

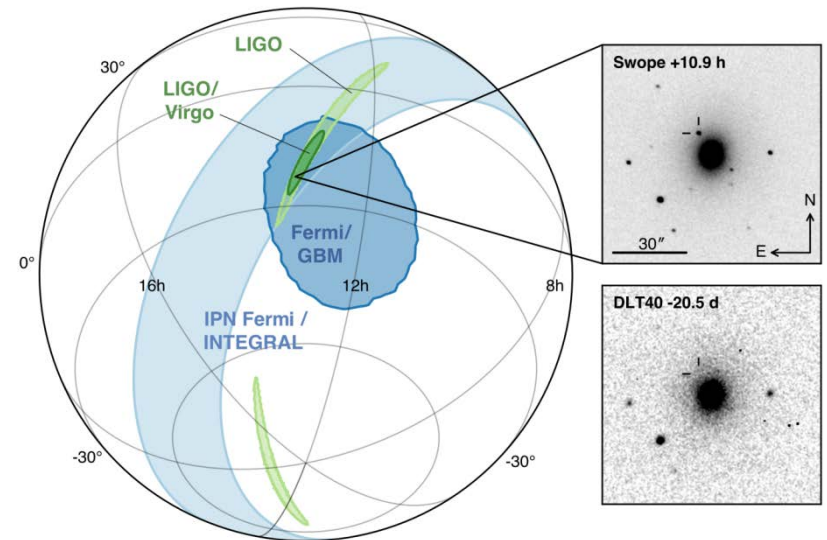
On a détecté les ondes gravitationnelles !

16 janvier 2018

Formation PAF académie de Versailles – LAL

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

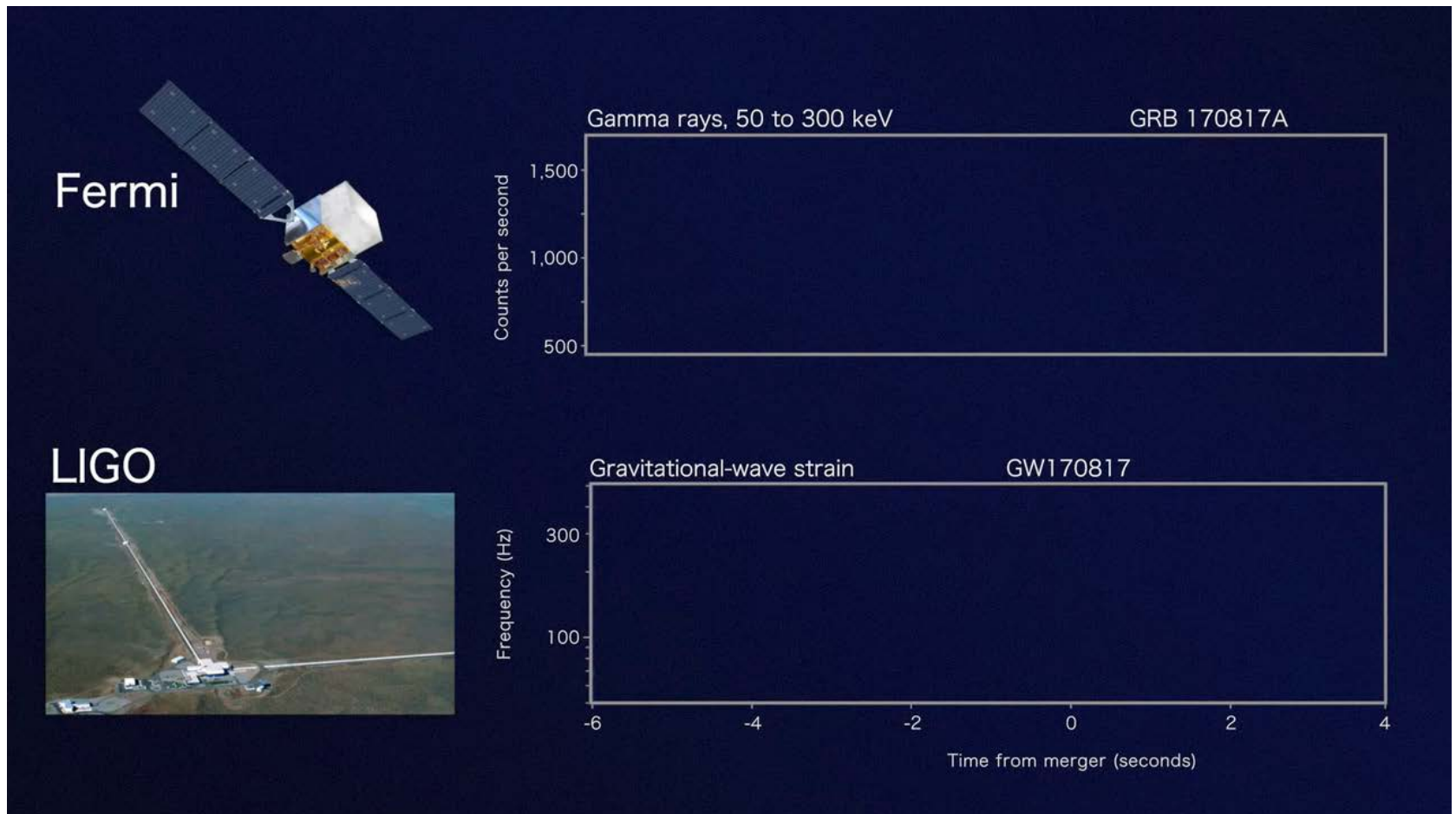
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3 & Université Paris-Sud)
European Gravitational Observatory (Consortium CNRS & INFN)



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

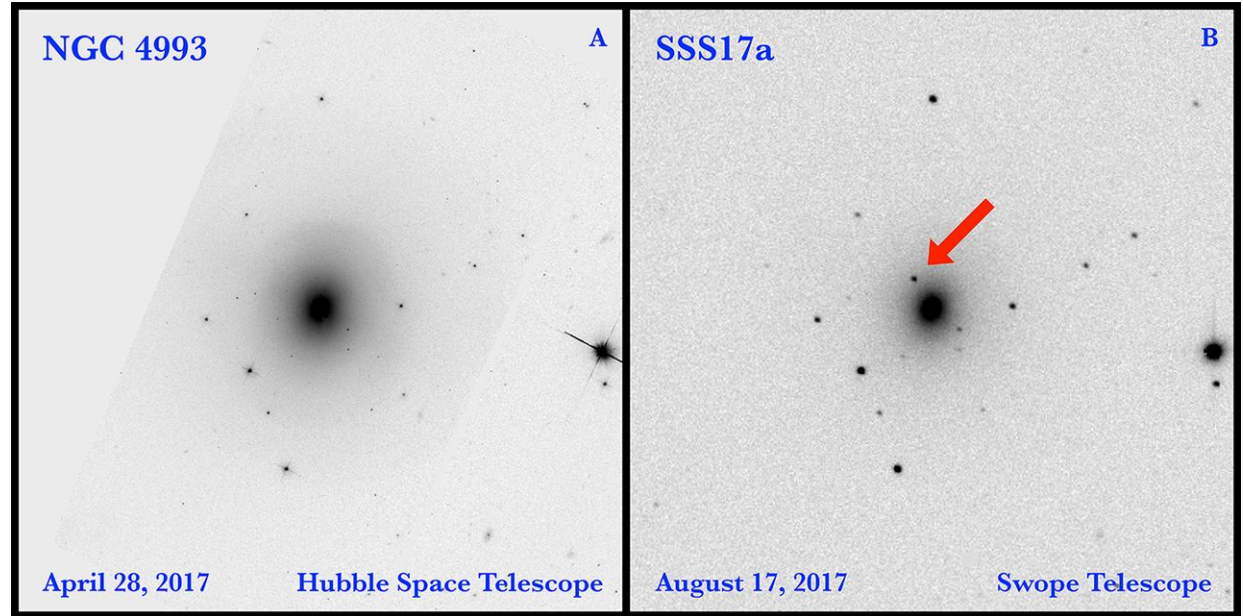
→ Localisation LIGO-Virgo

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



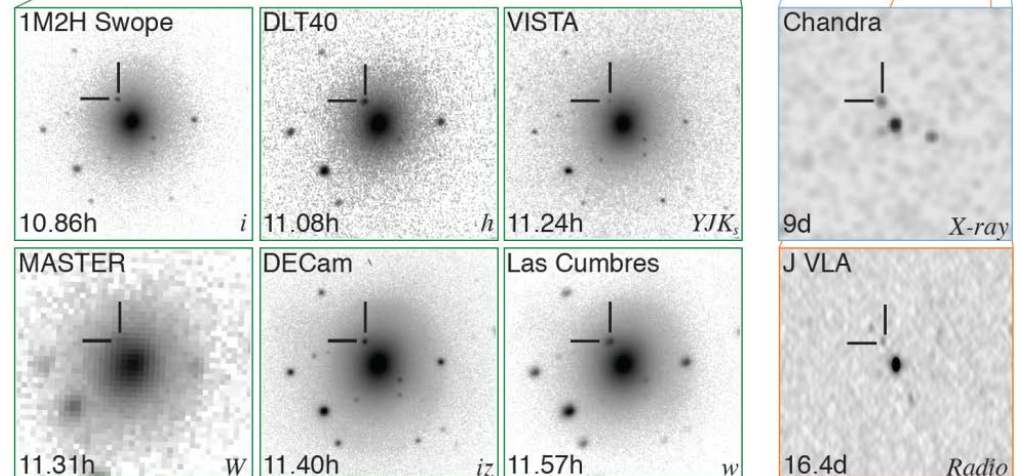
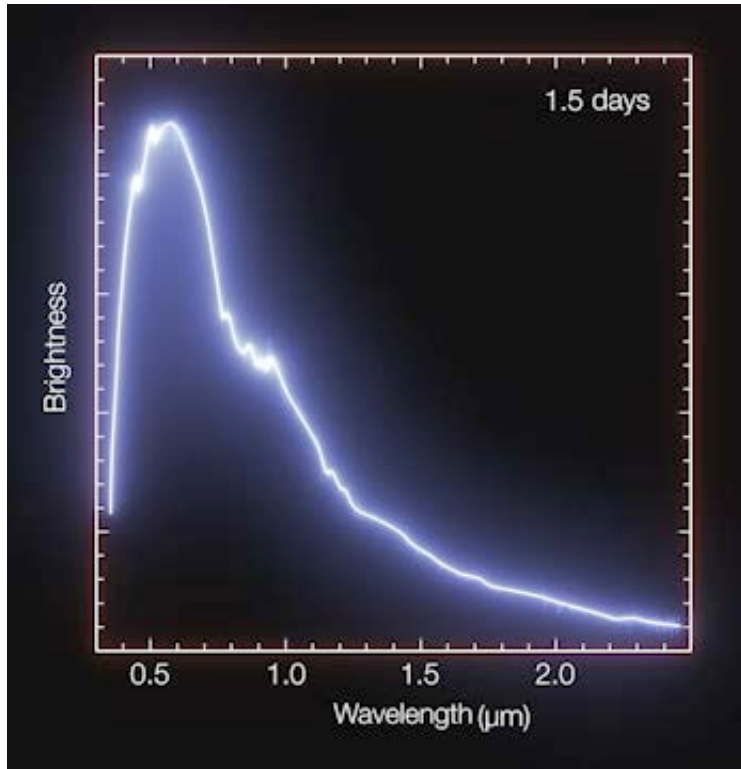
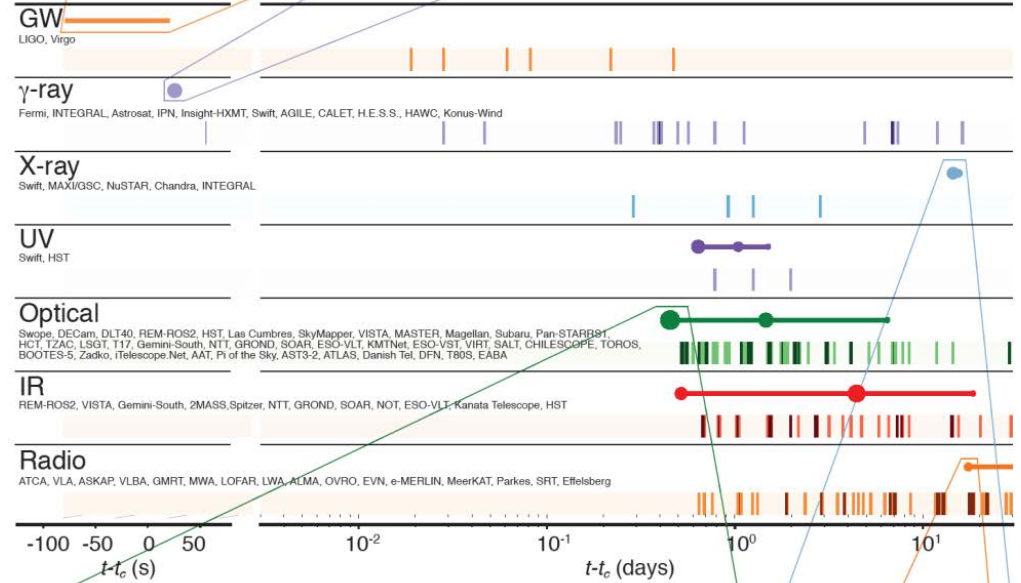
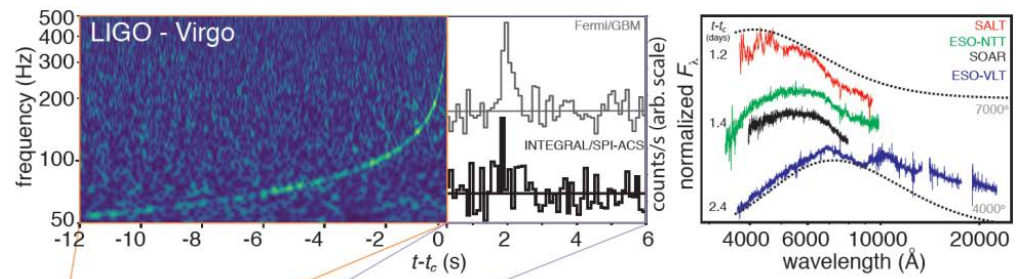
La nuit suivante ...

- 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

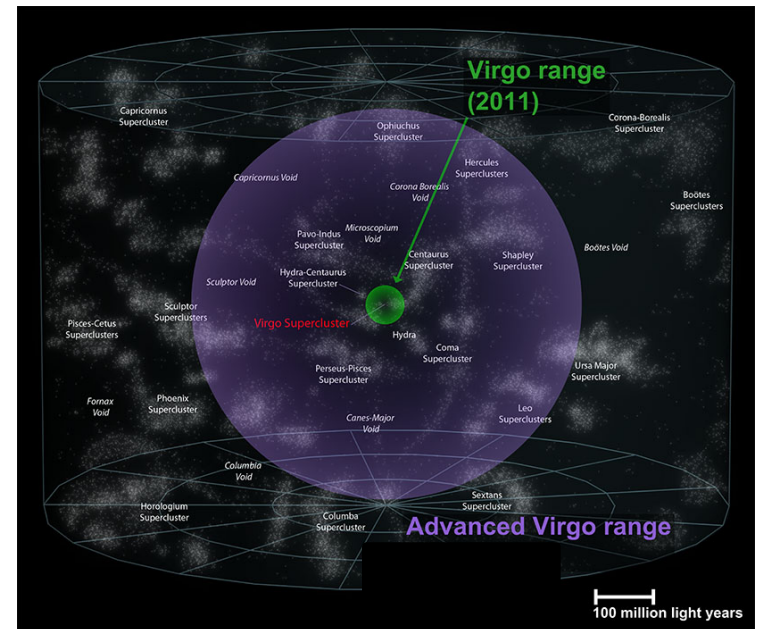
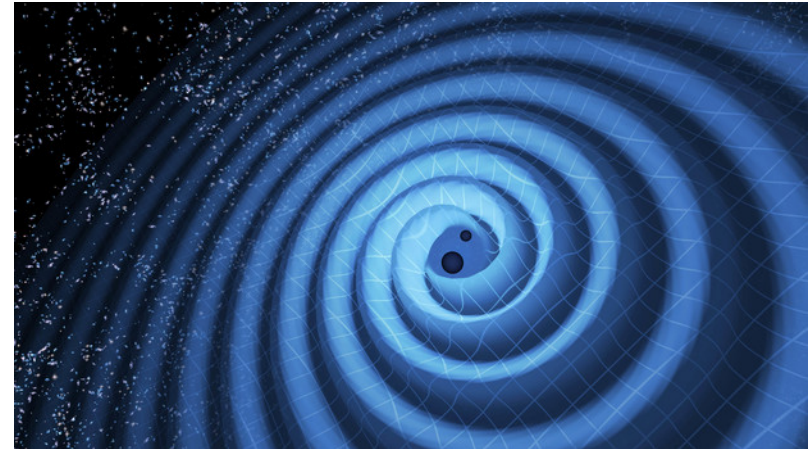


Détecter les ondes gravitationnelles

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

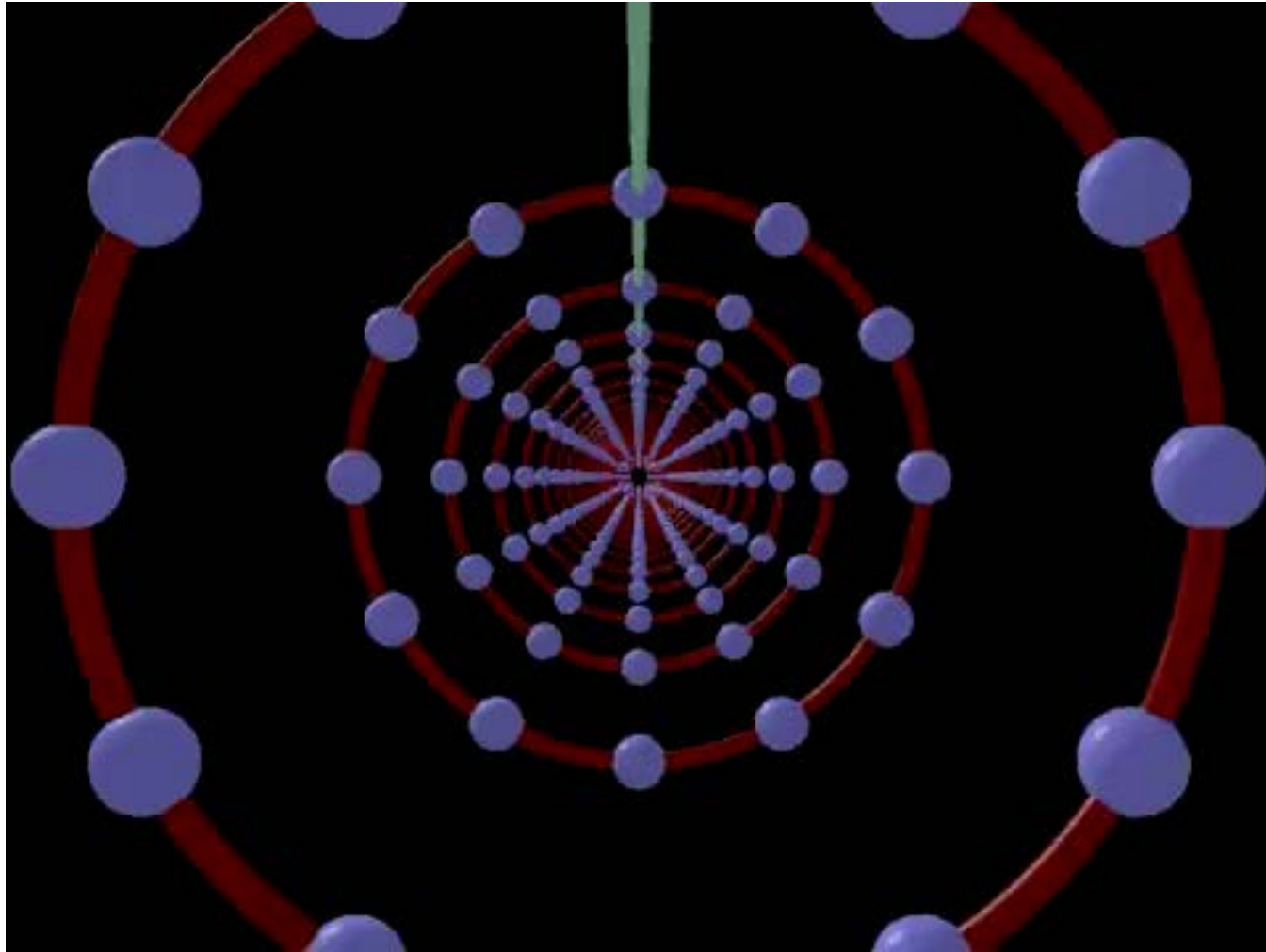
Les ondes gravitationnelles

- 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 $1/(distance \text{ à la source } d)$
 - 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

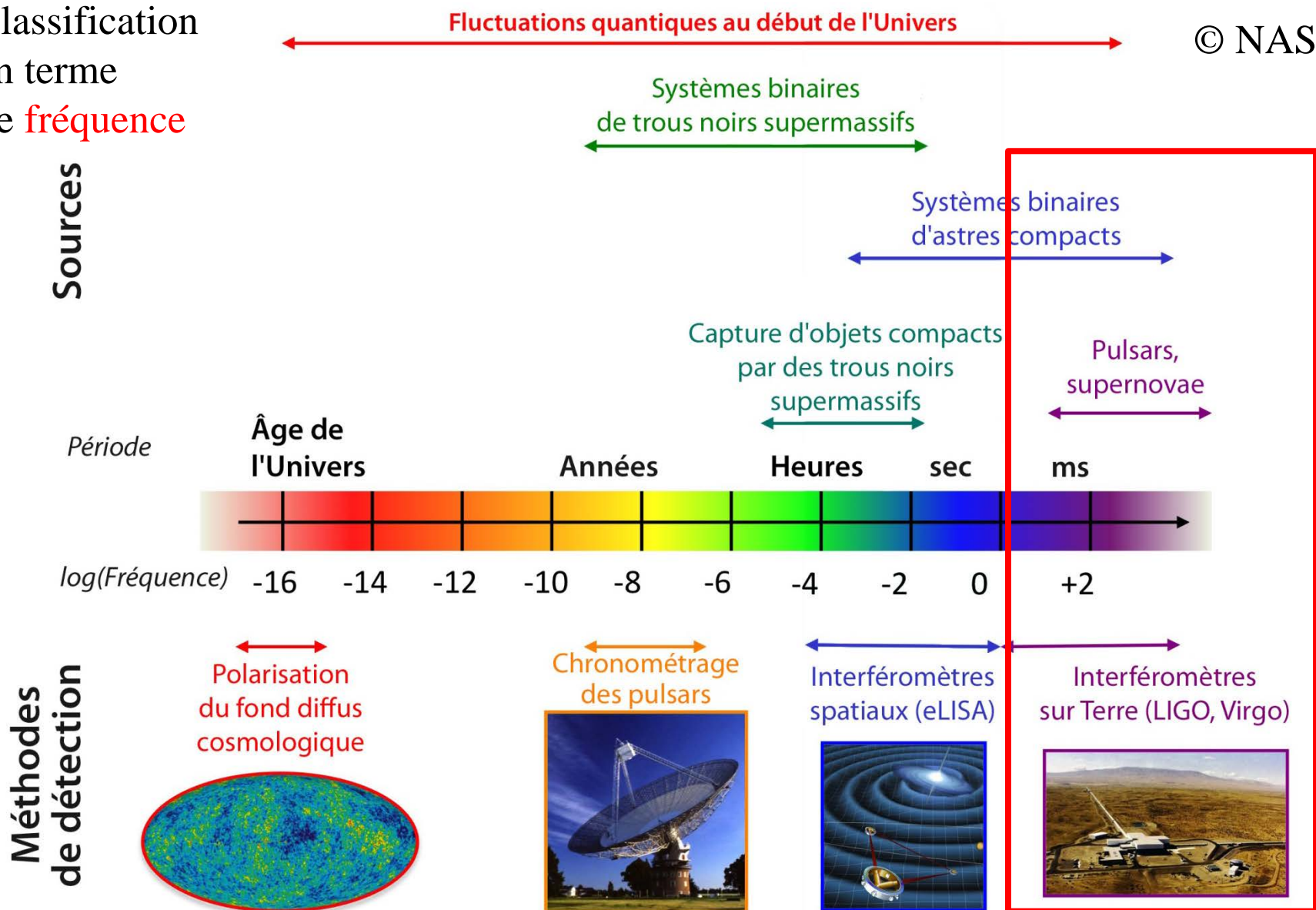
- En trois dimensions



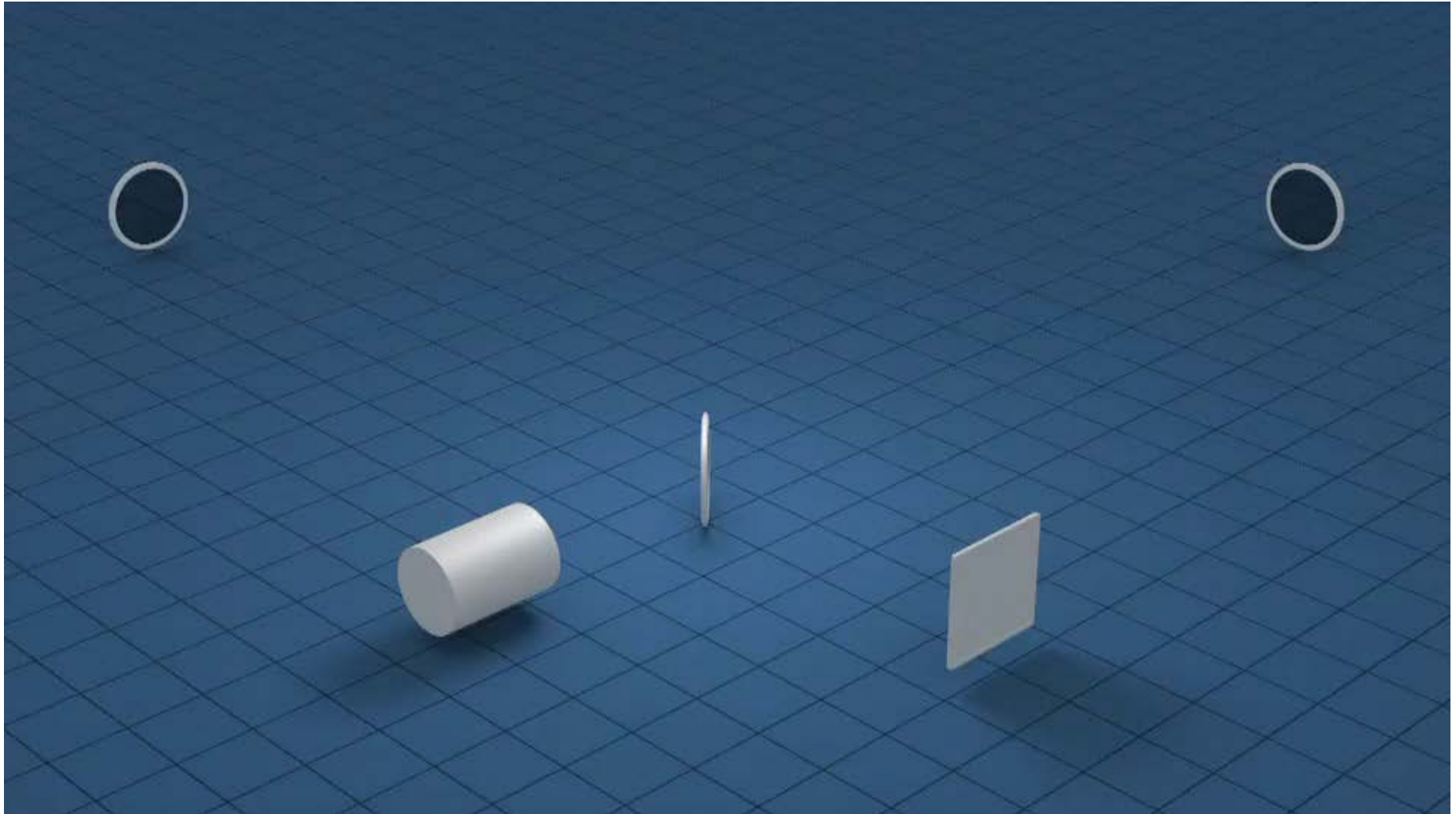
Le spectre des ondes gravitationnelles

- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



Principe de fonctionnement

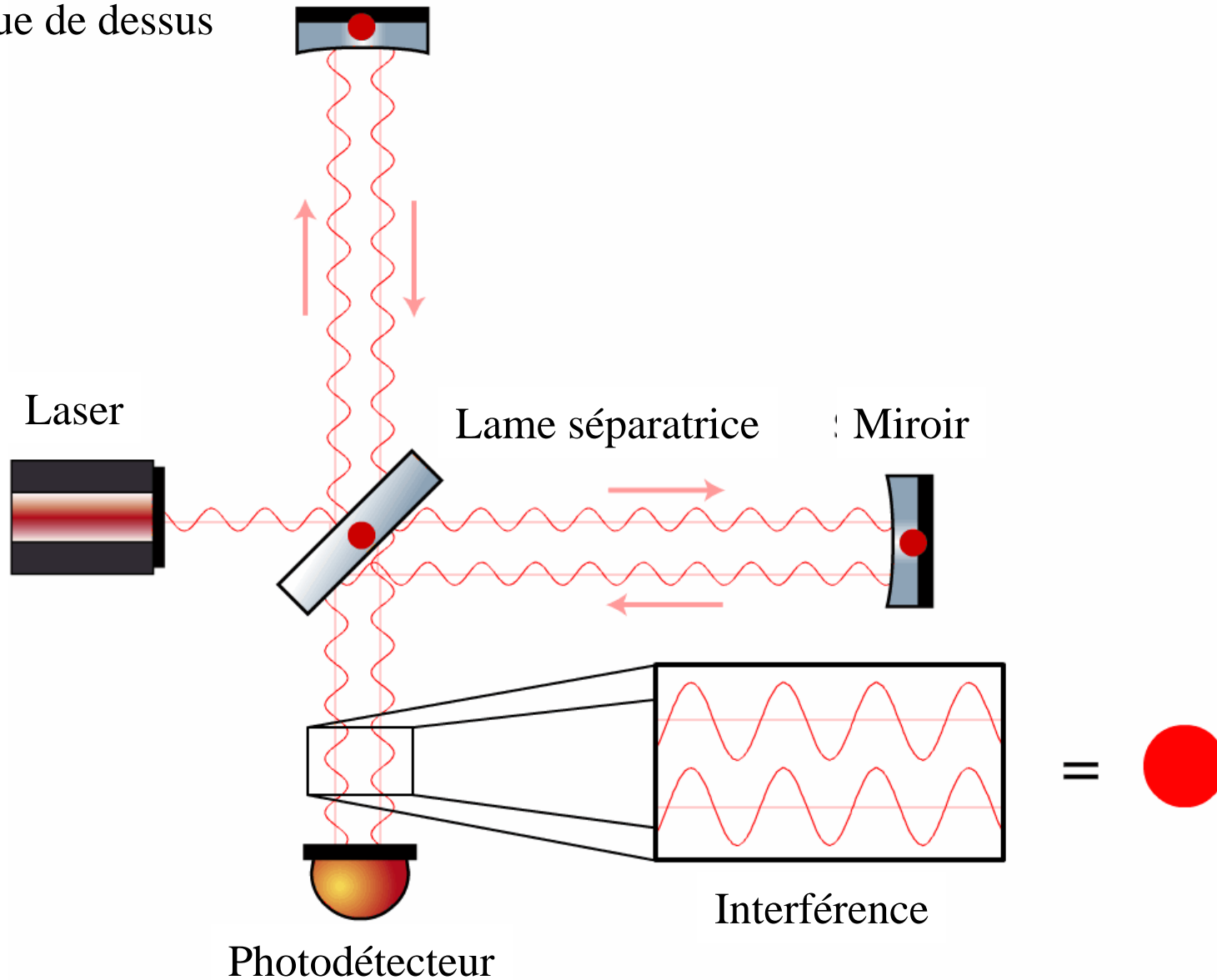


$$\underbrace{\text{Sensibilité}}_{\text{Valeurs très petites}} \propto \frac{1}{(\text{longueur des bras}) \times \sqrt{\text{puissance laser}}}$$

Valeurs très petites

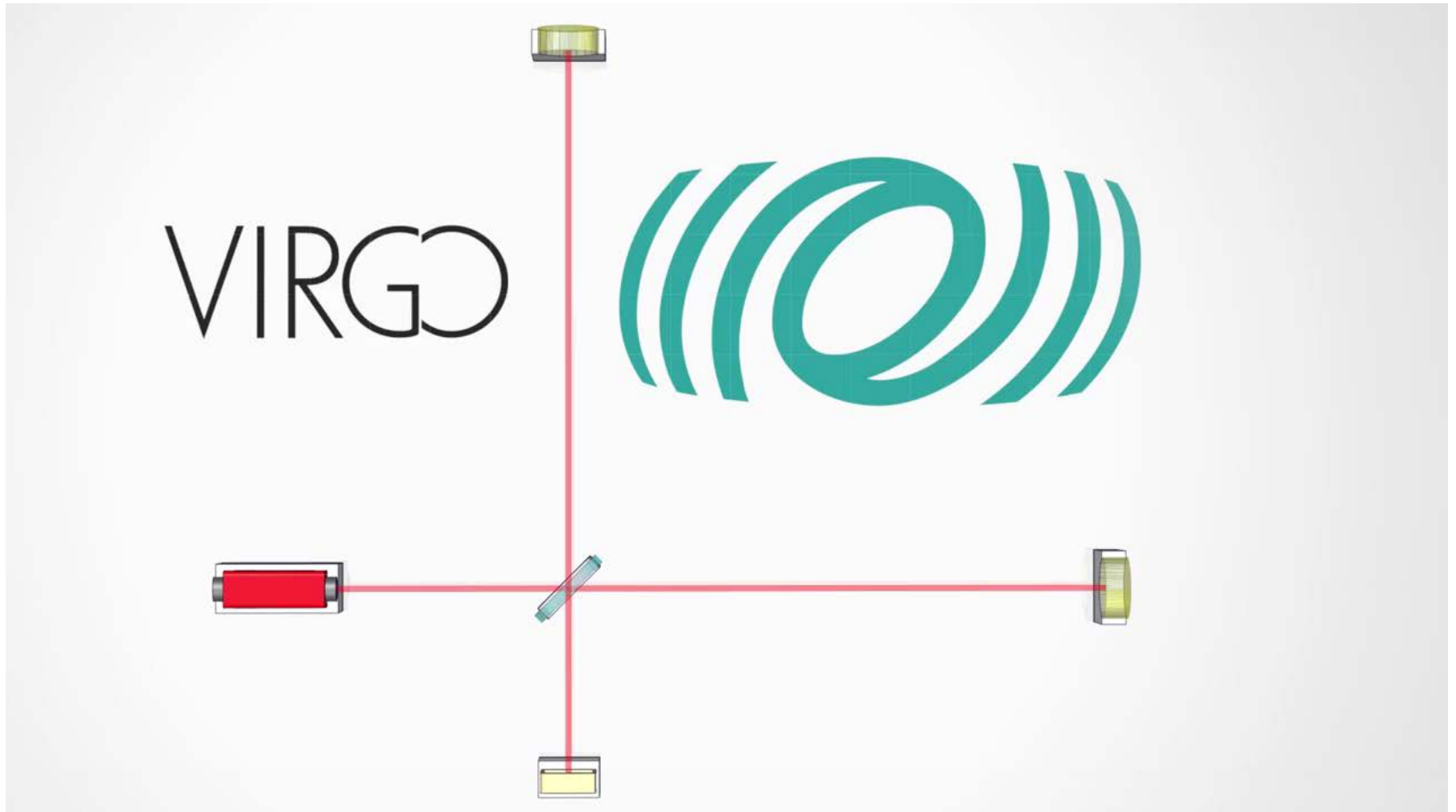
Principe de fonctionnement

- Vue de dessus



Un détecteur réel : Virgo avancé

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



Où est Virgo ?



Une T.G.I.R.

Très Grande Infrastructure de Recherche

Tour de Pisa

Aéroport de Pisa
Longueur du tarmac : 3 km

Zoom

Virgo

Virgo vu du ciel



- Virgo vu par un **drone** : <https://www.youtube.com/watch?v=mgjflMsI7qk>

Si Virgo était à Versailles ...



La Collaboration Virgo

- 6 pays européens
- 21 laboratoires
- Environ 300 membres (LIGO : ~750)



La Collaboration Virgo

- 6 pays européens
- 21 laboratoires
- Environ 300 membres (LIGO : ~750)
- Virgo a été construit par 11 laboratoires du **CNRS** (France) et de l'**INFN** (Italie)
 - Budget : ~150 M€
 - Des équipes des **Pays-Bas**, de **Pologne**, de la **Hongrie** et de l'**Espagne** ont rejoint le projet ensuite
- Budget pour **Advanced Virgo** : ~20 M€
 - Plus des contributions en nature de NIKHEF
- Le consortium **EGO** (European Gravitational Observatory) gère le site de Virgo à Cascina. Il fournit infrastructures et ressources pour la construction et le fonctionnement du détecteur



APC Paris
ARTEMIS Nice
EGO Cascina
INFN Firenze-Urbino
INFN Genova
INFN Napoli
INFN Perugia
INFN Pisa
INFN Roma La Sapienza
INFN Roma Tor Vergata
INFN Padova
INFN TIFPA
LAL Orsay – ESPCI Paris
LAPP Annecy
LKB Paris
LMA Lyon
NIKHEF Amsterdam
POLGRAW
RADBOUD Uni. Nijmegen
RMKI Budapest
Valence University

Un réseau de détecteurs

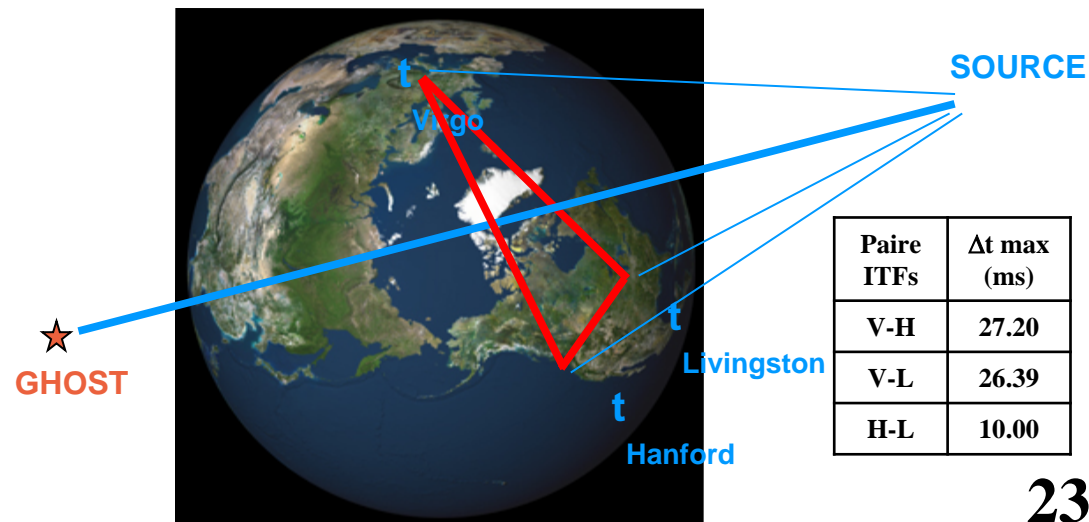
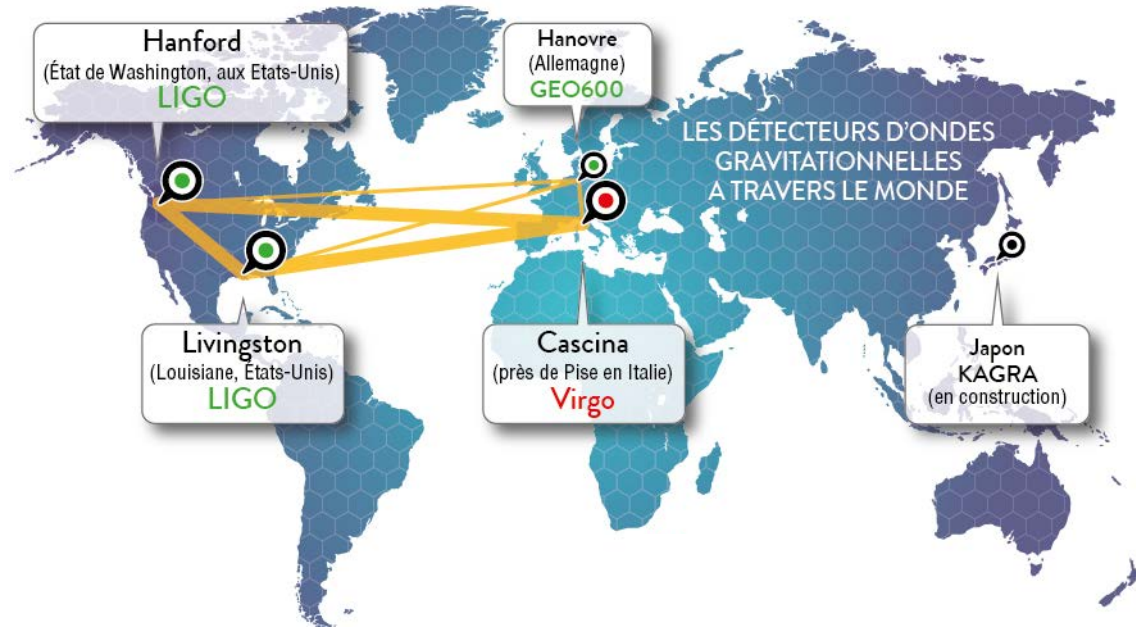


Un réseau de détecteurs

- 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

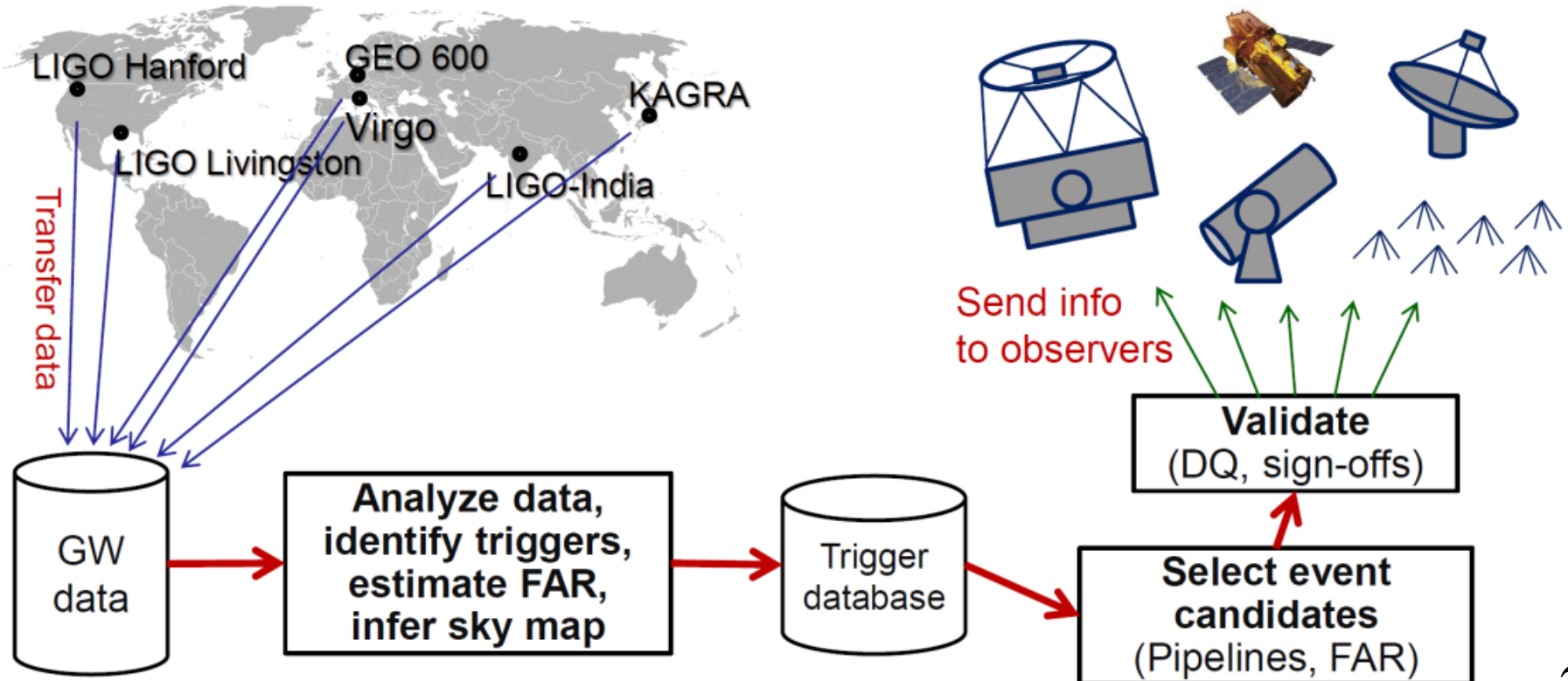


Réseau : deux puis trois détecteurs

- **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^{er} 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 fin 2018
 - **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^(*) !

(*) 6 détections publiées à la date de la conférence

1916-2017 : un siècle de progrès

- **1916 : Prédiction 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.)

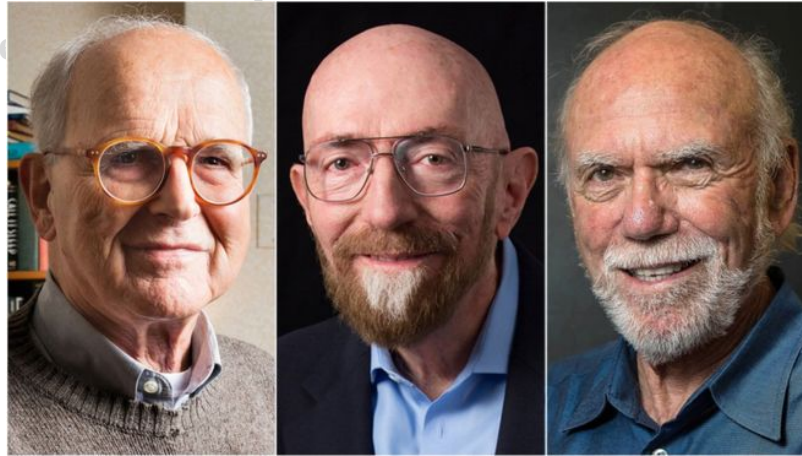
- **1960's : premières barres de Weber**
 - **1970 : premier prototype d'ITF (Forward)**
 - **1972 : Etudes de faisabilité détaillées (Weiss)**
 - **1974 : PSRB 1913+16 (Hulse & Taylor)**
 - **Années 1980 : Prototypes (~10 m de long) (Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)**
 - **Fin des années 1980 : projets 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 !**

1916-2017 : un siècle de progrès

- 1916 : Prédiction des OG (Einstein)

1957 : Conférence de

- 1963 : Trous noirs de Kerr



(c.)

Barres de Weber

Type d'ITF (Forward)
Stabilité détaillées (Weiss)
6 (Hulse & Taylor)

types (~10 m de long)

(Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)

- Fin des



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

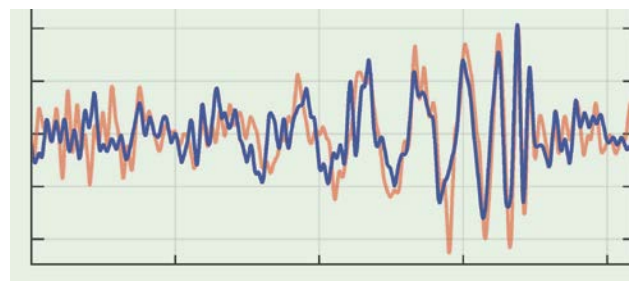
- Identification en temps (quasi-)réel d'un candidat « prometteur »
 - Programmes informatiques automatisés
 - Envoi d'une alerte interne LIGO-Virgo : téléphone, SMS, e-mail
- Examen de l'alerte par une équipe de scientifiques
 - Validation (ou rejet) du candidat
- Alerte envoyée aux télescopes partenaires
 - 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

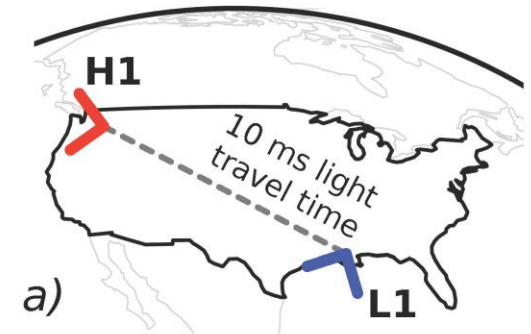
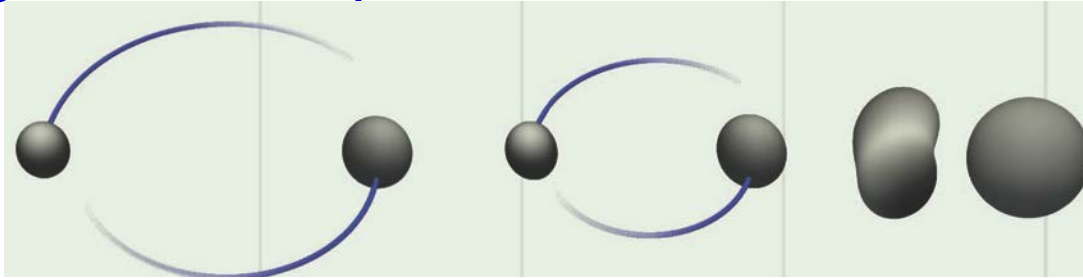
- **Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle**

- **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

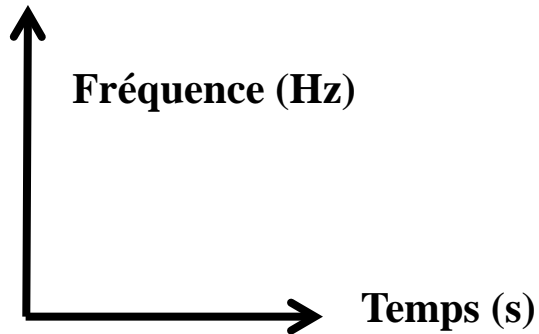
Etat de Washington, USA



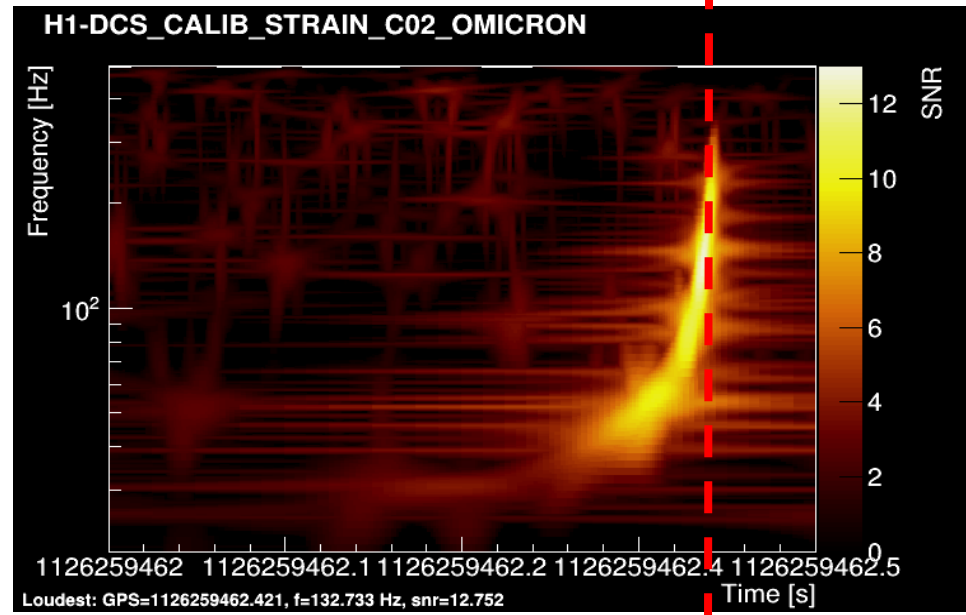
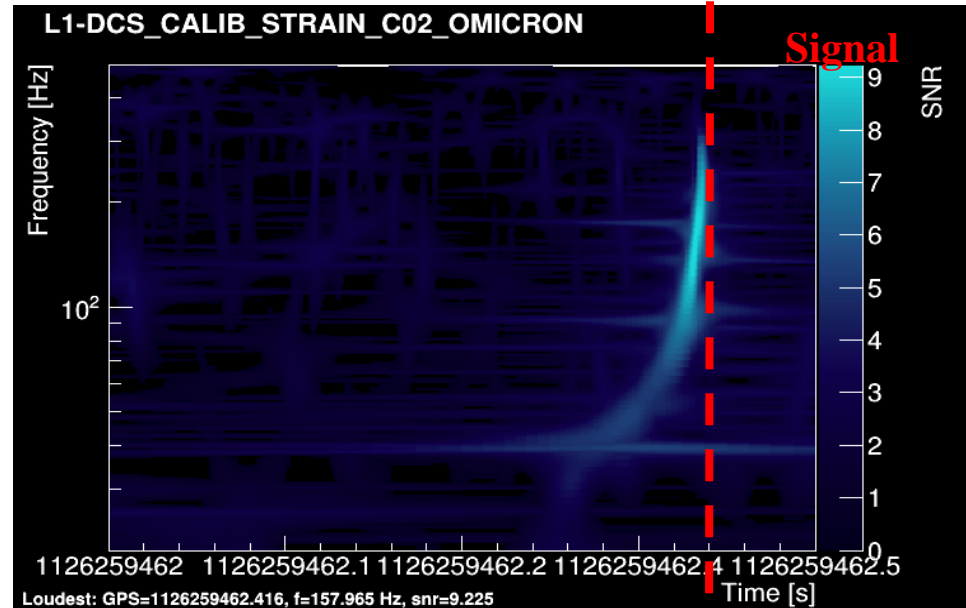
LIGO Livingston Louisiane, USA

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

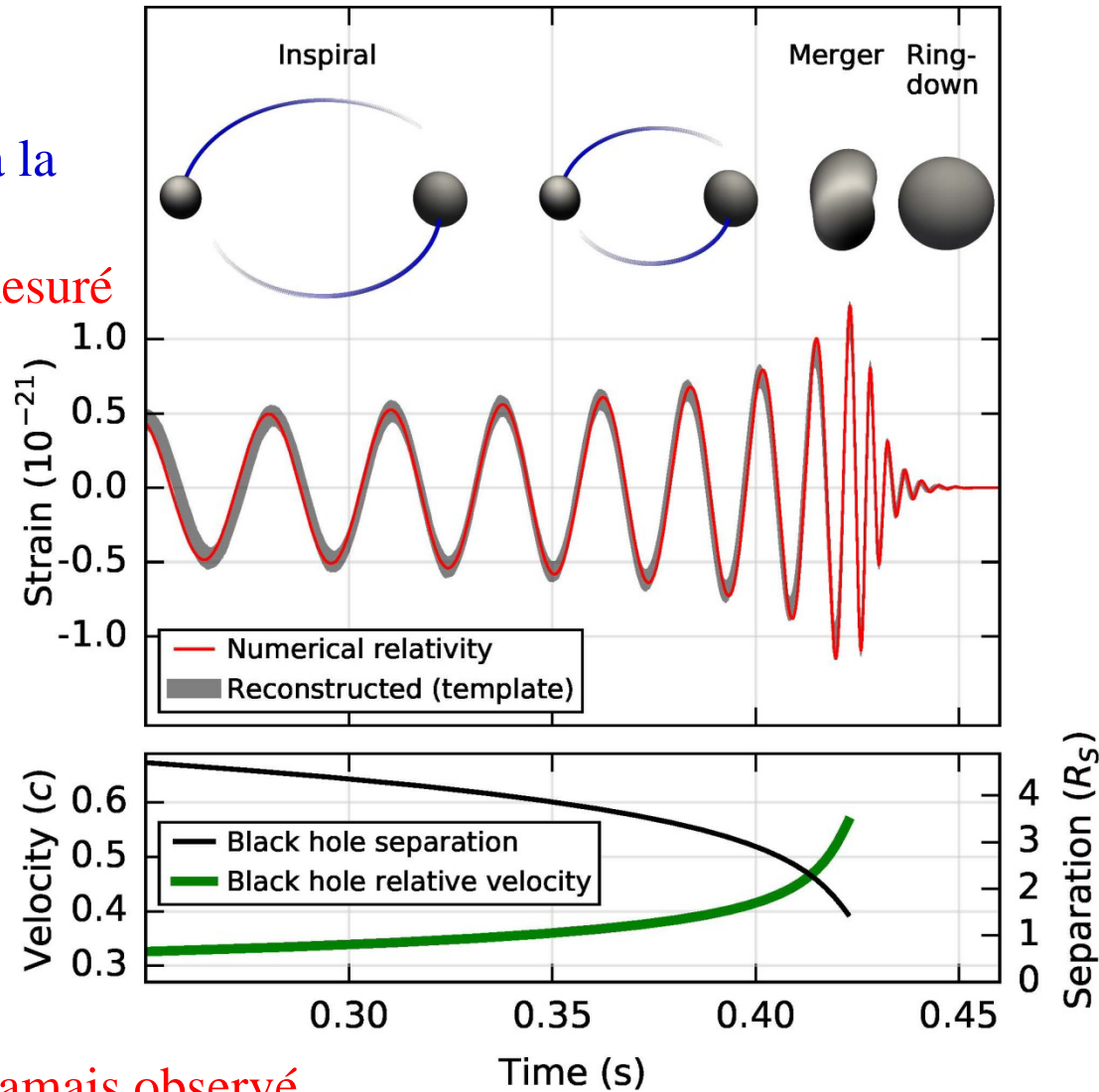
- Deux **objets massifs** et **compacts** en orbite l'un autour de l'autre à **75 Hz** (la moitié de la fréquence de l'OG), donc à une **vitesse relativiste** et qui se rapprochent très près avant de fusionner
→ A peine quelques R_S !

→ Seuls des trous noirs peuvent correspondre à ces observations

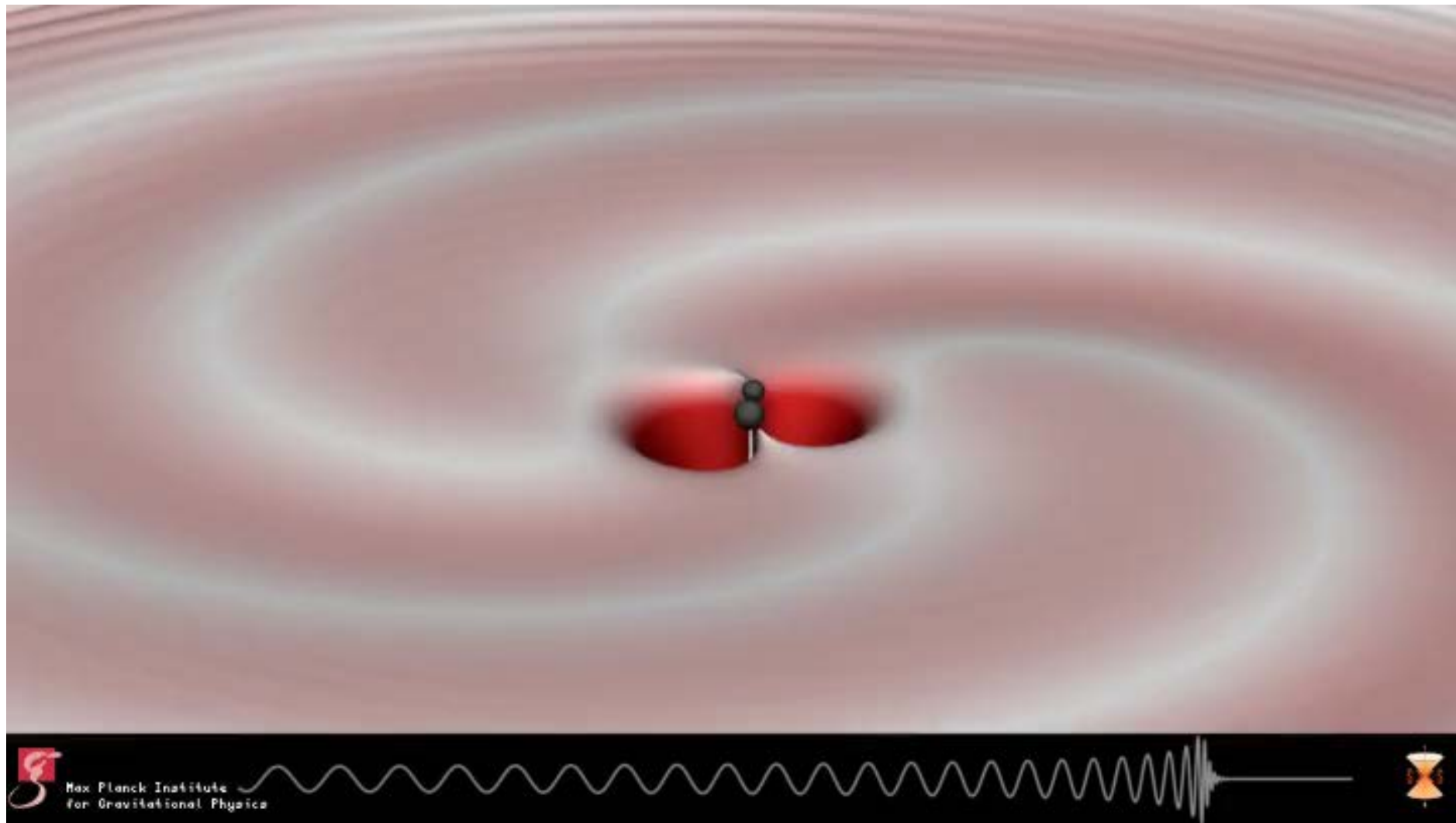
- $\sim 3 M_{\text{Soleil}}$ rayonnées en OG

- **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



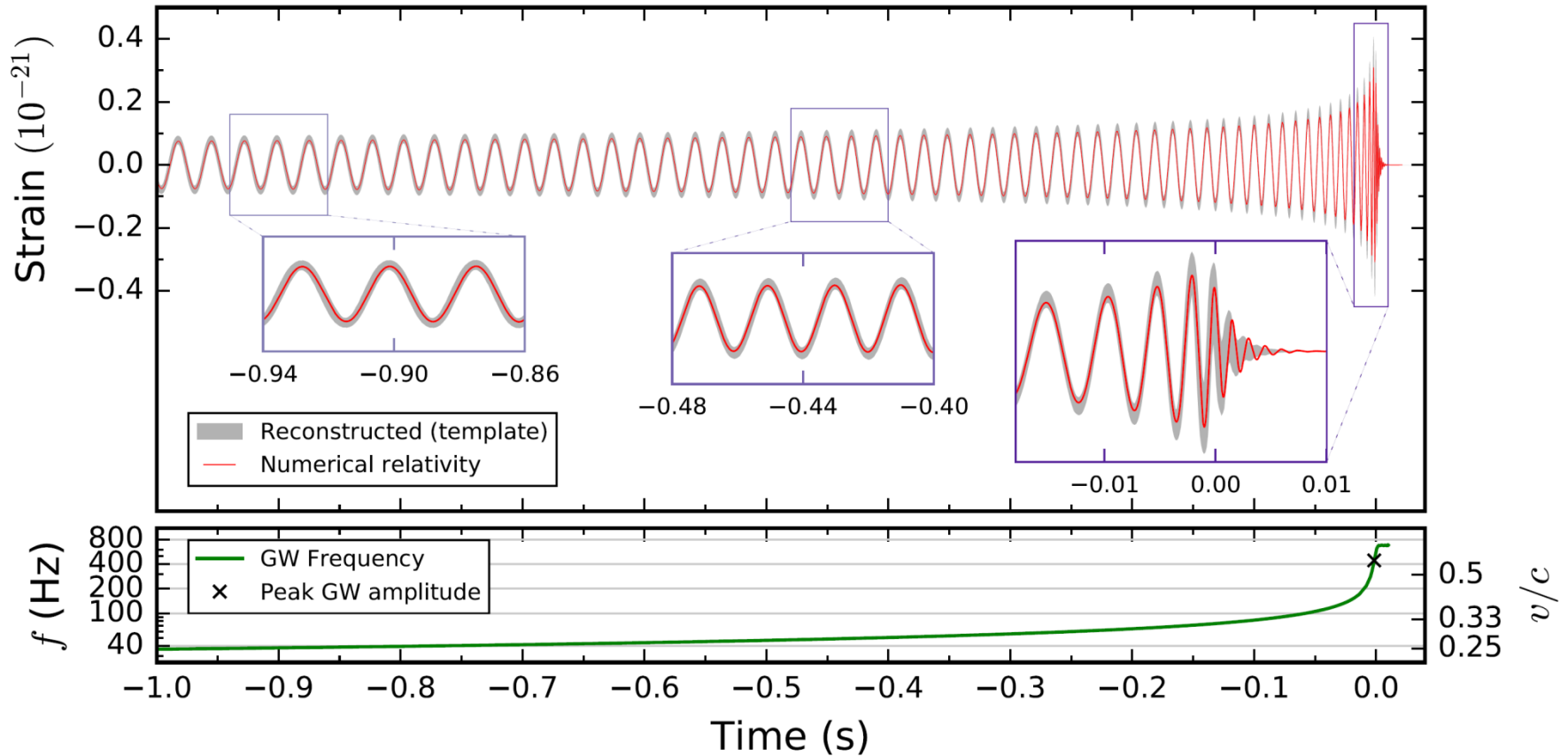
Simulation de la fusion des deux trous noirs



L'événement GW151226

GW151226

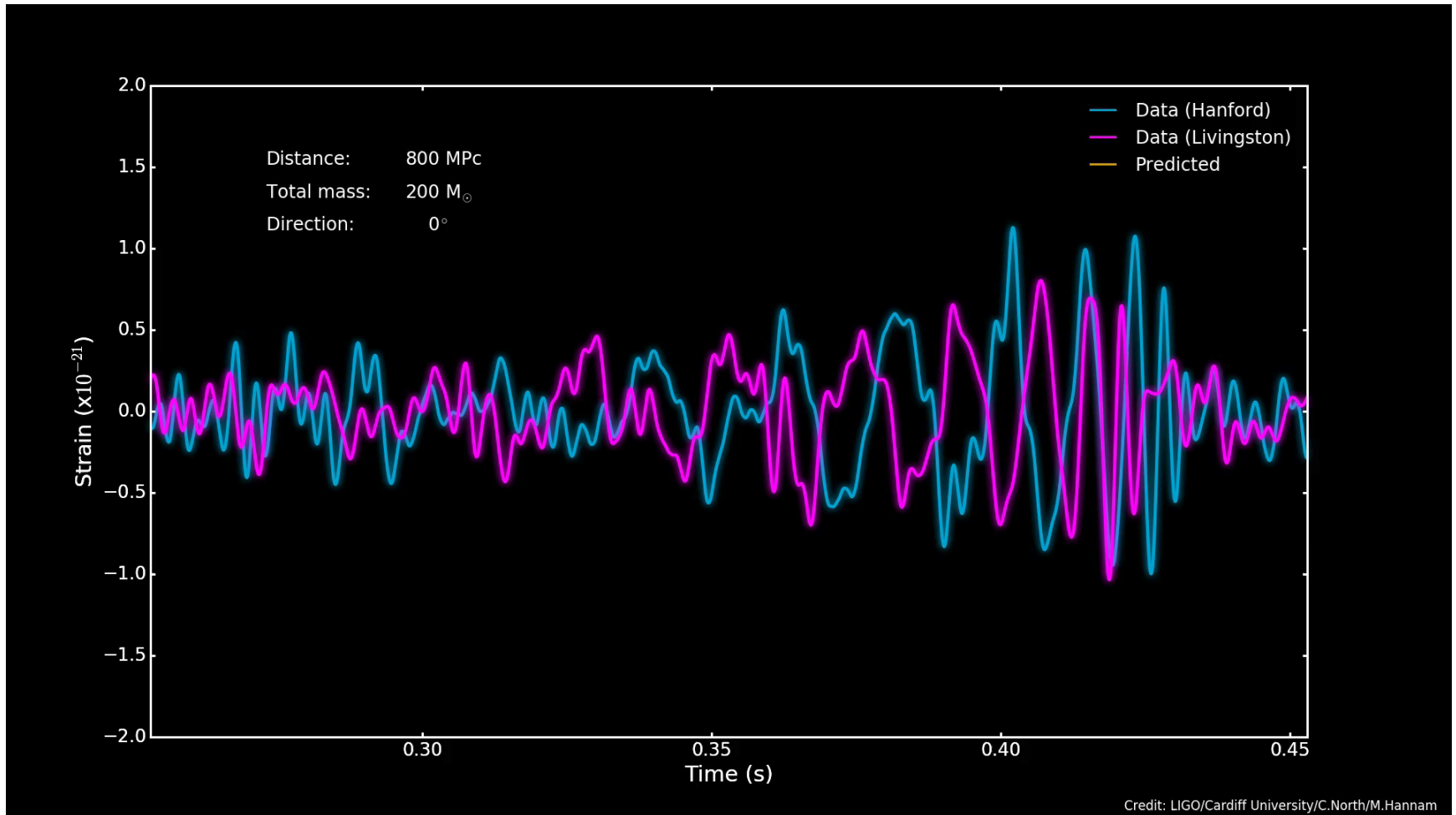
- **Excellent accord** entre formes d'onde
 - analytique (développement post-newtonien, en gris) et
 - numérique (en rouge)



L'événement GW170104

De la mesure à la source

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



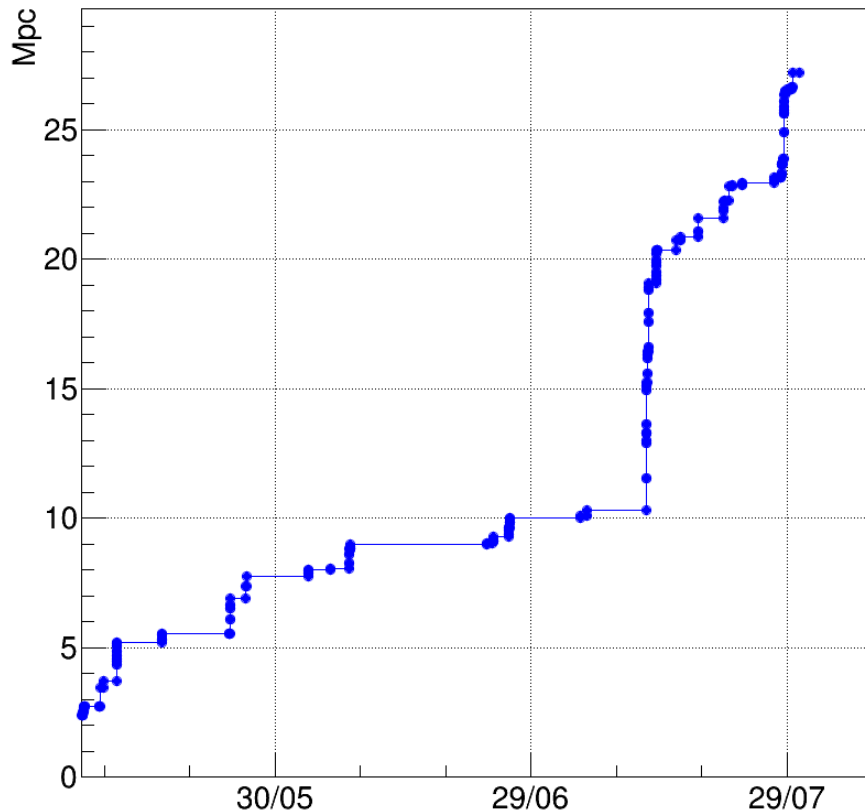
Prise de données

« O2 » pour Virgo

1^{er} – 25 Août 25 2017

Virgo Avancé : rejoindre O2 !

- Chronologie pour « Virgo Avancé »
 - Démarrage de la prise de données : 1^{er} août 2017



- Octobre 2007 : Première version du projet Advanced Virgo (détecteur dit de seconde génération)
- Novembre 2008-Mai 2009 : Evaluation du projet par un comité scientifique international
- Décembre 2009 : Approbation du projet Advanced Virgo par les agences de financement
- Octobre 2011 : Début du démantèlement du détecteur de première génération



Physiciens travaillant sur l'un des bancs optiques
(Photo: © Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque)

- Avril 2012 : Finalisation du projet Advanced Virgo
- Août 2016 : Fin de la phase de construction de Advanced Virgo : l'ensemble du détecteur est sous vide
- Février 2017 : Inauguration d'Advanced Virgo
- Août 2017 : Prise de données simultanée d'Advanced Virgo et Advanced LIGO
- 27 Septembre 2017: Annonce de la première détection par les trois détecteurs d'ondes gravitationnelles

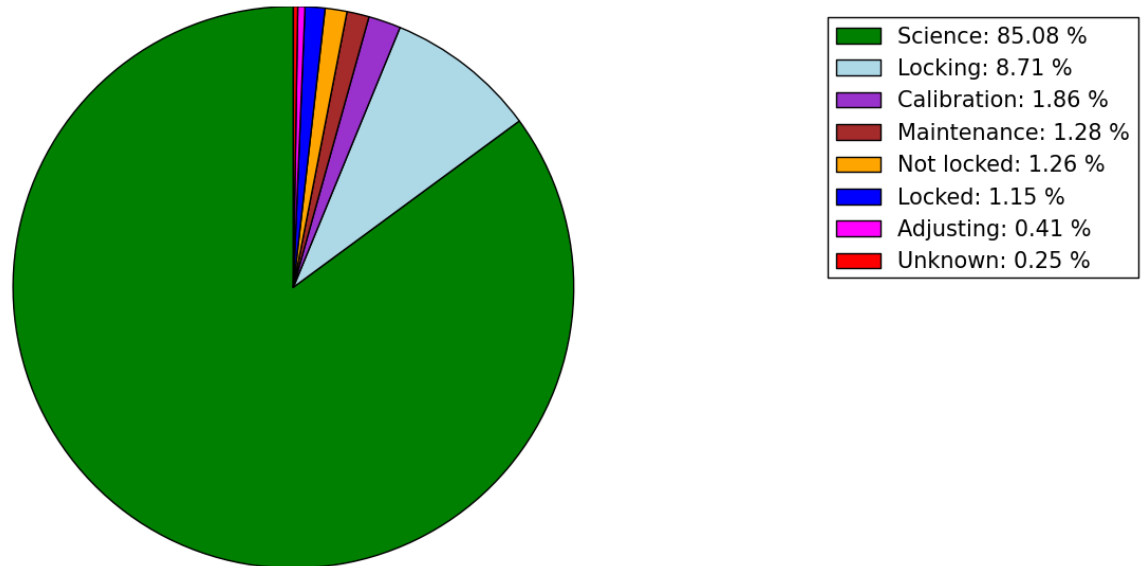
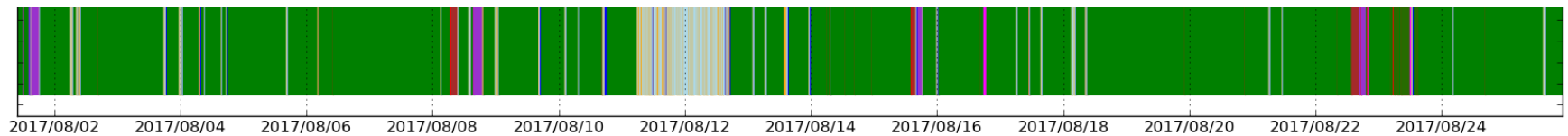
Bras ouest de l'interferomètre Virgo
(Photo: © Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque)

Mise à jour : 27 septembre, 2017



Résumé des quatre semaines de prise de données

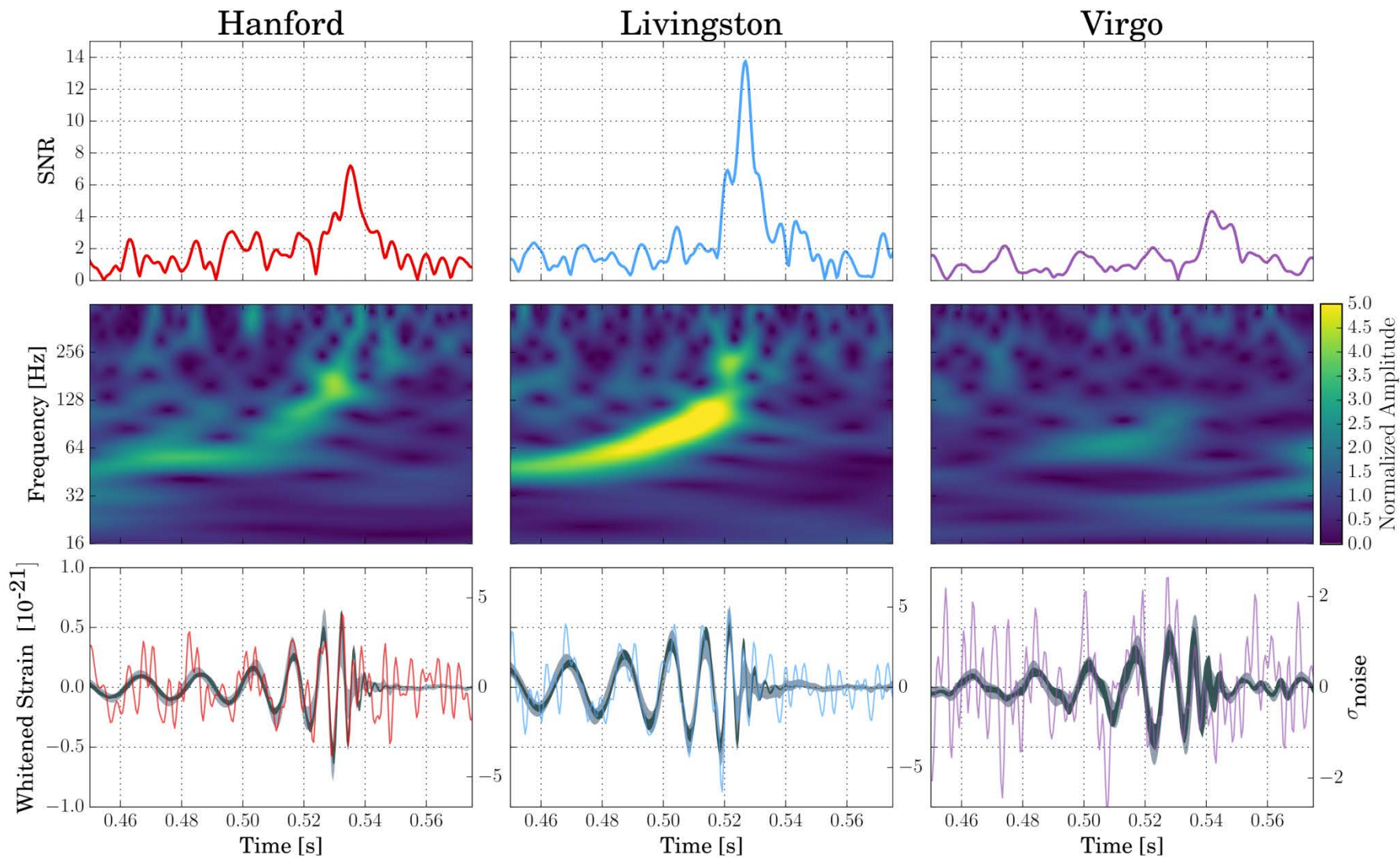
- **Cycle utile**
 - En fonction du temps
 - « Camembert » catégorie par catégorie



L'événement GW170814

Signaux détectés

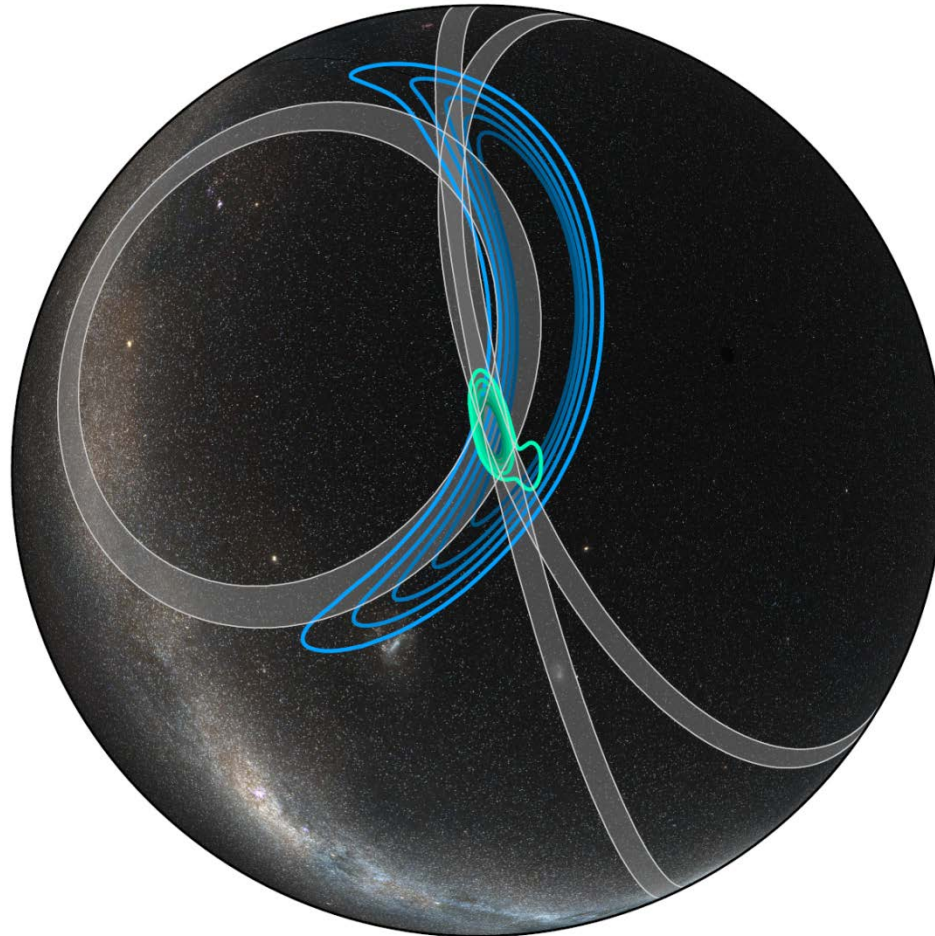
- Des études détaillées confirment la présence d'un **signal dans le détecteur Virgo**



Localisation LIGO-Virgo de la source dans le ciel

- **Triangulation**

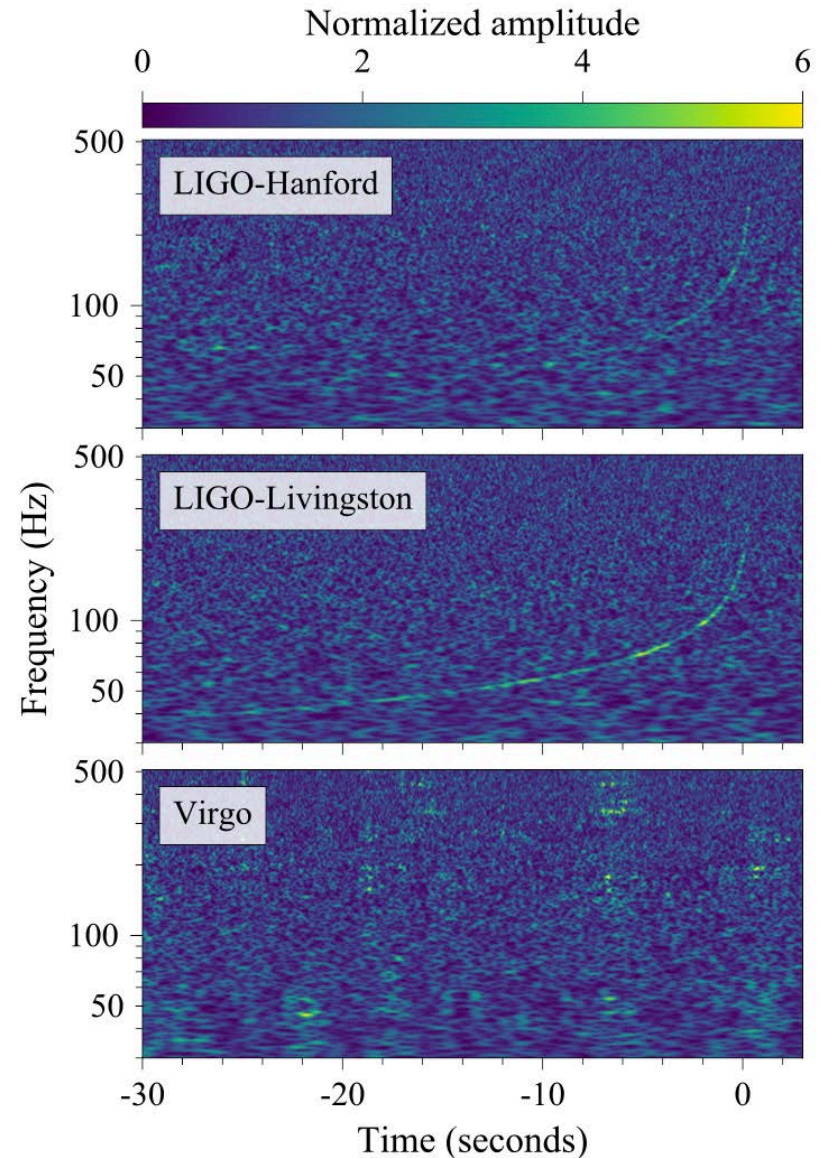
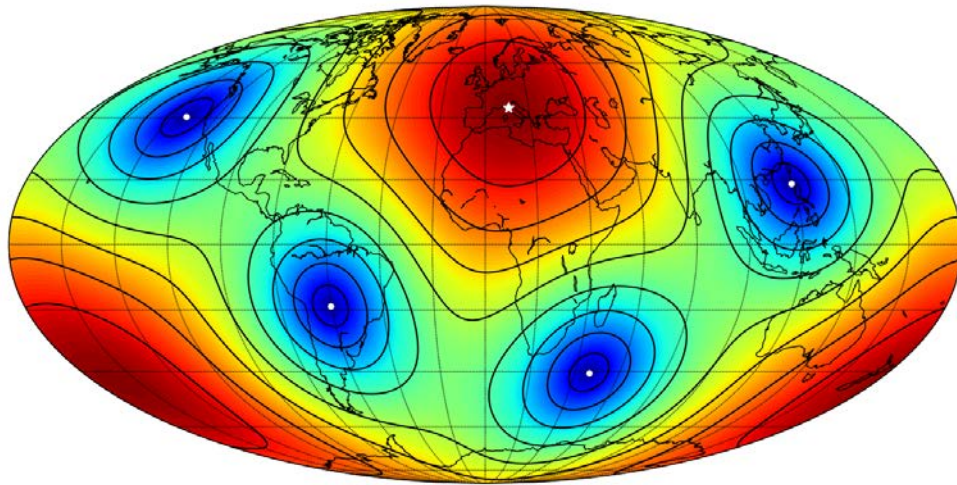
- Délais entre les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs
- Différences de forme et d'amplitude entre ces signaux



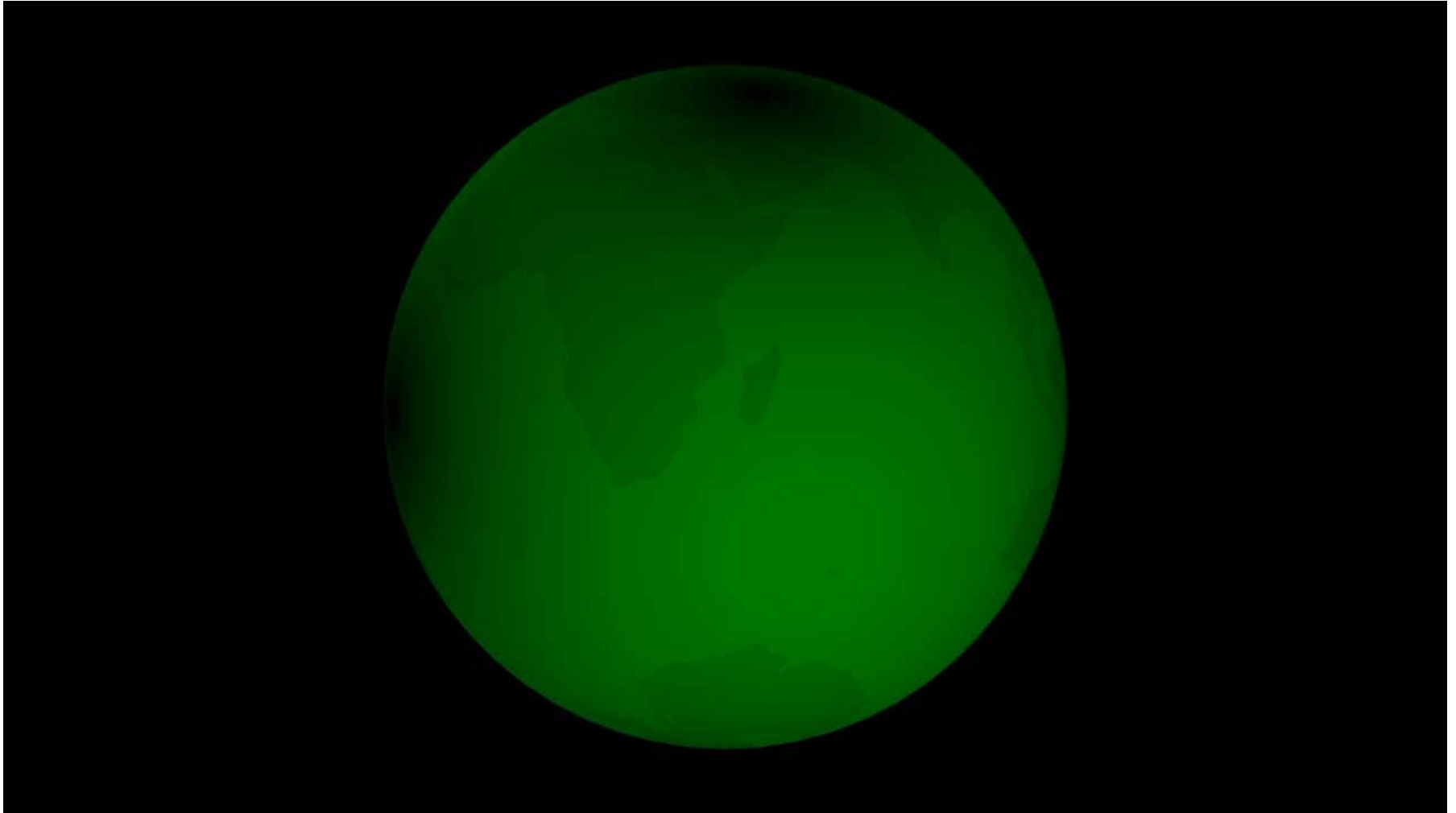
L'événement GW170817

Ondes gravitationnelles

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

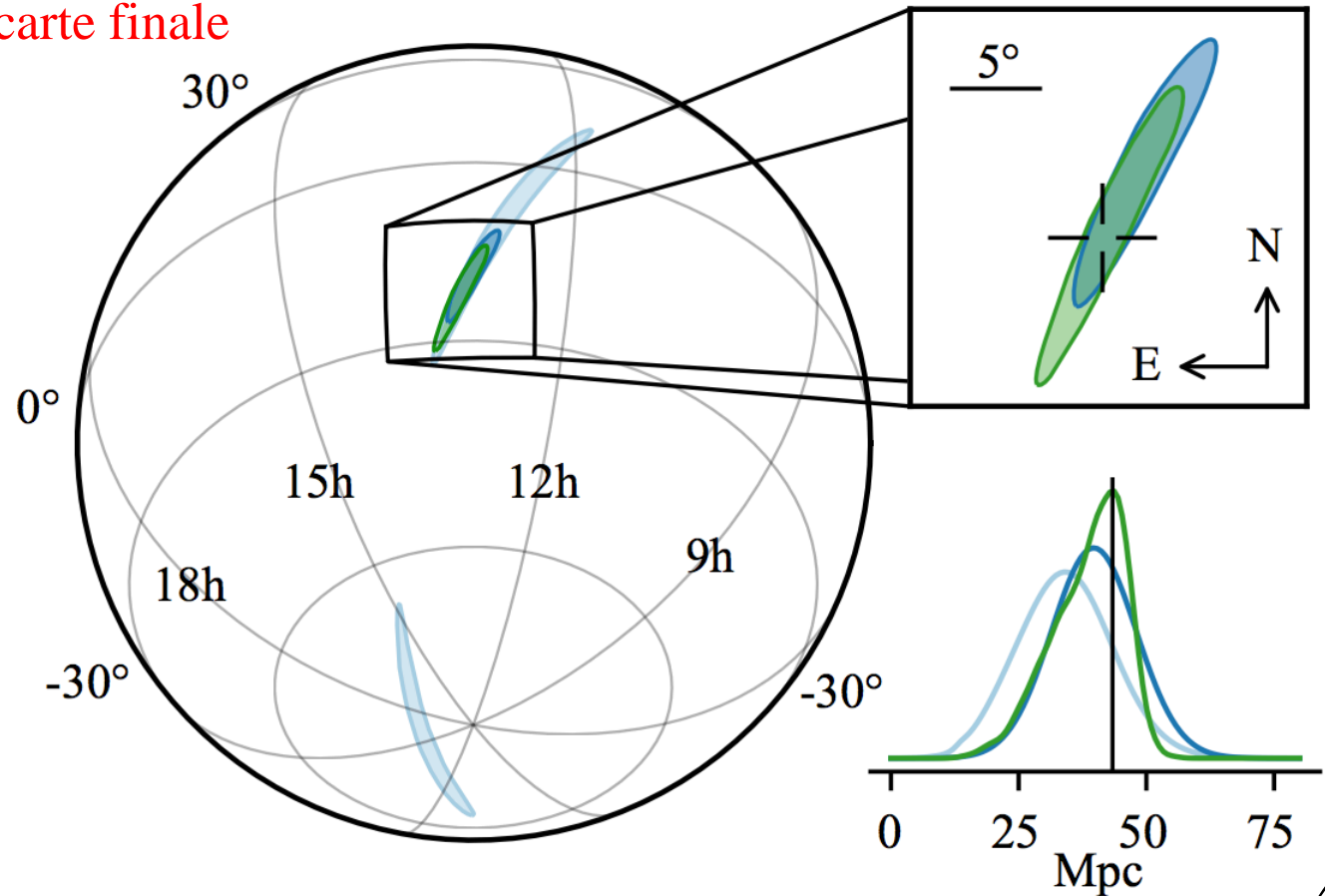


Localisation de la source par LIGO-Virgo



Localisation de la source par LIGO-Virgo

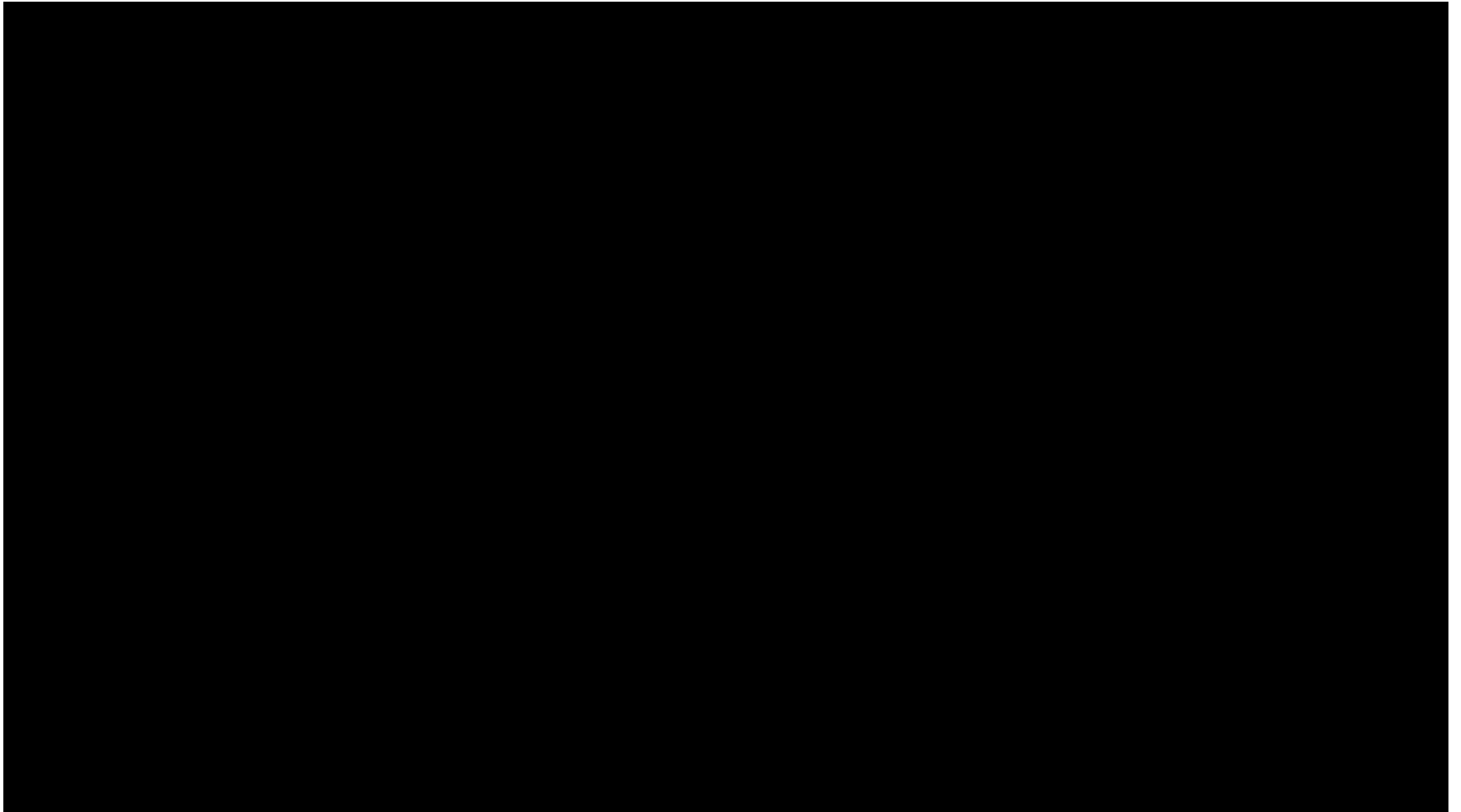
- Bleu pâle : LIGO seul
- Bleu foncé : LIGO + Virgo, carte initiale
- Vert : LIGO + Virgo, carte finale



Recherche de contreparties pour GW170817

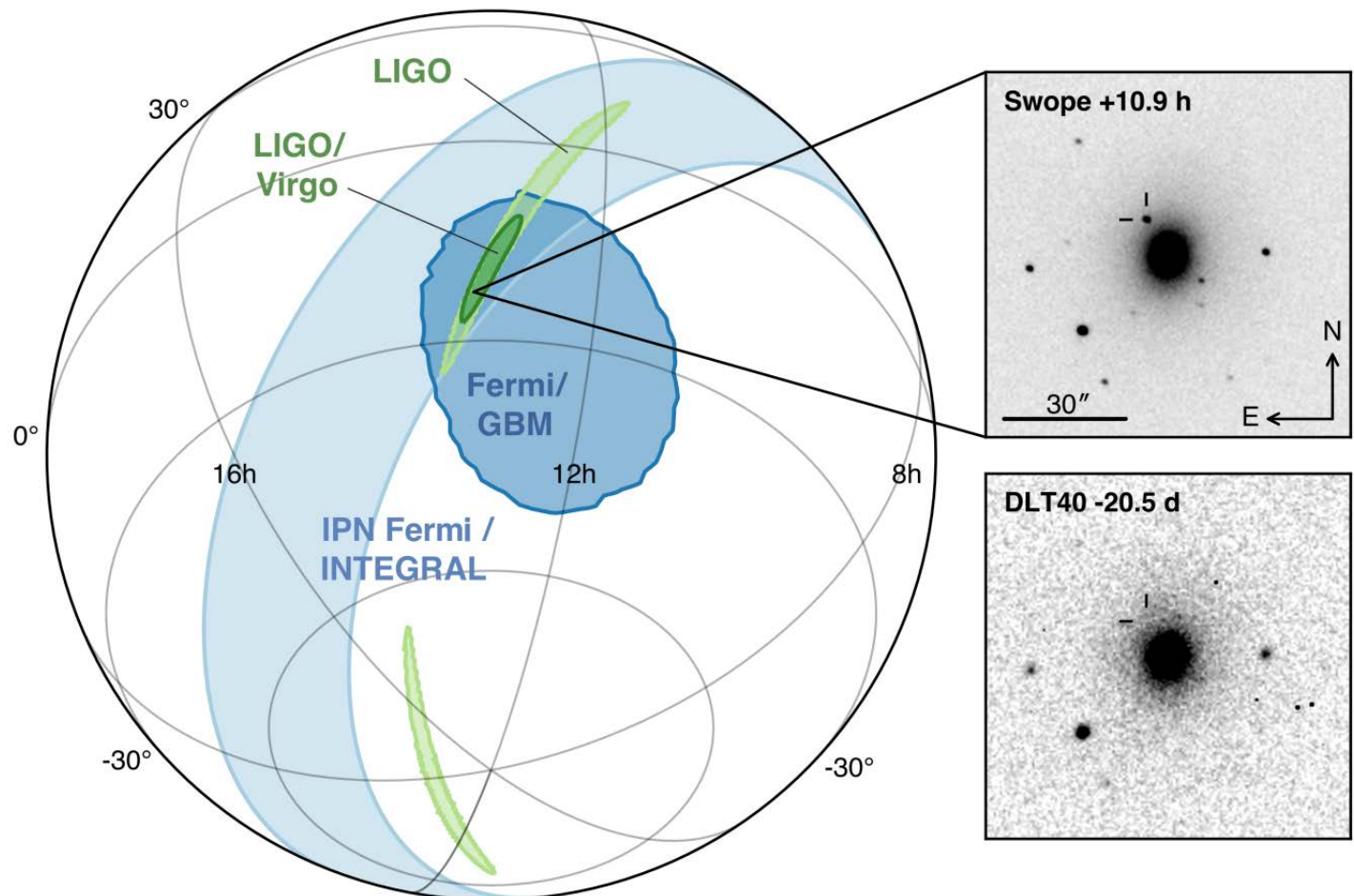
- Alerte envoyée par LIGO-Virgo aux télescopes partenaires
 - Localisation dans le ciel incluse

OzGrav/LSC-Virgo



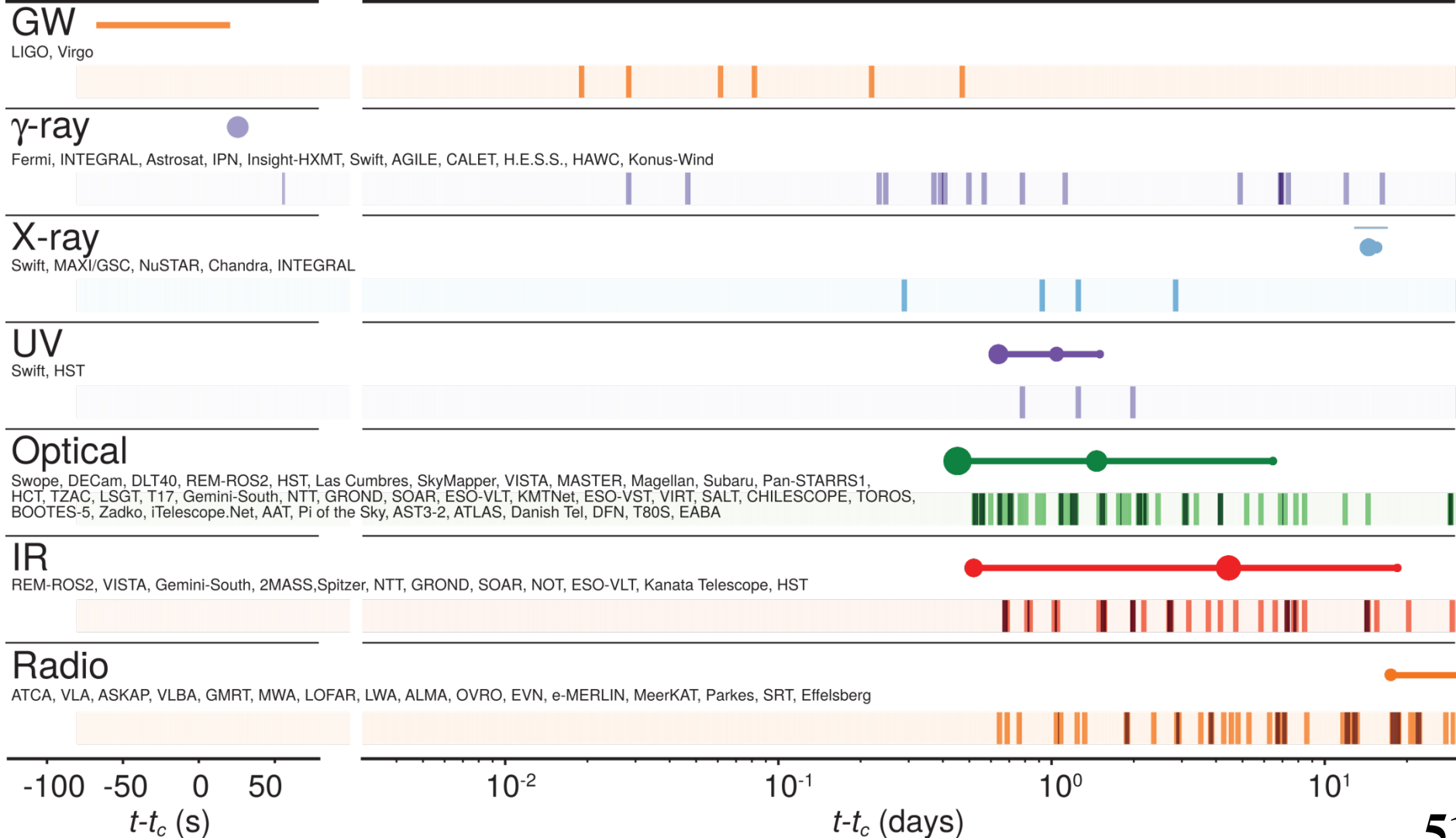
Localisation de la source dans le ciel

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



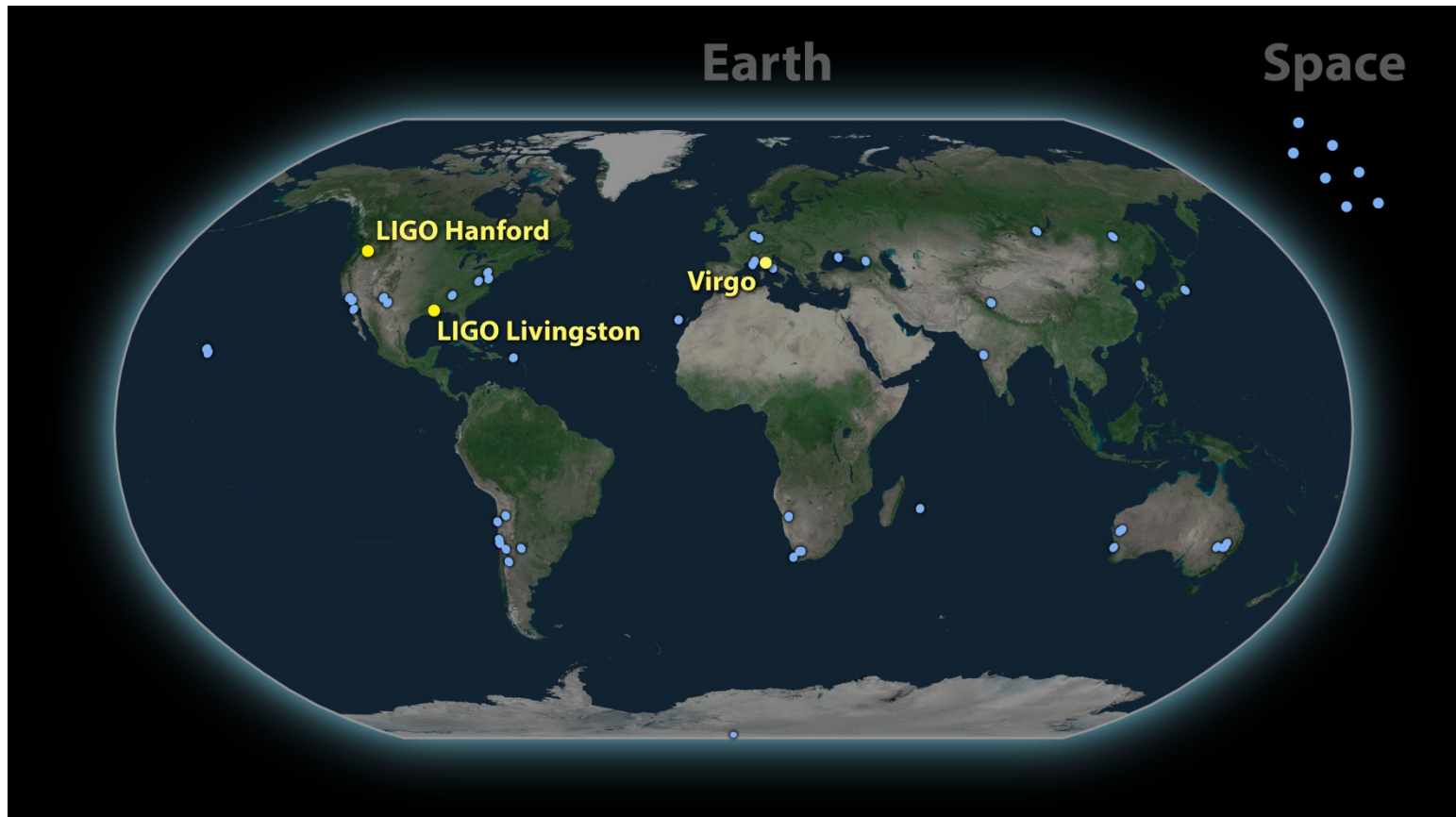
Astronomie multi-messagers

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

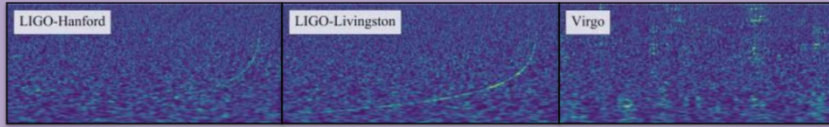


Un suivi mondial

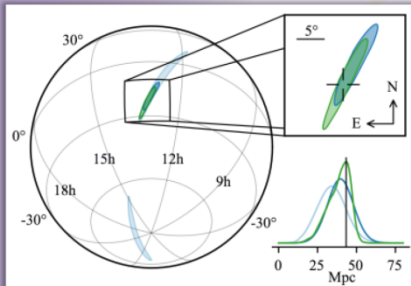
- Trois détecteurs d'ondes gravitationnelles
- Des dizaines d'observatoires partenaires



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 ^{ère} 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 ²
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 _☉	Galaxie hôte	NGC 4993
Masse 1 ^{ère} EN	Entre 1,36 et 2,26 M _☉	RA, Dec de la source	13 ^h 09 ^m 48 ^s , 23°22'53"
Masse 2 ^{ème} EN	Entre 0,86 et 1,36 M _☉	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 _☉ c ²	Mesure de la constante de Hubble (galaxie hôte identifiée)	Entre 62 et 107 km s ⁻¹ Mpc ⁻¹
Rayon d'une EN de masse 1,4 M _☉	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 million de milliards		



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)

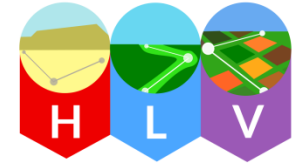
EN = Étoile à Neutrons
 OG = Onde Gravitationnelle
 EM = Electromagnétique
 $M_{\odot} = 1$ masse solaire = 2×10^{30} kg
 H/L= LIGO Hanford/Livingston, V=Virgo

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.



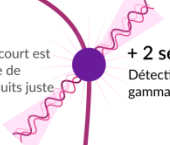
Cet événement "multi-messagers" confirme que des fusions d'étoiles à neutrons peuvent produire des sursauts gamma courts.



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.



+10 h 52 m

Une nouvelle source brillante de lumière visible est détectée dans la galaxie NGCC4993, située dans la constellation de l'Hydre.

+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.



+16 jours

Détection d'une émission en ondes radio.

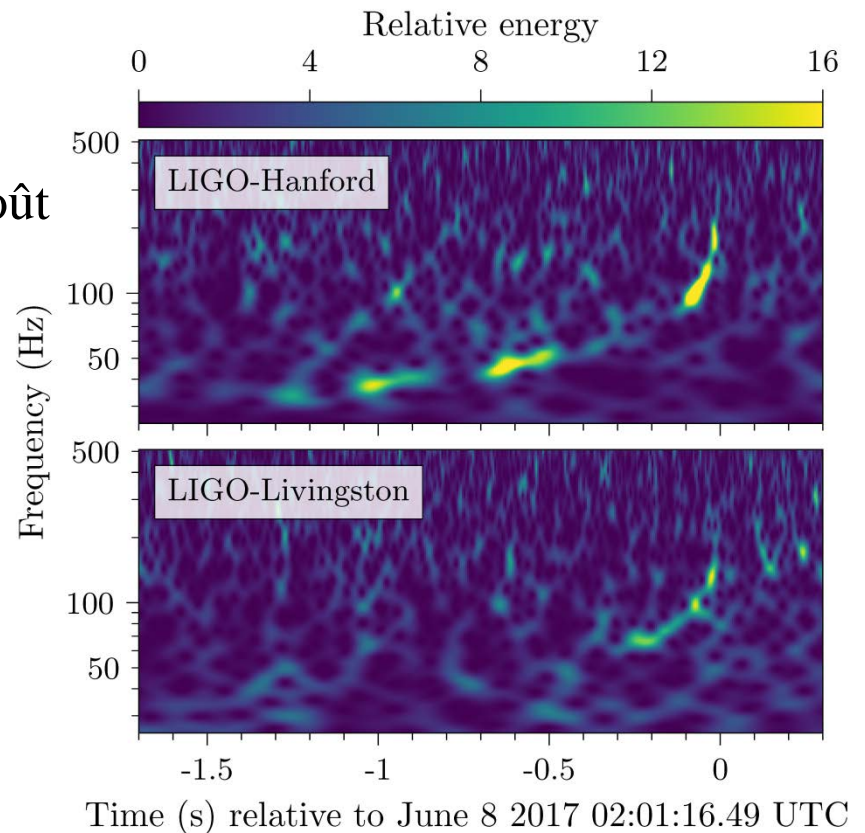
L'importance de GW170817

- 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

L'événement GW170608

GW170608

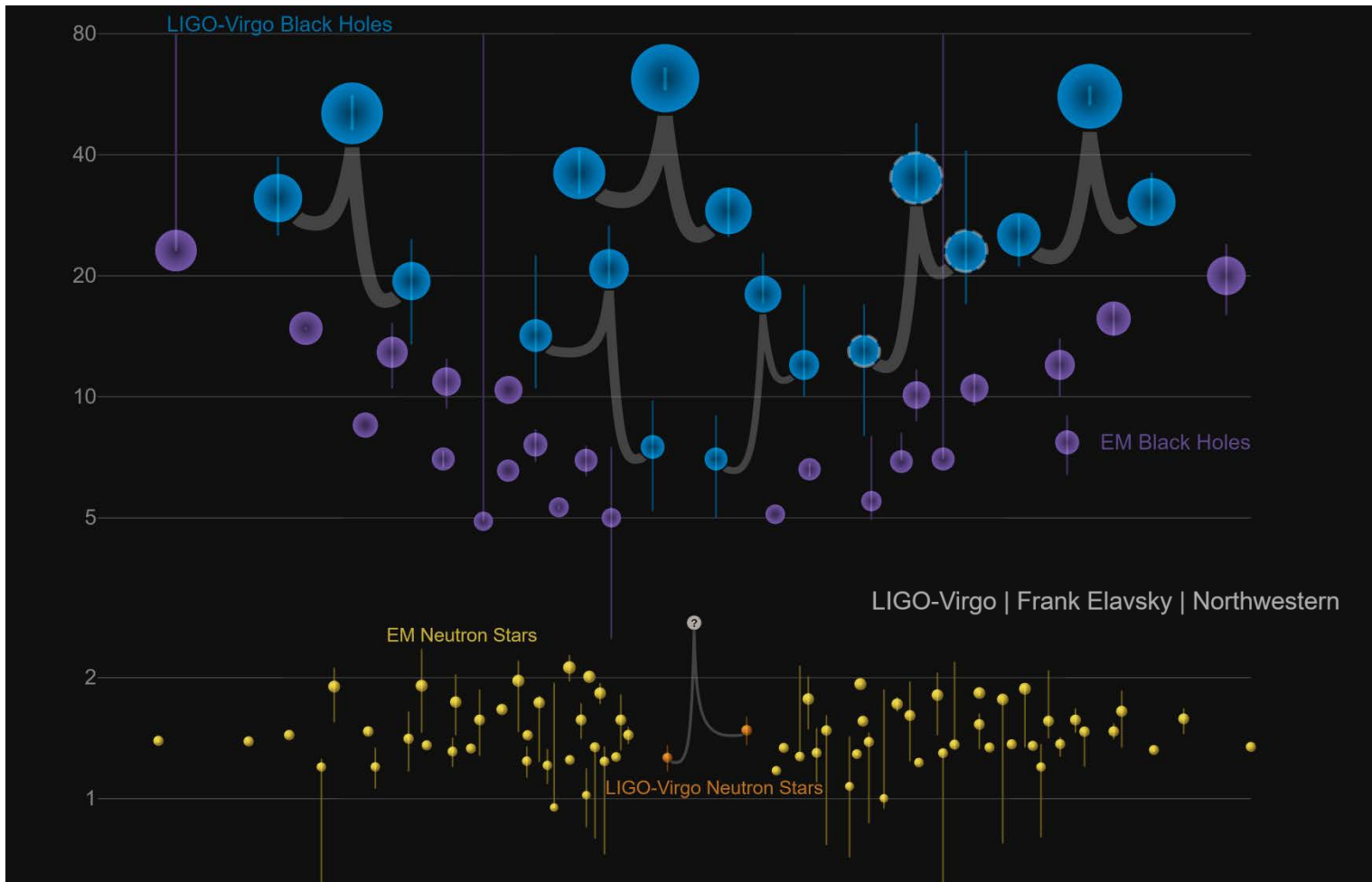
- Signal enregistré par les deux détecteurs LIGO le 8 juin dernier
 - Virgo encore en phase de démarrage
- Une autre fusion de deux trous noirs
 - Le système le plus léger observé jusqu'à maintenant
 - 12 et 7 masses solaires
- Analyse détaillée et annonce décalées suite aux deux événements observés en août
 - Signal antérieur aux détections GW170814 et GW170817 mais publié après



Conclusions

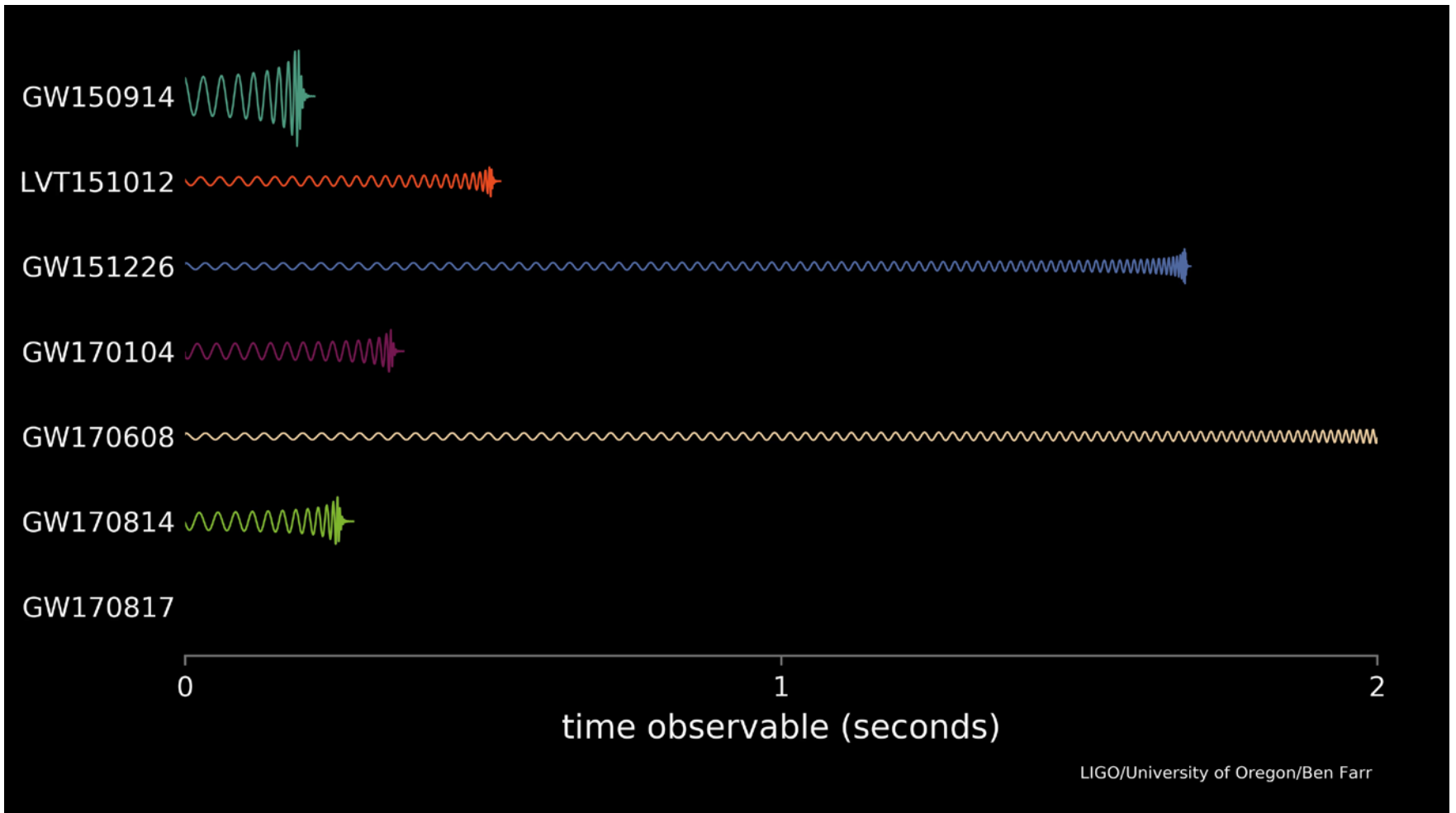
Détections

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



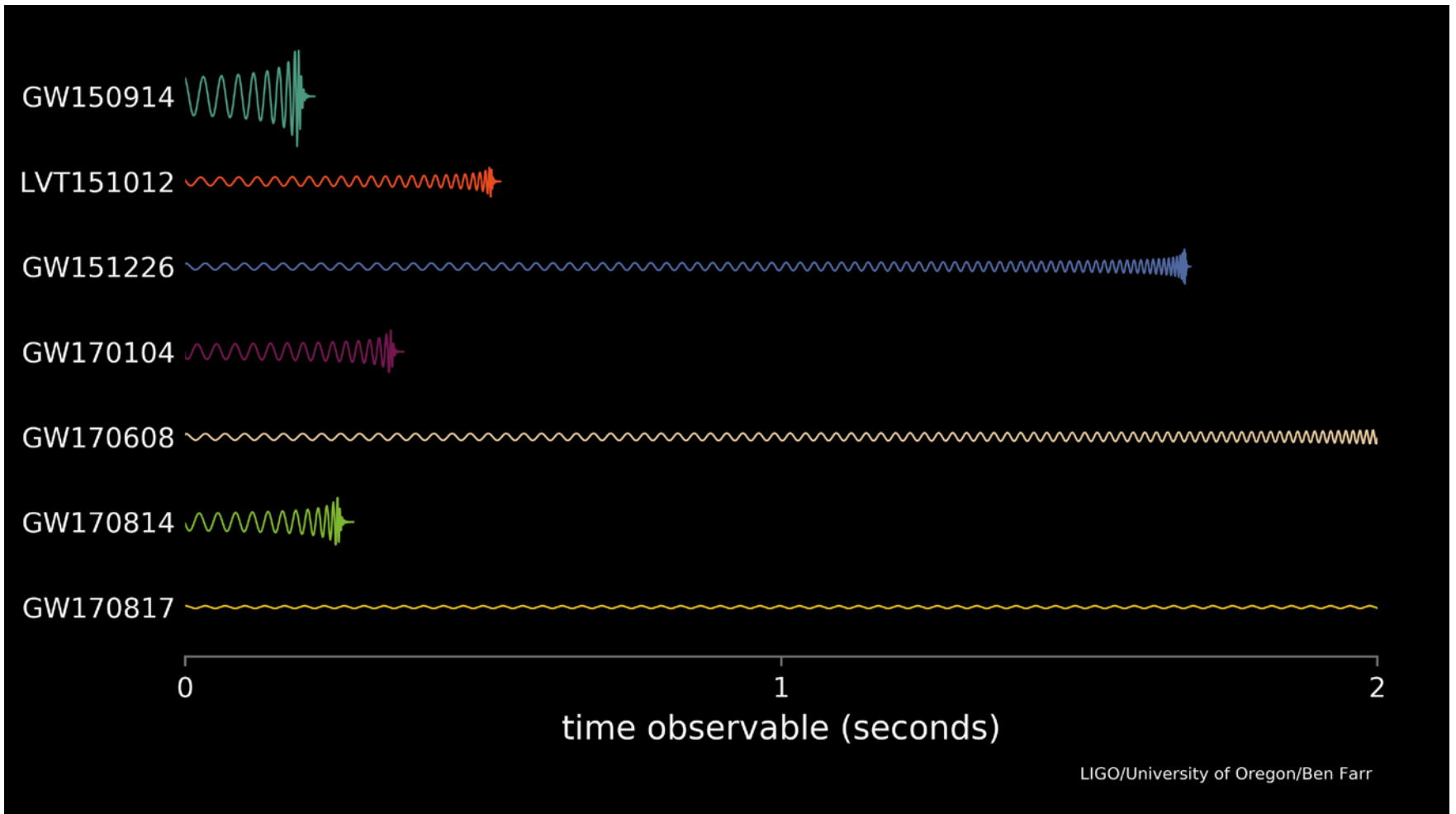
Détections

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



Détections

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

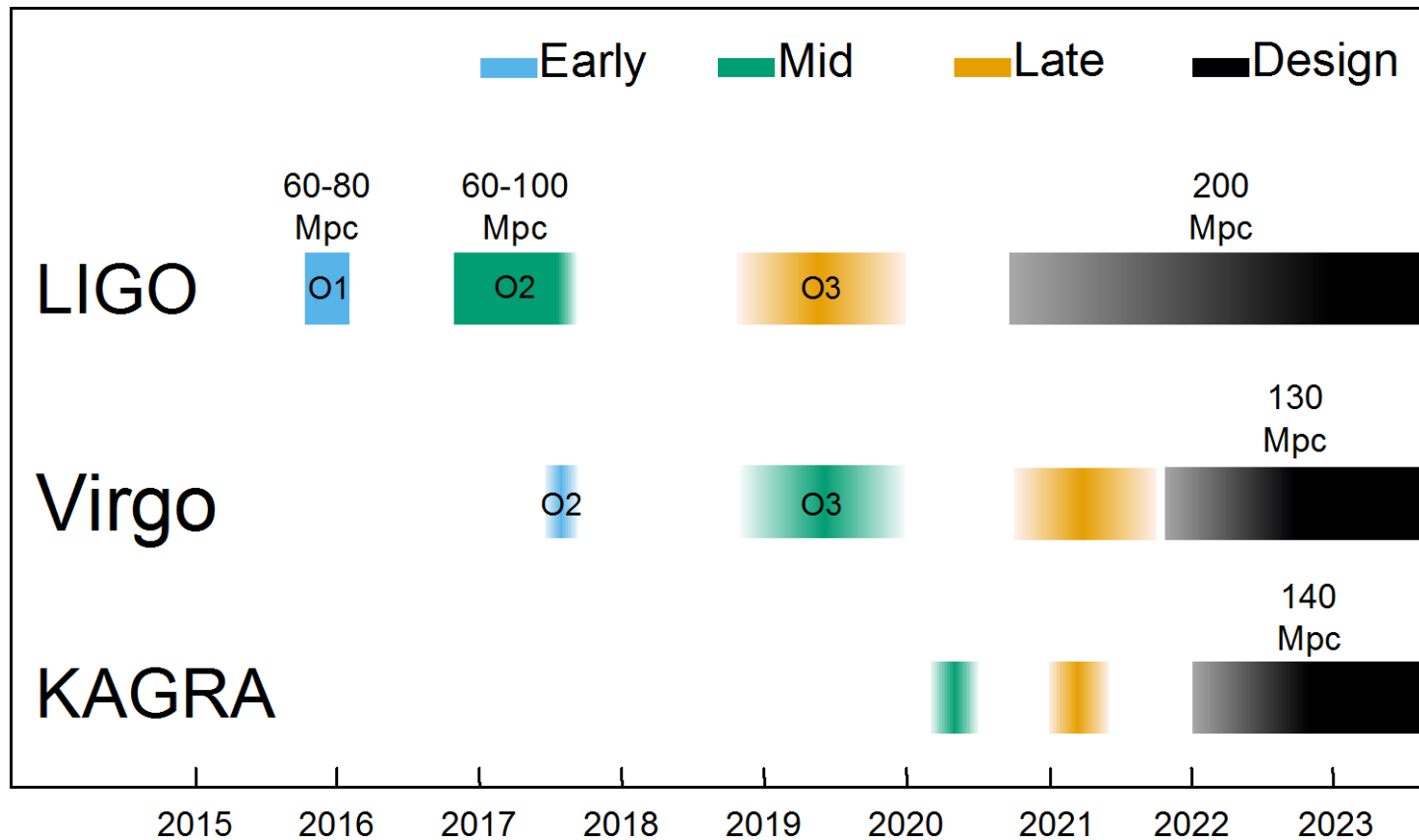


Conclusions

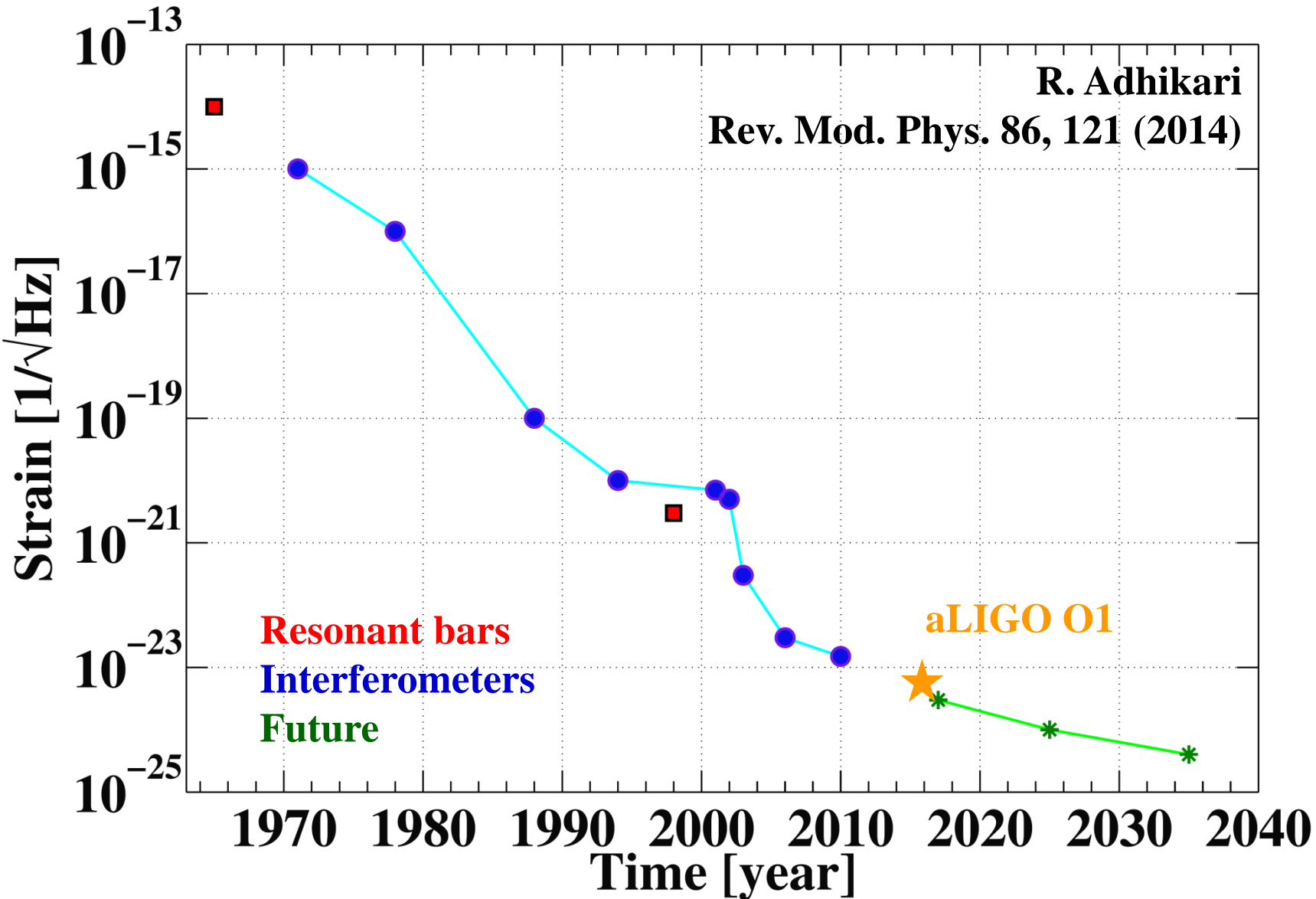
- Le **réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles** est maintenant une **réalité**
 - Les détecteurs détecteurs LIGO avancés ont pris leurs premières données en septembre 2015 et ont détecté les signaux **GW150914, GW151226, GW170104, GW170608**
 - **Virgo avancé a rejoint LIGO le 1^{er} août 2017**
 - 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^{ème} 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 l'automne 2018**
 - Activités R&D en cours pour préparer la 3^{ème} génération d'instruments
 - « Einstein telescope » !?

Prévisions

- Améliorations possibles / attendues de la sensibilité des détecteurs au cours du temps
 - Exprimées en terme de « distance moyenne de détection d'une BNS »
 - Distance moyennée sur le ciel ; détection @ SNR = 8



Evolution de la sensibilité pic en fonction du temps



Film CNRS Images

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

