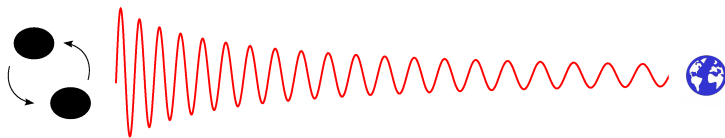


Les ondes gravitationnelles, messagères d'Einstein

Alexandre Le Tiec

Laboratoire Univers et Théories
Observatoire de Paris / CNRS





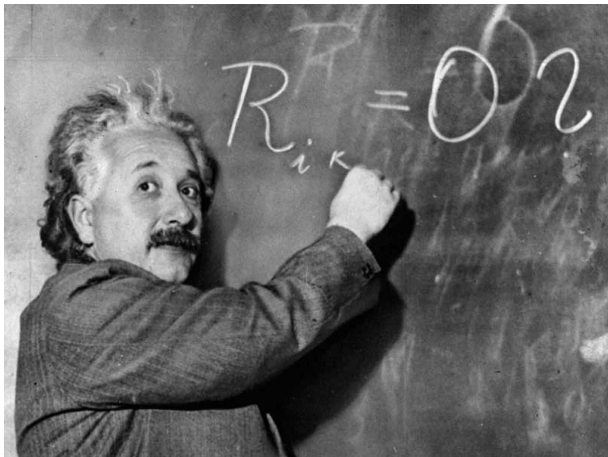


Plan de l'exposé

- ① Espace, temps et gravitation
- ② Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- ③ Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- ④ Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- ⑤ Un couple de trous noirs fusionnels

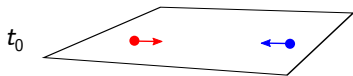
Plan de l'exposé

- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 3 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- 4 Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- 5 Un couple de trous noirs fusionnels

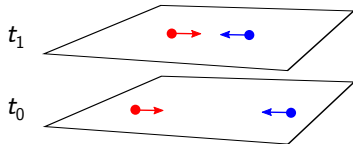


La *relativité générale* est la théorie de l'**espace**, du **temps** et de la **gravitation** formulée par Albert Einstein en 1915

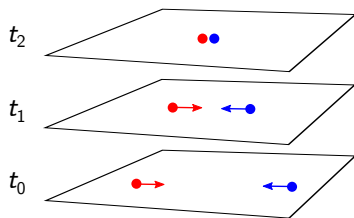
Espace, temps et espace-temps



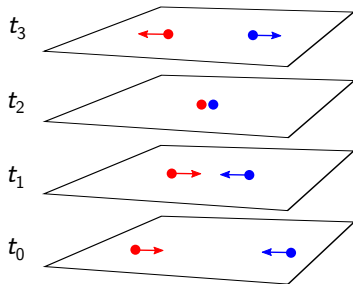
Espace, temps et espace-temps



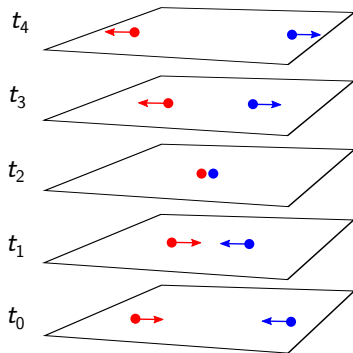
Espace, temps et espace-temps



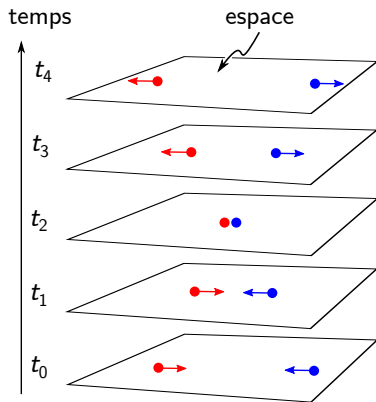
Espace, temps et espace-temps



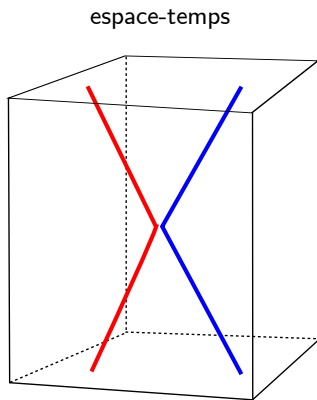
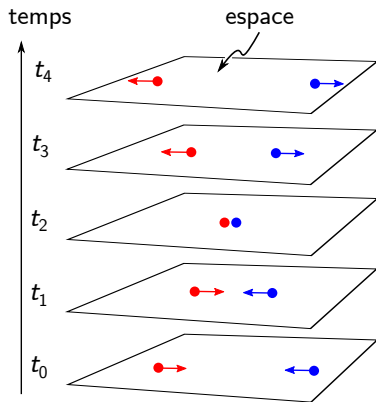
Espace, temps et espace-temps



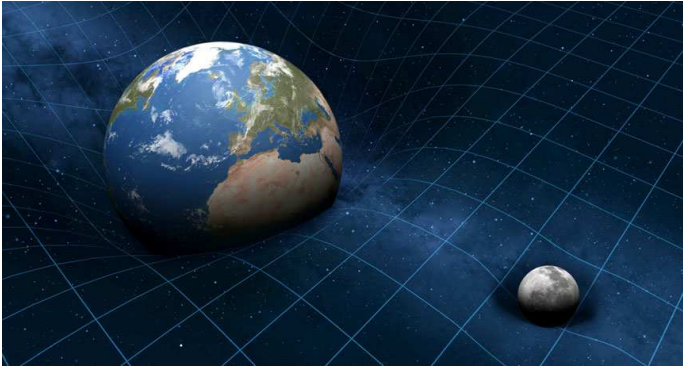
Espace, temps et espace-temps



Espace, temps et espace-temps

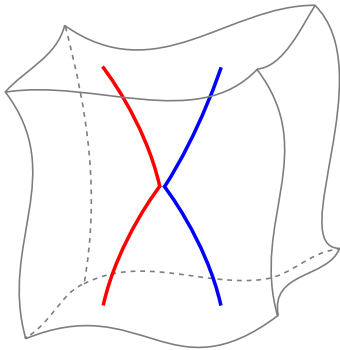


L'espace-temps est courbe



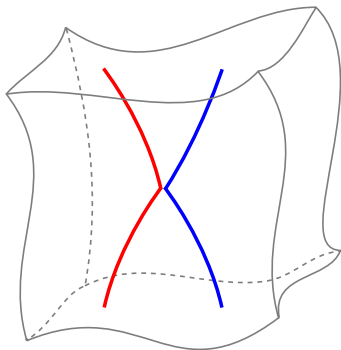
La gravitation est la manifestation de la **courbure de l'espace-temps** par la masse et l'énergie de la matière

L'espace-temps est dynamique



espace-temps

L'espace-temps est dynamique



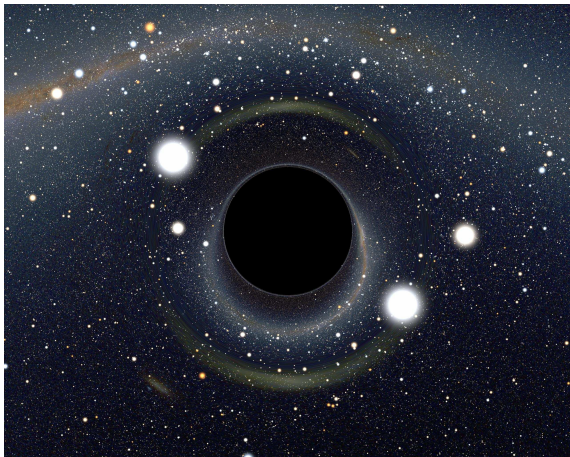
espace-temps



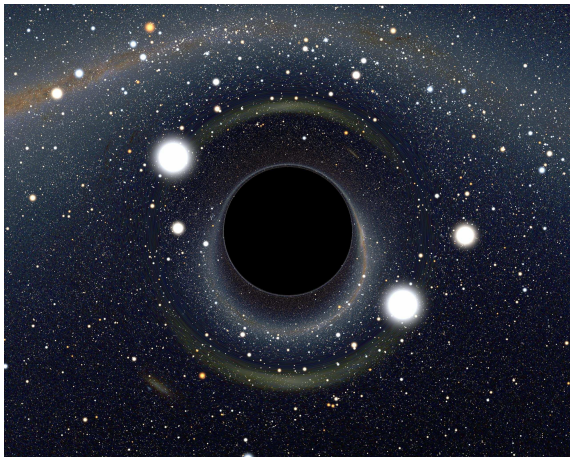
dessert anglais

Plan de l'exposé

- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 3 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- 4 Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- 5 Un couple de trous noirs fusionnels



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



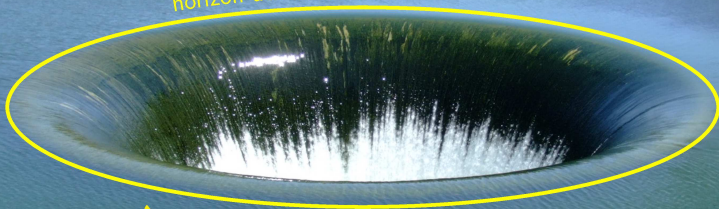
La frontière immatérielle entre l'intérieur du trou noir et le reste de l'univers s'appelle l'**horizon des événements**





poisson-lumière

horizon des événements



poisson-lumière

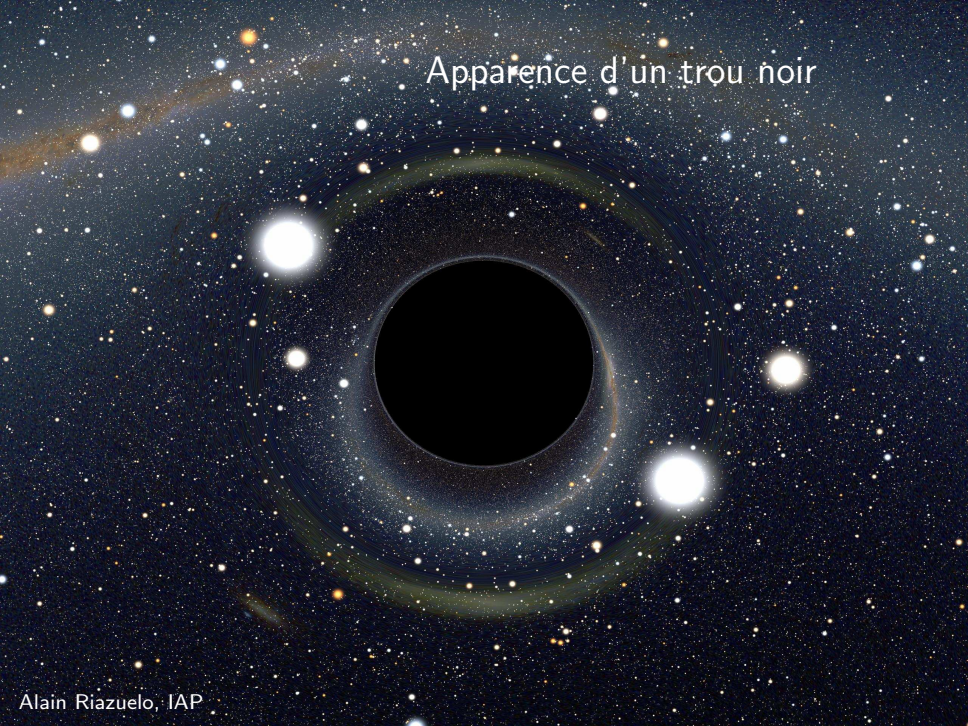
horizon des événements

trou noir



poisson-lumière

Apparence d'un trou noir



Un trou noir est compact



[<https://youtu.be/QgNDao7m41M>]

Densité et compacité

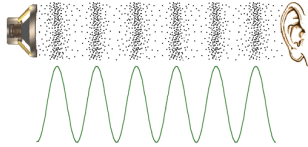
$$\rho = \frac{M}{R^3} \quad C = \frac{G}{c^2} \frac{M}{R}$$

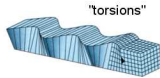
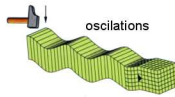
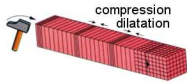
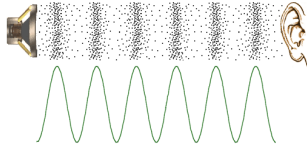
Système	Densité [g/cm ³]	Compacité [sans unité]
Proton	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{-39}$
Lune	3	$\sim 10^{-11}$
Terre	5	$\sim 10^{-9}$
Soleil	1	$\sim 10^{-6}$
Naine blanche	$\sim 10^7$	$\sim 10^{-3}$
Étoile à neutrons	$\sim 10^{15}$	$\sim 0,2$
Trou noir	0	$\sim 0,5$

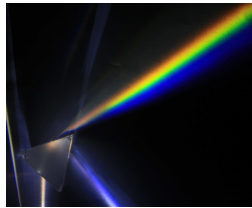
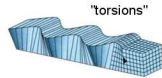
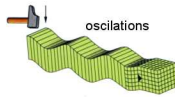
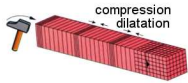
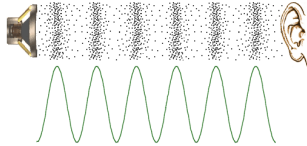
Plan de l'exposé

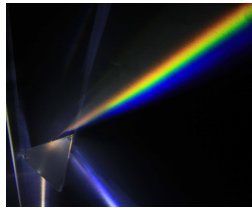
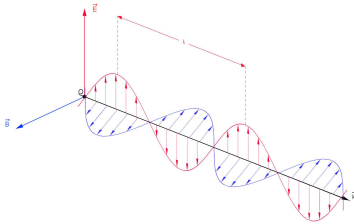
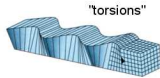
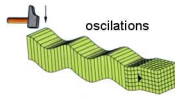
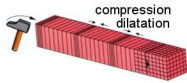
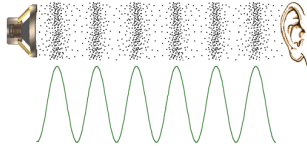
- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 3 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?**
- 4 Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- 5 Un couple de trous noirs fusionnels





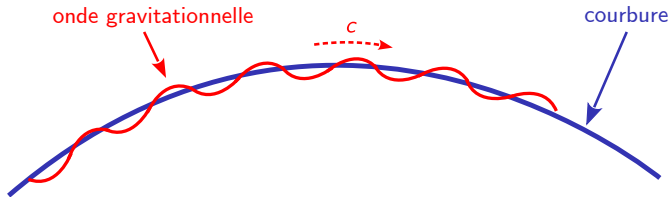




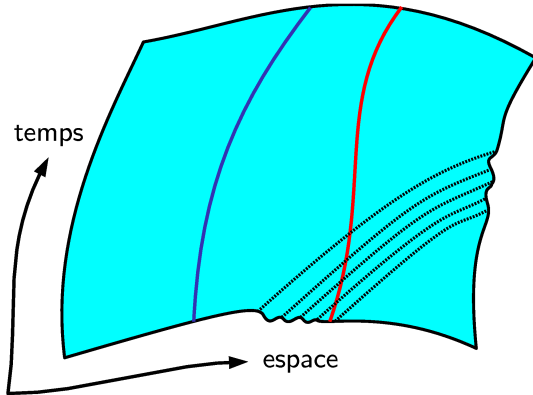


Les vibrations de l'espace-temps

Une **onde gravitationnelle** est une oscillation dans la **courbure** de l'espace-temps qui se propage à la vitesse de la lumière c

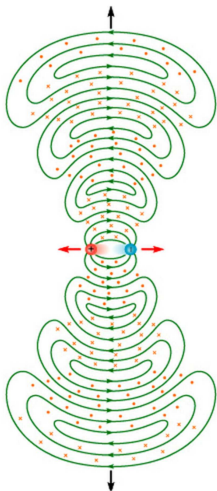


Les vibrations de l'espace-temps

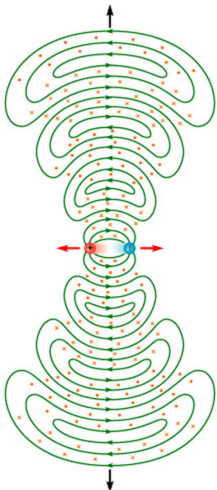


(Credit : E. Gourgoulhon)

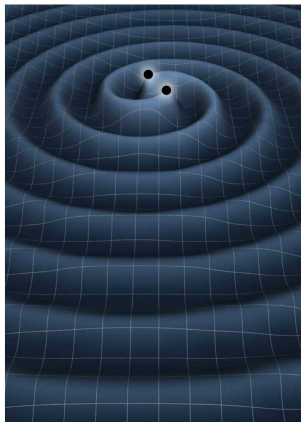
Ondes électromagnétiques



Ondes électromagnétiques



Ondes gravitationnelles



Les sources d'ondes gravitationnelles



supernovae

Les sources d'ondes gravitationnelles



étoile à neutrons isolée

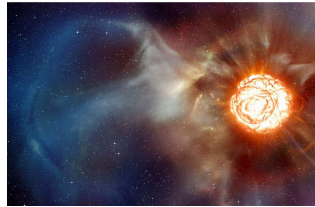


supernovae

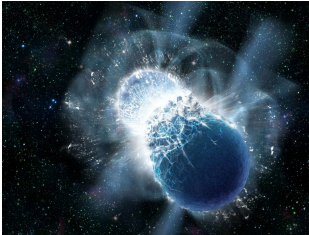
Les sources d'ondes gravitationnelles



étoile à neutrons isolée



supernovae

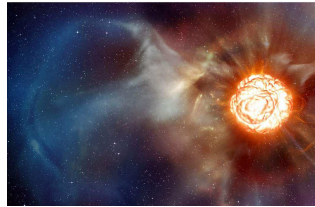


binaire d'étoiles à neutrons

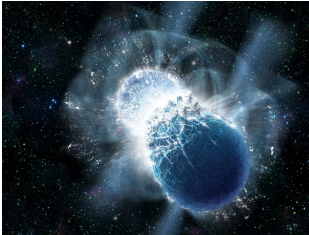
Les sources d'ondes gravitationnelles



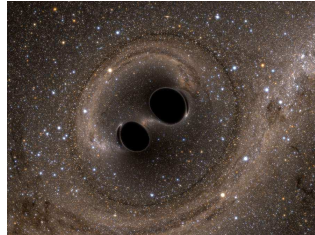
étoile à neutrons isolée



supernovae



binaire d'étoiles à neutrons

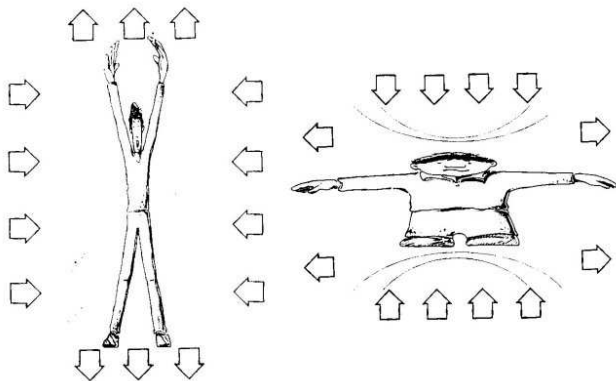


binaire de trous noirs

Plan de l'exposé

- ① Espace, temps et gravitation
- ② Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- ③ Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- ④ Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- ⑤ Un couple de trous noirs fusionnels

Effets d'une onde gravitationnelle

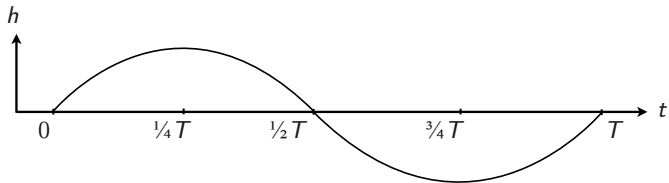


Effets d'une onde gravitationnelle

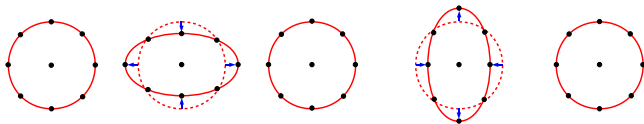
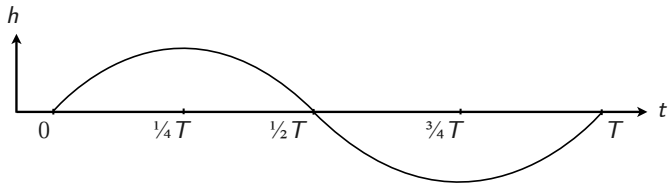


[https://youtu.be/WgE6lb_i78A]

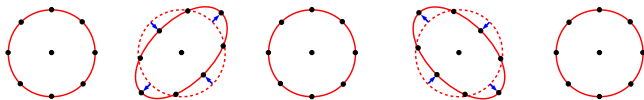
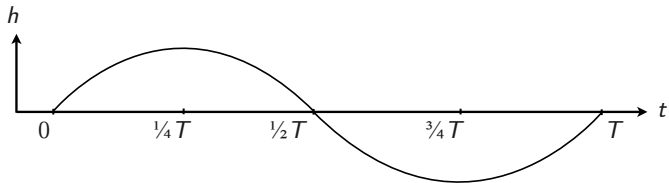
Effets d'une onde gravitationnelle



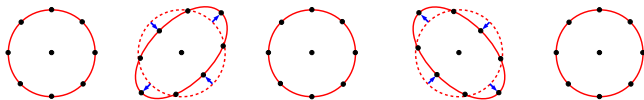
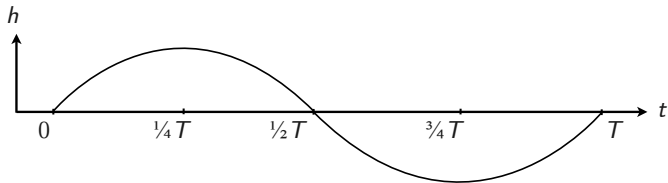
Effets d'une onde gravitationnelle



Effets d'une onde gravitationnelle



Effets d'une onde gravitationnelle

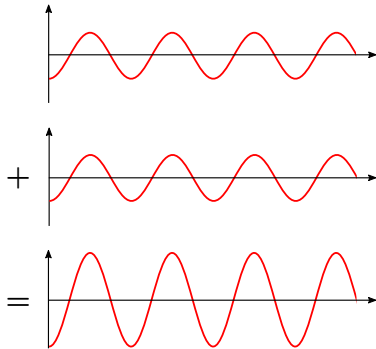


Onde gravitationnelle $h \rightarrow$ variation de longueur $\delta L \sim h L$

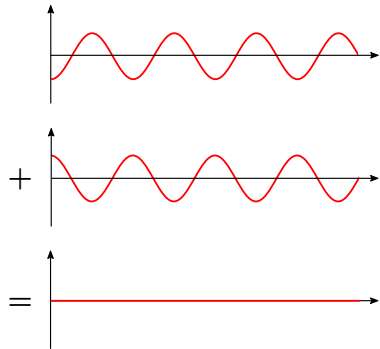
Détecteurs interférométriques laser



Les ondes peuvent interférer

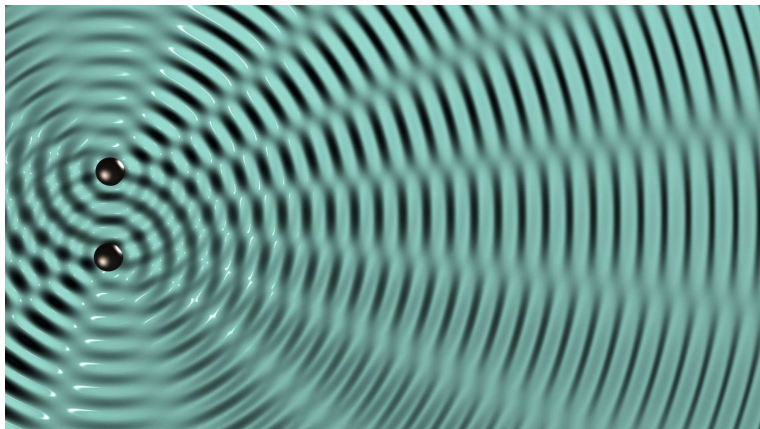


interférences constructives

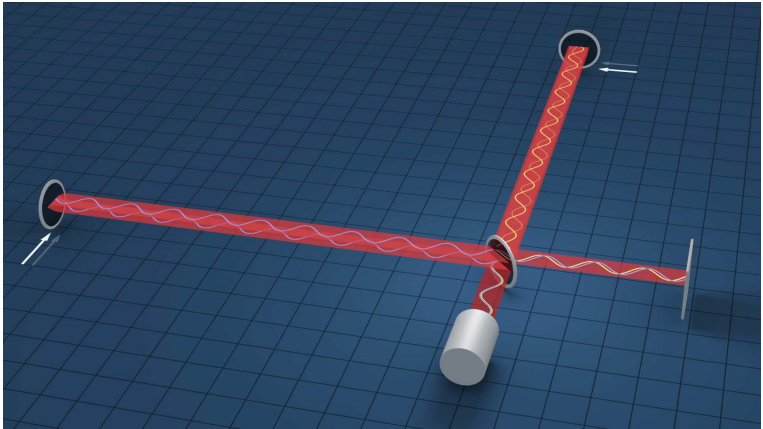


interférences destructives

Les ondes peuvent interférer



Principe de fonctionnement

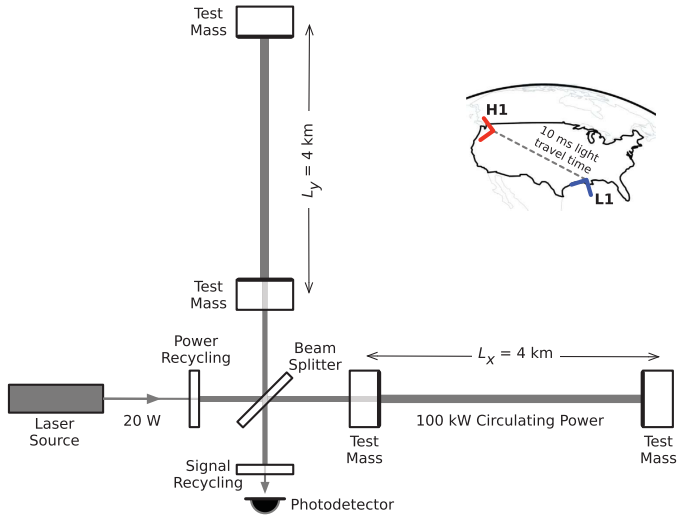


[https://youtu.be/tQ_telUb3tE]

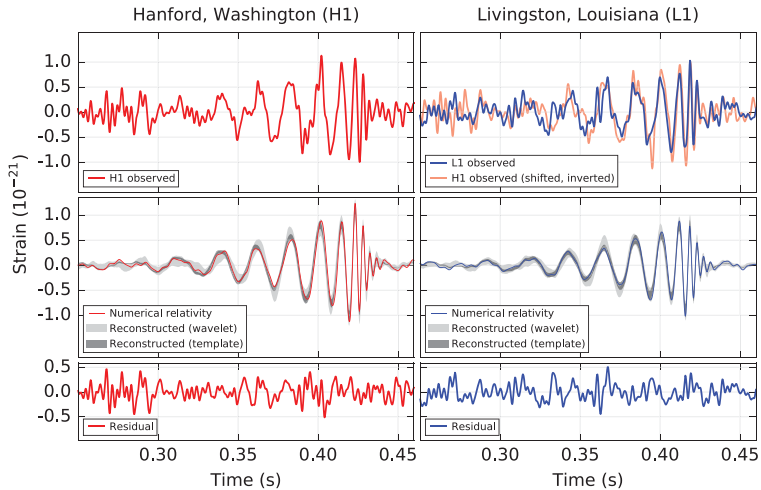
Plan de l'exposé

- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- 3 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- 4 Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- 5 Un couple de trous noirs fusionnels

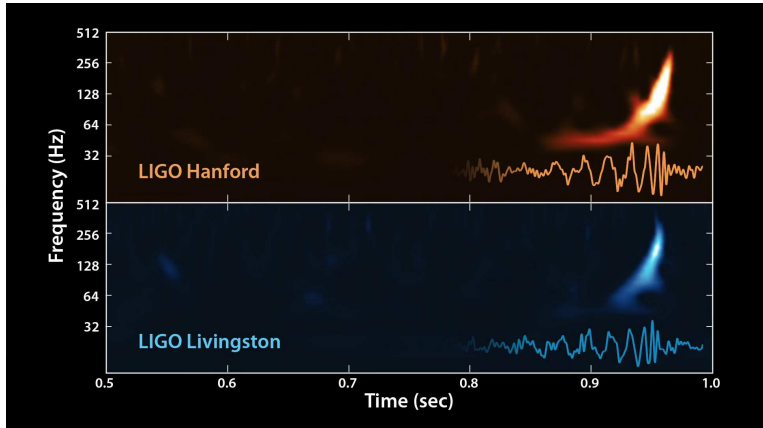
Les détecteurs LIGO



La première détection !

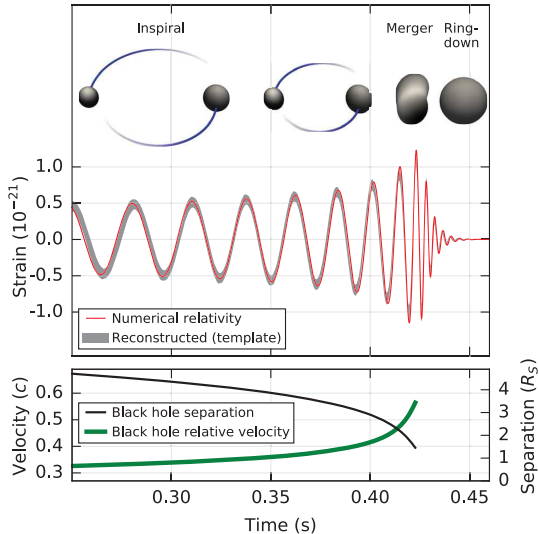


La première détection !

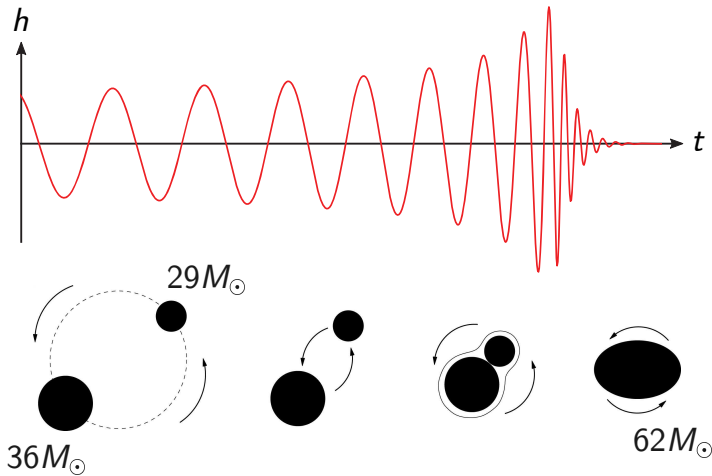


[<https://youtu.be/QyDcTbR-kEA>]

Deux trous noirs ont fusionné



Propriétés de la source



Un événement historique

PRL **116**, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

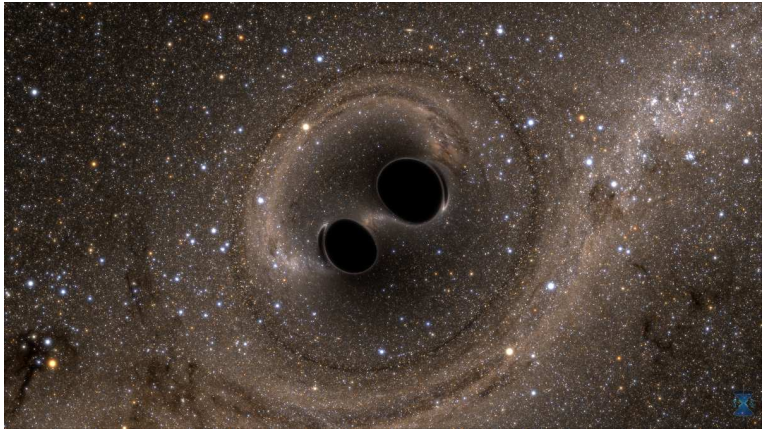
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

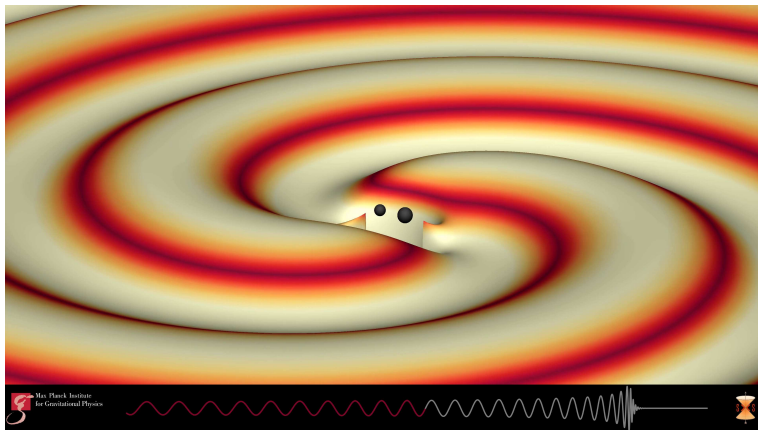
- Première **détection directe** d'ondes gravitationnelles
- Preuve la plus robuste de l'existence des **trous noirs**
- Découverte du premier système **binaire** de trous noirs
- Premier test de la relativité générale en **champ fort**

Apparence de la fusion



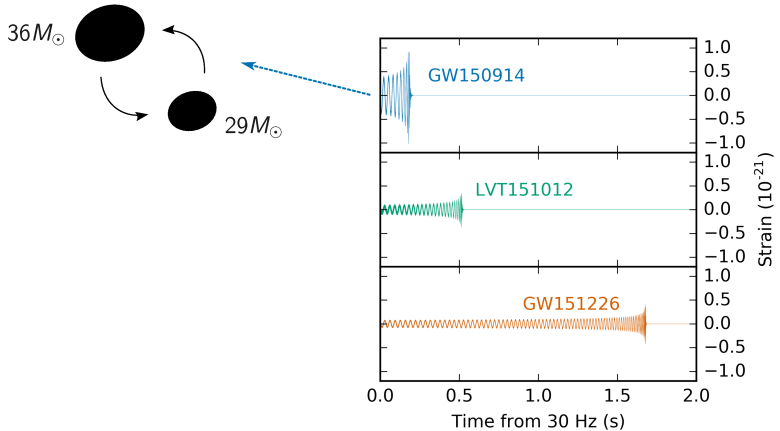
[https://youtu.be/I_88S8DWbcU]

Simulation de la fusion

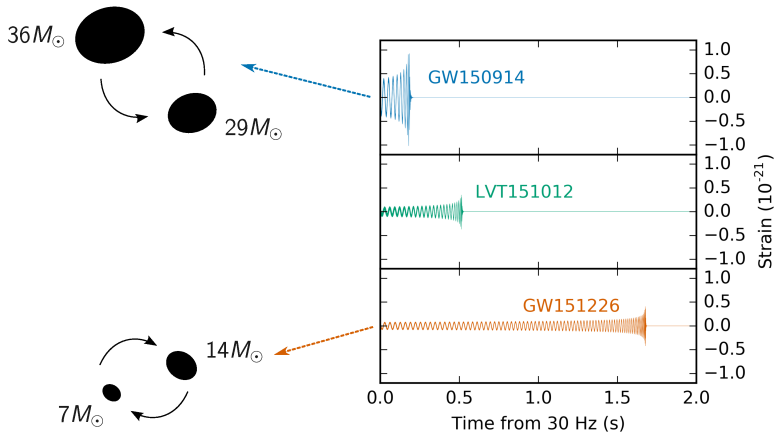


[https://youtu.be/_GhkWuIDzpc]

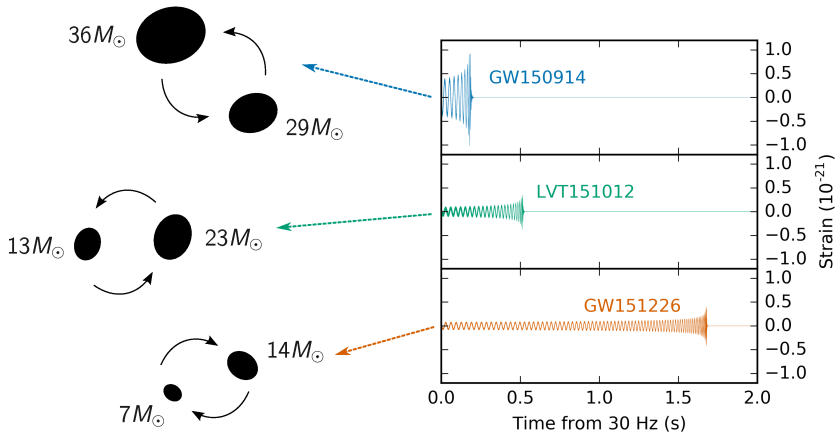
Trois détections en quelques mois



Trois détections en quelques mois



Trois détections en quelques mois

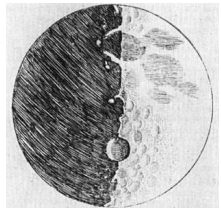
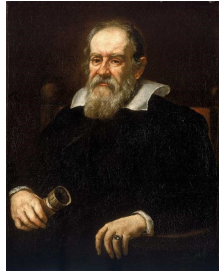


Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
---------	-----------	------------	-------

Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires	1609



Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires	1609
		satellites joviens	1610

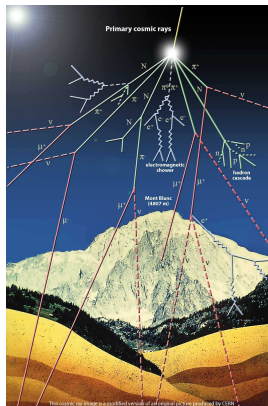
Observations de Galilée

20. Jan. 1610	○ * *
30. Jan. 1610	* * ○ *
2. Febr. 1610	○ * * *
3. Mars 1610	○ * *
3. Avr. 1610	* ○ *
4. Mars 1610	* ○ * *
6. Mars 1610	* * ○ *
8. Mars 1610	* * * ○
10. Mars 1610	* * * ○ *
11. Mars 1610	* * * ○ *
12. H. Febr. 1610	* * ○ *
17. Mars 1610	* * ○ *
14. Mars 1610	* * * ○ *



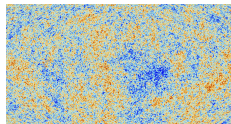
Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires satellites joviens	1609 1610
cosmiques	1912	muons	1936



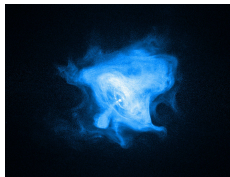
Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires satellites joviens	1609 1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus	1964



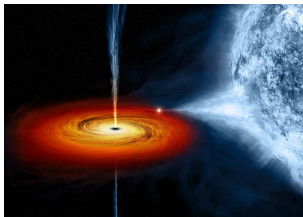
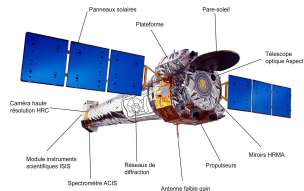
Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires	1609
		satellites joviens	1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus	1964
		pulsars	1967



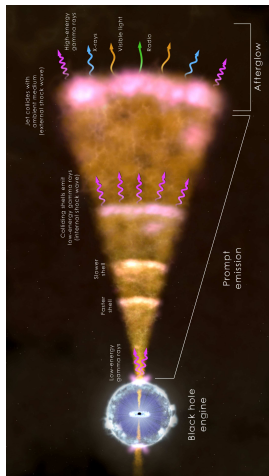
Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires satellites joviens	1609 1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus pulsars	1964 1967
rayons X	1948	binaires X	1962



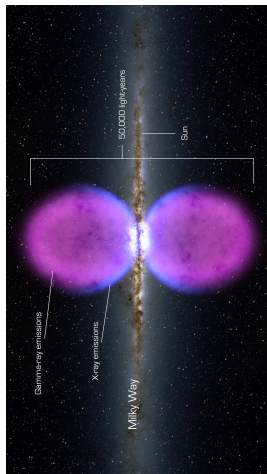
Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires satellites joviens	1609 1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus pulsars	1964 1967
rayons X	1948	binaires X	1962
rayons γ	1961	sursauts γ	1967



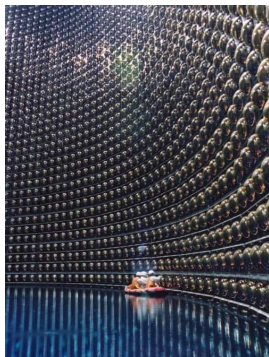
Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires satellites joviens	1609 1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus pulsars	1964 1967
rayons X	1948	binaires X	1962
rayons γ	1961	sursauts γ bulles géantes	1967 2010



Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires	1609
		satellites joviens	1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus	1964
		pulsars	1967
rayons X	1948	binaires X	1962
rayons γ	1961	sursauts γ	1967
		bulles géantes	2010
neutrinos	1968	oscillations	2001



Que nous réserve l'avenir ?

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires	1609
		satellites joviens	1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus	1964
		pulsars	1967
rayons X	1948	binaires X	1962
rayons γ	1961	sursauts γ	1967
		bulles géantes	2010
neutrinos	1968	oscillations	2001
ondes grav.	2015		



De nombreuses surprises en perspective !

En résumé

- Les ondes gravitationnelles sont des **oscillations de courbure** qui se propagent dans l'Univers à la vitesse de la lumière
- Ces ondes sont générées lors de l'accélération de grandes **concentrations de masse**
- Les systèmes binaires d'**astres compacts** sont des sources d'ondes gravitationnelles prometteuses
- Les **détecteurs interférométriques** d'ondes gravitationnelles sont capables de mesurer d'infimes variations de longueur
- Des ondes gravitationnelles émises lors de la **fusion de deux trous noirs** ont récemment été détectées
- Cette découverte historique inaugure une nouvelle ère en astronomie, celle de l'**astronomie gravitationnelle**

Pour en savoir plus

Livres

- J. Levin, *Black hole blues*, Bodley Head, 2016
- P. Binétruy, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, Dunod, 2015
- N.& J. Delabrouille, *Les nouveaux messagers du cosmos*, Seuil, 2011
- D. Kennefick, *Traveling at the speed of thought*, Princeton, 2007
- K. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion, 1997

MOOC

- *Gravité !*, Université Paris Diderot
- *Peser l'Univers*, Observatoire de Paris

Plate-forme France université numérique : **www.fun-mooc.fr**