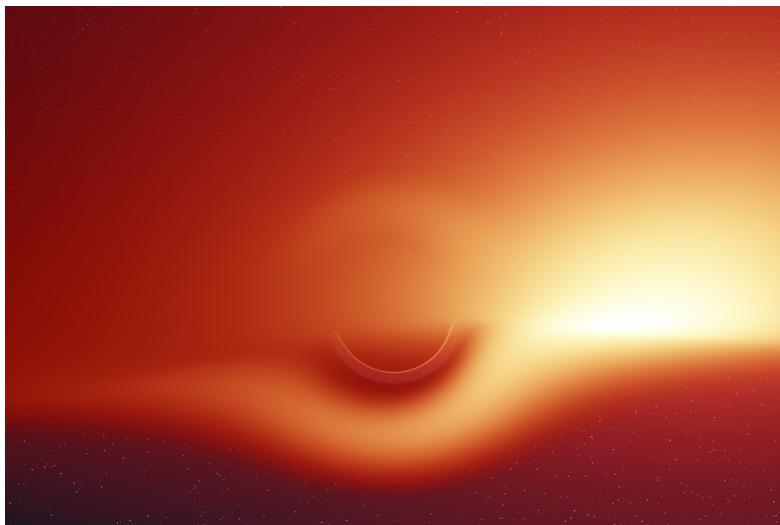
# Vol vers un trou noir

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



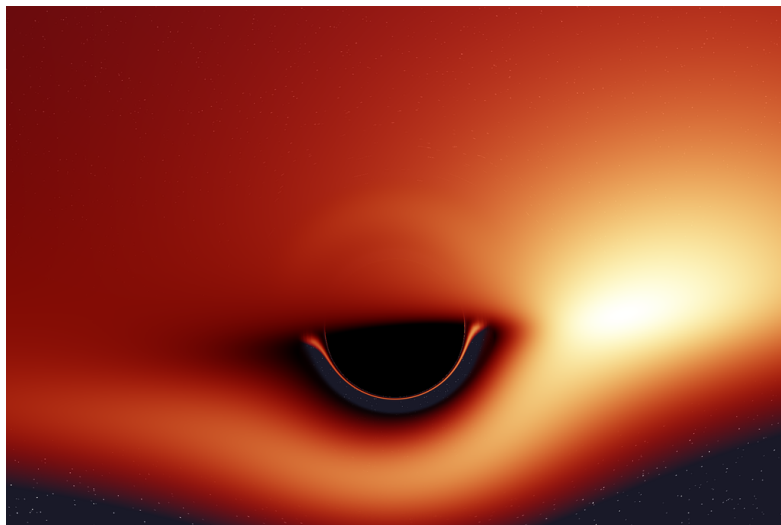
# Vol vers un trou noir

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



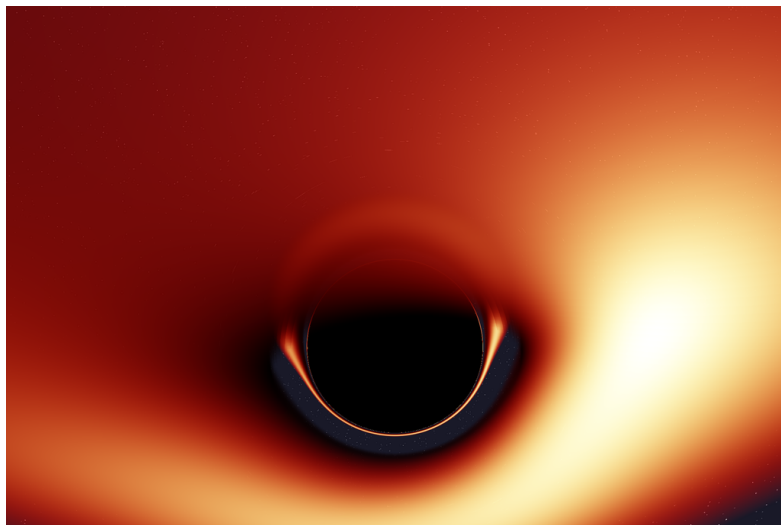
# Vol vers un trou noir

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



# Vol vers un trou noir

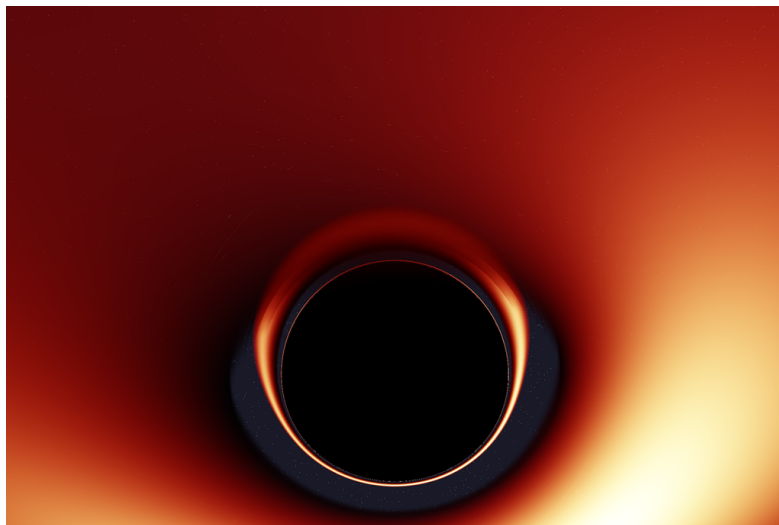
Images calculées par J.-A. Marck [Marck, CQG 13, 393 (1996)]





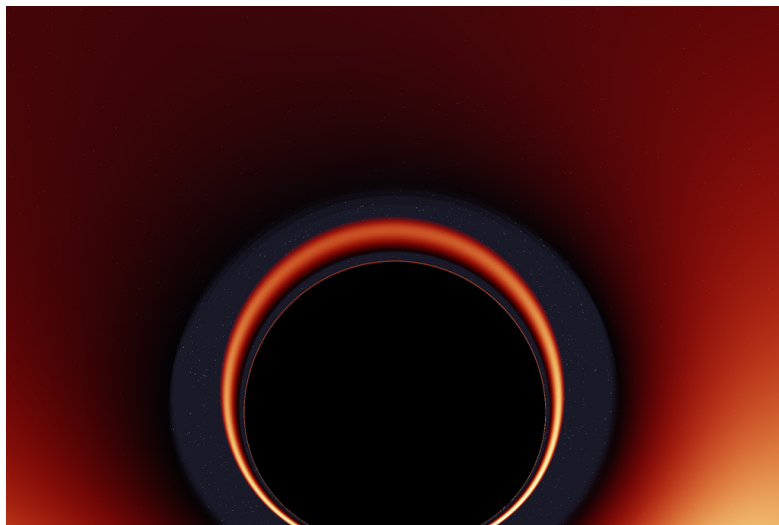
# Vol vers un trou noir

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



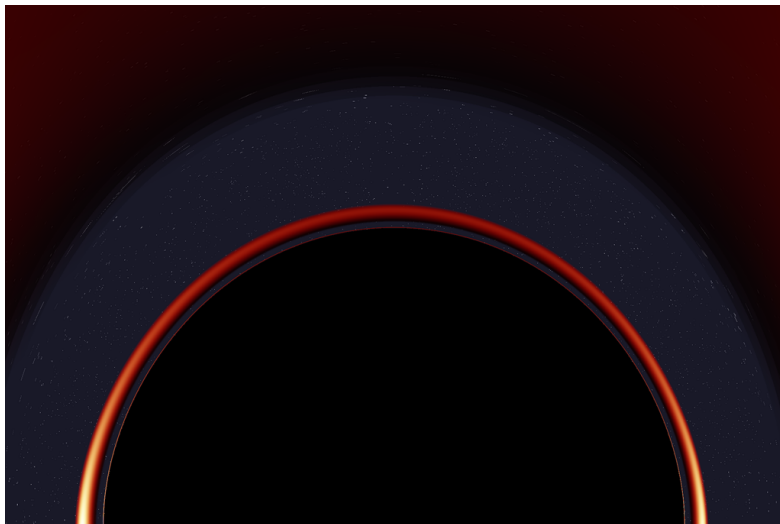
# Vol vers un trou noir

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

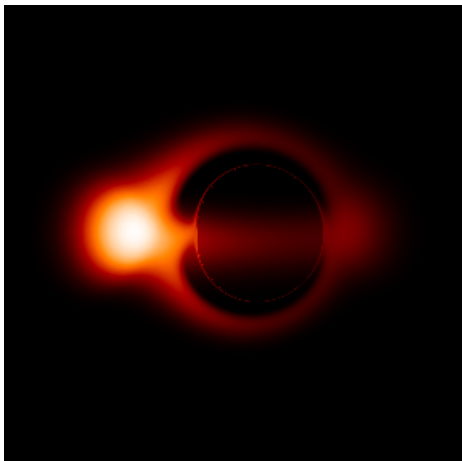
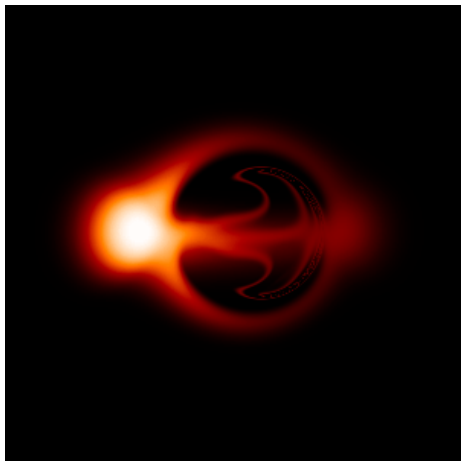


# Vol vers un trou noir

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

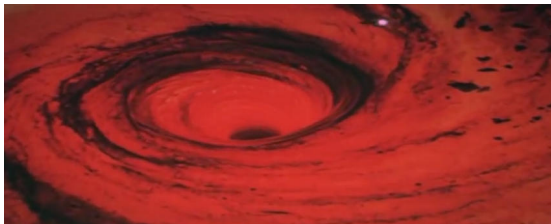


## Images d'objets alternatifs au trou noir de Kerr

trou noir de Kerr  $a/M = 0.9$ étoile bosonique  $k = 1, \omega = 0.70 m/\hbar$ 

[Vincent, Meliani, Grandclément, Gourgoulhon &amp; Straub, CQG 33, 105015 (2016)]

# Les trous noirs au cinéma



## Le Trou Noir

Gary Nelson (1979)

produit par Walt Disney

(c) Walt Disney Pictures

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

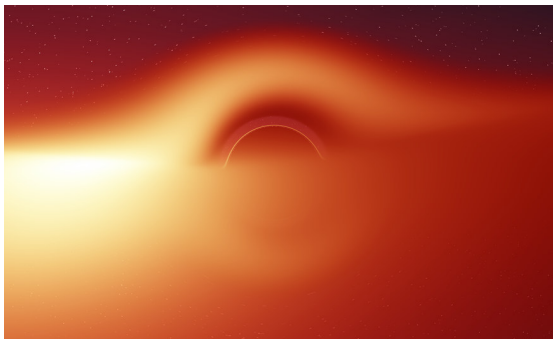


Image calculée par J.-A. Marck (1996)

**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

10 avril 2019 : la toute première image observée !

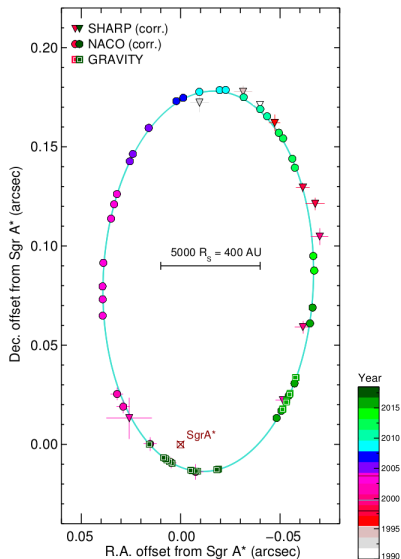


Image du trou noir M87\* par la collaboration *Event Horizon Telescope*

[EHT Collaboration, ApJ 875, L1 (2019)]



## La prochaine image : le trou noir du centre de notre galaxie ?



## Trou noir Sgr A\* :

- distance :  $d = 8.12$  kpc

- masse :

$$\begin{aligned}
 M &= 4.10 \times 10^6 M_{\odot} \\
 &= 20.2 \text{ s} \quad (c = G = 1) \\
 &= 6.06 \times 10^9 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- spin  $J = aM$  pas encore connu...

⇒ taille de l'ombre  $\Theta \sim 53 \mu\text{as}$

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

S2 : étoile de type B

période orbitale :  $P = 16.05$  an

périastre (mai 2018) :

- $r_{\text{per}} = 120 \text{ UA} = 3 \times 10^3 M$

- $v_{\text{per}} = 7650 \text{ km s}^{-1} = 0.025 c$

[GRAVITY team, A&A 615, L15 (2018)]

# Les trous noirs dans le ciel

Il existe trois grandes catégories de trous noirs astrophysiques :

- les **trous noirs stellaires**, restes d'étoiles massives (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  $R \sim 3 \times 10^5 \text{ km à } 200 \text{ UA}^1$

*exemples : Sgr A\* :  $M = 4,3 \times 10^6 M_{\odot}$  et  $R = 13 \times 10^6 \text{ km}$   
 M 87\* :  $M = 6,2 \times 10^9 M_{\odot}$  et  $R = 120 \text{ UA}$*

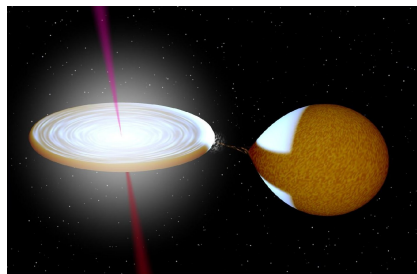
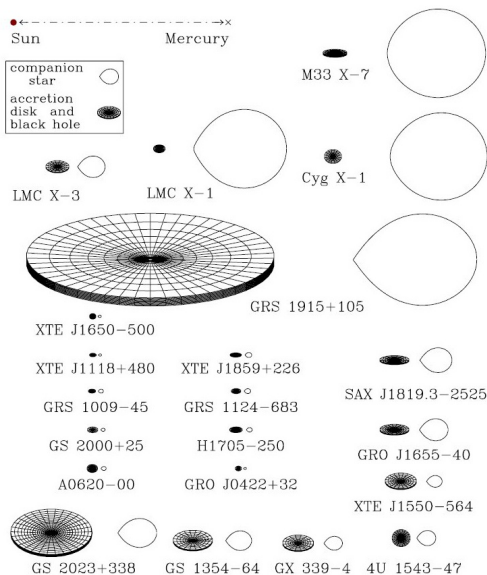
- les **trous noirs de masse intermédiaire**, vus comme des sources X ultra-lumineuses :

$M \sim 10^2 - 10^5 M_{\odot}$  et  $R \sim 300 \text{ km} - 3 \times 10^5 \text{ km}$

*exemple : ESO 243-49 HLX-1 :  $M \sim 10^4 M_{\odot}$  ;  $R \sim 3 \times 10^4 \text{ km}$*

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

# Trous noirs dans les binaires X

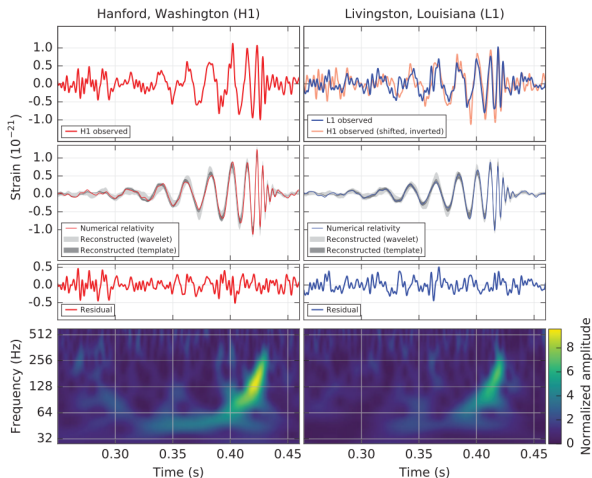


Une vingtaine de trous noirs identifiés dans notre galaxie

[McClintock et al. (2011)]

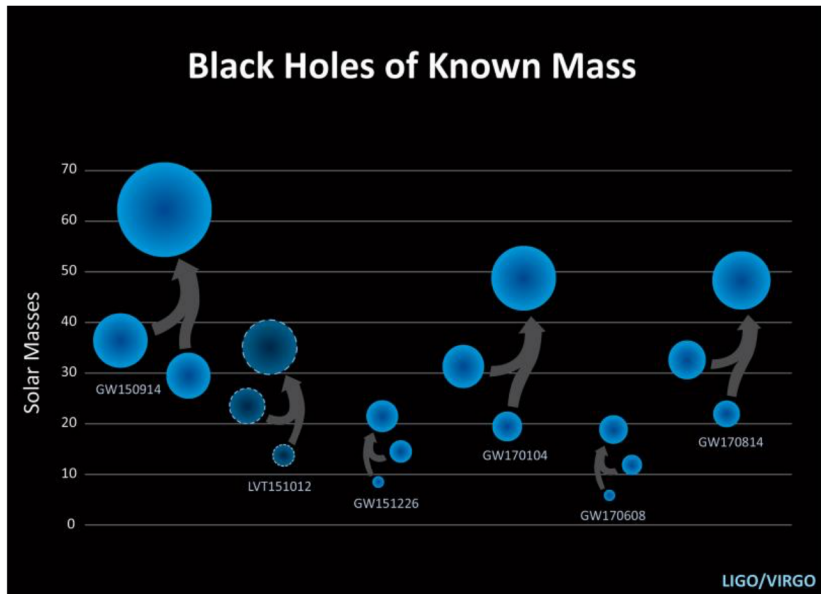
# Un autre canal d'observation des trous noirs : les ondes gravitationnelles

Le 14 septembre 2015, à 09 h 50 min 45 s UTC :



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

## Trous noirs détectés en ondes gravitationnelles

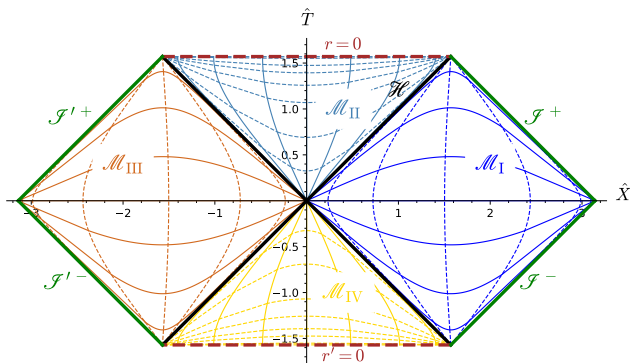


# Plan

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir, un trou blanc et un trou de ver ?
- 2 L'espace-temps relativiste
- 3 Propriétés des trous noirs
- 4 Les trous noirs dans l'Univers
- 5 Les trous blancs : science ou fiction ?**
- 6 Les trous de vers : science ou fiction ?
- 7 Conclusions

# Les trous blancs comme solutions des équations d'Einstein

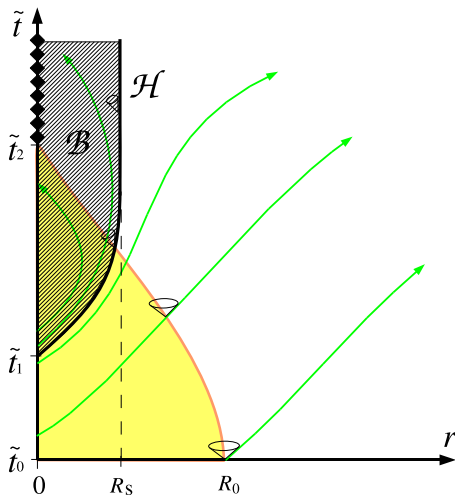
Extension maximale de la **solution de Schwarzschild** décrivant un trou noir statique, obtenue par John L. Synge (1950), Martin D. Kruskal (1960) et George Szekeres (1960)



- $\mathcal{M}_I$  : notre univers
- $\mathcal{M}_{II}$  : trou noir
- $\mathcal{H}$  : horizon du trou noir
- $\mathcal{M}_{IV}$  : trou blanc
- $\mathcal{M}_{III}$  : autre univers
- - : surfaces  $r = \text{const}$
- : surfaces  $t = \text{const}$

Vue compactifiée de l'extension maximale  
(Diagramme conforme de Carter-Penrose)

## Caractère académique de l'extension maximale



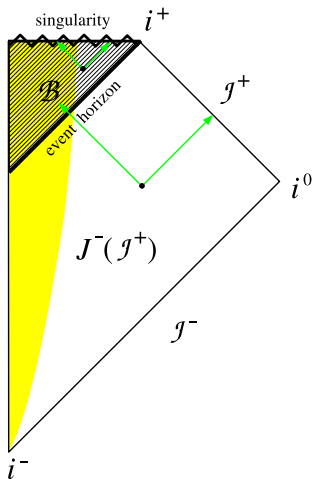
Scénario astrophysique de formation des trous noirs

L'**effondrement gravitationnel** d'une étoile génère un espace-temps avec trou noir, mais sans trou blanc.

Diagramme d'espace-temps



## Caractère académique de l'extension maximale



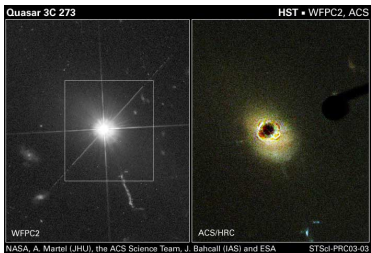
Scénario astrophysique de formation des trous noirs

L'**effondrement gravitationnel** d'une étoile génère un espace-temps avec trou noir, mais sans trou blanc.

Diagramme conforme de Carter-Penrose  
 $\implies$  pas de trou blanc

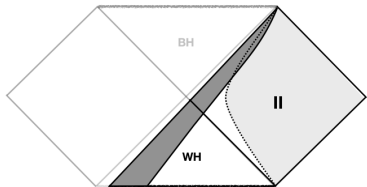
# Trous blancs formés par explosion à partir d'une singularité

Le modèle de Novikov (1964)



Scénario imaginé par Igor Novikov en 1964 pour expliquer l'énergie des **quasars**, découverts au début des années 1960 :

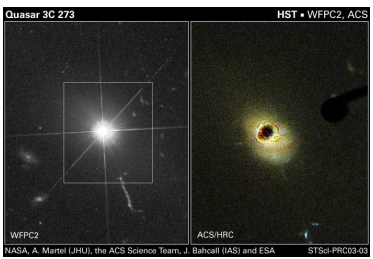
Matière en expansion à partir d'une singularité (région de "big-bang retardé")  $\implies$  forme un trou blanc



[Rovelli & Vidotto, Universe 2018 4, 127]

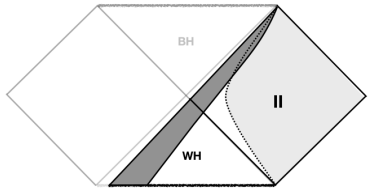
# Trous blancs formés par explosion à partir d'une singularité

Le modèle de Novikov (1964)



Scénario imaginé par Igor Novikov en 1964 pour expliquer l'énergie des **quasars**, découverts au début des années 1960 :

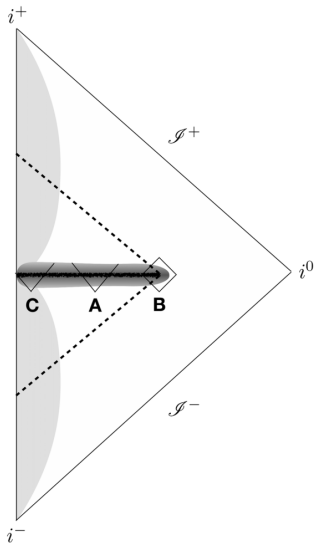
Matière en expansion à partir d'une singularité (région de "big-bang retardé")  $\implies$  forme un trou blanc



Le scénario de Novikov est aujourd'hui abandonné : on explique l'énergie des quasars par l'accrétion de matière sur un *trou noir supermassif*.

[Rovelli & Vidotto, Universe 2018 4, 127]

## Des trous blancs formés par évaporation des trous noirs ?



Scénario proposé en 2015 par Hal Haggard et Carlo Rovelli, faisant intervenir la **gravité quantique** : un trou noir qui s'évapore sous l'effet du rayonnement de Hawking donne naissance à un trou blanc

[Haggard & Rovelli, PRD 92, 104020 (2015)]

← diagramme conforme de Carter-Penrose : la zone en gris foncé est celle où la relativité générale ne s'applique plus (gravité quantique)

[D'Ambrosio, Christodoulou, Martin-Dussaud, Rovelli, & Soltani, PRD 103, 106014 (2021)]

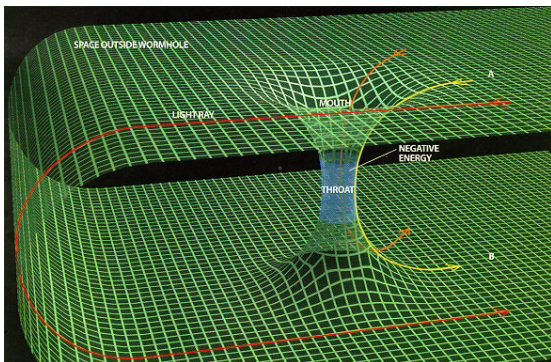
# Plan

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir, un trou blanc et un trou de ver ?
- 2 L'espace-temps relativiste
- 3 Propriétés des trous noirs
- 4 Les trous noirs dans l'Univers
- 5 Les trous blancs : science ou fiction ?
- 6 Les trous de vers : science ou fiction ?**
- 7 Conclusions

# Les trous de vers

Un **trou de ver** est une structure de l'espace-temps, qui relie deux régions autrement éloignées l'une de l'autre.

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



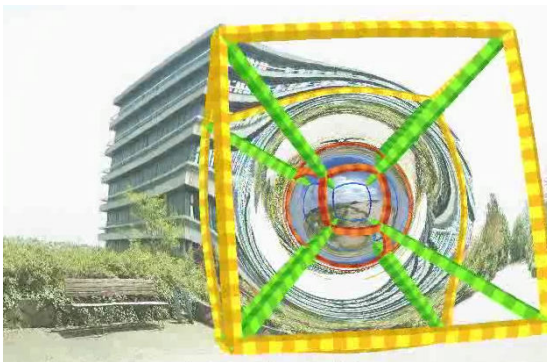
Un trou de ver se distingue par

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

Matière exotique : matière à densité d'énergie *négative*

# Voyage à travers un trou de ver

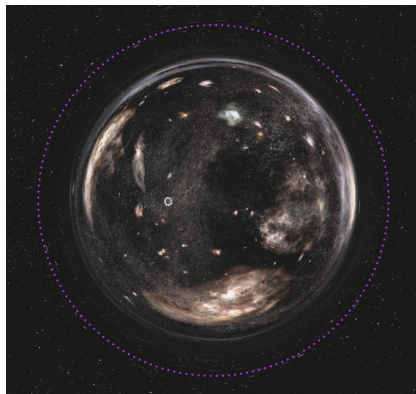
Trou de ver de type Morris & Thorne (1988) entre l'Université de Tübingen (Allemagne) et une plage de Boulogne sur Mer



Film réalisé par C. Zahn (2008)

<https://www.spacetime.travel.org/>

# Le trou de ver d'*Interstellar*



[James, von Tunzelmann, Franklin & Thorne, Am. J. Phys. **83**, 486 (2015)]  
[video]



# Plan

- 1 Qu'est-ce qu'un trou noir, un trou blanc et un trou de ver ?
- 2 L'espace-temps relativiste
- 3 Propriétés des trous noirs
- 4 Les trous noirs dans l'Univers
- 5 Les trous blancs : science ou fiction ?
- 6 Les trous de vers : science ou fiction ?
- 7 Conclusions

# Conclusions

- Les trous noirs, les trous blancs et les trous de ver sont des **solutions des équations de la relativité générale** décrivant certaines configurations de l'espace-temps.
- Il ne fait aujourd'hui guère de doute que **les trous noirs existent** dans notre Univers : détectés dans les systèmes binaires X dès les années 1970, ils sont aujourd'hui observés en ondes gravitationnelles et l'un d'entre eux a même été "photographié" en 2019.
- On dispose d'un scénario astrophysique générique pour la formation des trous noirs : l'**effondrement gravitationnel**.
- Inversement, on n'a pas de scénario de formation pour les trous de ver ; en particulier il faudrait disposer de **matière exotique**.
- Pour les trous blancs, un scénario de formation par évaporation des trous noirs a récemment été proposé, mais il reste spéculatif, en raison du **manque d'une théorie quantique de la gravité** bien établie.
- **Aucun phénomène observé à ce jour n'indique l'existence d'un trou blanc ou d'un trou de ver.**

# Bibliographie

- T. Damour, 2005, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi
- S. Collion, 2019, *Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps*, EDP Sciences
- N. Deruelle, 2015, *De Pythagore à Einstein, tout est nombre*, Belin
- N. Deruelle & J.-P. Lasota, 2018, *Les Ondes gravitationnelles*, Odile Jacob
- J.-P. Lasota, 2010, *La science des trous noirs*, Odile Jacob
- J.-P. Luminet, 2006, *Le Destin de l'Univers II*, Folio Essais
- A. Riazuelo, 2016, *Les trous noirs : à la poursuite de l'invisible*, Vuibert  
video : <http://www2.iap.fr/users/riazuelo/bh/vuibert>
- M. Smerlak, 2016, *Les trous noirs*, Que sais-je ?, PUF
- P. Spagnou, 2017, *Les mystères du temps*, CNRS Éditions
- K.S. Thorne, 1997, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion
- K.S. Thorne, 2014, *The Science of Interstellar*, Norton

# À propos de ce document

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



**Linux**

système d'exploitation (Ubuntu)



traitement de texte



**Inkscape**

dessin vectoriel



**SoGE**

calcul formel sous Python (diagrammes de Carter-Penrose)

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