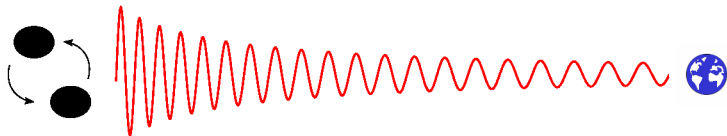


# La relativité générale et les ondes gravitationnelles

Alexandre Le Tiec

Laboratoire Univers et Théories  
Observatoire de Paris / CNRS





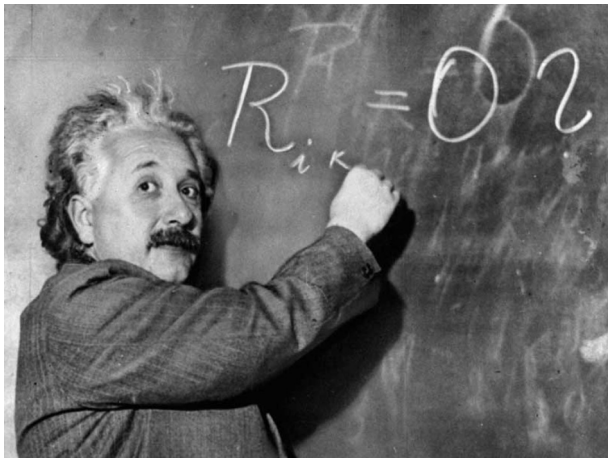


# Plan de l'exposé

- 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

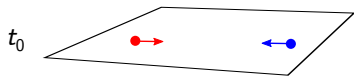
# Plan de l'exposé

- 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

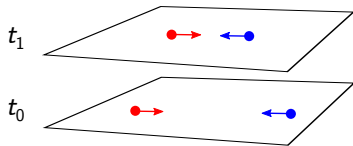


La *relativité générale* est la théorie de l'**espace**, du **temps** et de la **gravitation** formulée par Albert Einstein en 1915

# Espace, temps et espace-temps

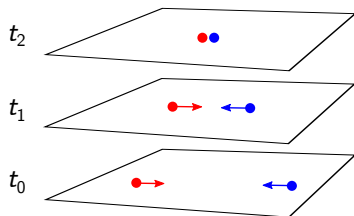


# Espace, temps et espace-temps

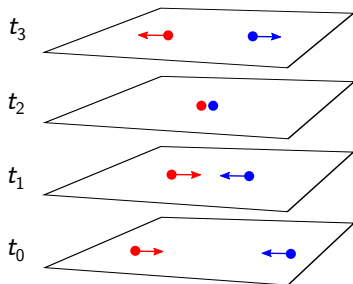




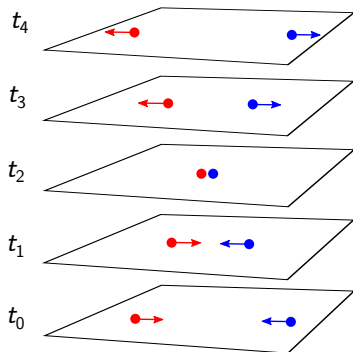
# Espace, temps et espace-temps



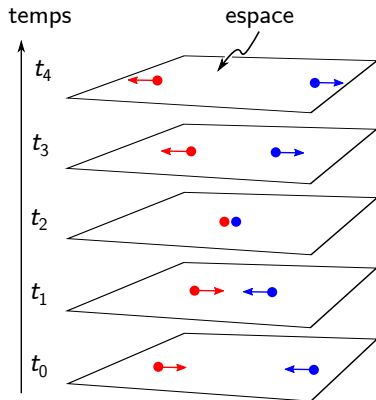
# Espace, temps et espace-temps



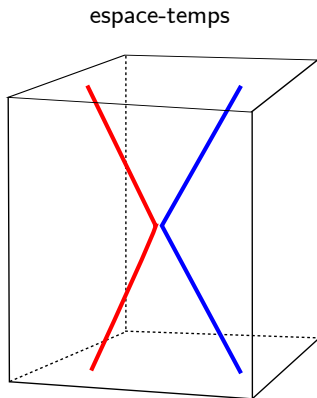
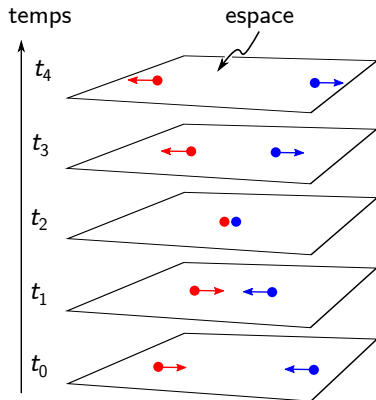
# Espace, temps et espace-temps



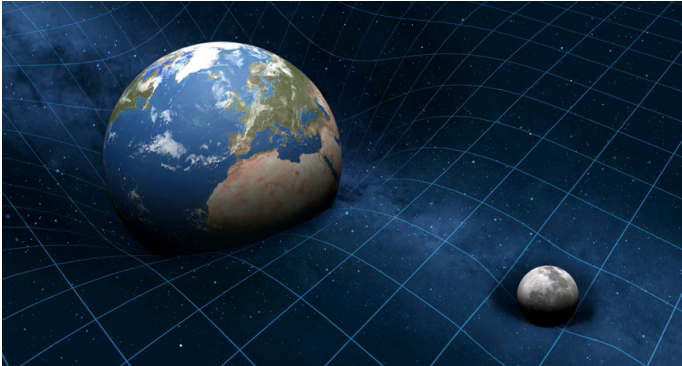
# Espace, temps et espace-temps



# Espace, temps et espace-temps

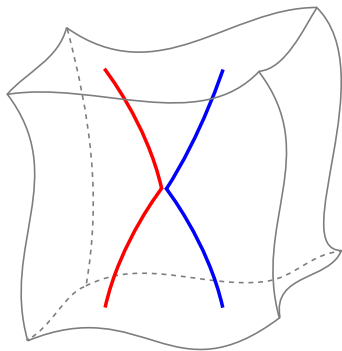


## L'espace-temps est courbe



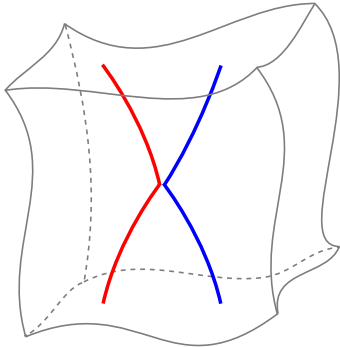
La gravitation est la manifestation de la **courbure de l'espace-temps** par la masse et l'énergie de la matière

# L'espace-temps est dynamique



espace-temps

# L'espace-temps est dynamique



espace-temps



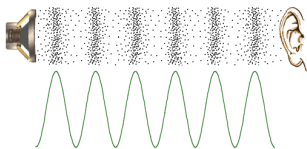
dessert anglais

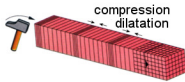
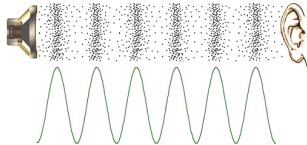


# Plan de l'exposé

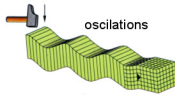
- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?**
- 3 Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- 4 Un couple de trous noirs fusionnels
- 5 L'astronomie gravitationnelle



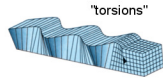




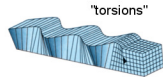
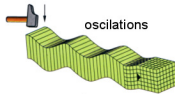
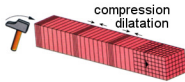
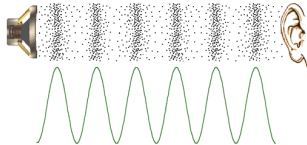
compression  
dilatation

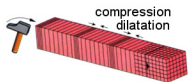
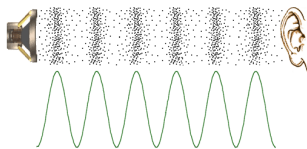


oscilations

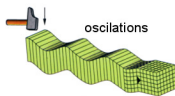


"torsions"

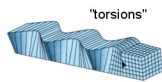




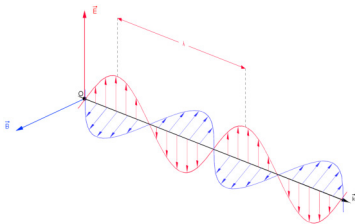
compression  
dilatation



oscillations

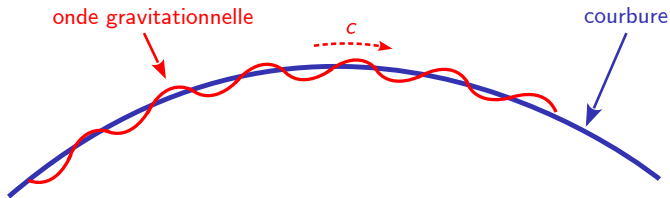


"torsions"

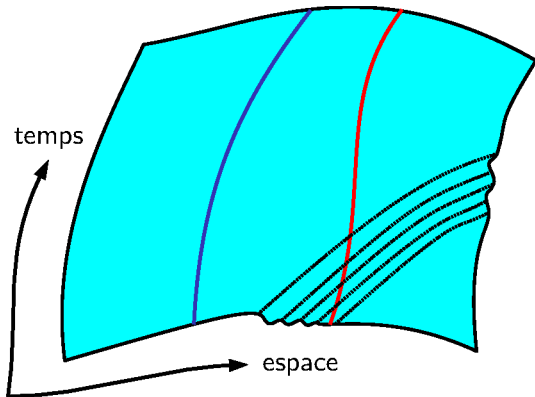


## Les vibrations de l'espace-temps

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



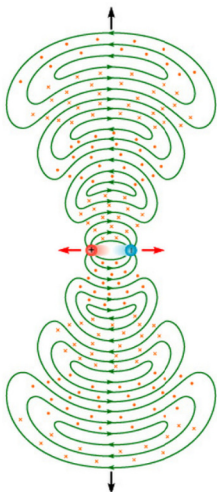
## Les vibrations de l'espace-temps



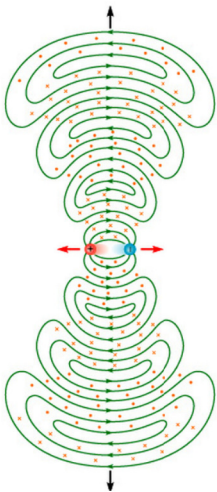
(Credit : E. Gourgoulhon)



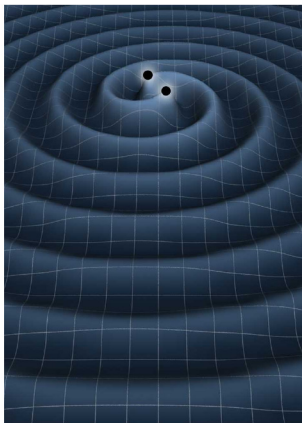
## Ondes électromagnétiques



## 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



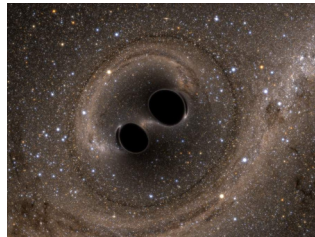
étoile à neutrons isolée



supernovae



binaire d'étoiles à neutrons

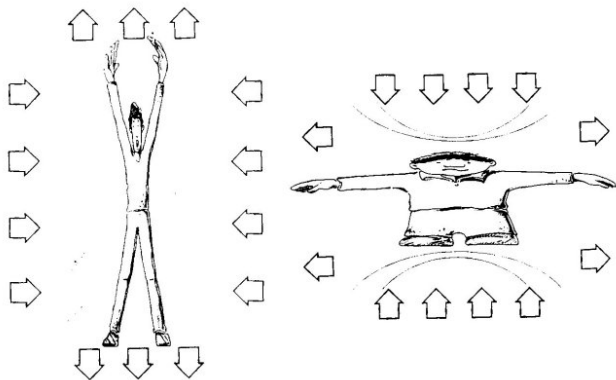


binaire de trous noirs

# 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



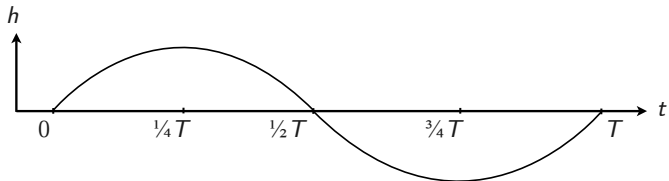


# Effets d'une onde gravitationnelle

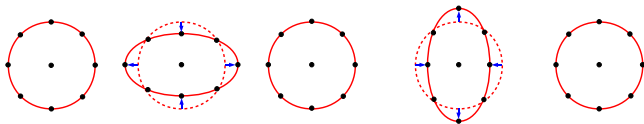
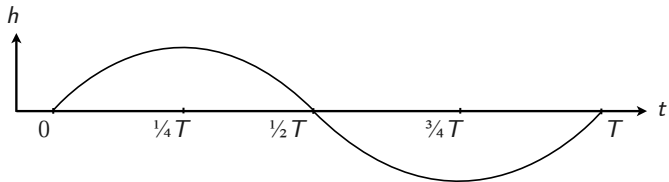


[[https://youtu.be/WgE6lb\\_i78A](https://youtu.be/WgE6lb_i78A)]

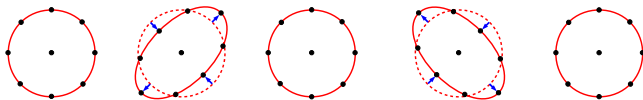
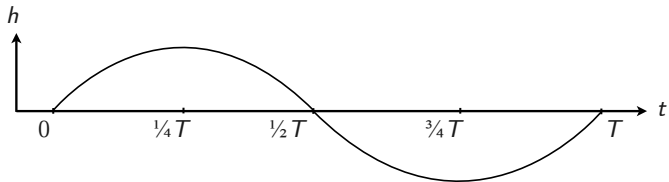
## Effets d'une onde gravitationnelle



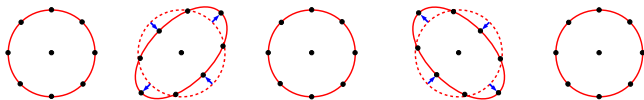
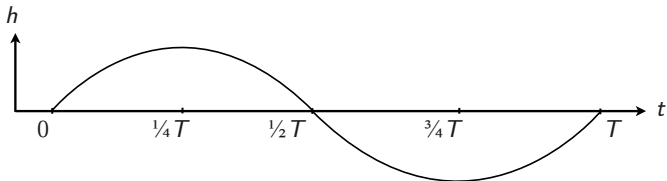
# Effets d'une onde gravitationnelle



# Effets d'une onde gravitationnelle

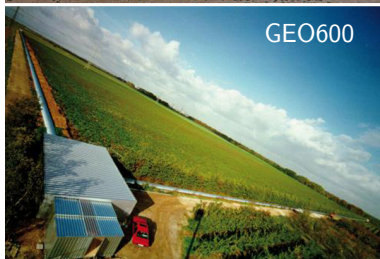


## Effets d'une onde gravitationnelle

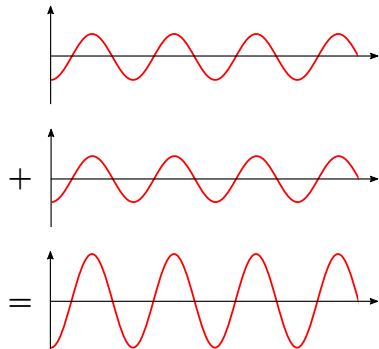


Onde gravitationnelle  $h \rightarrow$  variation de longueur  $\delta L \sim h L$

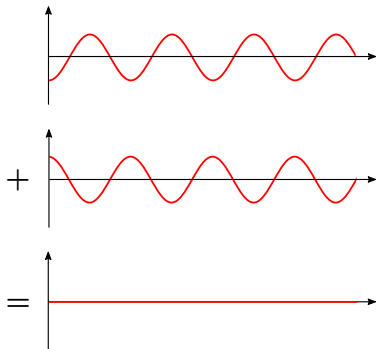
# Détecteurs interférométriques laser



## Les ondes peuvent interférer

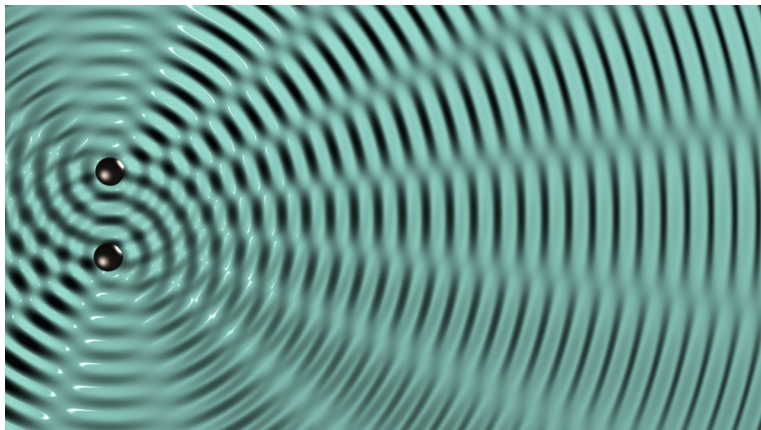


interférences constructives



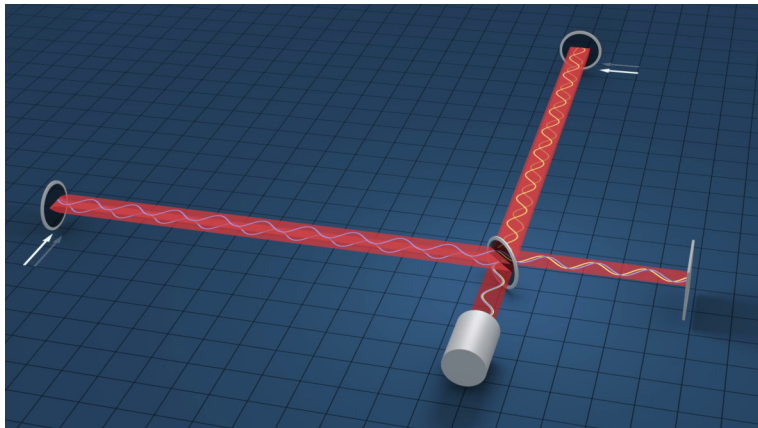
interférences destructives

Les ondes peuvent interférer





# Principe de fonctionnement

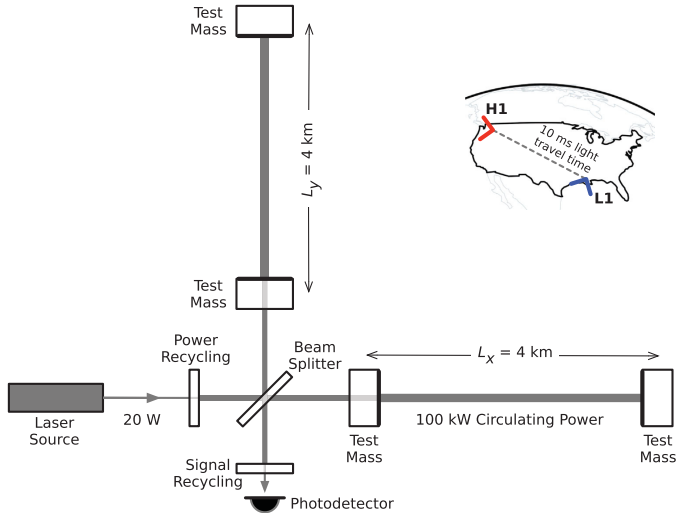


[[https://youtu.be/tQ\\_telUb3tE](https://youtu.be/tQ_telUb3tE)]

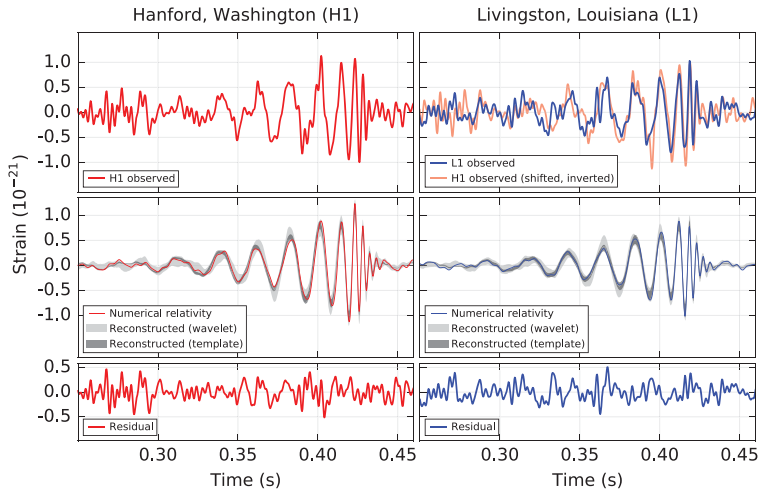
# Plan de l'exposé

- 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

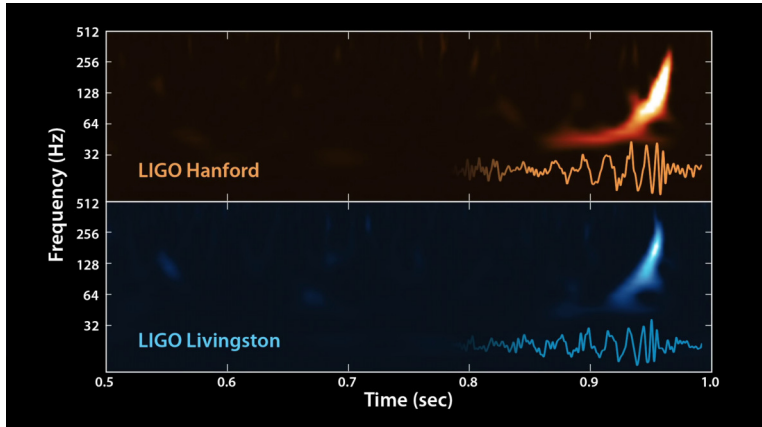
# Les détecteurs LIGO



# La première détection !

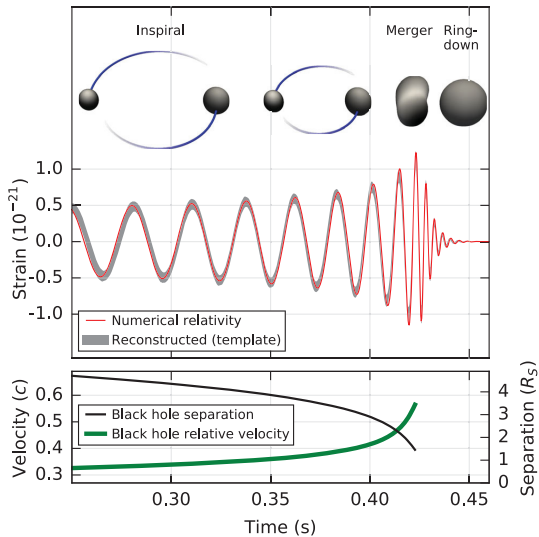


# La première détection !

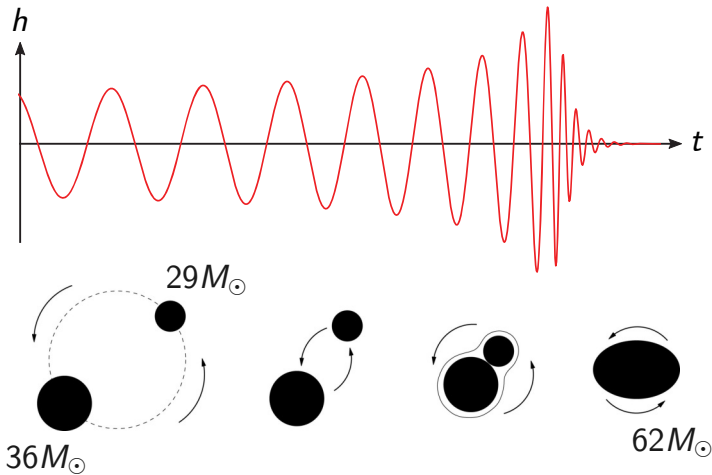


[<https://youtu.be/QyDcTbR-kEA>]

# Deux trous noirs ont fusionné



## Propriétés de la source



# Un événement historique

PRL **116**, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*  
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
12 FEBRUARY 2016

9

## 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  $1.0 \times 10^{-21}$ . 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  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410^{+160}_{-90}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36^{+2}_{-2} M_{\odot}$  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**

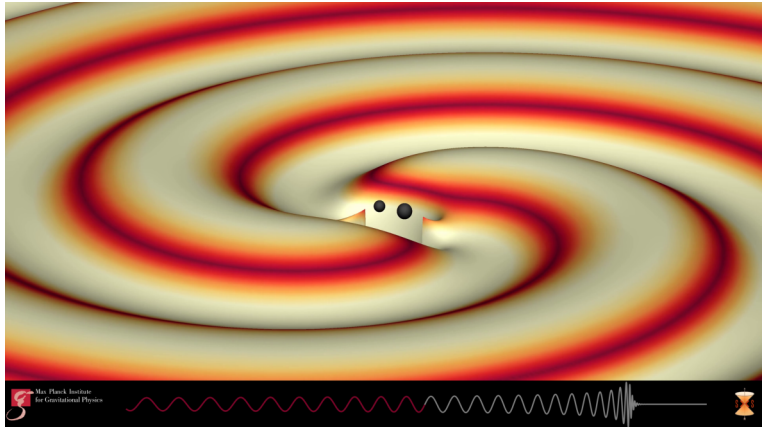


## Apparence de la fusion



[[https://youtu.be/I\\_88S8DWbcU](https://youtu.be/I_88S8DWbcU)]

# Simulation de la fusion

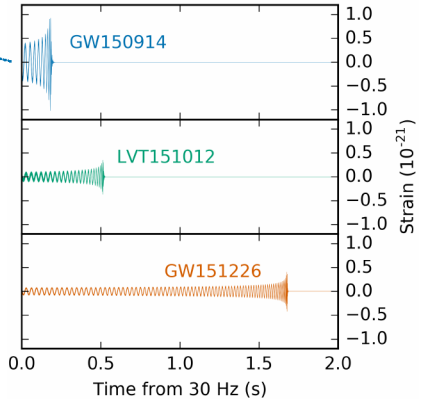
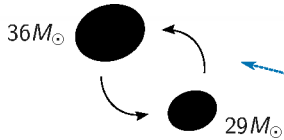


[[https://youtu.be/\\_GhkWuIDzpc](https://youtu.be/_GhkWuIDzpc)]

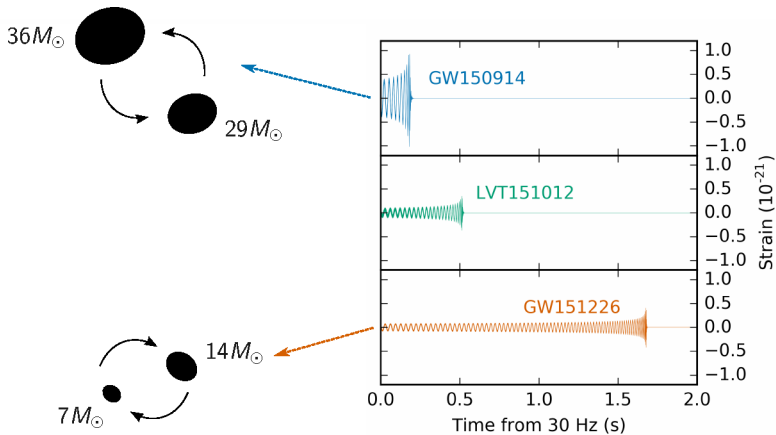
# Plan de l'exposé

- 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

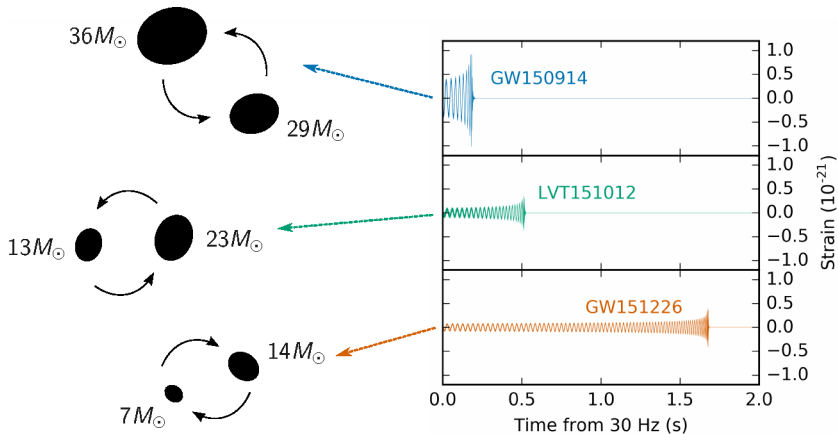
# Trois détections en quelques mois



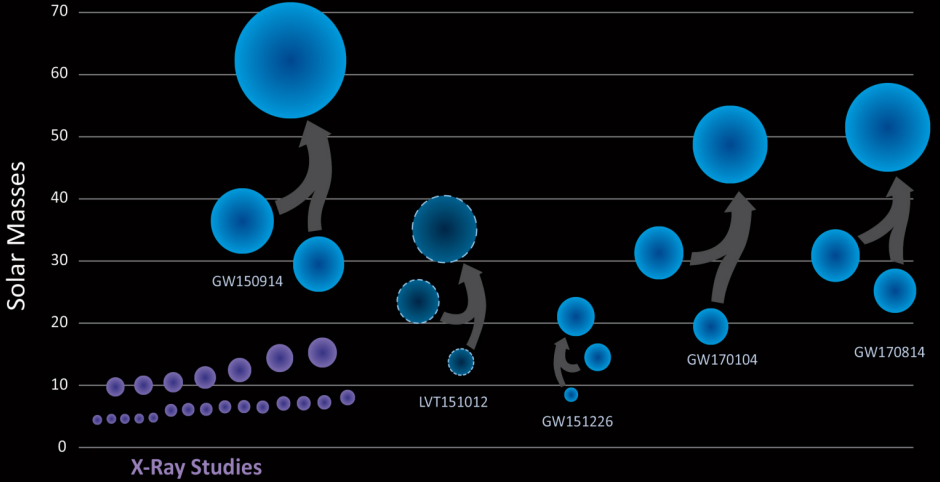
## Trois détections en quelques mois



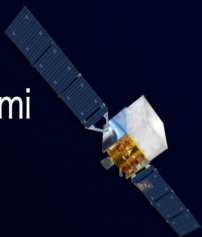
## Trois détections en quelques mois



# Trous noirs de masse connue

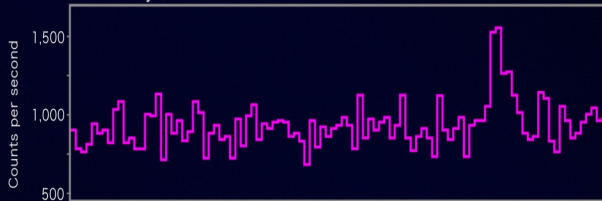


Fermi



Gamma rays, 50 to 300 keV

GRB 170817A

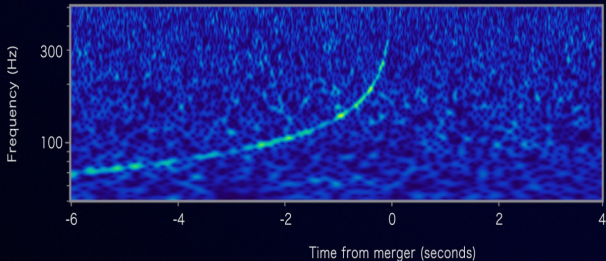


LIGO

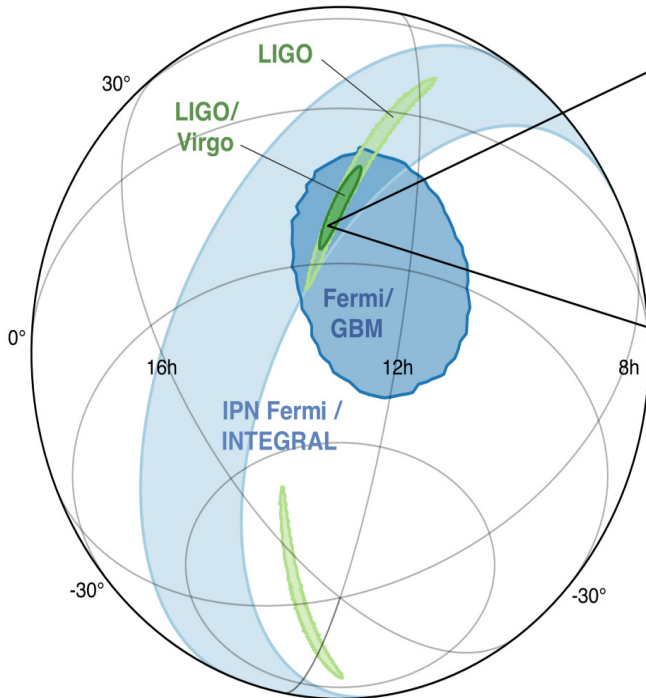


Gravitational-wave strain

GW170817





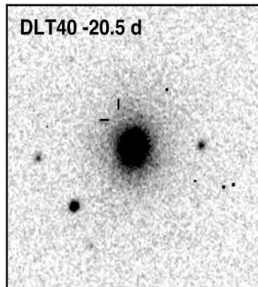


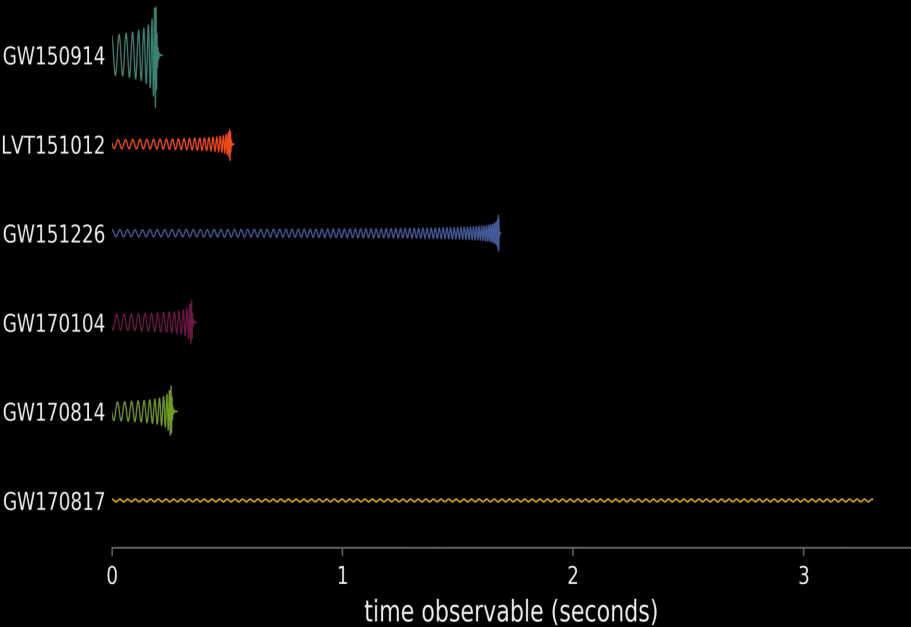
Swope +10.9 h

30"



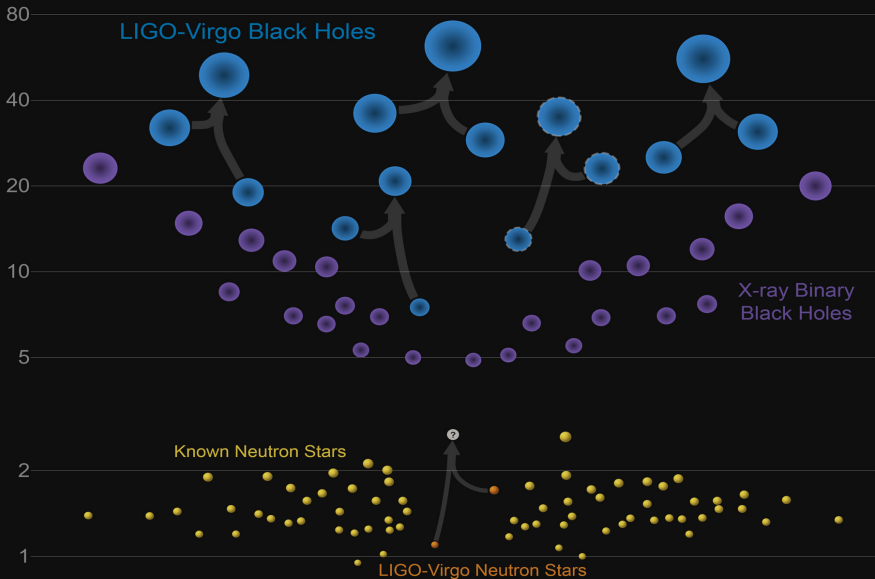
DLT40 -20.5 d





# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



## Un réseau mondial de détecteurs terrestres

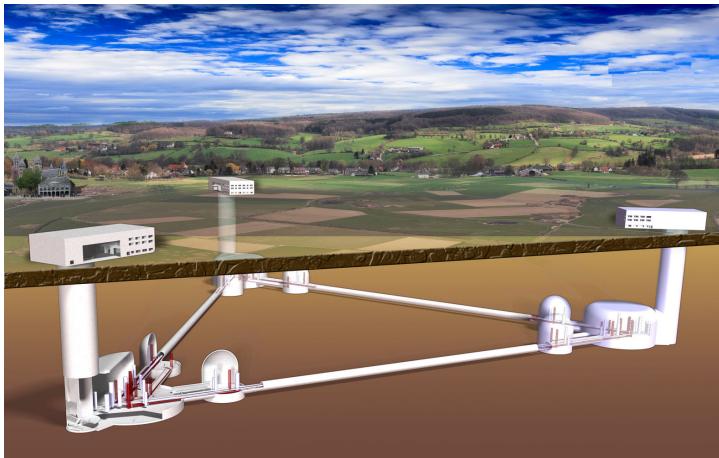


## Un réseau mondial de détecteurs terrestres



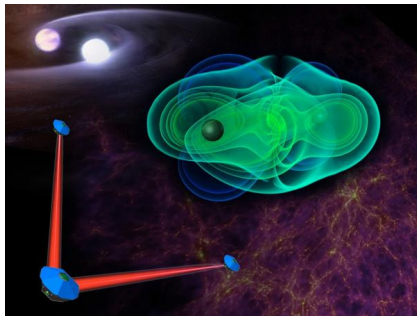
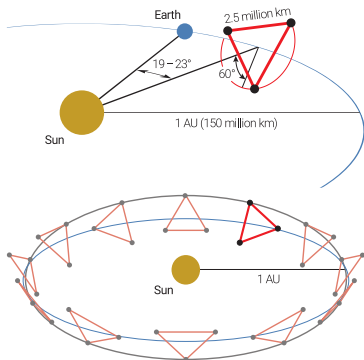
**Plusieurs centaines d'événements par an d'ici 2020**

# Un détecteur de troisième génération



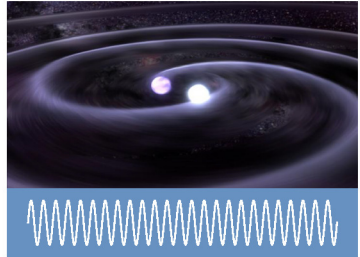
Projet **ET** à l'étude par la Commission européenne

# Une antenne gravitationnelle dans l'espace



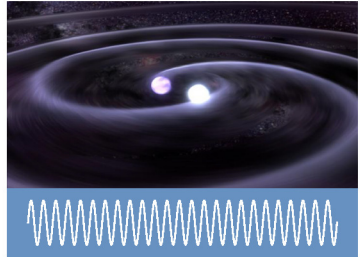
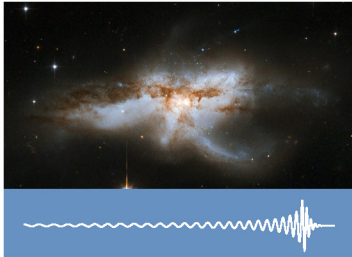
Projet **LISA** de l'Agence spatiale européenne (ESA)

# Écouter la symphonie cosmique avec LISA

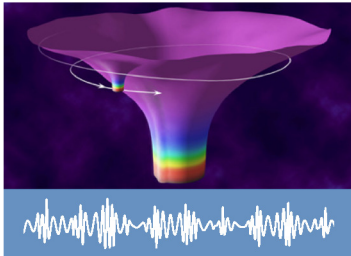
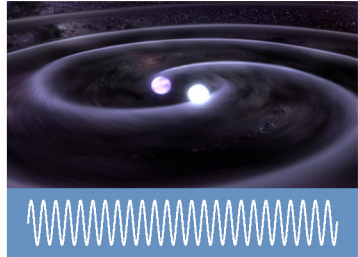
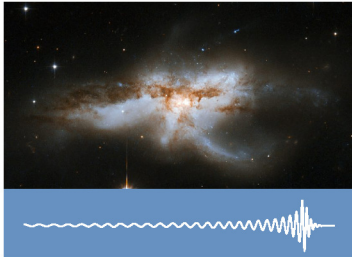




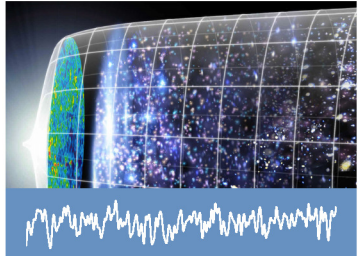
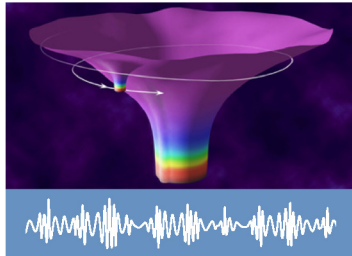
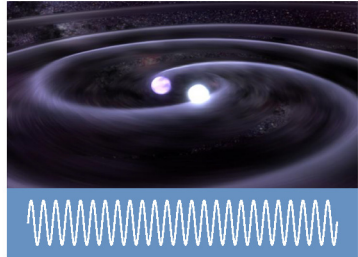
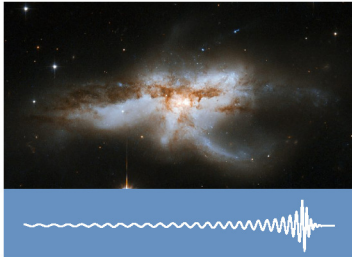
# Écouter la symphonie cosmique avec LISA



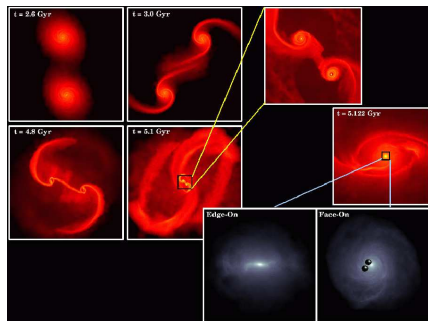
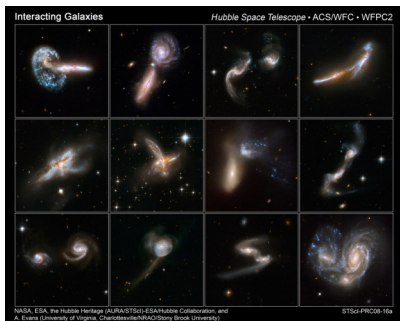
# Écouter la symphonie cosmique avec LISA



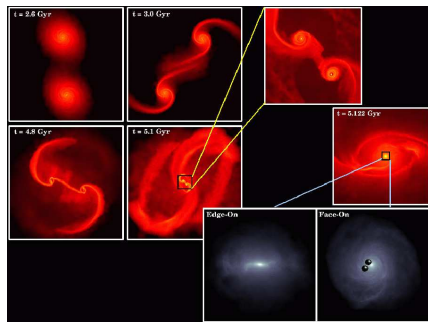
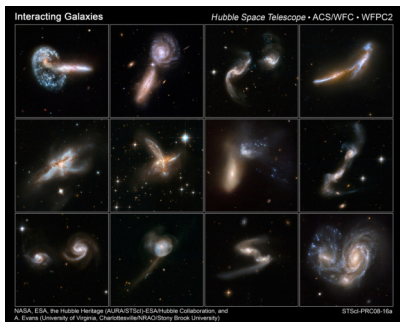
# Écouter la symphonie cosmique avec LISA



# Fusions de trous noirs supermassifs

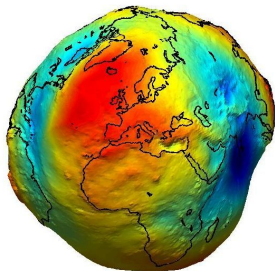


# Fusions de trous noirs supermassifs

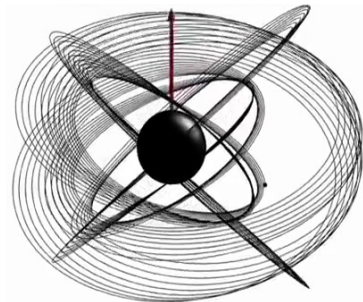
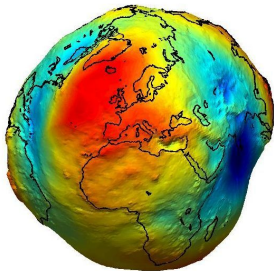


**Explorer la croissance des trous noirs et comprendre l'évolution des galaxies au cours des temps cosmiques**

# Géodésie

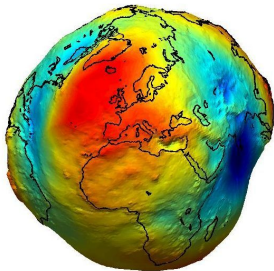


# Géodésie

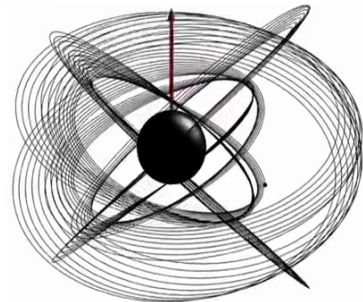


[<https://youtu.be/WPvkzSvGHvc>]

## Géodésie



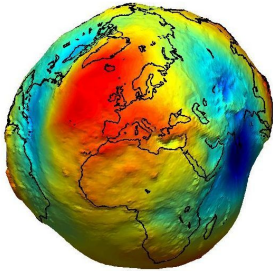
## Bothrioméladésie



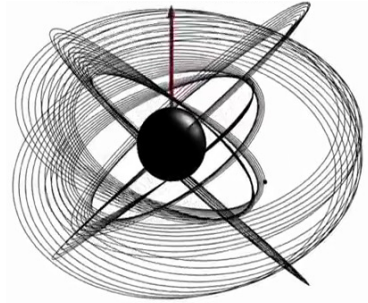
[<https://youtu.be/WPvkzSvGHvc>]



Géodésie



Bothrioméladésie



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

**Tester le théorème de calvitie des trous noirs**

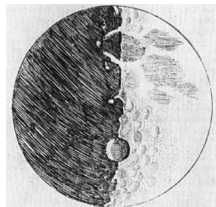
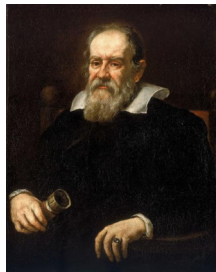


# Que nous réserve l'avenir ?

---

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires	1609

---

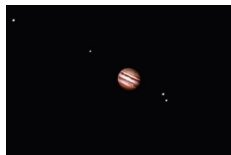


# Que nous réserve l'avenir ?

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

*Observations Joviennes*  
1610

2. 1. 1610	○ * *
30. 1. 1610	* * ○ *
2. 2. 1610	○ * * *
3. 2. 1610	○ * *
3. 2. 1610	* ○ *
4. 2. 1610	* ○ * *
6. 2. 1610	* * ○ *
8. 2. 1610	* * * ○
10. 2. 1610	* * * ○ *
11. 2. 1610	* * ○ *
12. 2. 1610	* ○ *
17. 2. 1610	* * ○ *
14. 2. 1610	* * * ○ *

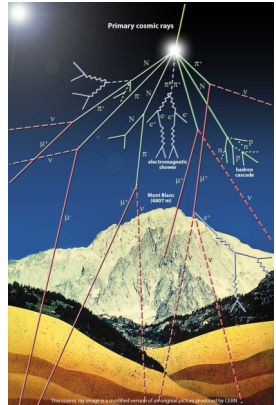


# Que nous réserve l'avenir ?

---

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

---

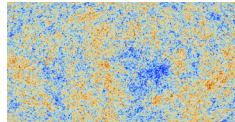
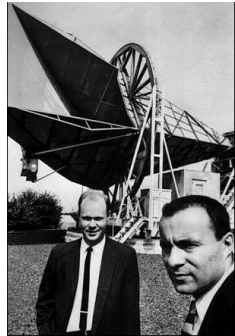


# Que nous réserve l'avenir ?

---

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

---

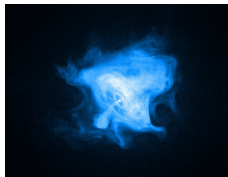


# Que nous réserve l'avenir ?

---

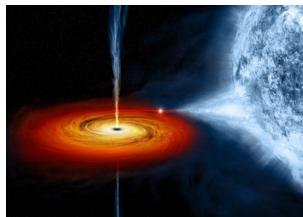
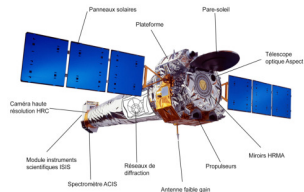
Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires	1609
		satellites joviens	1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus	1964
		pulsars	1967

---



# Que nous réserve l'avenir ?

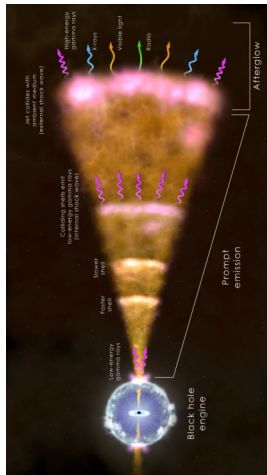
Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires satellites joviens	1609 1610
cosmiques	1912	muons	1936
ondes radio	1933	fond diffus pulsars	1964 1967
rayons X	1948	binaires X	1962





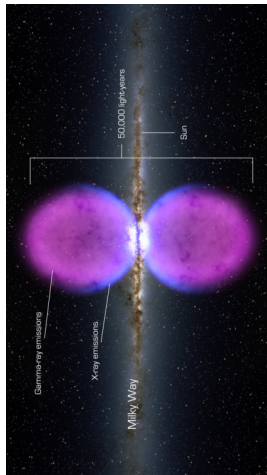
# Que nous réserve l'avenir ?

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 $\gamma$	1961	sursauts $\gamma$	1967



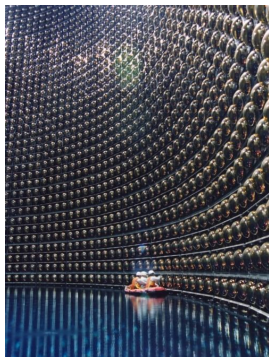
# Que nous réserve l'avenir ?

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 $\gamma$	1961	sursauts $\gamma$	1967
		bulles géantes	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 $\gamma$	1961	sursauts $\gamma$	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 $\gamma$	1961	sursauts $\gamma$	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 couples de **trous noirs** et d'**étoiles à neutrons** ont 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](http://www.fun-mooc.fr)