

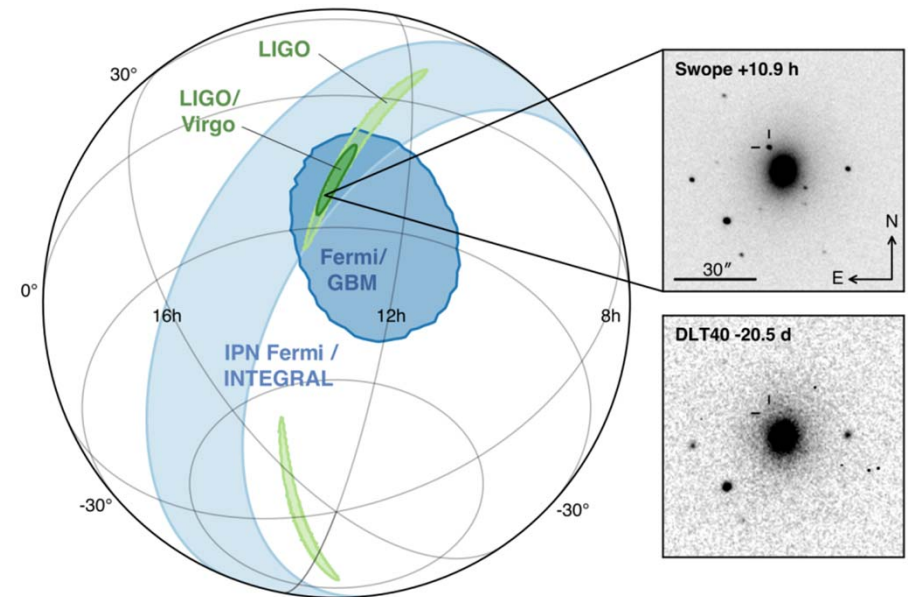
# On a détecté les ondes gravitationnelles !

27 Novembre 2018 – Lycée Jeanne d'Arc, Bastia

**Nicolas Arnaud** ([narnaud@lal.in2p3.fr](mailto:narnaud@lal.in2p3.fr))

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3 & Université Paris-Sud)

European Gravitational Observatory (Consortium CNRS & INFN)

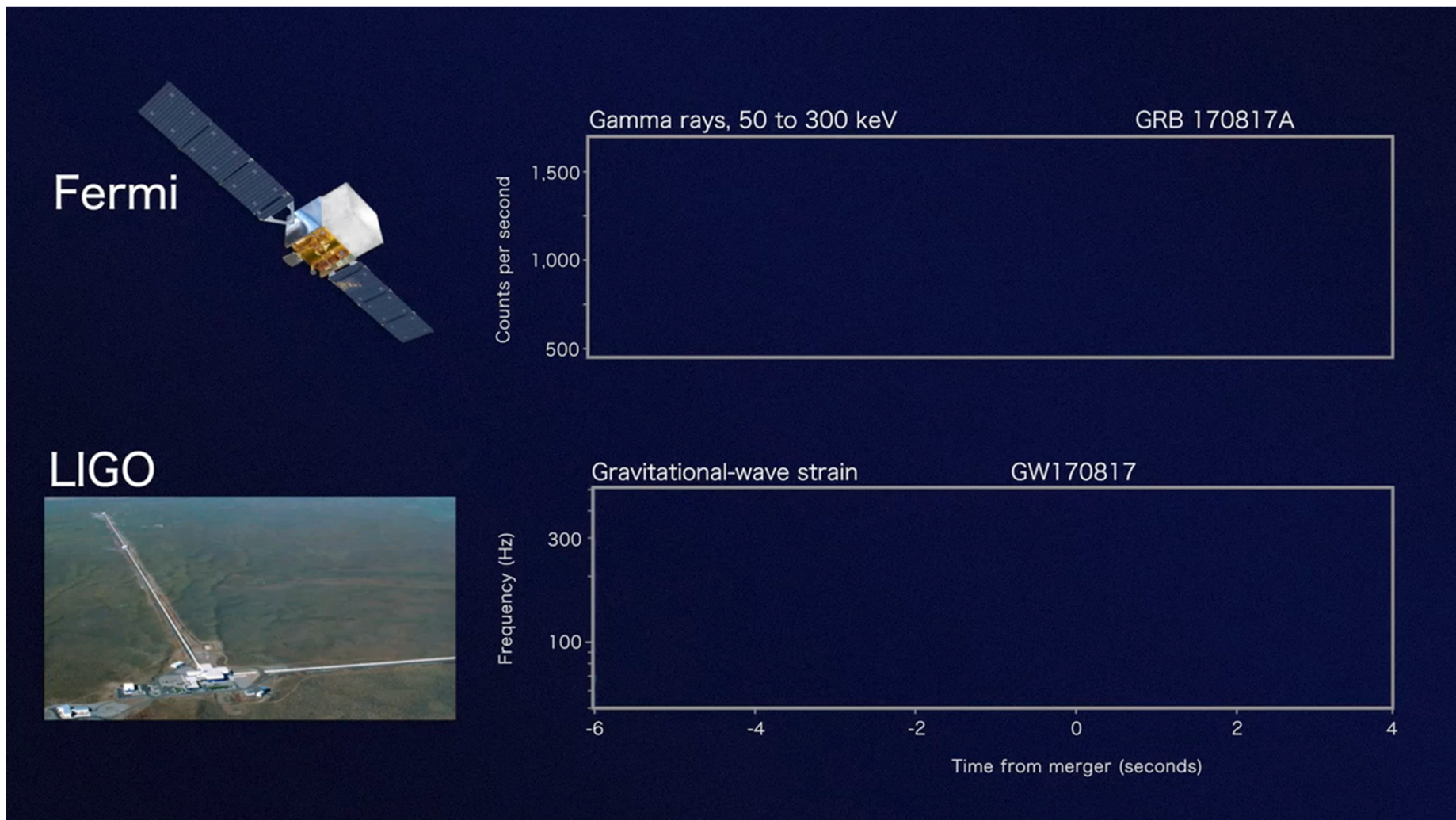


**17-18 août 2017 :**  
**12 heures extraordinaires**

Il y a bien longtemps, dans une galaxie  
lointaine, très lointaine....

# Jeudi 17 août 2017, 14h41 heure de Paris

- Signaux enregistrés avec un écart de deux secondes
  - LIGO (ondes gravitationnelles)
  - Instrument GBM (sursauts gamma) du satellite Fermi



# Plus tard le même jour ...

- 19h55

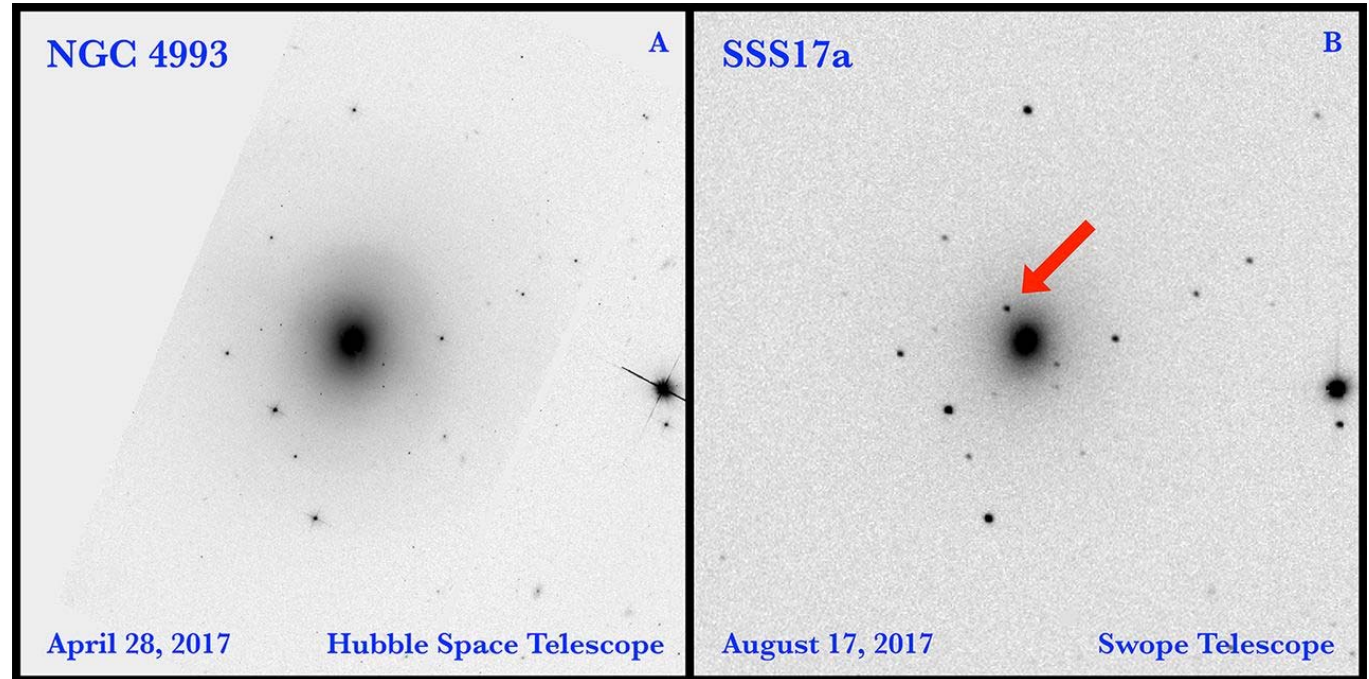
→ Localisation LIGO-Virgo

- Position dans le ciel :  
28 degrés carrés
- Estimation de la distance  
de la source



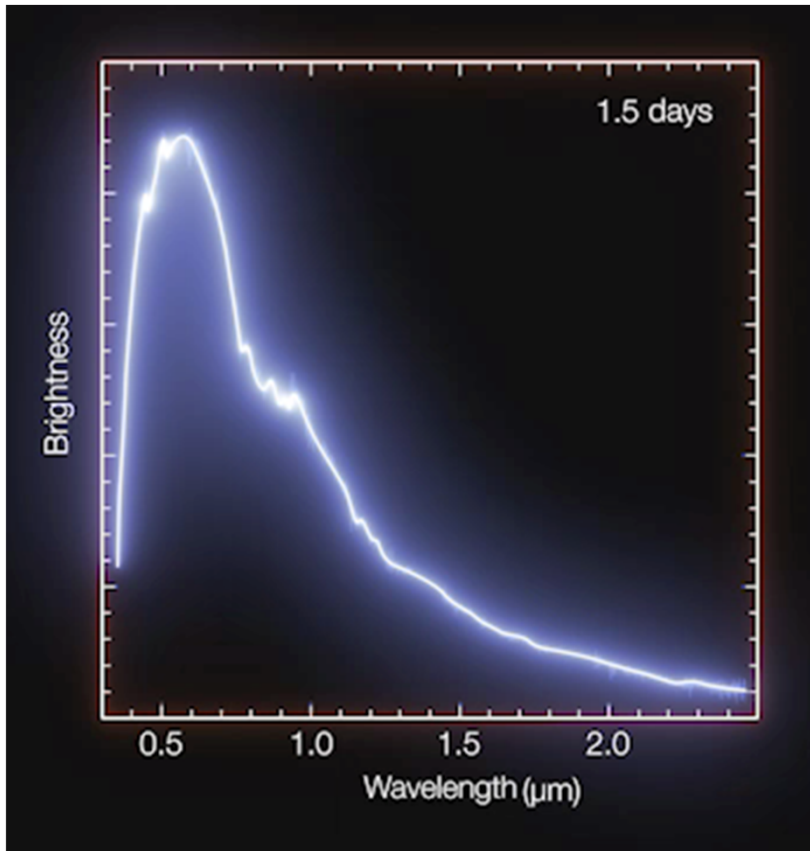
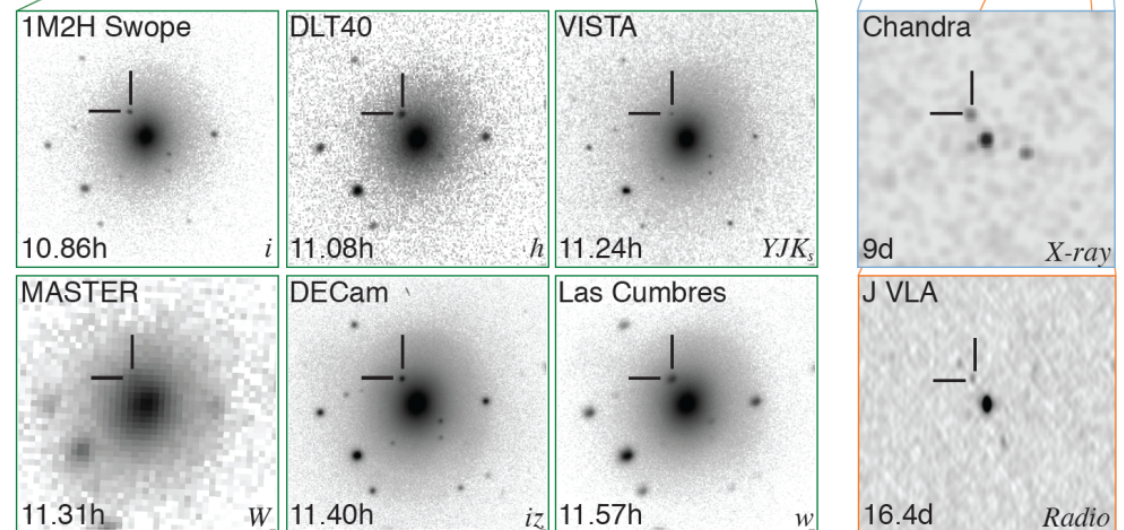
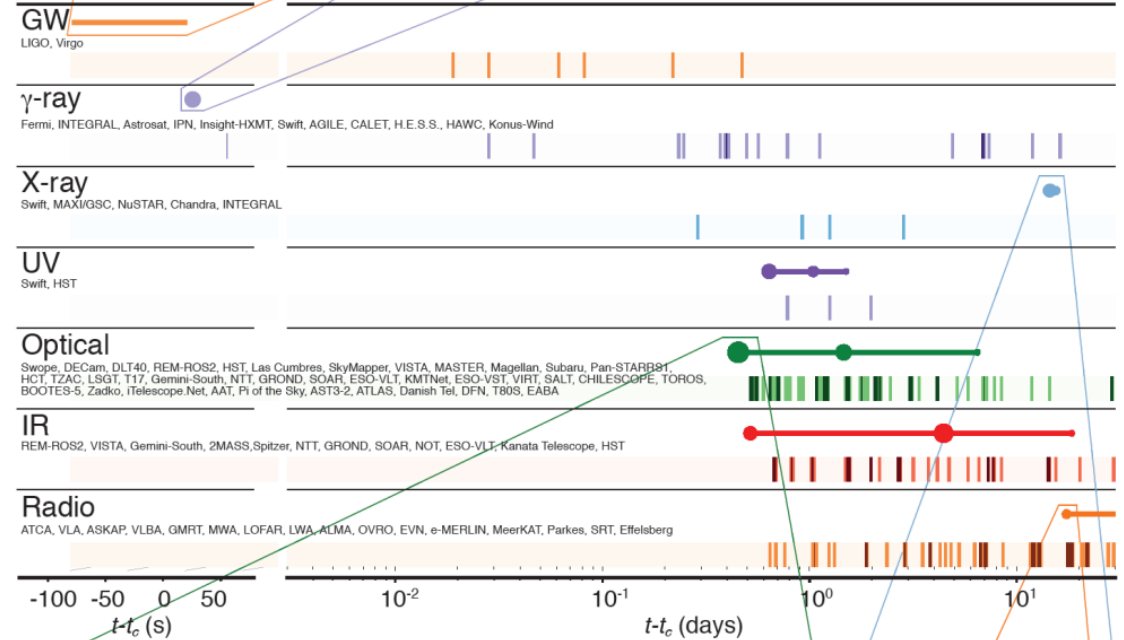
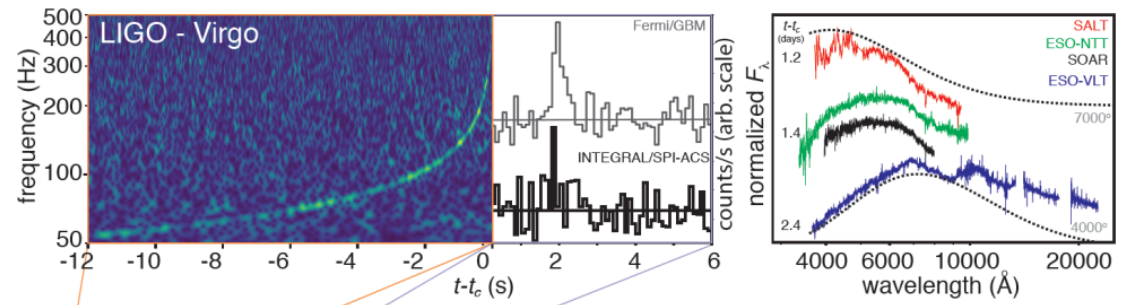
# La nuit suivante ...

- 18/08/2017  
01h33 heure de Paris
- Découverte de la  
contrepartie optique  
à l'aide du  
télescope SWOPE  
au Chili



# Astronomie multi-messagers

- Ondes gravitationnelles, sursauts gamma, l'ensemble du spectre électromagnétique



# Détecter les ondes gravitationnelles

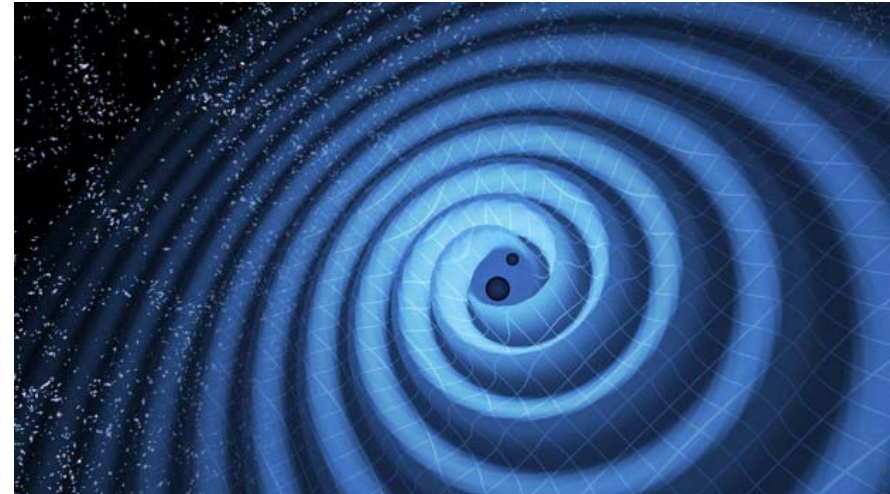
*Merci à tous mes collègues du groupe Virgo du LAL et des collaborations Virgo et LIGO, auxquels j'ai emprunté des idées et du matériel pour cette présentation*



# Les ondes gravitationnelles

- Une des premières prédictions de la relativité générale (1916)

- Les masses accélérées induisent des perturbations de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière

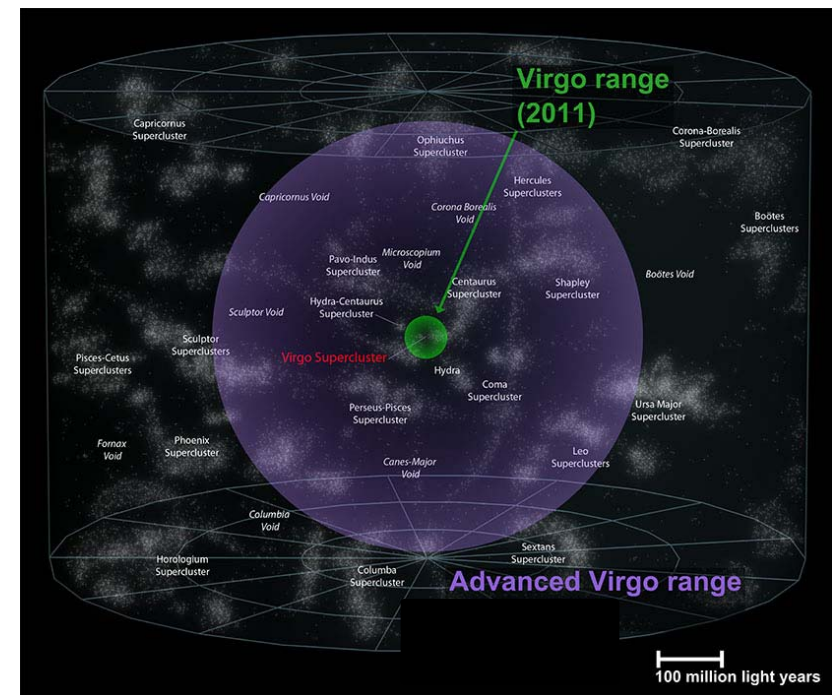


- Pas d'émission d'ondes gravitationnelles (OG) si la source est axisymétrique
  - Une « bonne » source doit avoir une distribution de masse asymétrique

- L'amplitude  $h$  d'une OG

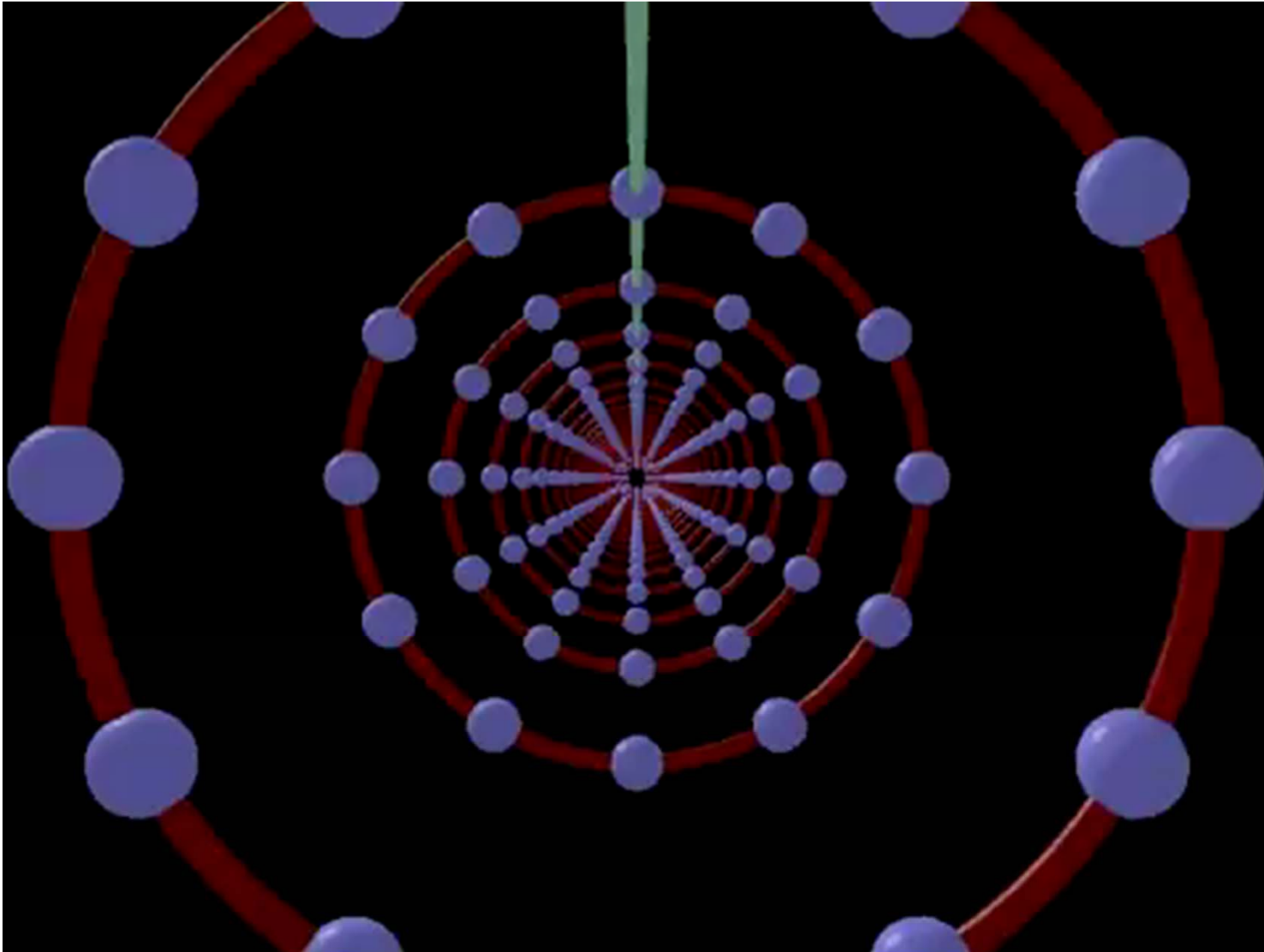
- est sans dimension
- Décroît comme  $1/(\text{distance à la source } d)$
- Les détecteurs y sont directement sensibles

→ Gain d'un facteur 2 (10) en sensibilité  
⇔ Gain d'un facteur 2 (10) en distance  
⇔ Volume d'Univers observable augmenté par un facteur 8 (1000)



# Effet d'une onde gravitationnelle

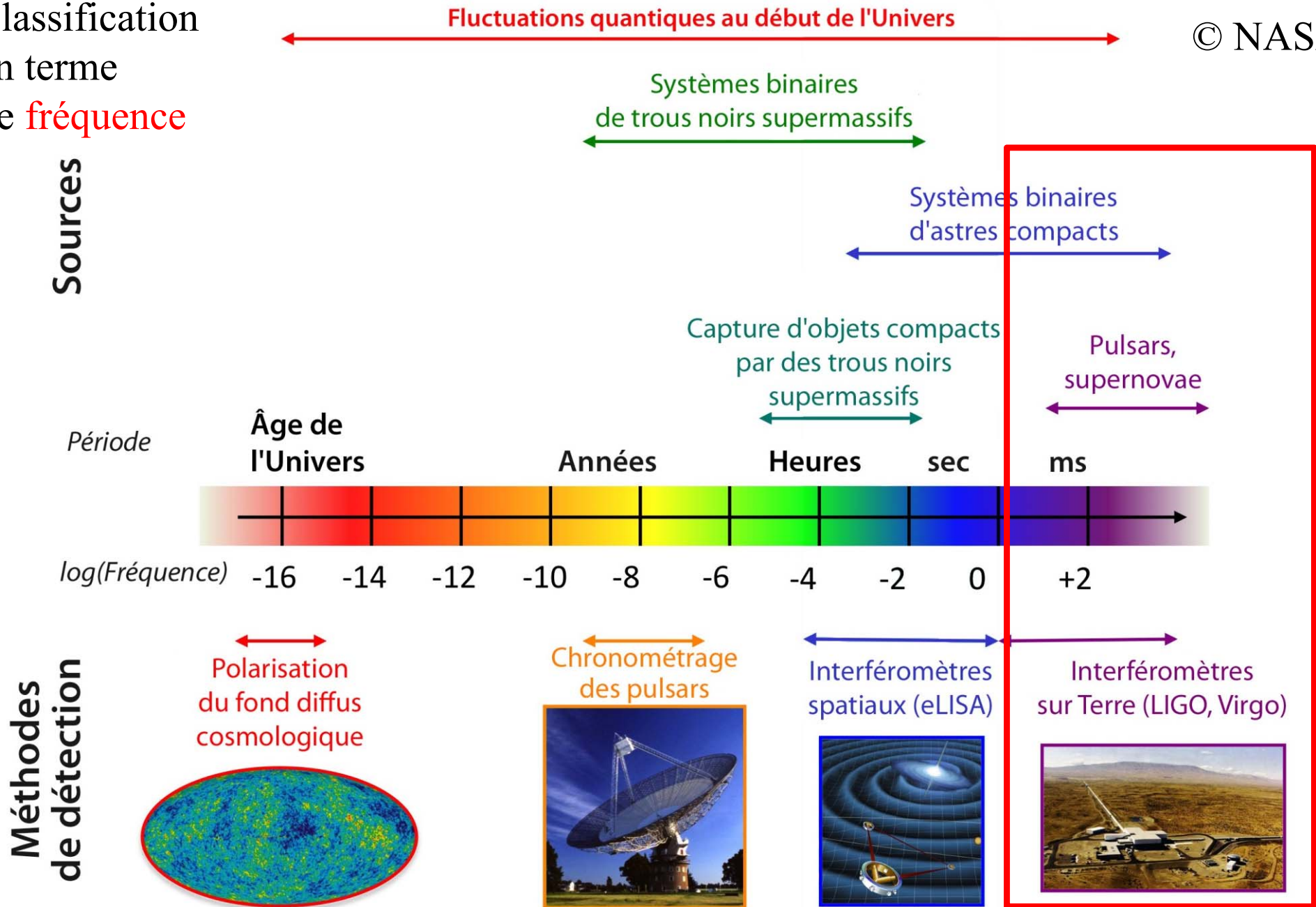
- En trois dimensions



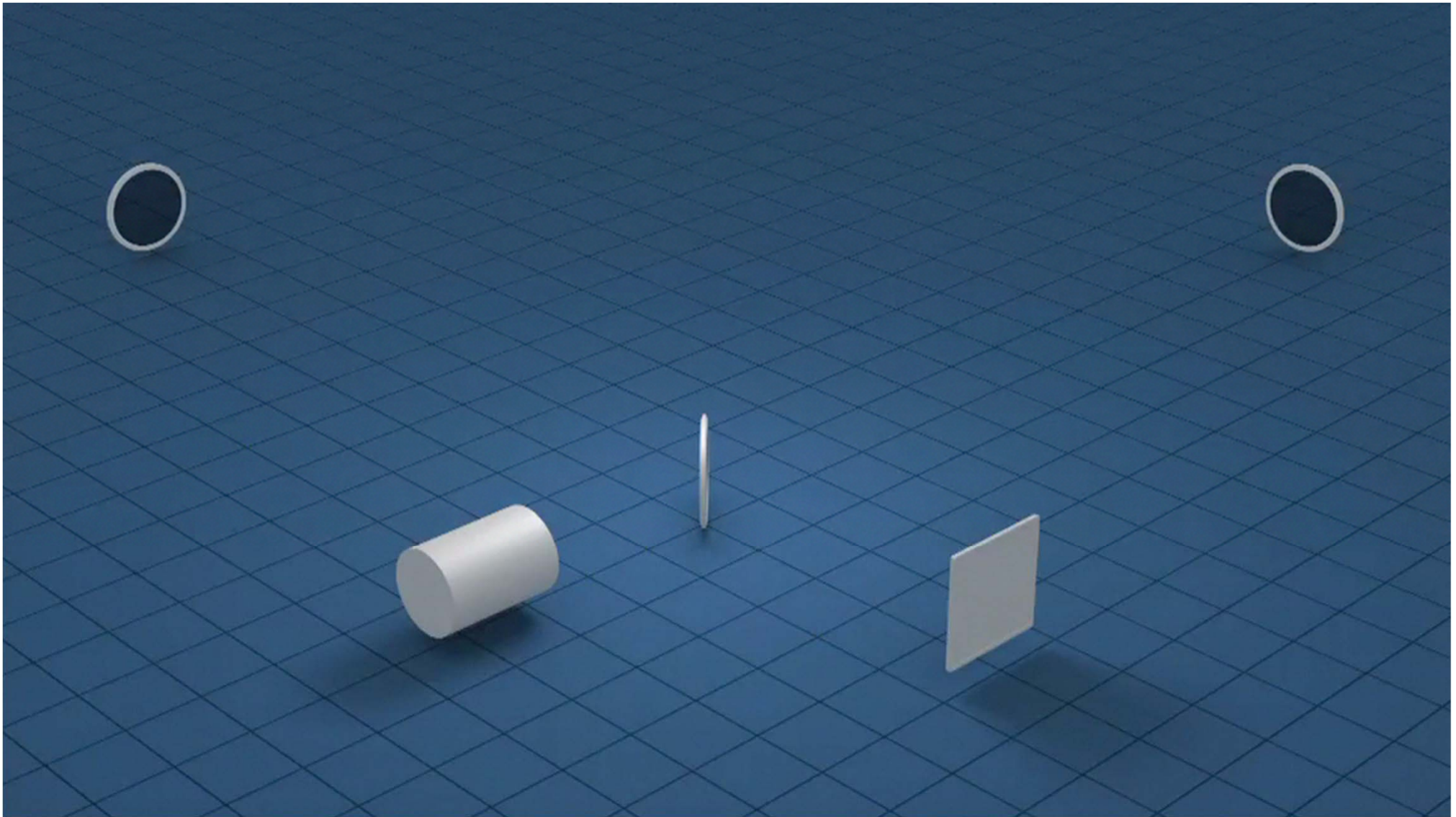
# Le spectre des ondes gravitationnelles

- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



# Principe de fonctionnement

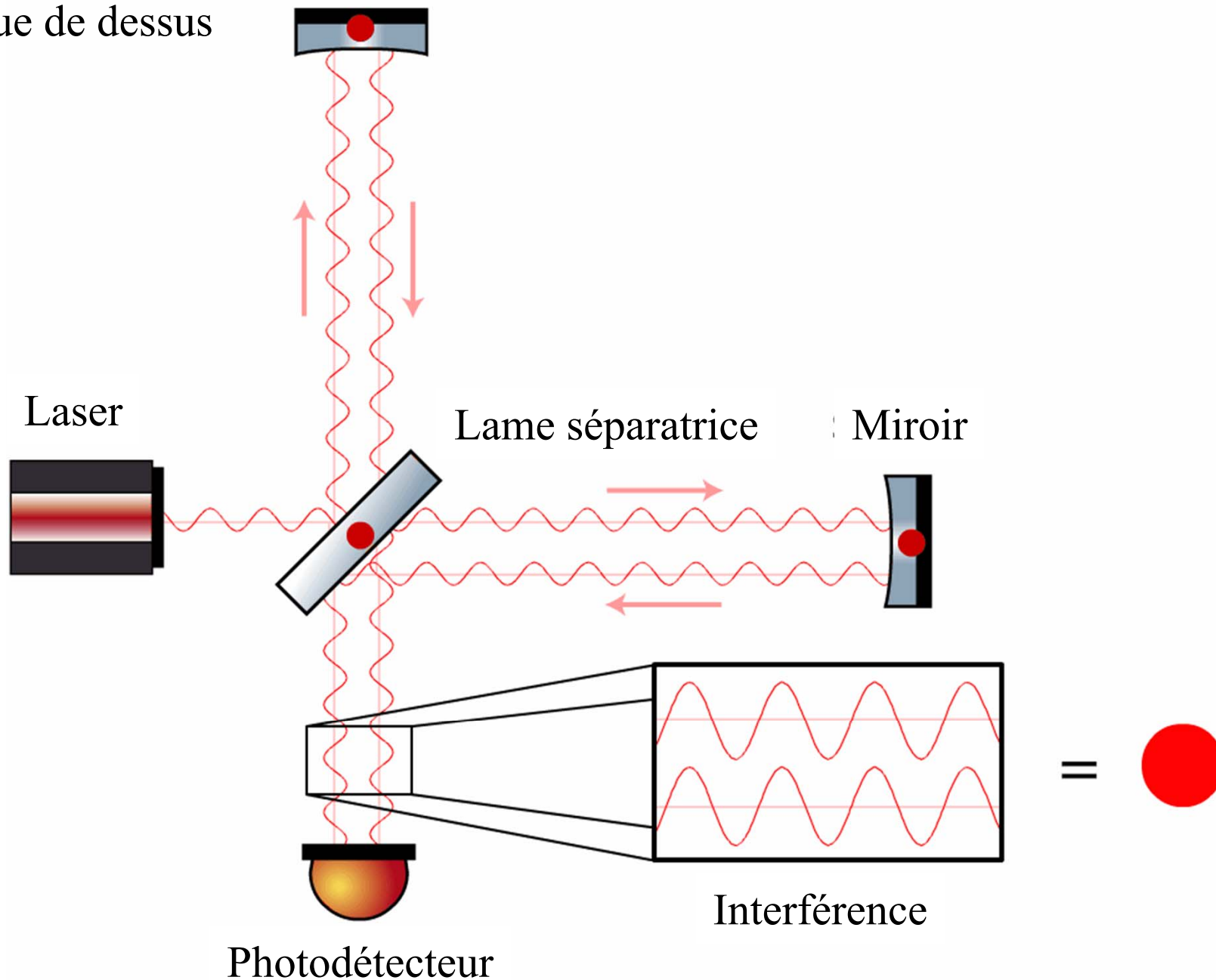


**Sensibilité**  $\propto \frac{1}{(\text{longueur des bras}) \times \sqrt{\text{puissance laser}}}$

Valeurs très petites

# Principe de fonctionnement

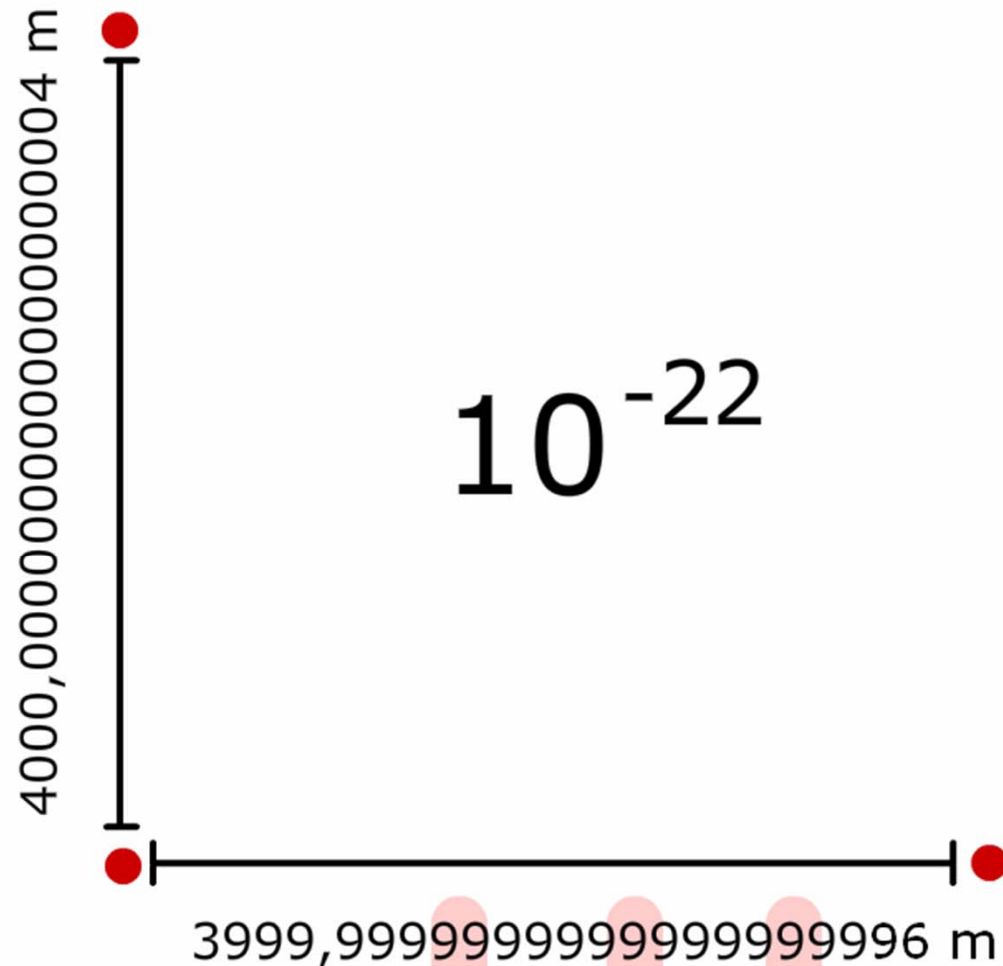
- Vue de dessus



# Une sensibilité record

- Variation relative de longueur ( $\Delta L/L$ ) très faible
  - De l'ordre d'une fraction de millièbre de milliardième de milliardième ( $10^{-21}$ ) !

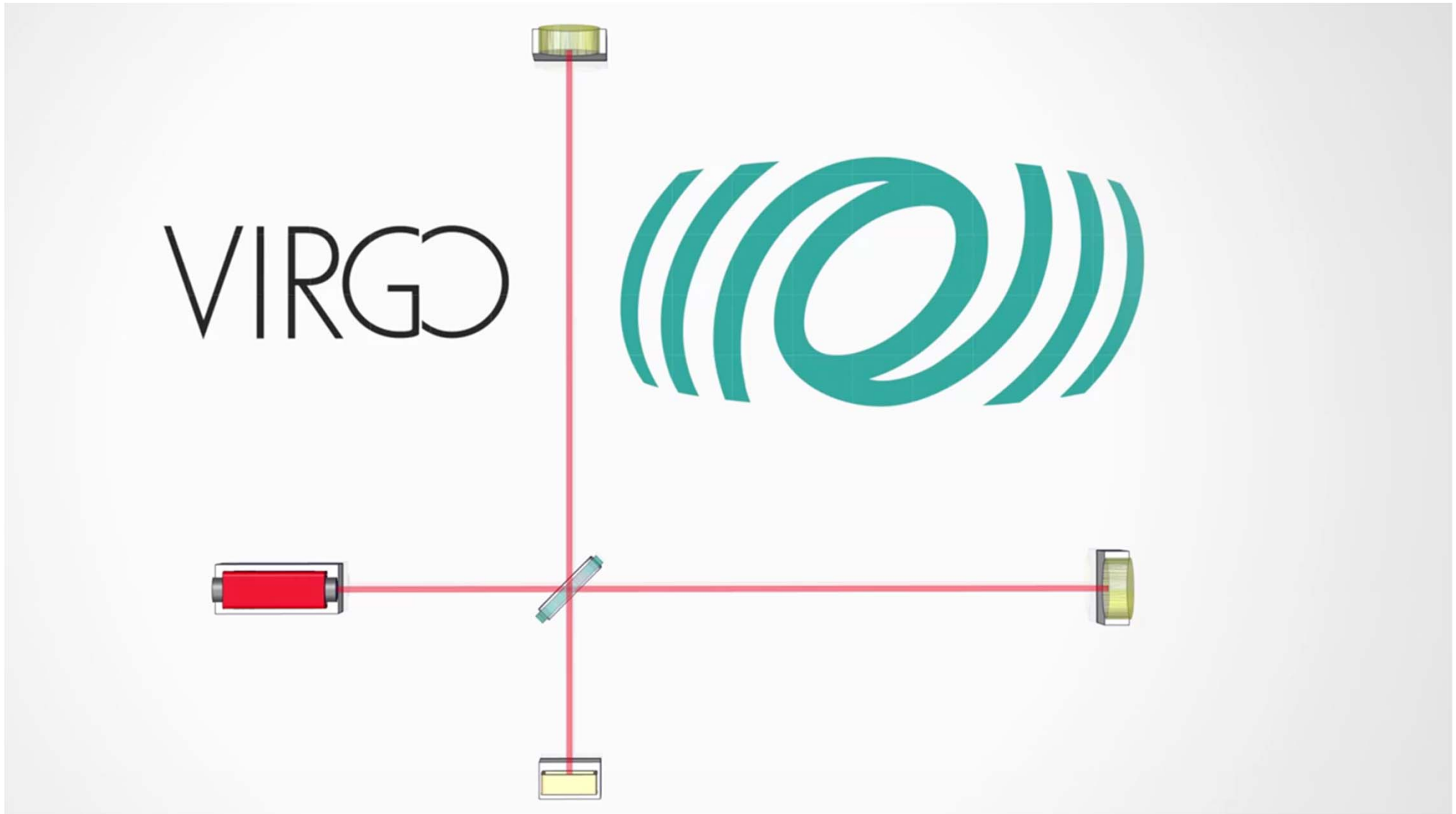
- $10^{-21}$ 
  - Taille d'un atome rapportée à la distance Terre-Soleil
  - Distance entre le Soleil et l'étoile Proxima du Centaure mesurée à 0,02 mm près



- Effet sur des longueurs de 4 km
    - Taille des détecteurs LIGO
- Milliardième de milliardième de mètre

# Un détecteur réel : Virgo avancé

- <https://www.youtube.com/watch?v=6raomYII9P4>, © Marco Kraan, Nikhef (Pays-Bas)



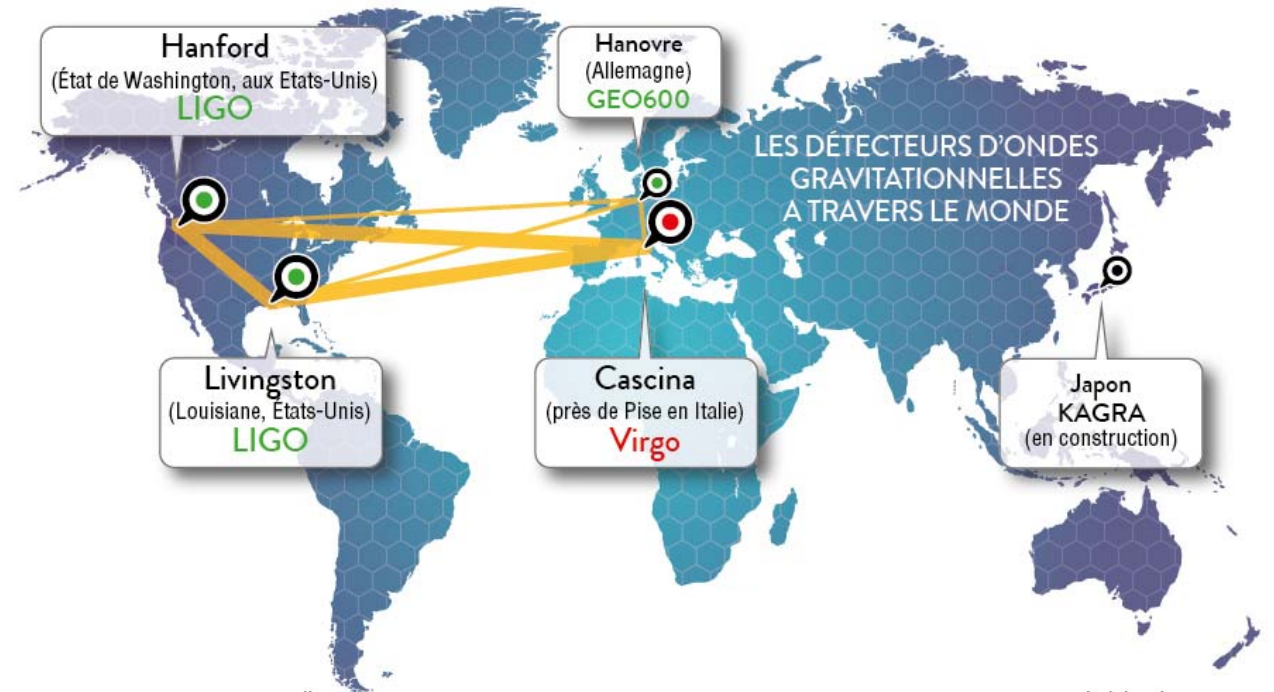
# Un réseau de détecteurs





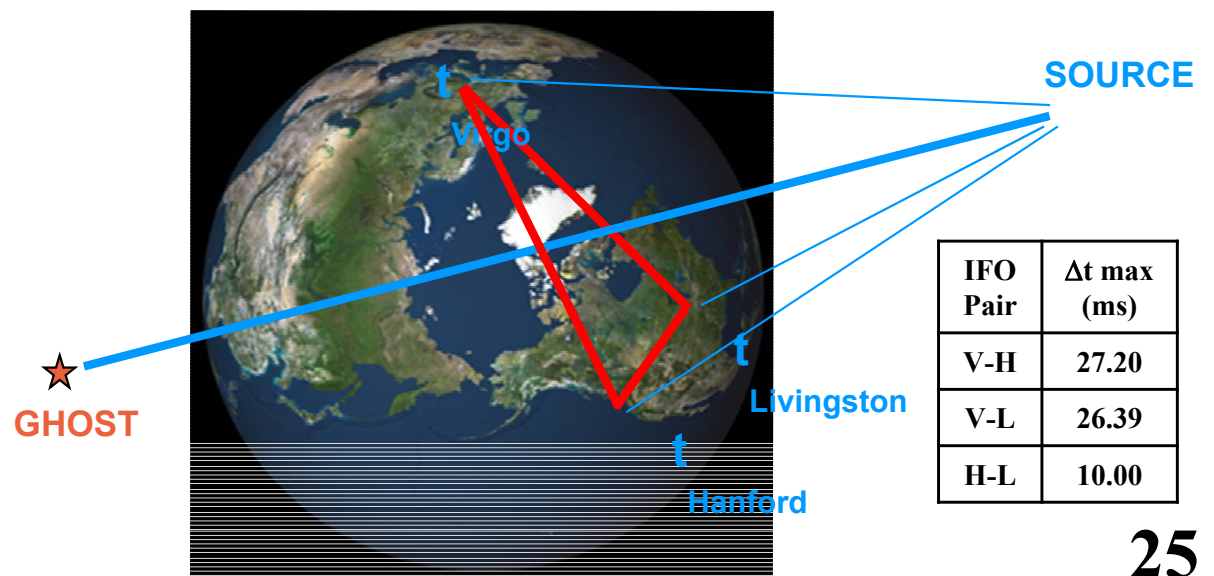
# Un réseau de détecteurs

- Un seul ITF ne suffit pas pour détecter les OGs
  - Difficile de séparer un signal de tous les bruits
  - Fausses détections annoncées dans le passé (barres) ...



→ Solution : utiliser un réseau d'interféromètres

- Accords de collaboration entre les différents projets
  - Partage des données, analyses et publications communes
- ITF : détecteurs non directionnels
- Triple coïncidence nécessaire pour reconstruire la position de la source dans le ciel

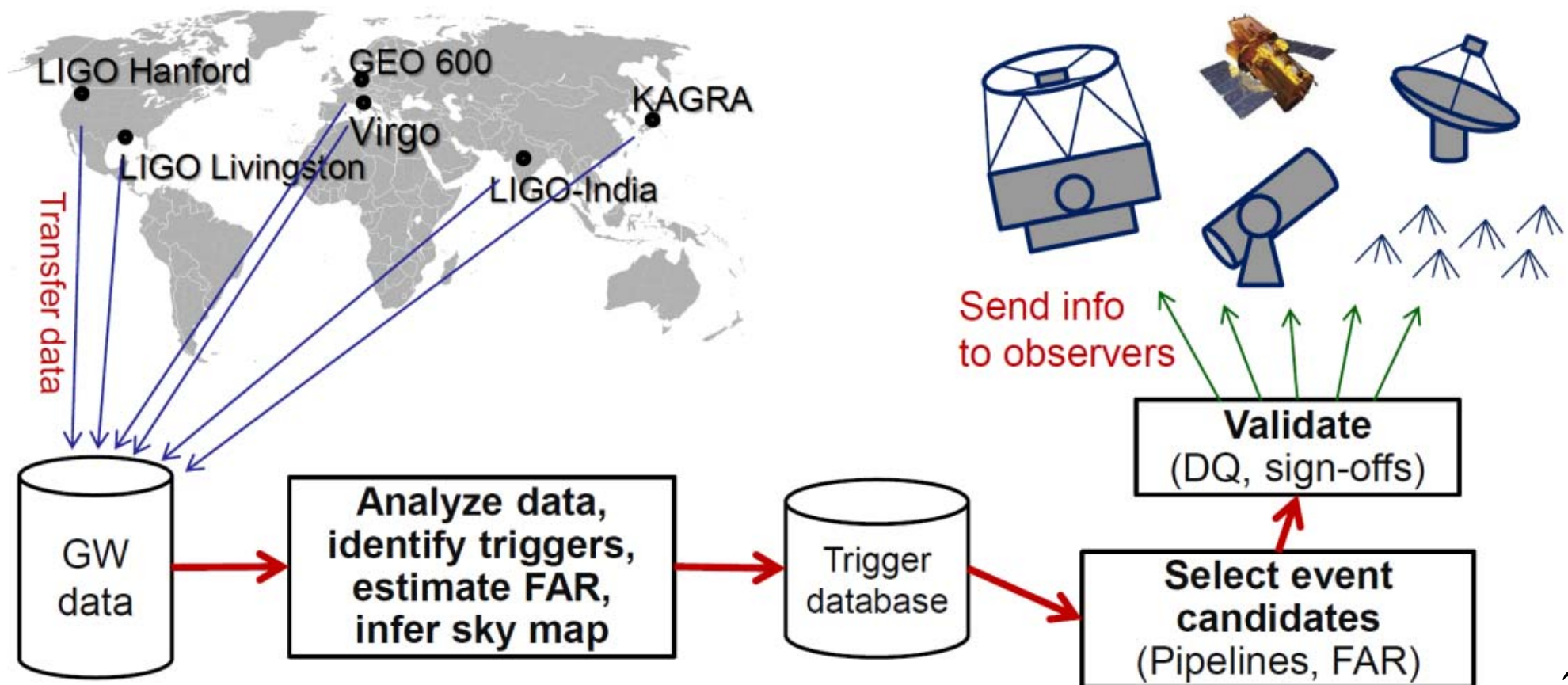


# Réseau : deux puis trois détecteurs

- **LIGO Livingston** et **LIGO Hanford**
  - **Prise de données « O1 »** : septembre 2015 → janvier 2016
  - **Maintenance et améliorations** : janvier 2016 → novembre 2016
  - **Prise de données « O2 »** : novembre 2016 → août 2017
- **Virgo**
  - **Programme d'amélioration « Virgo Avancé »** jusqu'à fin 2016
  - **Ensuite** : démarrage, rodage, amélioration des performances
  - **Démarrage de la prise de données le 1<sup>er</sup> août 2017**
- **Fin de « O2 » le 25 août 2017**
  - **Nouvelle phase de maintenance et d'améliorations pour les trois détecteurs**
- **Démarrage de la prise de données « O3 » prévue pour début 2019**
  - **Trois détecteurs** : LIGO + Virgo
  - **Pour environ un an**

# Un réseau de partenaires

- **Recherche de contreparties** au signal d'ondes gravitationnelles
    - Électromagnétiques
    - Neutrinos
    - Particules
- Des dizaines de télescopes partenaires



# Détections : 6<sup>(\*)</sup> !

(\*) 6 détections publiées à ce jour.

# 1916-2017 : un siècle de progrès

- **1916 : Prédications des OG (Einstein)**

**1957 : Conférence de Chapel Hill**

- **1963 : Trous noirs de Kerr**

- **1990's : développements théoriques pour la coalescence de systèmes binaires (Blanchet, Damour, Deruelle, Iyer, Will, Wiseman, etc.)**
- **2000 : Idem pour le cas de systèmes binaires de 2 trous noirs (Buonanno, Damour)**
- **2006 : simulations de la fusion de deux trous noirs (Baker, Lousto, Pretorius, etc.)**

*Théorie*

*Expérience*

(Bondi, Feynman, Pirani, etc.)

- **1960's : premières barres de Weber**
- **1970 : premier prototype d'ITF (Forward)**
- **1972 : Etudes de faisabilité détaillées (Weiss)**
- **1974 : PSRB 1913+16 (Hulse & Taylor)**
- **Années 1980 : Prototypes (~10 m de long) (Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)**
- **Fin des années 1980 : projets Virgo & LIGO**
- **Années 1990 : LIGO et Virgo financés**
- **2005-2011 : premières prises de données**
- **2007 : accord Virgo-LIGO – partage des données, analyses et publications communes**
- **2012 : financement des détecteurs avancés**
- **2015 : démarrage de LIGO avancé**
- **2017 : démarrage de Virgo avancé**

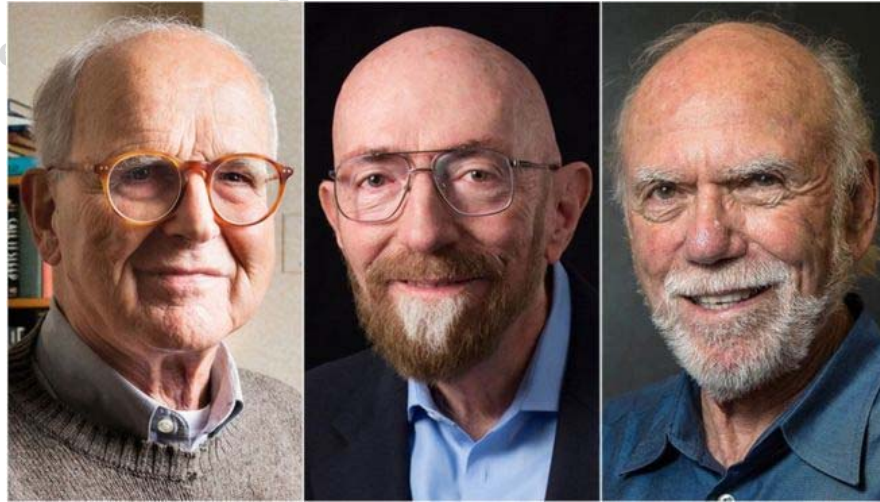
**Découvertes !**

# 1916-2018 : un siècle de progrès

- 1916 : Prédiction des OG (Einstein)

1957 : Conférence de

- 1963 : Trous noirs de Kerr



c.)

arres de Weber

type d'ITF (Forward)  
abilité détaillées (Weiss)  
6 (Hulse & Taylor)

types (~10 m de long)

(Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)

- Fin des



**Adalberto Giazotto**  
1940 - 2017

Années

2005-2

2007 :

2012 :

- 2015 : démarrage de LIGO avancé
- 2017 : démarrage de Virgo avancé

Découvertes !



- 2006 : simulations de la fusion de deux trous noirs (Baker, Lousto, Pretorius, etc.)

# Protocole

- Identification en temps (quasi-)réel d'un candidat « prometteur »
  - Programmes informatiques automatisés
  - Envoi d'une alerte interne LIGO-Virgo : téléphone, SMS, e-mail
- Examen de l'alerte par une équipe de scientifiques
  - Validation (ou rejet) du candidat
- Alerte envoyée aux télescopes partenaires
  - Localisation (plus ou moins précise) de la source dans le ciel
  - Recherche de contreparties
- Analyses détaillées / complètes des données de LIGO et de Virgo
  - Procédure longue et complexe mais fondamentale
  - Le « candidat » devient une « détection » ...
    - ... ou bien il est classifié comme « bruit » et rejeté
- Préparation de publications scientifiques
  - Annonce de la découverte

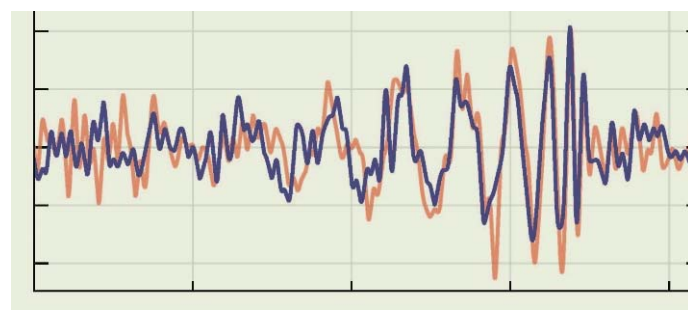
# **L'événement GW150914**



# 14 septembre 2015, 11:51 heure de Paris

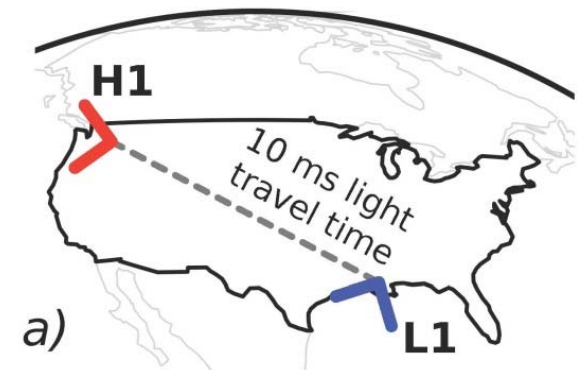
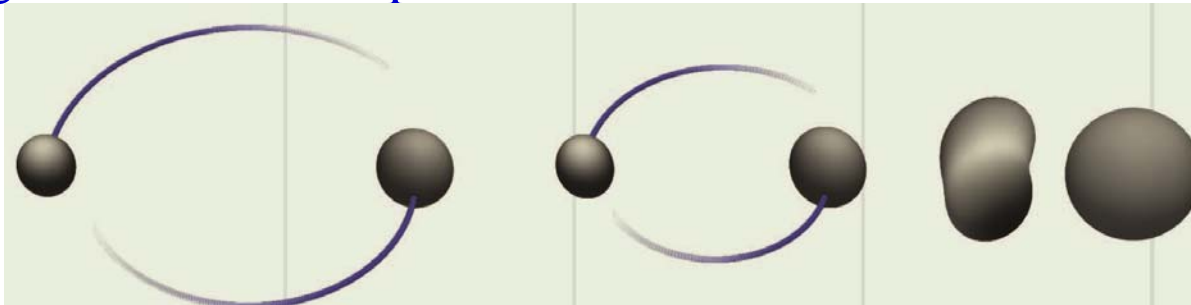
- Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle

- Très court ( $< 1$  s)
- Très fort
  - Par rapport au bruit de mesure
  - Très faible dans l'absolu



Evénement baptisé **GW150914**

- Signature attendue pour la « fusion » de deux trous noirs



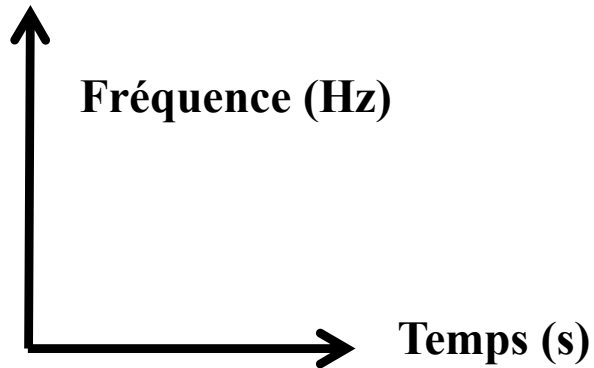
**LIGO Hanford**  
Etat de Washington, USA



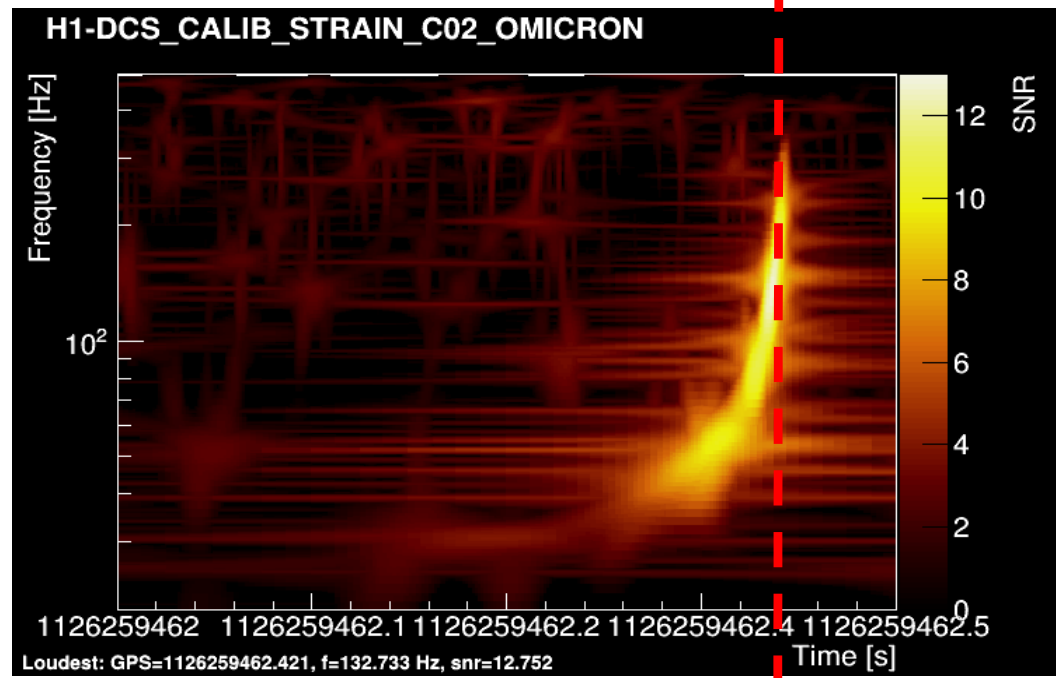
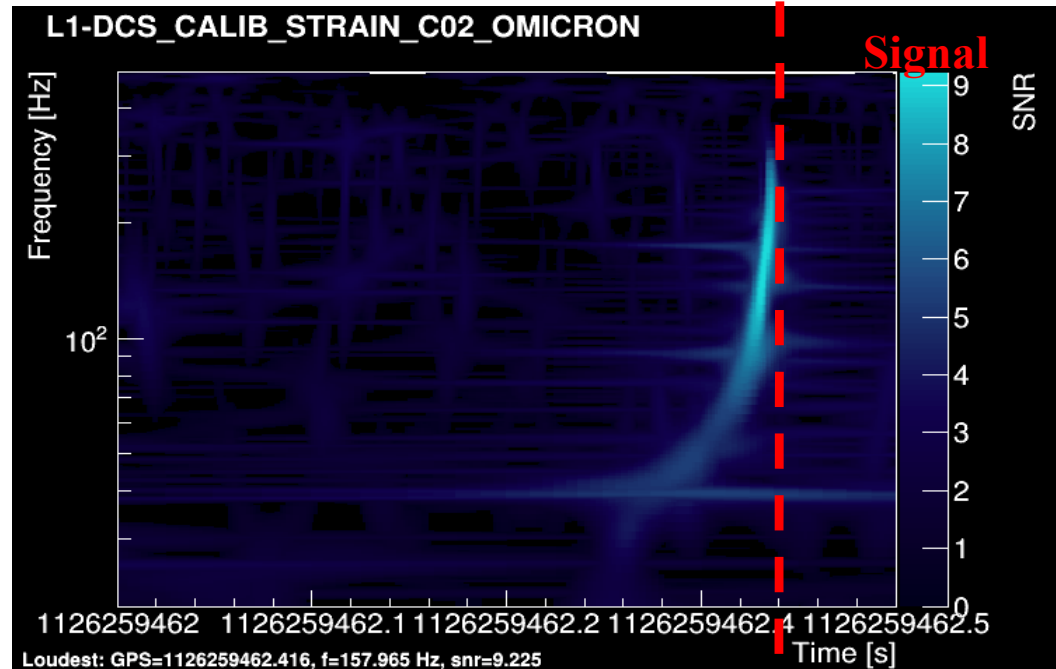
**LIGO Livingston** Louisiane, USA

# GW150914: spectrogrammes

- Cartes temps-fréquence



- Recherche d'excès d'énergie par rapport au bruit
  - Utilisation d'ondelettes
- L'excès doit être cohérent (et coïncident en temps) entre les deux interféromètres
- Fonctionnement en temps réel pour O1 !
- GW150914 est suffisamment fort pour être visible « à l'œil »



# Au fait, pourquoi deux trous noirs ?

- **Résultat des analyses !**
  - Le meilleur calque correspond à la fusion de deux trous noirs
  - Il reproduit très bien le signal mesuré

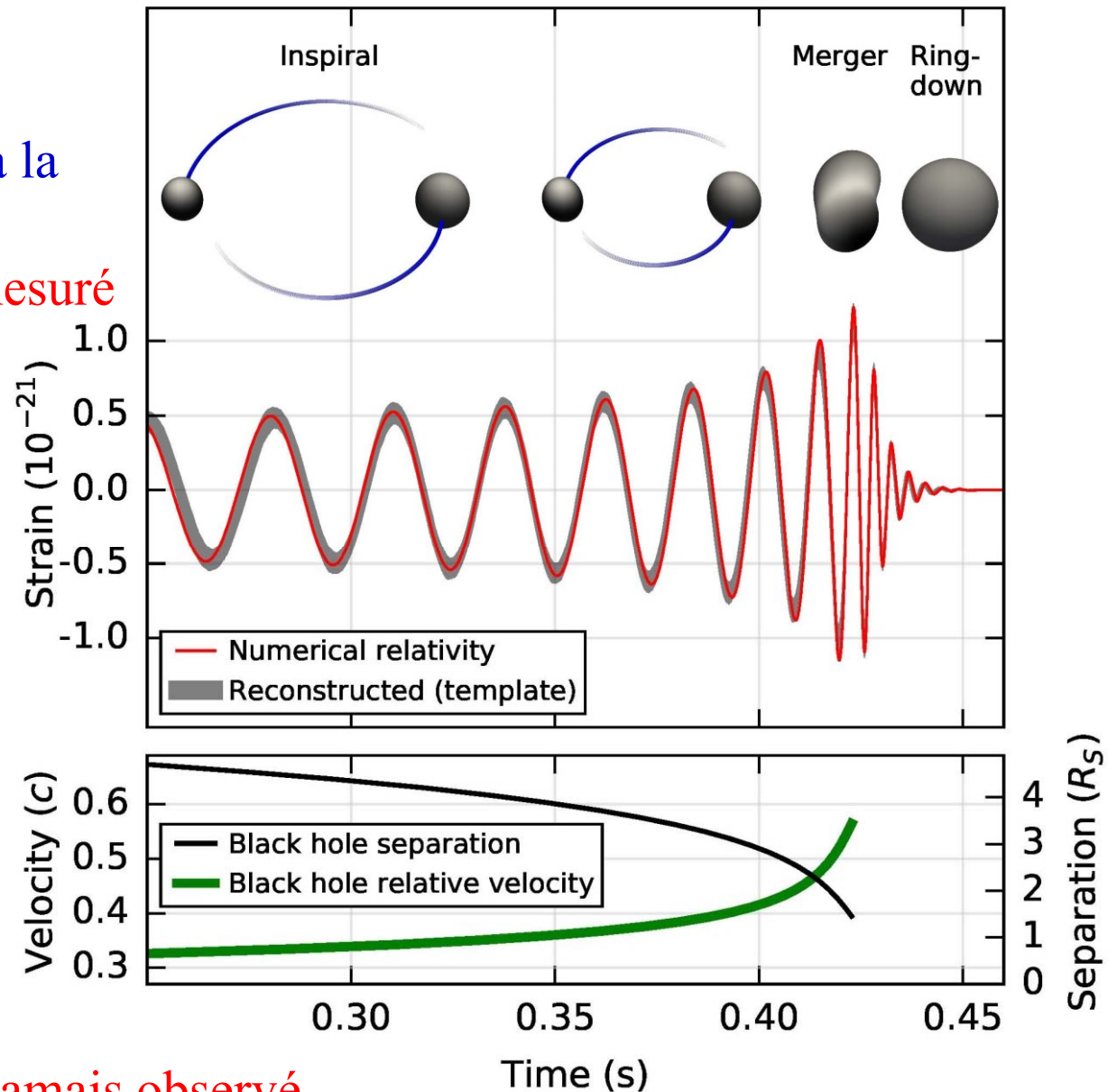
- Deux **objets massifs** et **compacts** en orbite l'un autour de l'autre à **75 Hz** (la moitié de la fréquence de l'OG), donc à une **vitesse relativiste** et qui se rapprochent très près avant de fusionner  
→ A peine quelques  $R_S$  !

→ Seuls des trous noirs peuvent correspondre à ces observations

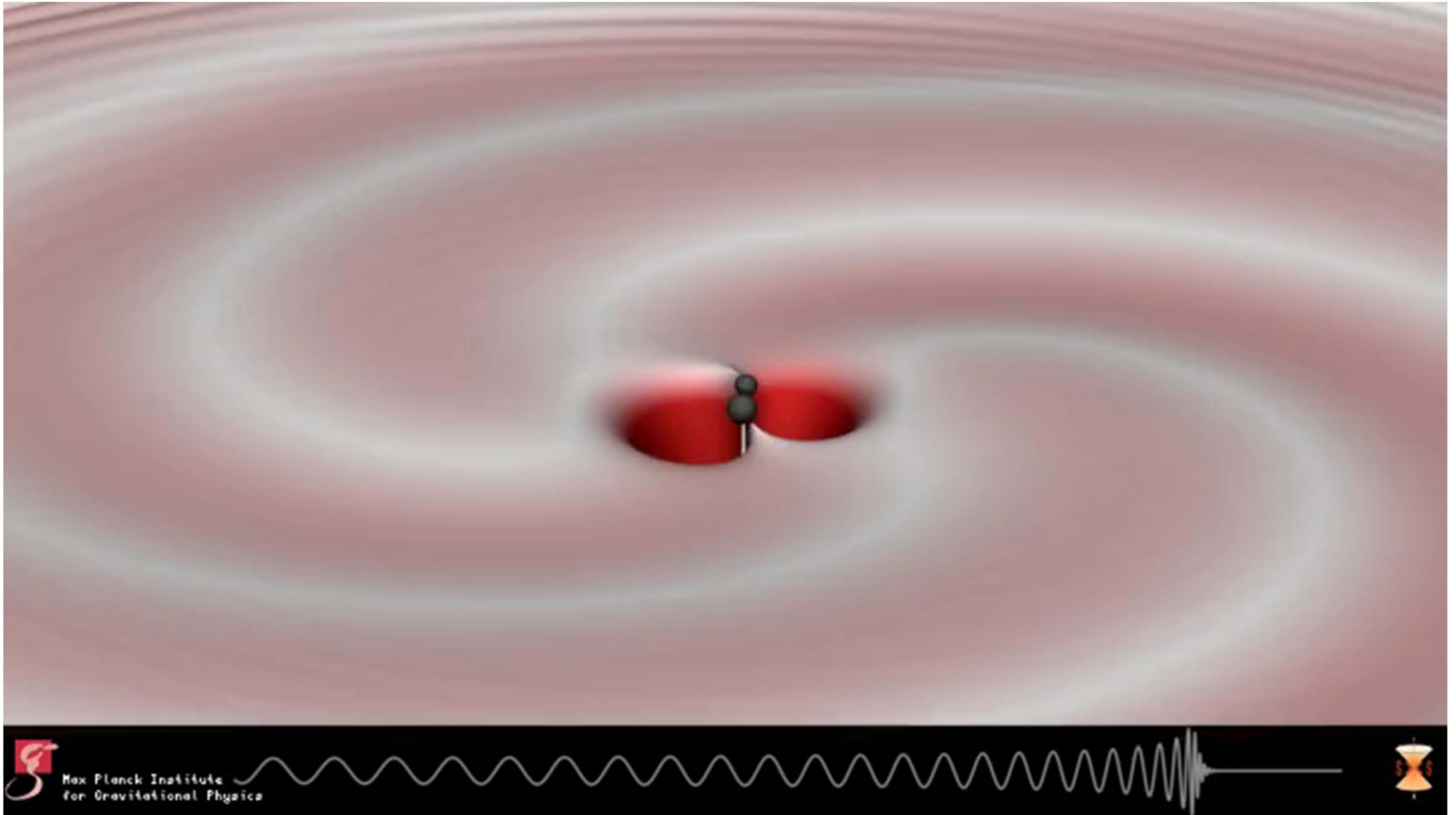
- $\sim 3 M_{\text{Soleil}}$  rayonnées en OG

- **L'événement le plus énergétique jamais observé**

- Plus que tous les sursauts gamma détectés jusqu'à aujourd'hui
- Puissance crête plus de 10 fois supérieure à celle émise par l'Univers visible



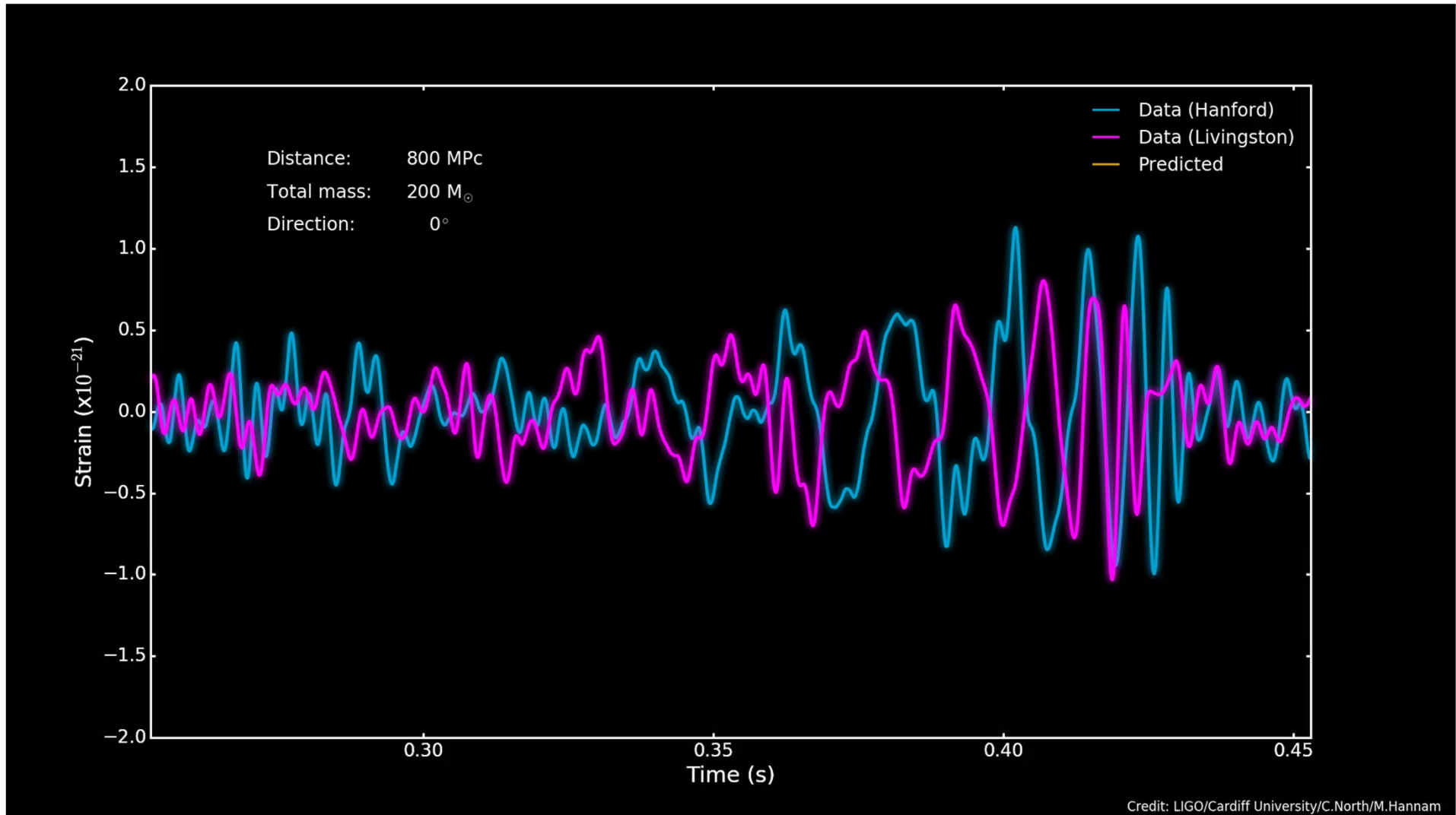
# Simulation de la fusion des deux trous noirs



# **L'événement GW170104**

# De la mesure à la source

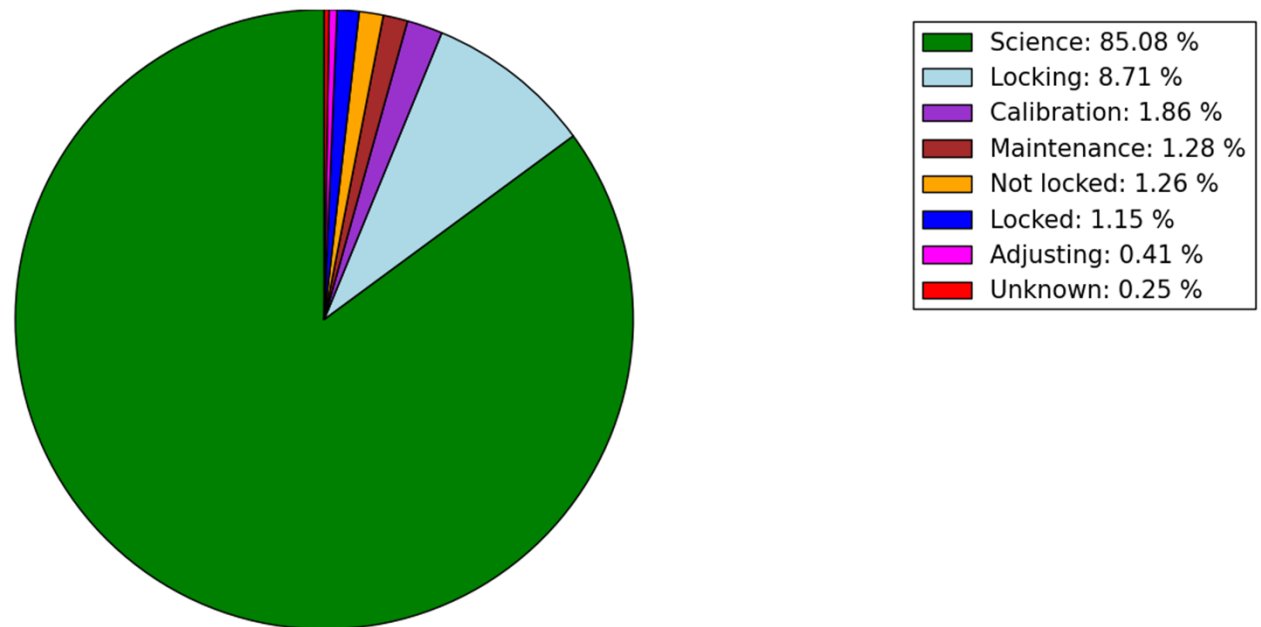
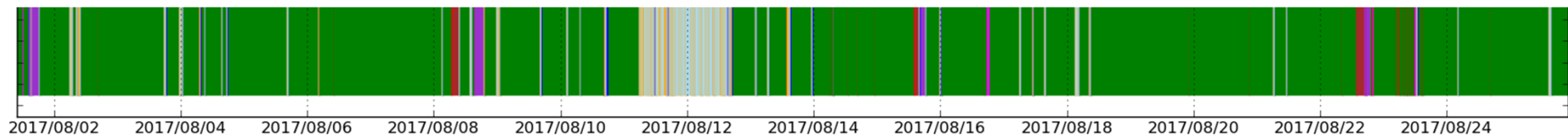
- **Mesure des paramètres** de la source du signal



**Prise de données**  
**« O2 » pour Virgo**  
**1<sup>er</sup> – 25 Août 25 2017**

# Résumé des quatre semaines de prise de données

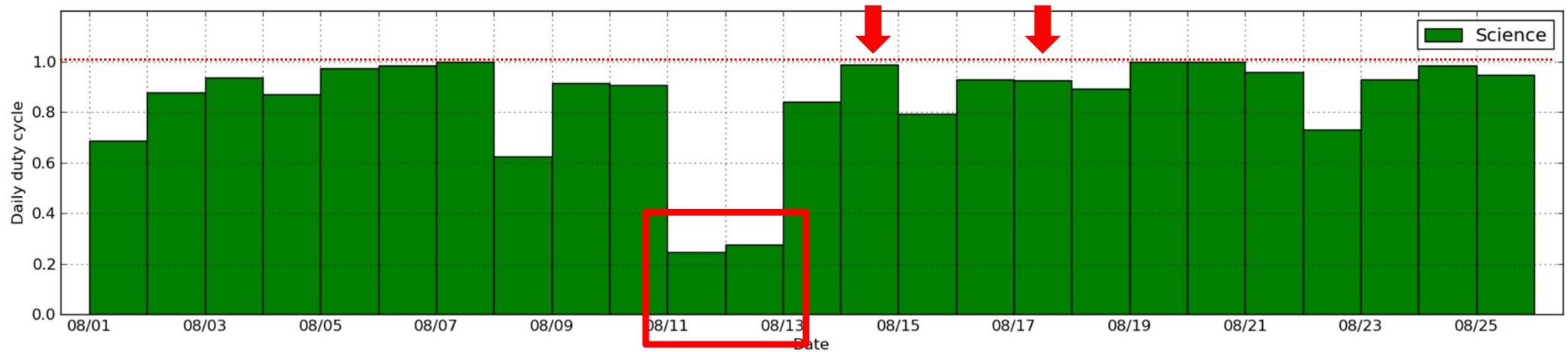
- **Cycle utile**
  - En fonction du temps
  - « Camembert » catégorie par catégorie





# Résumé des quatre semaines de prise de données

- Cycle utile
  - Suivi jour par jour

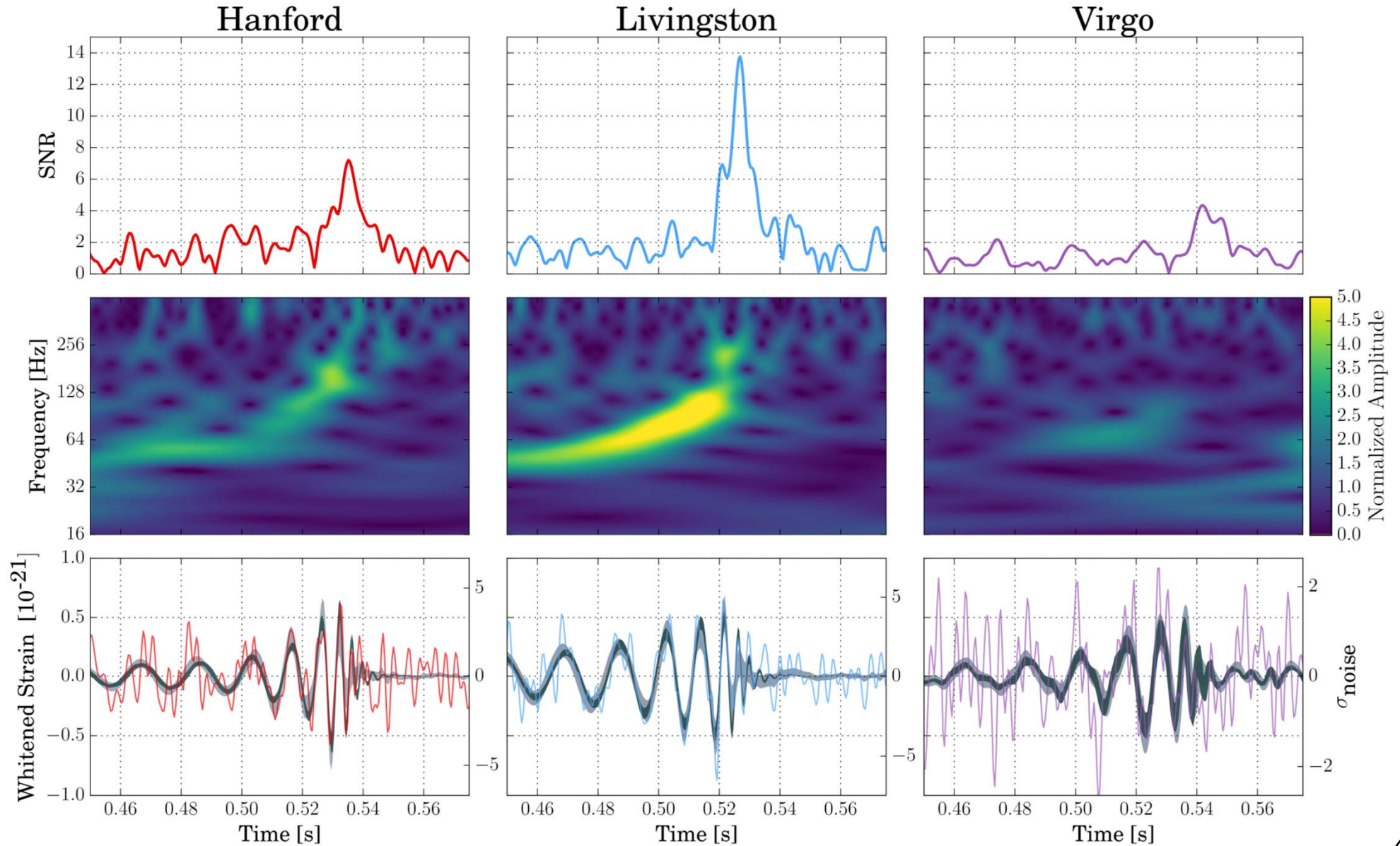


**Mauvaises conditions météorologiques  
→ Microséismes**

# **L'événement GW170814**

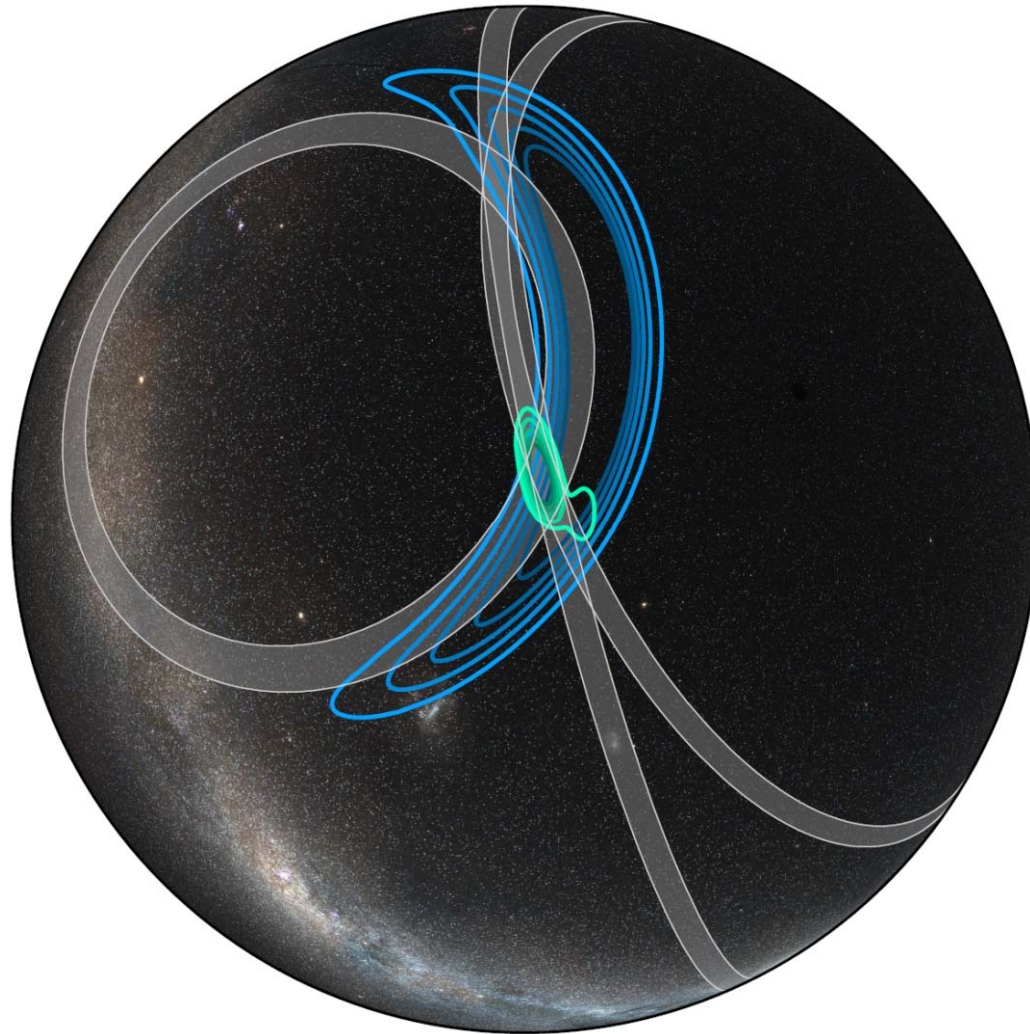
# Signaux détectés

- Des études détaillées confirment la présence d'un **signal dans le détecteur Virgo**



# Localisation LIGO-Virgo de la source dans le ciel

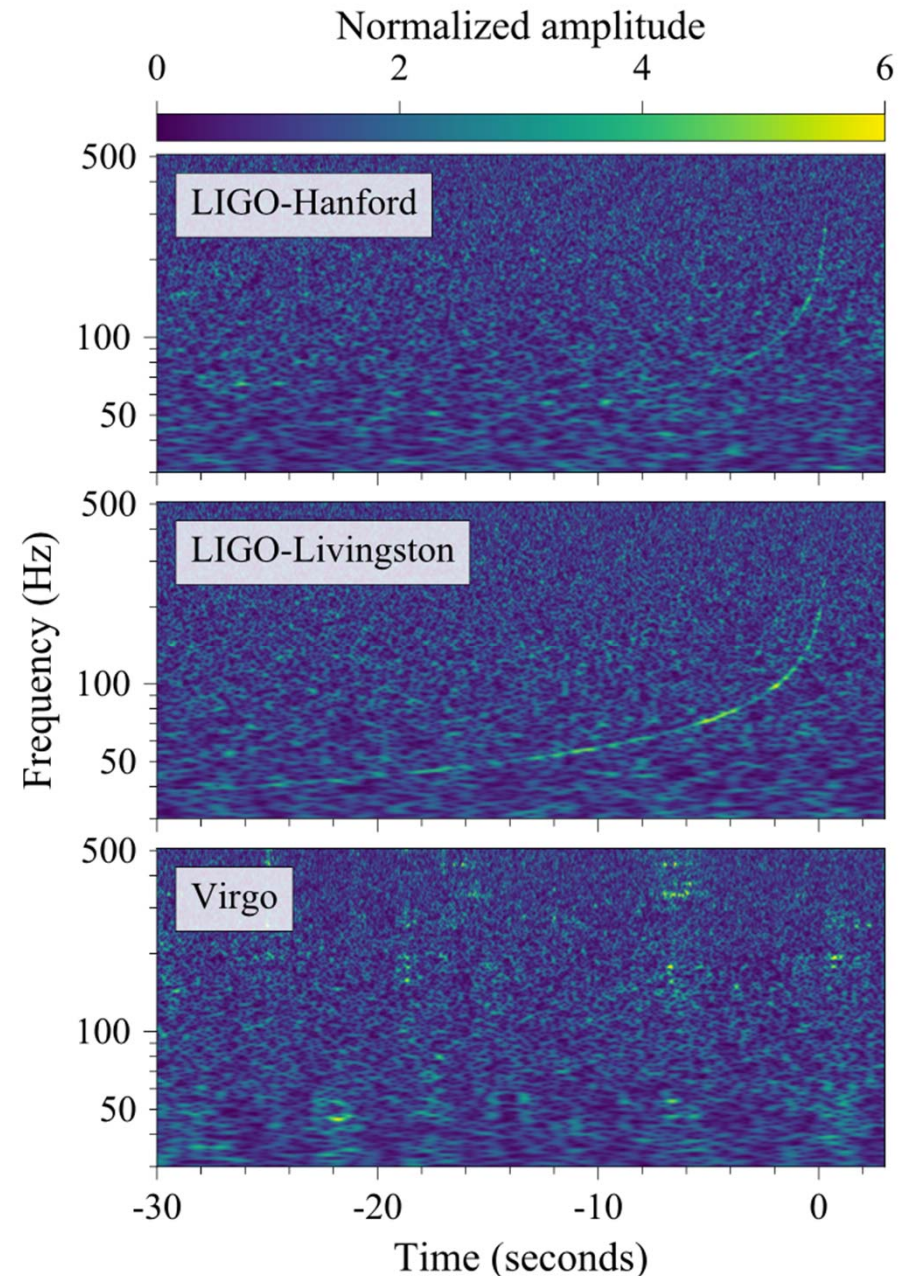
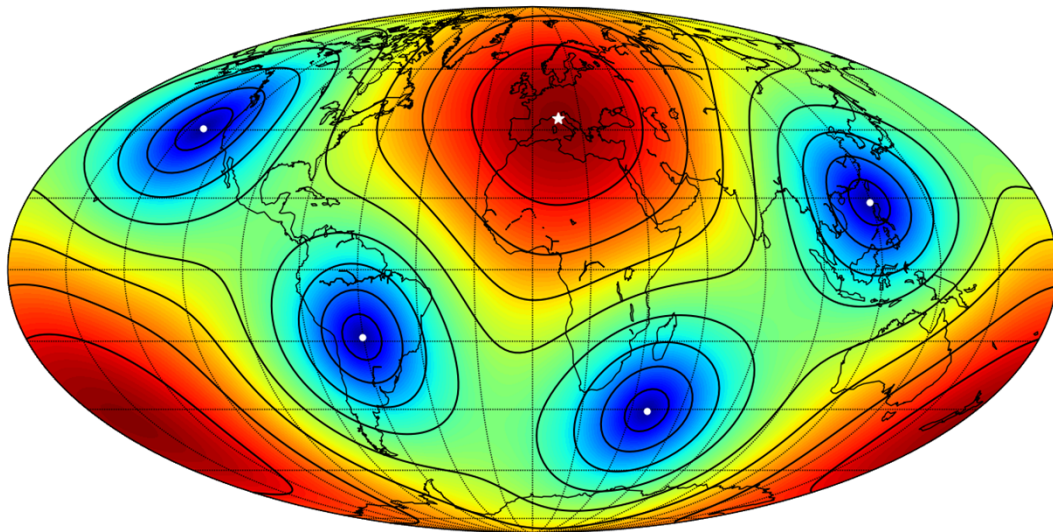
- **Triangulation**
  - Délais entre les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs
  - Différences de forme et d'amplitude entre ces signaux



# **L'événement GW170817**

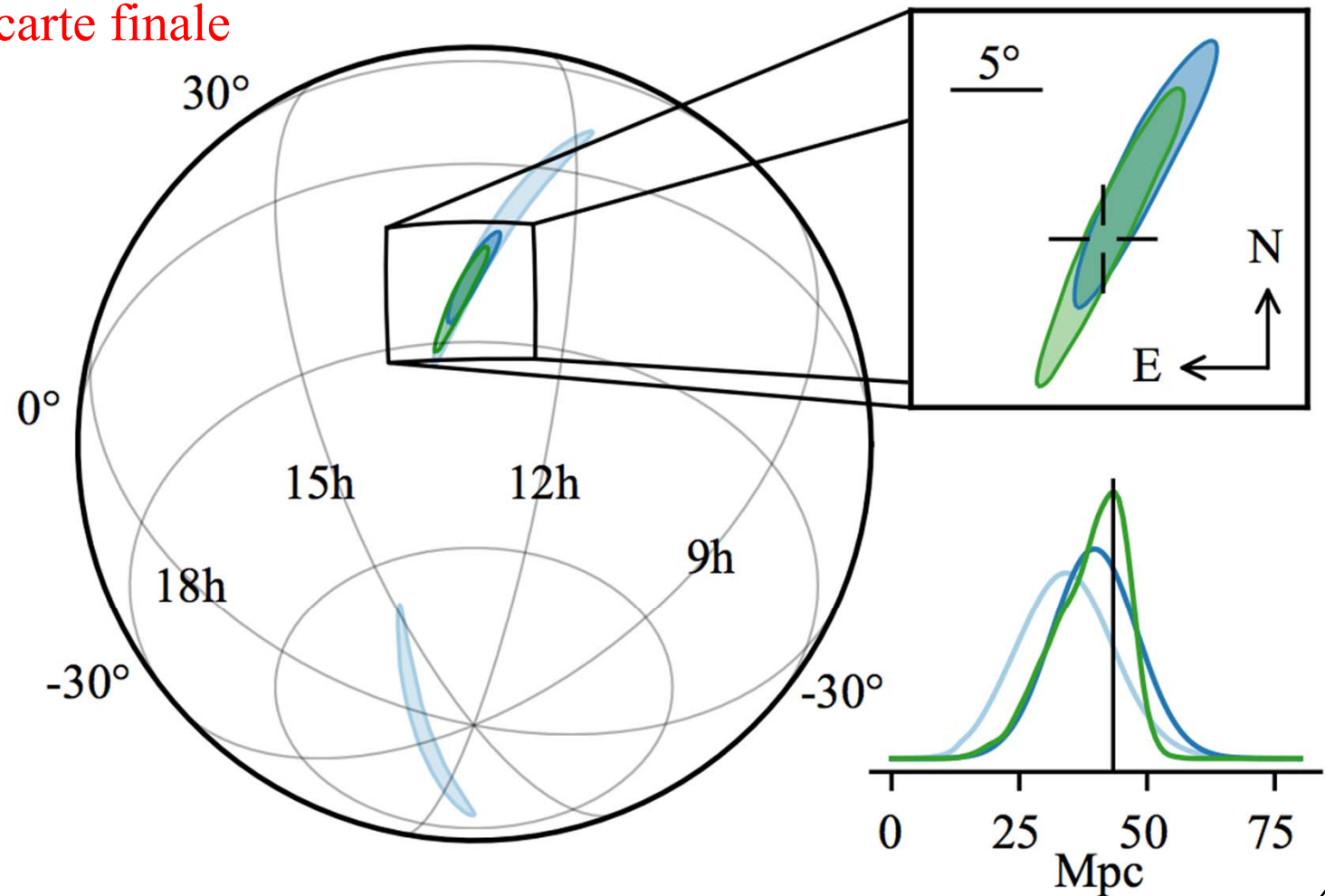
# Ondes gravitationnelles

- Visible à l'œil LIGO-Livingston
- Egalement assez visible dans LIGO-Hanford  
→ Différences de sensibilité
- Rien dans Virgo
  - Pourquoi ?  
→ Diagramme d'antenne!



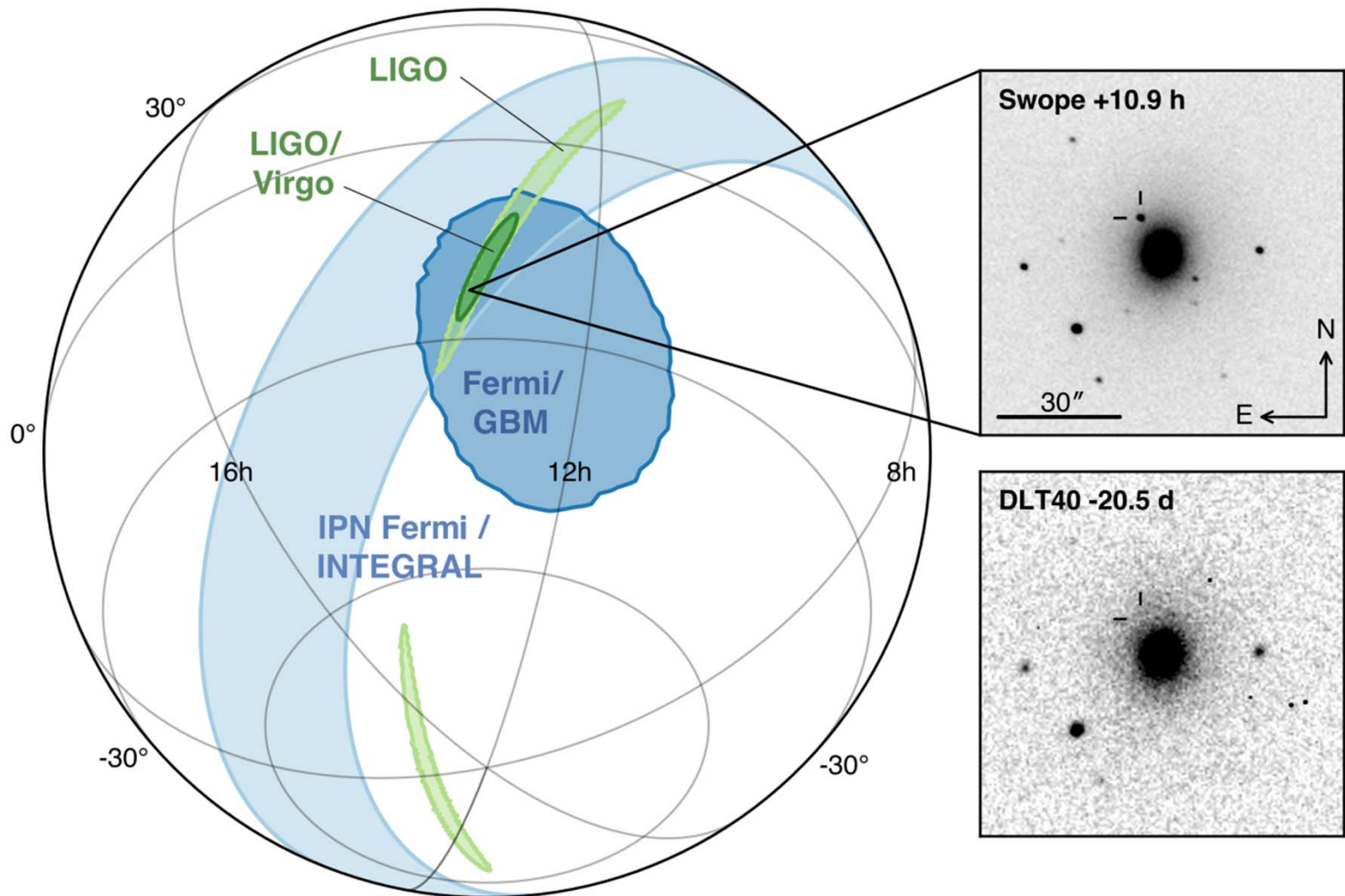
# Localisation de la source par LIGO-Virgo

- Bleu pâle : LIGO seul
- Bleu foncé : LIGO + Virgo, carte initiale
- Vert : LIGO + Virgo, carte finale



# Localisation de la source dans le ciel

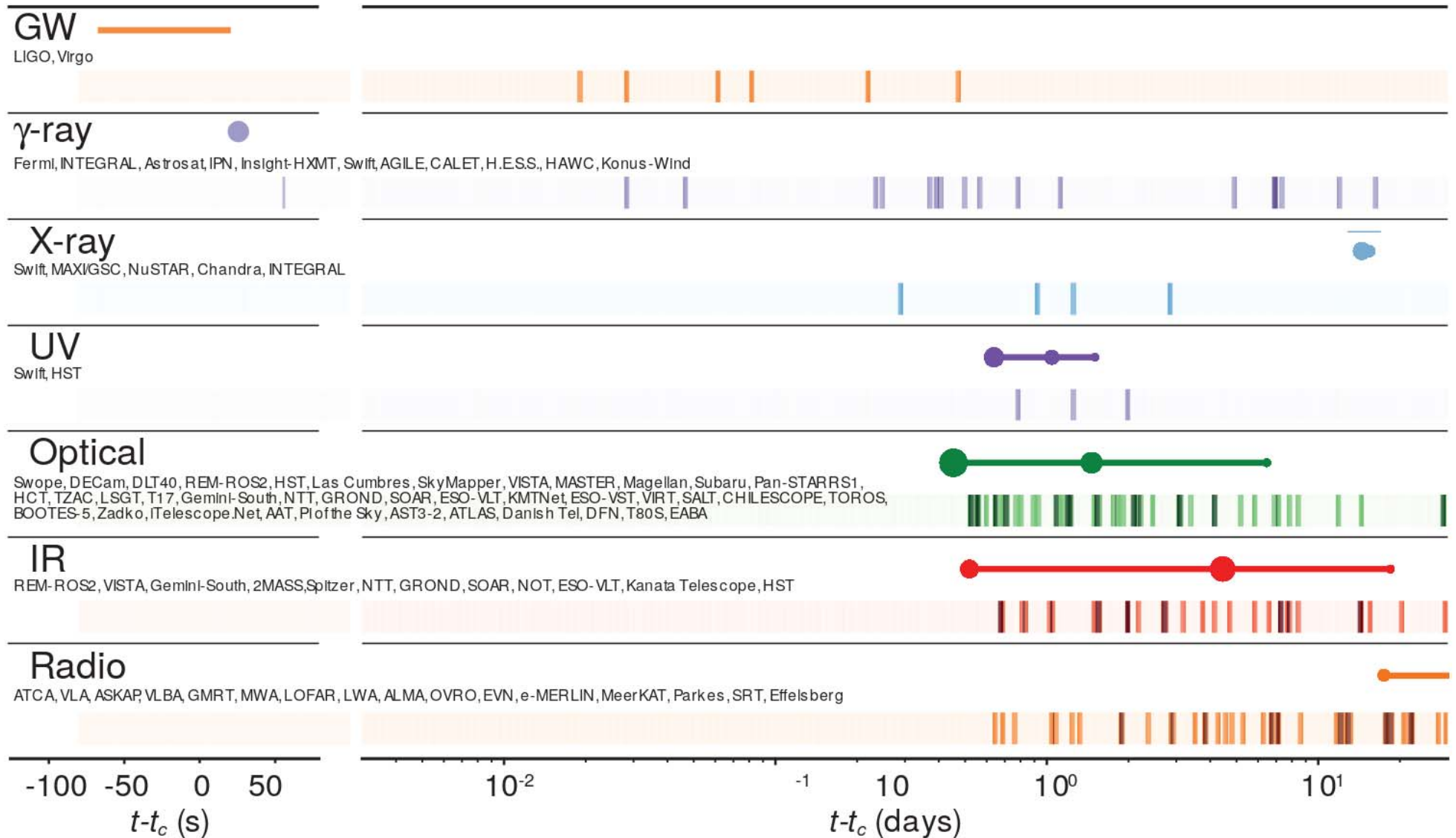
- Vert : LIGO et LIGO + Virgo
- Bleu : information des satellites observateurs de sursauts gamma – Fermi + Integral
- Découverte dans le visible
  - Telescope Swope au Chili





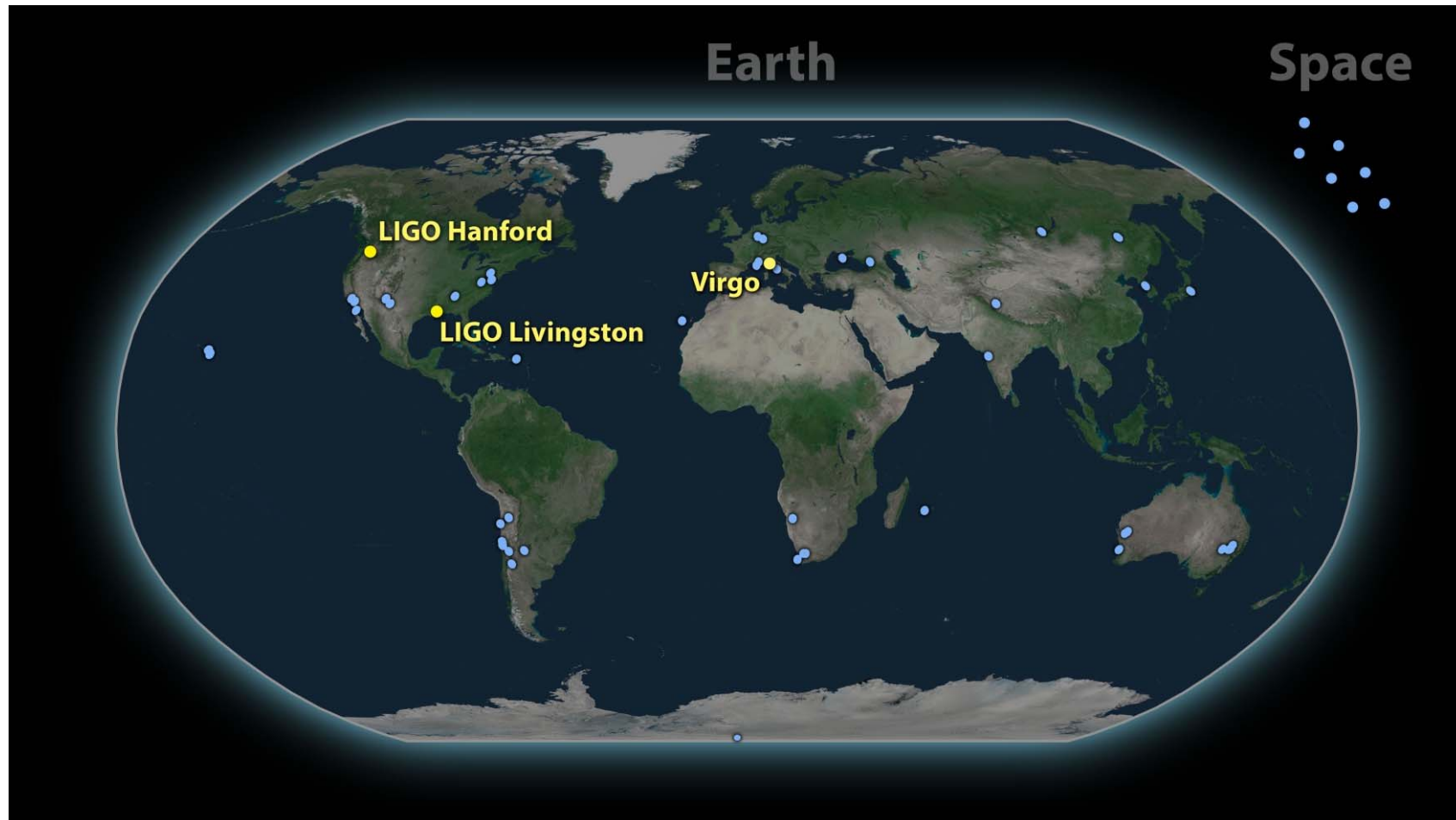
# Astronomie multi-messagers

- Ondes gravitationnelles, sursauts gamma, l'ensemble du spectre électromagnétique



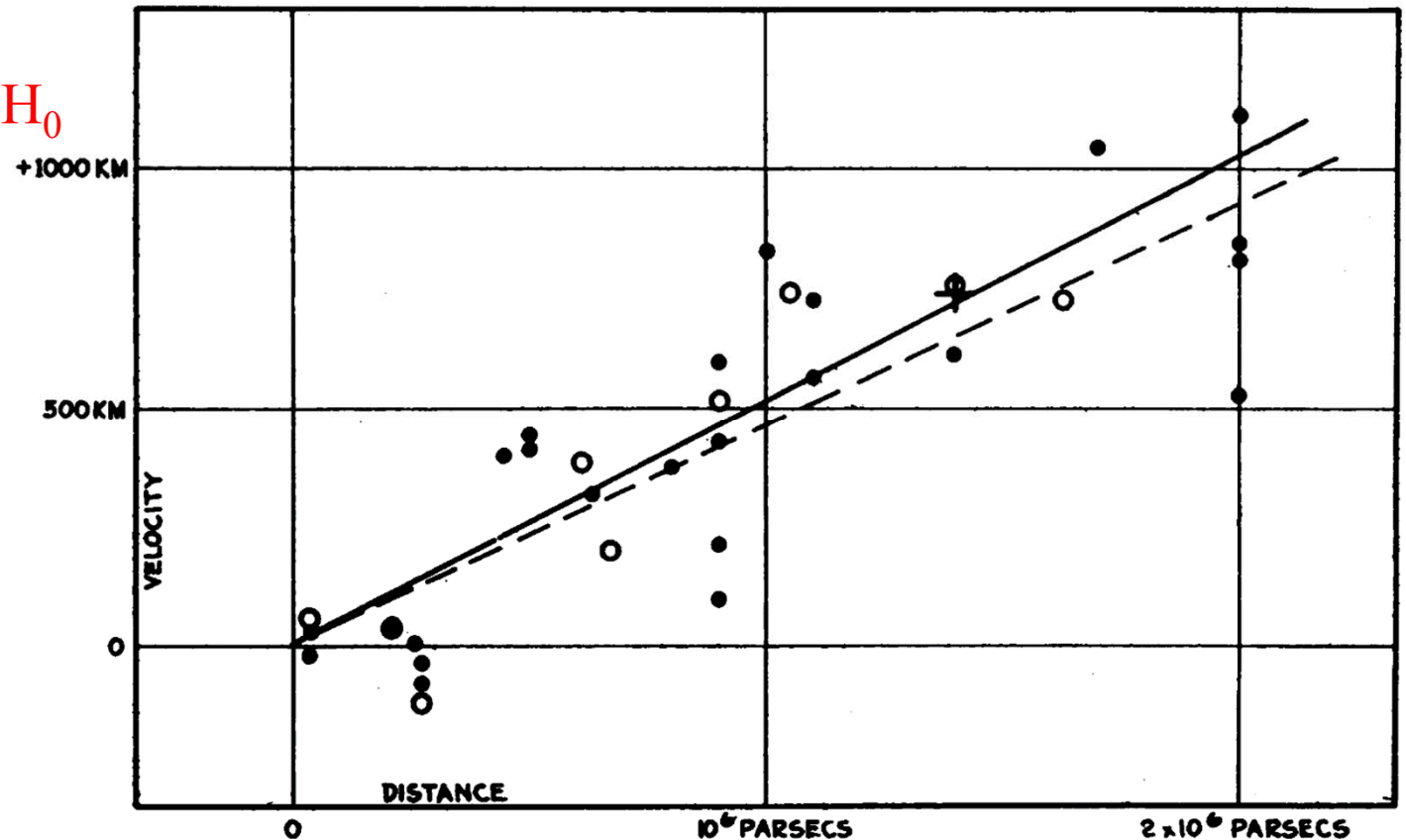
# Un suivi mondial

- Trois détecteurs d'ondes gravitationnelles
- Des dizaines d'observatoires partenaires



# Mesure de la constante de Hubble

- $v_H = H_0 \times d$  pour des sources proches ( $d \approx 50$  Mpc au plus)
  - $v_H$  : Vitesse de récession (vitesse radiale)
  - $H_0$  : Constante de Hubble
  - $d$  : Distance de la source
- Jusqu'à présent : deux techniques pour mesurer  $H_0$ 
  - Supernovae de type I
  - CMB
- $H_0 \approx 70$  km / s / Mpc
  - Tension entre les résultats obtenus par les deux méthodes
- Ondes gravitationnelles
  - Mesure nouvelle, indépendante des deux autres



# Mesure de la constante de Hubble

- $v_H = H_0 \times d$  pour des sources proches ( $d \approx 50$  Mpc au plus)

- $v_H$  : Vitesse de récession (vitesse radiale)
- $H_0$  : Constante de Hubble
- $d$  : Distance de la source

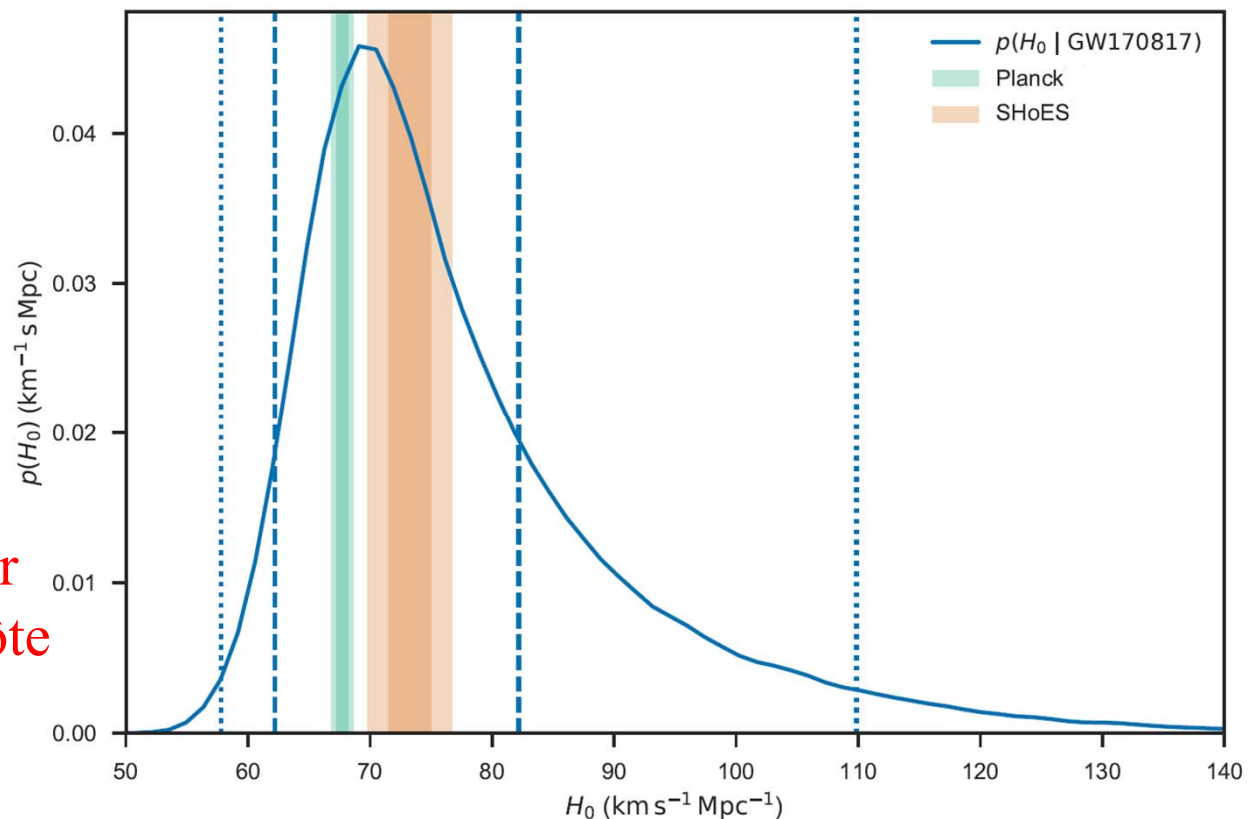
- Distance fournie par les ondes gravitationnelles

- $h \propto 1 / d$   
→  $d \approx 44$  Mpc

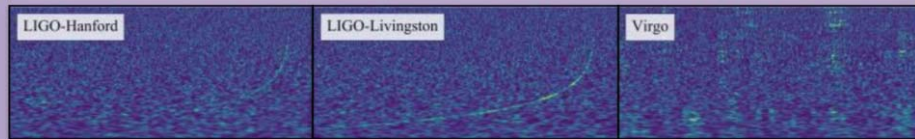
- Vitesse de récession donnée par l'identification de la galaxie hôte

- NGC 4993,  
constellation de l'Hydre  
→  $v_H \approx 3000$  km / s

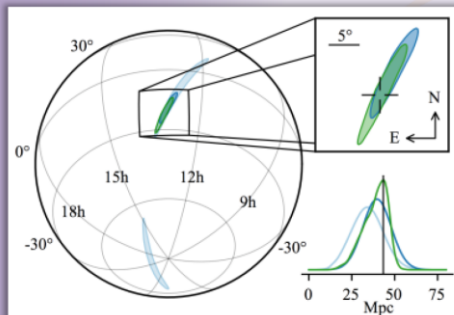
→  $H_0 = 70^{+10}_{-12}$  km / s / Mpc



## TOUT SUR GW170817



Observé par	H, L, V	Durée du signal entre 30 Hz et 2048 Hz**	~ 60 s
Type de source	Système binaire d'EN	Nombre de cycles pour le signal entre 30 Hz et 2048 Hz**	~ 3000
Date	17 Août 2017	Temps mis pour envoyer la 1 <sup>ère</sup> alerte aux astronomes*	27 min
Heure de l'événement	14:41:04 heure de Paris	Temps mis pour envoyer une carte du ciel HLV*	5 h 14 min
Rapport signal / bruit	32,4	Taille de la localisation HLV†	28 deg <sup>2</sup>
Taux de fausses alarmes	< 1 en 80 000 ans	Nombre de télescopes EM qui ont fait des observations de suivi de la source	~ 70
Distance	Entre 85 et 160 millions d'années-lumière	Longueurs d'onde dans lesquelles la source a été observée	Rayons gamma, rayons X, ultra-violet, visible, infrarouge, radio
Masse totale	Entre 2,73 et 3,29 M <sub>☉</sub>	Galaxie hôte	NGC 4993
Masse 1 <sup>ère</sup> EN	Entre 1,36 et 2,26 M <sub>☉</sub>	RA, Dec de la source	13 <sup>h</sup> 09 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup> , 23°22'53"
Masse 2 <sup>ème</sup> EN	Entre 0,86 et 1,36 M <sub>☉</sub>	Constellation	Hydre (hémisphère sud)
Rapport de masse	Entre 0,4 et 1,0	Angle de vue du jet (sans/avec identification de la galaxie)	≤ 56° et ≤ 28°
Energie rayonnée en OG	> 0,025 M <sub>☉</sub> c <sup>2</sup>	Mesure de la constante de Hubble (galaxie hôte identifiée)	Entre 62 et 107 km s <sup>-1</sup> Mpc <sup>-1</sup>
Rayon d'une EN de masse 1,4 M <sub>☉</sub>	Probablement ≤ 14 km		
Paramètre de spin effectif	Entre -0,01 et 0,17		
Precession du spin	Pas de contrainte		
Ecart entre la vitesse des OG et celle de la lumière	< quelques parties par milliard		



Images : cartes temps-fréquence (en haut), localisation de la source des OGs (ci-contre ; HL = bleu clair, HLV = bleu foncé, HLV améliorée = vert, position de la source visible = la mire)

EN = Étoile à Neutrons  
OG = Onde Gravitationnelle  
EM = Electromagnétique  
M<sub>☉</sub> = 1 masse solaire = 2 × 10<sup>30</sup> kg  
H/L= LIGO Hanford/Livingston, V=Virgo

Les intervalles donnés pour les paramètres sont à 90% de niveau de confiance.

\* Par rapport au temps de la fusion  
\*\* Estimation par maximum de vraisemblance  
† Région de crédibilité à 90%

## GW170817

Une fusion de deux étoiles à neutrons  
Une détection d'ondes gravitationnelles par LIGO-Virgo dont les contreparties électromagnétiques ont été observées par plus de 70 observatoires.



Distance  
130 millions d'années-lumière

Découverte  
17 août 2017

Type  
Fusion d'étoiles à neutrons

14 h 41 min 4 s heure de Paris  
Une onde gravitationnelle produite par une fusion d'étoiles à neutrons est détectée.

**onde gravitationnelle**  
Deux étoiles à neutrons, chacune de la taille de Paris mais pesant au moins autant que le Soleil, sont entrées en collision.

**sursaut gamma**  
Un sursaut gamma court est une bouffée intense de rayons gamma produits juste après la fusion.  
**+ 2 secondes**  
Détection d'un sursaut gamma.

GW170817 permet pour la première fois de mesurer directement le taux d'expansion de l'Univers avec des ondes gravitationnelles.

Détecter les ondes gravitationnelles émises lors d'une fusion d'étoiles à neutrons permet d'en apprendre plus sur la structure de ces astres étranges.

Cet événement "multi-messagers" confirme que des fusions d'étoiles à neutrons peuvent produire des sursauts gamma courts.

**kilonova**  
La désintégration de noyaux riches en neutrons forme une kilonova brillante qui produit des métaux lourds comme de l'or et du platine.  
**+10 h 52 m**  
Une nouvelle source brillante de lumière visible est détectée dans la galaxie NGCC4993, située dans la constellation de l'Hydre.

**émission de lumière rémanente**  
La matière éjectée par la fusion produit une onde de choc dans le milieu interstellaire. L'émission radio associée peut durer des années.  
**+11 h 36 m**  
Observation de l'émission infrarouge.

**+15 h**  
Détection d'une émission brillante dans l'ultraviolet.  
**+9 jours**  
Détection d'une émission de rayons X.

**Au**  
L'observation d'une kilonova a permis de montrer que les fusions d'étoiles à neutrons sont responsables d'une partie de la production des noyaux lourds (comme l'or) dans l'Univers.

Observer à la fois les ondes gravitationnelles et électromagnétiques produites par cet événement montre de manière convaincante que les ondes gravitationnelles voyagent à la même vitesse que la lumière.  
**+16 jours**  
Détection d'une émission en ondes radio.

# L'importance de GW170817

- Première fusion de deux étoiles à neutrons détectée
  - Ondes gravitationnelles + spectre électromagnétique
- Premier événement en ondes gravitationnelles dont la source est identifiée et suivie par de très nombreux télescopes de par le monde
  - Kilonova
- Une partie au moins des sursauts gamma courts sont générés lors de fusions d'étoiles à neutrons
- Les fusions d'étoiles à neutrons peuvent jouer un rôle important dans la formation des éléments chimiques lourds (au-delà du fer) dans l'Univers
- Mesure indépendante de la constante de Hubble
  - Taux d'expansion de l'Univers
- Confirmation expérimentale de la validité de la relativité générale
  - Accord prédictions – mesures contraignent fortement les théories alternatives

**Et maintenant ?**

# Programme d'améliorations

- Entre la **fin de la prise de données O2** (août 2017) et le **démarrage de O3** (début 2019)
- Caractérisation du détecteur jusqu'à la Toussaint 2017
- Puis : remplacement de composants du détecteur / installation de nouveaux éléments
  - **Suspensions des miroirs** : fils d'acier → fils en verre (silice fondue)
  - Augmentation de la **puissance laser** – disponible comme utilisée
  - Diminution du **bruit de comptage des photons** – dominant à haute fréquence
- **Nouvelle période de caractérisation / apprentissage / amélioration depuis le printemps**
  - Détecteur en partie « nouveau »
  - Conditions de fonctionnement modifiées
  - Résolutions de problèmes (pannes, remplacements, etc.)
  - Maintenance

→ **Equilibre à trouver entre les différentes phases**
- **But à court terme : être prêt pour O3 !**
  - Démarrage en même temps que LIGO
  - Sensibilité
  - Cycle utile
  - Stationarité et stabilité du bruit



# Prise de données O3

- Amélioration de la sensibilité et du cycle utile des détecteurs  
→ (Beaucoup) **plus de détections**
  - **Nouveau système d'alerte** pour les « candidats ondes gravitationnelles »
    - **Ouvert** et **public** !  
→ Si vous êtes intéressé.e ...
    - **Latence** la plus basse possible (~minutes)
    - **Validation** a posteriori (~heures) et **rétractation** éventuelle
    - **Automatisation**
- **Efficacité élevée / bas taux de fausses alarmes**

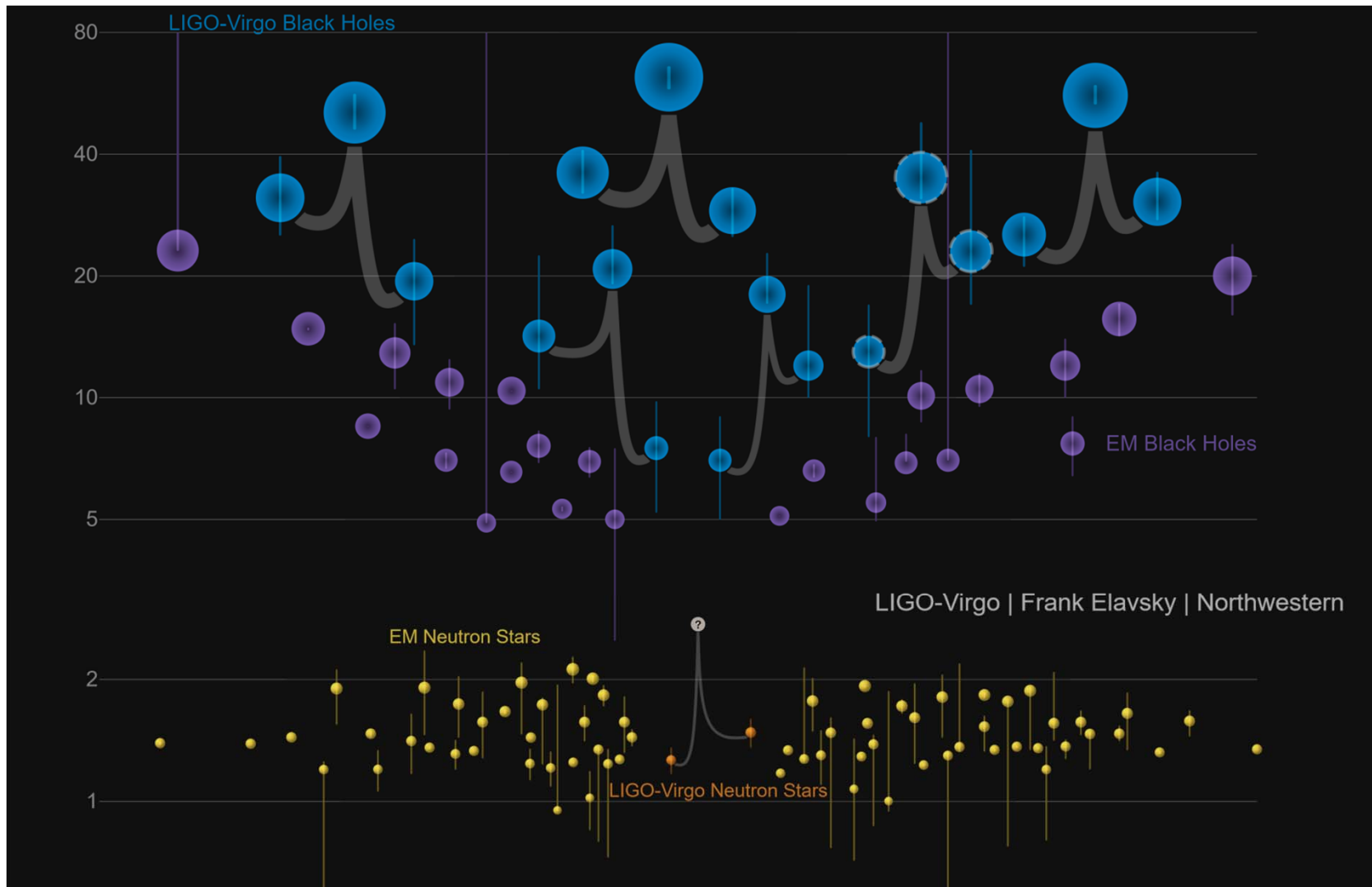
# Au niveau de Virgo

- Processus en cours d'élargissement de la collaboration
  - Nouveaux groupes / pays
    - Ressources humaines et/ou financières, expertise, expérience
- Après la prise de données O3
  - Un an d'arrêt : nouvelles améliorations, phase d'apprentissage ...
  - Prise de données O4 : au moins une année
- Long-terme (2023 →) : projet « Advanced Virgo +  
→ Atteindre les limites de l'infrastructure actuelle
  - Approbation par les tutelles en cours
  - Validation par un comité international d'experts au premier semestre 2019
  - Documents préparatoires : scientifiques, techniques, H&R, financement
- Lancement de la constellation de satellites LISA vers 2031-2034
- Projet d'instrument (au sol) de troisième génération
  - Le « **Télescope Einstein** » (ET)

# Conclusions

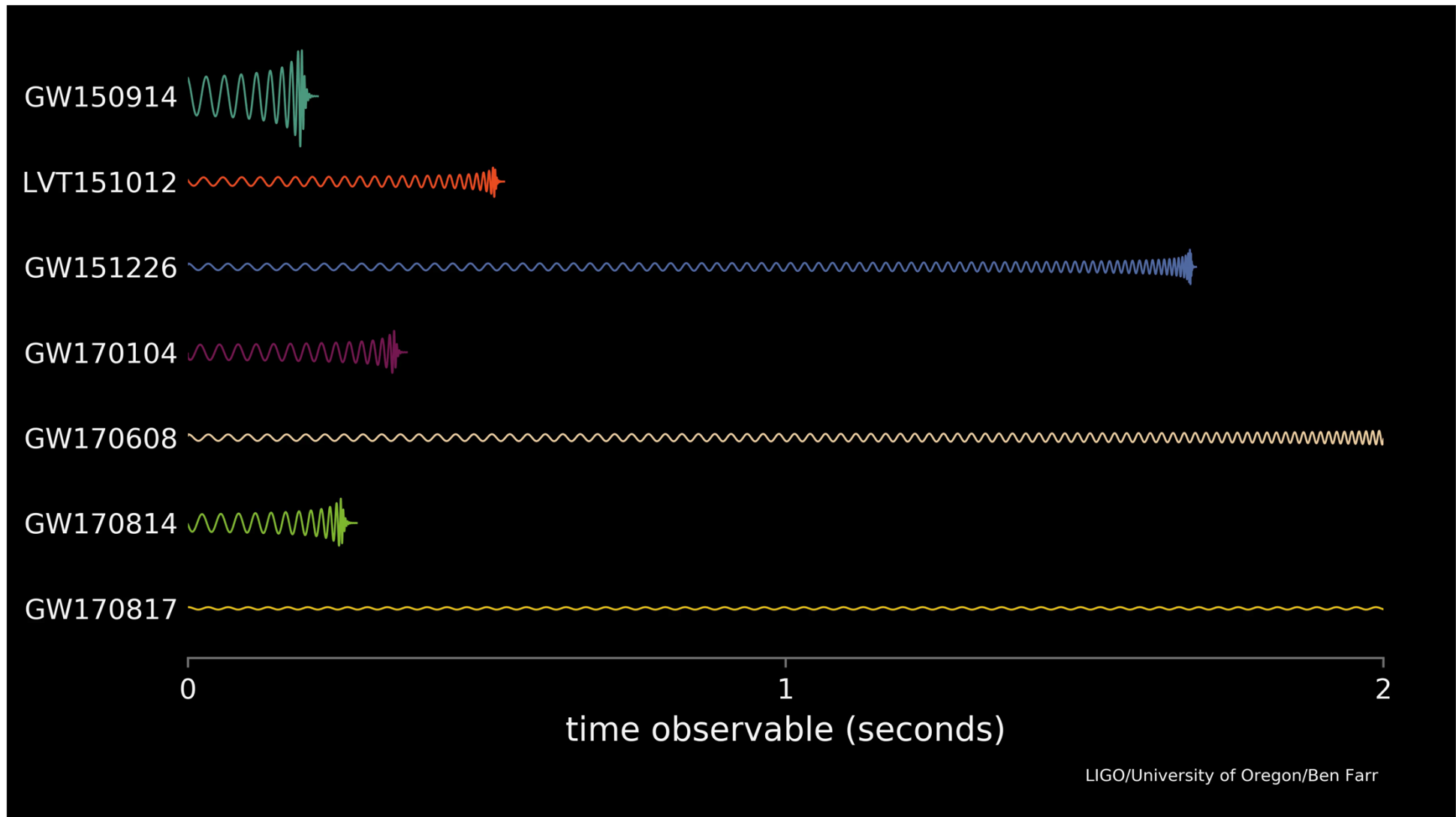
# Détections

- Cinq coalescences de systèmes binaires de trous noirs
  - GW150914, GW151226, GW170104, GW170814, GW170608
- Une fusion de deux étoiles à neutrons : GW170817



# Détections

- Cinq coalescences de systèmes binaires de trous noirs
  - GW150914, GW151226, GW170104, GW170814, GW170608
- Une fusion de deux étoiles à neutrons : GW170817



# Conclusions

- Le **réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles** est maintenant une **réalité**
  - Les détecteurs détecteurs LIGO avancés ont pris leurs premières données en septembre 2015 et ont détecté les signaux **GW150914, GW151226, GW170104, GW170608**
  - **Virgo avancé a rejoint LIGO le 1<sup>er</sup> août 2017**
    - Deux découvertes supplémentaires annoncées
      - ◆ **GW170814** : Première triple détection publiée
      - ◆ **GW170817** : Première détection d'une fusion d'étoiles à neutrons  
+ astronomie multi-messagers
- Agrandissement du réseau dans les prochaines années
  - **KAGRA** (Japon) devrait rejoindre LIGO & Virgo avant la fin de la décennie
  - Peut-être un 3<sup>ème</sup> détecteur LIGO (**LIGO-India**) d'ici une dizaine d'années
- **La sensibilité des détecteurs actuels permet de détecter des ondes gravitationnelles**
  - Améliorations encore nécessaires pour atteindre les sensibilités nominales
    - **Programme d'amélioration en cours jusqu'à début 2019**
  - Activités R&D en cours pour préparer la 3<sup>ème</sup> génération d'instruments
    - « Einstein telescope » !?

# Film CNRS Images

- <https://lejournal.cnrs.fr/videos/ondes-gravitationnelles-les-detecteurs-de-lextreme>
  - 6 minutes, 2016

