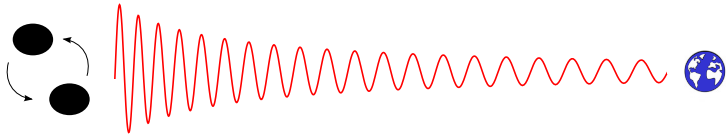


Énigmatique trou noir

Philippe Grandclément
Alexandre Le Tiec

Laboratoire Univers et Théories
Observatoire de Paris / CNRS







Plan de l'exposé

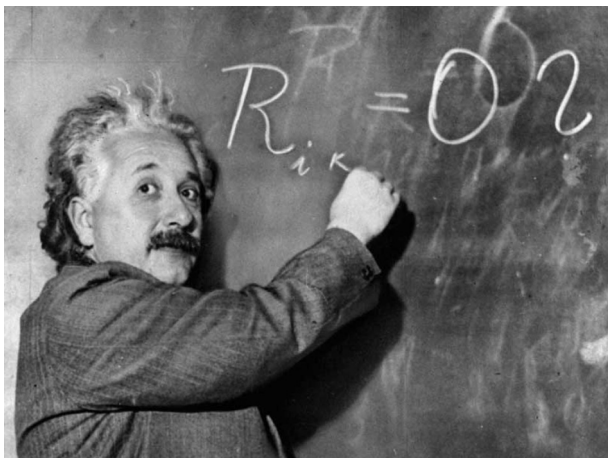
① Espace, temps et gravitation

② Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Plan de l'exposé

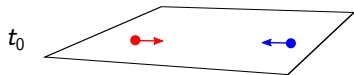
① Espace, temps et gravitation

② Qu'est-ce qu'un trou noir ?

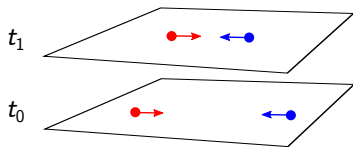


La *relativité générale* est la théorie de l'**espace**, du **temps** et de la **gravitation** formulée par Albert Einstein en 1915

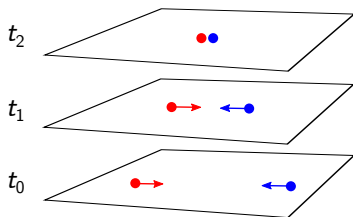
Espace, temps et espace-temps



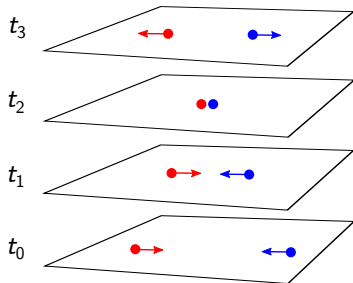
Espace, temps et espace-temps



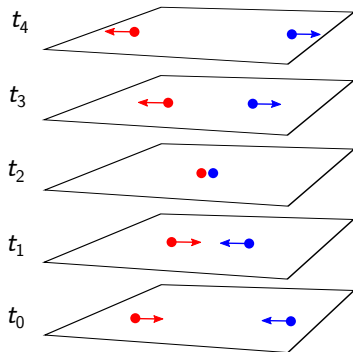
Espace, temps et espace-temps



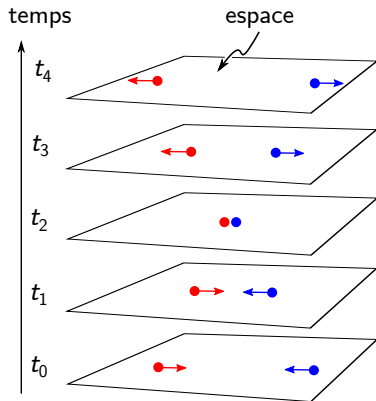
Espace, temps et espace-temps



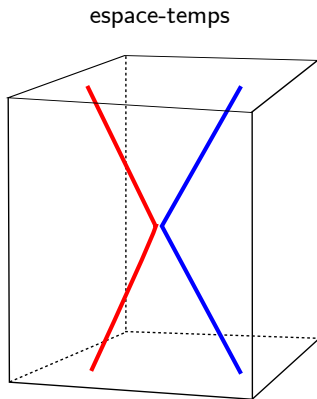
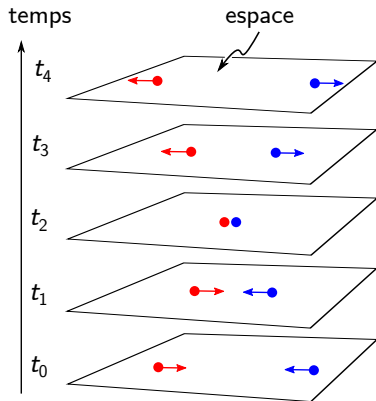
Espace, temps et espace-temps



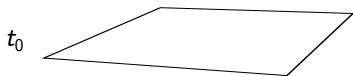
Espace, temps et espace-temps



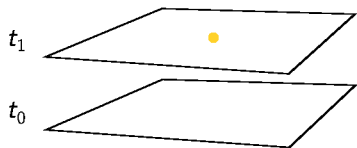
Espace, temps et espace-temps



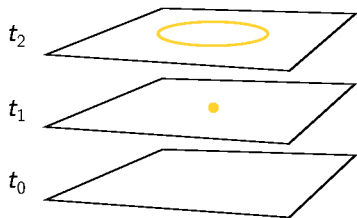
Espace, temps et espace-temps



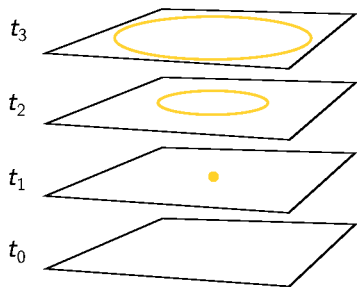
Espace, temps et espace-temps



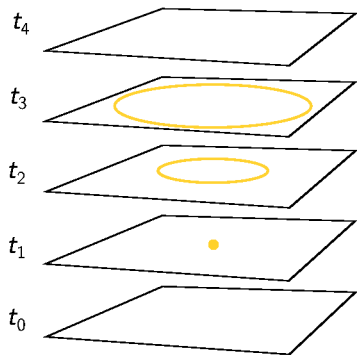
Espace, temps et espace-temps



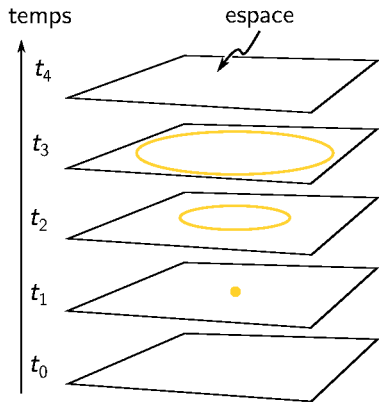
Espace, temps et espace-temps



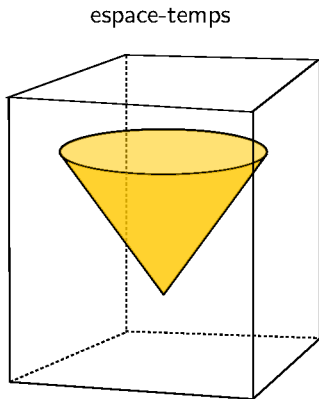
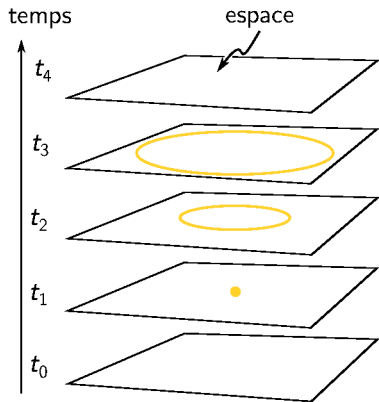
Espace, temps et espace-temps



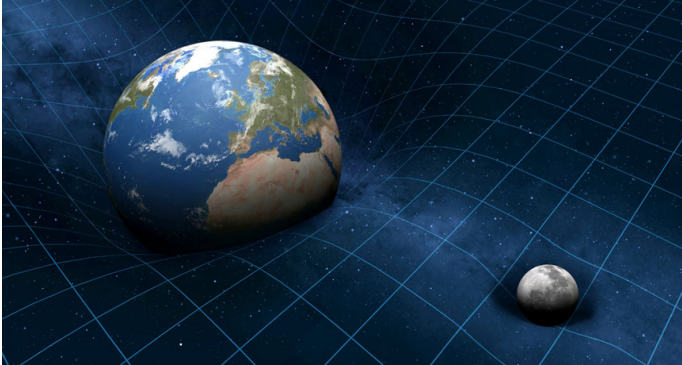
Espace, temps et espace-temps



Espace, temps et espace-temps

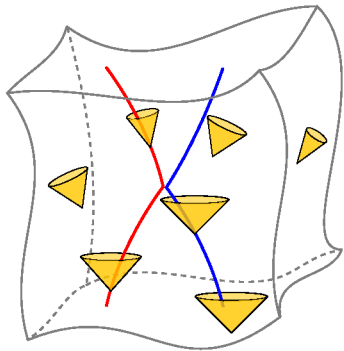


L'espace-temps est courbe



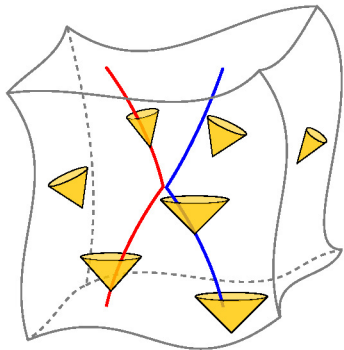
La gravitation est la manifestation de la **courbure de l'espace-temps** par la masse et l'énergie de la matière

L'espace-temps est courbe



espace-temps

L'espace-temps est courbe

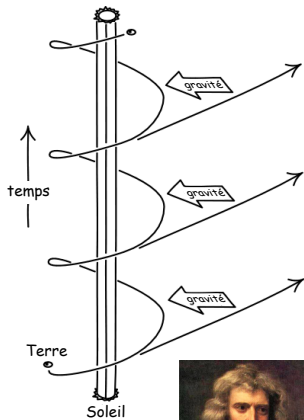


espace-temps



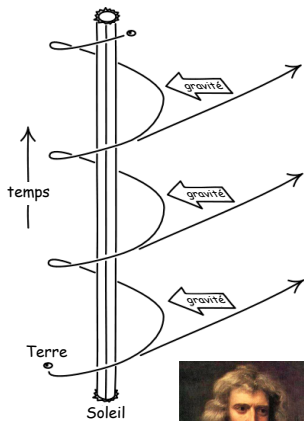
dessert anglais

Gravitation universelle



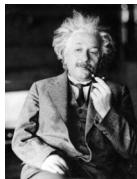
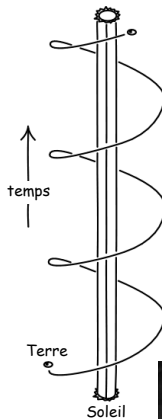
(Newton, 1687)

Gravitation universelle



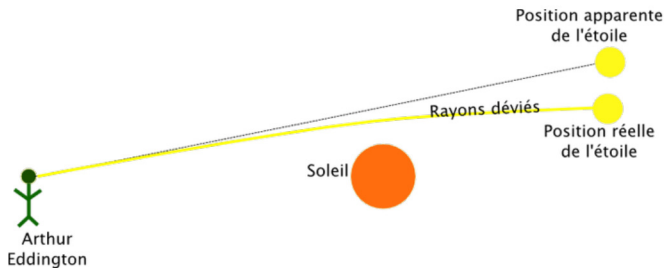
(Newton, 1687)

Relativité générale

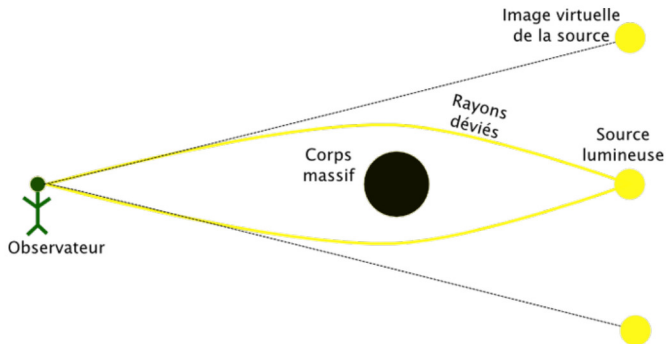


(Einstein, 1915)

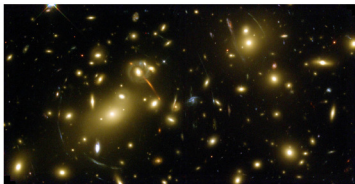
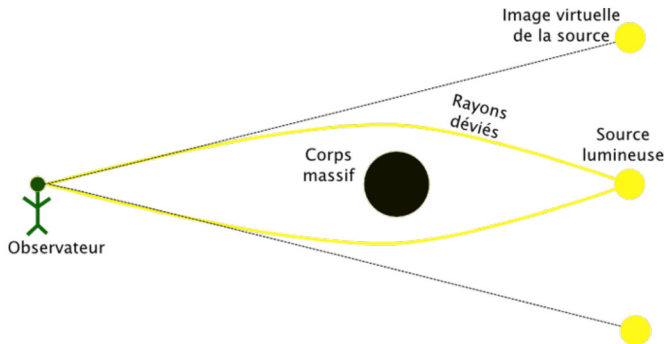
La déviation de la lumière



Les mirages gravitationnels



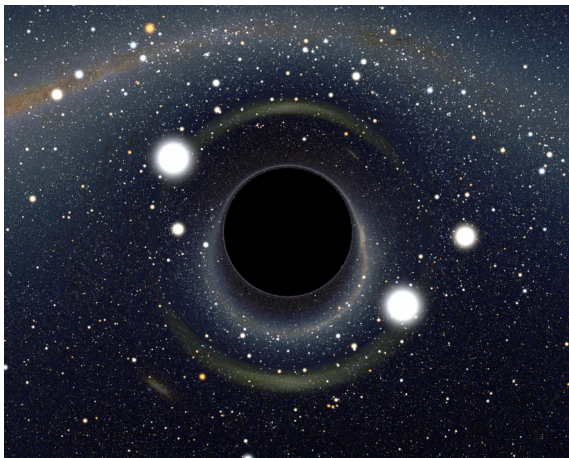
Les mirages gravitationnels



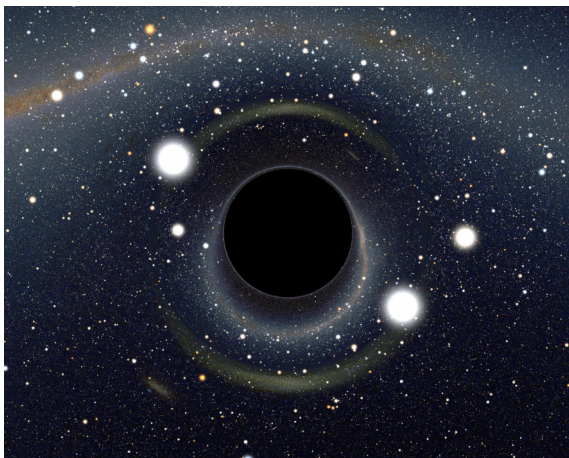
Plan de l'exposé

① Espace, temps et gravitation

② Qu'est-ce qu'un trou noir ?



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



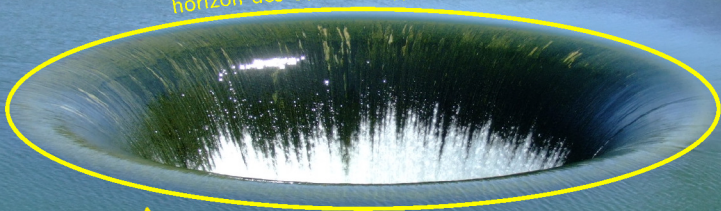
La frontière immatérielle entre l'intérieur du trou noir et le reste de l'univers s'appelle l'**horizon des événements**





poisson-lumière

horizon des événements



poisson-lumière

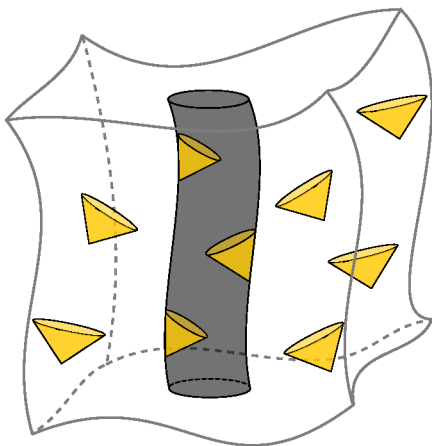
horizon des événements

trou noir



poisson-lumière

Qu'est-ce qu'un trou noir ?

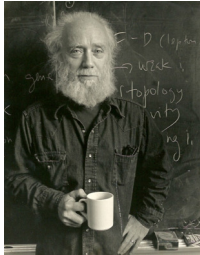


C'est une région de l'espace-temps d'où rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper

Un long cheminement intellectuel



Schwarzschild, 1916



Finkelstein, 1958



Kerr, 1963



Wheeler, 1960'

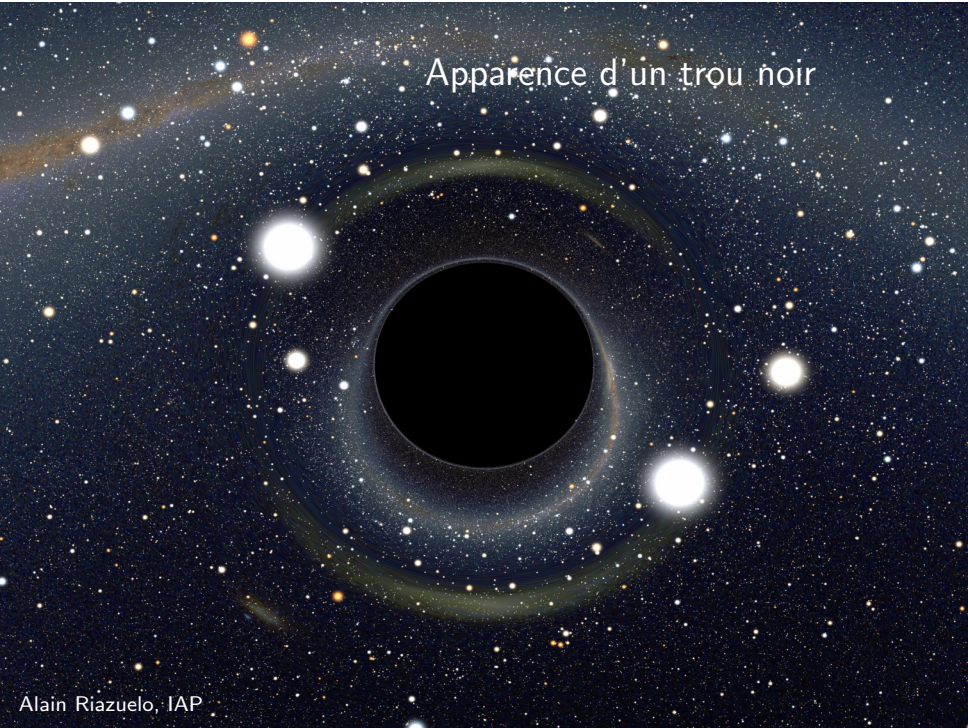


Penrose, 1965

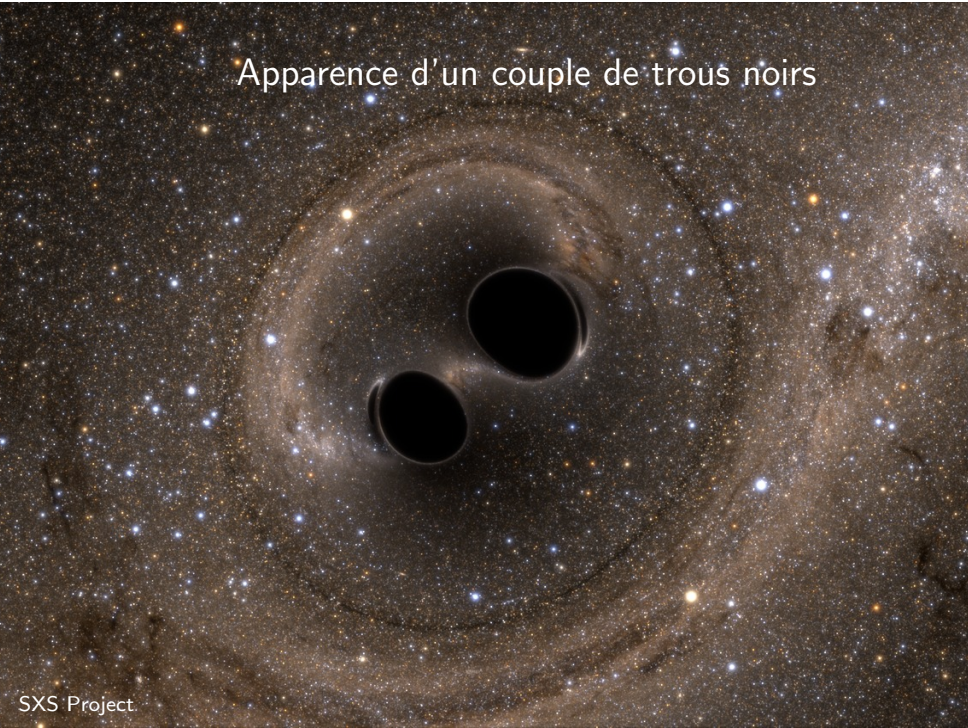


Hawking, 1974

Apparence d'un trou noir



Apparence d'un couple de trous noirs



Un trou noir est *compact*




Densité et compacité

$$\rho = \frac{M}{R^3} \quad C = \frac{G}{c^2} \frac{M}{R}$$

Système	Densité [g/cm ³]	Compacité [sans unité]
Proton	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{-39}$
Lune	3	$\sim 10^{-11}$
Terre	5	$\sim 10^{-9}$
Soleil	1	$\sim 10^{-6}$
Naine blanche	$\sim 10^7$	$\sim 10^{-3}$
Étoile à neutrons	$\sim 10^{15}$	$\sim 0,2$
Trou noir		$\sim 0,5$

TYPES OF BLACK HOLES



Miniature

Also called micro black holes are hypothetical tiny black holes



Stellar

They have masses ranging from about 5 to several tens of solar masses.



Intermediate

They have masses ranging from 10^2 to 10^5 solar masses



Supermassive

These are the largest of black holes, being millions to billions times more massive than the Sun.

Fabriquer et détecter un trou noir

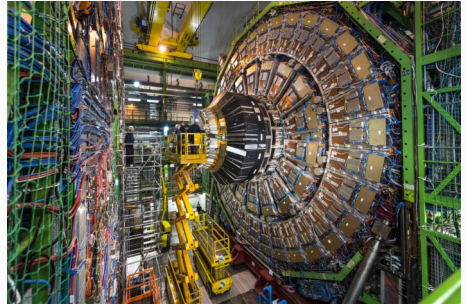
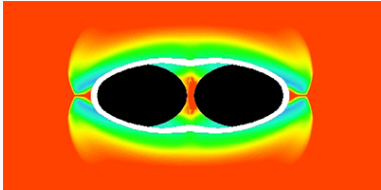
Création

- être autorisé par la théorie.
- amener suffisamment de masse dans un petit volume.

Détection

- seulement possible si il n'est pas isolé.
- disque d'accrétion.
- objets en orbite autour du trou.
- systèmes binaires.

Créer des micro-trous noirs sur terre ?

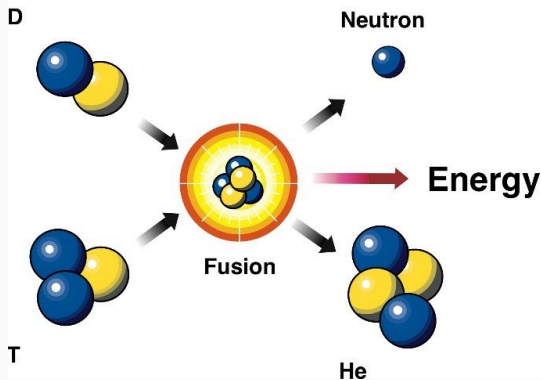


Possible, en principe, par collisions de particules mais pas d'inquiétude...

Une machine à créer des trous noirs : les supernovae

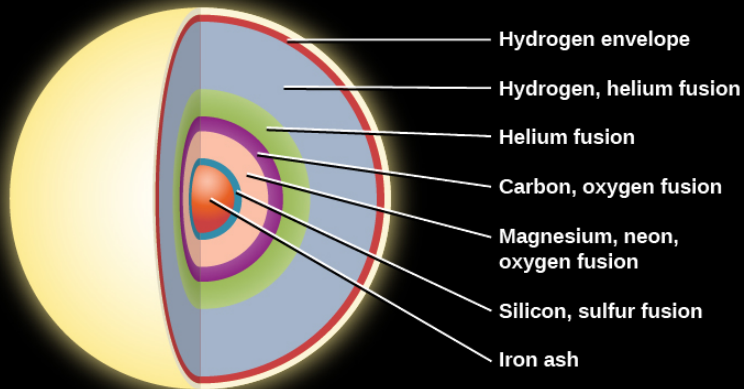


Fusion dans les étoiles

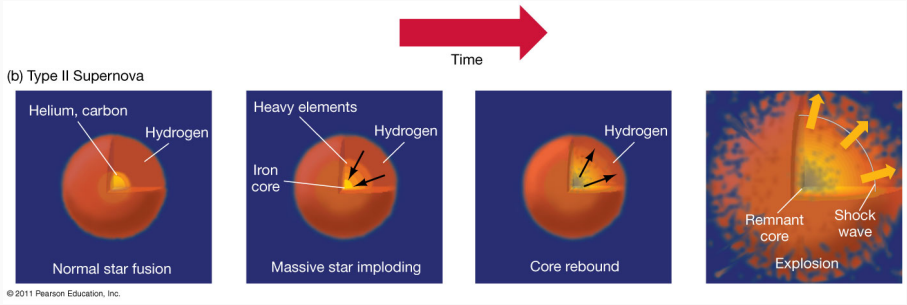


- Les étoiles massives poursuivent la fusion.
- Formation d'éléments de plus en plus lourds : Carbone, Oxygène, Silicium, Magnésium ...
- Jusqu'à l'élément le plus stable : le Fer.

Structure des étoile massives

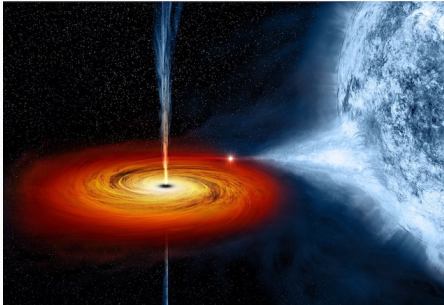


Implosion du coeur



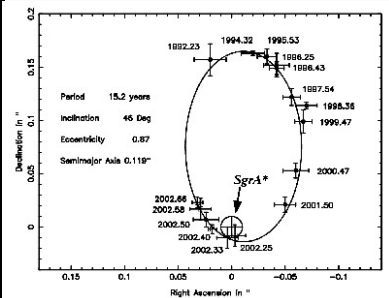
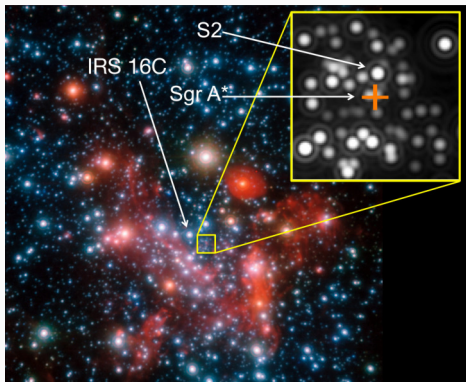
Si l'étoile est suffisamment massive, rien ne peut arrêter l'effondrement du coeur : formation d'un trou noir dit stellaire (masse de quelques dizaines de fois celle du soleil).

Observations : binaires X



- La modélisation du système (jet, disque, compagnon) peut permettre de remonter à la masse du corps accrétant.
- Tout objet de plus de 5 masses solaires est probablement un trou noir.
- Une vingtaine de candidats, jusqu'à 20 masses solaires.
- Pas mal d'incertitudes.

Trous noirs supermassifs : le centre galactique



Existence d'un objet "petit", sombre, et de 4 millions de masses solaires.

Observer un trou noir supermassif

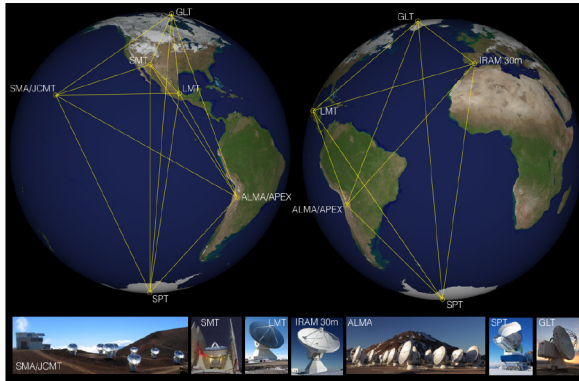
Difficulté

- objets très massifs (jusqu'à plusieurs milliards de masses solaires).
- mais très compacts.
- donc relativement petits.

Deux plus gros trous noirs sur le ciel

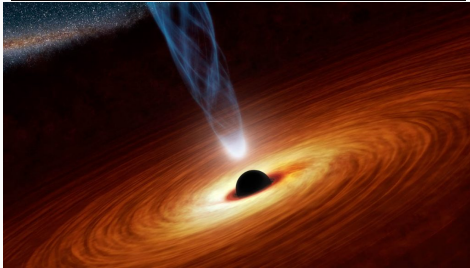
- Centre galactique : Sagittarius A*.
- M87 : plus loin mais 500,000 fois plus massif !
- Taille d'un pamplemousse sur la lune !

Event Horizon Telescope



Stations radio, recombinaison de signaux sur toute la surface du globe.

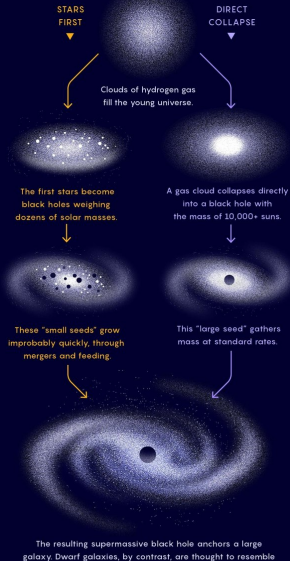
Première image (2019)



Formation des trous noirs supermassifs

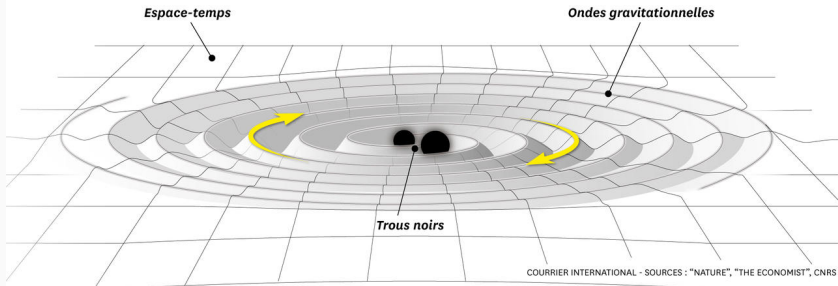
How Supermassive Black Holes Are Born

The heart of most Milky Way-like galaxies holds a black hole weighing billions of solar masses. Astrophysicists have two main ideas for how these monstrosities got so huge.

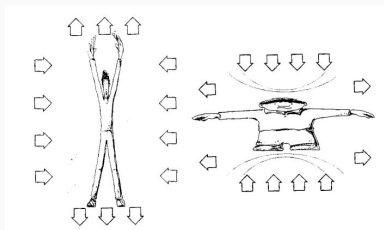
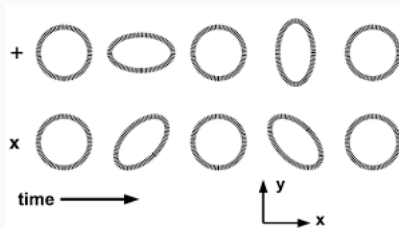


Ondes gravitationnelles

La convergence en spirale de deux trous noirs a provoqué ces ondes gravitationnelles.

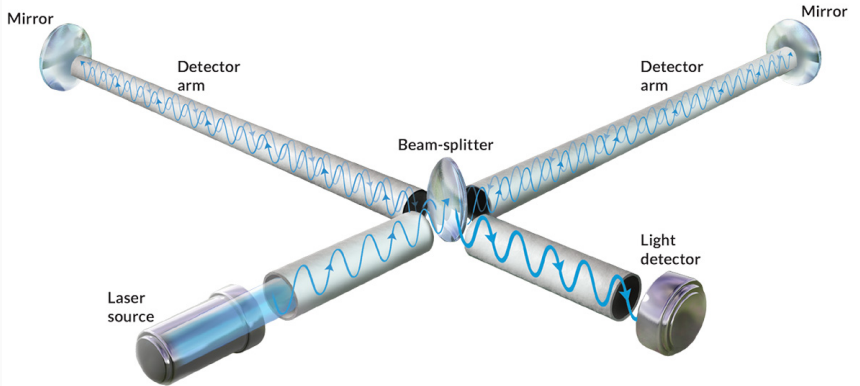


Effet des ondes gravitationnelles

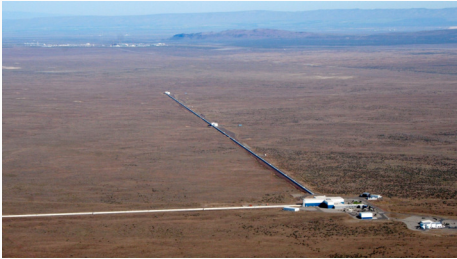


La variation de distance est incroyablement petite.

Principe de la détection



Détecteurs

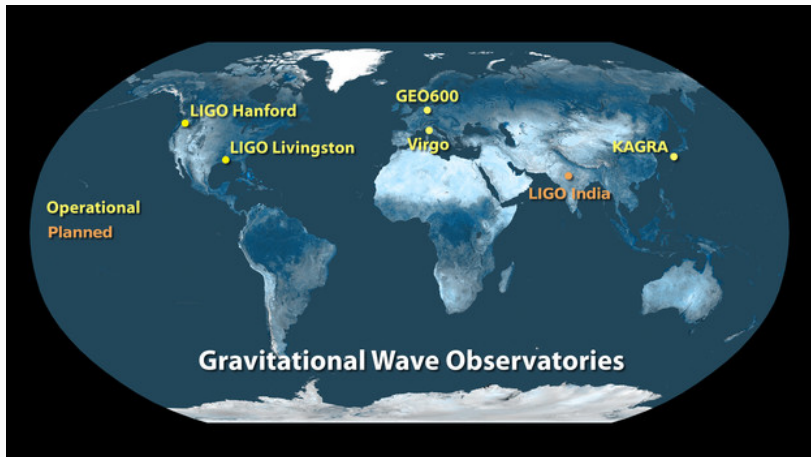


Hanford (Wa)

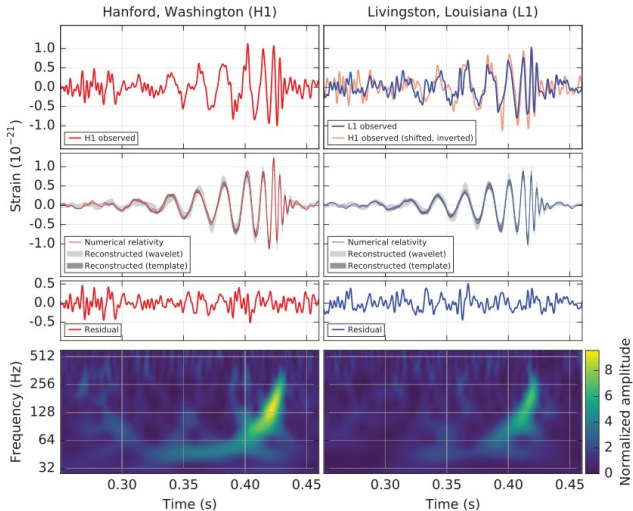
Sur des bras de 4 km, on s'attend à une variation de longueur de l'ordre de la taille d'un proton !



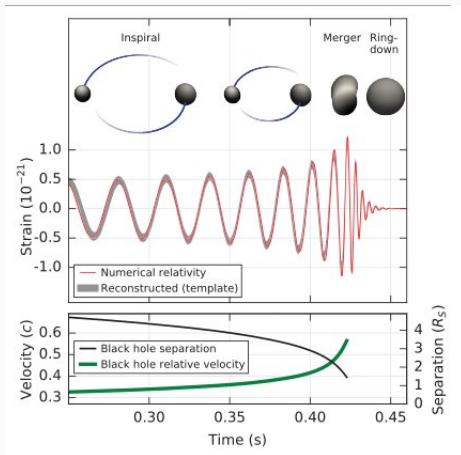
Livingston (La)



Première détection GW150914 (2015)

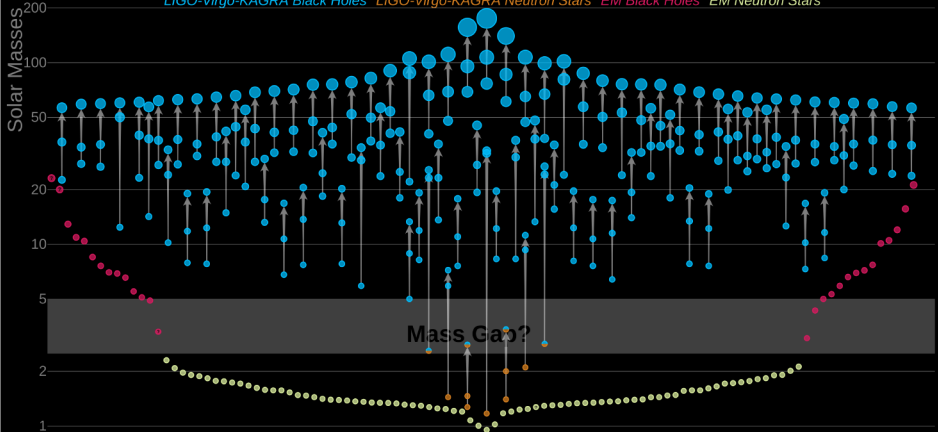


Explication de l'observation



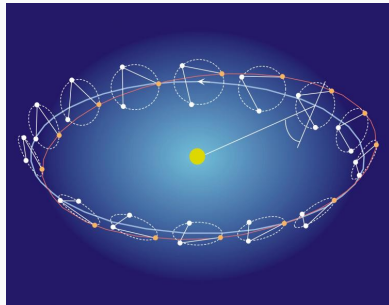
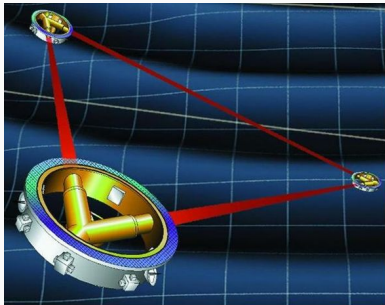
Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



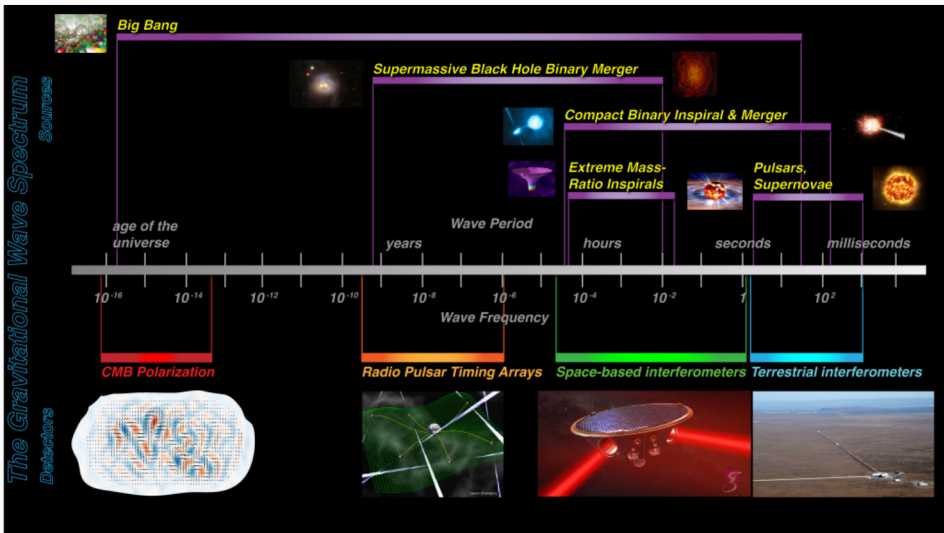
LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

Observatoire spatial : mission LISA (2034)



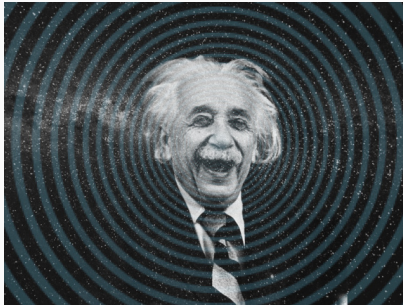
Bras de 2 millions de km, changement de fréquence d'observation.

Sources variées



Questions ouvertes ?

- Formation de trous noirs supermassifs.
- Existence de trous noirs primordiaux ? De masse intermédiaire ?
- Nature de la singularité centrale (très difficile).
- Déviation à la relativité générale ?
- Objets exotiques : trous de vers, étoiles bosoniques etc...



Pour en savoir plus

- A. Riazuelo, *Les trous noirs*, Vuibert, 2016
- J. Levin, *Black hole blues*, Bodley Head, 2016
- P. Binétruy, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, Dunod, 2015
- N. Deruelle, *De Pythagore à Einstein, tout est nombre*, Belin, 2015
- N.&J. Delabrouille, *Les nouveaux messagers du cosmos*, Seuil, 2011
- J.-P. Lasota, *La science des trous noirs*, Odile Jacob, 2010
- D. Kennefick, *Traveling at the speed of thought*, U. Princeton, 2007
- T. Damour, *Si Einstein m'était conté*, Le Cherche Midi, 2005
- K. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion, 1997
- R. Geroch, *General relativity from A to B*, U. Chicago Press, 1981