

Visite de EGO/Virgo

21 Juin 2022

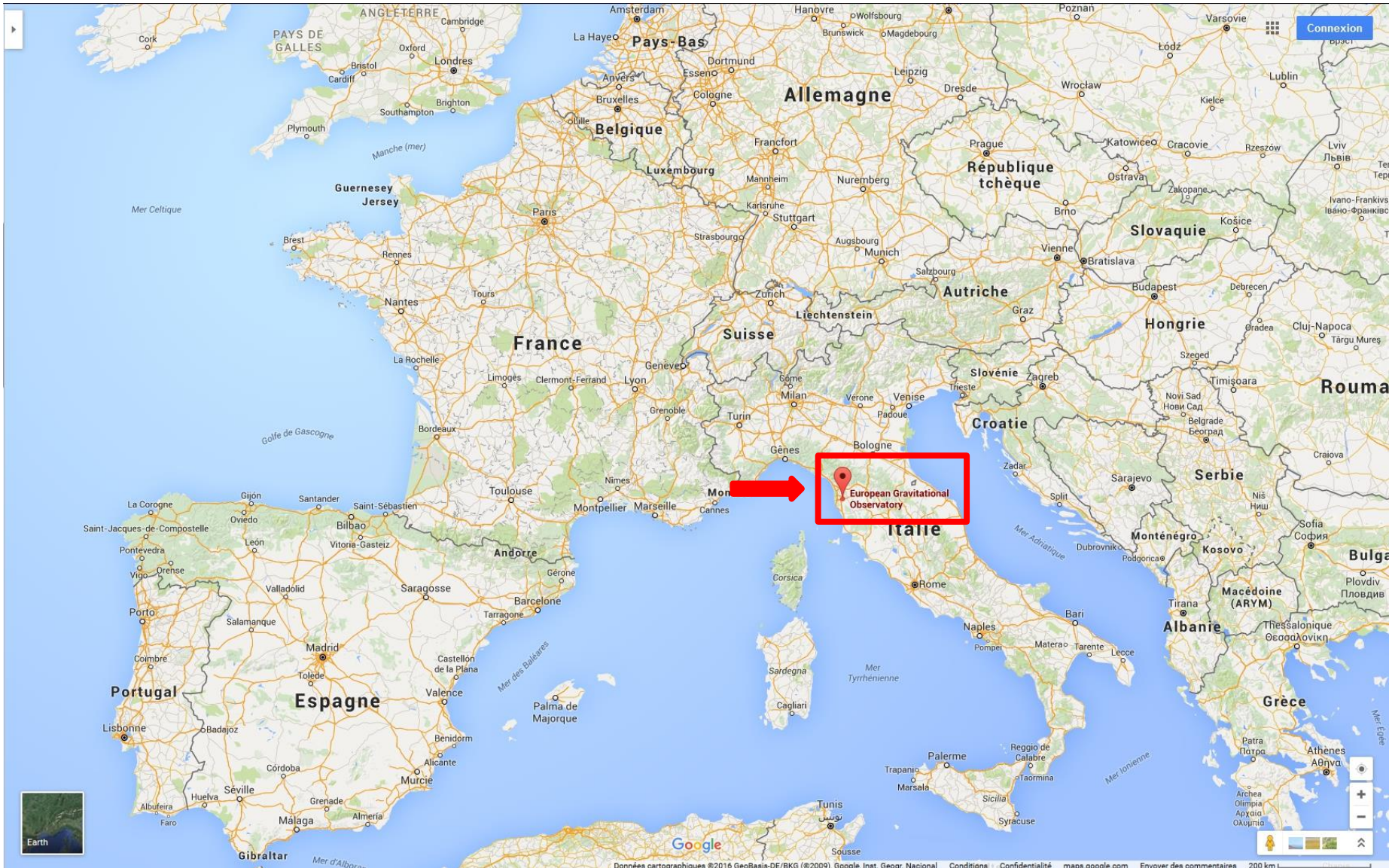
Nicolas Arnaud (nicolas.arnaud@ijclab.in2p3.fr)

Laboratoire de Physique des Deux Infinis Irène Joliot-Curie (Université Paris-Saclay & CNRS/IN2P3)
European Gravitational Observatory (CNRS, INFN & NIKHEF Consortium)



Plantons le décor ...

Où est Virgo ?



Une « IR* »

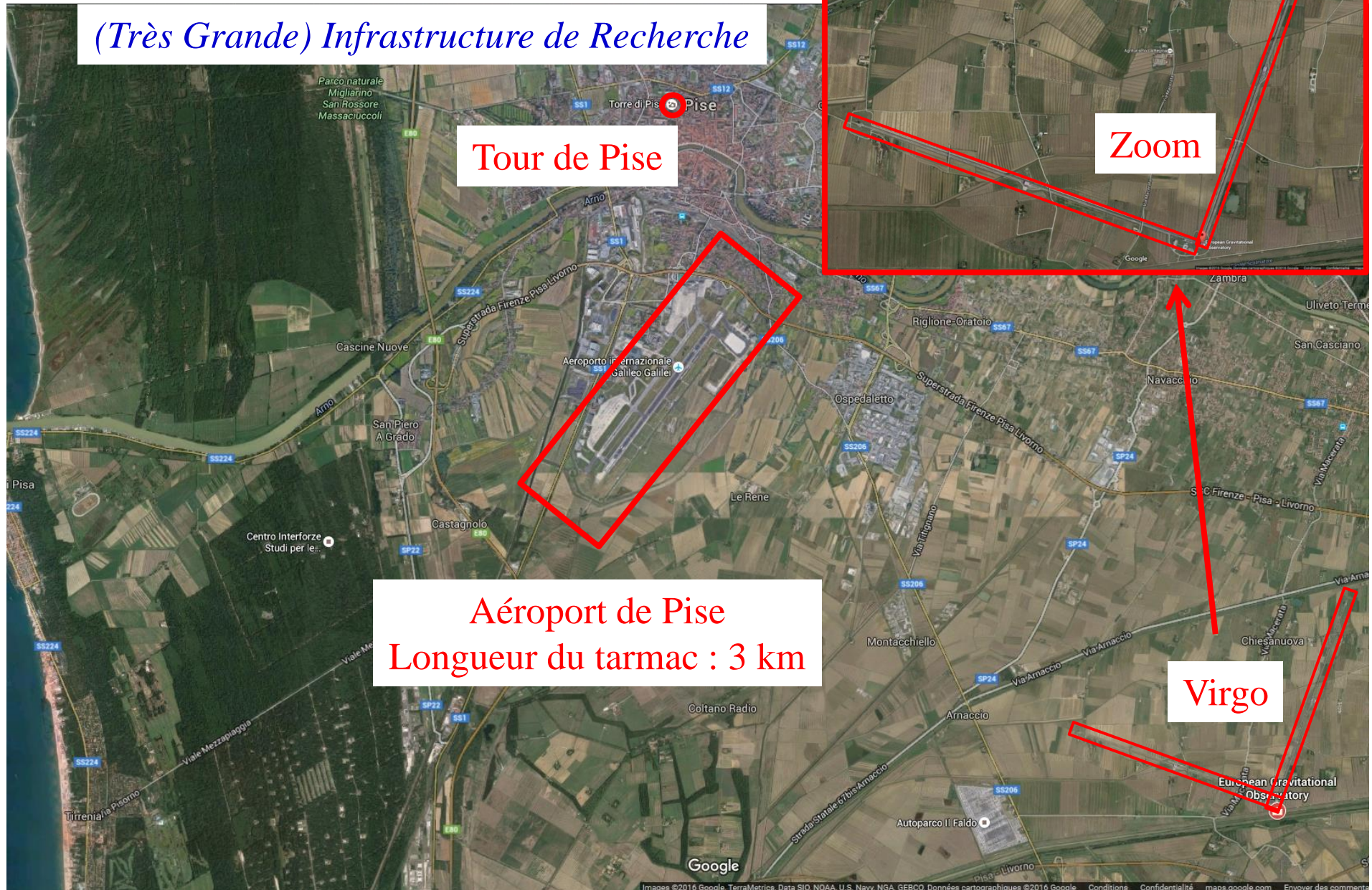
(Très Grande) Infrastructure de Recherche

Tour de Pise

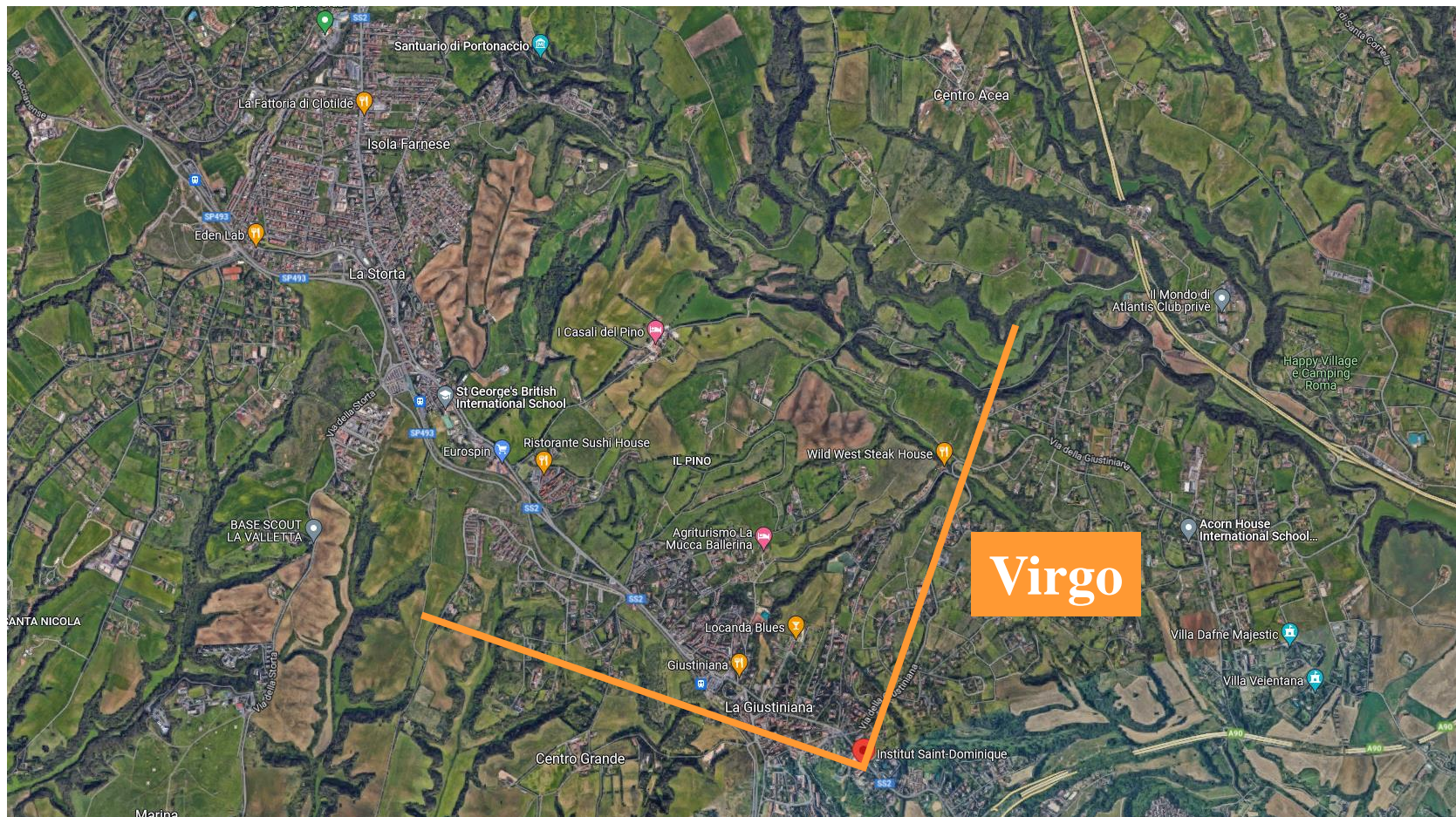
Aéroport de Pise
Longueur du tarmac : 3 km

Zoom

Virgo

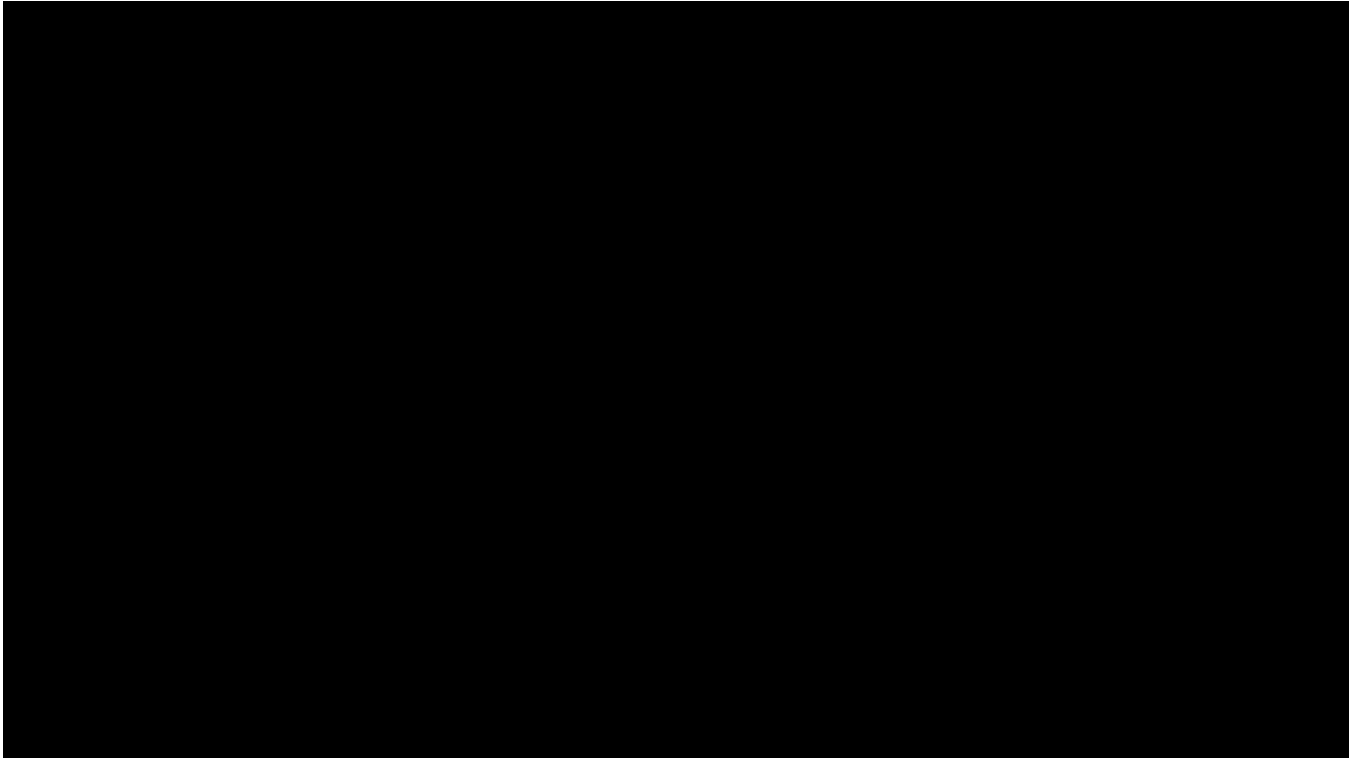


Si Virgo était pas loin de Rome ...



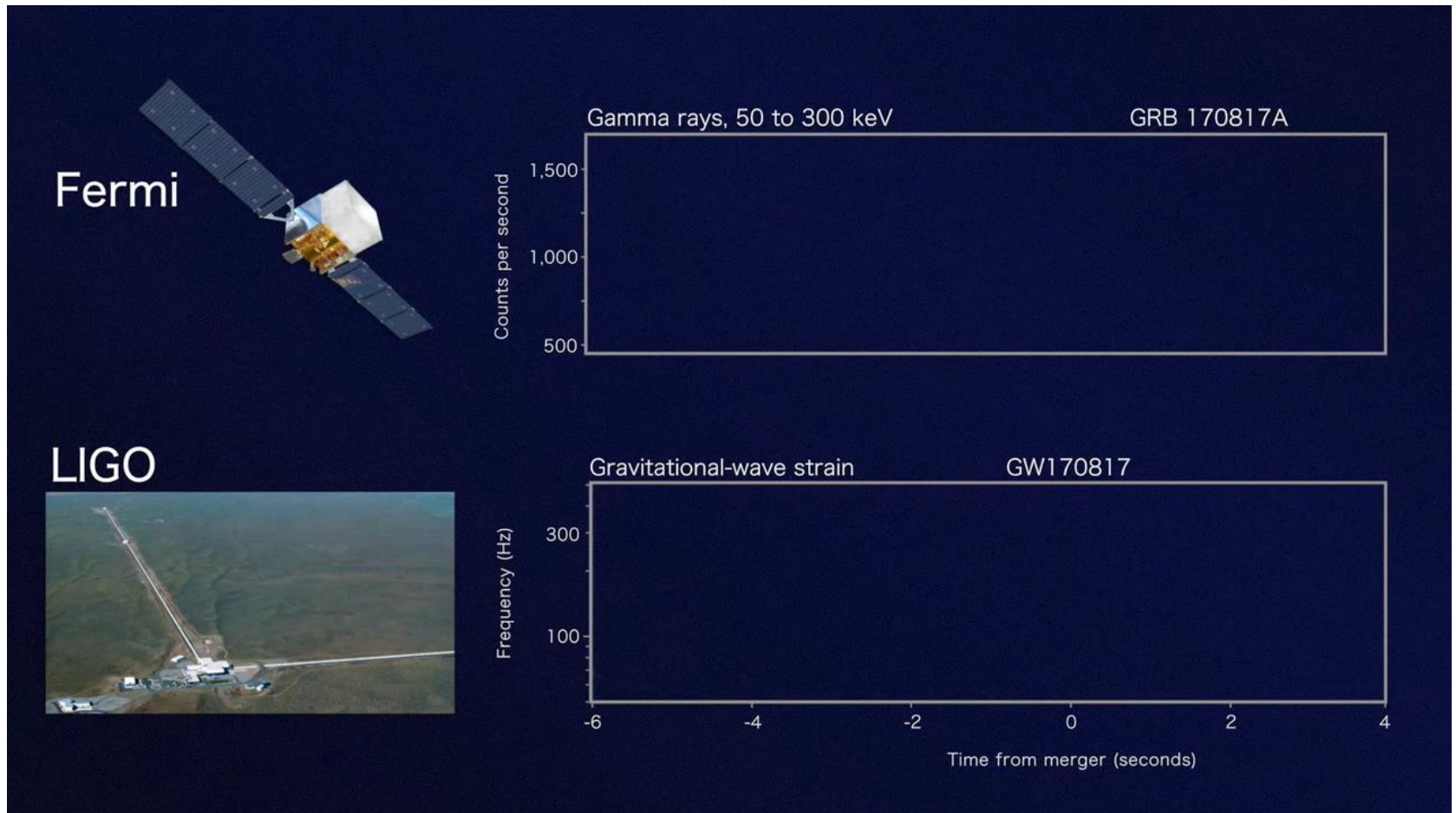
17-18 août 2017 :
12 heures extraordinaires

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

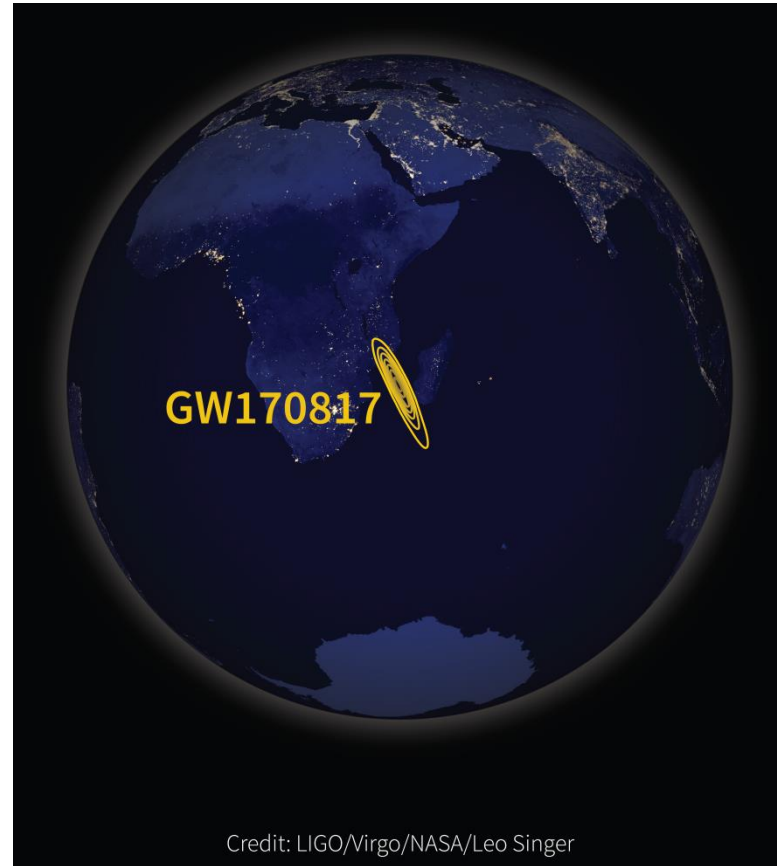


Plus tard le même jour ...

- 19h55

→ Localisation LIGO-Virgo

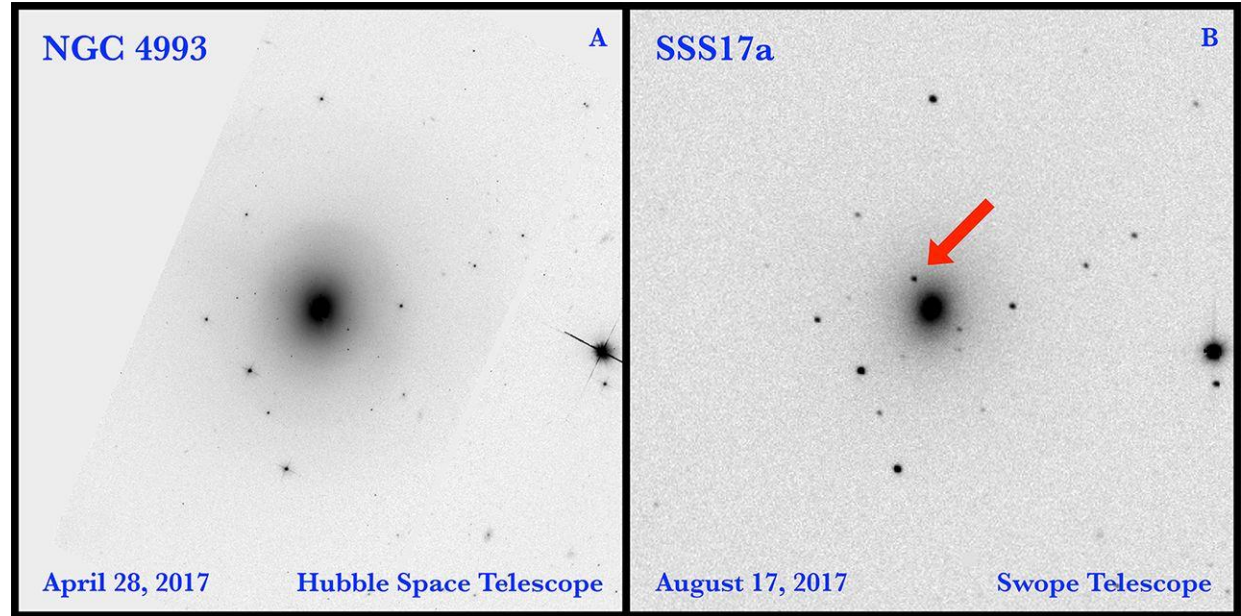
- Position dans le ciel :
28 degrés carrés
- Estimation de la distance
de la source



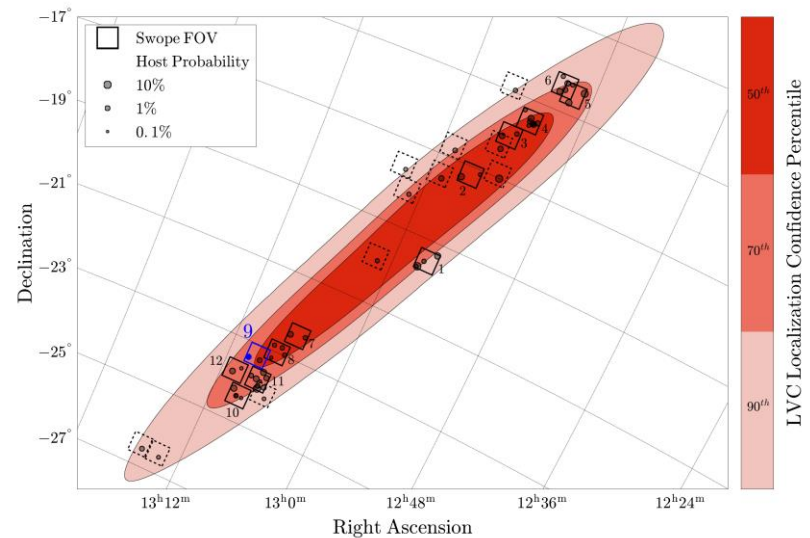
La nuit suivante ...

- 18/08/2017
01h33 heure de Paris

→ Découverte de la
contrepartie optique
à l'aide du
téléscope SWOPE
au Chili

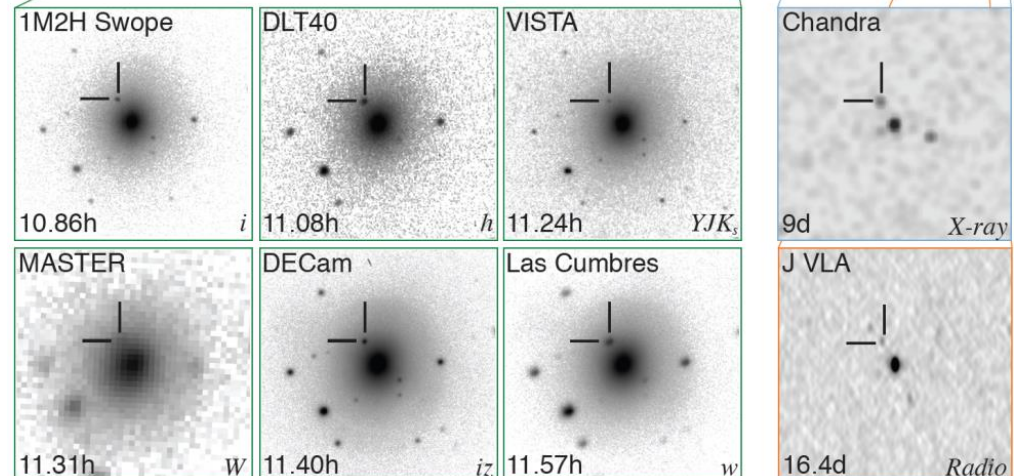
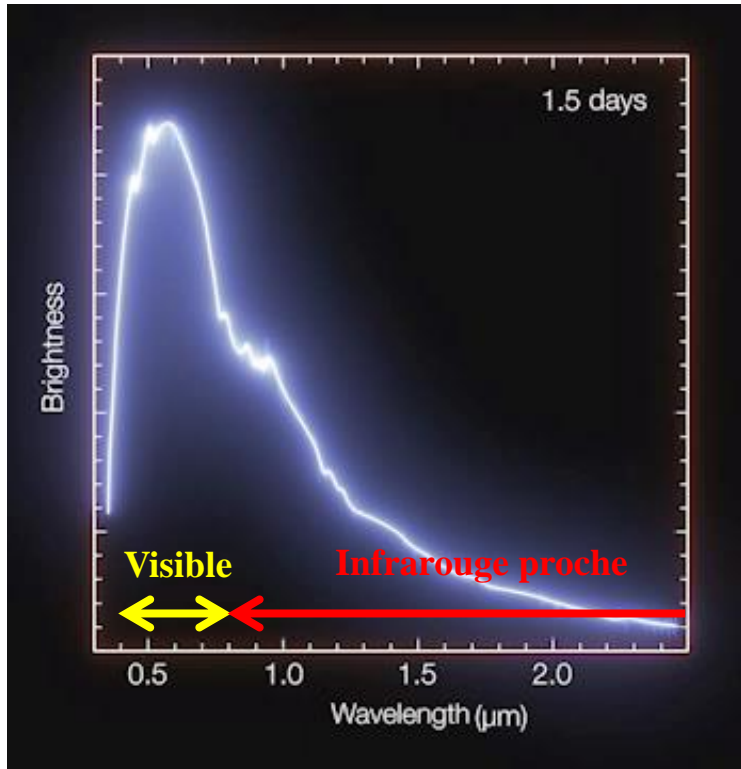
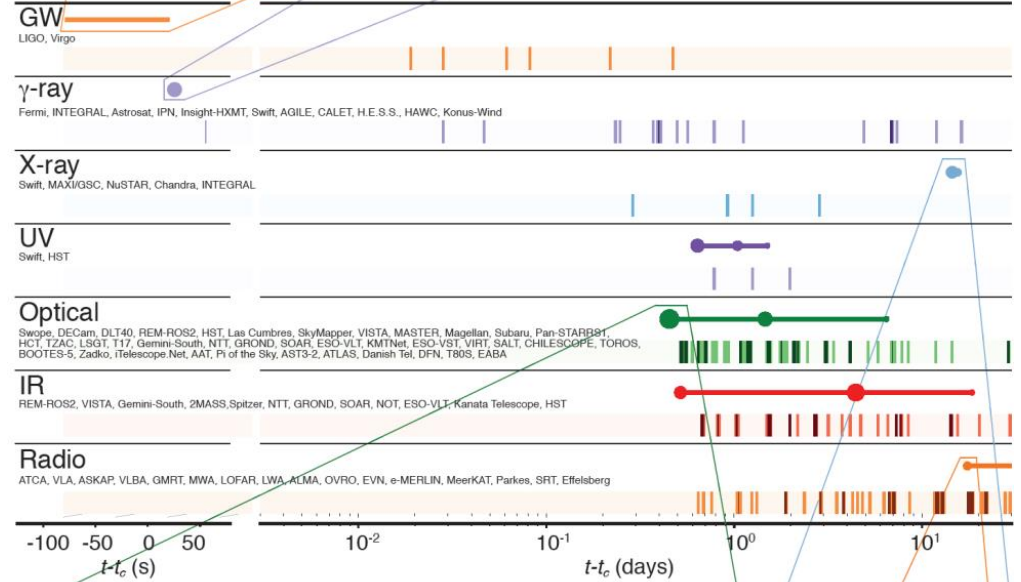
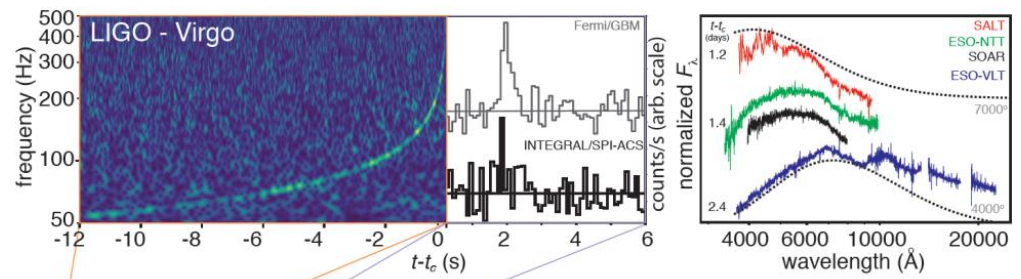


~ (1 / 160 000)-ème du ciel



Astronomie multi-messagers

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

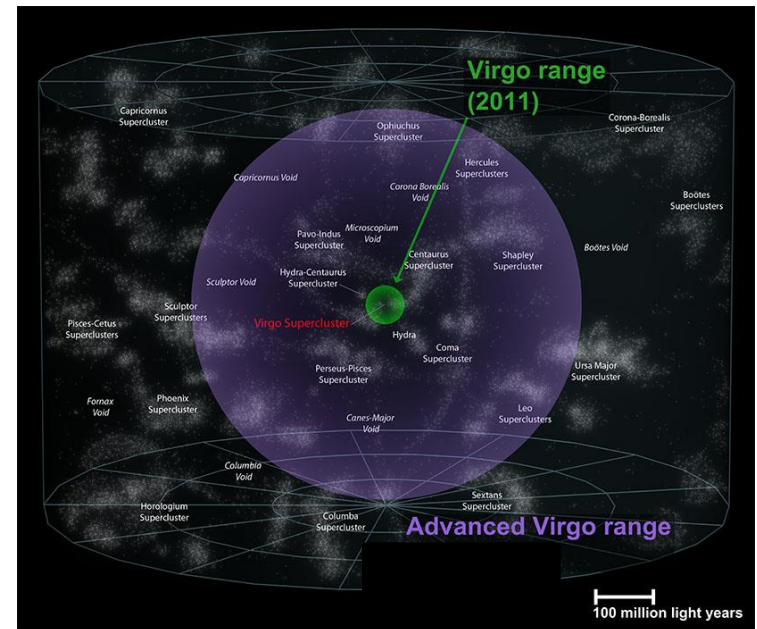
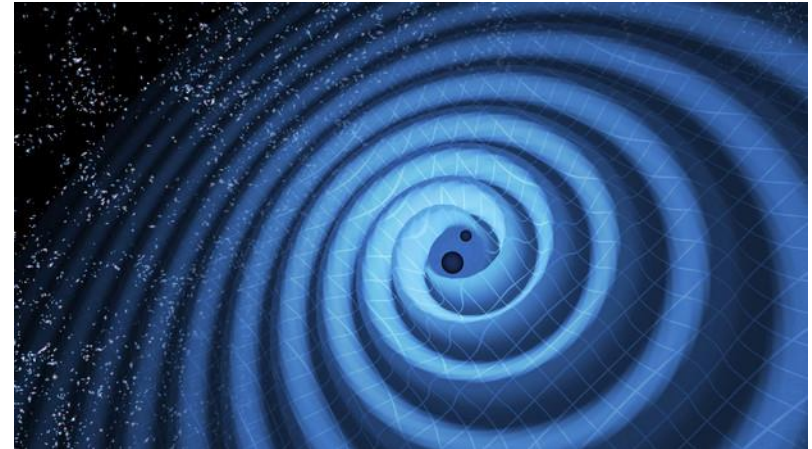


Détecter les ondes gravitationnelles

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

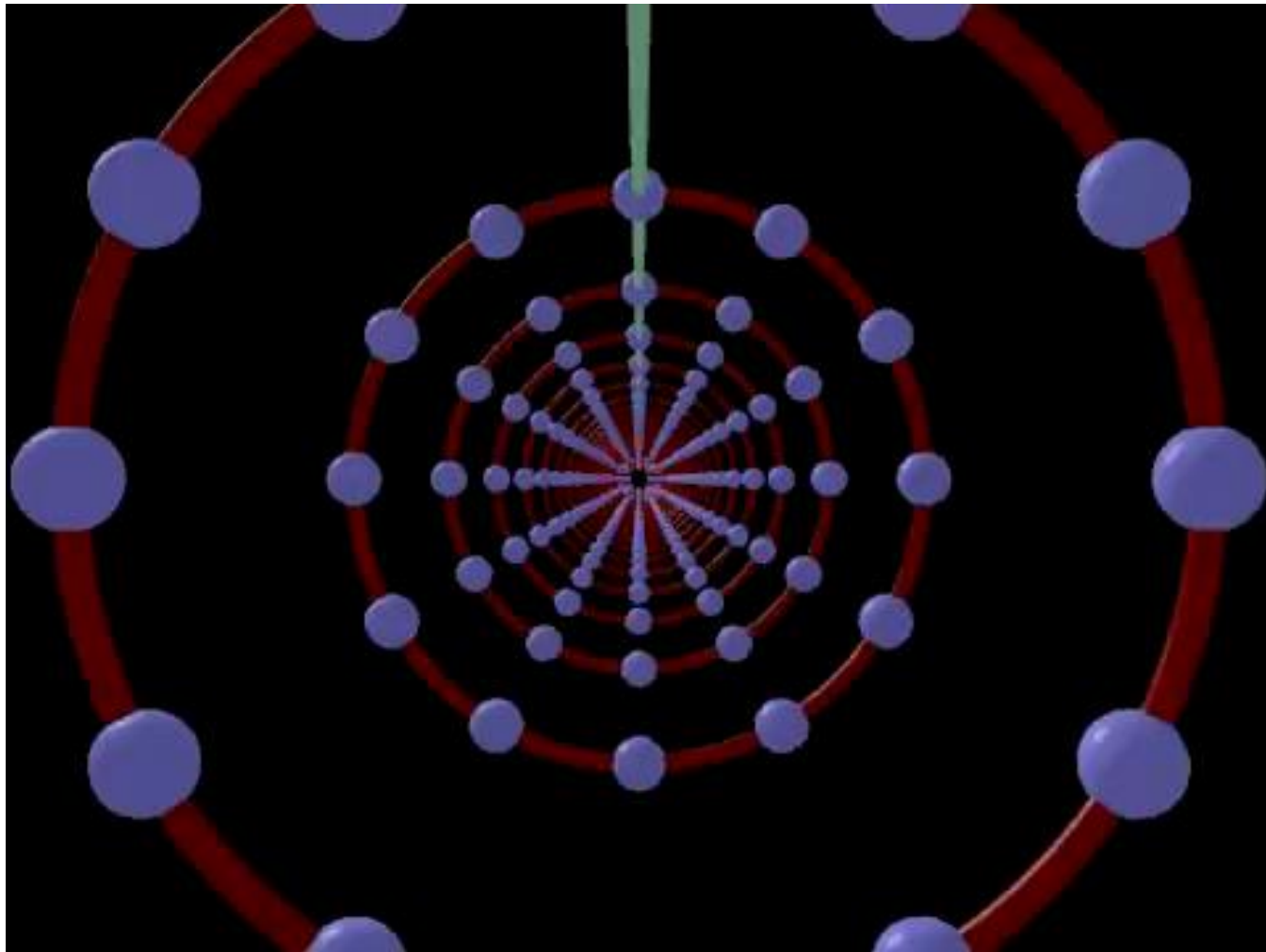
Les ondes gravitationnelles

- 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

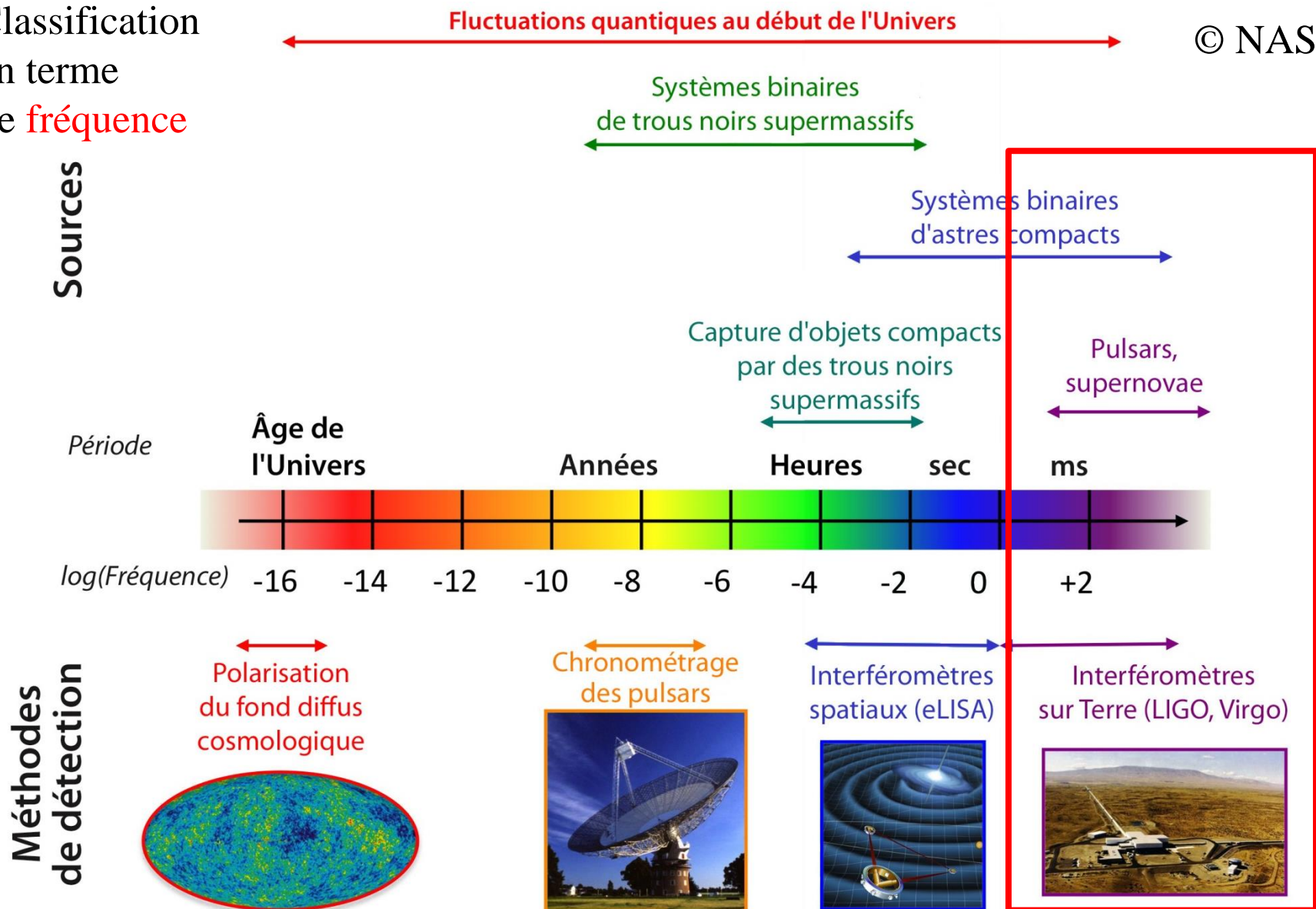
- En trois dimensions



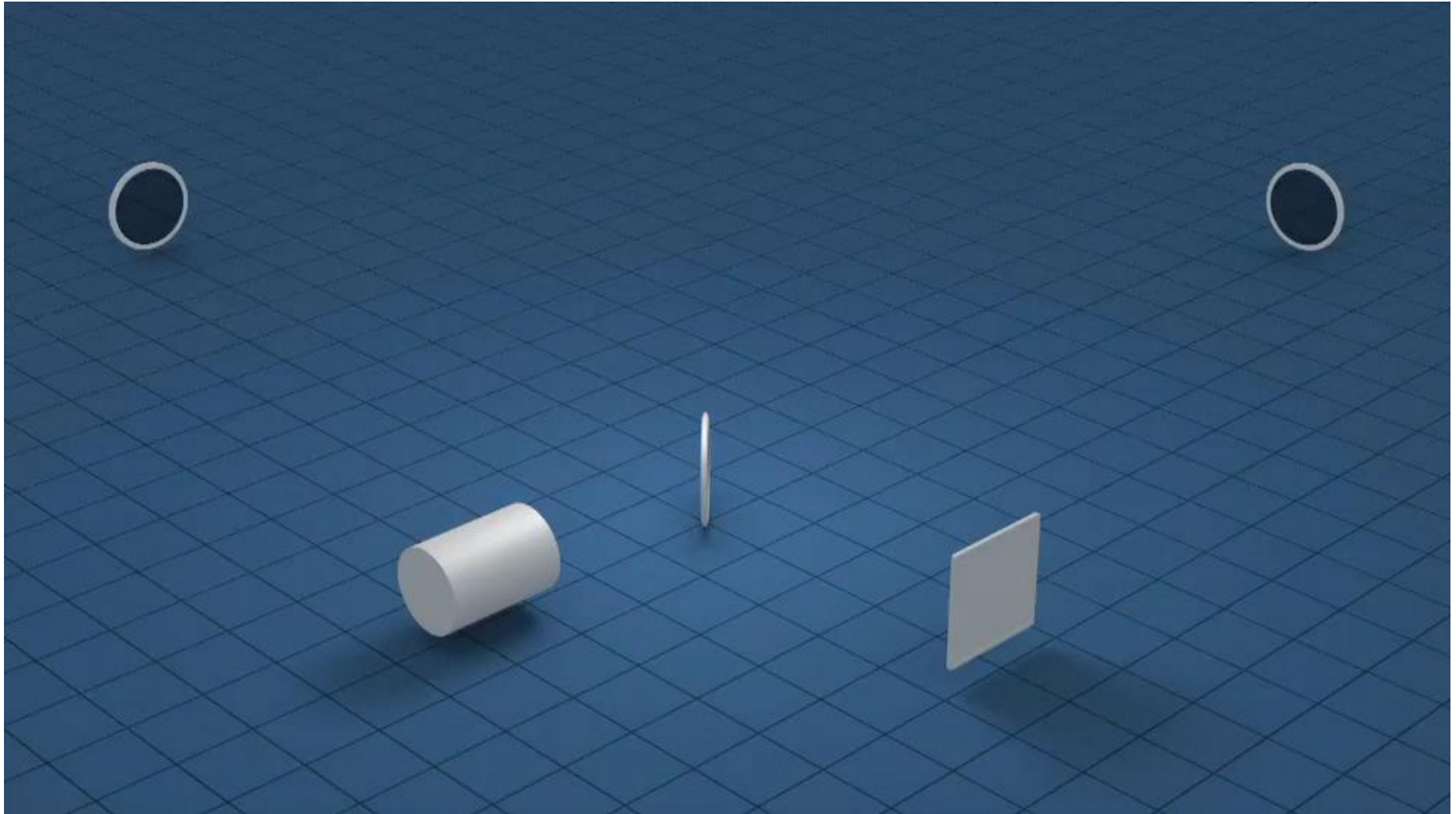
Le spectre des ondes gravitationnelles

- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



Principe de fonctionnement

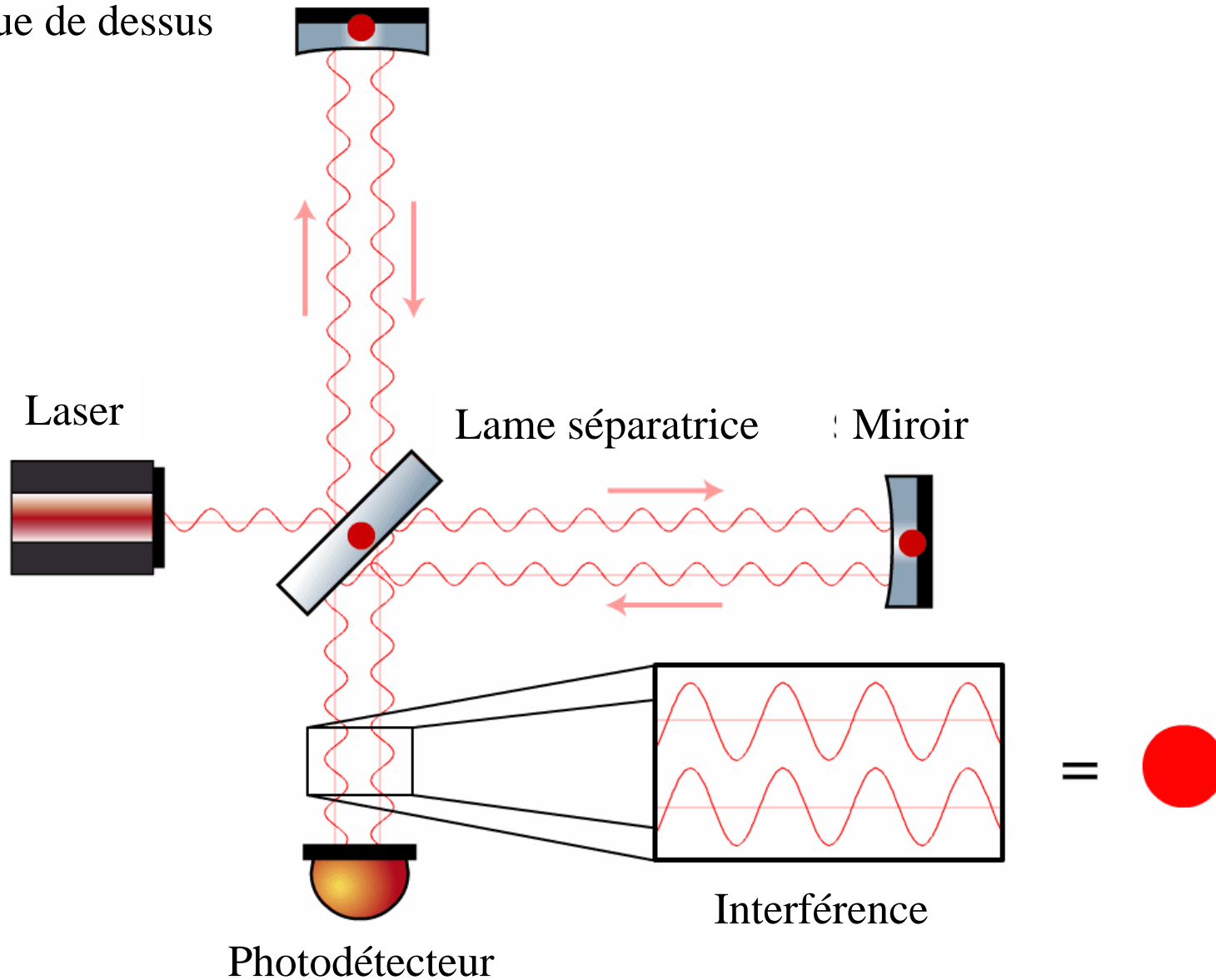


$$\underbrace{\text{Sensibilité}}_{\text{Valeurs très petites}} \propto \frac{1}{(\text{longueur des bras}) \times \sqrt{\text{puissance laser}}}$$

Valeurs très petites

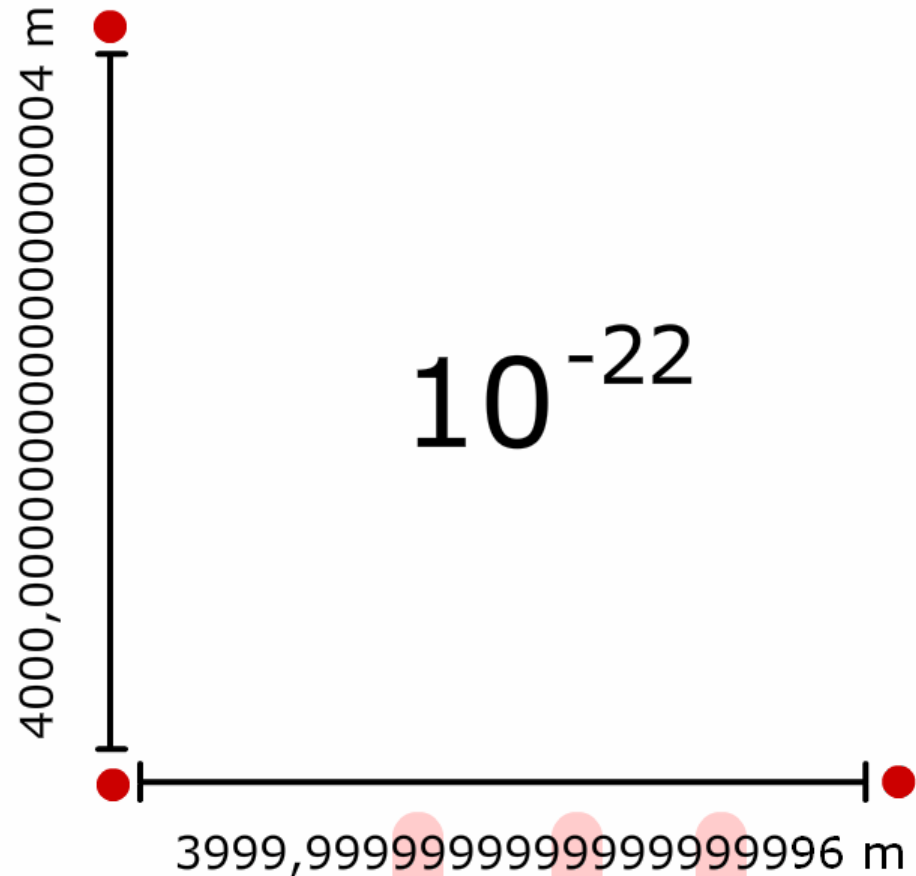
Principe de fonctionnement

- Vue de dessus



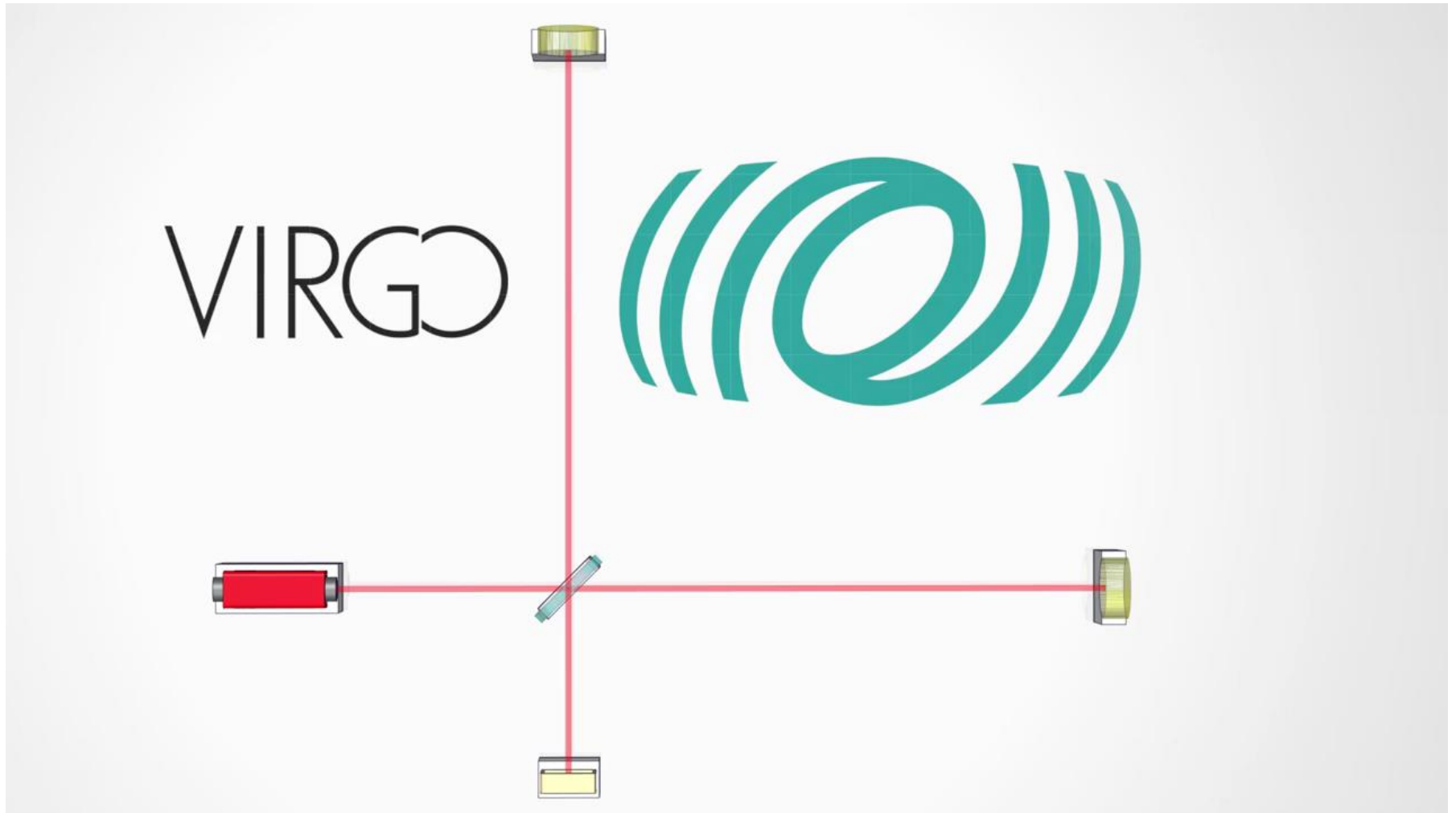
Une sensibilité record

- Variation relative de longueur ($\Delta L/L$) très faible
 - De l'ordre d'une fraction de millième 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

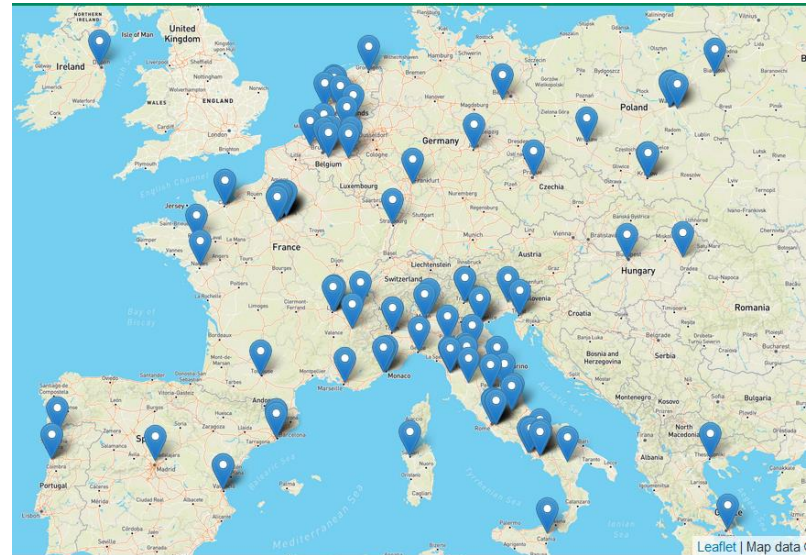
- <https://www.youtube.com/watch?v=6raomYII9P4>, © Marco Kraan, Nikhef (Pays-Bas)



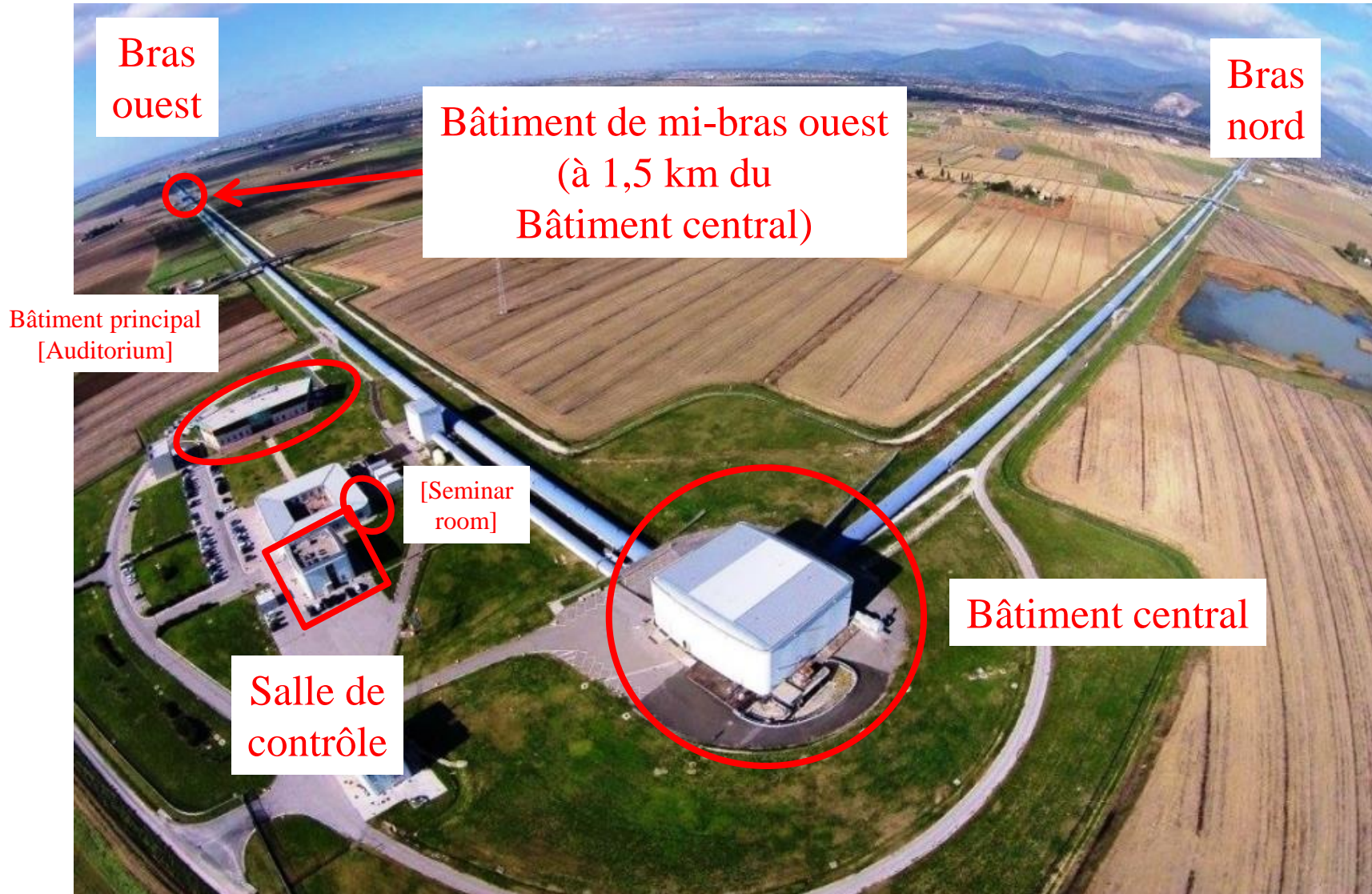
Virgo, LIGO and co.

La Collaboration Virgo

- Plus de 750 membres
 - Dont environ 450 auteurs
- Représentant ~130 institutions de 15 pays
- 9 pays représentés au comité en charge de piloter la Collaboration Virgo
 - 34 groupes au total



Virgo vu du ciel



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

Un réseau de détecteurs

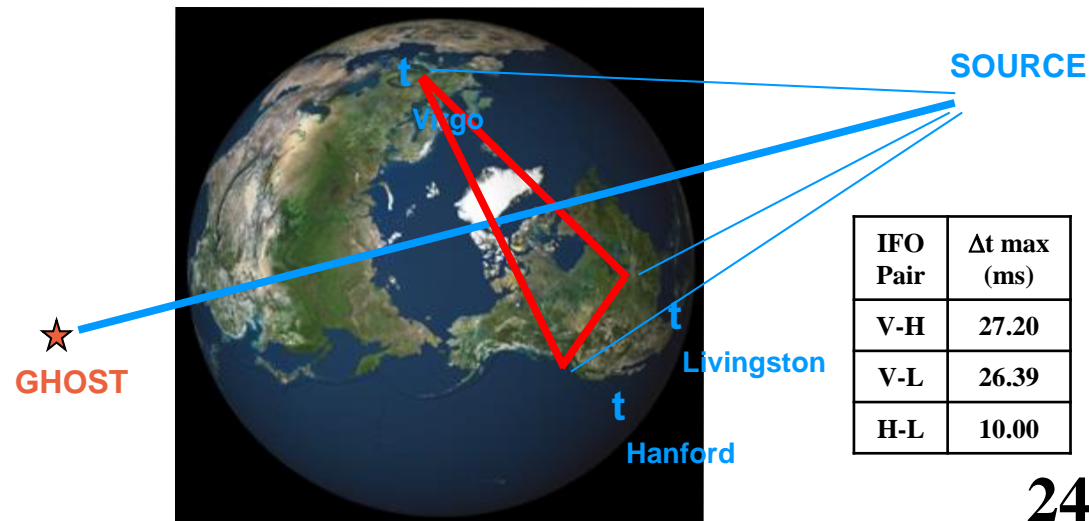
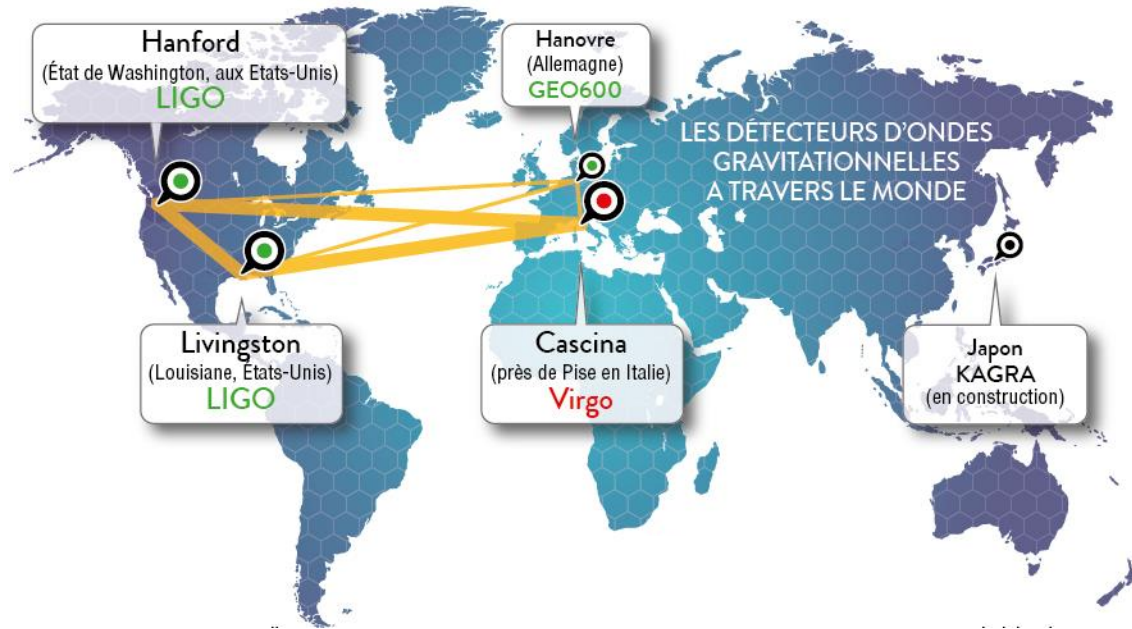


Un réseau de détecteurs

- 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) ...

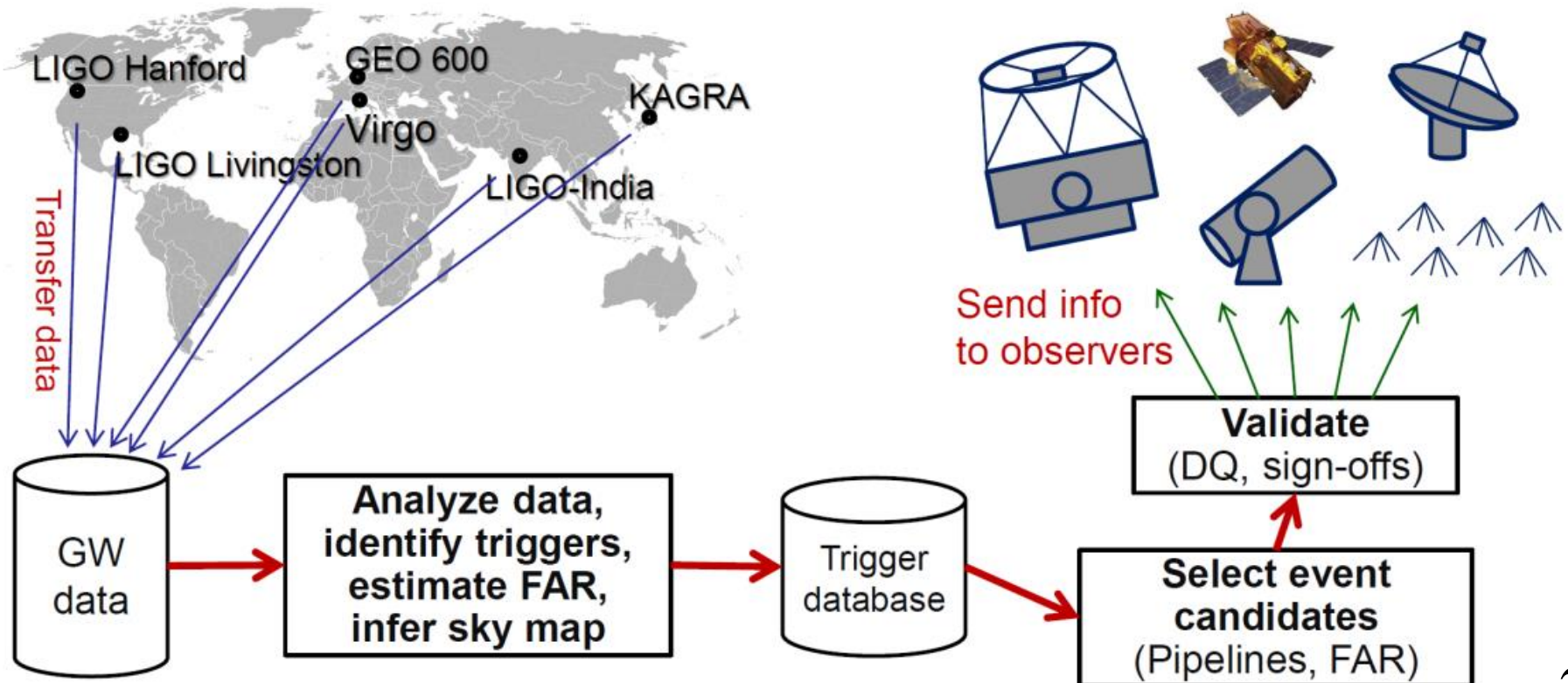
→ Solution : utiliser un réseau d'interféromètres

- 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



Un réseau de partenaires

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



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.)**

(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**

- **À suivre ...**

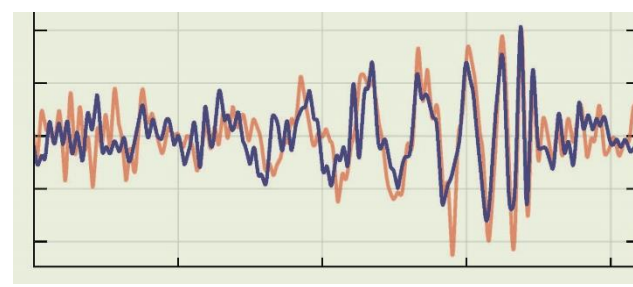
} **Premières découvertes !**

Théorie
Expérience

14 septembre 2015, 11:51 heure de Paris

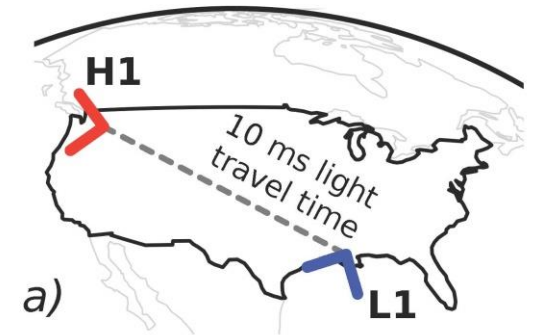
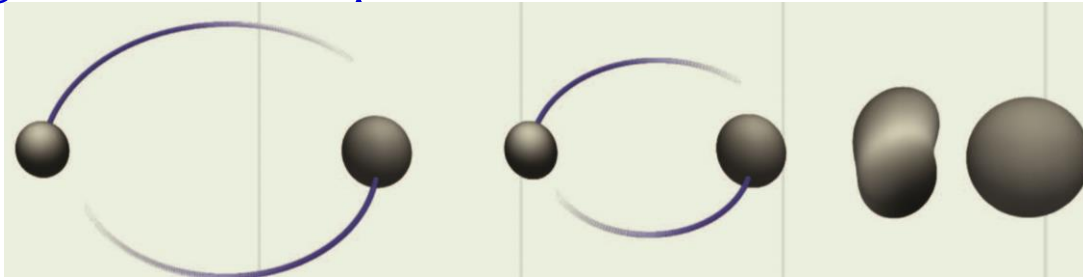
- Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle

- 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



a)



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

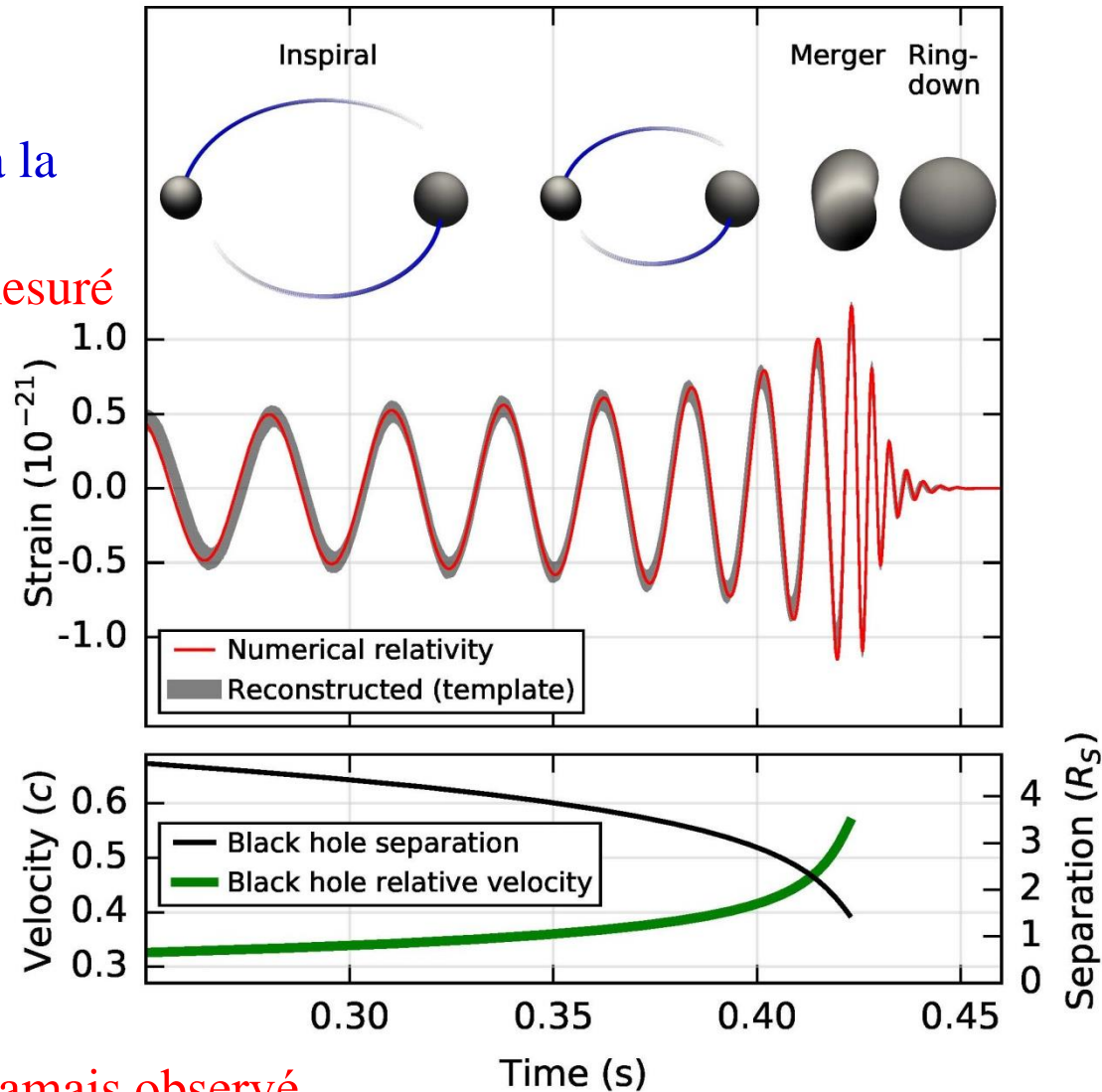
- Deux **objets massifs** et **compacts** en orbite l'un autour de l'autre à **75 Hz** (la moitié de la fréquence de l'OG), donc à une **vitesse relativiste** et qui se rapprochent très près avant de fusionner
→ A peine quelques R_S !

→ Seuls des trous noirs peuvent correspondre à ces observations

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

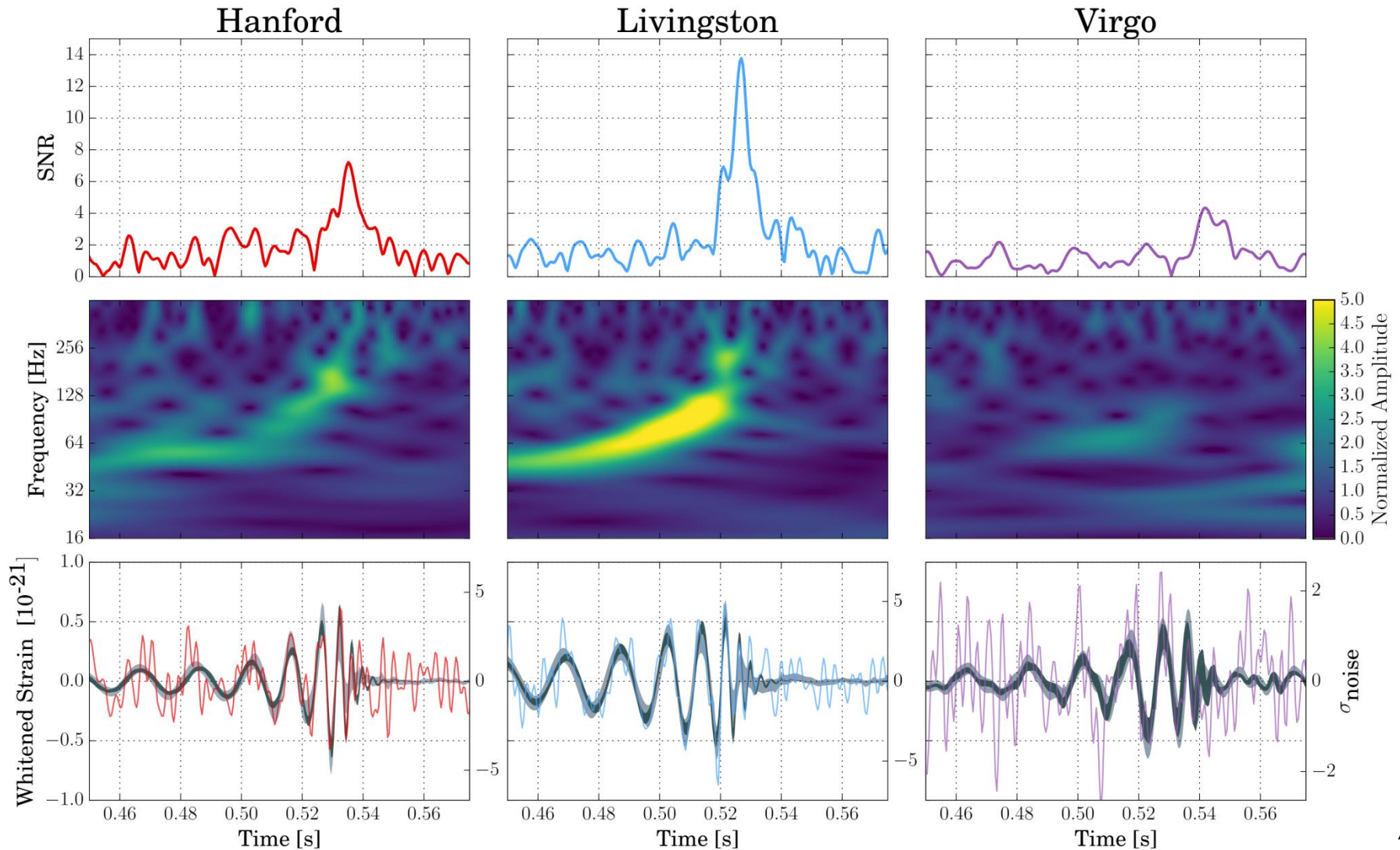
- **L'événement le plus énergétique jamais observé**

- 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



GW170814 : 1^{ère} détection triple

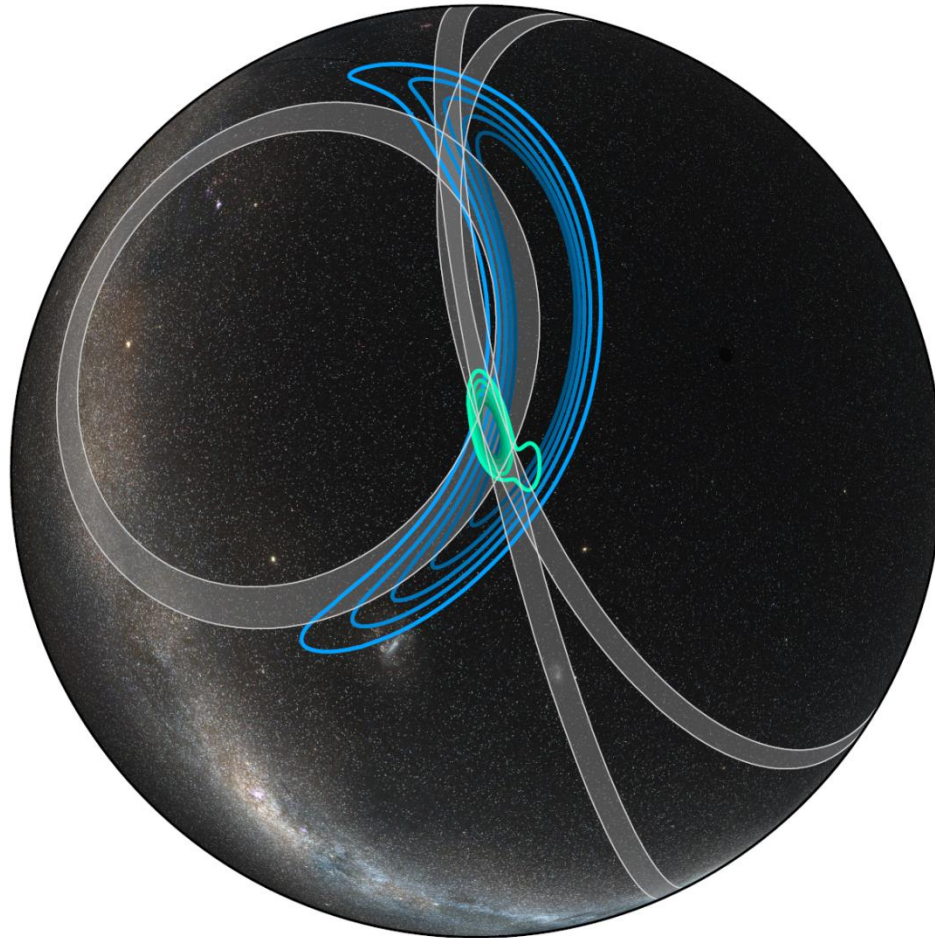
- Des études détaillées confirment la présence d'un **signal dans le détecteur Virgo**



GW170814 : localisation de la source dans le ciel

- **Triangulation**

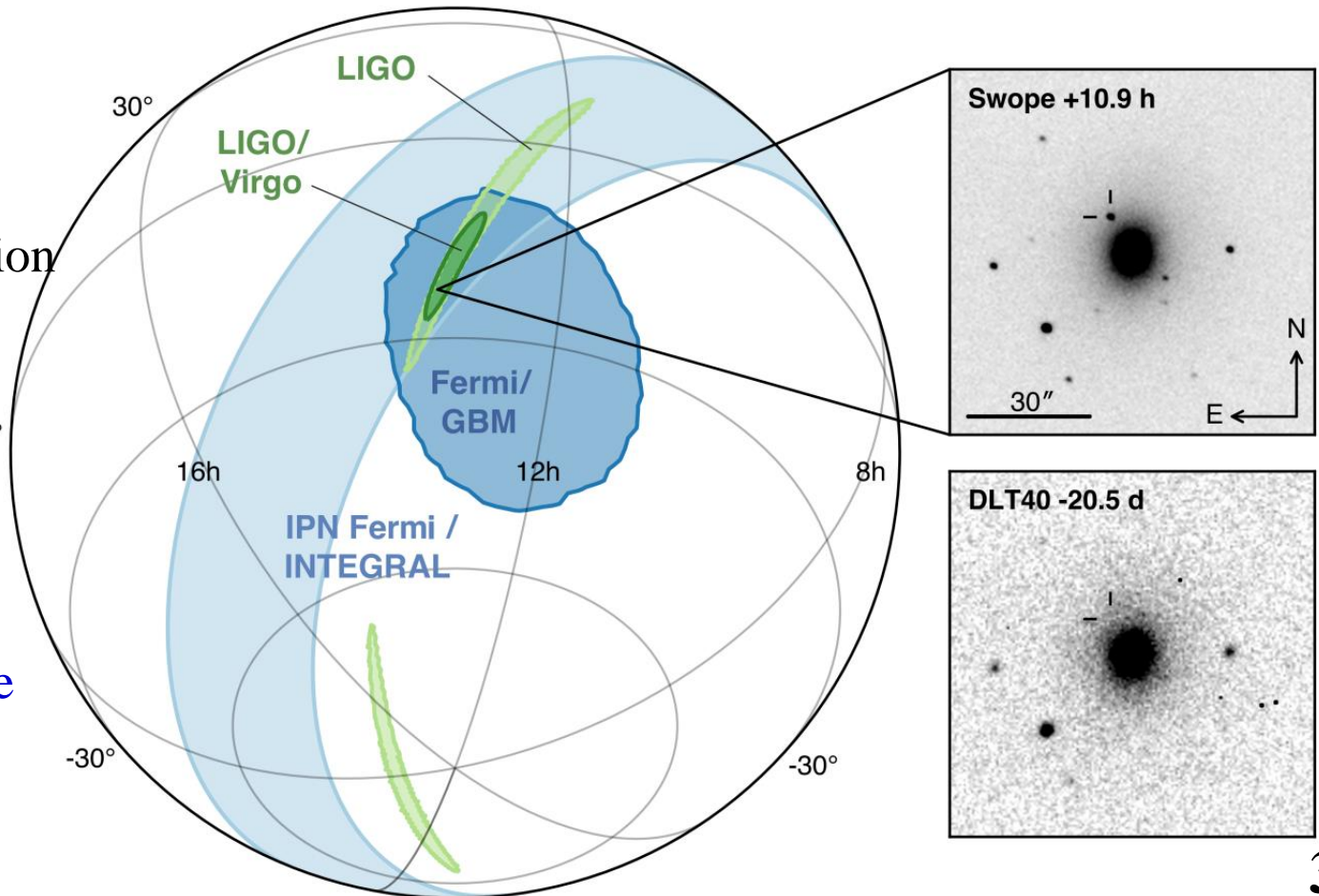
- Délais entre les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs
- Différences de forme et d'amplitude entre ces signaux



Localisation de la source de GW170817 dans le ciel

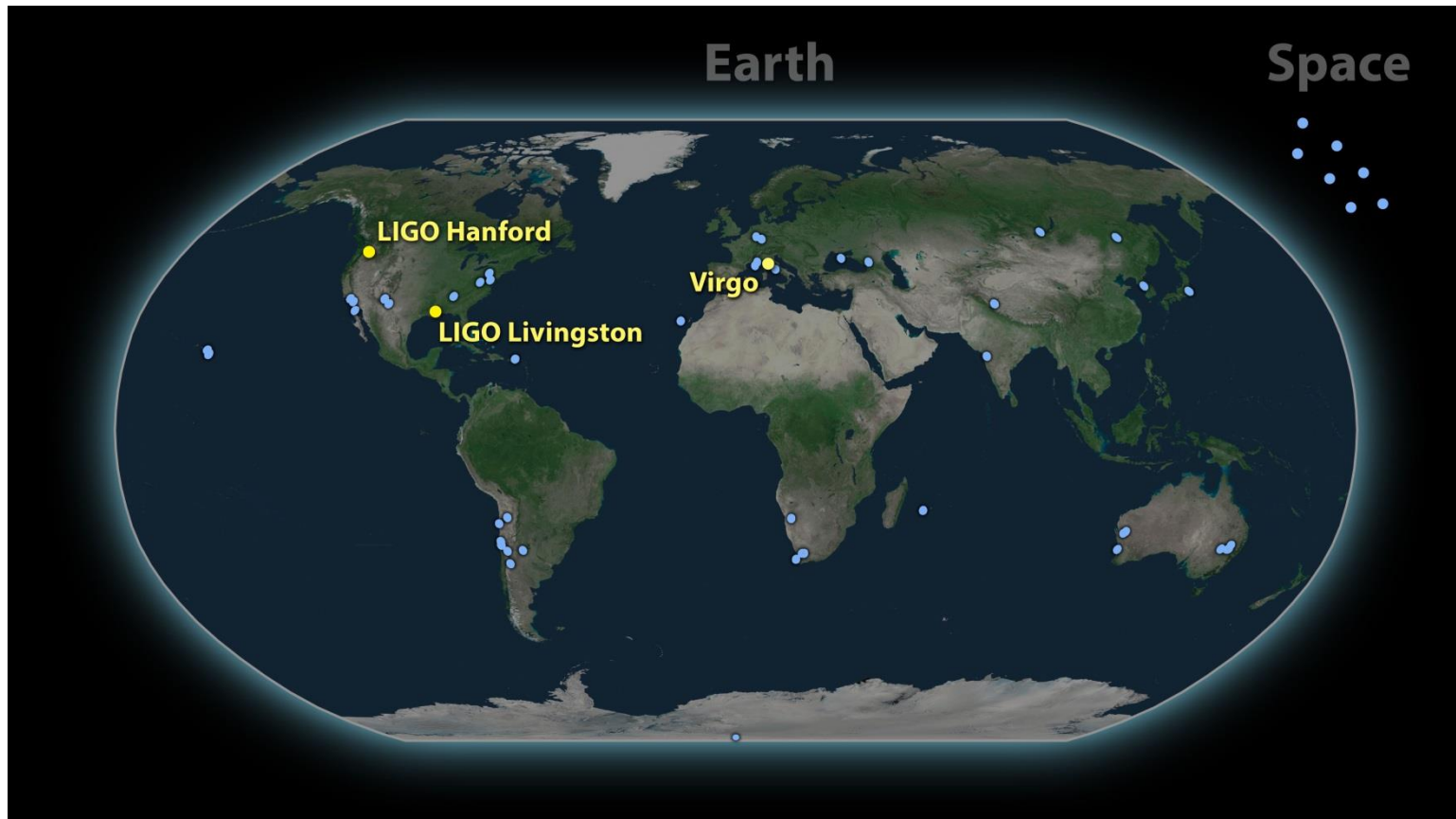
- Rapport signal sur bruit combiné : 32,4
 - Source proche d'une direction aveugle pour le détecteur Virgo
- Localisation précise envoyée à 19h55 (soit 5h14 après le passage de l'OG)

- En vert : LIGO et LIGO + Virgo
- En bleu : information de satellites d'observation de sursauts gamma
- Découverte en optique
 - Télescope Swope au Chili



Un suivi mondial

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

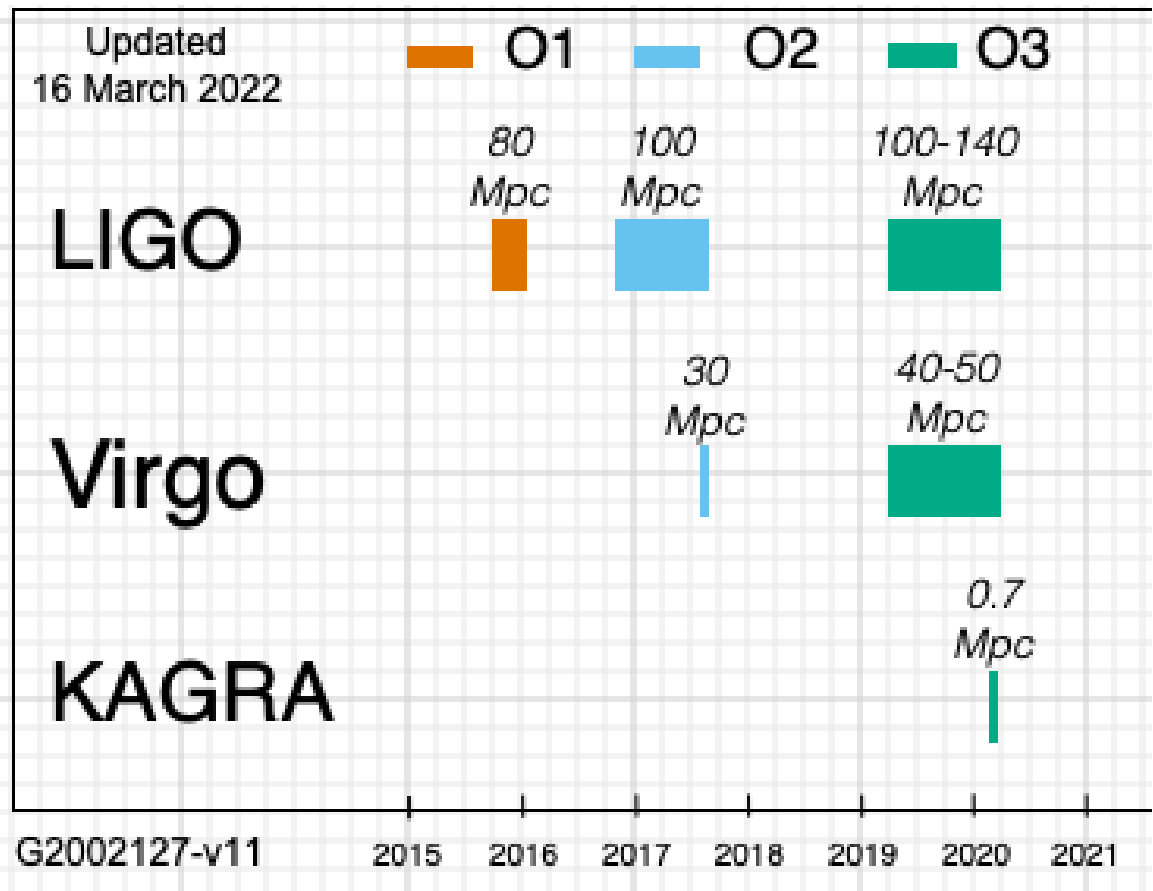


La prise de données LIGO-Virgo « O3 »

- 01 Avril 2019 → 27 mars 2020
 - 1 pause d'un mois au milieu pour réglages : Octobre 2019
 - Fin un mois plus tôt que prévu à cause de la pandémie de covid-19

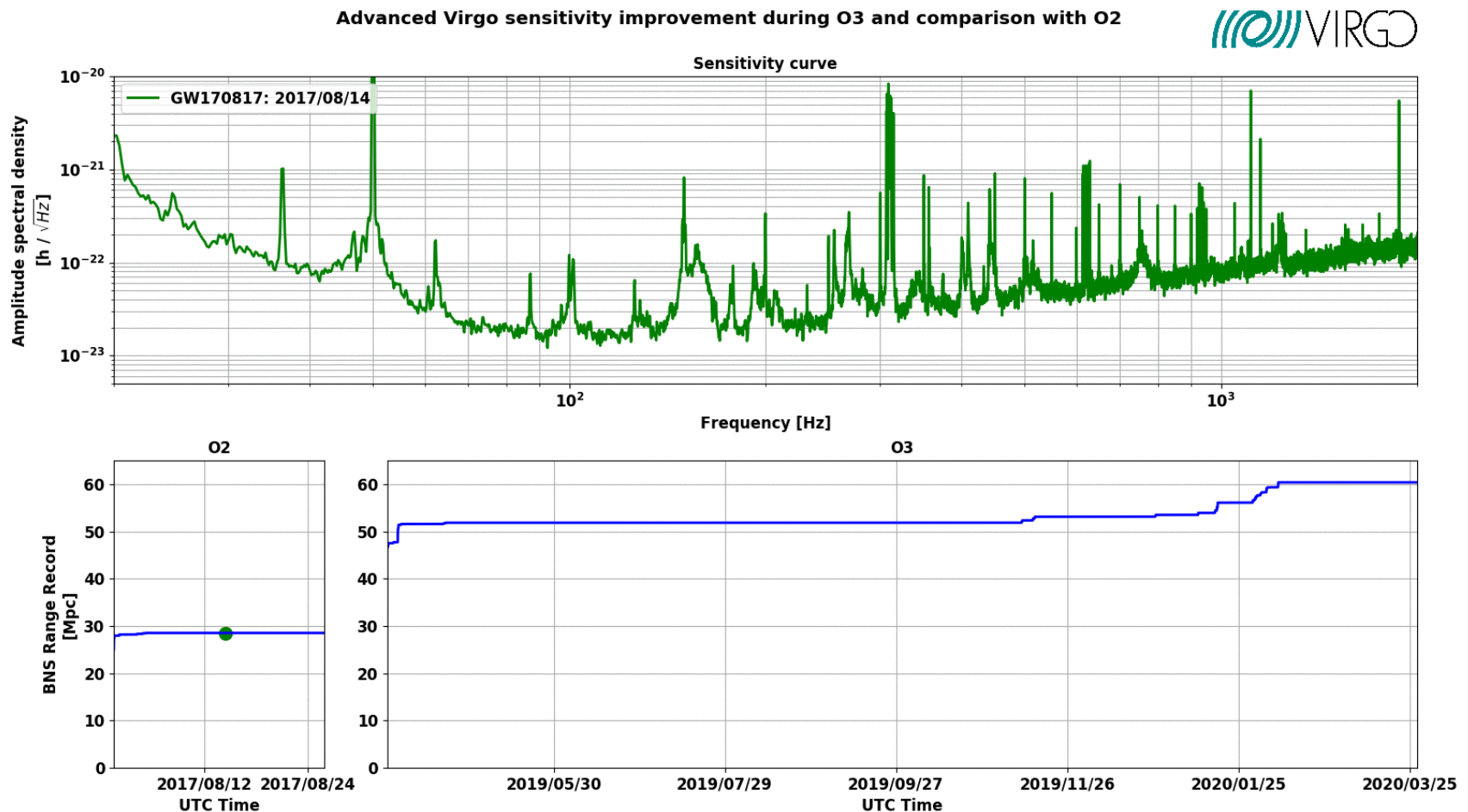
- **O_x**: Observing Run *x*
 - **O₁**: détecteurs LIGO
 - **O₂**: Essentiellement LIGO, Virgo en août 2017
 - **O₃**: LIGO-Virgo

-
- **O₄**: démarrage début 2023 LIGO + Virgo + KAGRA (Japon)



La prise de données LIGO-Virgo « O3 »

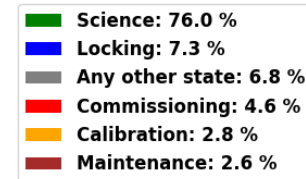
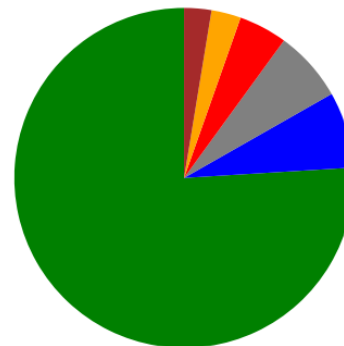
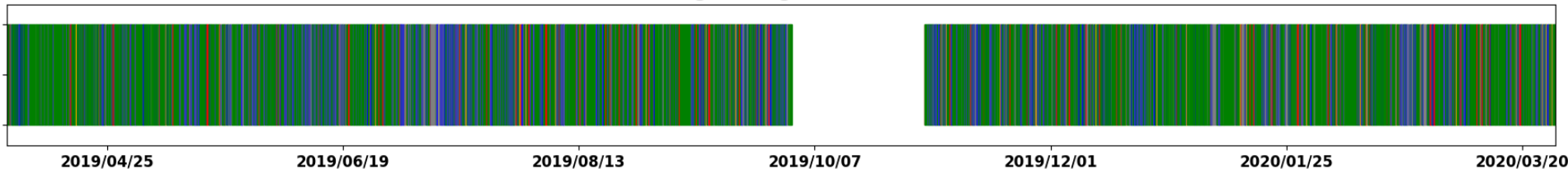
- **Améliorations** pendant les **runs O2 et O3** de la sensibilité de Virgo
 - **BNS range** : Distance moyenne de détection d'une **fusion de 2 étoiles à neutrons** en prenant 8 pour seuil en rapport signal-sur-bruit



La prise de données LIGO-Virgo « O3 »

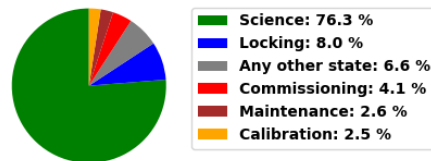
- Le cycle utile de Virgo pendant le run O3
 - La fraction du temps pendant laquelle le détecteur prend des « bonnes » données

Status of Advanced Virgo during O3: 2019/04/01 -> 2020/03/27

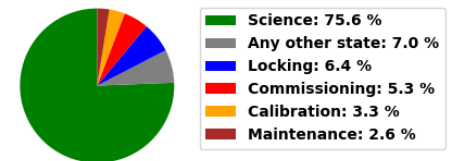


Advanced Virgo in O3

O3a: 2019/04/01 -> 2019/10/01



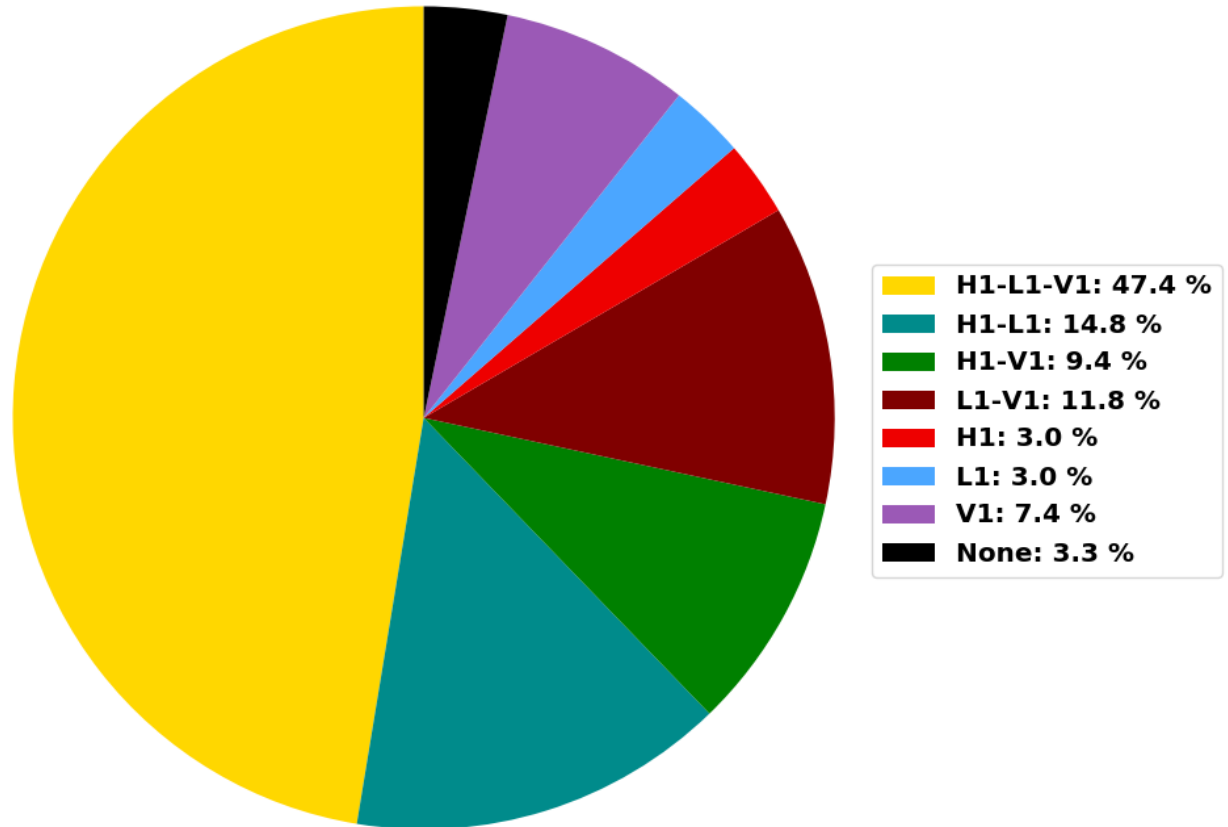
O3b: 2019/11/01 -> 2020/03/27



La prise de données LIGO-Virgo « O3 »

- **Global 3-detector network duty cycle** during O3

LIGO-Virgo Network duty cycle during O3: 2019/04/01 -> 2020/03/27
Detectors: LIGO Hanford (H1) in WA, USA; LIGO Livingston (L1) in LA, USA; Virgo (V1) in Cascina, Italy



Une belle moisson de détections

- **90 signaux** dans la dernière édition du catalogue LIGO-Virgo-KAGRA : **GWTC-3**

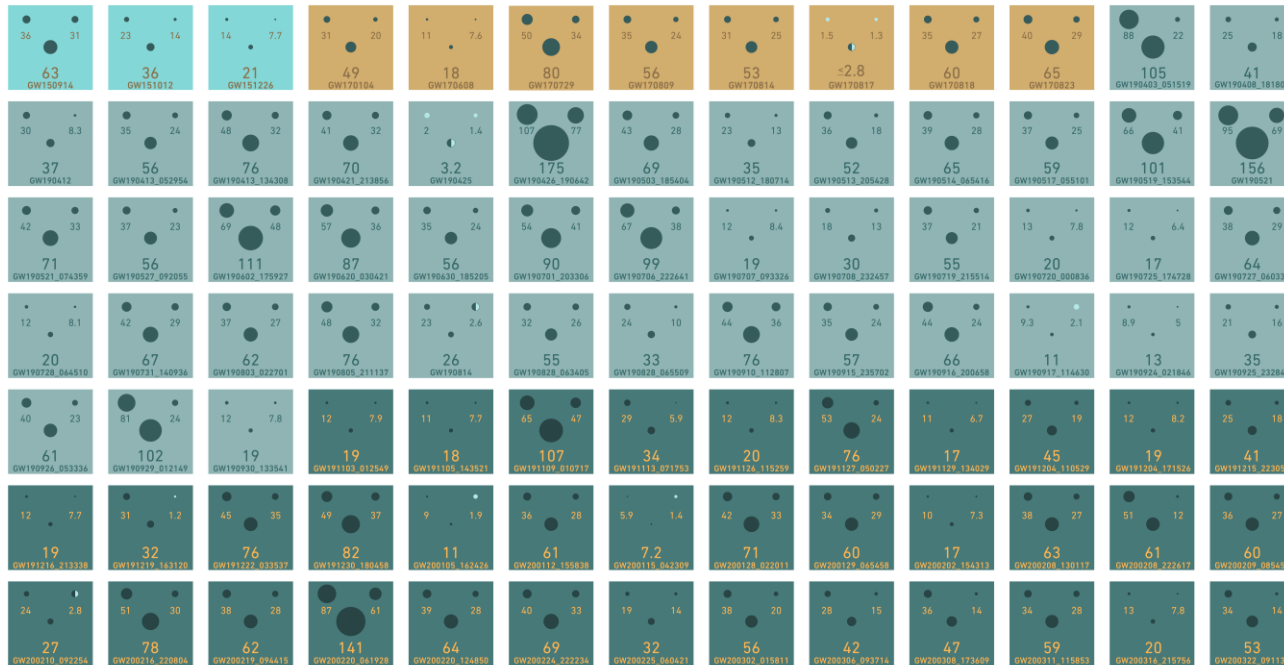
DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES

→ DEPUIS 2015

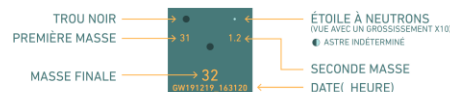
PÉRIODES D'OBSERVATION **01** 2015-2016

02 2016-2017

03a+b 2019-2020



LÉGENDE



LES UNITÉS SONT EN MASSE SOLAIRE
 1 MASSE SOLAIRE = $1,989 \times 10^{30}$ kg

L'estimation des masses n'inclut pas les incertitudes de mesure. C'est pourquoi la masse finale peut parfois sembler supérieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné. En réalité, la masse finale est toujours inférieure à la somme des masses des astres initiaux.

Les événements recensés ici ont passé un des deux critères de détection suivants : ils ont soit une probabilité de plus de 50% d'être d'origine astrophysique, soit un taux de fausse alarme inférieur à 1 tous les 3 ans.



To be continued...

- **Observing plans:** <https://observing.docs.ligo.org/plan>

☰ Observing Plans 2022.05.27 documentation

LIGO, VIRGO AND KAGRA OBSERVING RUN PLANS

(15 June 2022 update; next update by 15 September 2022)

LIGO, Virgo, and KAGRA are closely coordinating to start the O4 Observing run together. As a result of the most recent evaluation of the schedule for O4 readiness, **we project to start the O4 Observing Run in March 2023**, with an Engineering Run to start one month before the observing run begins; low-latency alerts for candidate events identified during engineering time may be released, both to exercise the system and to exploit their scientific value.

