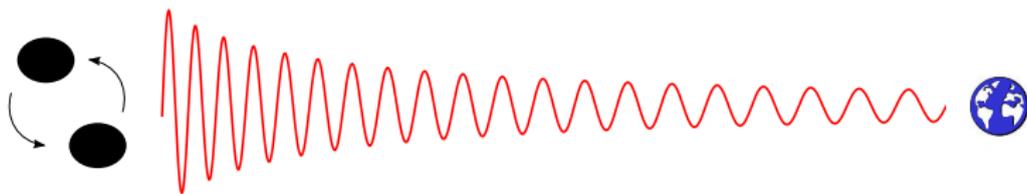


Les ondes gravitationnelles, messagères d'Einstein

Alexandre Le Tiec

Laboratoire Univers et Théories
Observatoire de Paris / CNRS





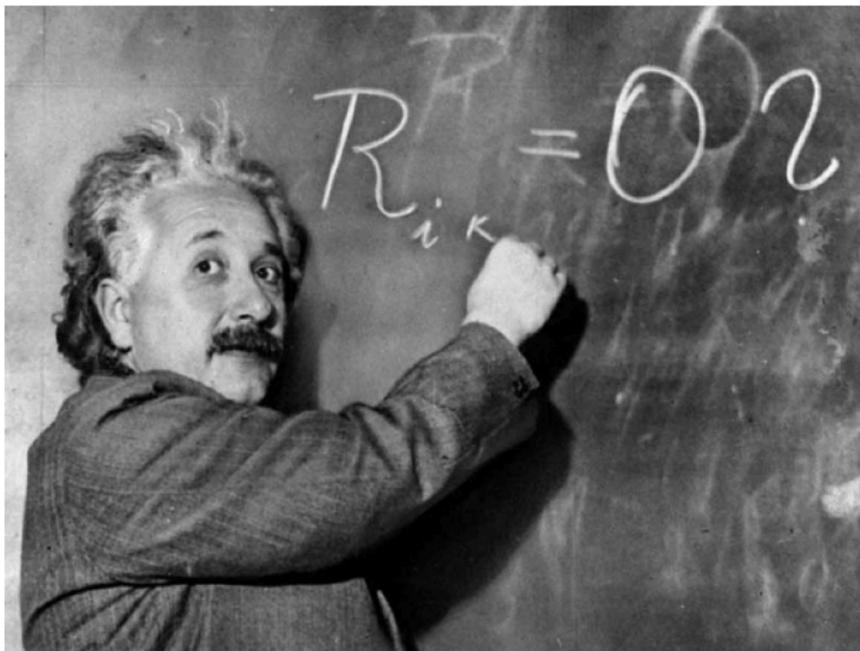


Plan de l'exposé

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

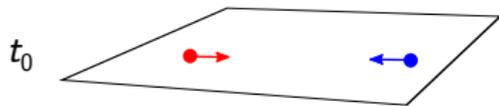
Plan de l'exposé

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

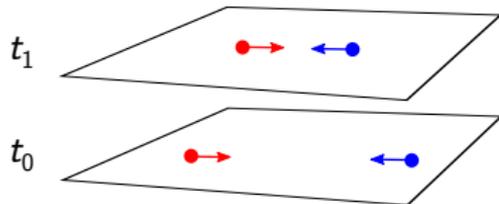


La *relativité générale* est la théorie de l'**espace**, du **temps** et de la **gravitation** formulée par Albert Einstein en 1915

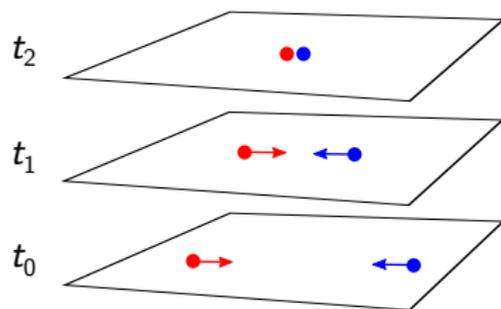
Espace, temps et espace-temps



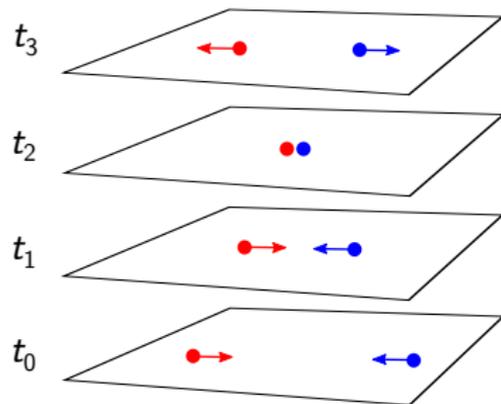
Espace, temps et espace-temps



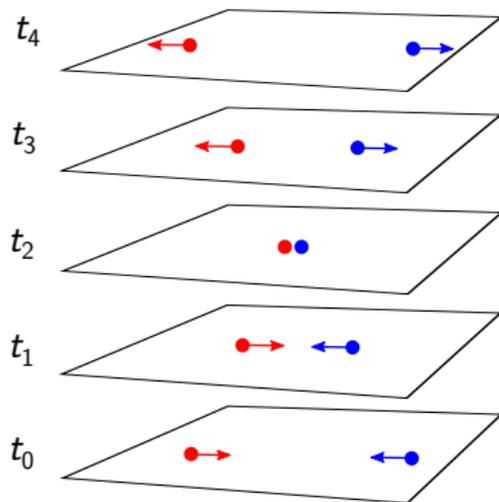
Espace, temps et espace-temps



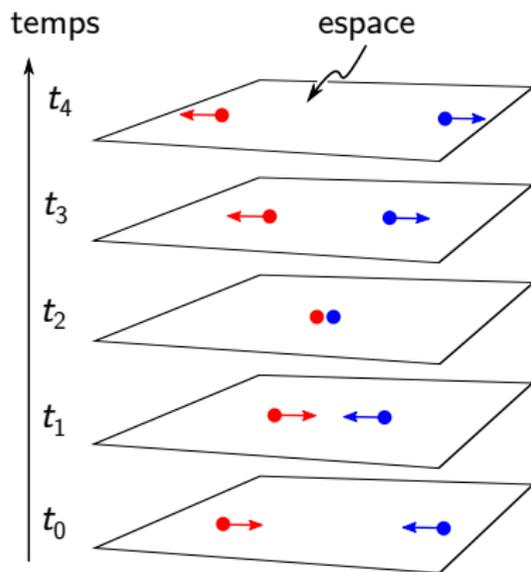
Espace, temps et espace-temps



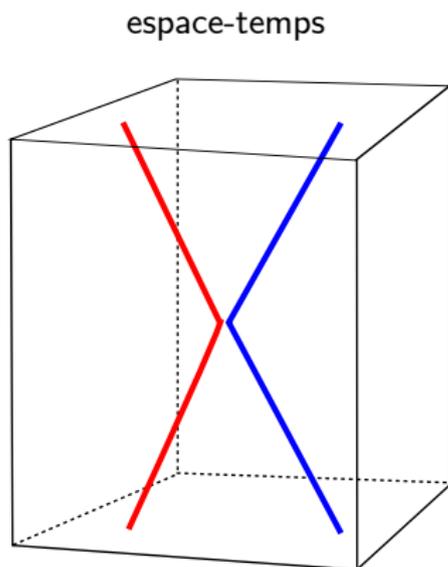
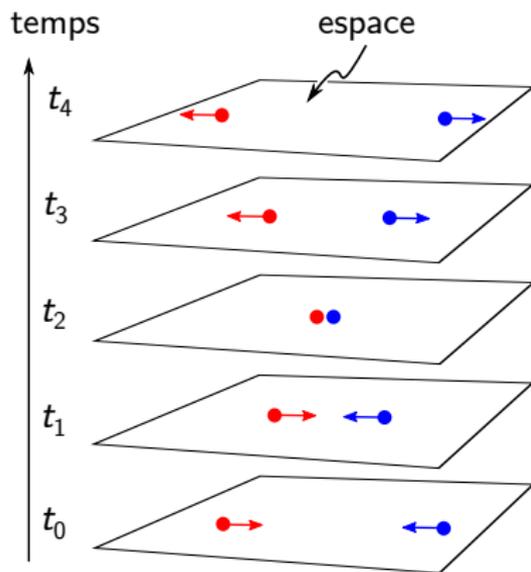
Espace, temps et espace-temps



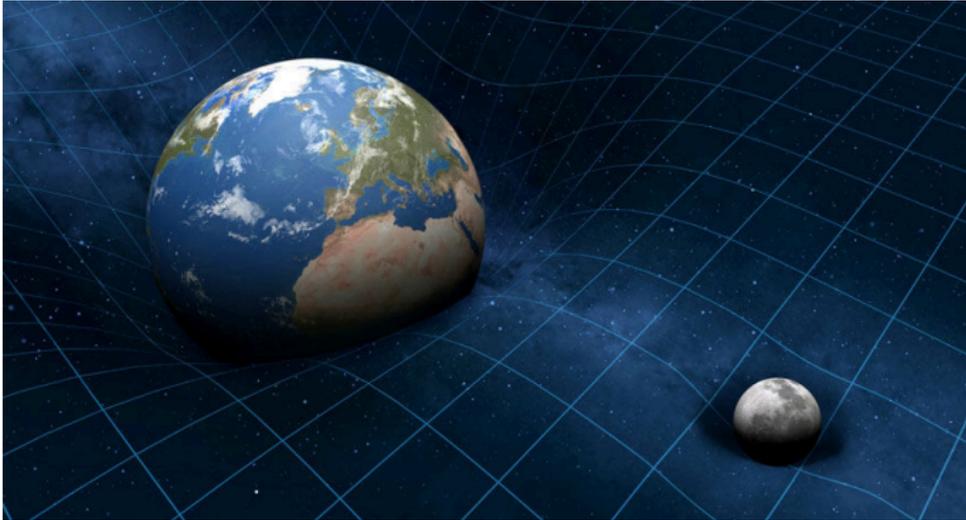
Espace, temps et espace-temps



Espace, temps et espace-temps

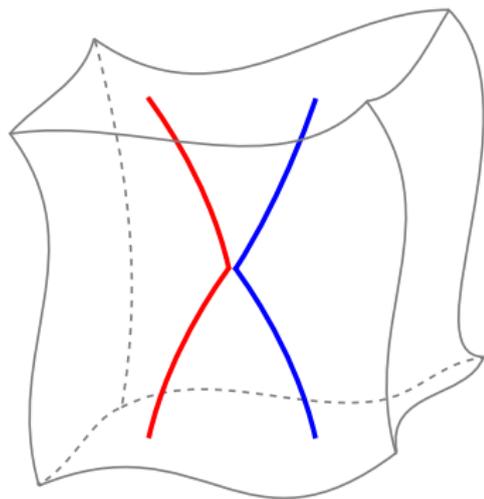


L'espace-temps est courbe



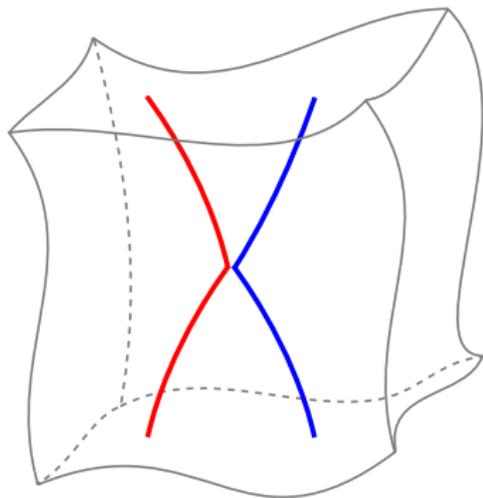
La gravitation est la manifestation de la **courbure de l'espace-temps** par la masse et l'énergie de la matière

L'espace-temps est dynamique



espace-temps

L'espace-temps est dynamique



espace-temps

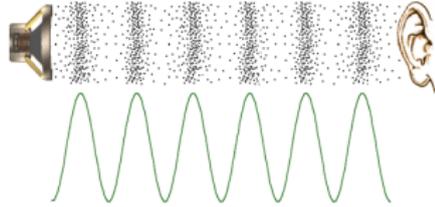


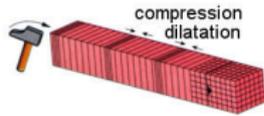
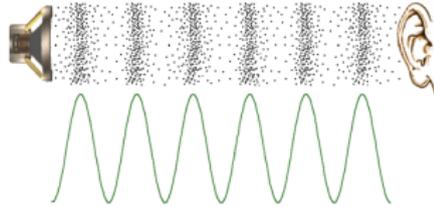
dessert anglais

Plan de l'exposé

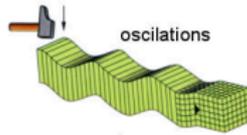
- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?**
- 3 Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- 4 Un couple de trous noirs fusionnels
- 5 L'astronomie gravitationnelle







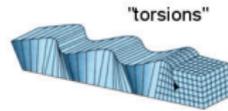
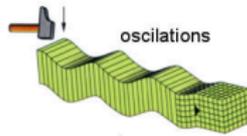
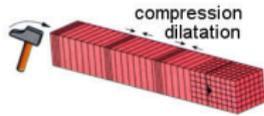
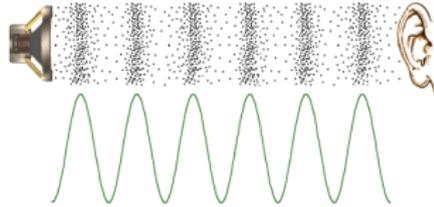
compression
dilatation

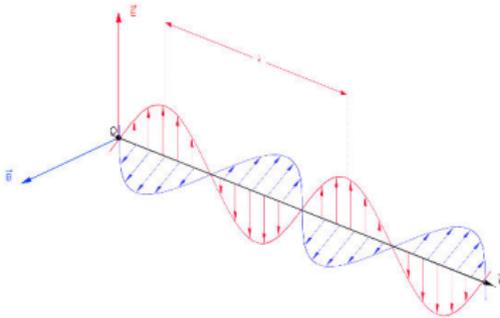
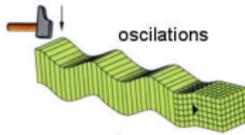
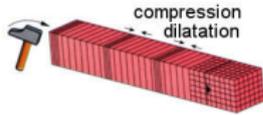
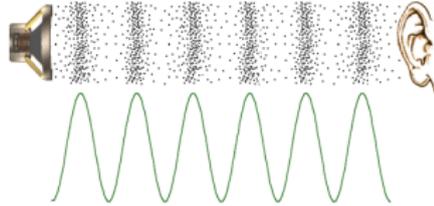


oscillations



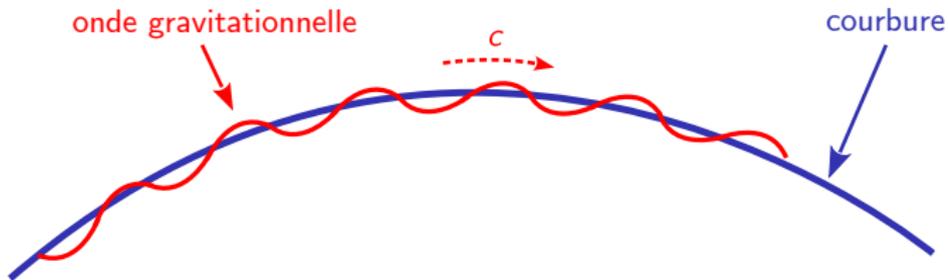
"torsions"



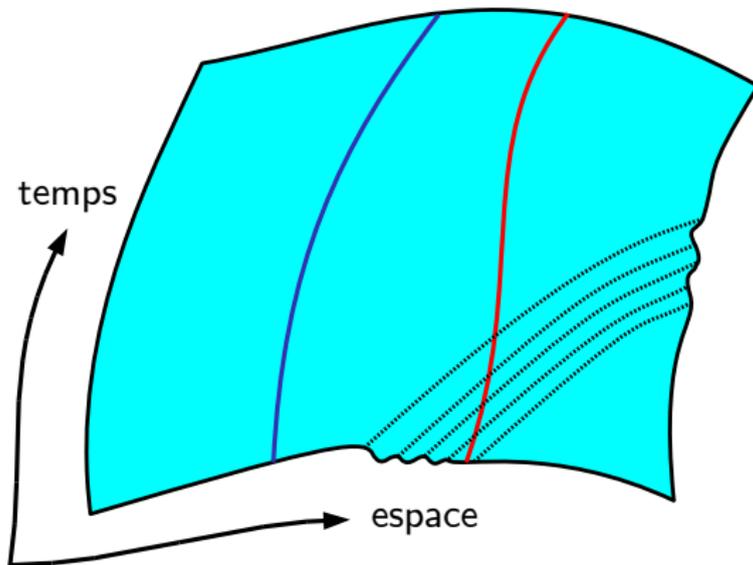


Les vibrations de l'espace-temps

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

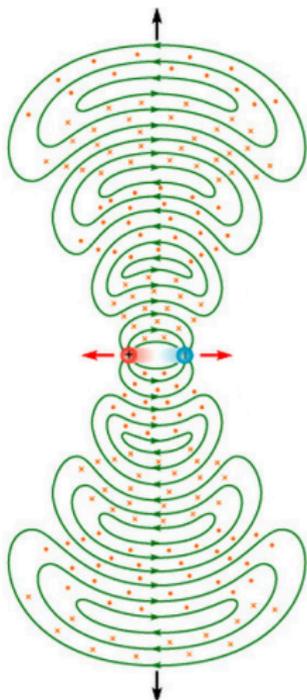


Les vibrations de l'espace-temps

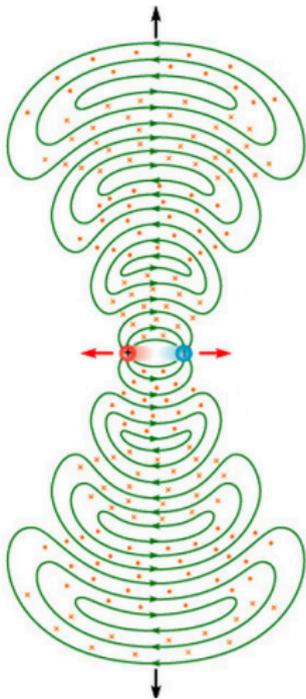


(Credit : E. Gourgoulhon)

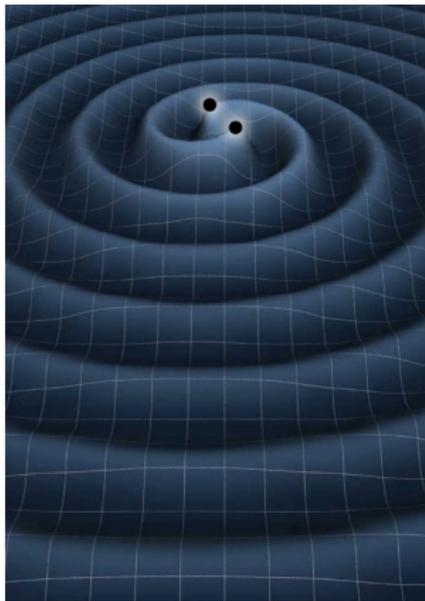
Ondes électromagnétiques



Ondes électromagnétiques



Ondes gravitationnelles

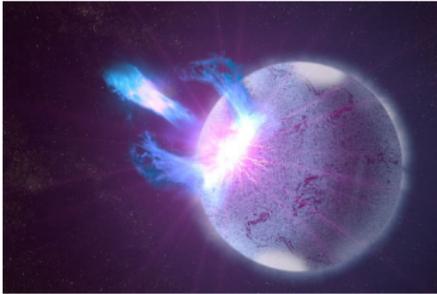


Les sources d'ondes gravitationnelles



supernovae

Les sources d'ondes gravitationnelles

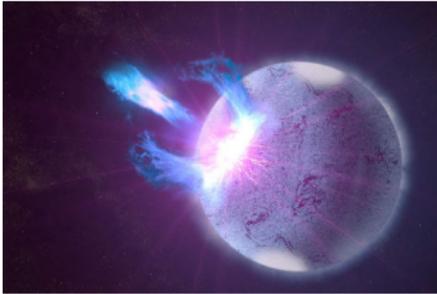


étoile à neutrons isolée



supernovae

Les sources d'ondes gravitationnelles



étoile à neutrons isolée



supernovae



binaire d'étoiles à neutrons

Les sources d'ondes gravitationnelles



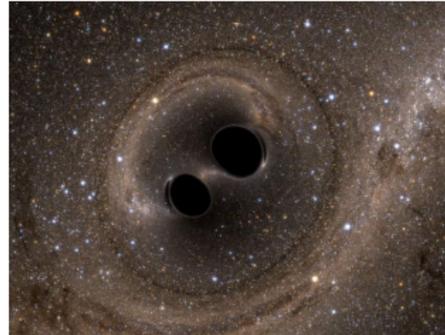
étoile à neutrons isolée



supernovae



binaire d'étoiles à neutrons

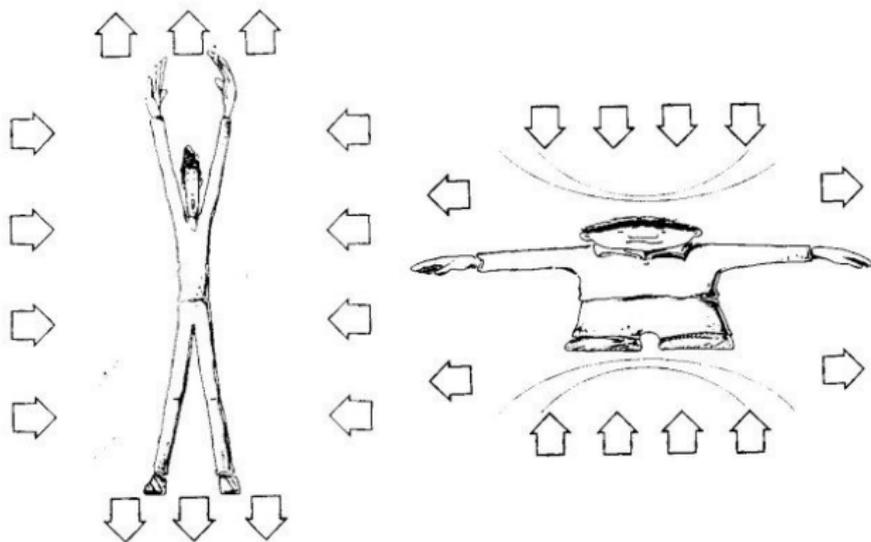


binaire de trous noirs

Plan de l'exposé

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

Effets d'une onde gravitationnelle

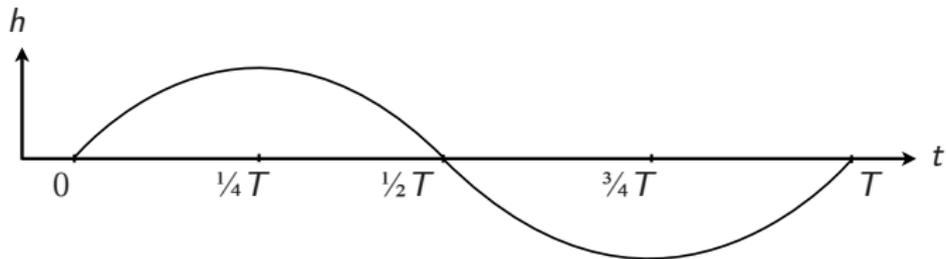


Effets d'une onde gravitationnelle

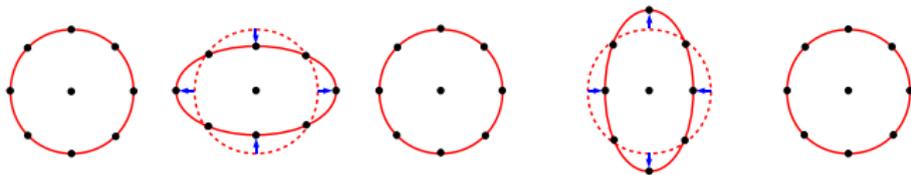
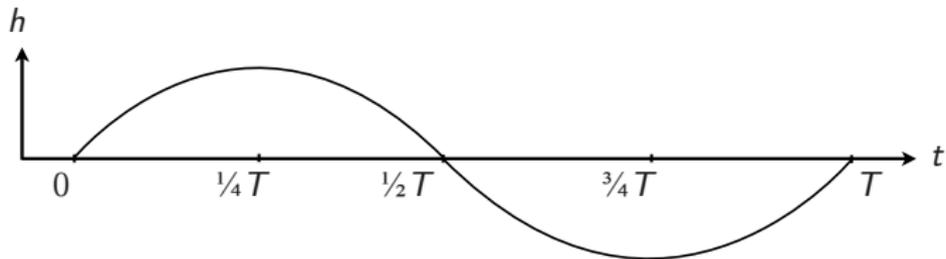


[https://youtu.be/WgE6lb_i78A]

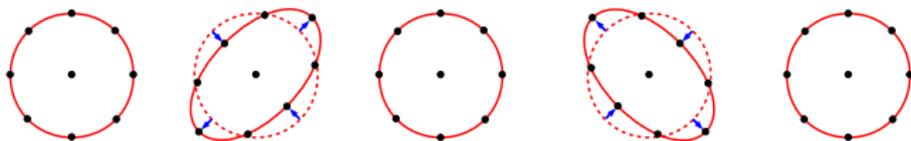
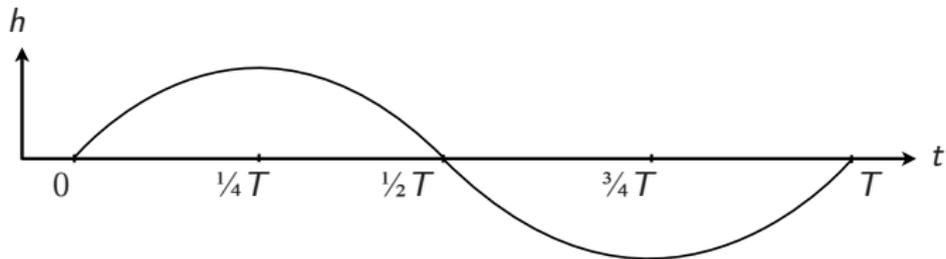
Effets d'une onde gravitationnelle



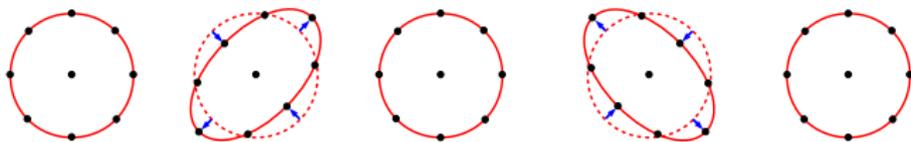
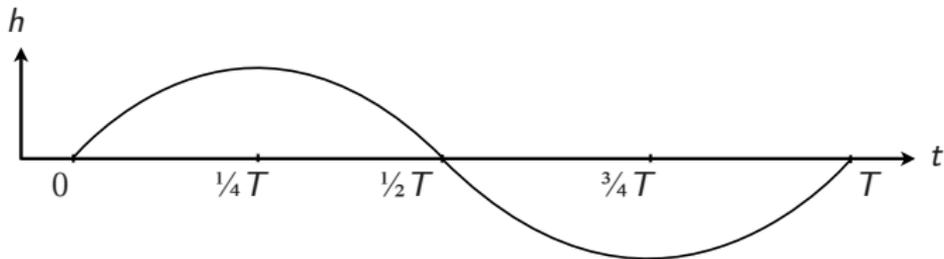
Effets d'une onde gravitationnelle



Effets d'une onde gravitationnelle

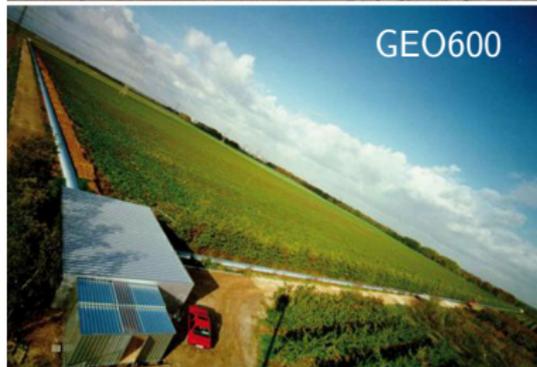


Effets d'une onde gravitationnelle

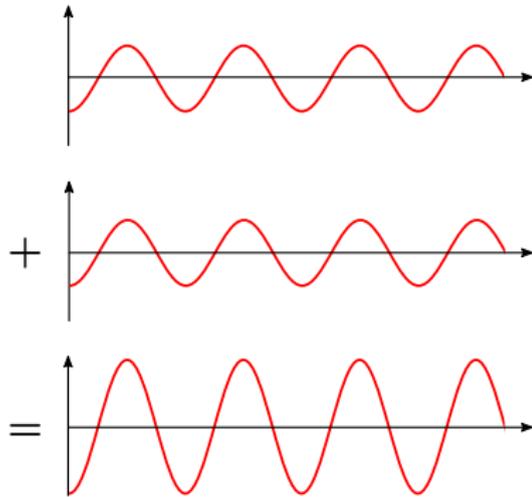


Onde gravitationnelle $h \rightarrow$ variation de longueur $\delta L \sim h L$

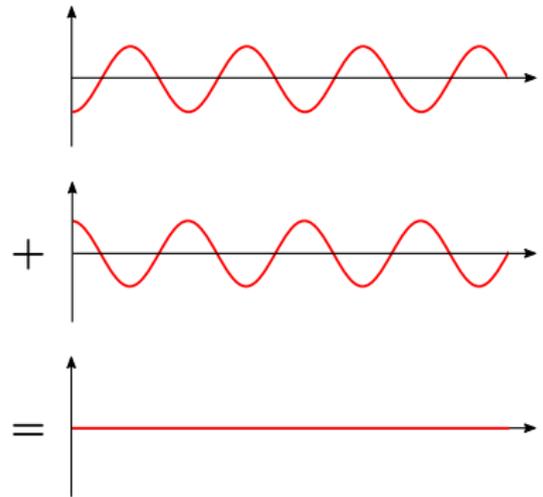
Détecteurs interférométriques laser



Les ondes peuvent interférer

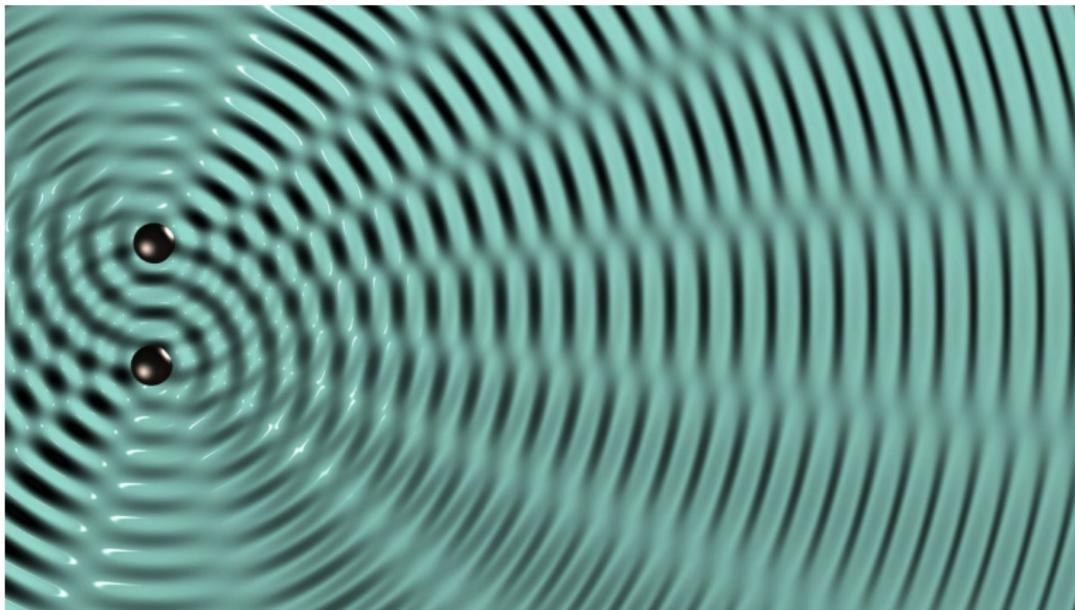


interférences constructives

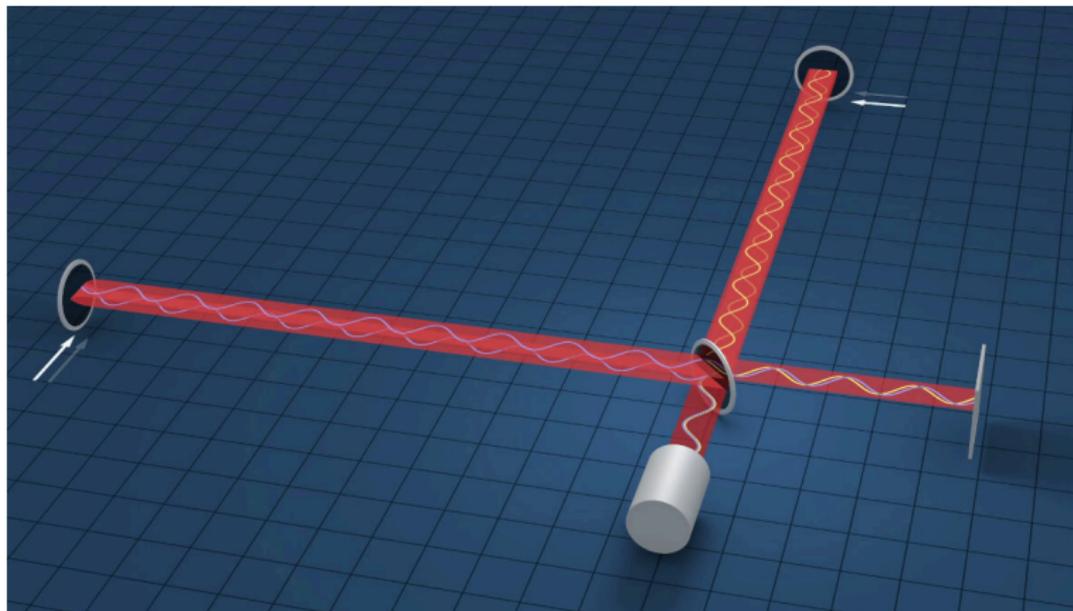


interférences destructives

Les ondes peuvent interférer



Principe de fonctionnement

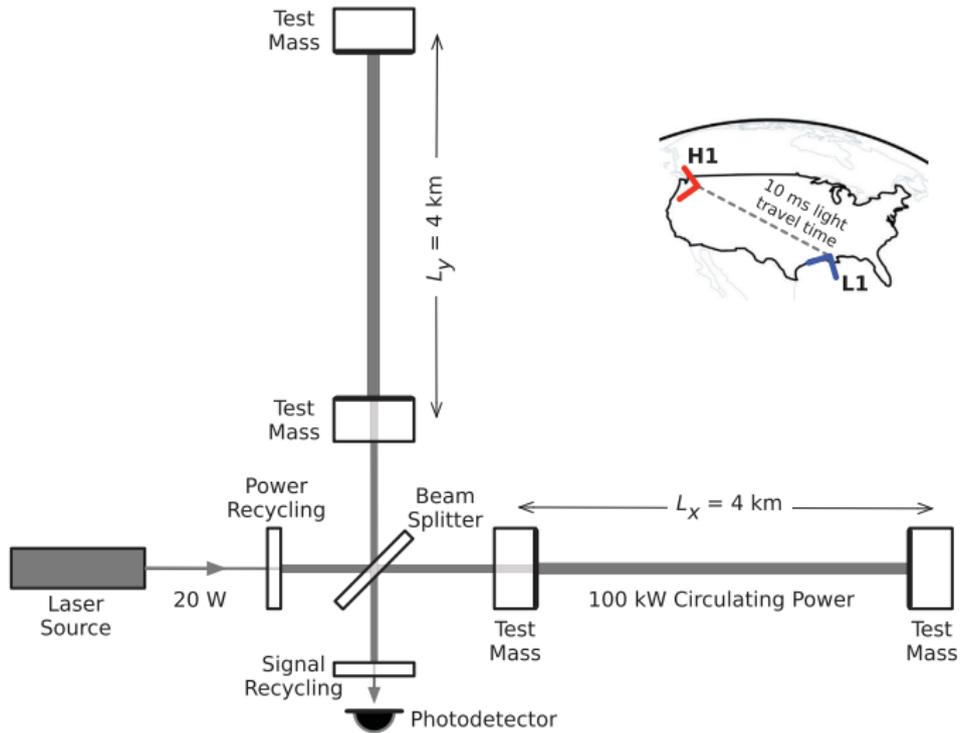


[https://youtu.be/tQ_telUb3tE]

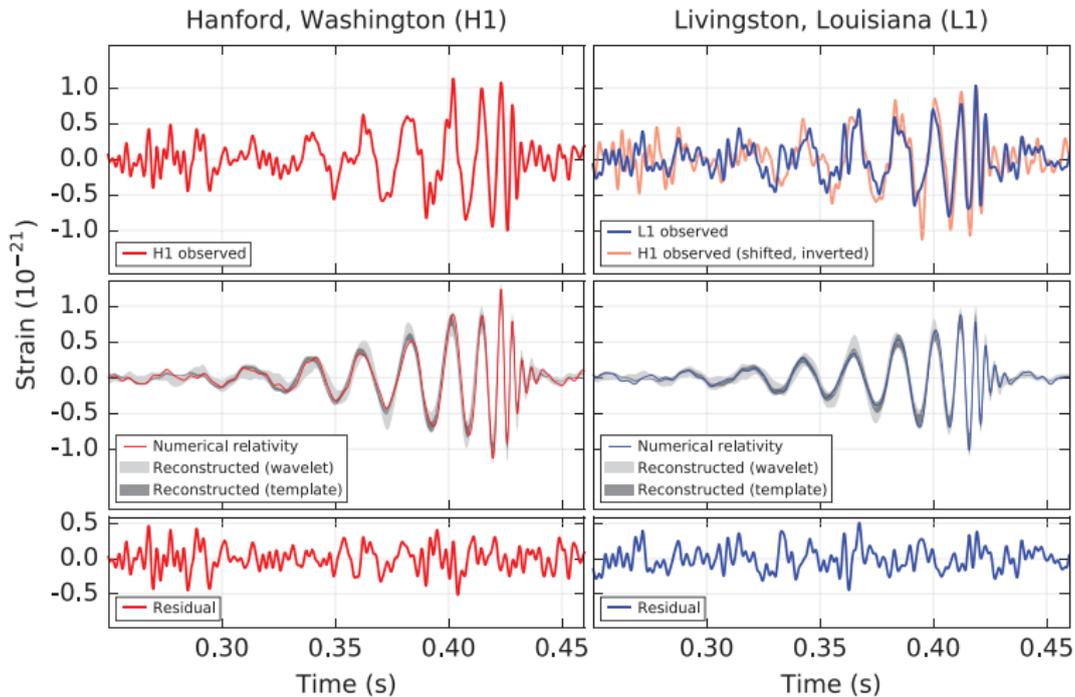
Plan de l'exposé

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

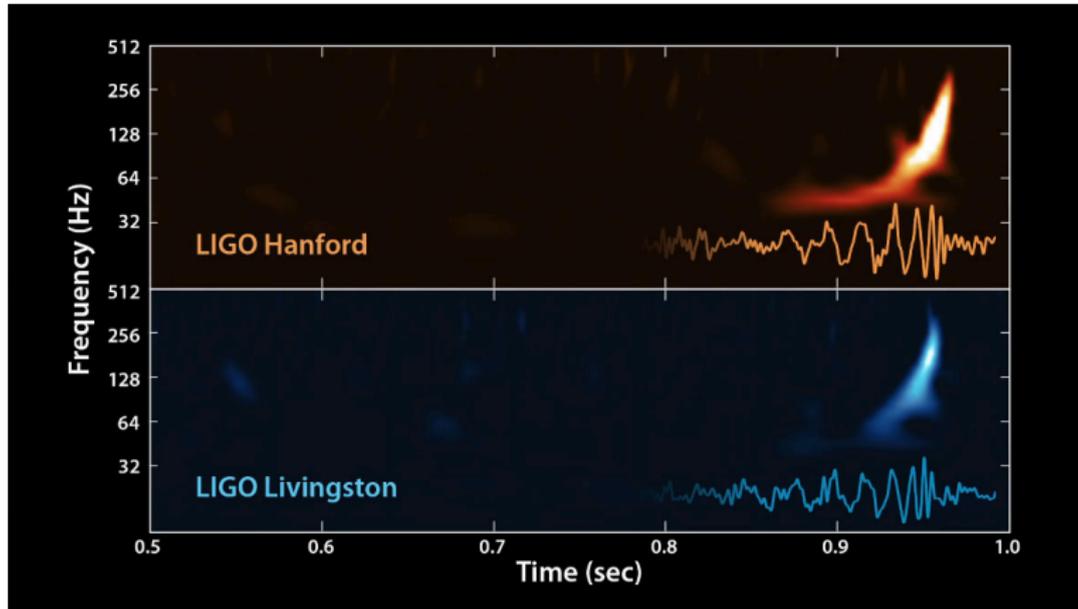
Les détecteurs LIGO



La première détection !

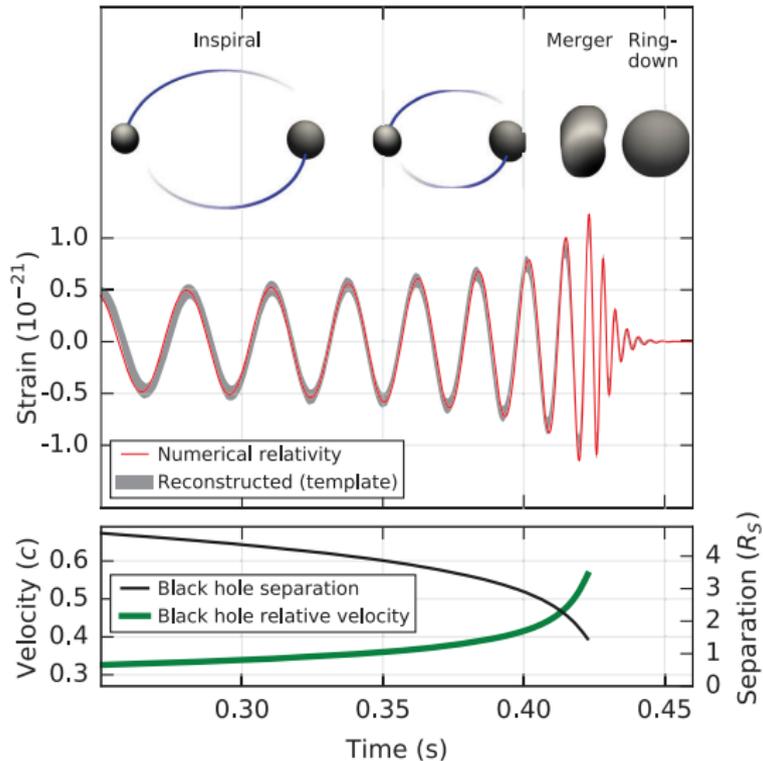


La première détection !

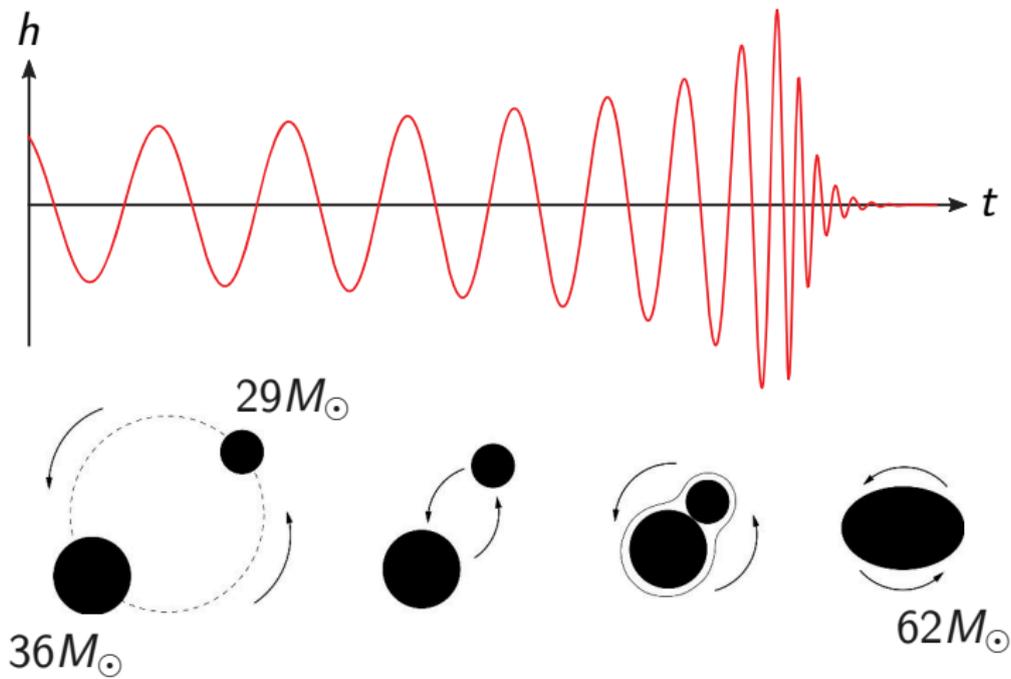


[<https://youtu.be/QyDcTbR-kEA>]

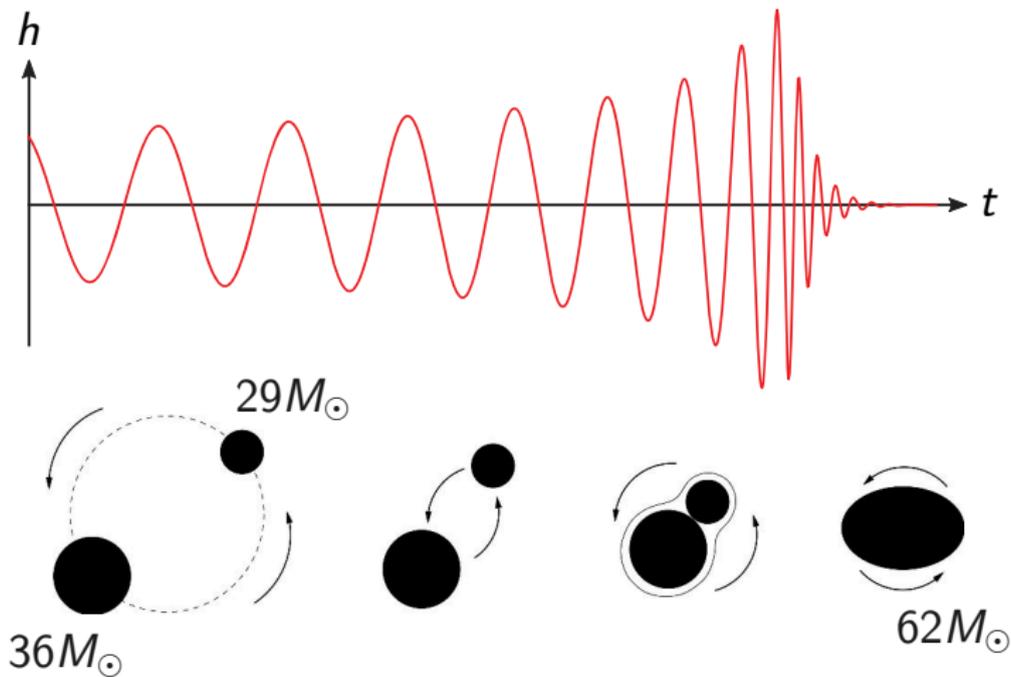
Deux trous noirs ont fusionné



Propriétés de la source



Propriétés de la source



Voir le **cours fil rouge** mardi 9 à 14h30

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.**

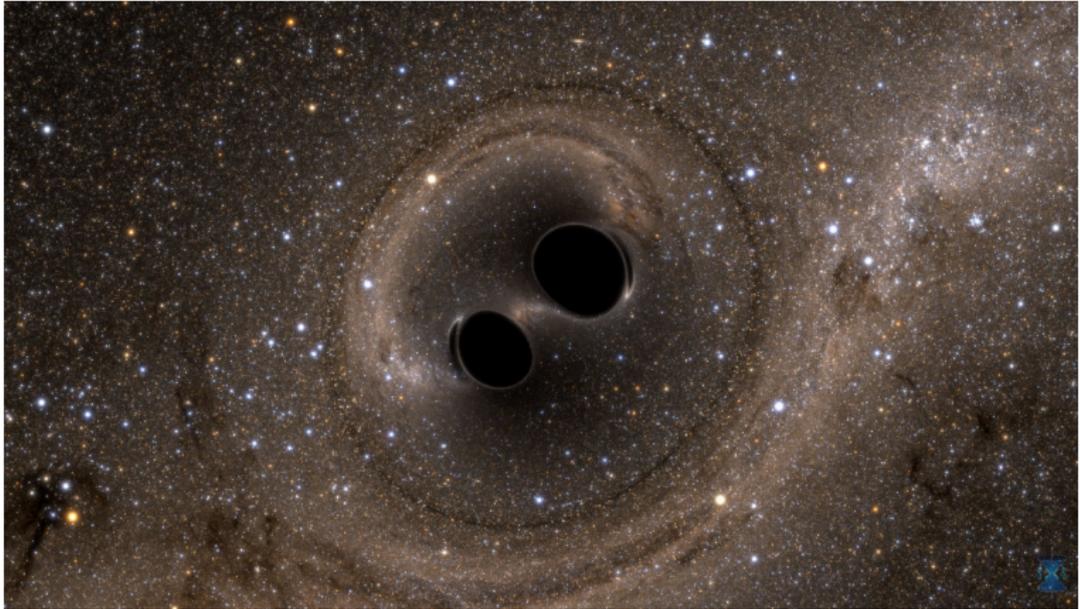
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(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 5.1 σ . 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 $62^{+4}_{-3} M_{\odot}$, 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.

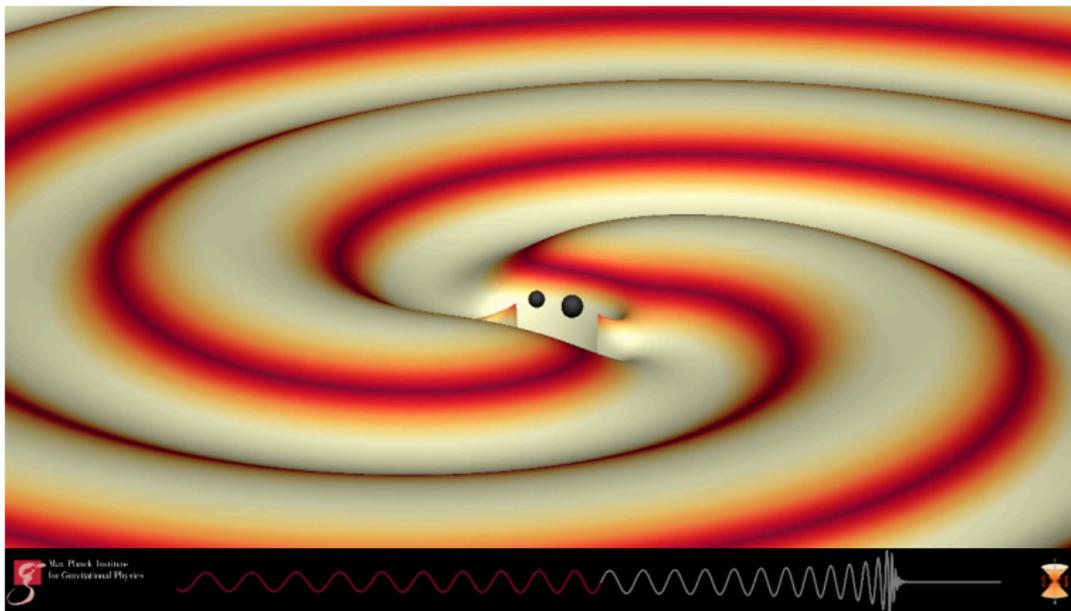
- Première **détection directe** d'ondes gravitationnelles
- Preuve la plus robuste de l'existence des **trous noirs**
- Découverte du premier système **binaire** de trous noirs
- Premier test de la relativité générale en **champ fort**

Apparence de la fusion



[https://youtu.be/I_88S8DWbcU]

Simulation de la fusion

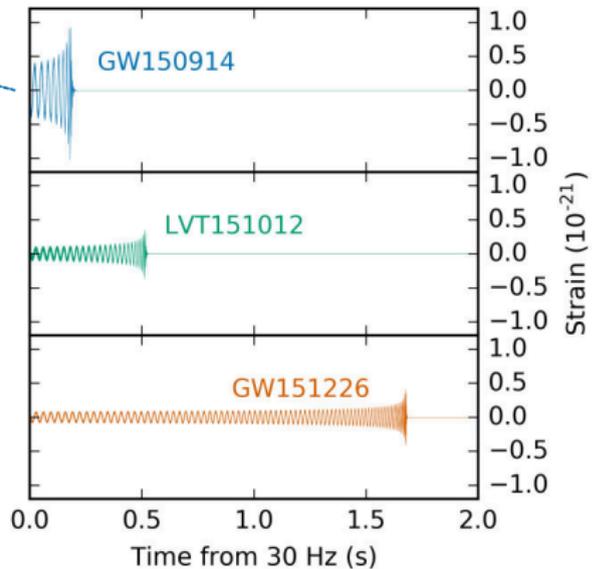
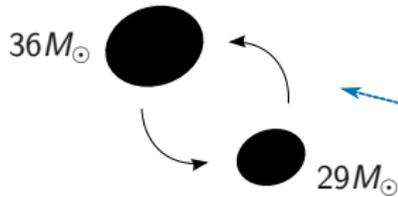


[https://youtu.be/_GhkWuIDzpc]

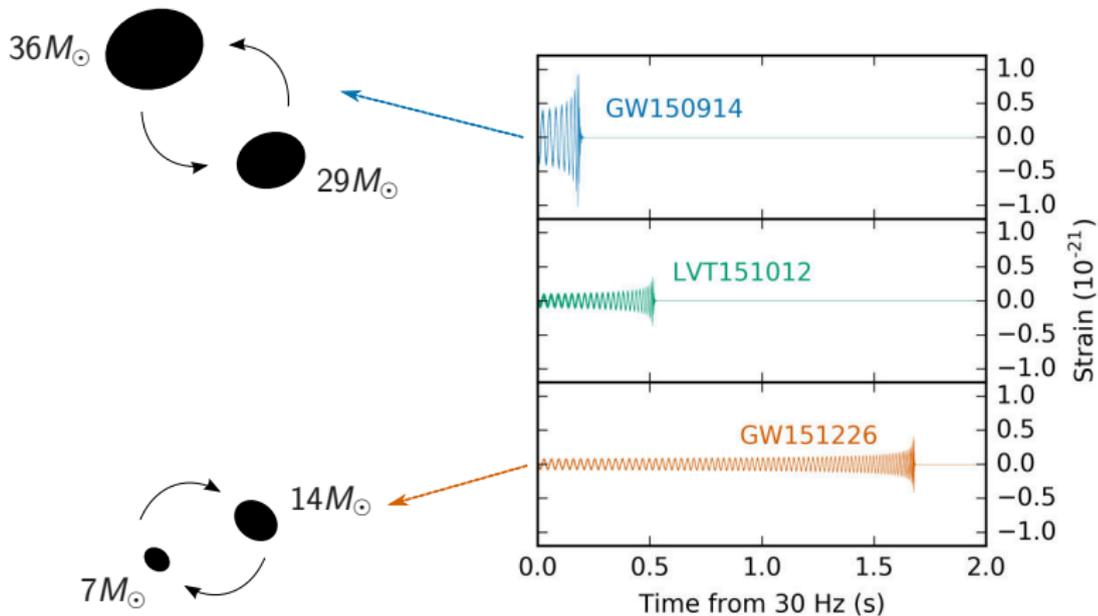
Plan de l'exposé

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

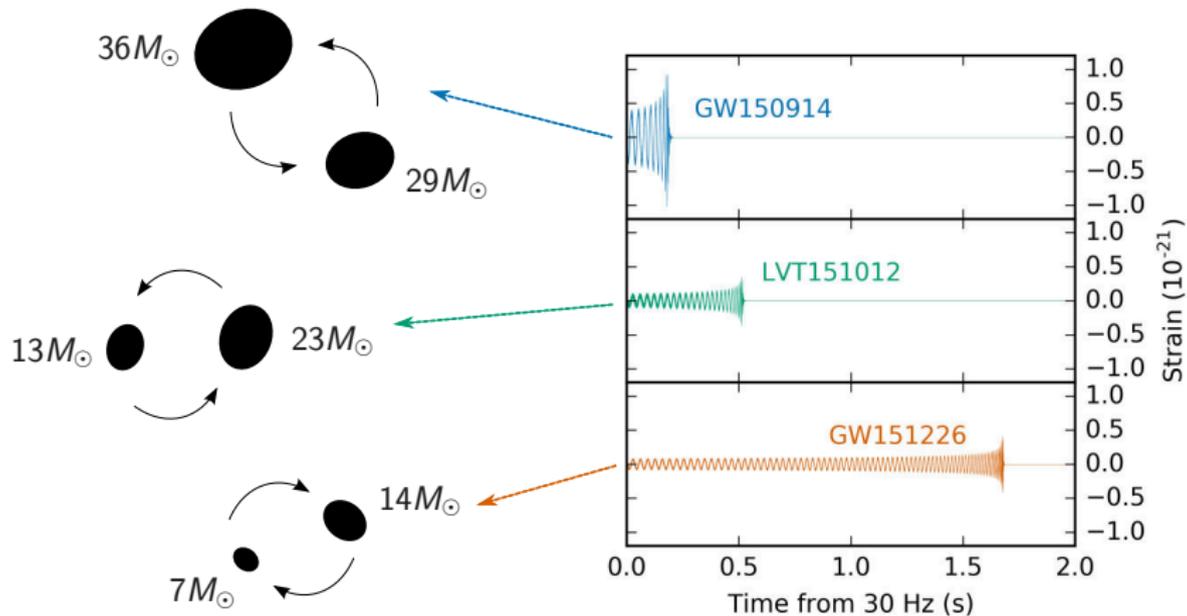
Trois détections en quelques mois



Trois détections en quelques mois



Trois détections en quelques mois



Un réseau mondial de détecteurs terrestres

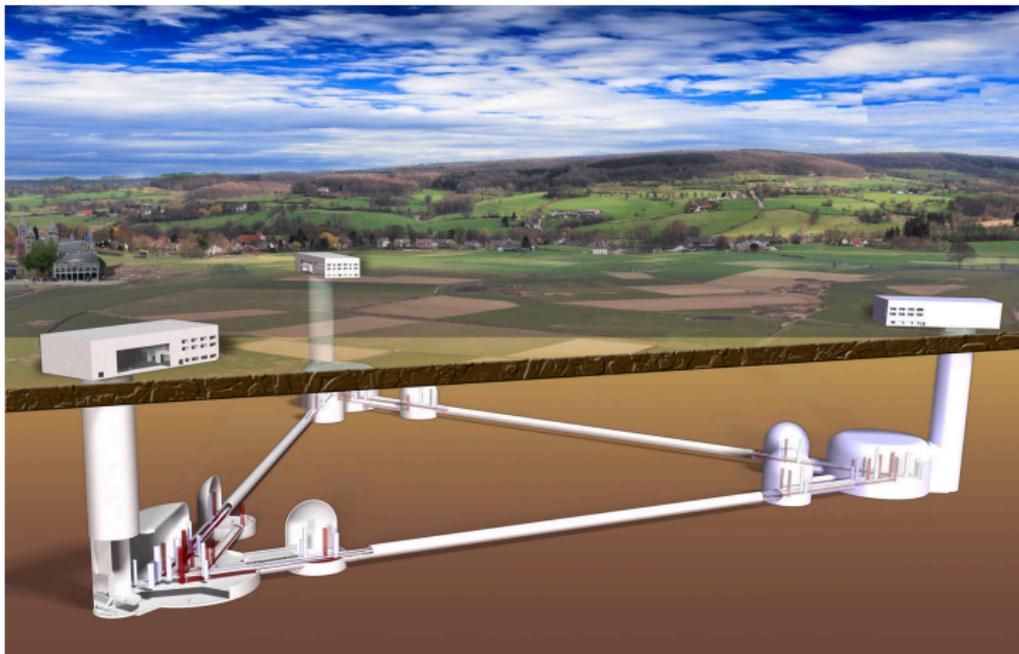


Un réseau mondial de détecteurs terrestres



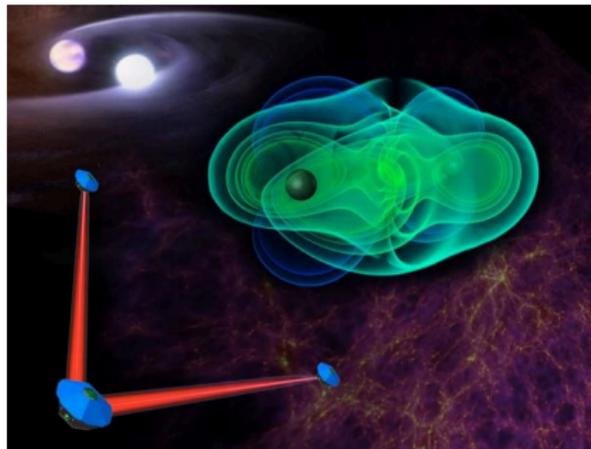
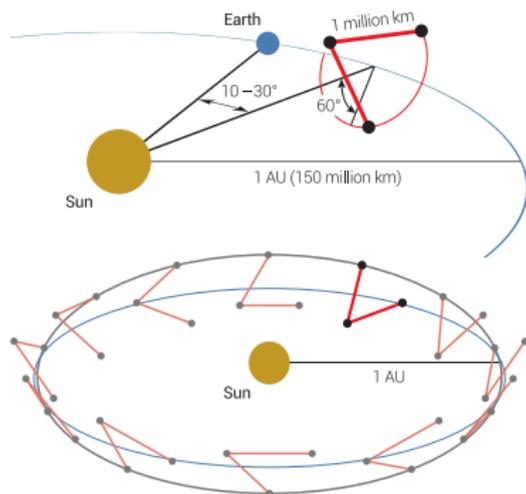
Plusieurs centaines d'événements par an d'ici 2020

Un détecteur de troisième génération



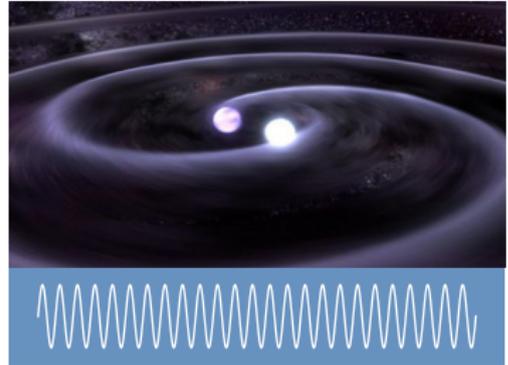
Projet **ET** à l'étude par la Commission européenne

Une antenne gravitationnelle dans l'espace

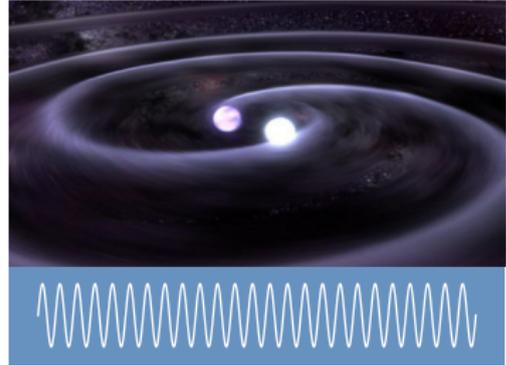
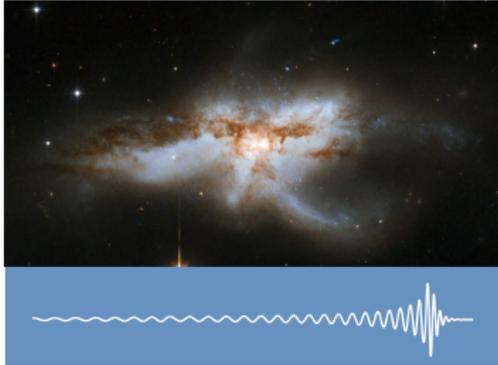


Projet **eLISA** de l'Agence spatiale européenne (ESA)

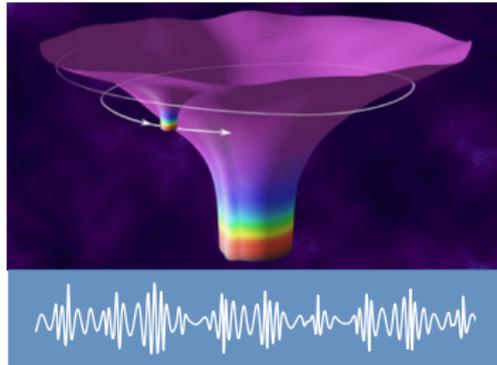
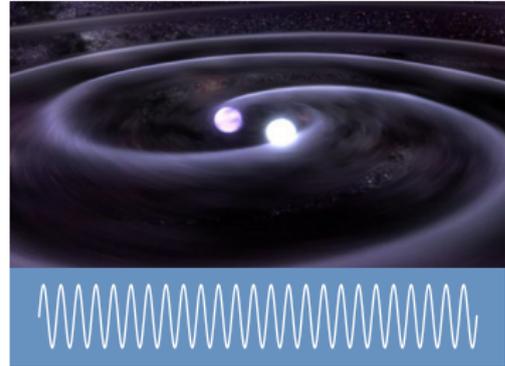
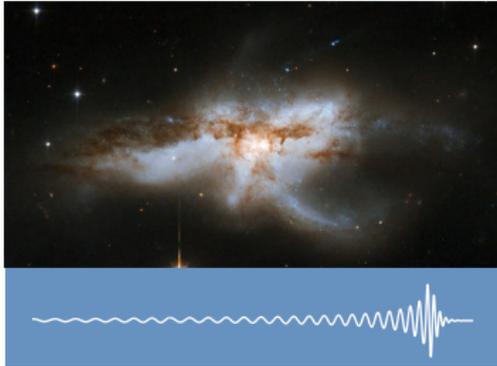
Écouter la symphonie cosmique avec eLISA



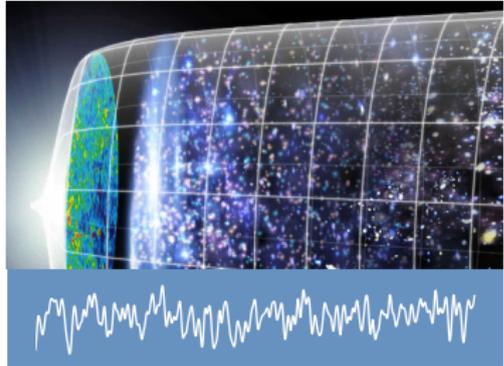
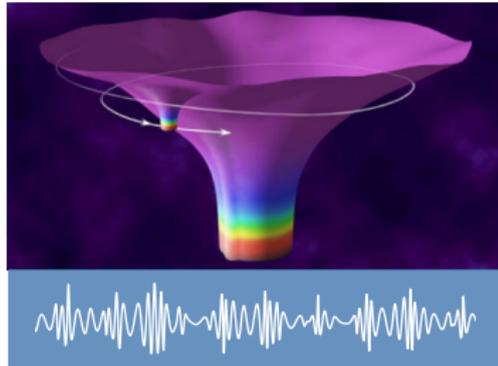
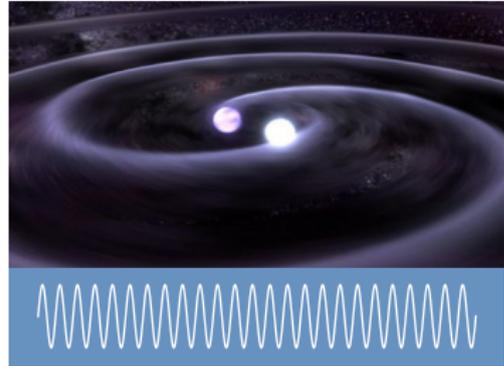
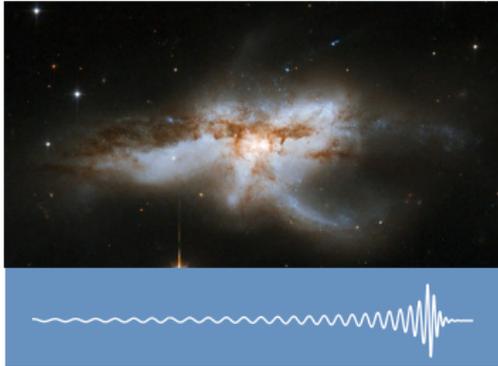
Écouter la symphonie cosmique avec eLISA



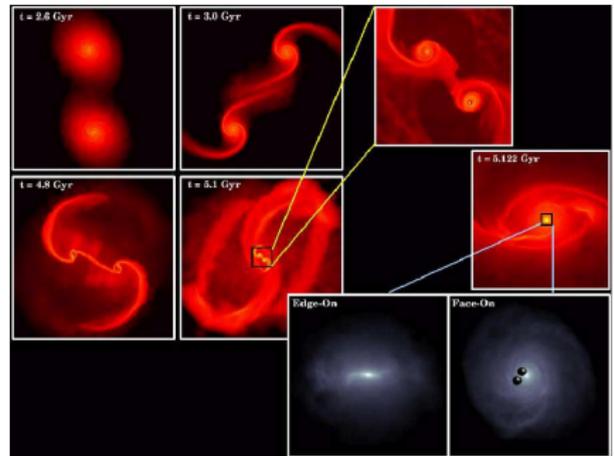
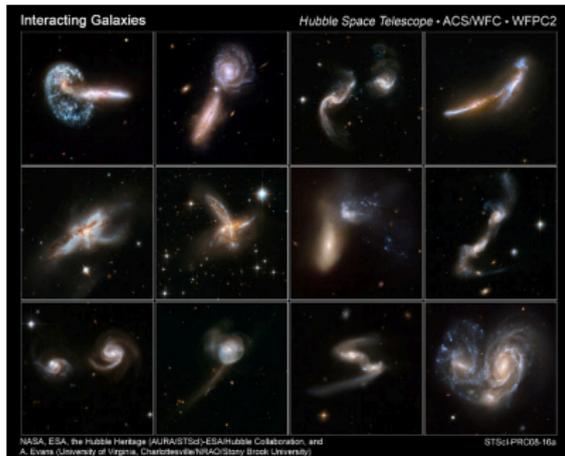
Écouter la symphonie cosmique avec eLISA



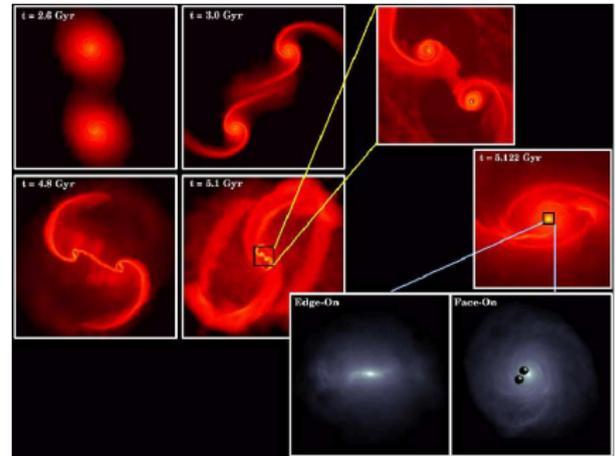
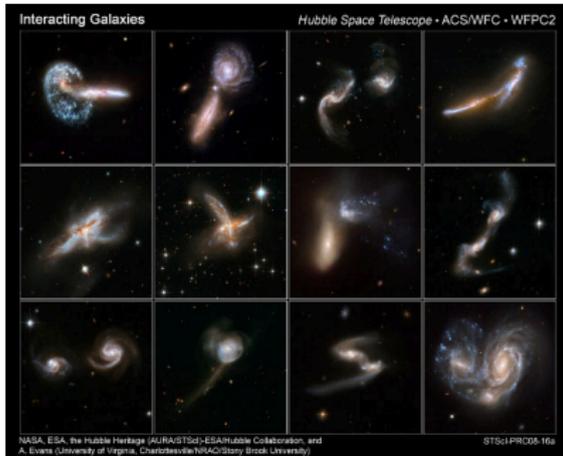
Écouter la symphonie cosmique avec eLISA



Fusions de trous noirs supermassifs

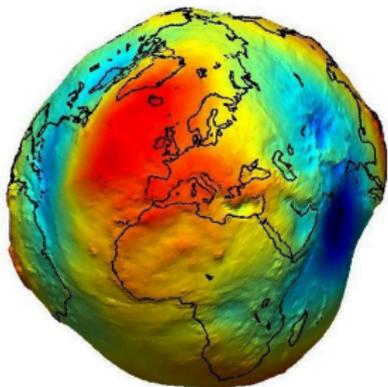


Fusions de trous noirs supermassifs

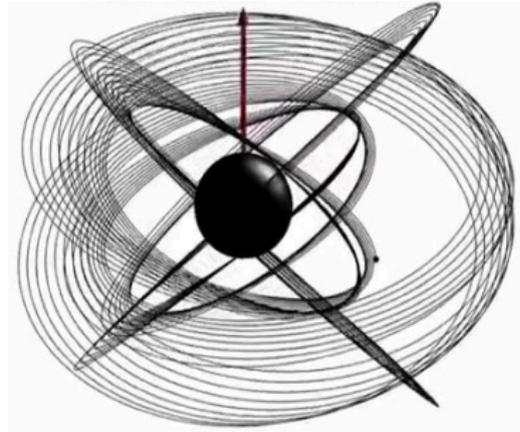
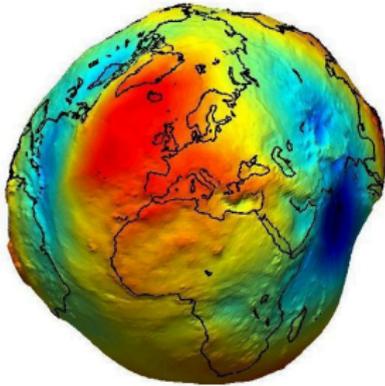


Explorer la croissance des trous noirs et comprendre l'évolution des galaxies au cours des temps cosmiques

Géodésie

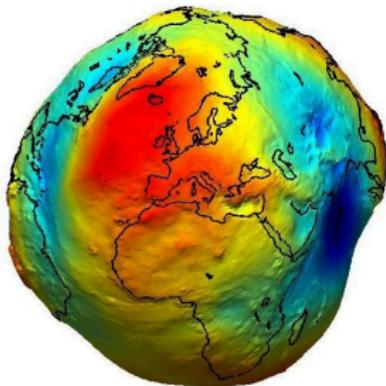


Géodésie

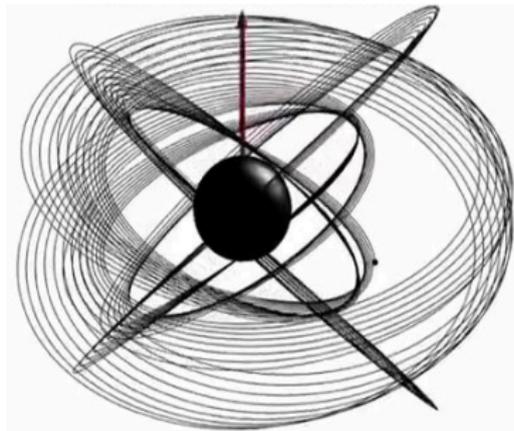


[<https://youtu.be/WPvkzSvgHvc>]

Géodésie

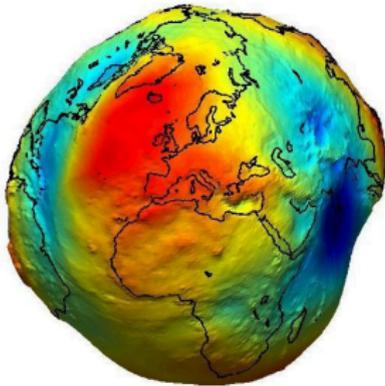


Bothrioméladésie

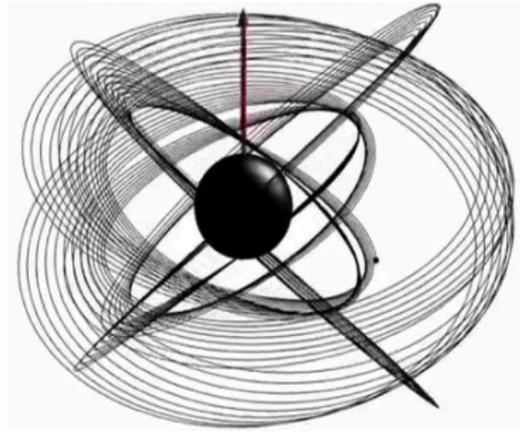


[<https://youtu.be/WPvkzSvGHvc>]

Géodésie



Bothrioméladésie

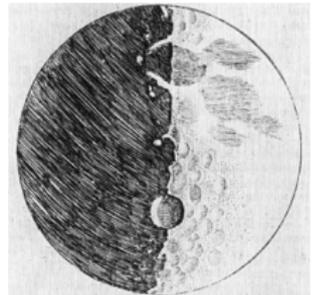
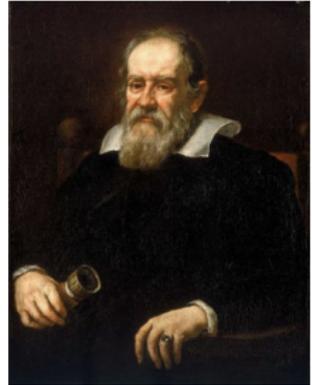


[<https://youtu.be/WPvkzSvgHvc>]

Tester le théorème de calvitie des trous noirs

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

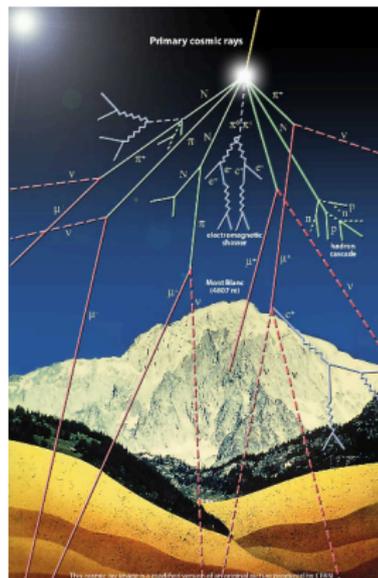
Observations de Galilée

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	* * * ○ *



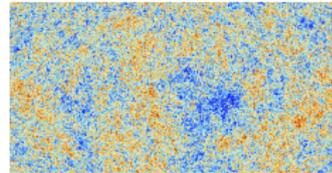
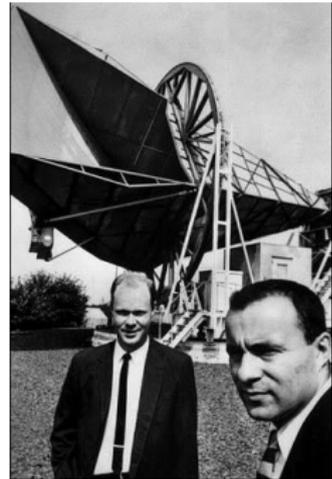
Que nous réserve l'avenir ?

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



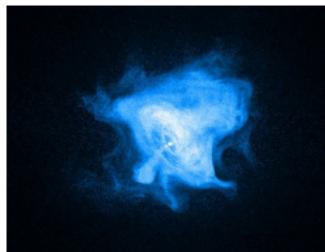
Que nous réserve l'avenir ?

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



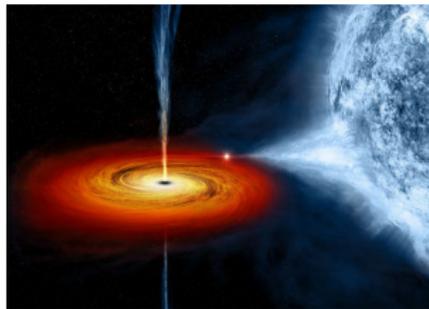
Que nous réserve l'avenir ?

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



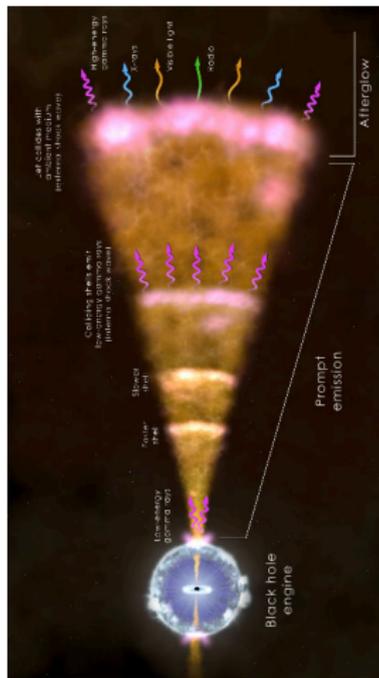
Que nous réserve l'avenir ?

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



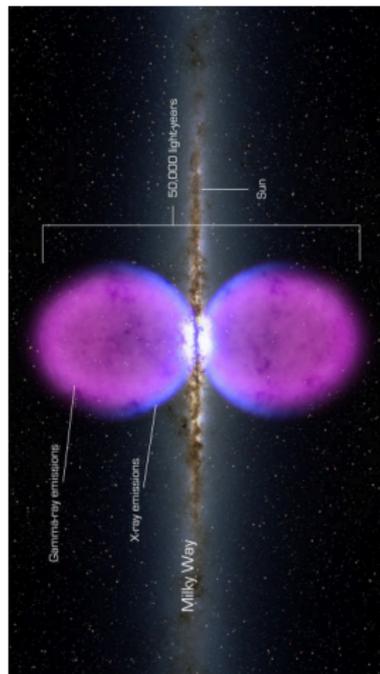
Que nous réserve l'avenir ?

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



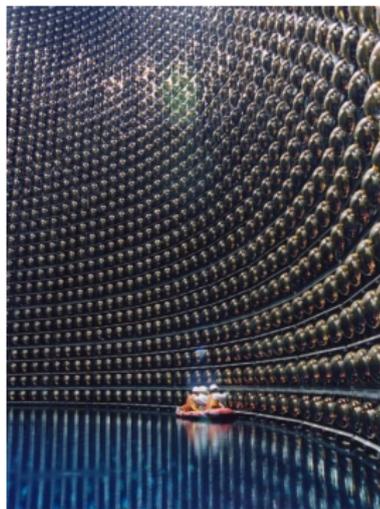
Que nous réserve l'avenir ?

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 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
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

Festival d'astronomie

- Mardi 9 à 11h15, **grande conférence** par A. Bohé :
*Première détection des ondes gravitationnelles,
le début d'une nouvelle astronomie*
- Mardi 9 à 14h30, **cours fil rouge** par moi-même :
Anatomie d'une onde gravitationnelle
- Mercredi 10 à 9h30, **cours fil rouge** par A. Bohé :
Comment détecte-t-on une onde 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**