

# Détection directe des ondes gravitationnelles

(de fréquence 10 Hz à 2 kHz)

Loïc Rolland



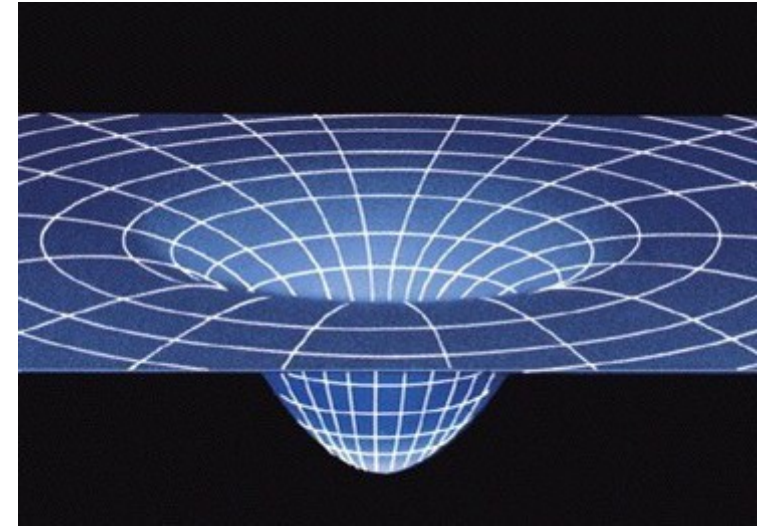
*Laboratoire d'Annecy de Physique des Particules*  
(<http://lapp.in2p3.fr/>)



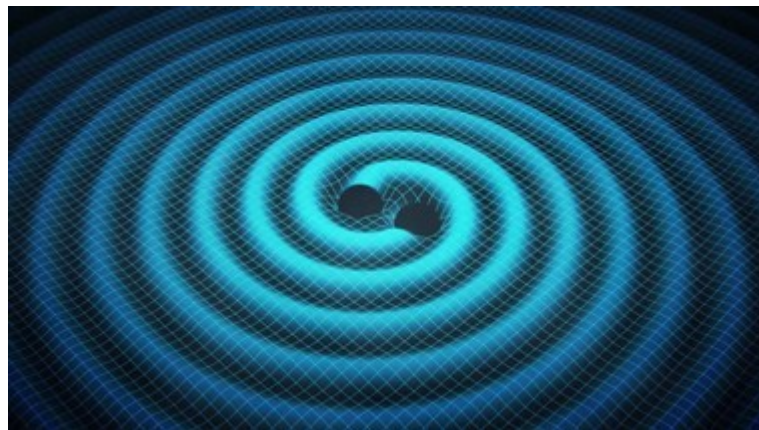
Site web de Virgo : <http://public.virgo-gw.eu/>  
Site web de LIGO : <http://www.ligo.org/>

# Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?

**Théorie de la Relativité Générale :**  
Gravité = déformation de l'espace-temps



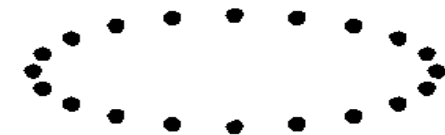
**Vue d'artiste d'une onde gravitationnelle**  
Propagation d'une perturbation de l'espace-temps



Onde transverse  
Deux polarisations  
Vitesse de propagation : c

**Effet « détectable »  
d'une onde gravitationnelle**

$$h = \frac{1}{2} \frac{\delta L}{L}$$





# Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

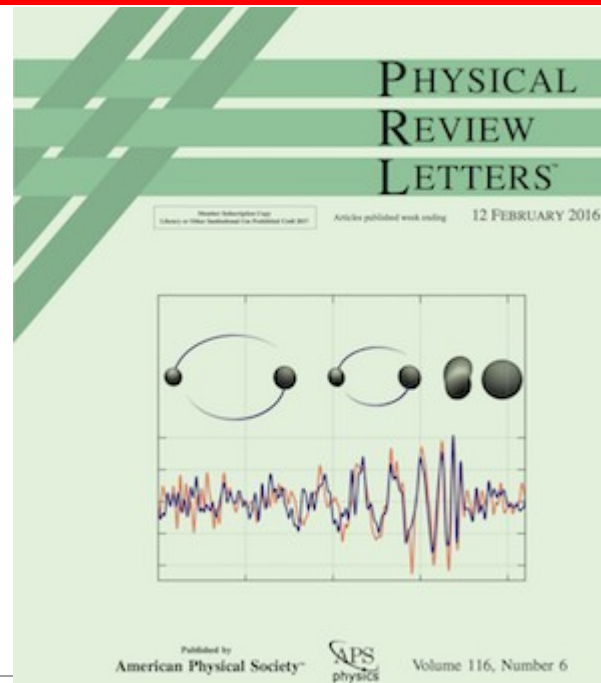
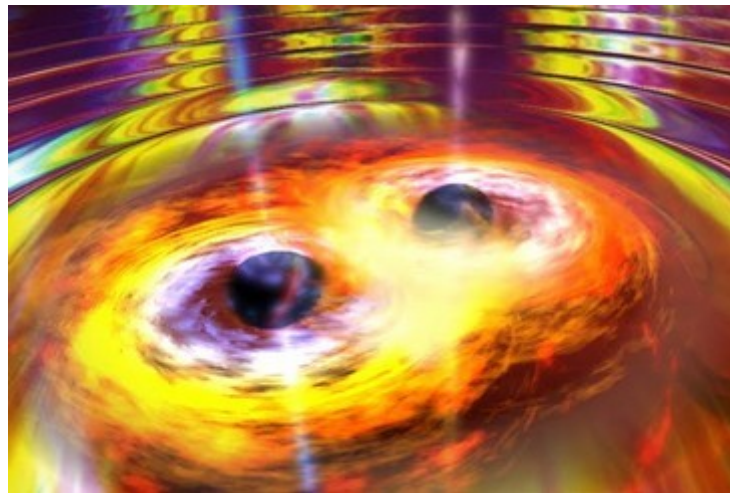
B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

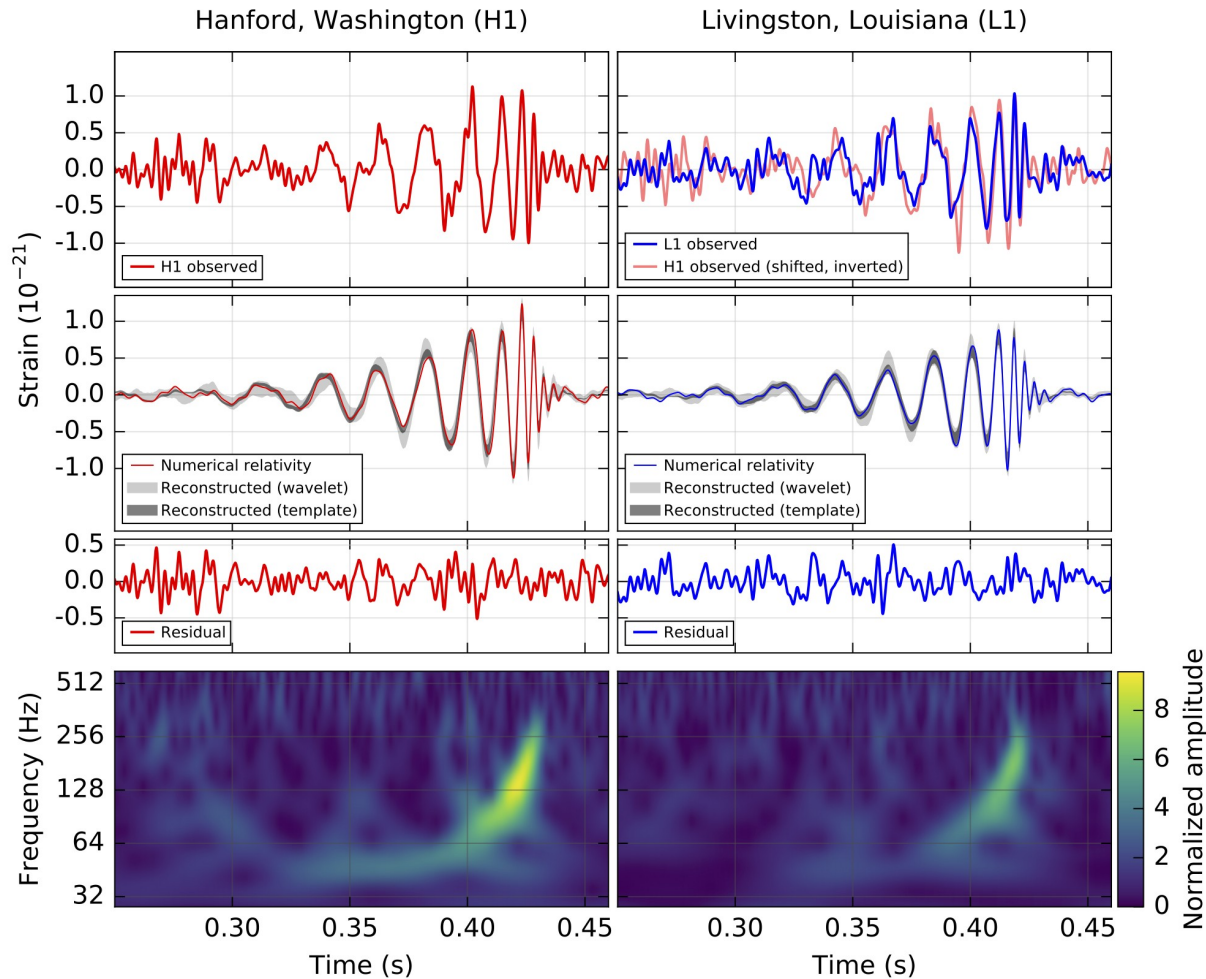
On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . 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.

Vue d'artiste



~1500 auteurs  
(chercheurs et ingénieurs)

# Première détection des ondes gravitationnelles (OG), 2015



14 Sept 2015, 9h50m45s UTC

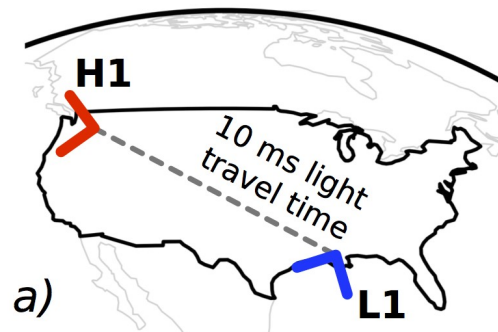
Vue dans les 2 détecteurs LIGO  
à 7 ms d'intervalle

Signal observable à partir de 30 Hz :  
durée **~200 ms**  
Nombre de cycles **~10**

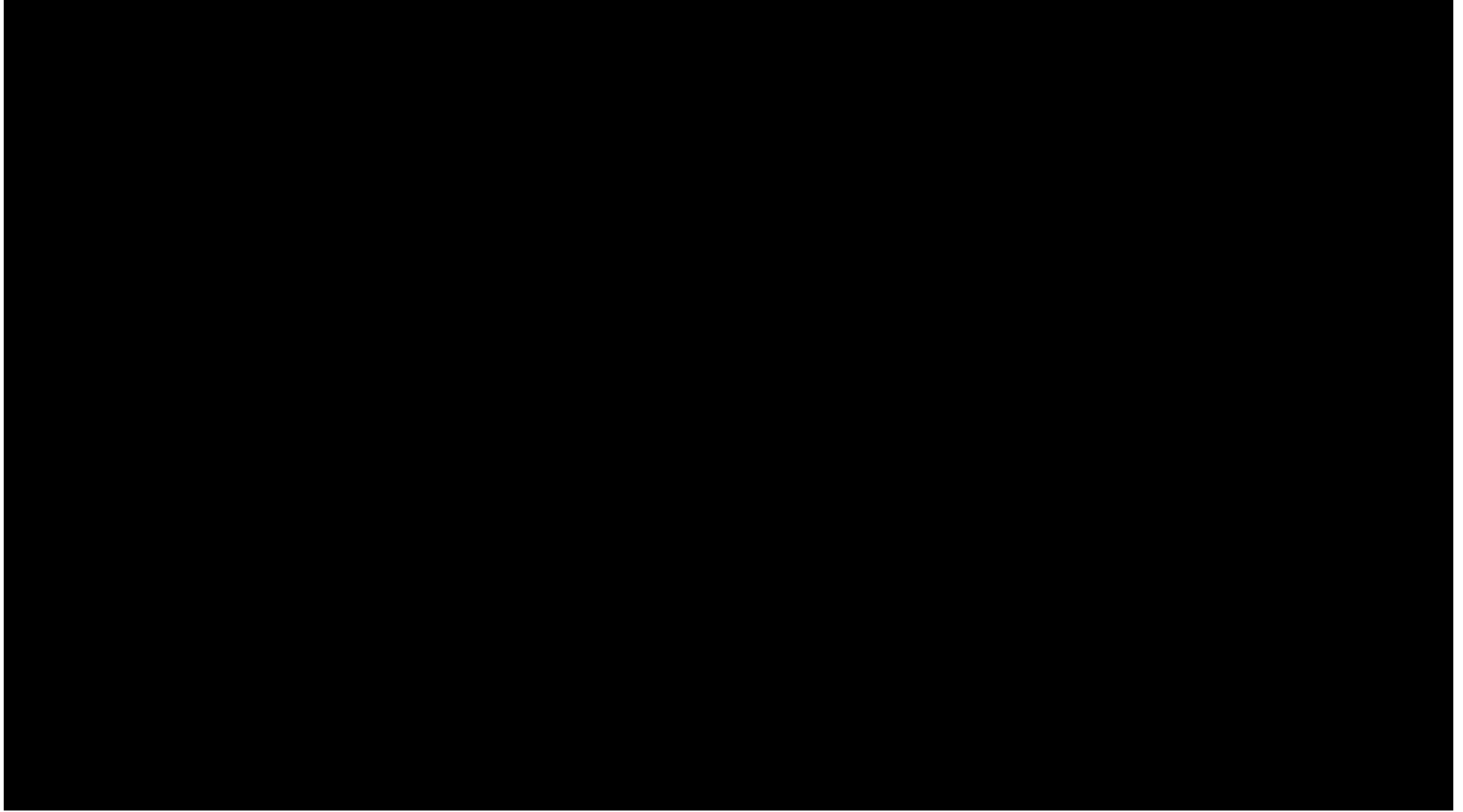
Amplitude au pic de l'onde :  **$1 \times 10^{-21}$**   
fréquence 150 Hz ( $\lambda \sim 2000$  km)

Rapport signal-sur-bruit : 24  
Taux de fausse alarme : **<1** en 200000 ans

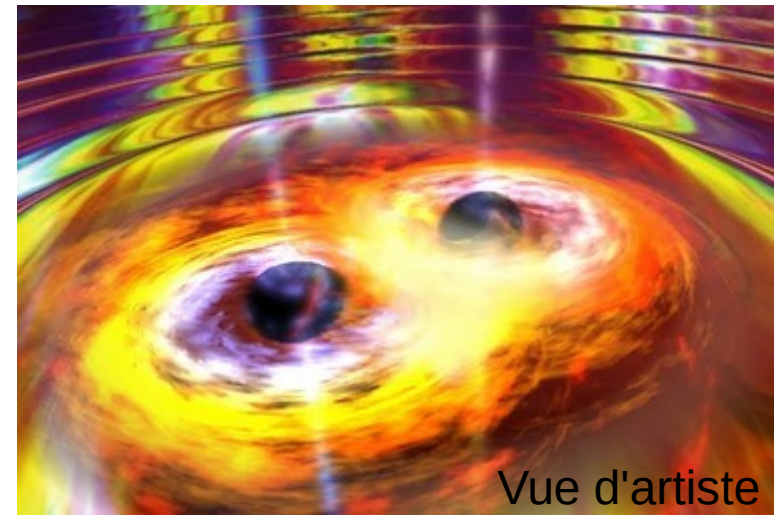
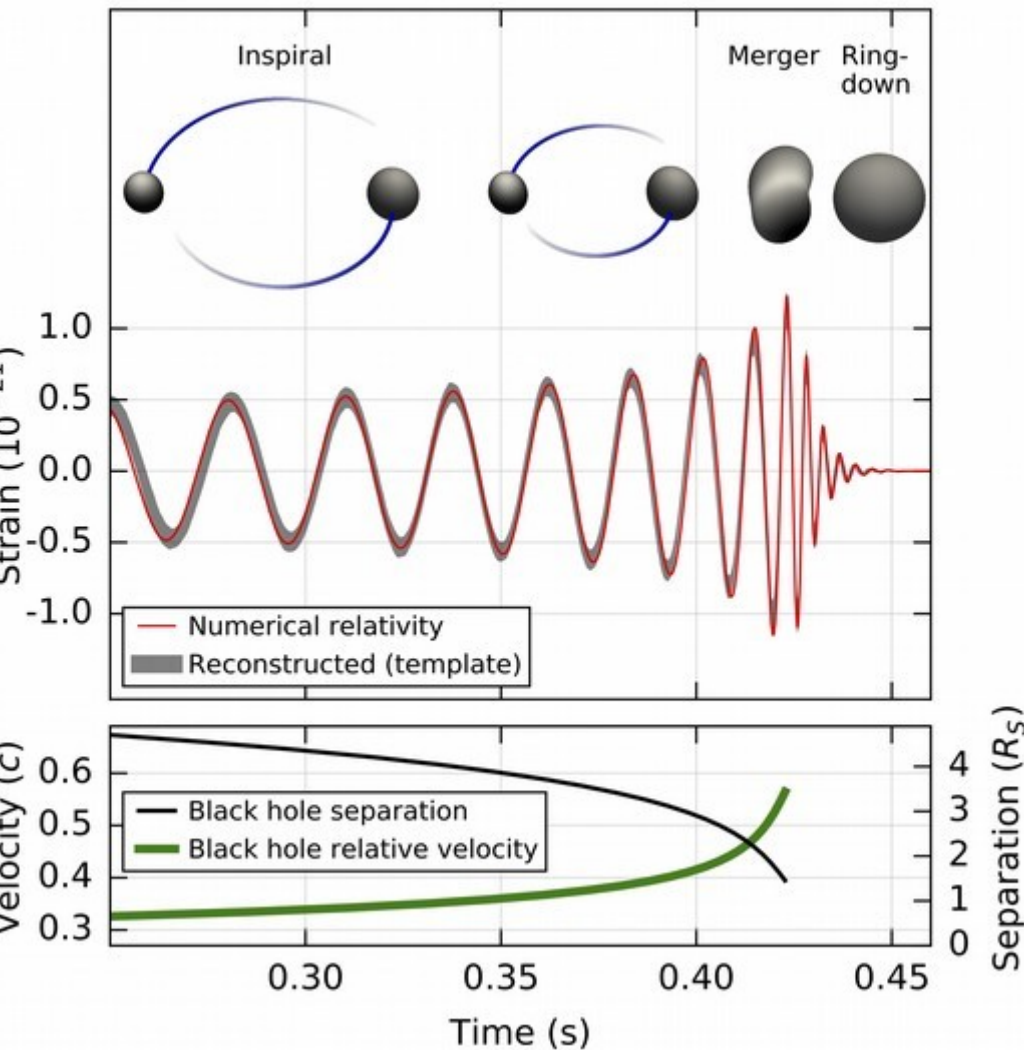
Les deux détecteurs LIGO  
aux États-Unis



# « Entendre » les ondes gravitationnelles !



# Première observation d'une fusion de deux trous noirs, 2015



## Trous noirs initiaux :

Masses :  $(36 \pm 5) M_{\odot}$  et  $(29 \pm 4) M_{\odot}$   
 Tournant jusqu'à 0,6 fois la vitesse de la lumière

## Trou noir final :

Masse :  $(62 \pm 4) M_{\odot}$   
 Spin  $\sim 70\%$  du maximum  
 Horizon  $\sim 180$  km

**Énergie rayonnée en OG :**  $(3.0 \pm 0.5) M_{\odot}$

**Distance :**  $(1,3 \pm 0,5) \times 10^9$  années-lumière



## GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

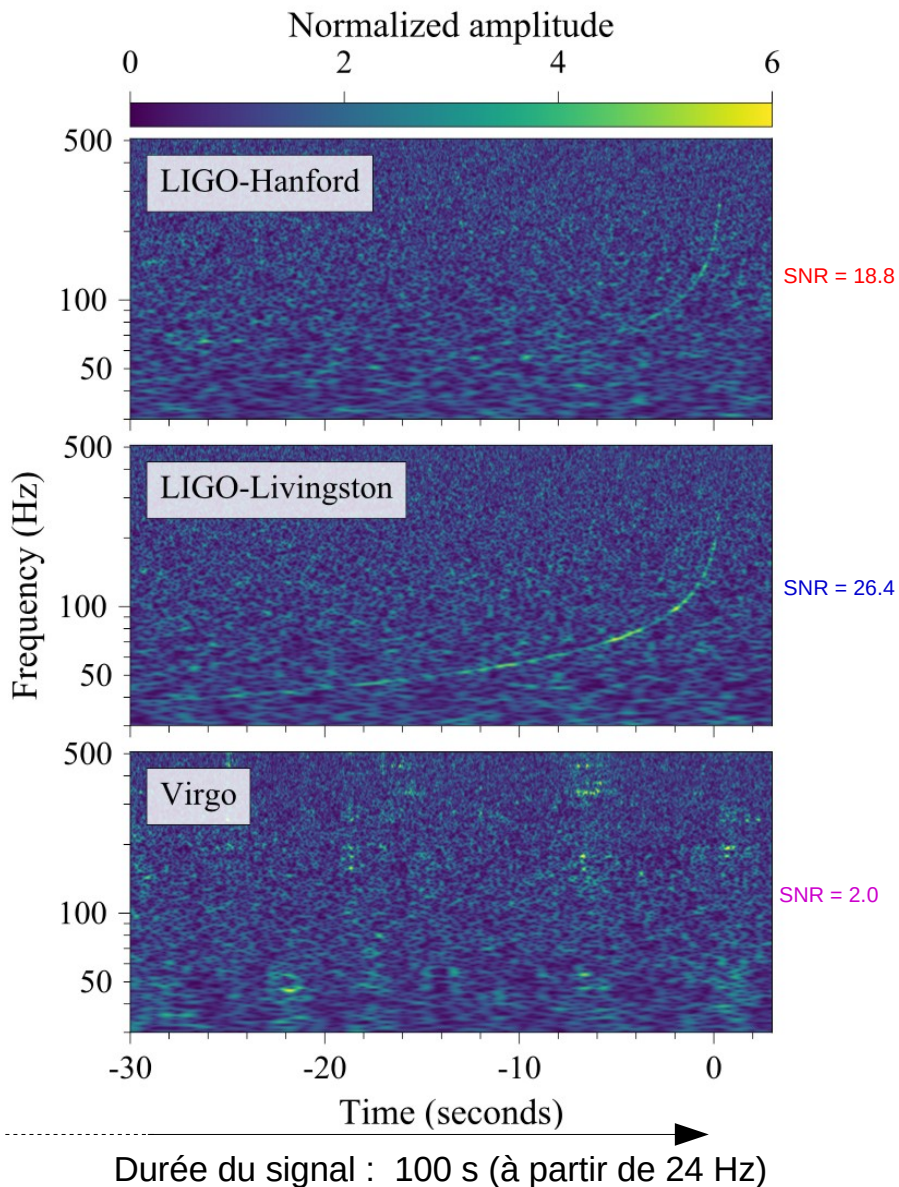
(Received 26 September 2017; revised manuscript received 2 October 2017; published 16 October 2017)

On August 17, 2017 at 12:41:04 UTC the Advanced LIGO and Advanced Virgo gravitational-wave detectors made their first observation of a binary neutron star inspiral. The signal, GW170817, was detected with a combined signal-to-noise ratio of 32.4 and a false-alarm-rate estimate of less than one per  $8.0 \times 10^4$  years. We infer the component masses of the binary to be between 0.86 and 2.26  $M_{\odot}$ , in agreement with masses of known neutron stars. Restricting the component spins to the range inferred in binary neutron stars, we find the component masses to be in the range 1.17–1.60  $M_{\odot}$ , with the total mass of the system  $2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$ . The source was localized within a sky region of 28 deg<sup>2</sup> (90% probability) and had a luminosity distance of  $40^{+8}_{-14}$  Mpc, the closest and most precisely localized gravitational-wave signal yet. The association with the  $\gamma$ -ray burst GRB 170817A, detected by Fermi-GBM 1.7 s after the coalescence, corroborates the hypothesis of a neutron star merger and provides the first direct evidence of a link between these mergers and short  $\gamma$ -ray bursts. Subsequent identification of transient counterparts across the electromagnetic spectrum in the same location further supports the interpretation of this event as a neutron star merger. This unprecedented joint gravitational and electromagnetic observation provides insight into astrophysics, dense matter, gravitation, and cosmology.



Vue d'artiste

# Première observation d'une fusion de deux étoiles à neutrons, 2017



17 août 2017, 12h41m04s UTC

Signal observable à partir de 30 Hz :

durée ~60 s

Nombre de cycles ~3000

Rapport signal-sur-bruit : 32

Taux de fausse alarme : <1 en 80000 ans

**Etoiles à neutrons initiales :**

Masses : 1,36 à 2,26  $M_{\odot}$  et 0,86 à 1,36  $M_{\odot}$

**Trou noir final :**

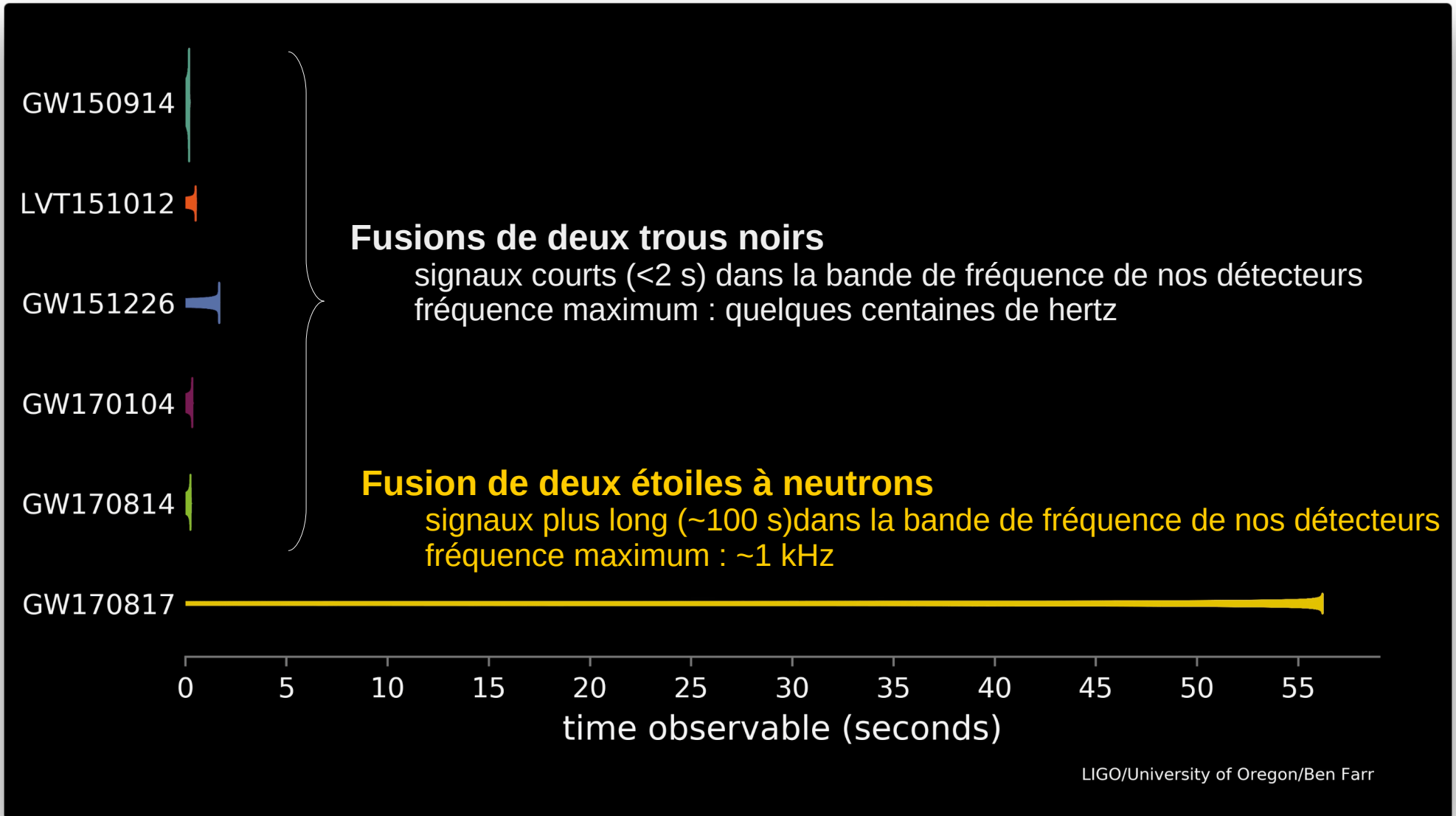
Masse : 2,73 à 3,29  $M_{\odot}$

**Énergie rayonnée en OG :** >0,025  $M_{\odot}$

**Distance :**  $(120 \pm 40) \times 10^6$  années-lumière



# Comparaison de quelques signaux détectés



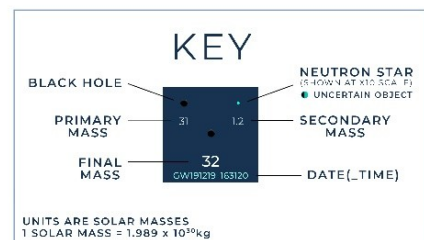
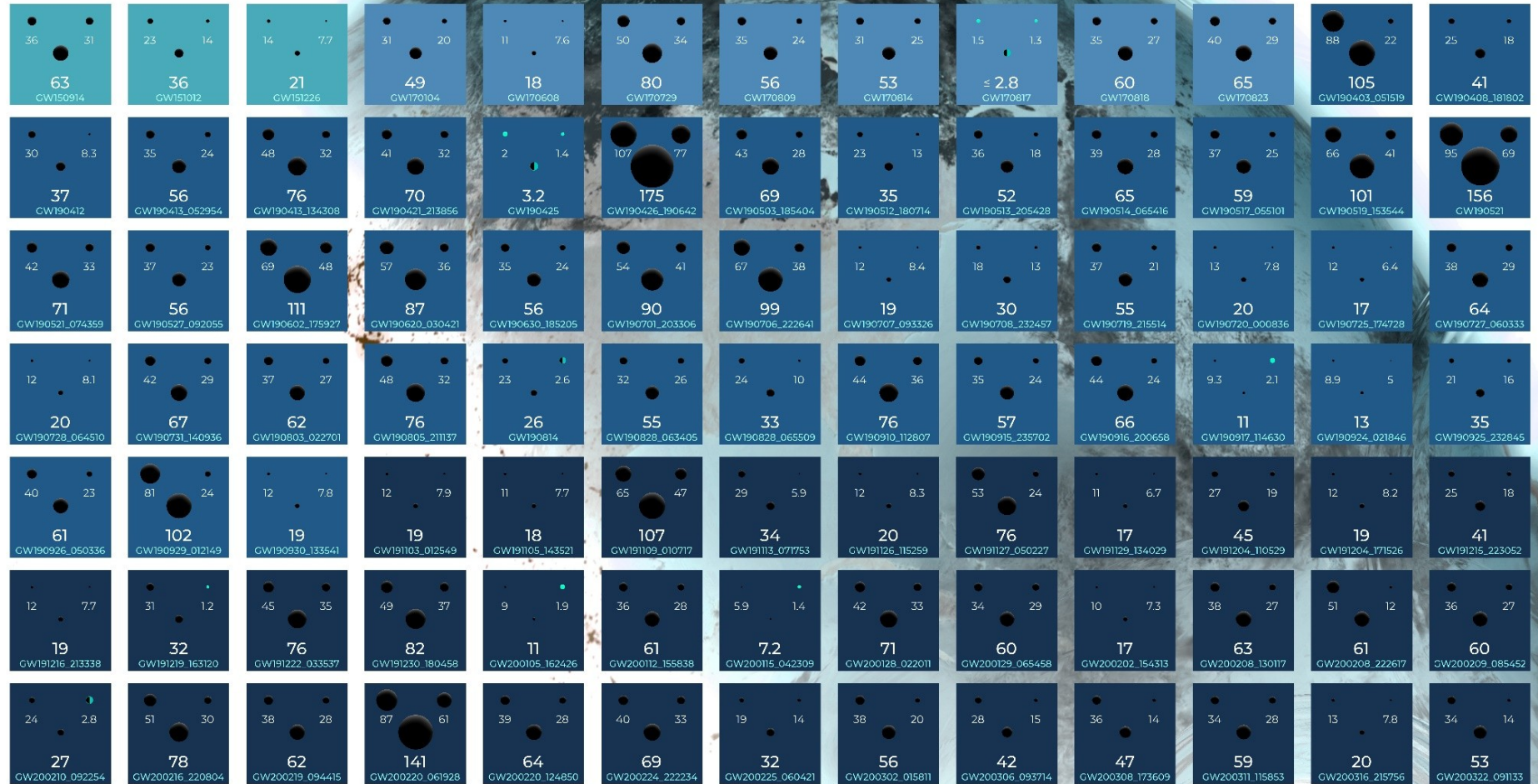
Forme du signal mesuré → information sur le type de source et sur ses paramètres

# Une centaine de détections depuis 2015

**OBSERVING RUN 01**  
2015 - 2016

**02**  
2016 - 2017

**03a+b**  
2019 - 2020



GRAVITATIONAL WAVE  
**MERGER**  
DETECTIONS  
SINCE 2015

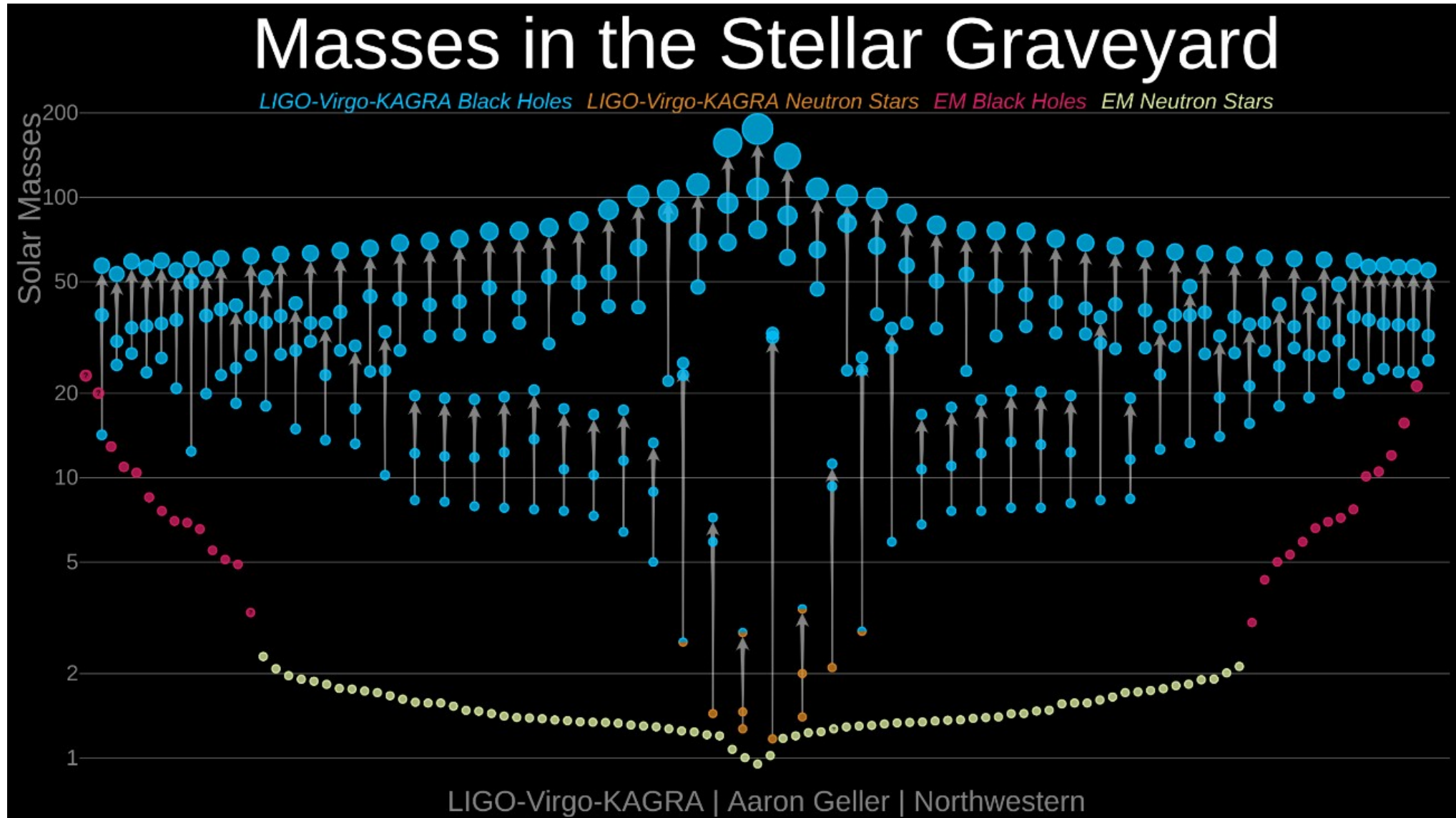


ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery

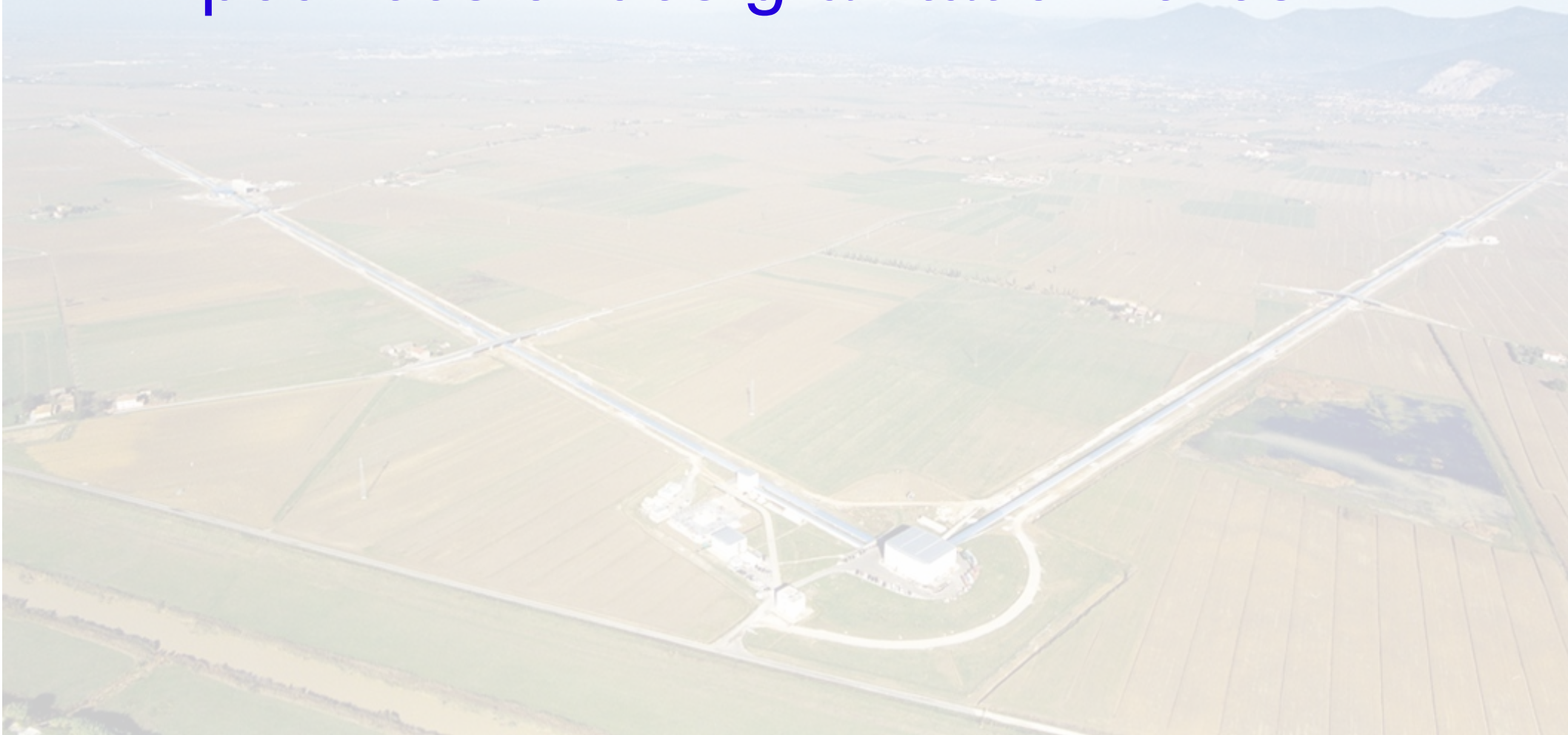
91 candidats, dont

- 10-15% de contamination
- 80 assez robustes pour être inclus dans les études de population

# Une centaine de détections depuis 2015

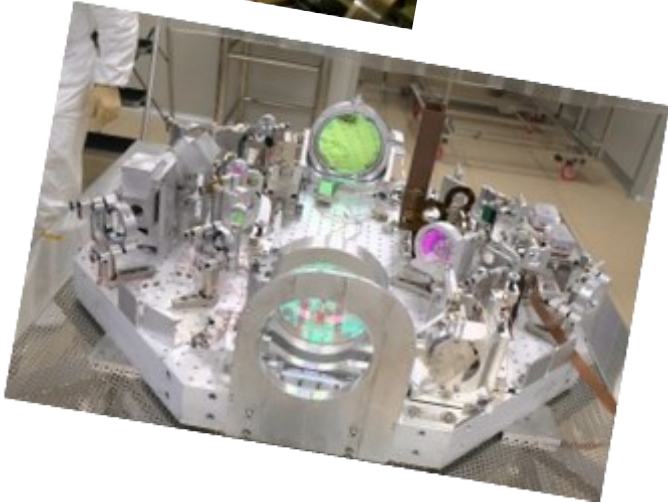


# Quels détecteurs pour ces ondes gravitationnelles ?



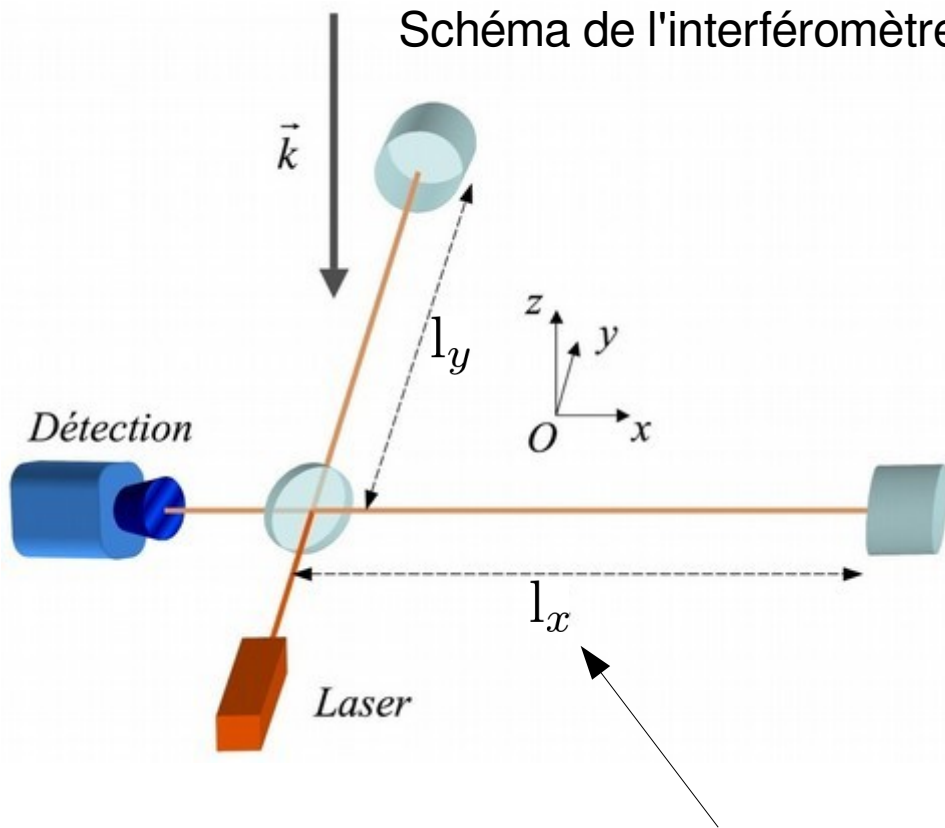
# Des interféromètres kilométriques

Vue aérienne de Virgo (Pise, Italie)



# Un interféromètre de Michelson

Schéma de l'interféromètre



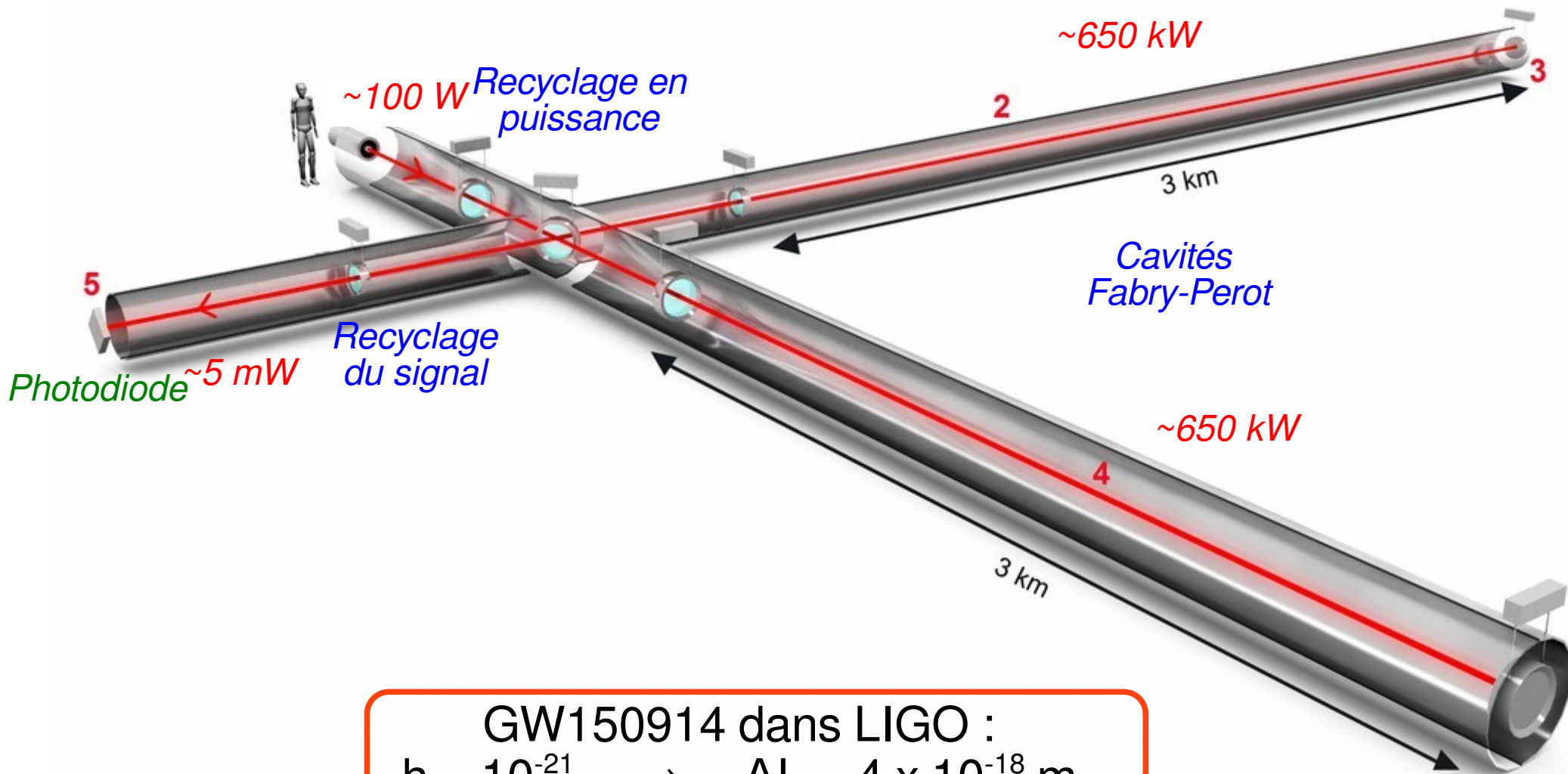
La figure d'interférence dépend de  $\Delta L$ :  
 $\Delta L(t) = l_x(t) - l_y(t)$



Longueur des bras:  $L_0 = 3 \text{ km}$

# Vue générale des interféromètres Advanced Virgo et Advanced LIGO

Vue d'artiste de l'interféromètre Virgo



GW150914 dans LIGO :  
 $h = 10^{-21} \rightarrow \Delta L = 4 \times 10^{-18} \text{ m}$

# Un réseau international d'interféromètres



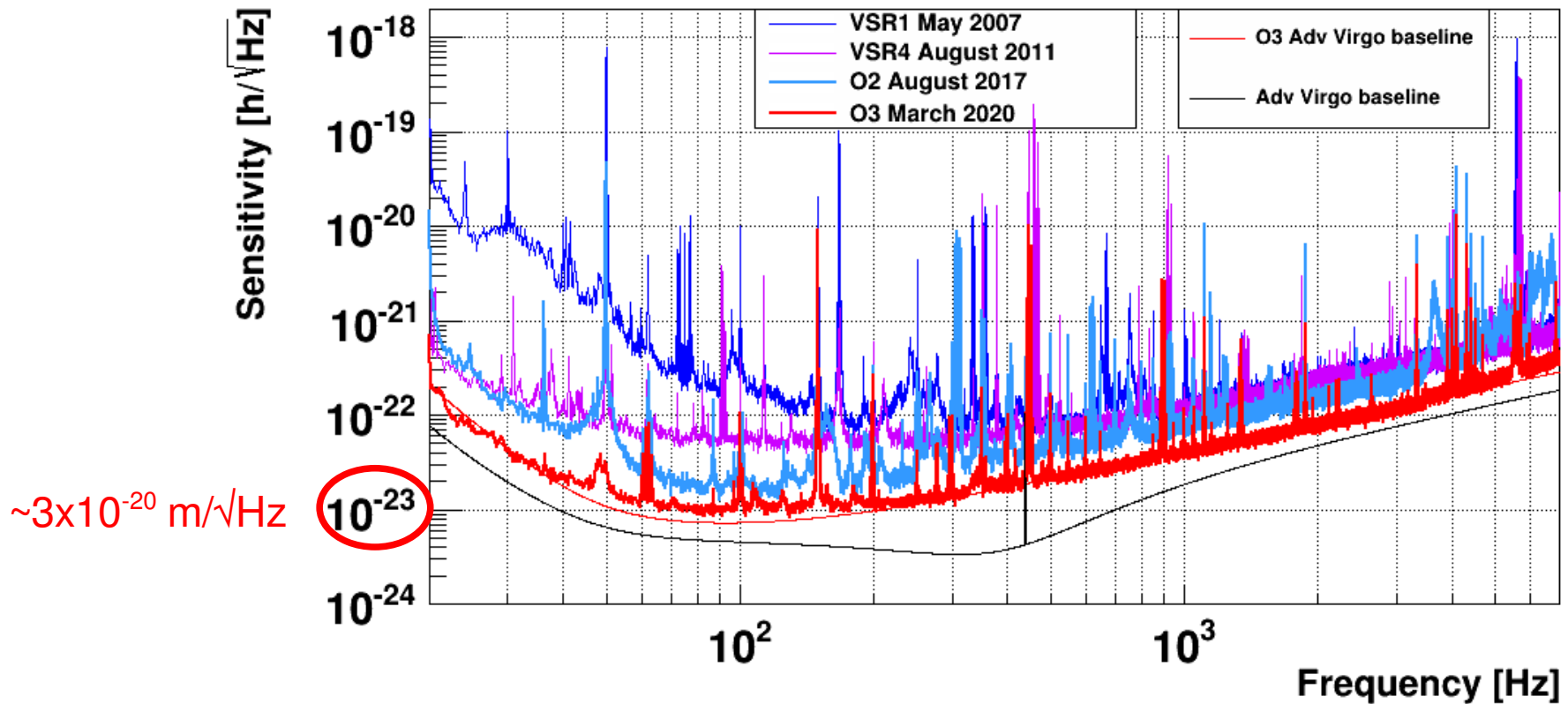
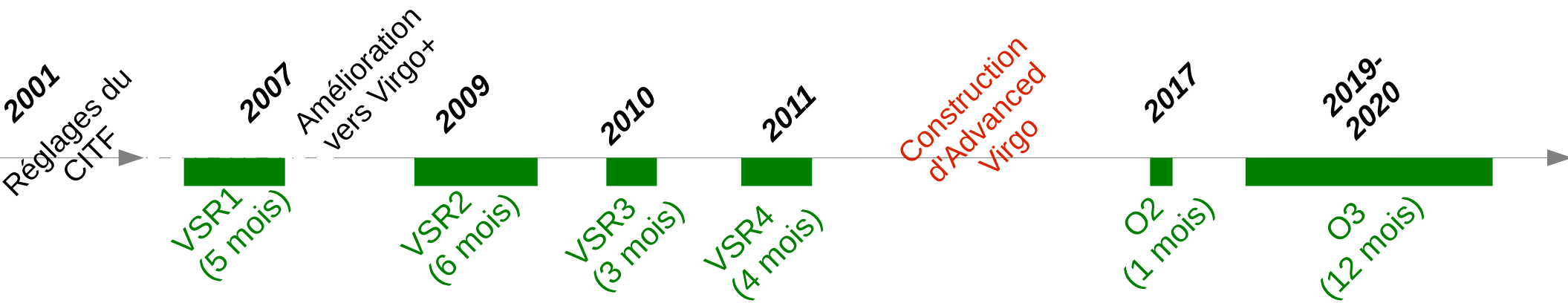
Réseau fonctionnant comme un unique détecteur depuis 2007

**Le réseau est un “téléscope à ondes gravitationnelles”**

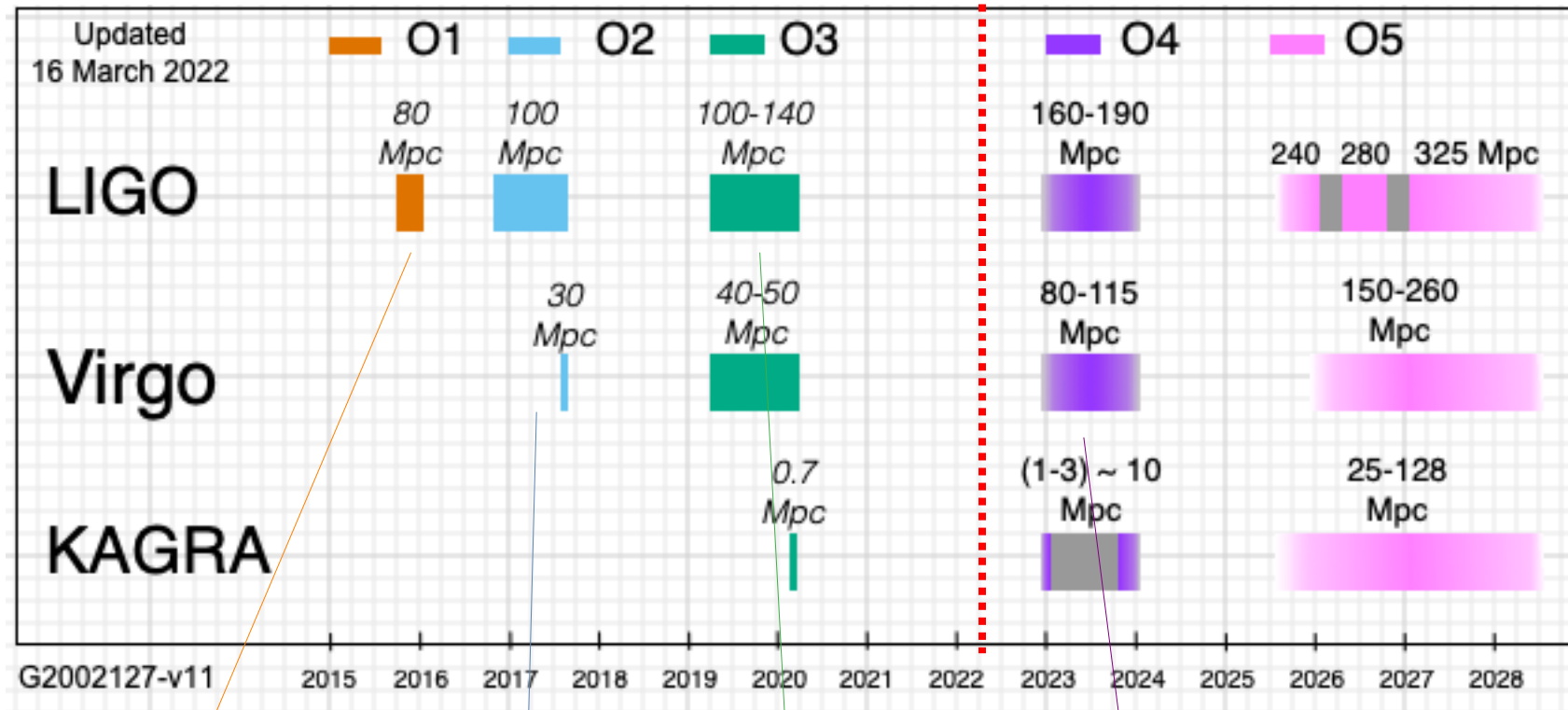
- ✓ Réjection des bruits locaux (coïncidence) → meilleure sensibilité
- ✓ Localisation des sources (triangulation) → astronomie



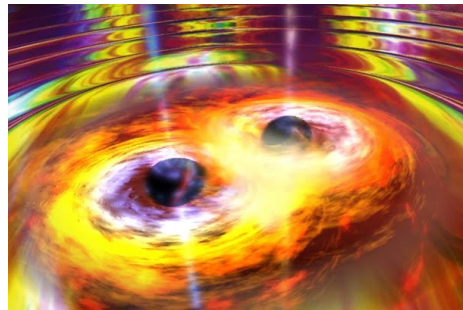
# Un petit historique de Virgo



# De plus en plus de détections à venir...



- Deux premières détections !



- Une détection par mois
- Première collision d'étoiles à neutrons !
- Naissance de l'astronomie multi-messager avec les OG



Vers quelques détections par semaine

- Une détection par semaine
- ~100 détections au total
- Etudes de populations
- Première détection trou noir-étoile à neutrons



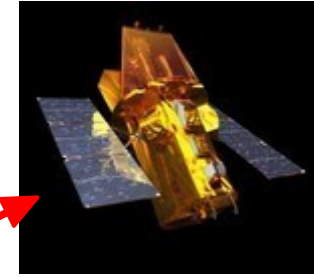
# Alertes pour des observations multi-messagers



**Optique**



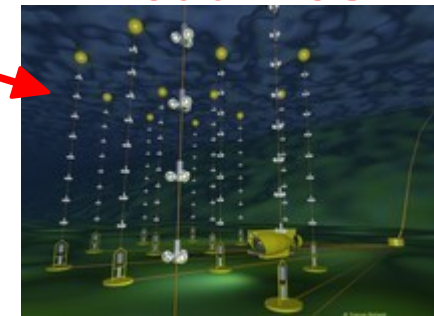
**Radio**



**Rayons X et  $\gamma$**



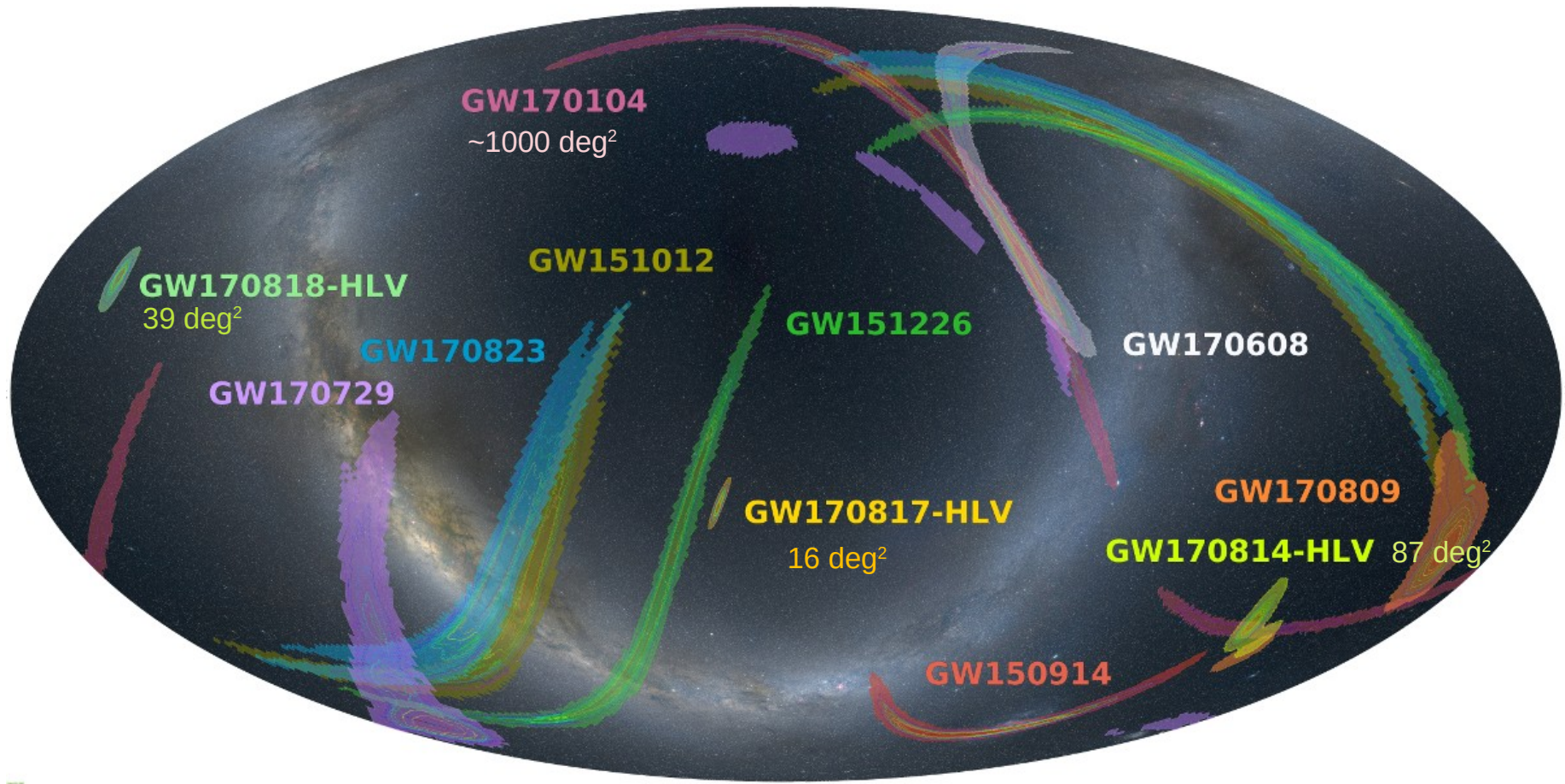
**Neutrinos**



- Augmenter la confiance dans les événements
- Mieux comprendre les phénomènes physiques des sources détectées

# Directions des événements détectés

Triangulation à partir des temps d'arrivée de l'OG sur les détecteurs



(1 pleine Lune ~ 0.8 deg<sup>2</sup>)

# Quelle physique avec les ondes gravitationnelles ?

En bref : physique avec des binaires de trous noirs

GW170817 : une détection multi-messenger

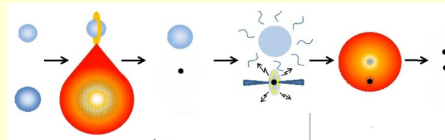
# En bref : physique avec des binaires de trous noirs

## Implications astrophysiques

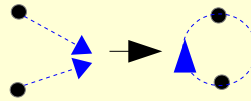
Formation d'étoiles massives ?

Formation de binaires de trous noirs

A partir d'étoiles doubles ?



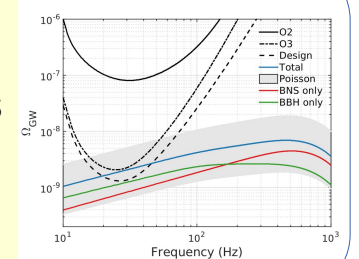
A partir d'étoiles isolées ?



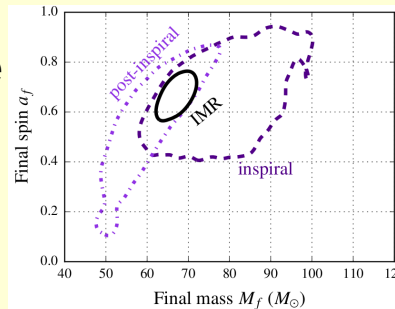
Estimation de la distribution des binaires de trous noirs et du taux de fusion

$$R = 12 - 213 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$$

Estimation du fond stochastique d'OG émis par des fusions de binaires de trous noirs

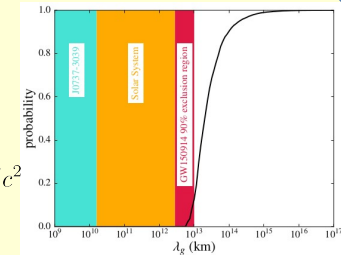


Vérification de la cohérence interne entre les formes d'ondes



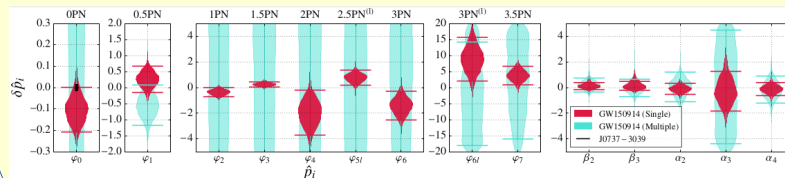
Limites sur le masse du graviton et la violation de Lorentz

$$m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

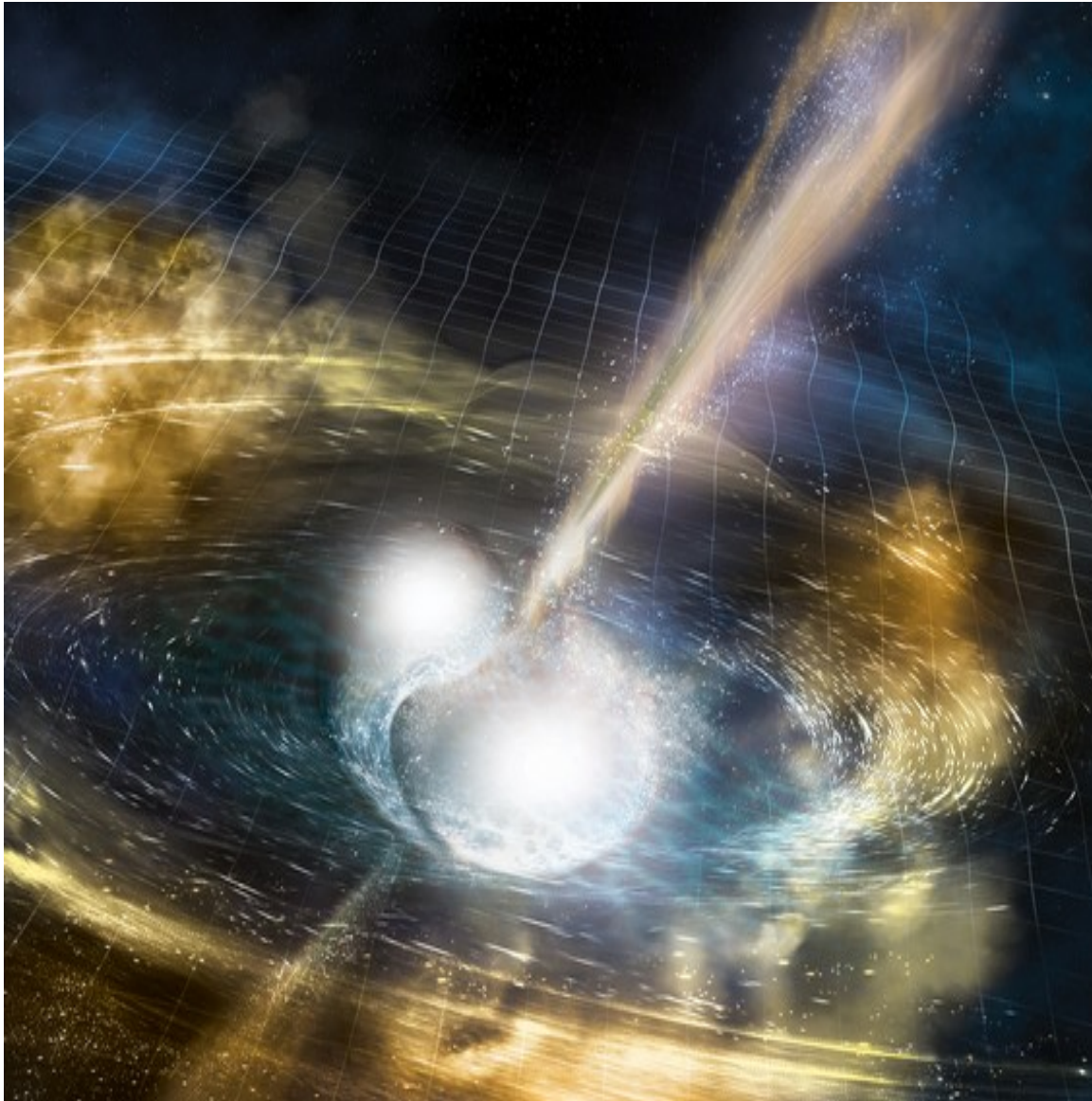


## Tests de Relativité Générale

Recherche d'écarts à la Relativité Générale dans les formes d'onde



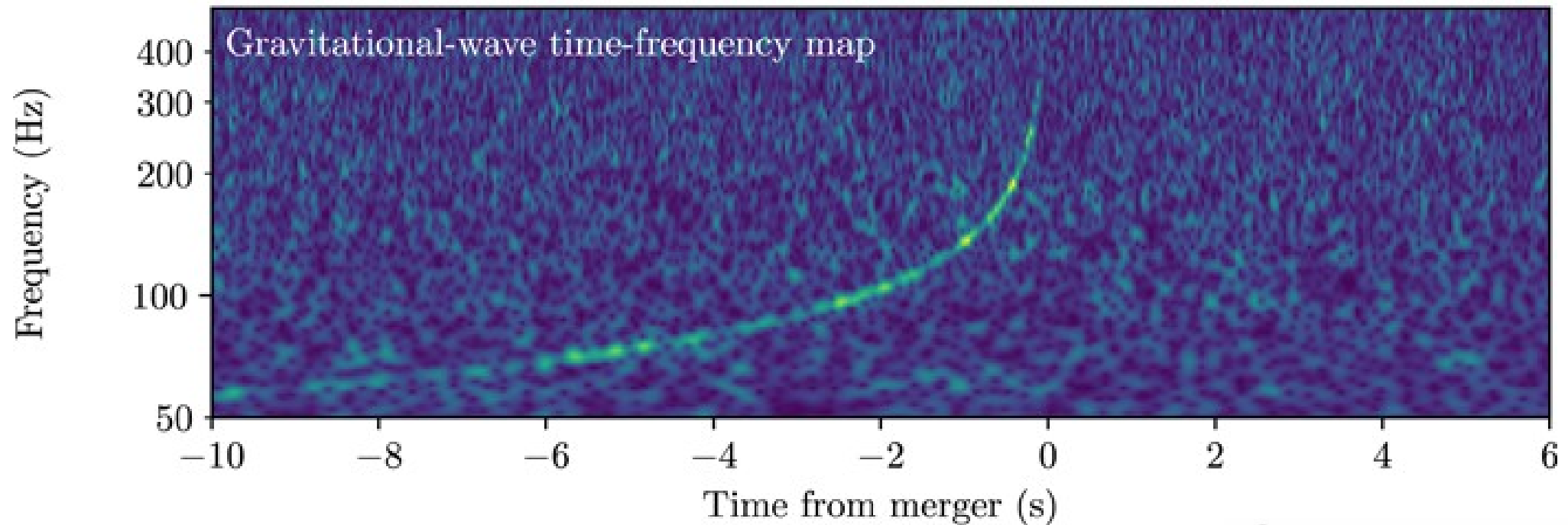
# La première détection multi-messagers d'une fusion d'étoiles à neutrons : GW170817



- Les données OG seules
- Association avec un GRB
- Suivi électro-magnétique et kilonova
- Mesure de la constante de Hubble
- A la recherche de neutrinos

17 août 2017, 14h41m04,4s en France

Détection d'ondes gravitationnelles émises par une fusion de deux étoiles à neutrons...



→ mail et SMS envoyés automatiquement pour déclencher une réunion de certains chercheurs de LIGO et Virgo



Depuis 2019 :

- les alertes sont envoyées automatiquement aux autres observatoires, en ~1 minute
- elles peuvent être rétractées après vérification « humaine »

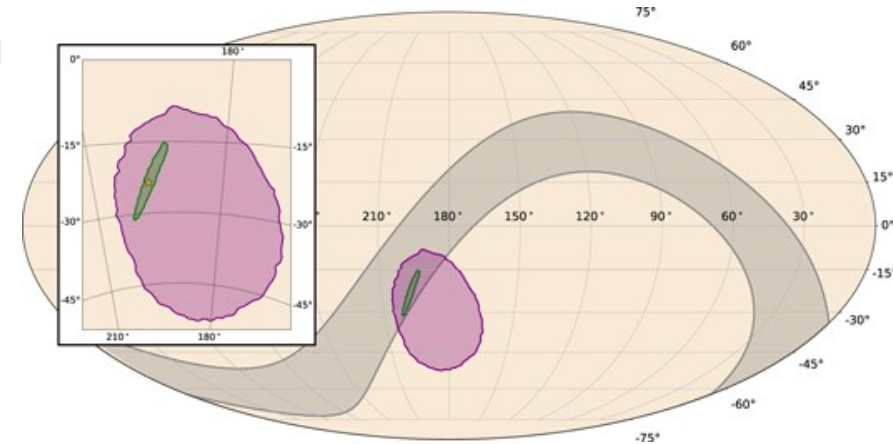


# Association avec un sursaut gamma

## GRB170817A détecté par Fermi et INTEGRAL

- émission  $\gamma$  commence  $\sim 1.7$  s après le moment de la fusion
- 3 fois plus probable d'être un sursaut gamma court qu'un long

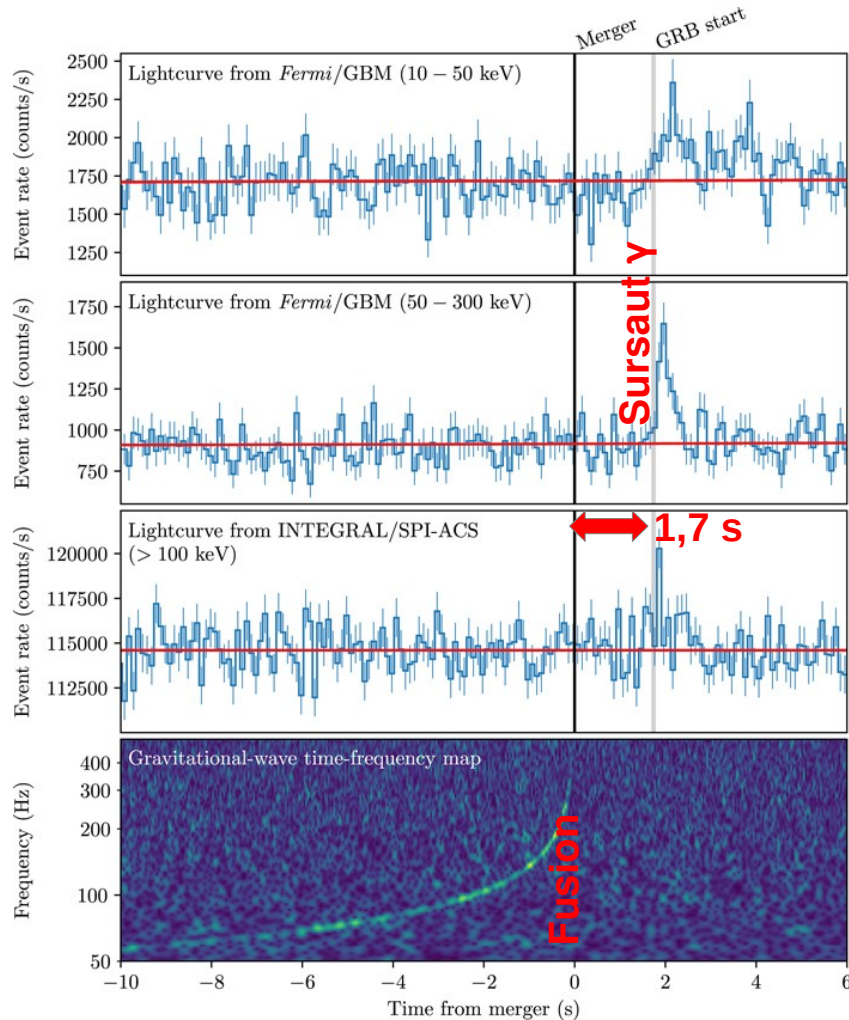
## Localisation dans le ciel du GRB (90% CL)



Fermi-GBM (1100 deg<sup>2</sup>)

Fermi et INTEGRAL (deg<sup>2</sup>)

LIGO-Virgo (28 deg<sup>2</sup>)

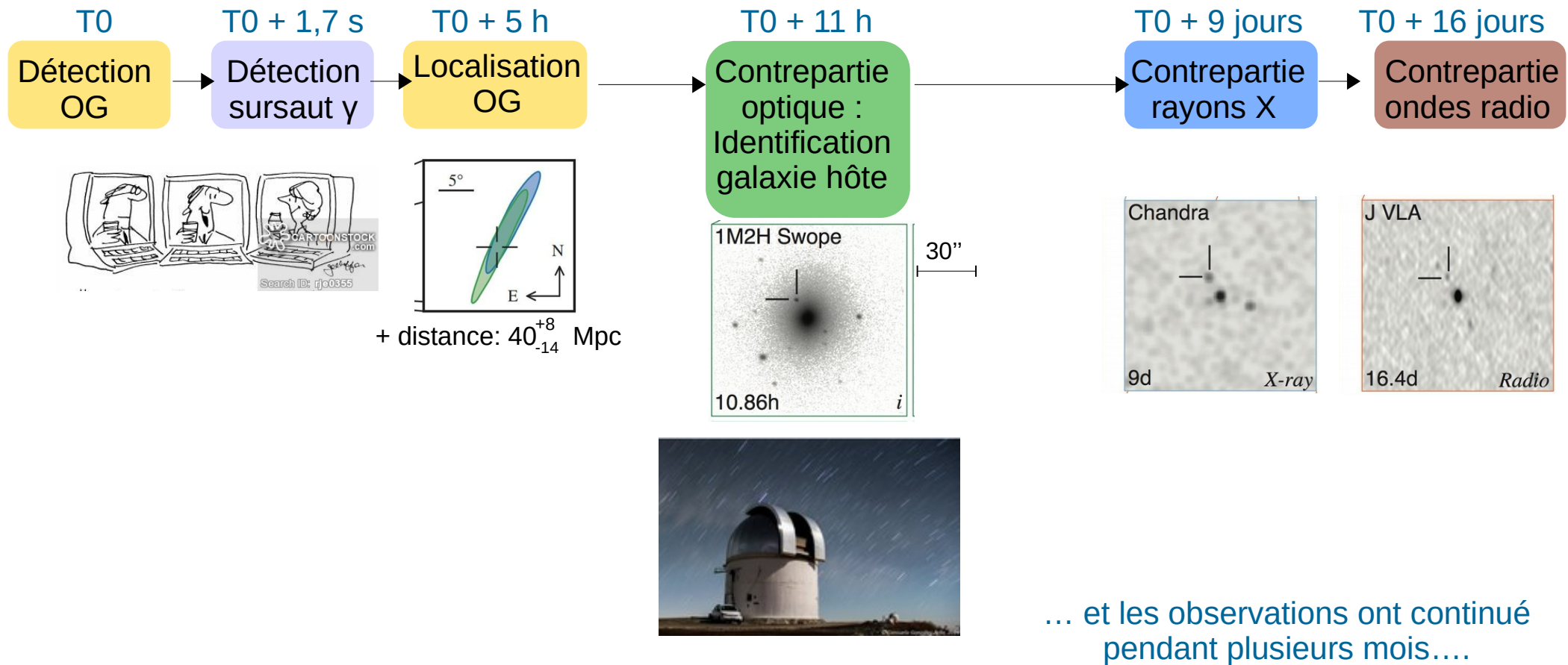


Probabilité de trouver une telle association en temps et en localisation pour deux événements indépendants :  $5.0 \times 10^{-8}$

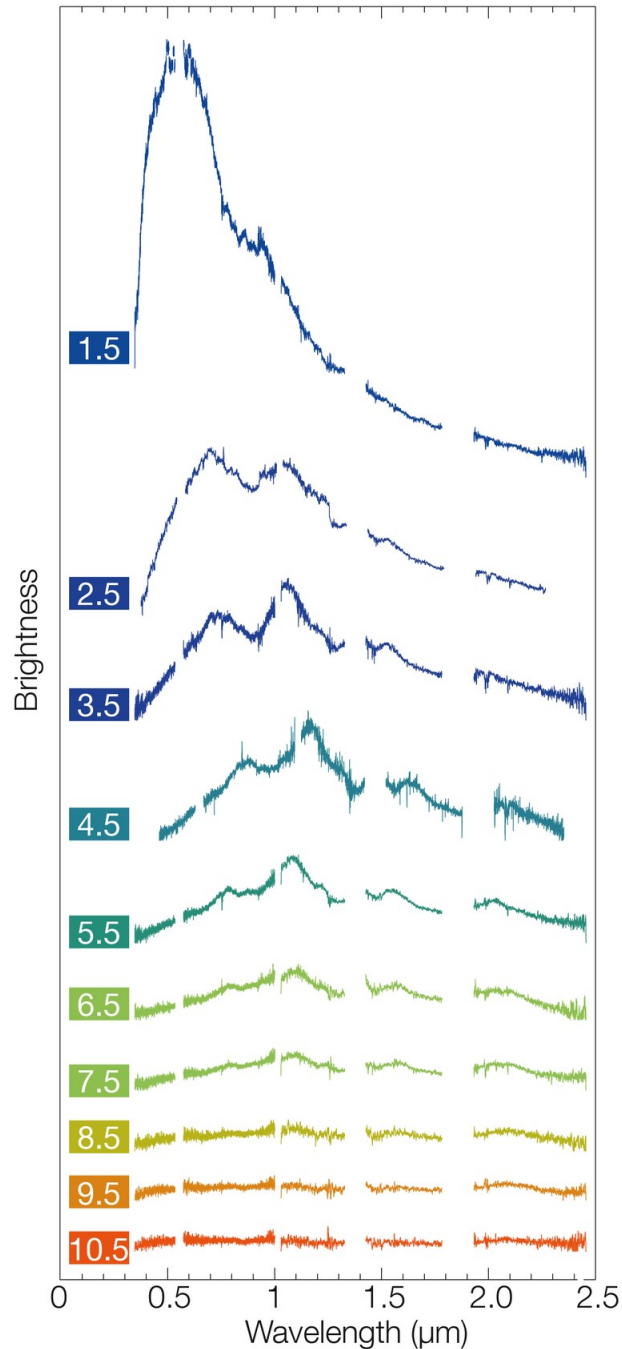
→ association validée à  $5.3 \sigma$

→ Première preuve directe que les fusions de binaires d'étoiles à neutrons sont les progéniteurs des (au moins certains) sursauts gamma courts !

# Une alerte a été envoyée à près d'une centaine d'observatoires et satellites



# Exemple : suivi de la source en lumière optique



Evolution du spectre du rayonnement électro-magnétique (proche UV au proche IR) pendant les 12 jours suivant la détection de la fusion

- Diminution du flux
- Rougissement de l'émission

ESO/E. Pian et al./S. Smartt & ePESSTO

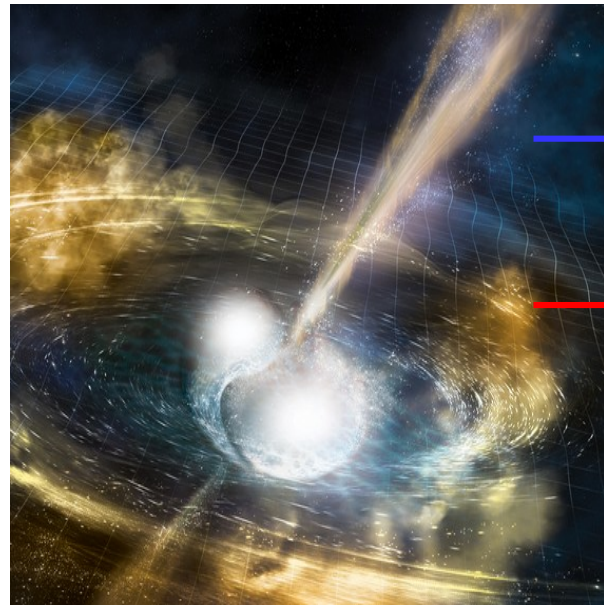
- <https://www.eso.org/public/images/eso1733j/>



**Qu'a-t-on appris  
avec cet événement remarquable ?**

# Quelle est la vitesse des ondes gravitationnelles ?

Fusion d'étoiles à neutrons



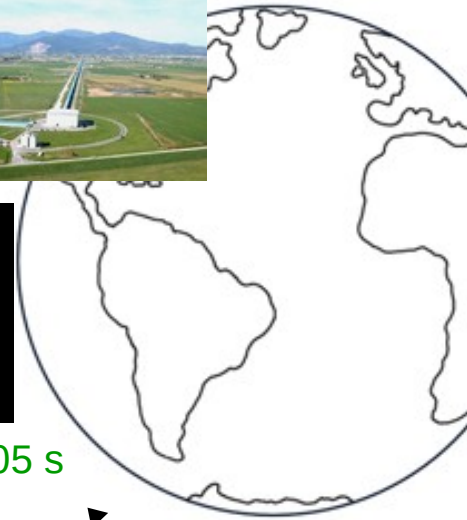
Hypothèse :  
Rayons  $\gamma$  émis entre 0  
et 10 s après la fusion

Propagation  
sur au moins 85 millions d'années lumière

Onde gravitationnelle

Rayons  $\gamma$

Détection sur Terre



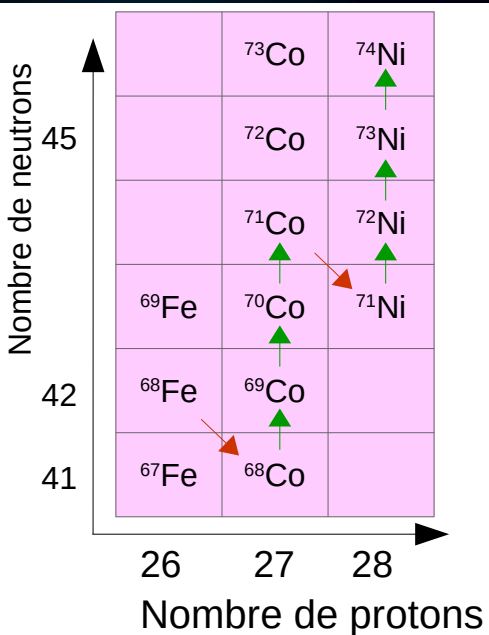
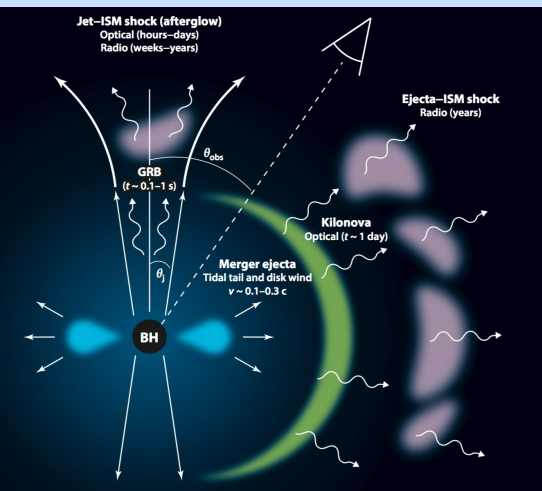
Rayons  $\gamma$ -rays détectés  $1.74 \pm 0.05$  s  
après la fusion vue par les OG

Les contraintes  
antérieures autorisaient  
un écart de 1000 ans  
entre ces deux temps  
d'arrivée !

Différence entre la vitesse des ondes gravitationnelles  
et la vitesse de la lumière :  
 $[-3 \times 10^{-15} ; +7 \times 10^{-16}] \times c$

→ la moitié des modèles de Relativité Modifiée pas  
compatibles avec cette nouvelle contrainte

# Formation d'une kilonova



Effets de marée avant la fusion

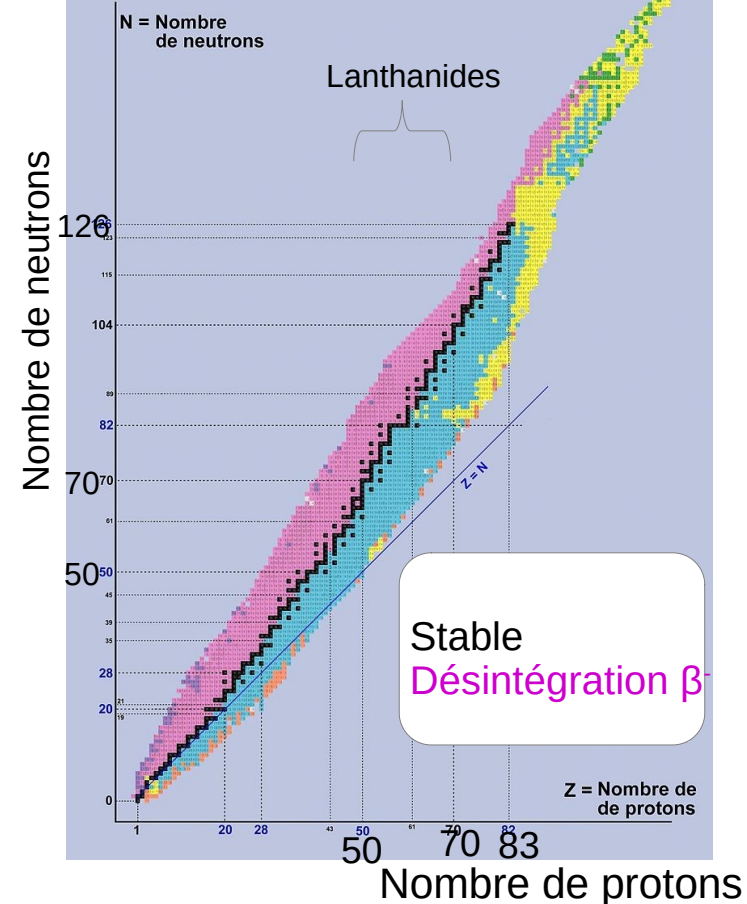
Ejection à grande vitesse de matière riche en neutrons

Fusion rapide d'éléments lourds instables, riches en neutrons

Désintégrations  $\beta^-$

Éléments lourds stables  
→ jusqu'au Pb, Bi, Inclus Au, Pt

## Vallée de stabilité des noyaux

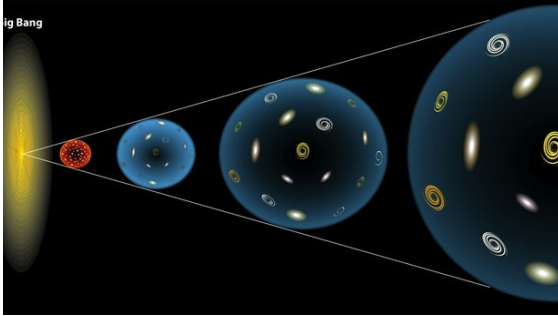


↘ Désintégrations  $\beta^-$   
↑ Capture de neutrons

→ Les fusions d'étoiles à neutrons sont probablement la source principale des éléments lourds de l'Univers

# Nouvelle mesure de la constante de Hubble

$H_0$  décrit le taux d'expansion de l'univers (actuel)



**GW170817 peut être utilisé comme une sirène standard**

$$D_{\text{luminosity}} = H_0 \times v_r$$

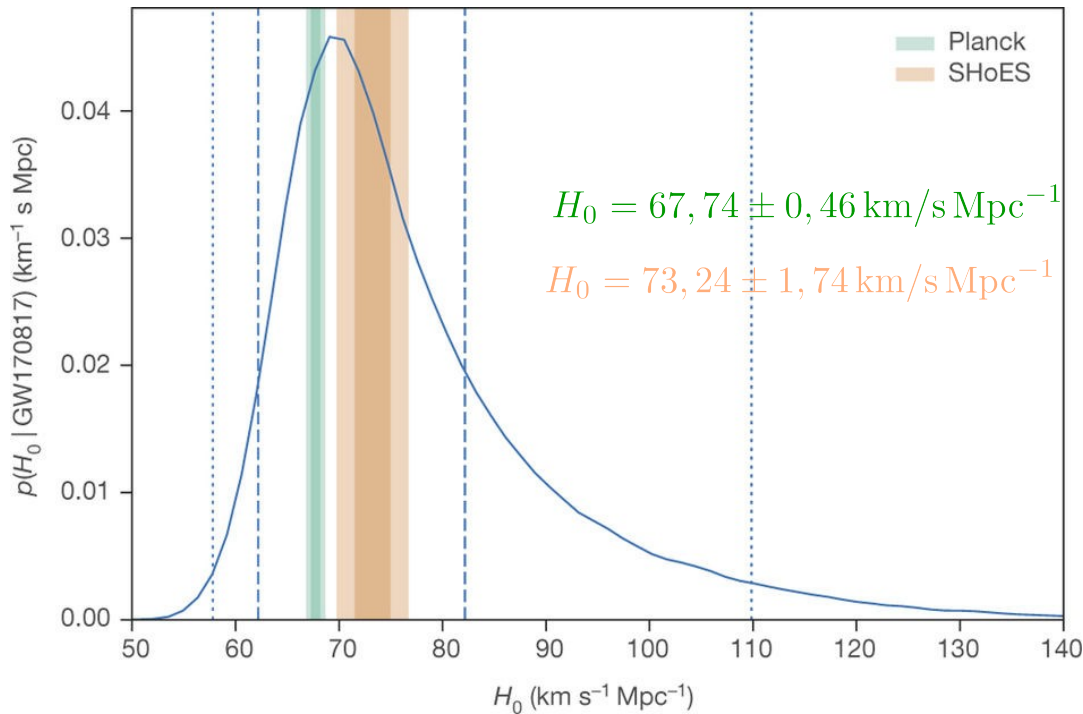
Estimé directement à partir du signal OG

$$(43.8^{+2.9}_{-6.9} \text{ Mpc})$$

Déterminé à partir de la galaxie hôte NGC4993

$$(3017 \pm 166 \text{ km/s})$$

→ estimation de la constante de Hubble  $H_0 = 70^{+12}_{-8} \text{ km/s Mpc}^{-1}$



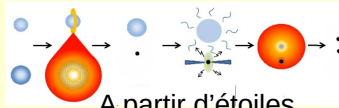
**Mesure de  $H_0$  complètement indépendante**  
 → aidera à comprendre la « tension » entre les autres mesures...

# Une liste non-exhaustive de tests...

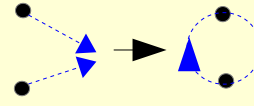
## Implications astrophysiques



Formation des binaires d'étoiles à neutrons



A partir d'étoiles binaires ?



A partir d'étoiles à neutrons isolées ?

Origine des GRB, structure du jet

Modélisation des Kilonova

Équation d'état des étoiles à neutrons ( $r < 15$  km)

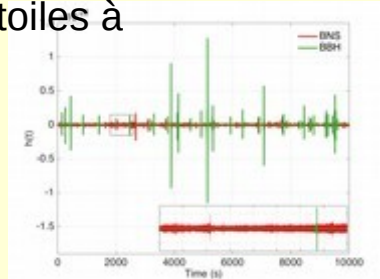
Étoile à neutrons résultante à courte ou long vie ?

Estimation de la distribution des binaires d'étoiles à neutrons et du taux de fusion

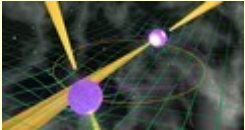
$$R = 1540^{+3200}_{-1220} \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$$

$$(R < 12600 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1} \text{ from 01})$$

Estimation du fond stochastique émis par des fusion d'étoiles à neutrons



## Tests de la Relativité Générale



Différence entre vitesse de la gravité et de la lumière  $[-3 \times 10^{-15} ; +7 \times 10^{-16}] \times c$

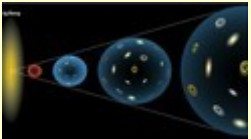
Recherche de déviations à la RG dans les formes d'ondes

Étude de la polarisation des OG

Limites sur la violation de Lorentz

Tests du principe d'équivalence

## Cosmologie



Mesure indépendante de la constante de Hubble



# Les détecteurs d'ondes gravitationnelles : des défis technologiques en continu





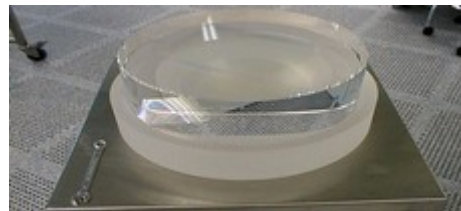
Bancs optiques suspendus sous vide



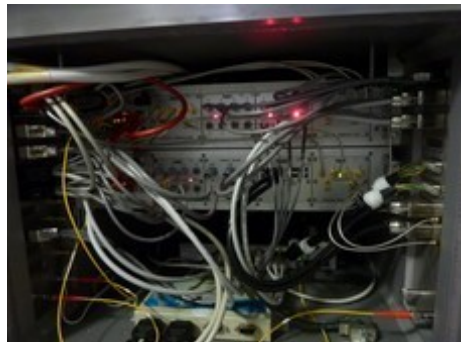
Suspensions monolithiques



Système de vide et pièges froids



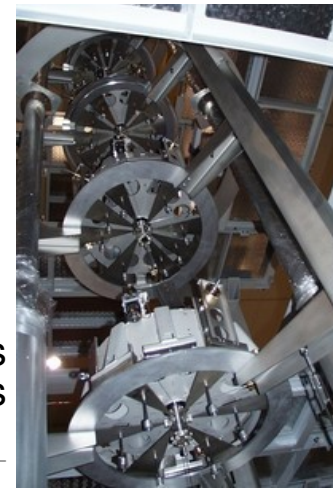
Grands miroirs de précision



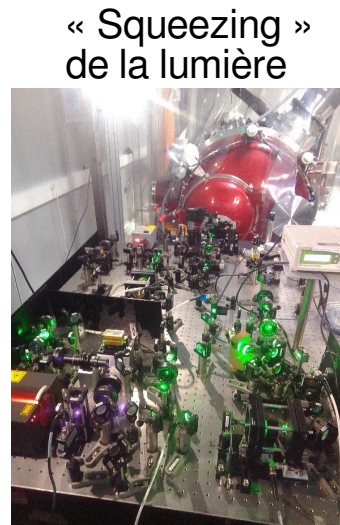
Electronique bas bruit,  
Électronique numérique rapide



Cavité optique,  
sélecteur de mode  
et fréquence



Atténuateurs  
simisques



« Squeezing »  
de la lumière



Merci de votre attention,  
et bonne visite virtuelle de Virgo !