

# Pourquoi les ondes gravitationnelles font-elles tant de bruit ?

Jérôme Margueron, IPN Lyon, France

- De l'astronomie à l'oeil nu aux ondes gravitationnelles
- De quels astres parle t-on ?
- Leur découverte
- De l'infiniment grand à l'infiniment petit
- L'astronomie multi-messagers
- Répondre à des questions fondamentales de la physique

# L'astronomie au cours de l'histoire

L'origine de l'astronomie remonte à l'époque préhistorique.  
Elle a principalement consisté à l'observation du ciel à l'oeil nu.

Événements marquants : les Perséides, 12 août 2016: plus de 200 météores/h provenant de la comète Swift-Tuttle.



Naviguation des polynésiens grâce aux étoiles.

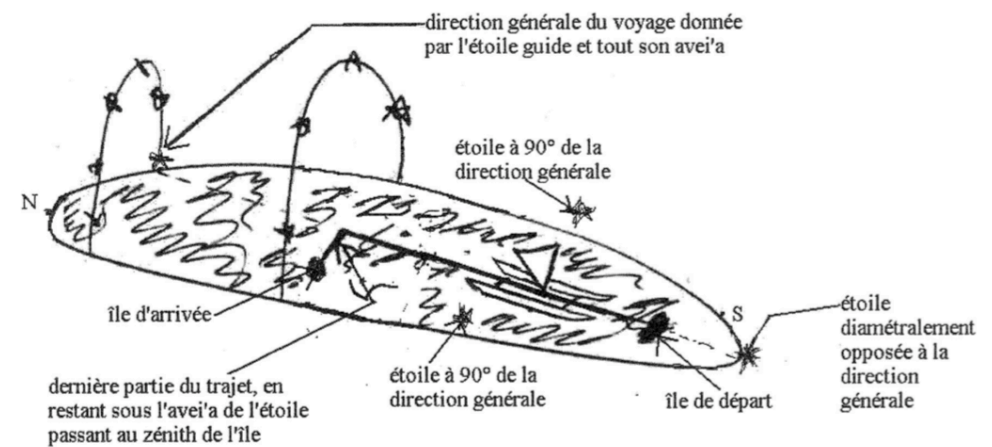


FIG. 4. — Voyage en « pique à uru ».

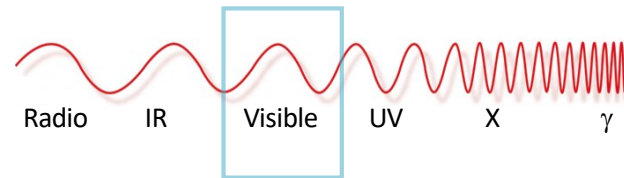
Peteuil, journal de la société des océanistes 116, 13 (2003)

1608, première lunette astronomique d'Hans Lippershey (perfectionnée en 1609 par Galilée) a bouleversé l'astronomie (géocentrisme/héliocentrisme). Imperfections de la lune, satellites de Jupiter, etc...

1865, Robert Bunsen et Gustav Kirchhoff effectuent la spectroscopie du soleil pour la première fois, ce qui permit la détermination de sa composition chimique.

# Au delà du spectre visible

Le spectre visible représente un gamme de longueurs d'onde très réduite :

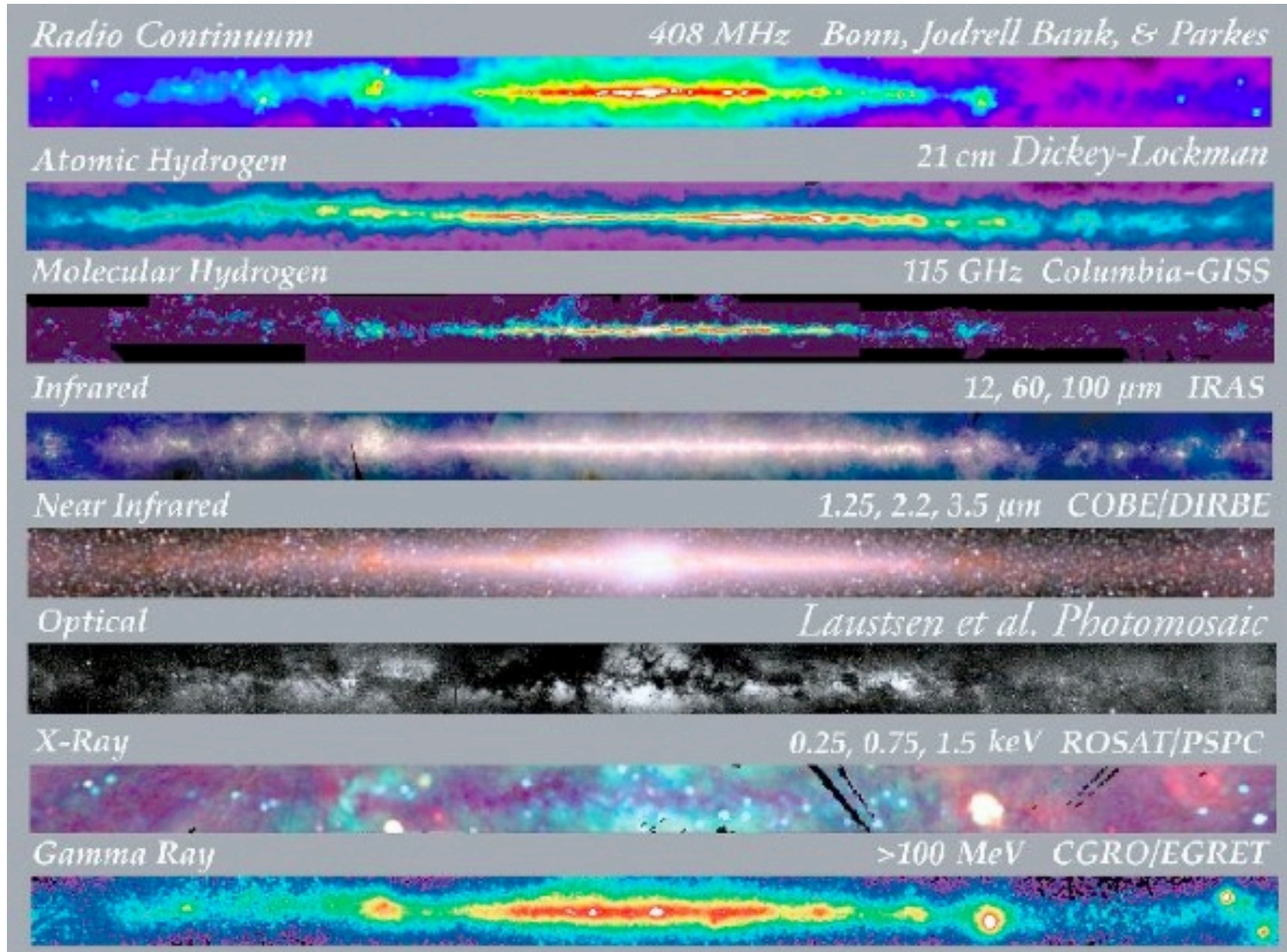


La voie lactée apparaît très clairement dans le domaine du proche infra-rouge :



**Que voit-on dans le domaine des autres longueurs d'onde ?**

# Observation multi-longueurs d'ondes

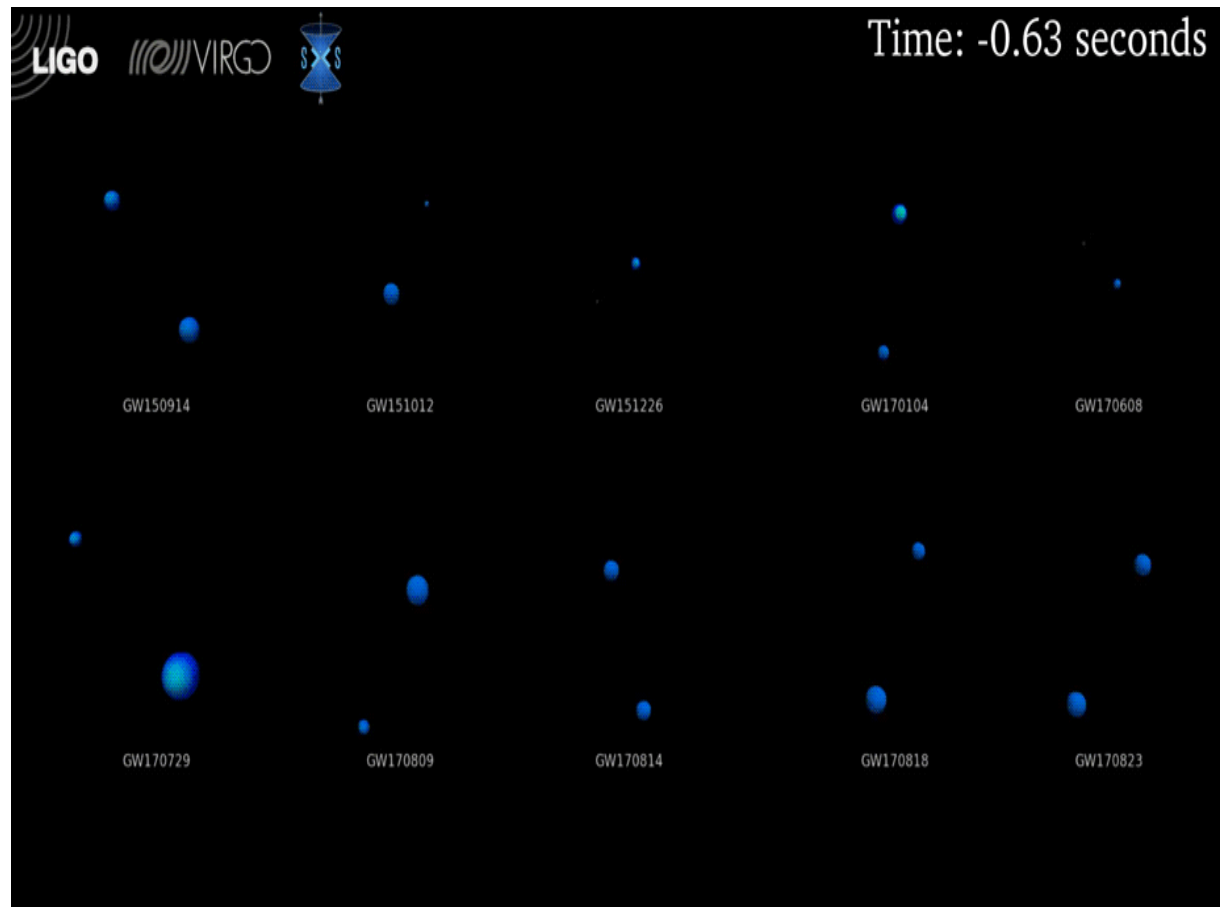


# Ondes gravitationnelles: une nouvelle astronomie

À la recherche de murmures aux confins de l'espace

1- Un tour de force instrumental, 100 ans après leur prédiction.

2- Une nouvelle fenêtre sur l'univers, porteuse de nouveaux résultats pour la physique et l'astrophysique.



Visualizations of the 10 black hole collisions detected by LIGO so far, along with the gravitational-wave signals they produced.

[Teresita Ramirez, Geoffrey Lovelace, SXS Collaboration, and LIGO Virgo Collaboration](#)

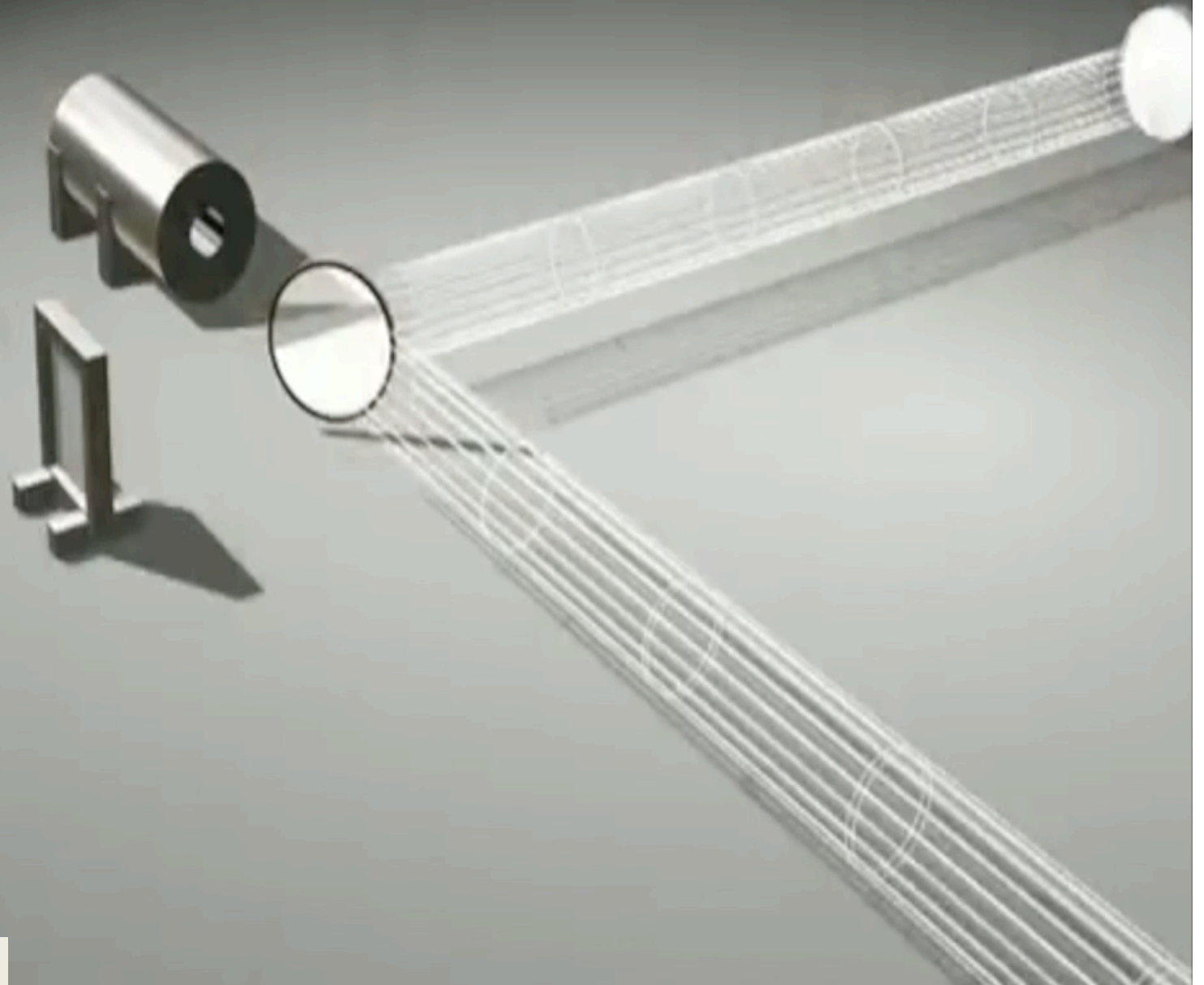
## Vue aérienne d'un interféromètre (LIGO Livingston et Hanford)



# Vue aérienne d'un interféromètre (Virgo, Toscane)



# Principe de fonctionnement des interféromètres Virgo et LIGO





# 14 septembre 2015: la première détection d'OG issues de la coalescence de 2 trous noirs

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  $410_{-180}^{+160}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$  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.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

+ 3000 citations

Prix Nobel 2017: Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne.



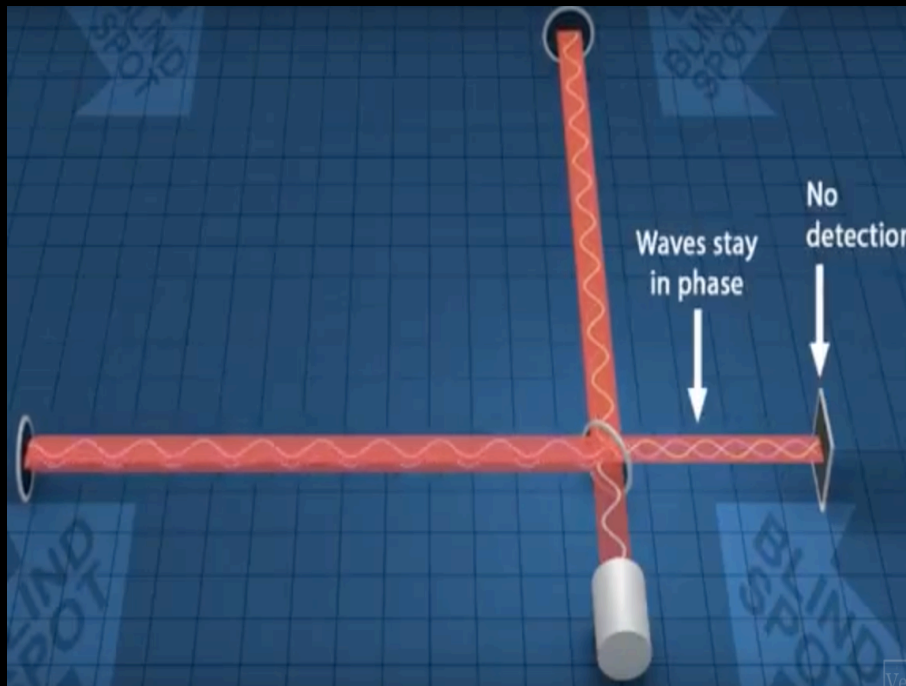
Retentissement mondial.

Prouesse technique d'une  
mesure d'extrême précision  
équivalente à  
1/1000 diamètre du proton ( $10^{-18}$ m).

Février 2016: publication des  
résultats et conférence de  
presse

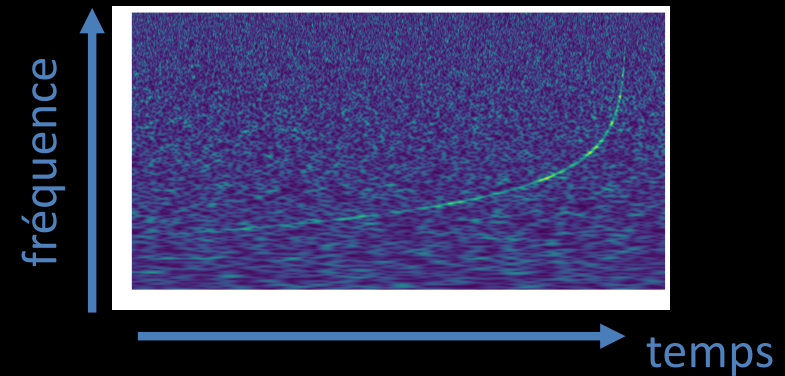
[https://www.youtube.com/watch?v=mtL  
PKYI4AHs](https://www.youtube.com/watch?v=mtLPKYI4AHs)

# La detection d'une onde gravitationnelle (OG)

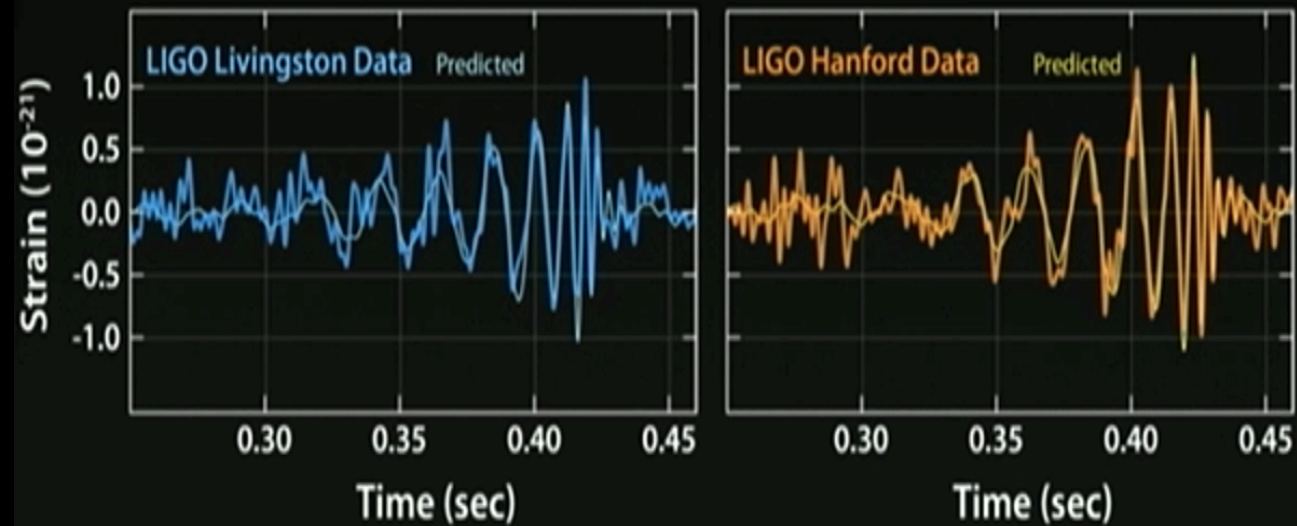


Quand une OG secoue l'interféromètre

→ un gasouillement (chirp)!



Le signal comparé au modèle



Jusqu'à présent nous regardions l'univers, maintenant nous pouvons l'entendre murmurer!

<https://youtu.be/SQbaLLipiY>

J. Margueron, IP2I Lyon, [GdR RESANET](#)

# Polémique sur la 1ere découverte d'OG

**NewScientist**

FEATURE 31 October 2018

## Exclusive: Grave doubts over LIGO's discovery of gravitational waves

The news we had finally found ripples in space-time reverberated around the world in 2015. Now it seems they might have been an illusion

DAILY NEWS 2 November 2018

## LIGO to publish new paper in wake of New Scientist investigation

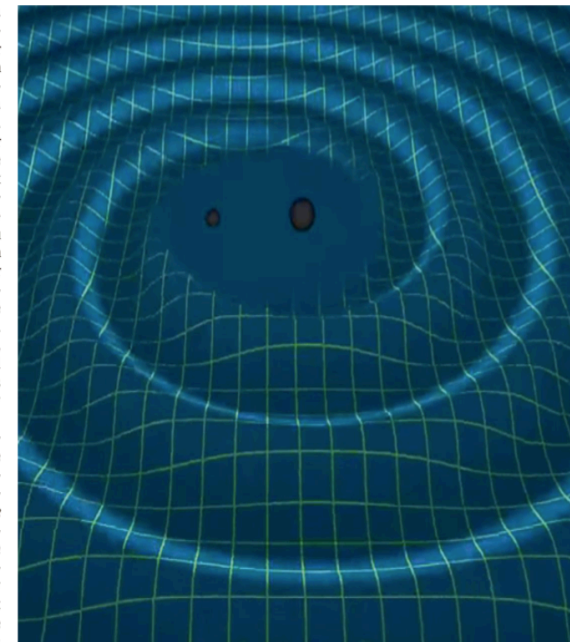
Le Monde, 28 novembre 2018

## Fritures sur les ondes gravitationnelles

ASTROPHYSIQUE - Leur détection en 2015 a débouché sur un Nobel. Mais certains doutent que les détecteurs LIGO et Virgo aient bien capté ces déformations de l'espace-temps

Le 16 février 2016, la planète a été secouée par une annonce sensationnelle. Pour la première fois, des ondes d'un nouveau genre avaient été détectées sur Terre, conséquences de la fusion entre deux trous noirs. L'observation elle-même, par deux instruments jumeaux de l'expérience LIGO installés aux Etats-Unis, date du 14 septembre 2015 : le sursaut des « aiguilles » des deux détecteurs de l'ordre du millième du diamètre d'un proton a été suffisant pour affirmer qu'une onde, dite « gravitationnelle », prévue par la relativité d'Einstein, avait traversé la Terre. Le retentissement est mondial et, dès l'année suivante, le prix Nobel est accordé aux pionniers de ces expériences, Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne.

Le 3 novembre, nouvelle secousse, un article du magazine *New Scientist* titré « Adieu les ondes ? » détaille des doutes sur l'annonce de 2016. « Nous pensons que LIGO a échoué à apporter des preuves suffisantes de la détection d'une quelconque onde gravitationnelle », y explique Andrew Jackson, chercheur à l'Institut Niels Bohr (INB) de Copenhague (Danemark). Au *Monde*, il précise : « Il y a une sorte de signal dans les



Simulation de la fusion de deux trous noirs qui engendre des ondes gravitationnelles. LIGO/PLE

# Relativité sur la 1ère découverte d'OG

## Questionnement de la fig.1 du PRL par une équipe du Niels Bohr Institute

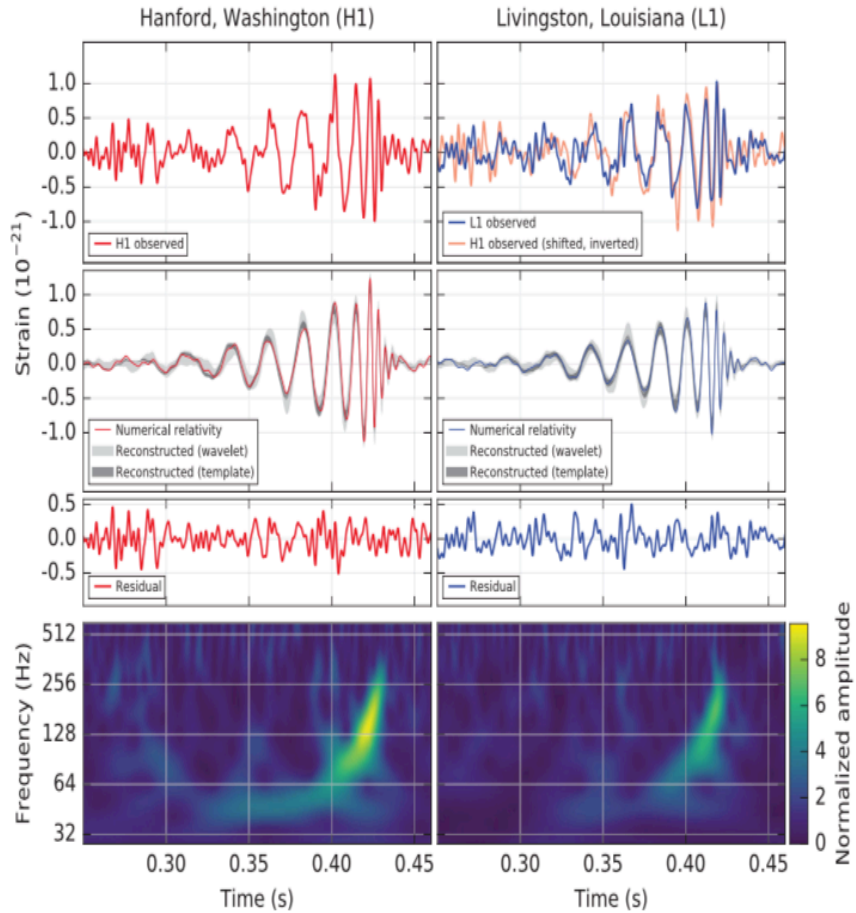


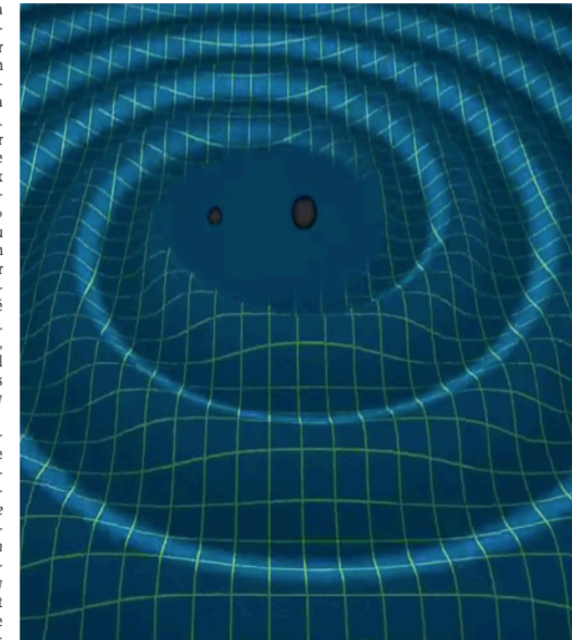
FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress large fluctuations outside the detectors' most sensitive frequency band, and band-reject filters to remove the strong instrumental spectral lines seen in the Fig. 3 spectra. *Top row, left:* H1 strain. GW150914 arrived first at L1 and  $6.9^{+0.5}_{-0.4}$  ms later at H1; for a visual comparison, the H1 data are also shown, shifted in time by this amount and inverted (to account for the detectors' relative orientations). *Second row:* Gravitational-wave strain projected onto each detector in the 35–350 Hz band. Solid lines show a numerical relativity waveform for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914 [37,38] confirmed to 99.9% by an independent calculation based on [15]. Shaded areas show 90% credible regions for two independent waveform reconstructions. One (dark gray) models the signal using binary black hole template waveforms [39]. The other (light gray) does not use an astrophysical model, but instead calculates the strain signal as a linear combination of sine-Gaussian wavelets [40,41]. These reconstructions have a 94% overlap, as shown in [39]. *Third row:* Residuals after subtracting the filtered numerical relativity waveform from the filtered detector time series. *Bottom row:* A time-frequency representation [42] of the increasing over time.

Le Monde, 28 novembre 2018

## Écritures sur les ondes gravitationnelles

ASTROPHYSIQUE - Leur détection en 2015 a débouché sur un Nobel. Mais certains doutent que les détecteurs LIGO et Virgo aient bien capté ces déformations de l'espace-temps

Le 16 février 2016, la planète a été secouée par une annonce sensationnelle. Pour la première fois, des ondes d'un nouveau genre avaient été détectées sur Terre, conséquences de la collision entre deux trous noirs. L'observation elle-même, par deux instruments jumeaux de l'expérience LIGO installés aux États-Unis, date du 14 septembre 2015 : le sursaut des « aiguilles » des deux détecteurs de l'ordre du millième du diamètre d'un proton a été suffisant pour affirmer l'existence d'une onde, dite « gravitationnelle », prévue par la relativité d'Einstein, qui avait traversé la Terre. Le retentissement est mondial et, l'année suivante, le prix Nobel a été accordé aux pionniers de ces expériences, Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne. Le 3 novembre, nouvelle semaine, un article du magazine *New Scientist* intitulé « Adieu les ondes ? » détaille des doutes sur l'annonce de 2016. « Nous pensons que LIGO a échoué à apporter des preuves suffisantes de la détection de quelque onde gravitationnelle », y explique Andrew Jackson, chercheur à l'Institut Niels Bohr (INB) de Copenhague (Danemark). Au *Monde*, il précise : « Il y a une sorte de signal dans les



Simulation de la fusion de deux trous noirs qui engendre des ondes gravitationnelles. LIGO/P. FLE

NewScientist

FEATURE 31 October 2015

Exclusif  
discover

The news we had  
2015. Now it seems

DAILY NEWS 2 November 2015

LIGO to  
of New

# Belémminique sur la 1ère découverte d'OG

## Questionnement de la fig.1 du PRL par une équipe du Niels Bohr Institute

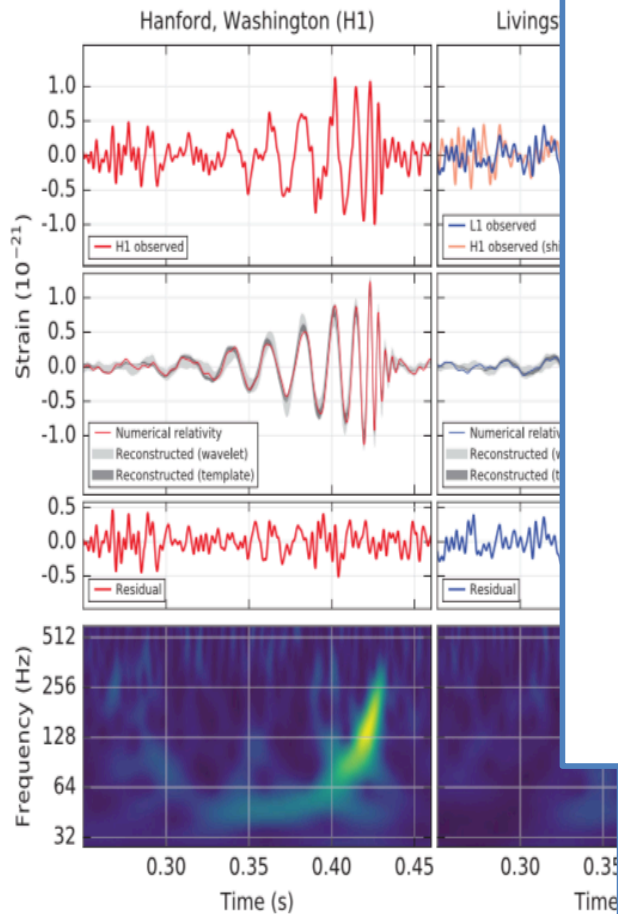
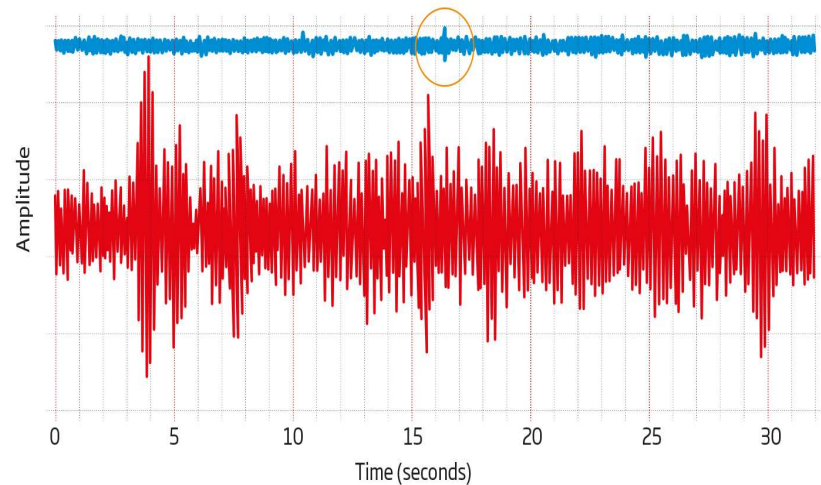


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress large fluctuations outside the detectors' most sensitive frequency bands. The L1 data are inverted (to account for the detectors' relative orientations). *Top row, left:* GW150914 arrived first at L1 and  $6.9^{+0.5}_{-0.4}$  ms later at H1; for a visual comparison, the H1 data are inverted (to account for the detectors' relative orientations). *Second row:* Gravitational-wave detector in the 35–350 Hz band. Solid lines show a numerical relativity waveform for a system recovered from GW150914 [37,38] confirmed to 99.9% by an independent calculation based on regions for two independent waveform reconstructions. One (dark gray) models the signal using numerical relativity [39]. The other (light gray) does not use an astrophysical model, but instead calculates the strain using sine-Gaussian wavelets [40,41]. These reconstructions have a 94% overlap, as shown in [39]. *Third row:* The filtered numerical relativity waveform from the filtered detector time series. *Bottom row:* A time-frequency spectrogram of the strain signal, showing the characteristic chirp of the gravitational wave.

## Une question de bruit!

### Cutting through the noise

The gravitational wave observed in September 2015 is obscured by noise in the raw signal from LIGO's Livingston detector. It is **only visible** in the **cleaned-up plot**, where irrelevant frequencies have been removed and the scale is magnified 100 times



SOURCE: arXiv:1705.04191

La collaboration LIGO-Virgo a reconnu les problèmes et le défaut d'information des articles.

**Conclusion: les contre-analyses ne sont pas de nature à remettre en question de l'observation de 2016, ni des suivantes.**

NewScientist

FEATURE 31 October 2015

Exclusive discovery

The news we had in 2015. Now it seems

DAILY NEWS 2 November 2015

LIGO today of New

# 17 août 2017: première detection de la coalescence de deux étoiles à neutrons (GW170817)

Abbott et al., PRL 119, 161101 (2017)

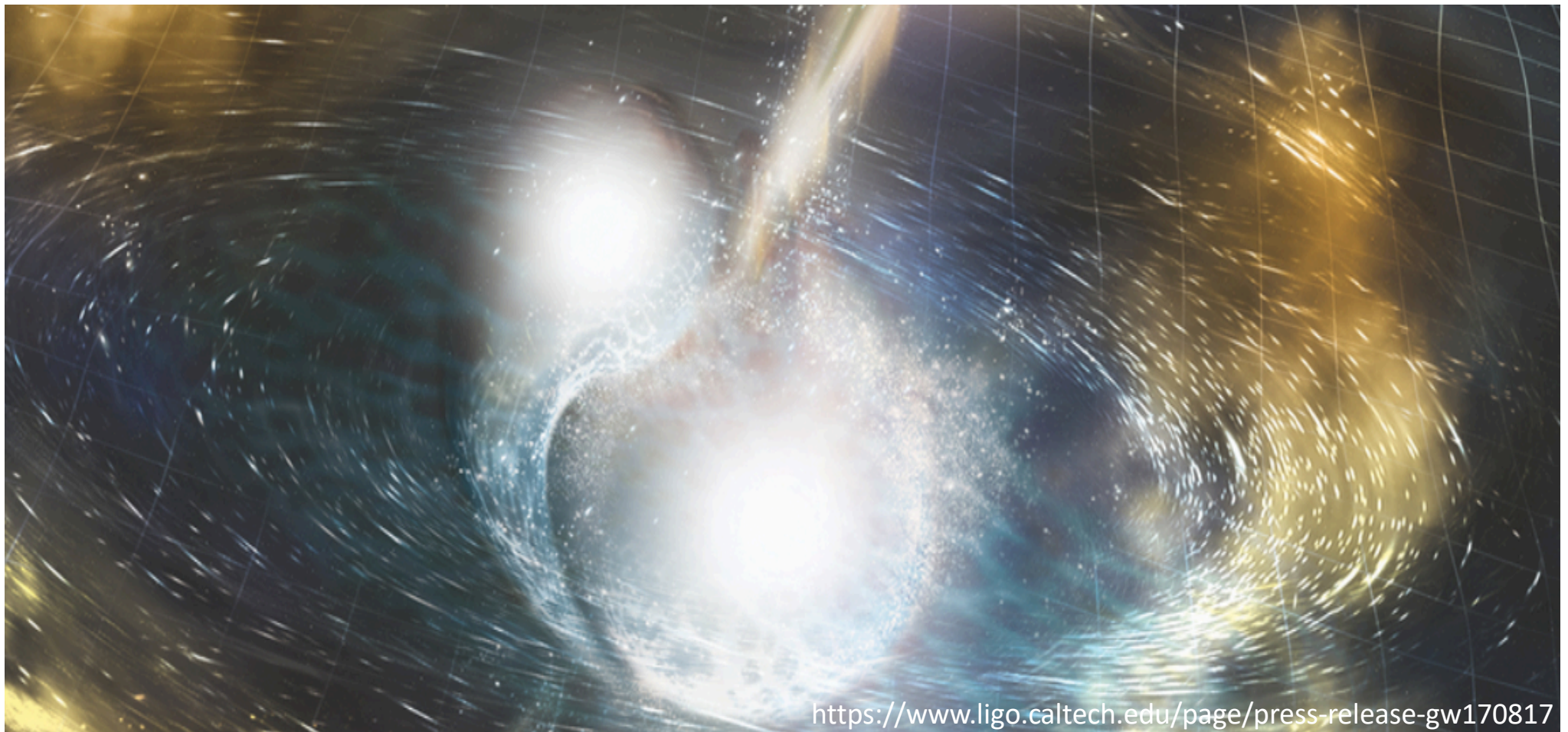
+ 1000 citations

Octobre 2017: publication des résultats et conférence de presse

<https://www.youtube.com/watch?v=mtLPKYI4AHs&t=105s>

Décembre 2017: Conférence de presse JINA-CEE

<https://www.youtube.com/watch?v=CxxmaLx-4e0>



<https://www.ligo.caltech.edu/page/press-release-gw170817>

*Cataclysmic Collision Artist's illustration of two merging neutron stars. The rippling space-time grid represents gravitational waves that travel out from the collision, while the narrow beams show the bursts of gamma rays that are shot out just seconds after the gravitational waves. Swirling clouds of material ejected from the merging stars are also*

FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN  
GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

# La naissance de l'astronomie multi-message



# L'astronomie multi-messagers

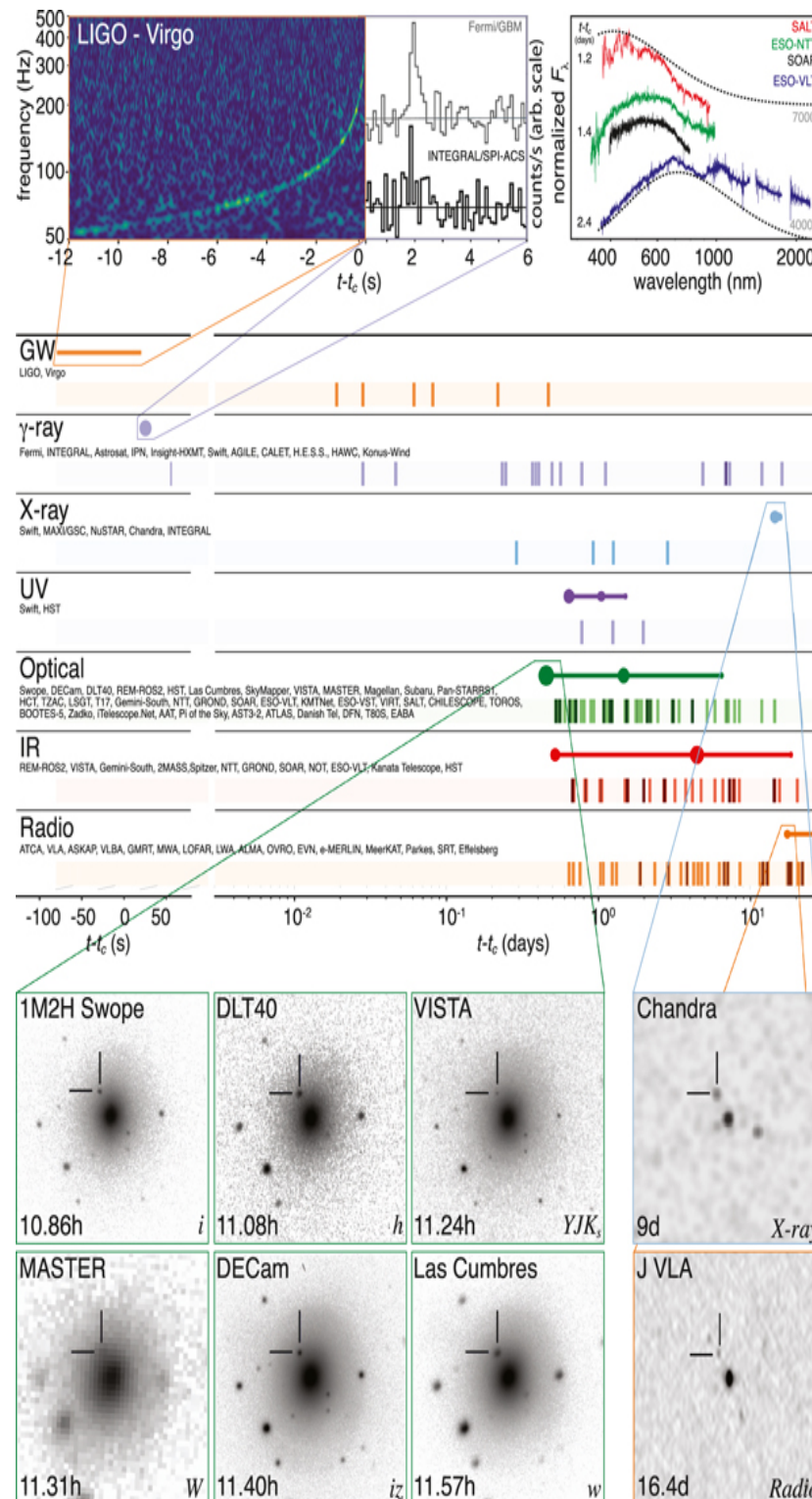
Abbott et al., ApJL 848 (2017) L12

+ 70 instruments  
Several weeks

Multi-messagers:

- GW (interferometers)
- GRB, X (satellites)
- UV, Optical, IR (telescopes)
- Radio (radio-telescopes)

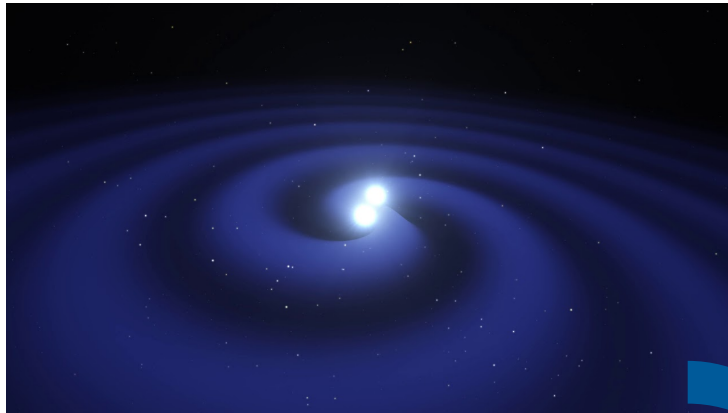
59-page "letter" (!)  
More than 2000 authors,  
~70 collaborations  
+500 citations



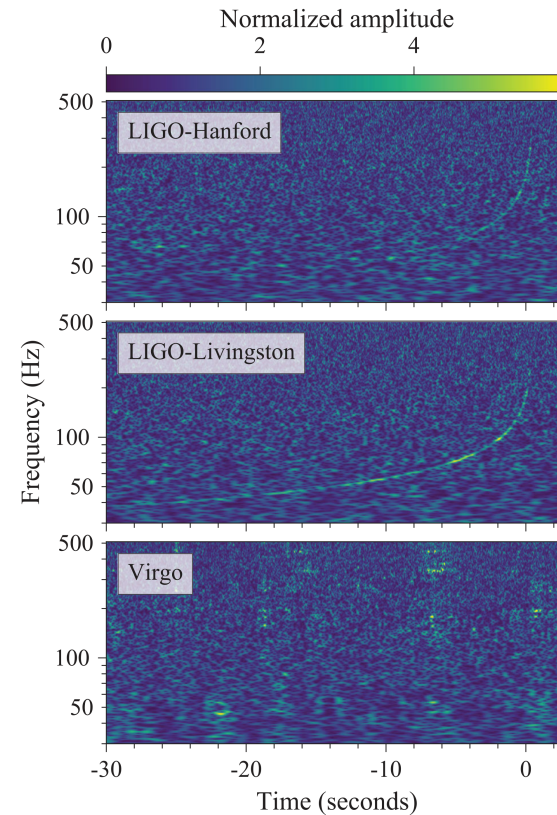


# Kilonova: liens entre observation, simulation et données nucléaires

Dernières orbites durant la coalescence



Signal OG



Déformation de marée



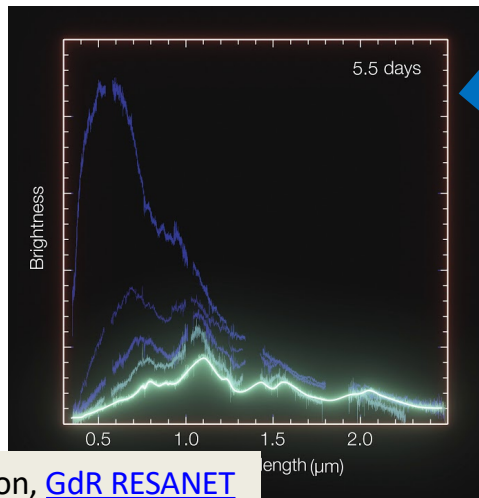
Contrainte sur le **rayon/masse** des EN

Fusion: objet compact + éjecta



Signal OG post-merger

Observation EM (téléscope)



Modélisation hydrodynamique + ingrédients nucléaire-hadronique

Apporte des contraintes sur:

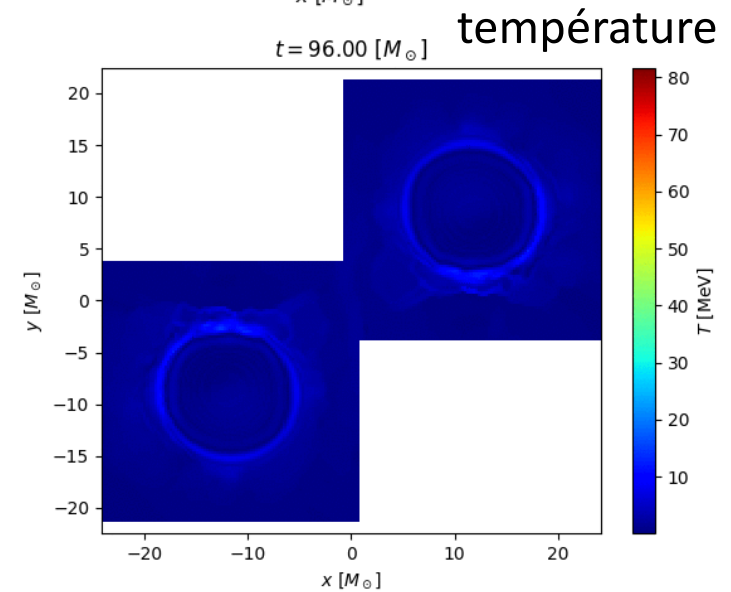
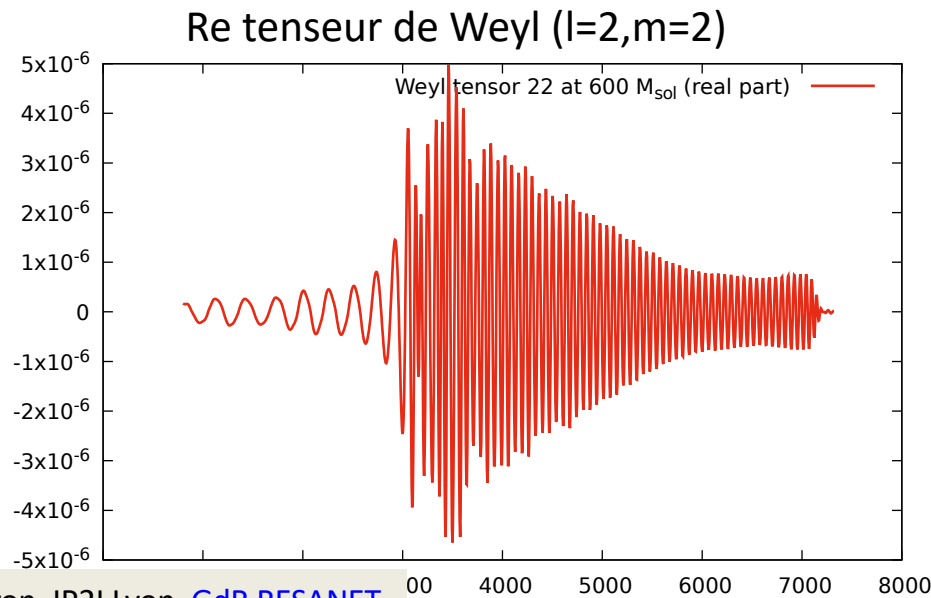
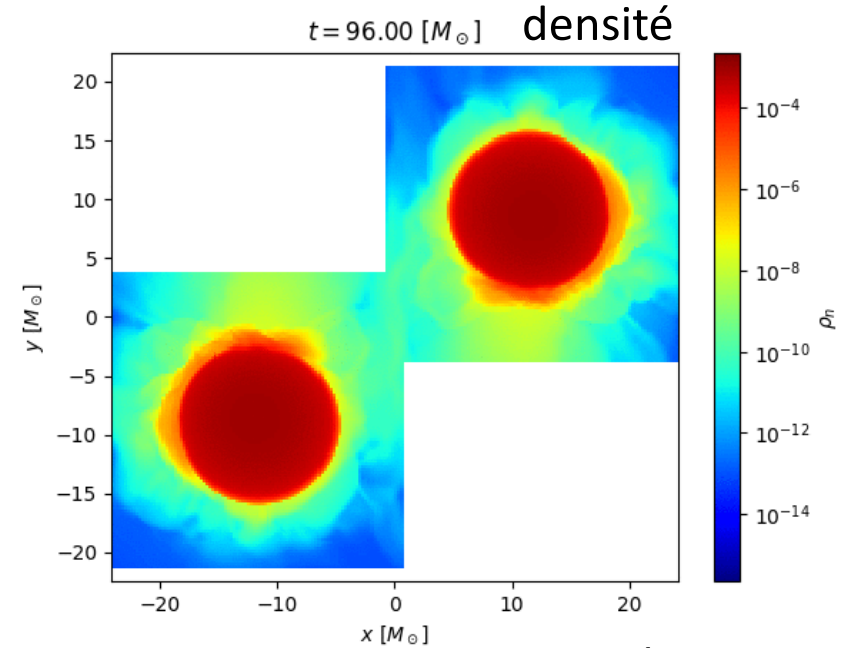
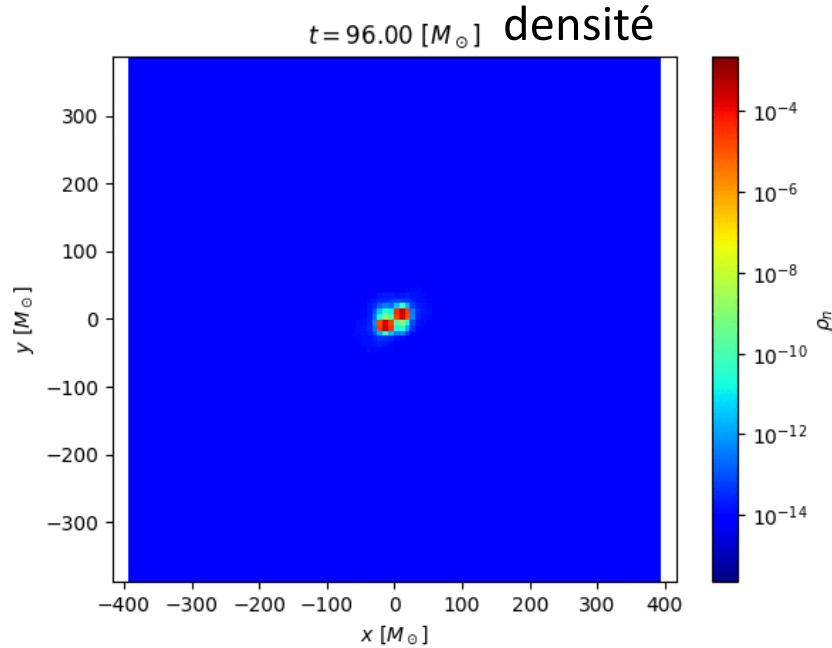
- La **nucléosynthèse** des éléments lourds
- La force de la collision + propriétés de l'EN supra-massive  
→ **équation d'état** de la matière dense

# Premières simulations de coalescence d'étoiles à neutrons à l'IPNL

Code D. Radice (Univ. Princeton)

EoS LS220, taux d'interaction neutrinos tabulés.

Calculateur DIRAC (lyosrv047), 100 CPU pendant 10 jours.

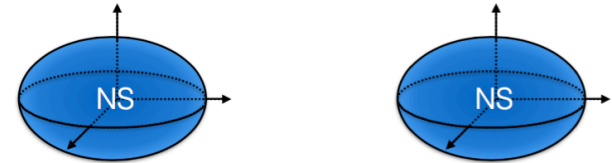


# Neutron star matter and inspiral GW signal

## Tidal deformability

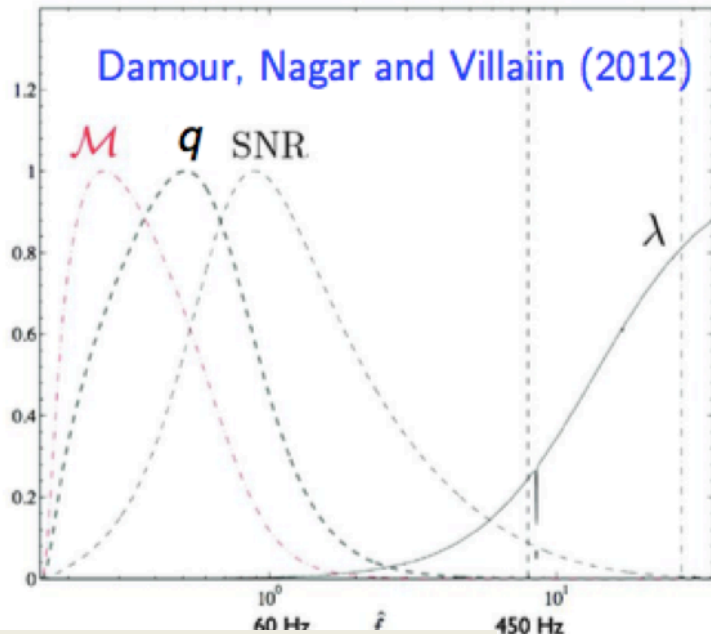
$$Q_{ij} = -\Lambda(\text{EOS}, m)m^5 \mathcal{E}_{ij}$$

- Tidal field  $E_{ij}$  from companion star induces a quadrupole moment  $Q_{ij}$  in the NS
- Amount of deformation depends on the stiffness of EOS via the tidal deformability  $\Lambda$ .

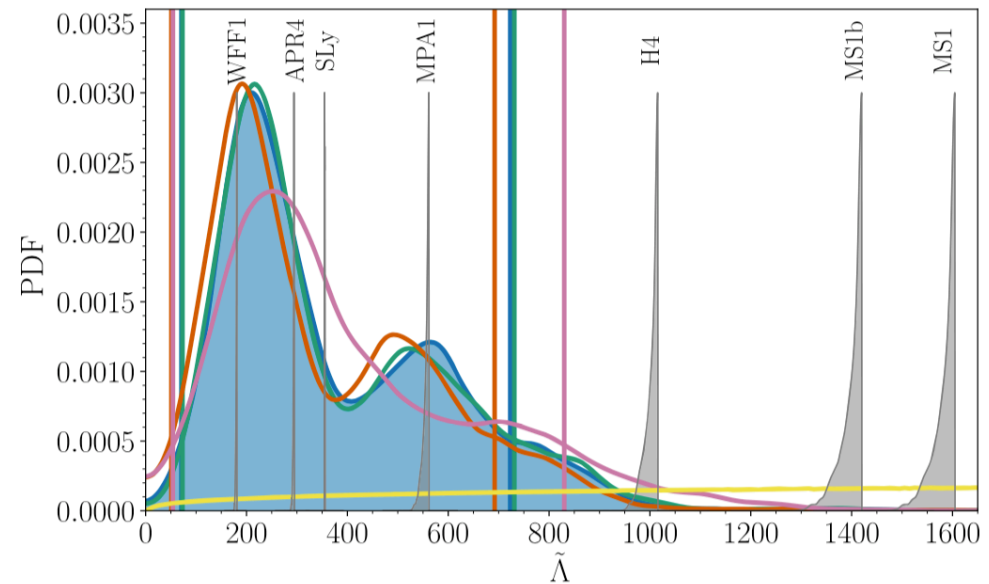


Post-Newtonian expansion of the waveform:  
Tidal effect enters at 5<sup>th</sup> order

Hinderer+ 2008, Blanchet, Damour



LVC, Phys. Rev. X 9, 011001 (2019)

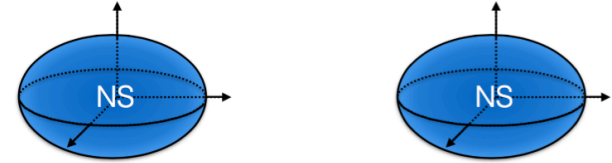


**GW170817  $\rightarrow 70 \leq \Lambda \leq 720$  (90% CL)**

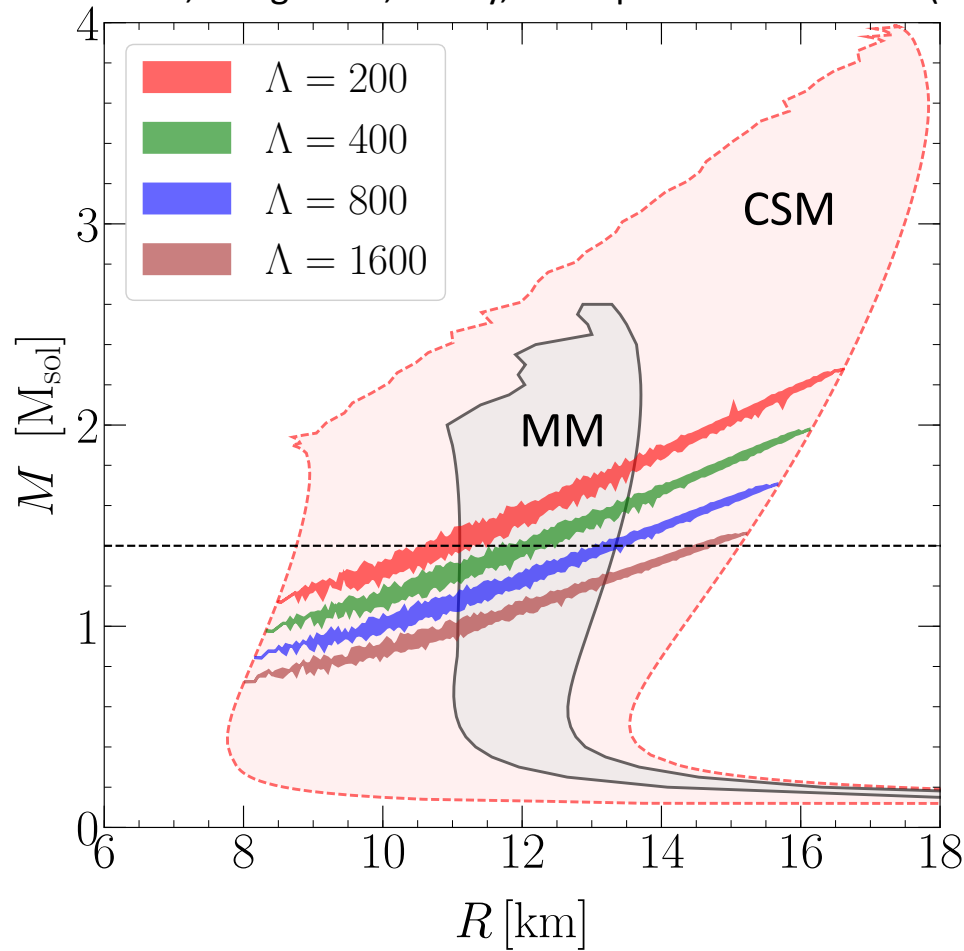
# Neutron star matter and inspiral GW signal

## Tidal deformability

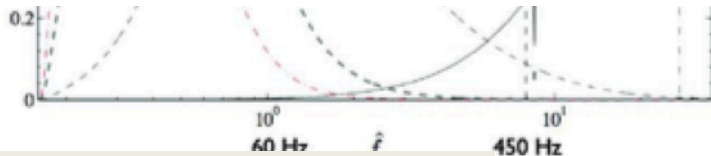
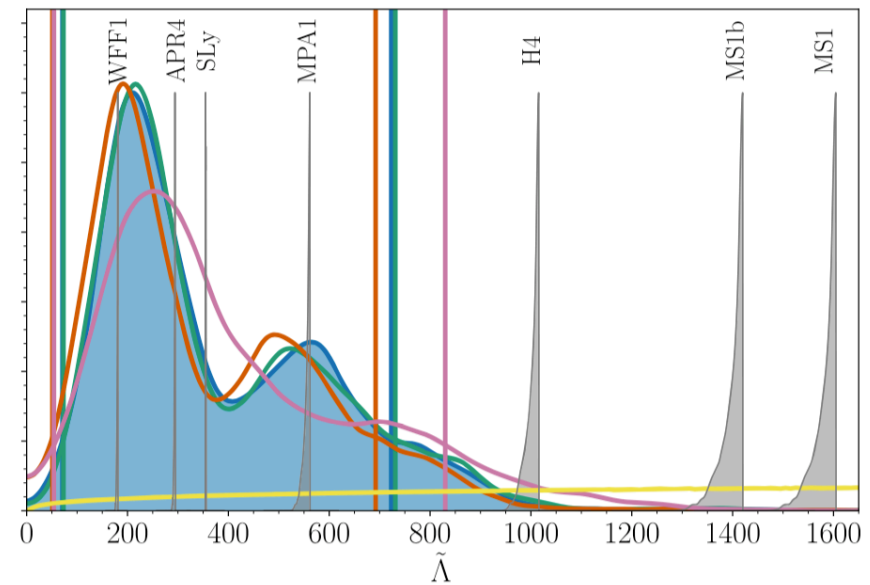
$$Q_{ij} = -\Lambda(\text{EOS}, m)^5 \mathcal{E}_{ij}$$



Tews, Margueron, Reddy, EPJA special issue on GW (2019)



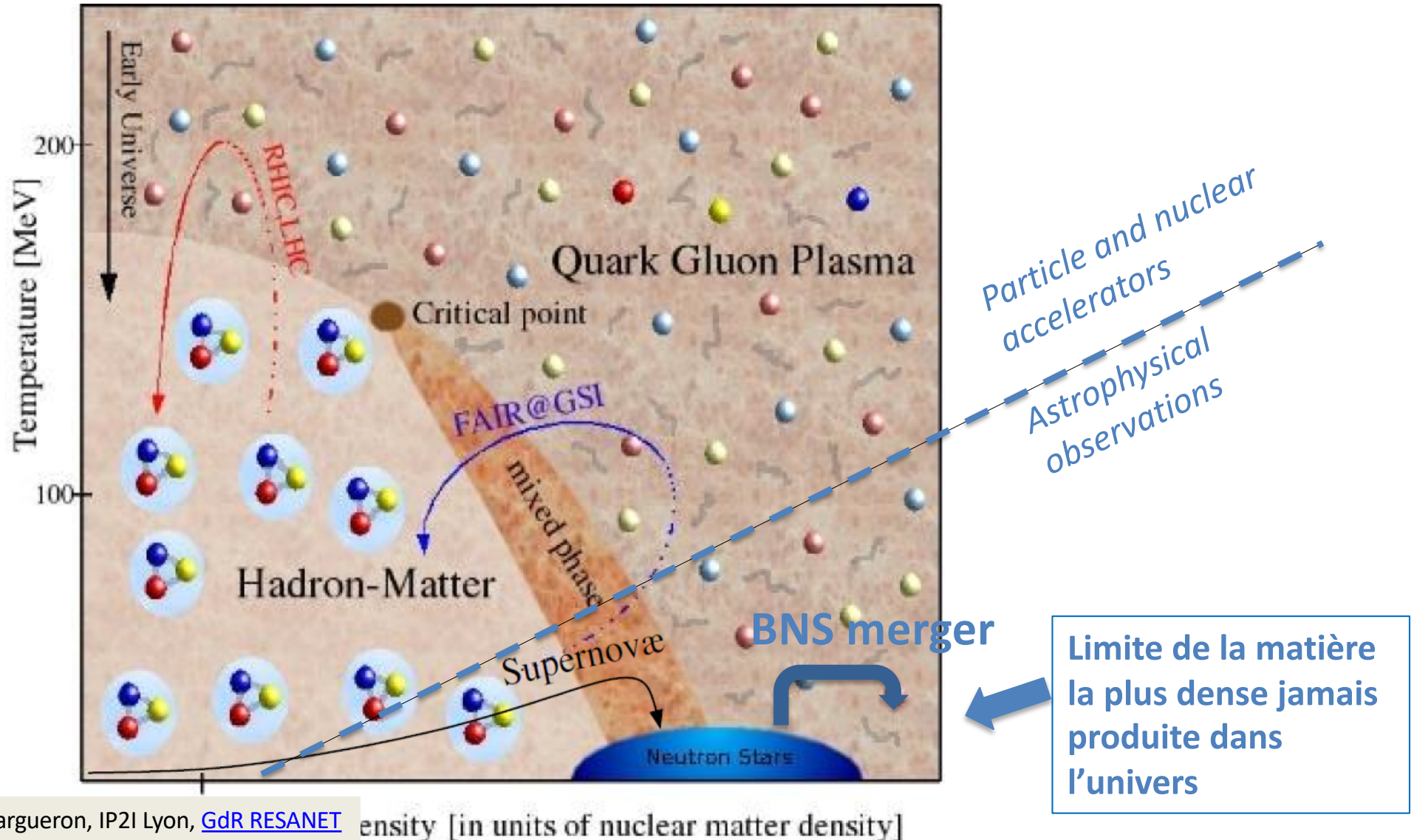
LVC, Phys. Rev. X 9, 011001 (2019)



**GW170817  $\rightarrow 70 \leq \Lambda \leq 720$  (90% CL)**

# Un nouveau graal pour l'exploration de la matière dense

## Diagramme de phase de QCD (physique fondamentale)



# Conclusions

- Les ondes gravitationnelles viennent d'être découvertes (2015), un siècle après leur prédiction par Einstein.
- C'est un outil fantastique pour étudier les phénomènes cataclysmiques qui étaient jusqu'à présent quasi-invisibles.
- Répercussions fondamentales pour :
  - L'étude des trous noirs.
  - L'étude des étoiles compactes (étoiles à neutrons, naines blanches).
  - La cosmologie: kilonovae comme chandelles standards, la matière noire, etc....

Et à l'avenir, de nouvelles découvertes sont attendues, de nouveaux détecteurs sont en construction.

LIGO-Virgo O3: 1 an d'acquisition de données, commence en mars 2019

Taux de détections attendus : 10 BBH/mois, 1 BNS/mois, 0.1 BHNS/mois, autres?

