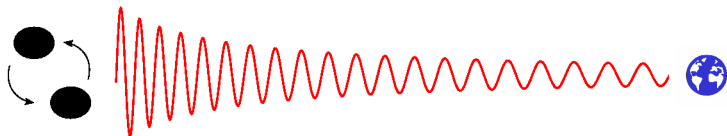


# La découverte des ondes gravitationnelles

Alexandre Le Tiec

Laboratoire Univers et Théories  
Observatoire de Paris / CNRS





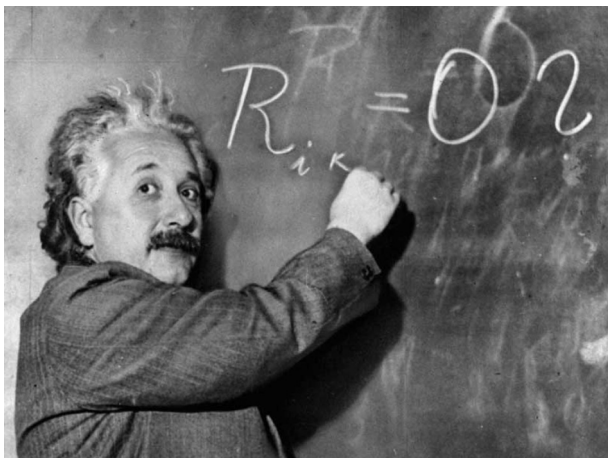


# Plan de l'exposé

- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- 3 Un couple de trous noirs fusionnels
- 4 La valse de deux étoiles à neutrons
- 5 L'astronomie gravitationnelle

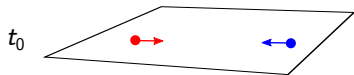
# Plan de l'exposé

- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- 3 Un couple de trous noirs fusionnels
- 4 La valse de deux étoiles à neutrons
- 5 L'astronomie gravitationnelle

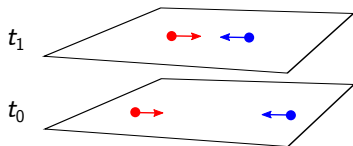


La *relativité générale* est la théorie de l'**espace**, du **temps** et de la **gravitation** formulée par Albert Einstein en 1915

# Espace, temps et espace-temps

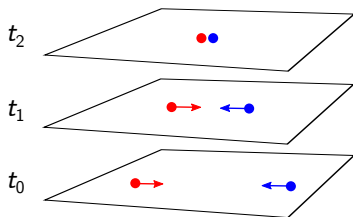


# Espace, temps et espace-temps

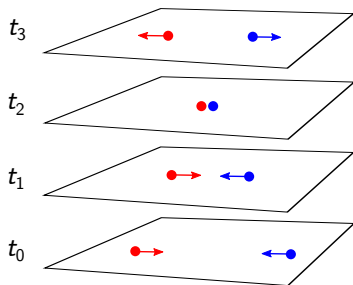




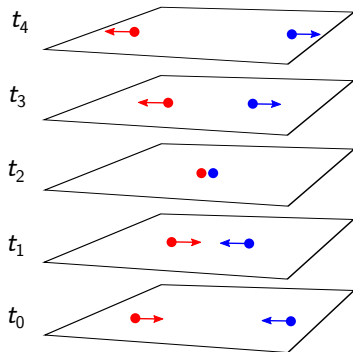
# Espace, temps et espace-temps



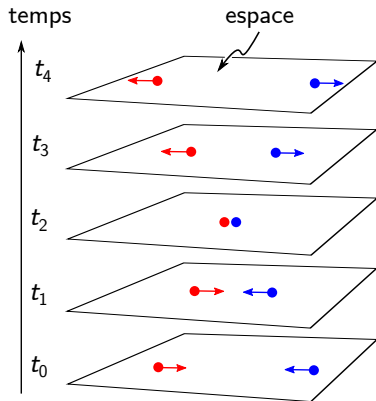
# Espace, temps et espace-temps



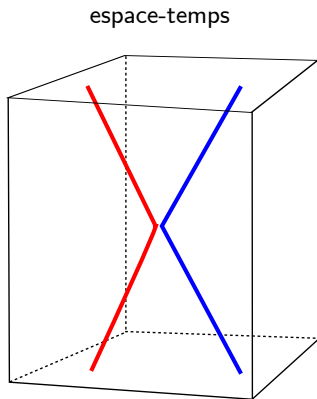
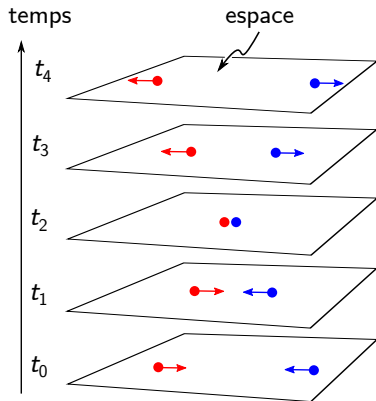
# Espace, temps et espace-temps



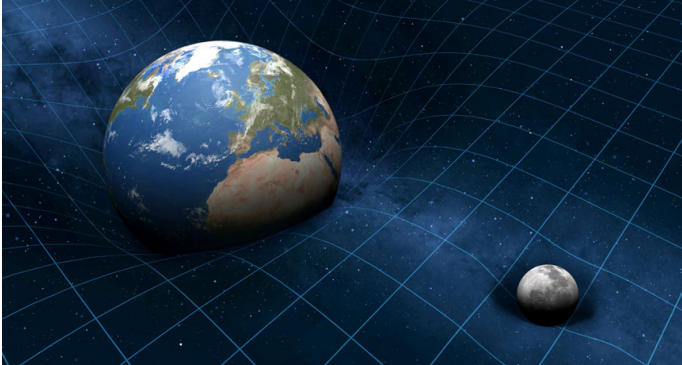
# Espace, temps et espace-temps



# Espace, temps et espace-temps

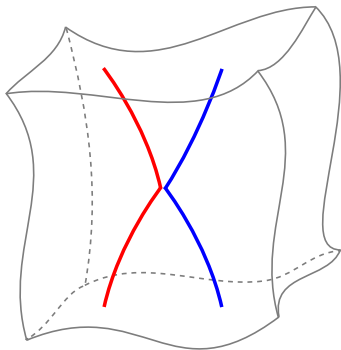


## L'espace-temps est courbe



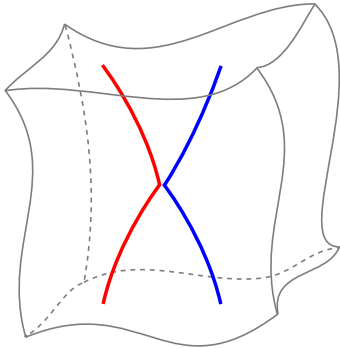
La gravitation est la manifestation de la **courbure de l'espace-temps** par la masse et l'énergie de la matière

# L'espace-temps est dynamique



espace-temps

# L'espace-temps est dynamique



espace-temps



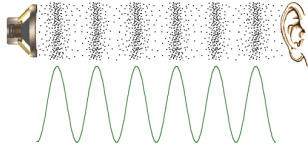
dessert anglais

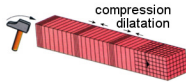
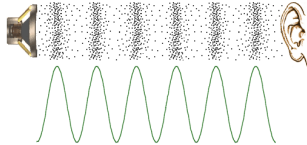


# Plan de l'exposé

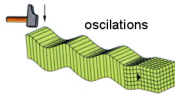
- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?**
- 3 Un couple de trous noirs fusionnels
- 4 La valse de deux étoiles à neutrons
- 5 L'astronomie gravitationnelle



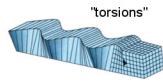




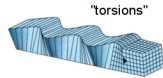
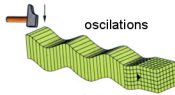
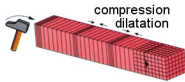
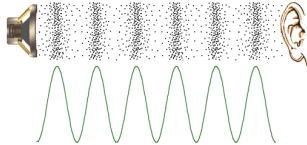
compression  
dilatation

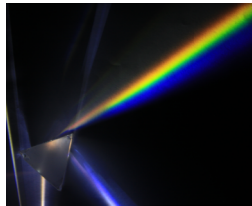
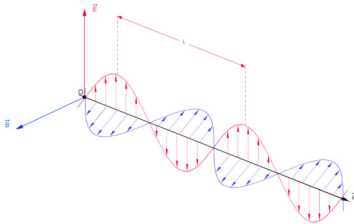
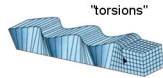
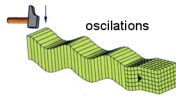
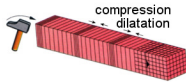
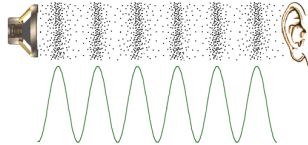


oscilations



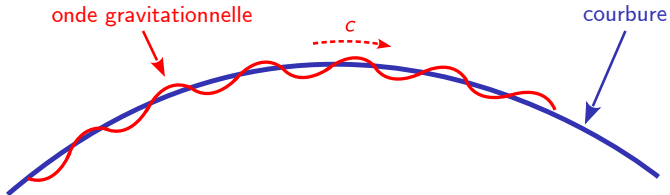
"torsions"



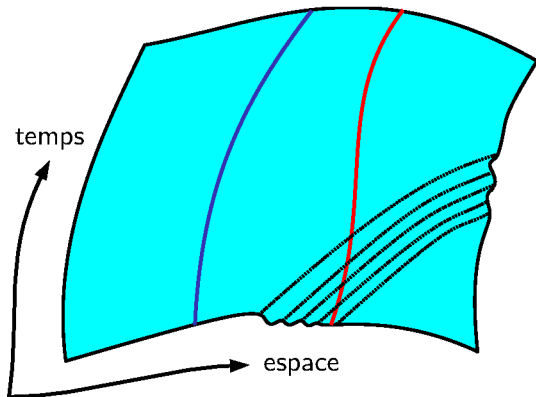


# Les vibrations de l'espace-temps

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



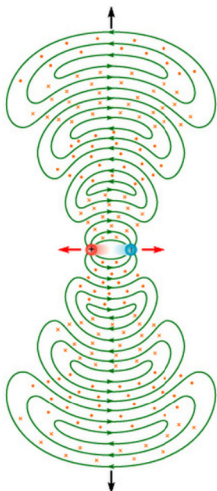
## Les vibrations de l'espace-temps



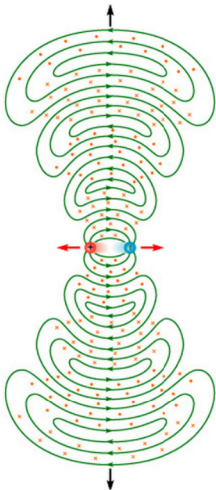
(Credit : E. Gourgoulhon)



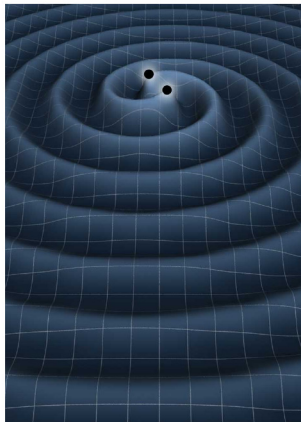
## Ondes électromagnétiques



## 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



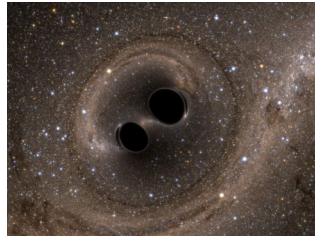
étoile à neutrons isolée



supernovae



binaire d'étoiles à neutrons



binaire de trous noirs

# Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

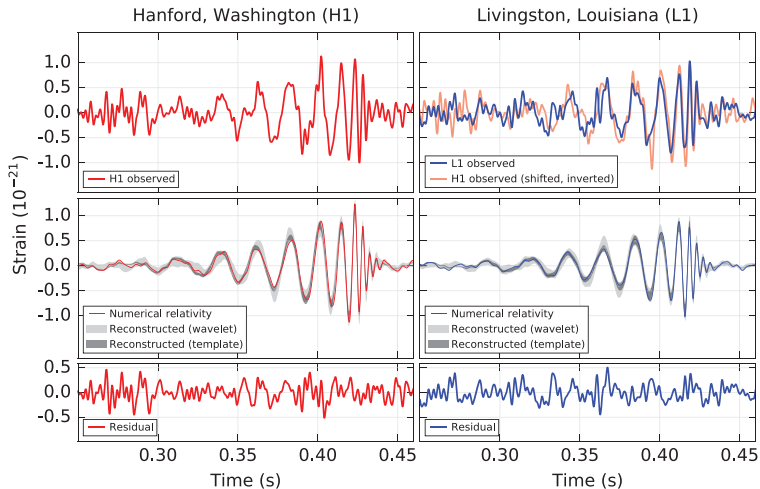


# Plan de l'exposé

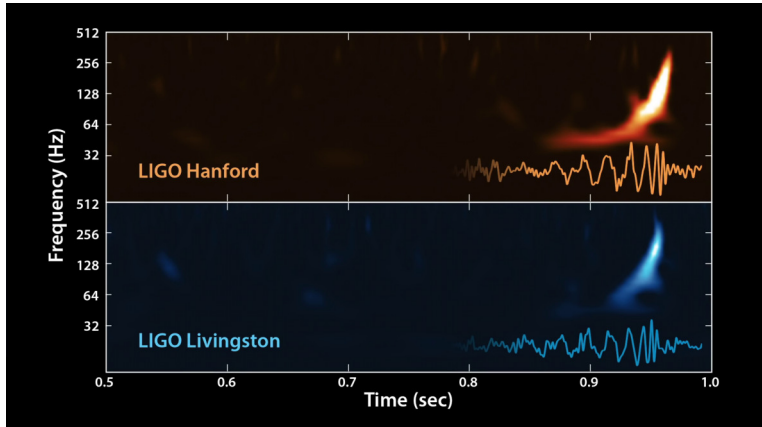
- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- 3 Un couple de trous noirs fusionnels**
- 4 La valse de deux étoiles à neutrons
- 5 L'astronomie gravitationnelle



# La première détection !

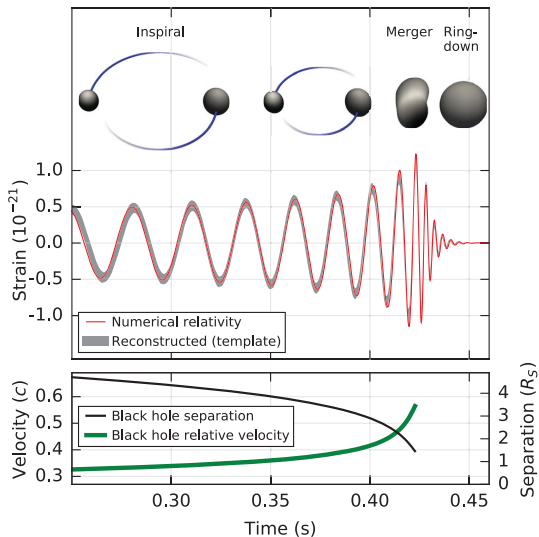


# La première détection !

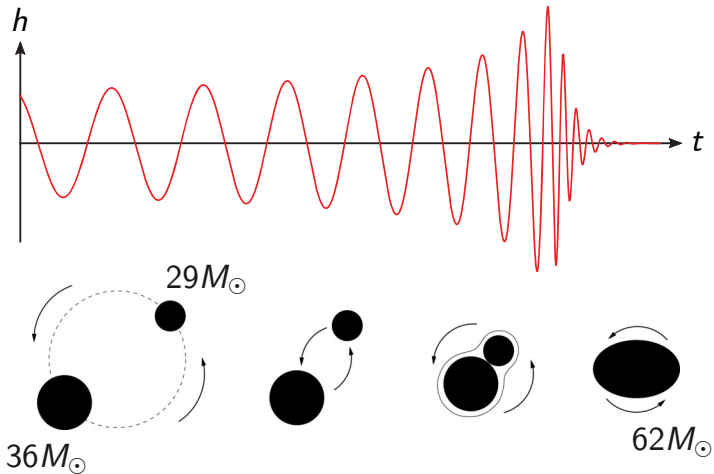


[<https://youtu.be/QyDcTbR-kEA>]

# 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.*\*

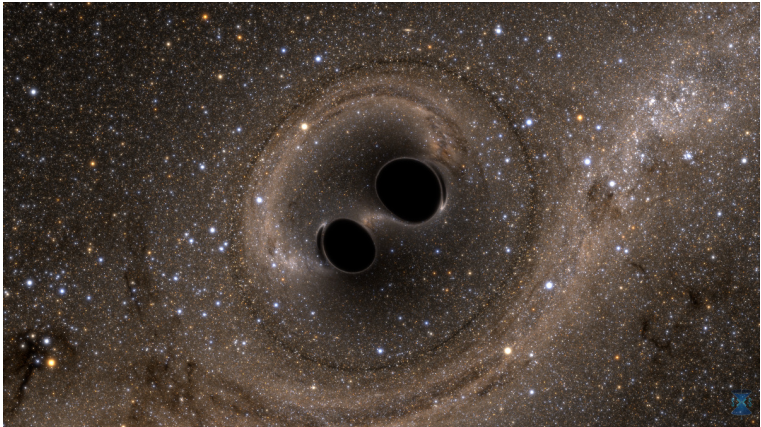
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(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  $1.0 \times 10^{-21}$ . 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  $410^{+160}_{-180}$  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.

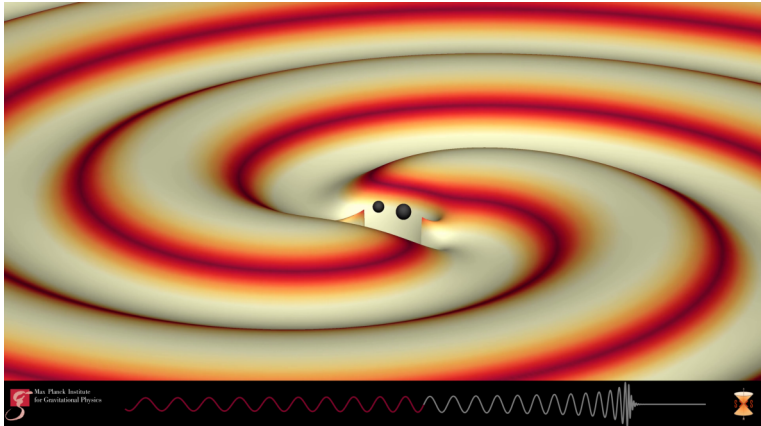
- Première **détection directe** d'ondes gravitationnelles
- Preuve la plus robuste de l'existence des **trous noirs**
- Découverte du premier système **binaire** de trous noirs
- Premier test de la relativité générale en **champ fort**

## Apparence de la fusion



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

# Simulation de la fusion



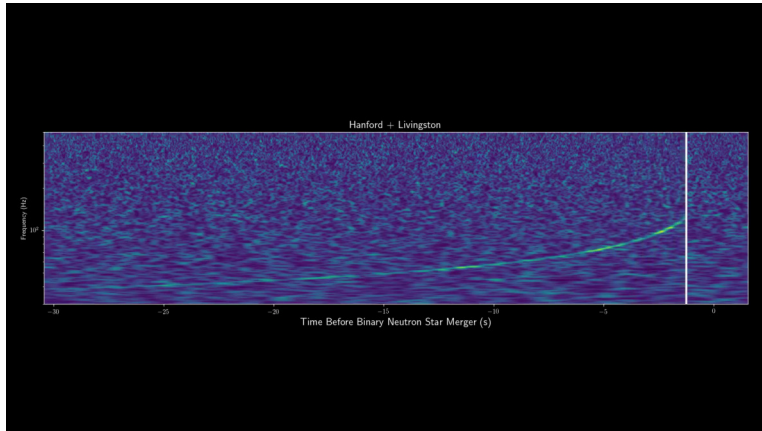
[[https://youtu.be/\\_GhkWuIDzpc](https://youtu.be/_GhkWuIDzpc)]

# Plan de l'exposé

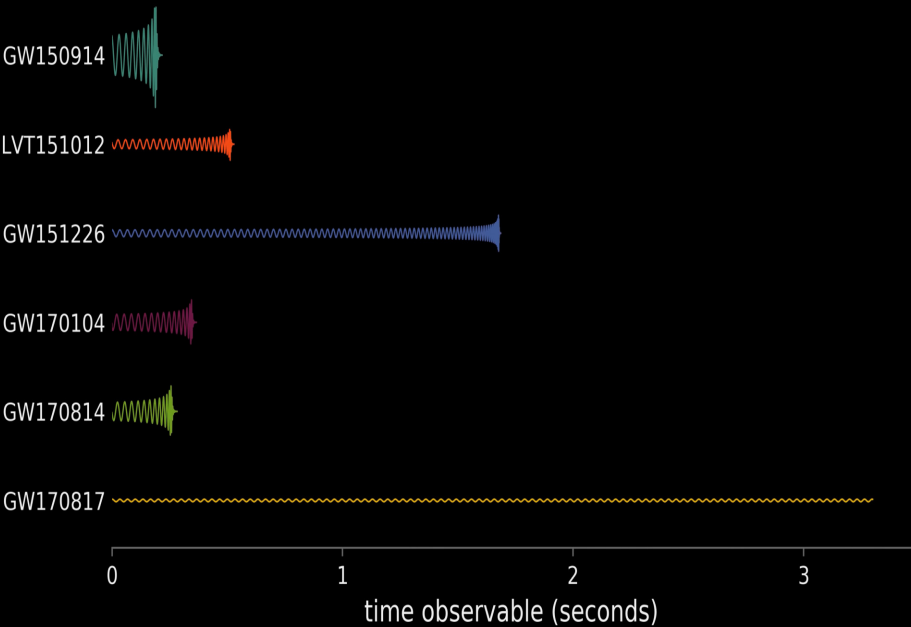
- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- 3 Un couple de trous noirs fusionnels
- 4 La valse de deux étoiles à neutrons**
- 5 L'astronomie gravitationnelle



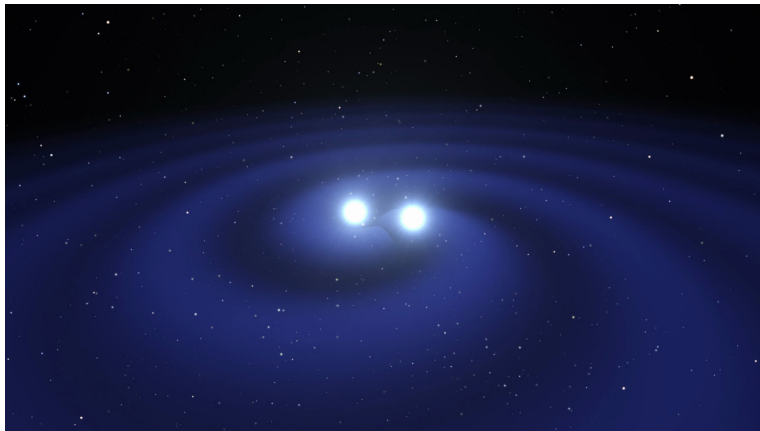
# L'événement GW170817



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

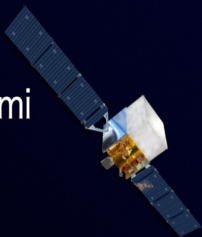


## Le spiralement de deux étoiles à neutrons



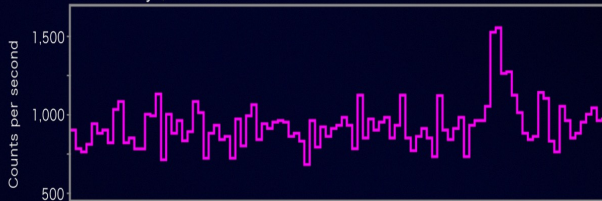
[<https://youtu.be/y8VDwGi0r0E>]

Fermi



Gamma rays, 50 to 300 keV

GRB 170817A

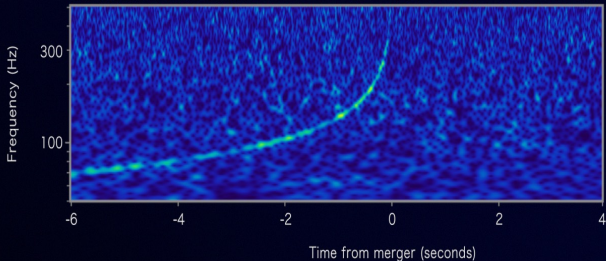


LIGO

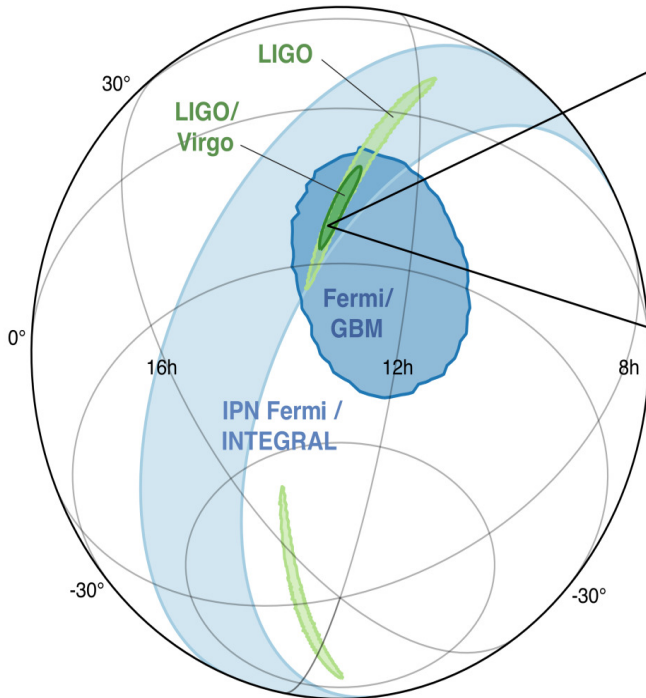


Gravitational-wave strain

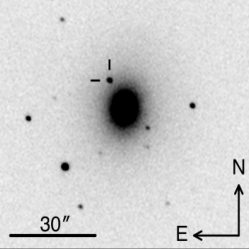
GW170817



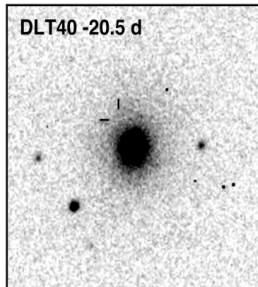
# NGC 4993



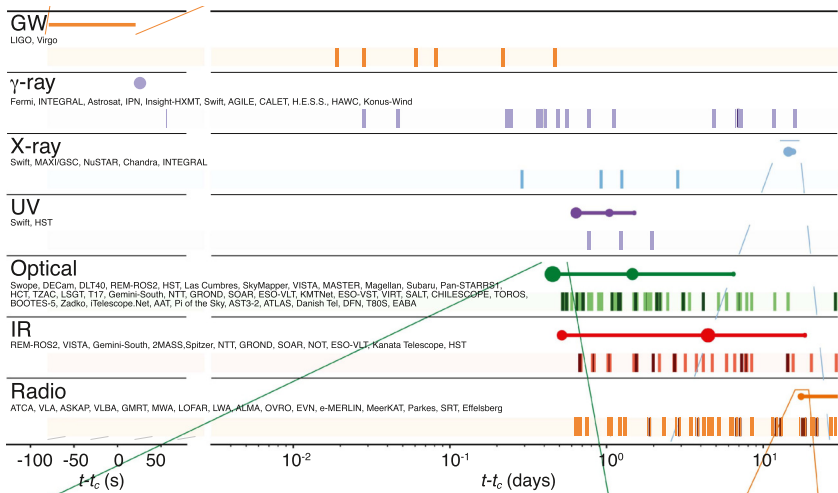
Swope +10.9 h



DLT40 -20.5 d



# L'astronomie multi-messager est une réalité



# Une découverte historique

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

**OPEN ACCESS**

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91e9>



## Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Fermi GBM, INTEGRAL, IceCube Collaboration, AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team, IPN Collaboration, The Insight-Hxmt Collaboration, ANTARES Collaboration, The Swift Collaboration, AGILE Team, The IM2H Team, The Dark Energy Camera GW-EM Collaboration and the DES Collaboration, The DLT40 Collaboration, GRAWITA: GRAVitational Wave Inaf TeAm, The Fermi Large Area Telescope Collaboration, ATCA: Australia Telescope Compact Array, ASKAP: Australian SKA Pathfinder, Las Cumbres Observatory Group, OzGrav, DWF (Deeper, Wider, Faster Program), AST3, and CAASTRO Collaborations, The VINROUGE Collaboration, MASTER Collaboration, J-GEM, GROWTH, JAGWAR, Caltech-NRAO, TTU-NRAO, and NuSTAR Collaborations, Pan-STARRS, The MAXI Team, TZAC Consortium, KU Collaboration, Nordic Optical Telescope, ePESSTO, GROND, Texas Tech University, SALT Group, TOROS: Transient Robotic Observatory of the South Collaboration, The BOOTES Collaboration, MWA: Murchison Widefield Array, The CALET Collaboration, IKI-GW Follow-up Collaboration, H.E.S.S. Collaboration, LOFAR Collaboration, LWA: Long Wavelength Array, HAWC Collaboration, The Pierre Auger Collaboration, ALMA Collaboration, Euro VLBI Team, Pi of the Sky Collaboration, The Chandra Team at McGill University, DFN: Desert Fireball Network, ATLAS, High Time Resolution Universe Survey, RIMAS and RATIR, and SKA South Africa/MeerKAT  
(See the end matter for the full list of authors.)

*Received 2017 October 3; revised 2017 October 6; accepted 2017 October 6; published 2017 October 16*

- Première observation d'une **fusion** d'étoiles à neutrons
- Fusion d'étoiles à neutrons  $\leftrightarrow$  **sursauts  $\gamma$  courts**
- Mesure indépendante de la **constante de Hubble**
- Conforte la théorie de la nucléosynthèse par **processus  $r$**
- Forte contrainte sur la **vitesse de propagation** des ondes
- Début de l'astronomie **multi-messenger**

# Plan de l'exposé

- 1 Espace, temps et gravitation
- 2 Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- 3 Un couple de trous noirs fusionnels
- 4 La valse de deux étoiles à neutrons
- 5 L'astronomie gravitationnelle**



## Un réseau mondial de détecteurs terrestres

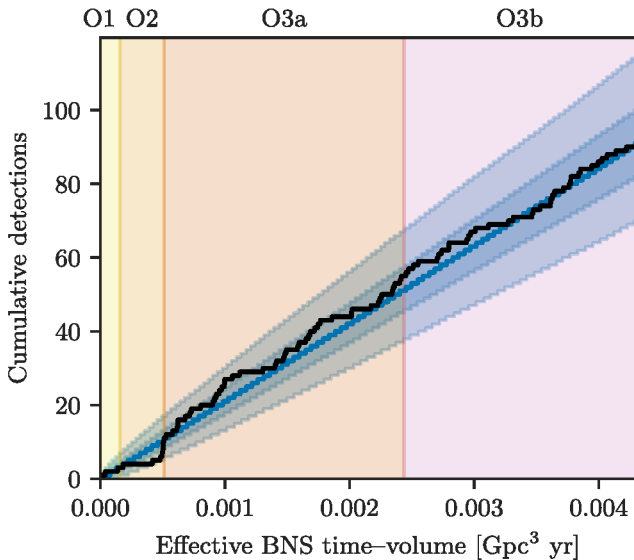


## Un réseau mondial de détecteurs terrestres



**Plusieurs centaines d'événements par an d'ici 2022+**

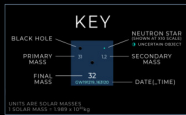
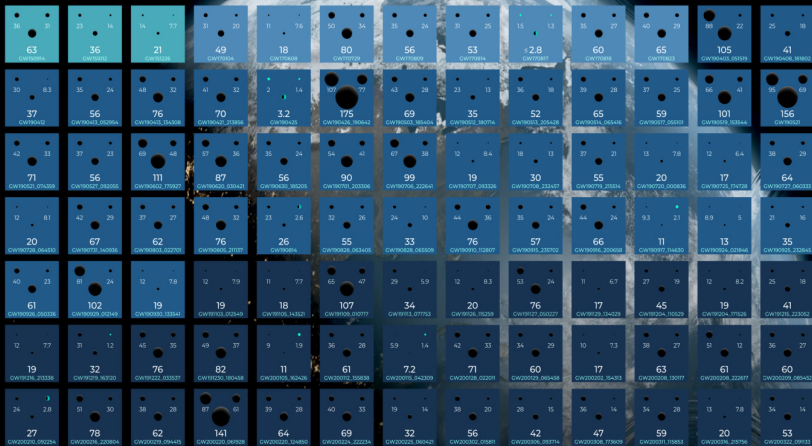
# Trois campagnes d'observations



OBSERVING  
01  
2015 - 2016

02  
2016 - 2017

03a+b  
2019 - 2020



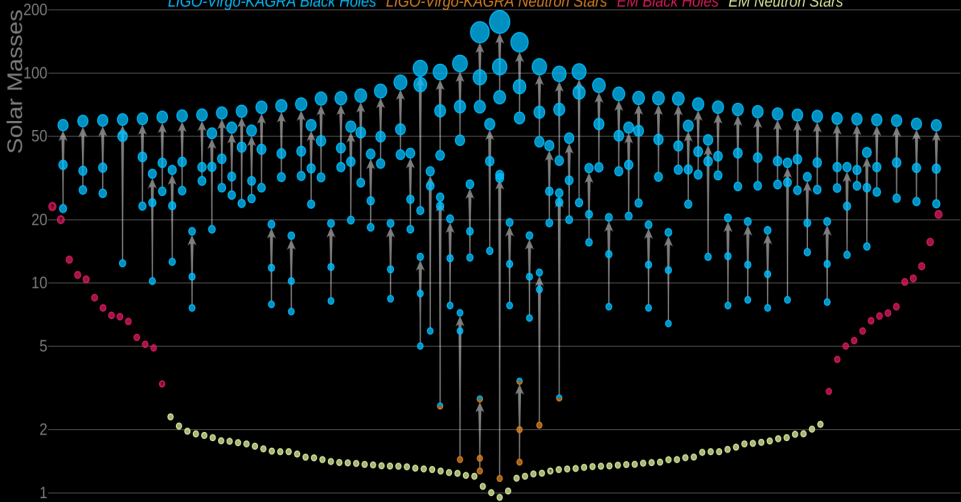
# GRAVITATIONAL WAVE MERGER DETECTIONS

SINCE 2015

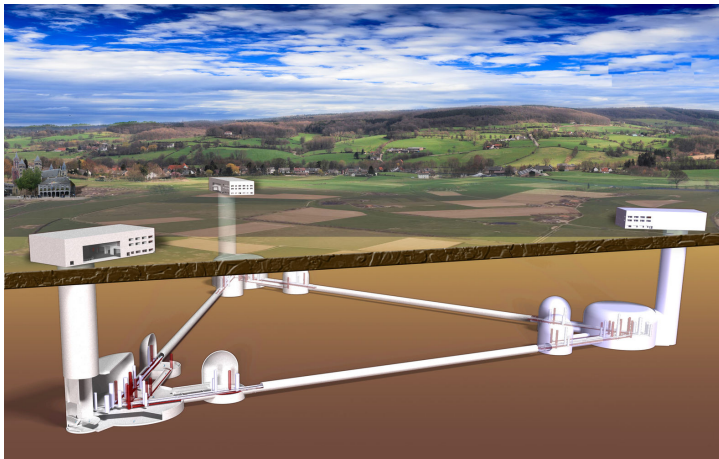


# Masses in the Stellar Graveyard

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

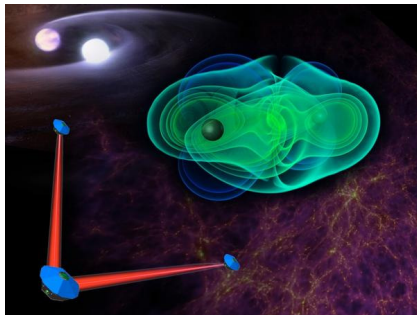
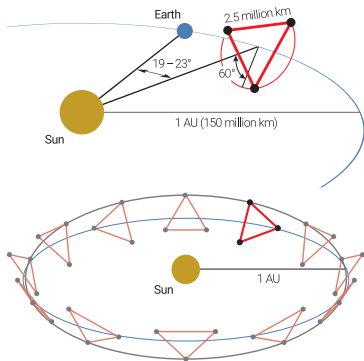


# Un détecteur de troisième génération



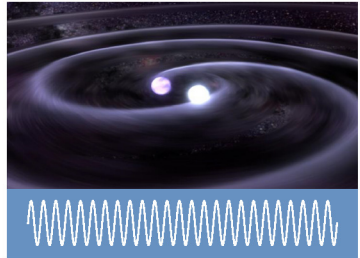
Projet **ET** à l'étude par la Commission européenne

# Une antenne gravitationnelle dans l'espace



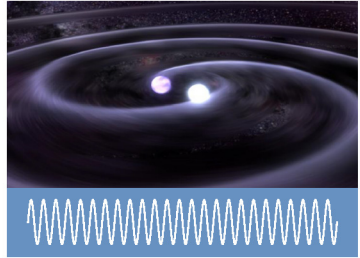
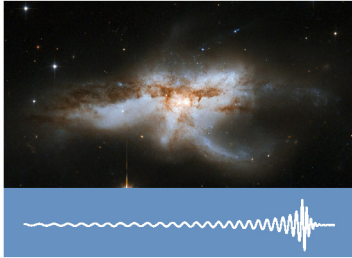
Projet **LISA** de l'Agence spatiale européenne (ESA)

# Écouter la symphonie cosmique avec LISA

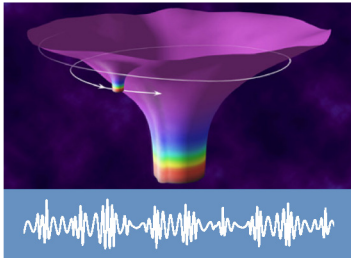
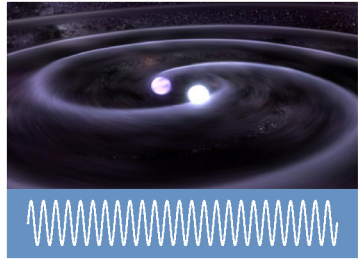
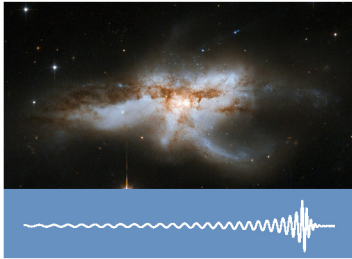




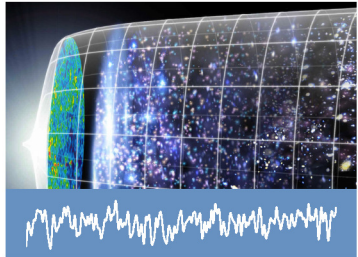
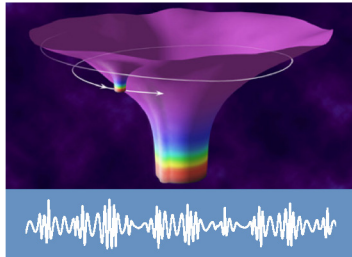
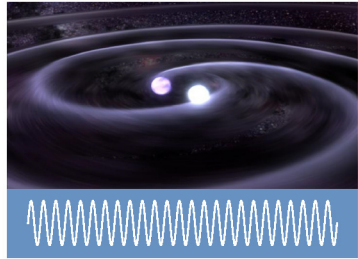
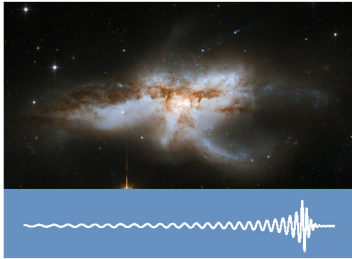
# Écouter la symphonie cosmique avec LISA



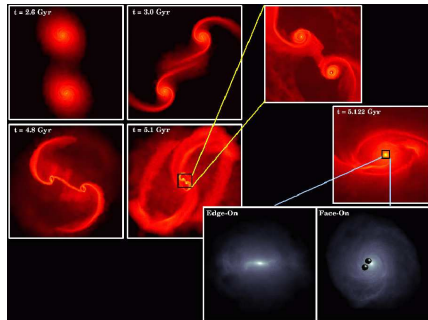
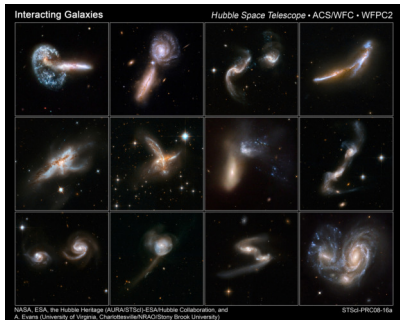
# Écouter la symphonie cosmique avec LISA



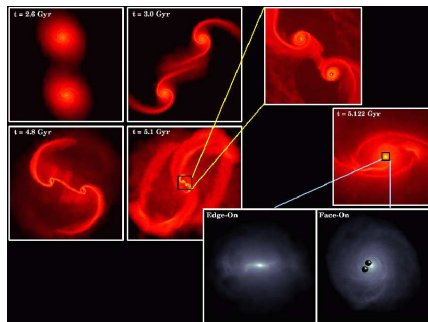
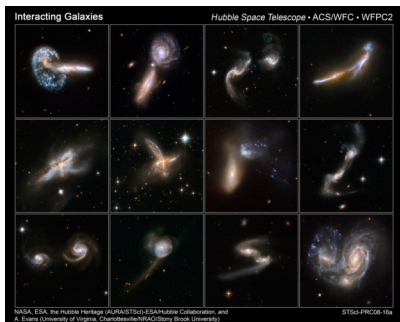
# Écouter la symphonie cosmique avec LISA



# Fusions de trous noirs supermassifs

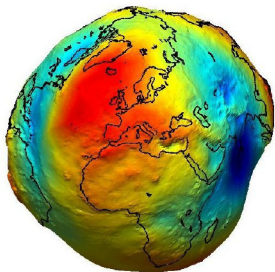


# Fusions de trous noirs supermassifs

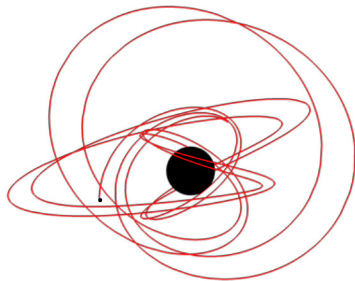
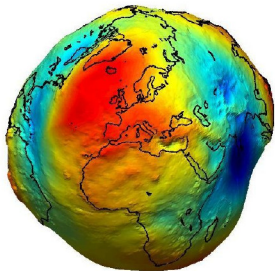


**Explorer la croissance des trous noirs et comprendre l'évolution des galaxies au cours des temps cosmiques**

# Géodésie

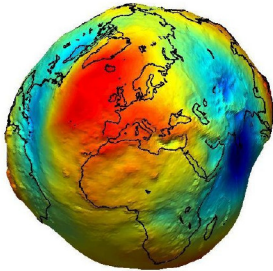


# Géodésie

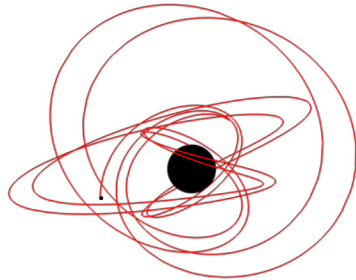


[<https://youtu.be/WPvkzSvgHvc>]

## Géodésie



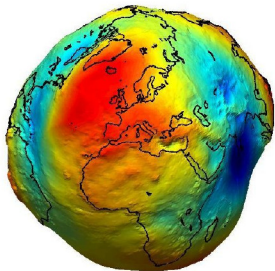
## Bothriométradésie



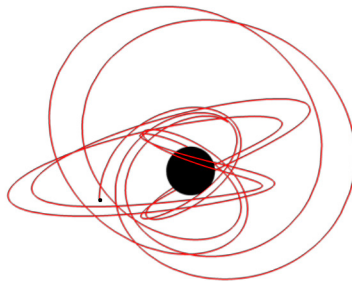
[<https://youtu.be/WPvkzSvGHvc>]



Géodésie



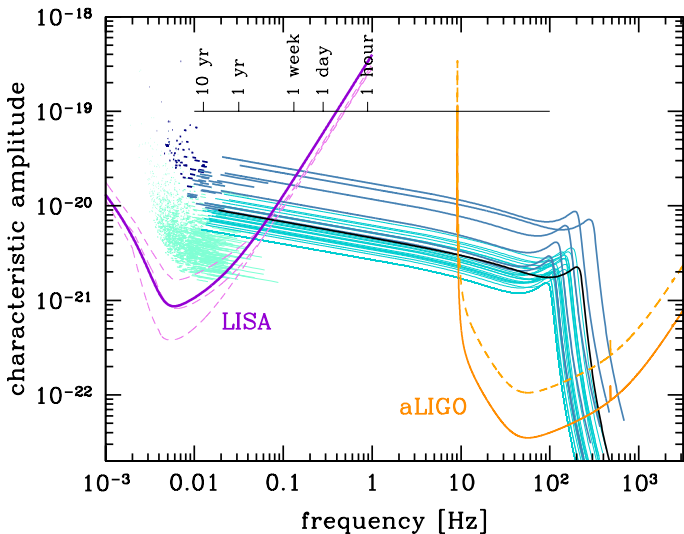
Bothrioméladésie



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

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

# L'astronomie gravitationnelle multi-bande



## Que nous réserve l'avenir ?

---

<b>Fenêtre</b>	<b>Ouverture</b>	<b>Découverte</b>	<b>Année</b>
----------------	------------------	-------------------	--------------

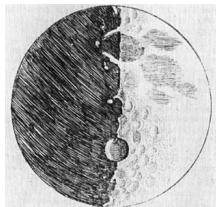
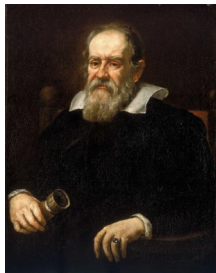
---

## Que nous réserve l'avenir ?

---

Fenêtre	Ouverture	Découverte	Année
optique	1609	cratères lunaires	1609

---

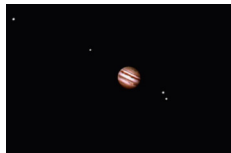


# Que nous réserve l'avenir ?

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

*Observations de Galilée*

20. janv.	○ * *
30. janv.	* * ○ *
2. fév.	○ * * *
3. mars	○ * *
3. Avr.	* ○ *
4. avril	* ○ **
6. mai	** ○ *
8. mai 1610	* * * ○
10. mai	* * * ○ *
11.	* * ○ *
12. H. + 1/2	* ○ *
13. mai	* * ○ *
14. juv.	* * * ○ *

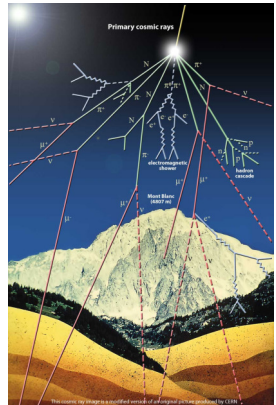


# Que nous réserve l'avenir ?

---

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

---

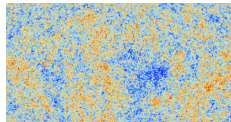
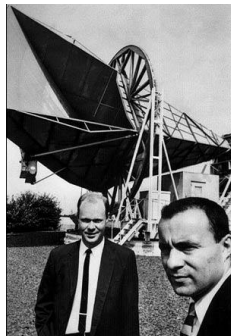


# Que nous réserve l'avenir ?

---

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

---

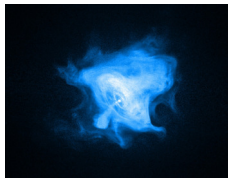


# Que nous réserve l'avenir ?

---

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

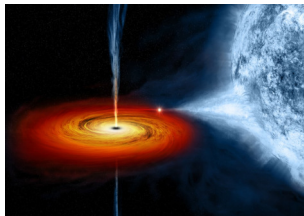
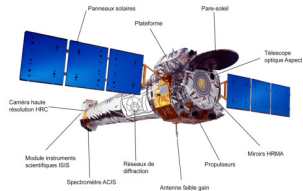
---





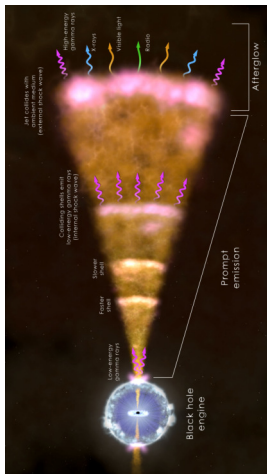
# Que nous réserve l'avenir ?

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



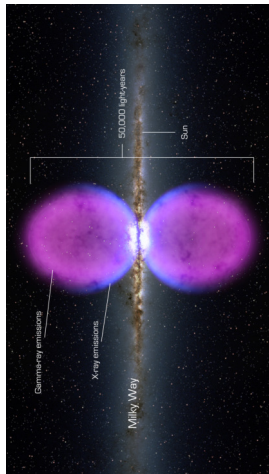
# Que nous réserve l'avenir ?

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



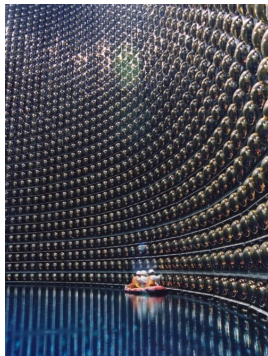
# Que nous réserve l'avenir ?

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
		<b>bulles géantes</b>	<b>2010</b>



# 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 particulièrement 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
- Ces découvertes historiques inaugurent une nouvelle ère en astronomie, celle de l'**astronomie gravitationnelle**

## Pour en savoir plus

- M. Barsuglia, *Les vagues de l'espace-temps*, Dunod, 2019
- T. Damour, *Ondes gravitationnelles et trous noirs*, CNRS, 2019
- N. Deruelle & J.-P. Lasota, *Les ondes gravitationnelles*, Odile Jacob, 2018
- P. Binétruy, *À la poursuite des ondes gravitationnelles*, Dunod, 2016
- J. Levin, *Black hole blues*, Bodley Head, 2016
- 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