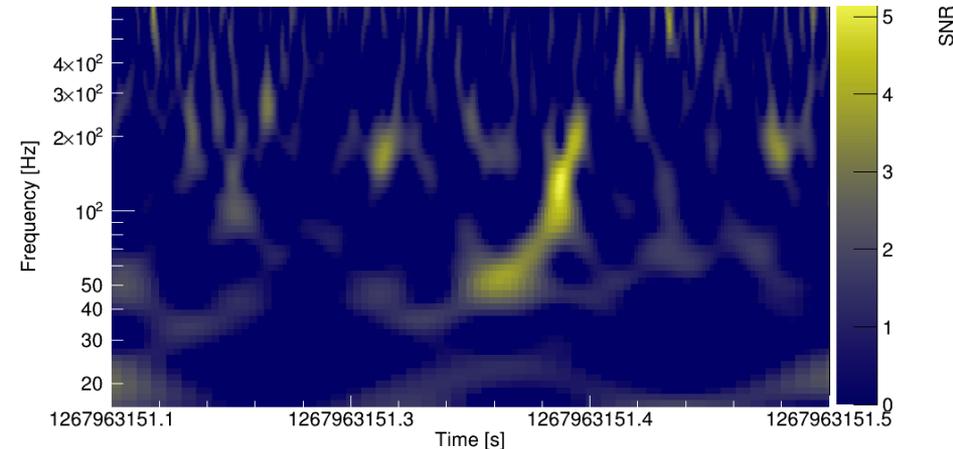


# Les ondes gravitationnelles : premier bilan et perspectives, sept ans après leur découverte

## 09 Novembre 2022, La Réunion

**Nicolas Arnaud** ([nicolas.arnaud@ijclab.in2p3.fr](mailto: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)



# Préambule

- Pourquoi suis-je ici aujourd'hui ?

# Préambule

- Pourquoi suis-je ici aujourd'hui ?

→ Grâce à des rencontres avec ces personnes ...



# Préambule

- ... Des personnes croisées lors d'actions pédagogiques en métropole
  - En particulier lors d'un stage pour professeurs, organisé chaque année au CERN(\*)



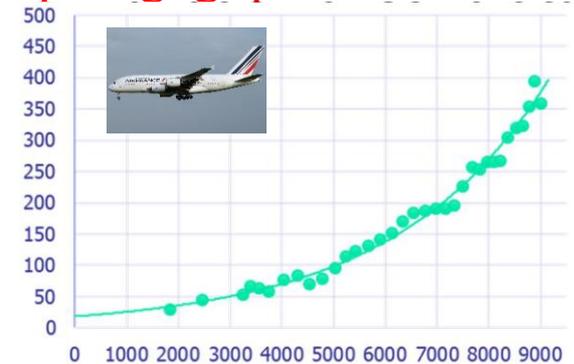
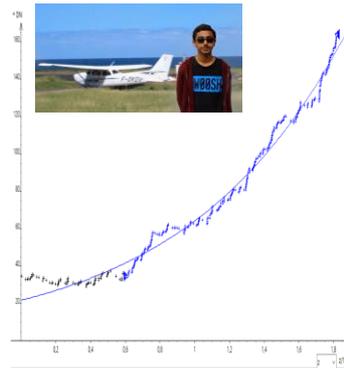
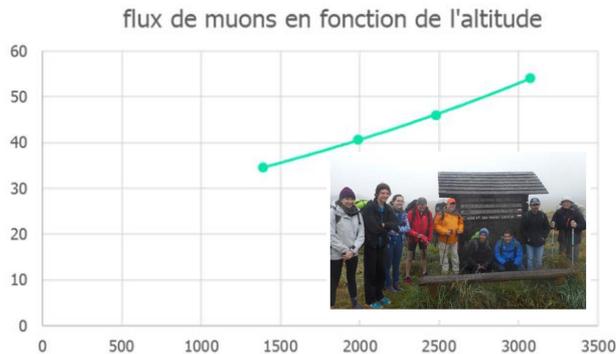
- Je suis un chercheur qui aime faire de la vulgarisation « de terrain »
- Des conférences grand public – comme aujourd'hui !
  - Des formations avec pour le secondaire pour cœur de cible– enseignants et élèves
- Tous ces visages sont ceux de professeurs alors en poste à la Réunion, qui réalisent des projets pédagogiques assez incroyables pour et avec leurs élèves ...

(\*) **CERN** : le plus grand laboratoire au monde pour l'étude de « l'infiniment petit », c'est-à-dire les **constituants élémentaires de la matière** et les **lois** qui les gouvernent : un bon sujet pour une autre conférence !



# Des réalisations « made in » La Réunion

- Effet de l'altitude sur le taux de comptage des détecteurs pédagogiques



- Quoi de mieux que l'Océan Indien pour vérifier le pouvoir absorbant de l'eau ?



- Prosélytisme « physique des deux infinis » pour manchots aux Kerguelen ?



- Voyages des deux infinis ...



... Jusqu'au bureau de la directrice générale du CERN !



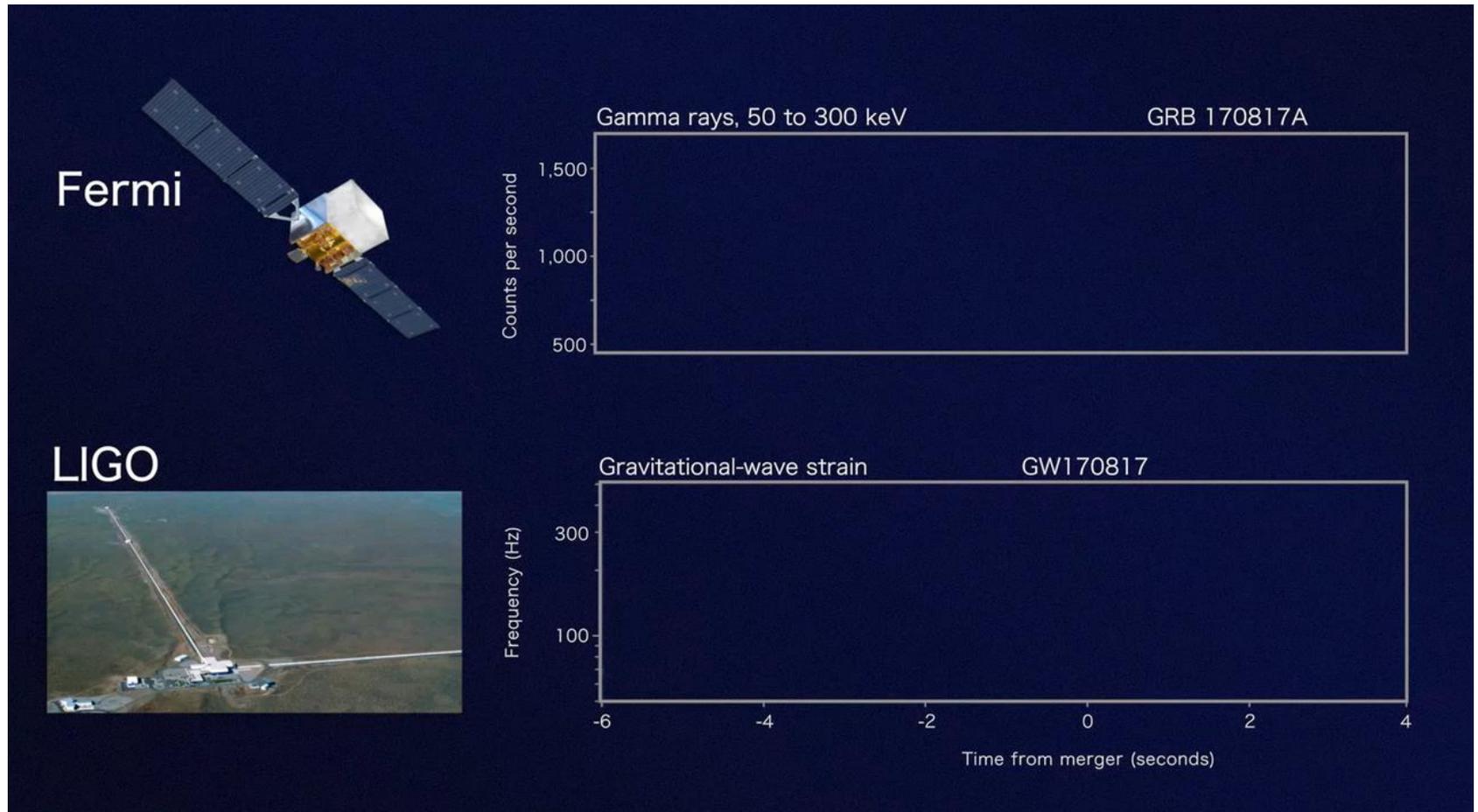
# 17-18 août 2017 : deux jours extraordinaires

- Revenons à nos moutons aux ondes gravitationnelles ...

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

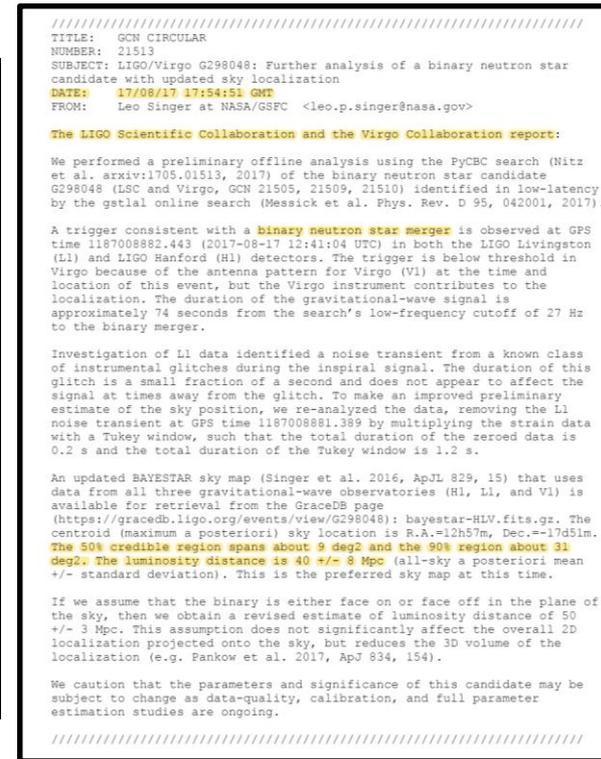


# Plus tard le même jour ...

• 19h55

## → Localisation LIGO-Virgo

- Position dans le ciel :  
« banane » couvrant  
une trentaine de  
degrés carrés
- ◆ Ciel entier :  
~41253 degrés carrés
- Estimation de la distance  
de la source

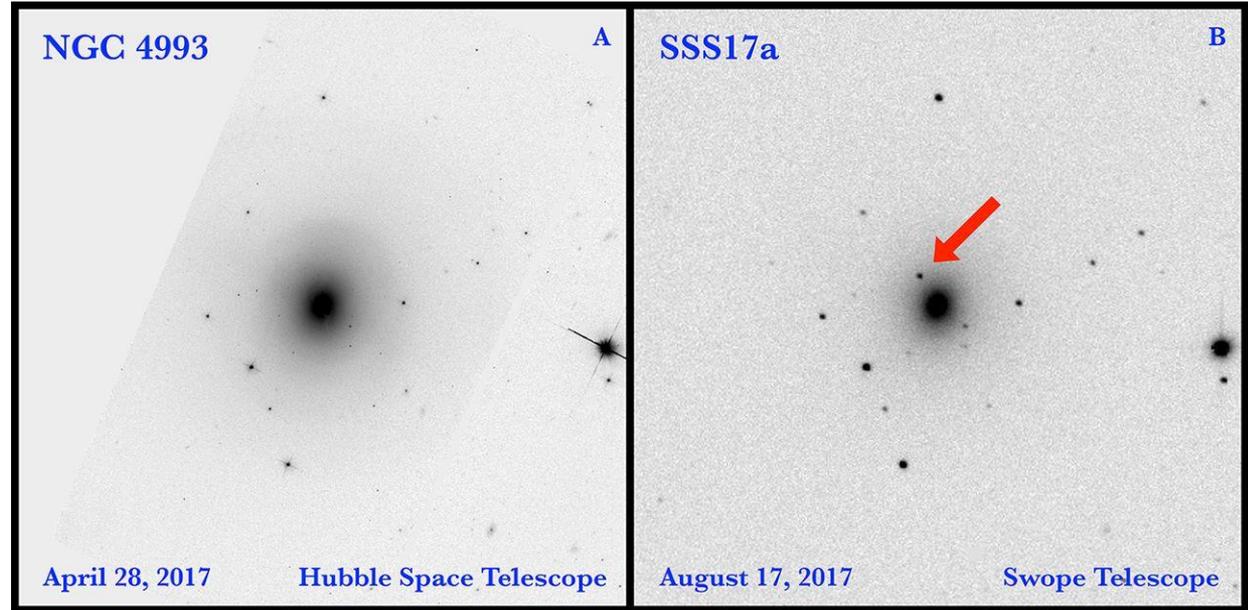


## → Informations pour les télescopes : où regarder et à quelle profondeur

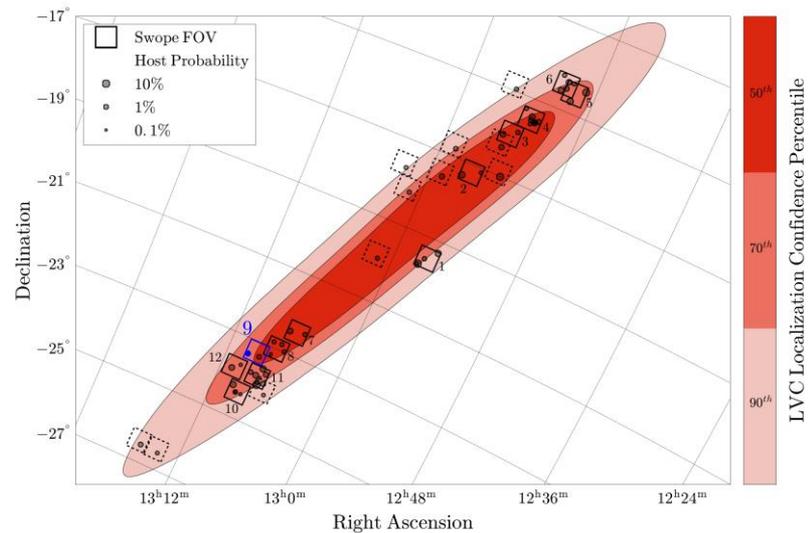


# La nuit suivante ...

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

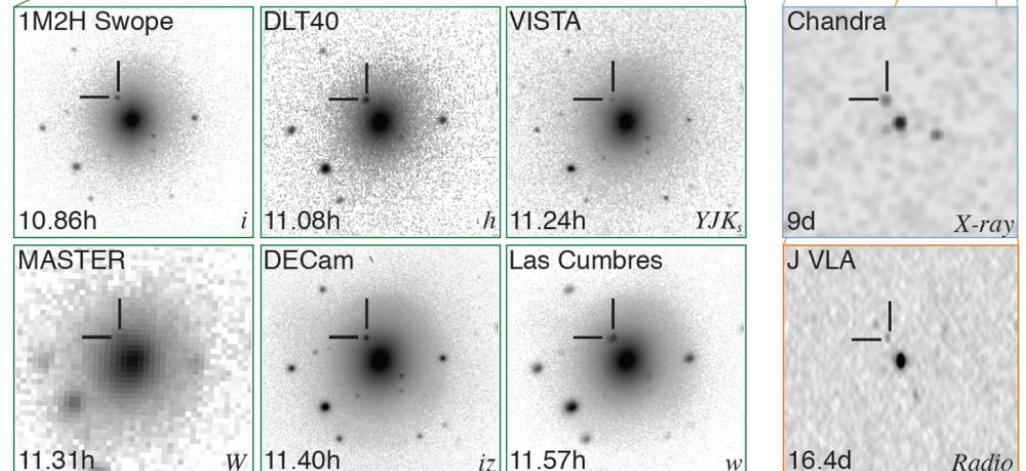
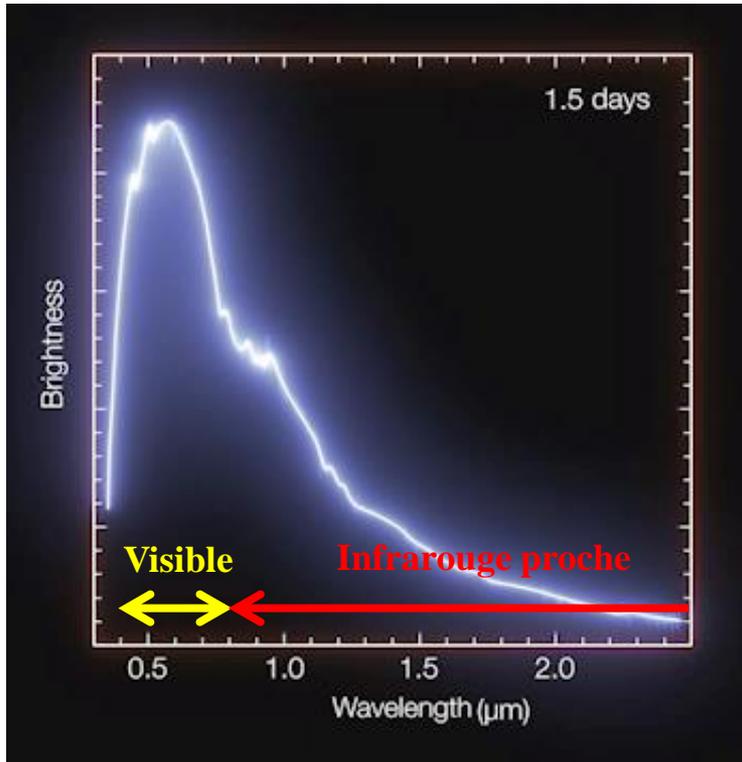
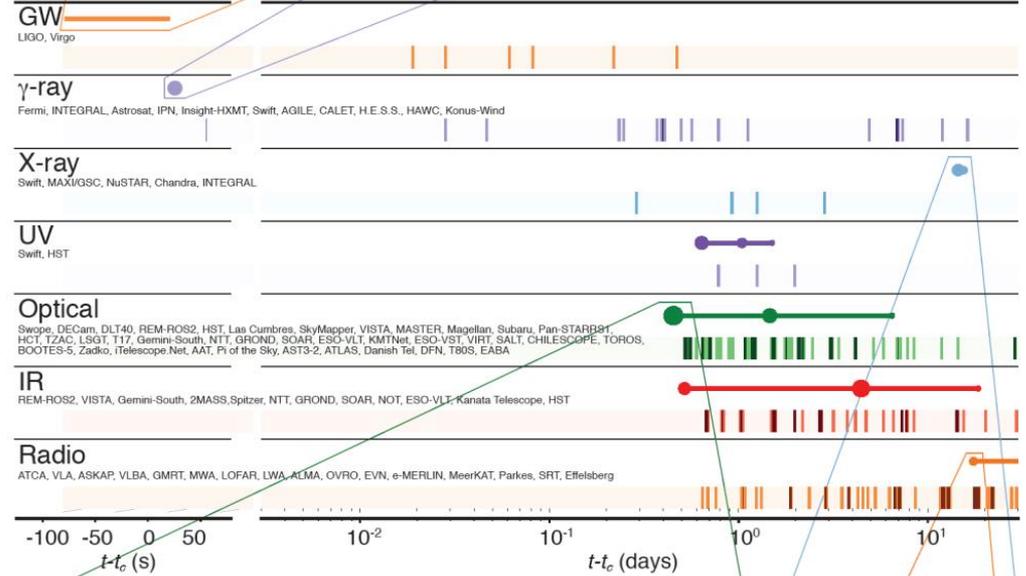
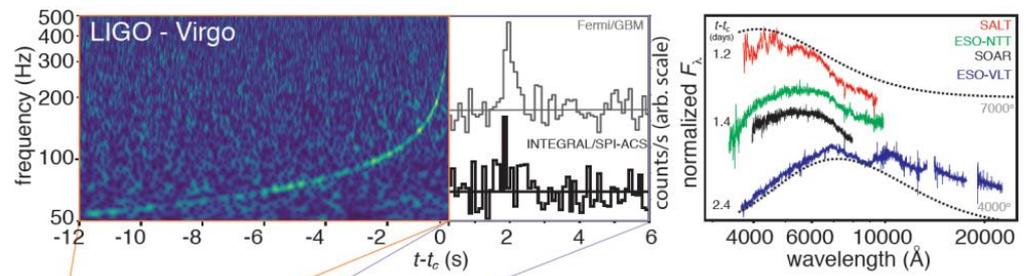


Champ de vue : ~ (1 / 160 000)-ème du ciel



# Astronomie multi-messagers

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

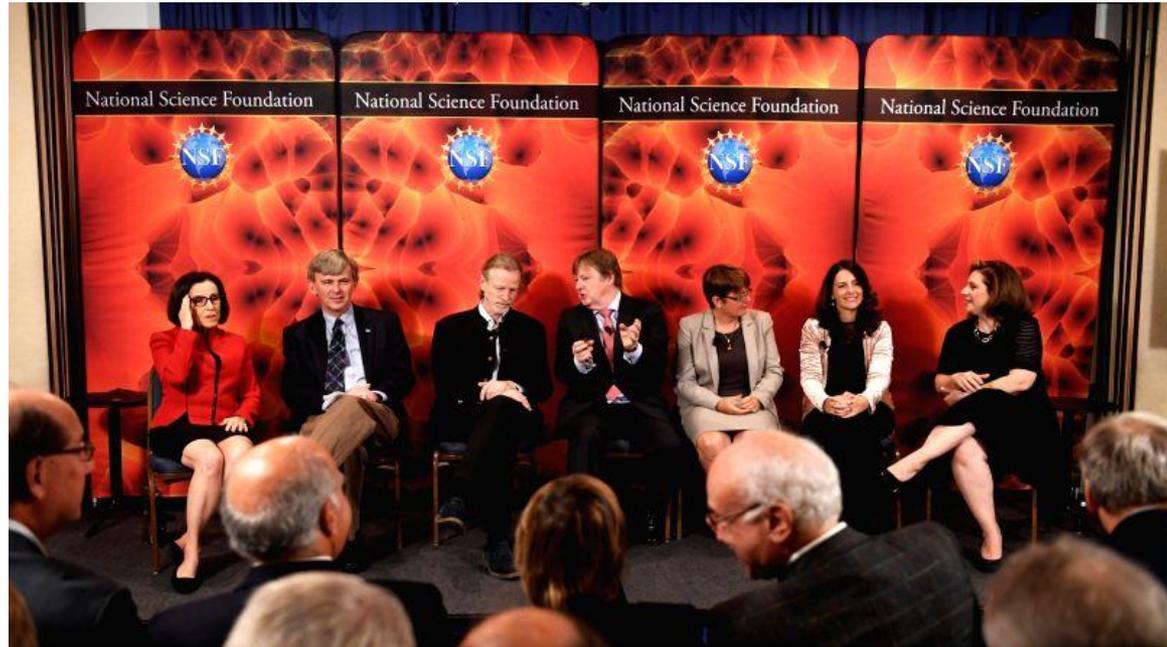


# Lundi 16 octobre 2017

- 16h à Paris

→ Annonce de la découverte

- Conférences de presse simultanées : Washington, Paris, Rome, ESO, etc.



www.cnrs.fr

COMMUNIQUÉ DE PRESSE NATIONAL | PARIS | 16 OCTOBRE 2017

## Les ondes gravitationnelles font la première lumière sur la fusion d'étoiles à neutrons

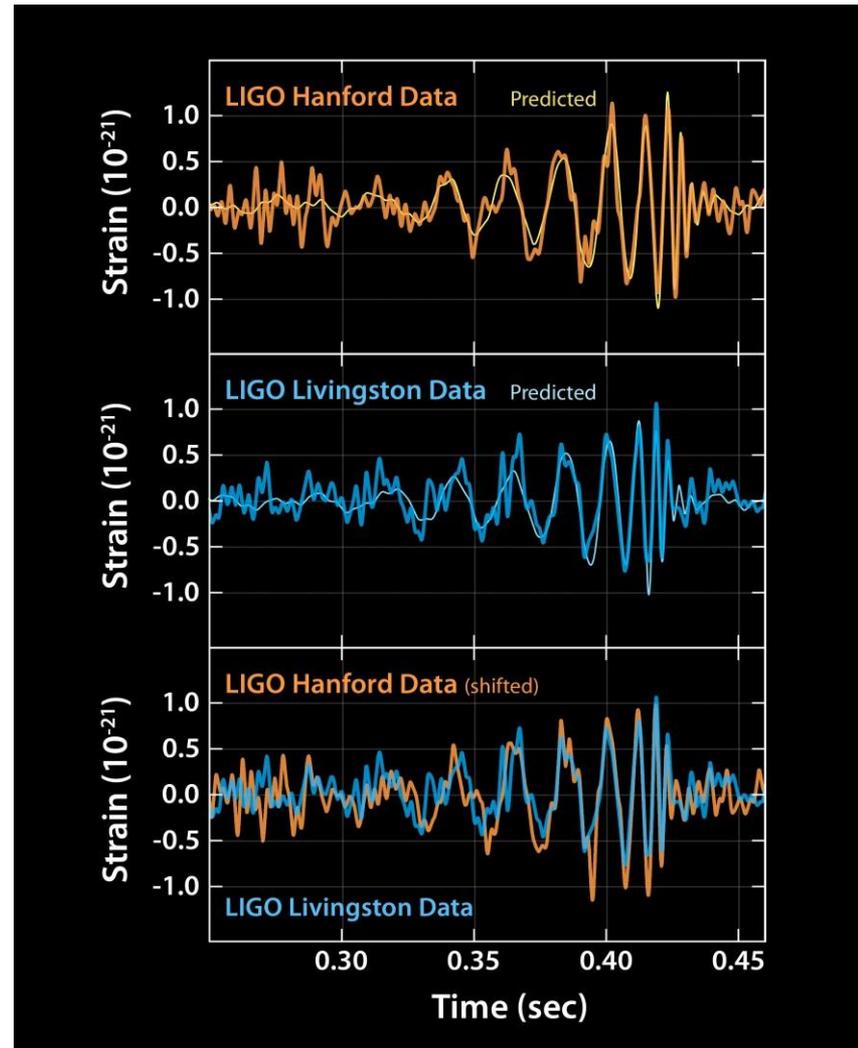
C'est une découverte majeure à plus d'un titre. Les scientifiques de la collaboration LIGO-Virgo (dont le CNRS est membre) ont observé pour la première fois des ondes gravitationnelles émises lors de la fusion de deux étoiles à neutrons, et non de deux trous noirs comme dans les cas précédents. Autre première : cette source d'ondes gravitationnelles émet de la lumière, observée dans les heures, jours et semaines qui suivirent grâce à la contribution de 70 autres observatoires sur Terre et dans l'espace. Cet ensemble d'observations marque l'avènement d'une astronomie dite « multi-messagers ».



# On a découvert les ondes gravitationnelles !

- De **quoi** s'agit-il ?
- **Pourquoi** s'y intéresser ?
- **Comment** ça marche ?
- **Où** / comment les trouve-t-on ?
- **Quelle importance / intérêt** ?
- **A quoi ça sert** ?

**Essayons de répondre  
à ces questions ...**



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

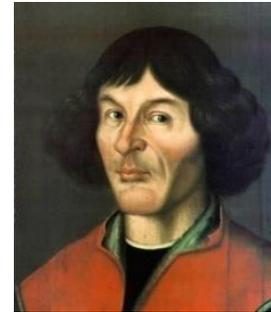
# **Gravitation et ondes gravitationnelles**

# La mécanique céleste

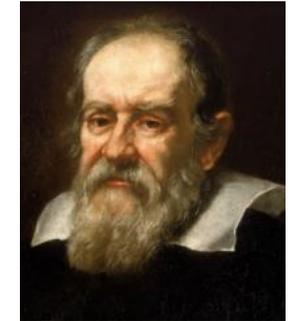
- Modèle **géocentrique** du système solaire (II<sup>ème</sup> siècle de notre ère) de **Ptolémée**
  - La Terre est au centre
  - Tous les « astres voyageurs » orbitent autour d'elle **selon des empilements complexes de sphères**



- Première remise en cause sérieuse : le modèle **héliocentrique** de **Copernic** (1543)



- **Galilée** : observations en contradiction avec la théorie de **Ptolémée** (1610)



→ L'église catholique l'oblige à abjurer « l'erreur » de **Copernic**

- **Kepler** (1609-1619) : suppose un modèle héliocentrique & des orbites elliptiques

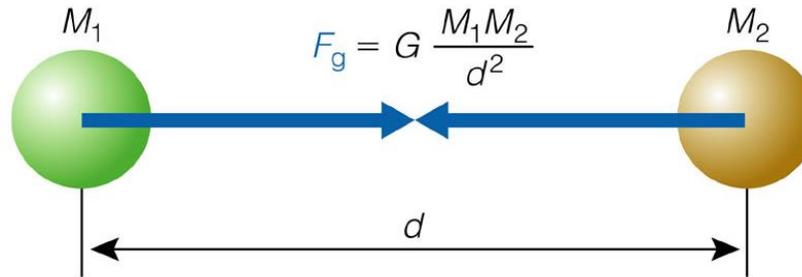
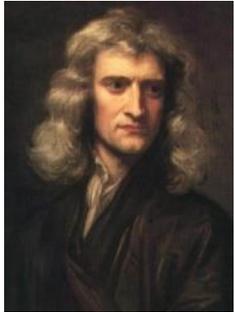
→ Il construit **trois** lois empiriques à partir desquelles il fait des prédictions confirmées par l'observation



# Loi de la gravitation universelle

« Deux masses ponctuelles s'attirent selon une force dirigée le long de la ligne les reliant. La force est proportionnelle au produit des deux masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les séparent. »

- **Newton** (1687) :



- **Simple** et **élegante**
- Explique les lois de **Kepler**
- Remplace la multitude de sphères nécessaires pour conserver la validité du modèle de **Ptolémée**

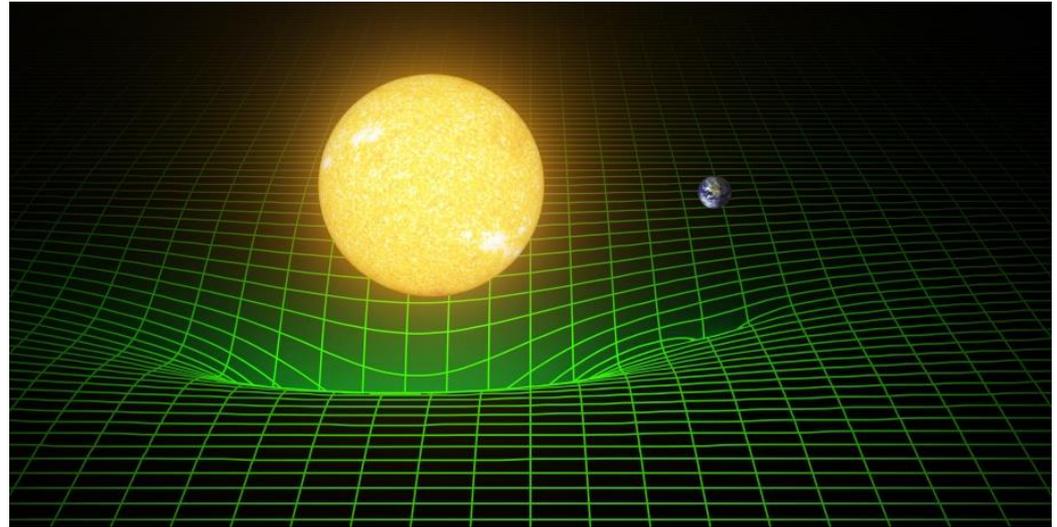
Règne sur la mécanique pendant plus de deux siècles

Toujours très utilisée aujourd'hui !

- La **découverte de Neptune** (1846)
  - **Urbain Le Verrier** (calculs mathématiques)
  - **Gottfried Galle** (observations astronomiques)

# La Relativité générale

- Einstein 1915-1917
  - Grossman, Hilbert
- « L'espace-temps dit à la matière comment se déplacer ; la matière dit à l'espace-temps comment se courber. »
- John Archibald Wheeler (1990)

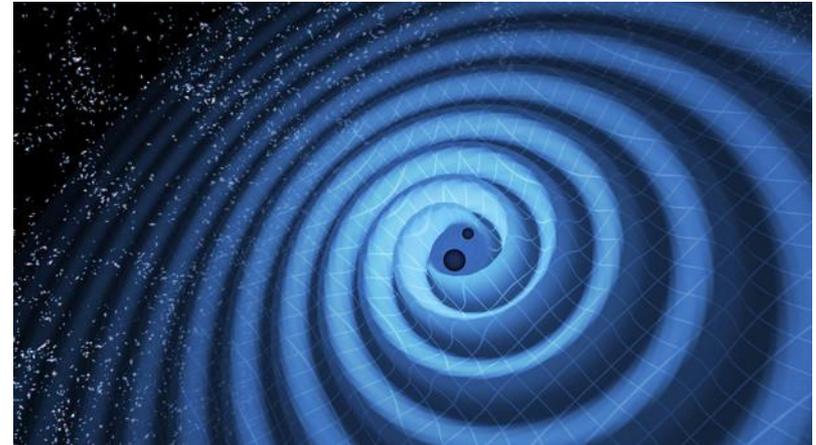


Gravitation ↔ Courbure de l'espace-temps  
Courbure de l'espace temps ↔ Densité d'énergie

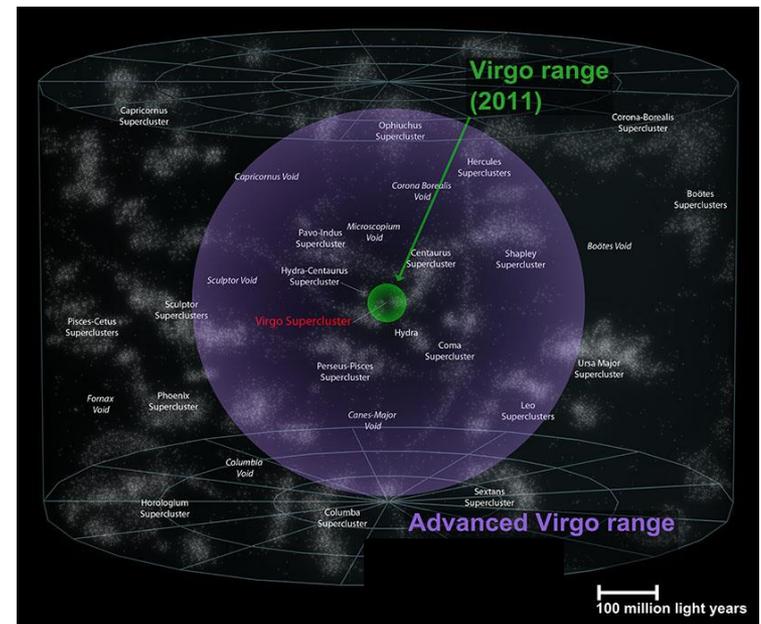
- **Généralisation** de la théorie de la gravitation universelle de Newton
  - Explication de phénomènes dont la mécanique newtonienne ne rendait pas compte : avance du périhélie de Mercure, etc.
  - Prédiction de nouveaux effets : expansion de l'Univers, trous noirs, lentille gravitationnelle, etc.
- Jamais mise en échec depuis
  - A la base du **Modèle Standard cosmologique** – Friedman, Lemaître, etc.
  - Une application : le **système GPS**

# 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

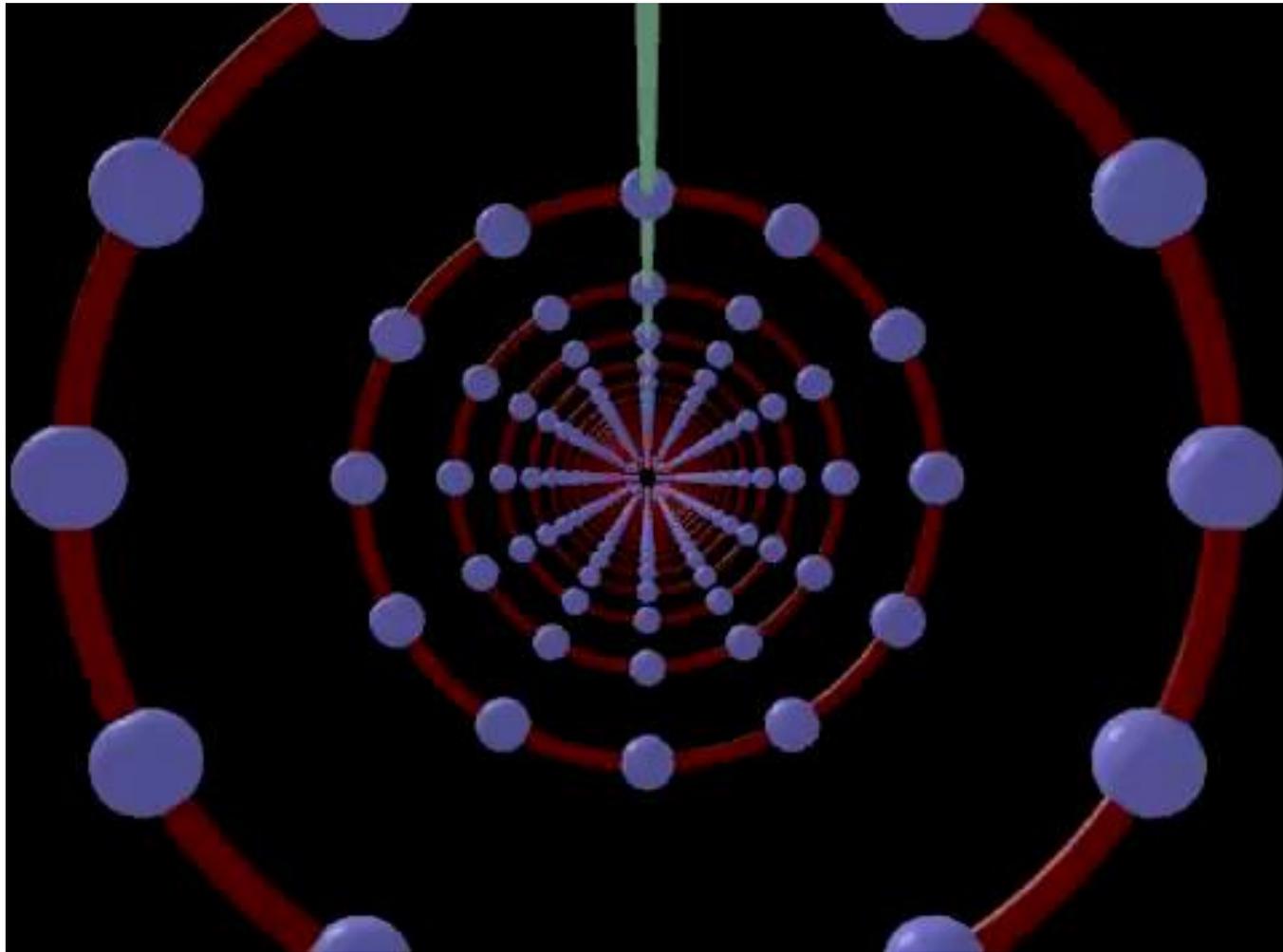


- Gain d'un facteur 2 (10) en sensibilité  
⇔ Gain d'un facteur 2 (10) en distance  
⇔ Volume d'Univers observable augmenté par un facteur 8 (1000)



# Effet d'une onde gravitationnelle

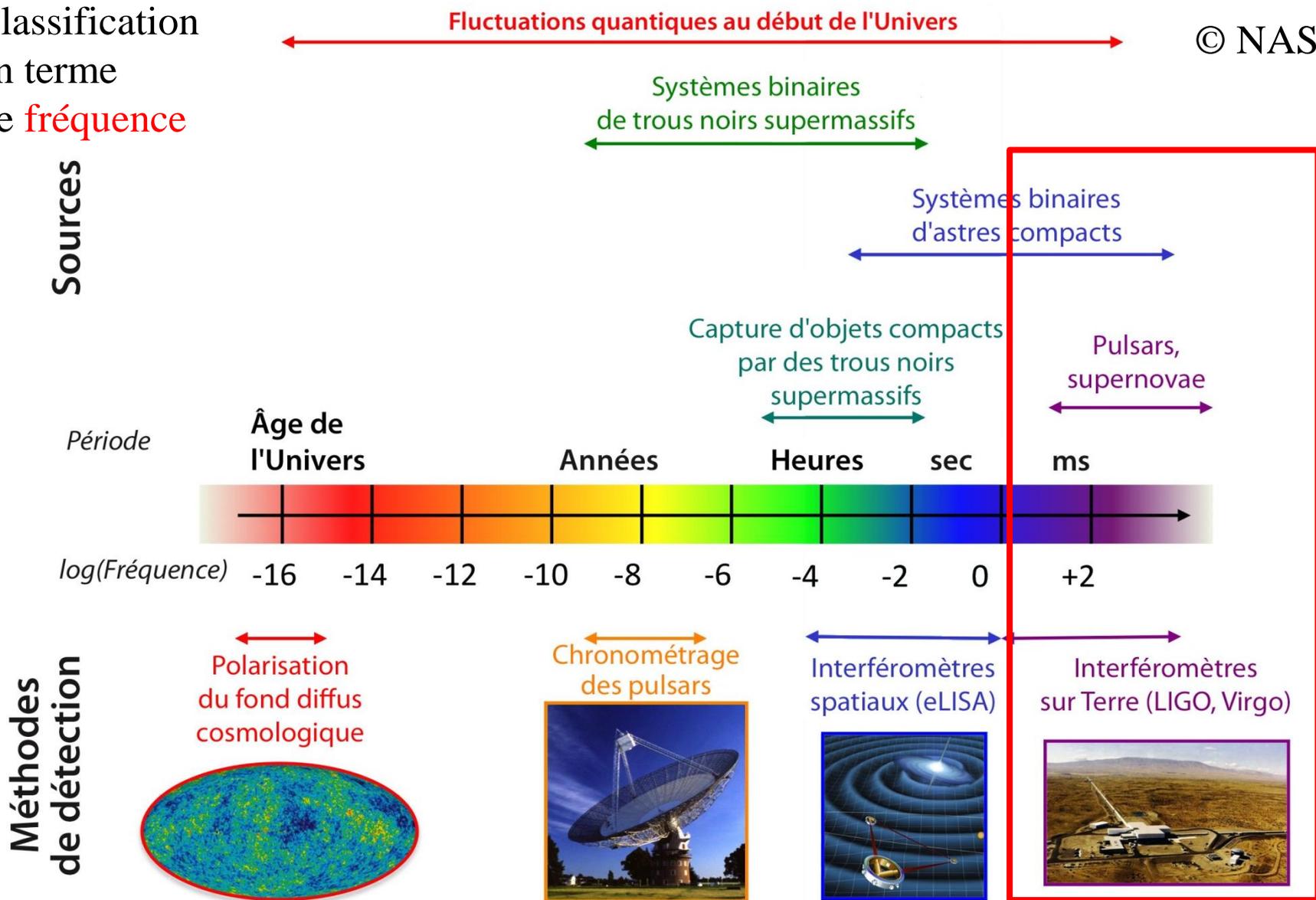
- En trois dimensions



# Le spectre des ondes gravitationnelles

- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



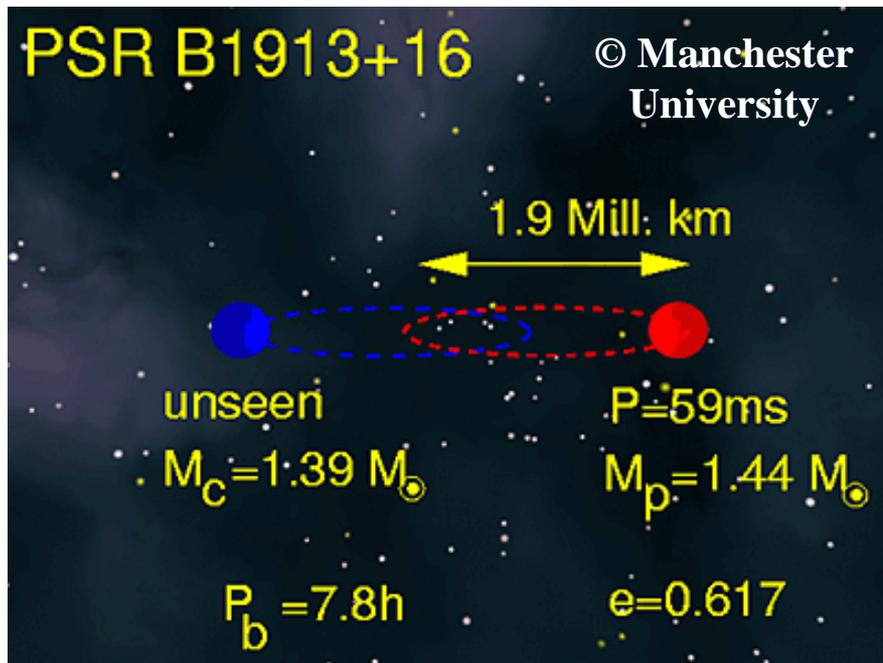
# Détecter les ondes gravitationnelles

# Les ondes gravitationnelles existent-elles ?

- Question résolue (positivement) depuis le 11 février 2016 !
  - Mais objet de nombreux débats scientifiques pendant un siècle
- Des décennies de controverse
  - Eddington, 1922: « *Les OGs se propagent à la vitesse de la pensée* »
  - Années 1950 : la relativité générale est un problème mathématique bien posé (Choquet-Buhat)
- Evidence indirecte de l'existence des OGs
  - Etude sur le long terme du système PSR B1913+16 – voir transparent suivant
    - Système binaire (deux astres) dans la Galaxie (23 000 années-lumière)
    - Deux étoiles à neutrons, dont l'une est un pulsar détecté depuis la Terre
- Système découvert par Hulse et Taylor en 1974
  - Découverte récompensée par le prix Nobel de physique 1993
- Un excellent laboratoire pour les études de la gravitation
  - En particulier les ondes gravitationnelles
    - Taylor & Weisberg, Damour

# PSR B1913+16

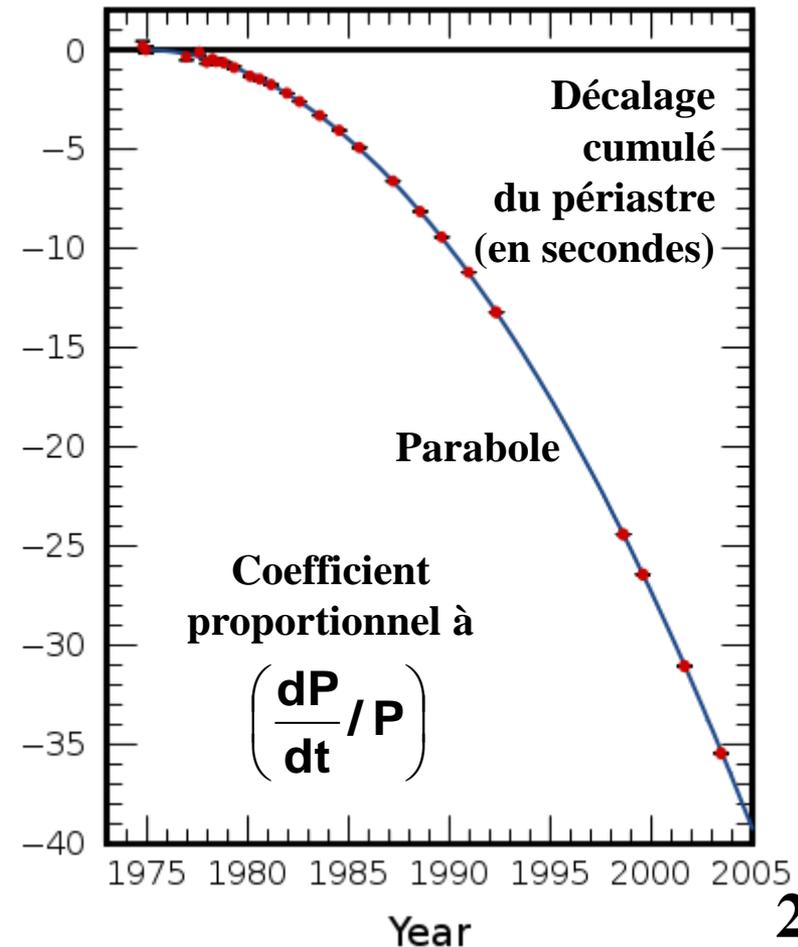
© Manchester University



- Le système perd lentement de l'énergie par émission d'ondes gravitationnelles
  - « Accélération » du mouvement orbital
    - $76,5 \mu\text{s} / \text{an}$  – période  $P = 7,75 \text{ h}$
  - Les étoiles se « rapprochent » :  $3,5 \text{ m} / \text{an}$ 
    - Fusion dans ... 300 millions d'années !
  - Virgo et LIGO devraient le voir ...
- Evolution similaire pour le système Terre-Soleil dans ...  $10^{23}$  années !
  - Rappel : âge de l'Univers  $\sim 10^{11}$  années

# PSR B1913+16

Prédictions théoriques et mesures superposées



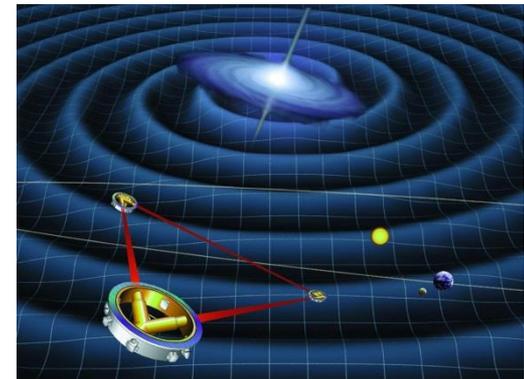
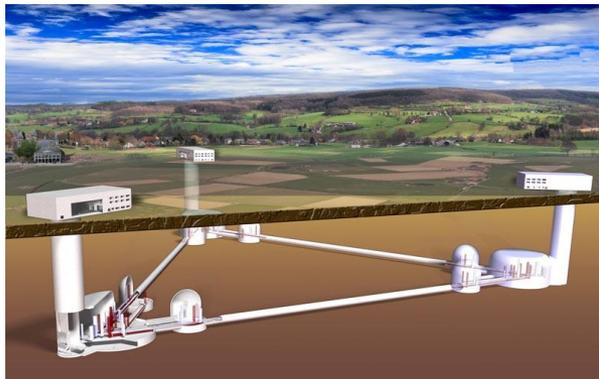
# Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

- **Sur terre**

- **Barres résonantes** (**Joe Weber** : le pionnier de la recherche des OGs)
  - Bande passante étroite, sensibilité limitée : plus utilisées aujourd'hui
- **Détecteurs interférométriques** : **LIGO, Virgo**, etc. : détails à venir
  - Actuellement : **détecteurs de 2<sup>ème</sup> generation** (« avancés »)
    - Préparations de la 3<sup>ème</sup> génération de détecteurs (**Einstein Telescope** en Europe)
- **Chronométrage des pulsars** « **Pulsar Timing Array** » (<http://www.ipta4gw.org>)
  - Modulation des temps d'arrivé des signaux émis par des pulsars galactiques millisecondes due à des OGs très basses fréquences

- **Dans l'espace**

- Future mission **LISA** (<https://www.elisascience.org>, lancement dans 10-15 ans)
- Technologies testées **récemment** (et avec **succès**) par la mission **LISA Pathfinder**



# 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*

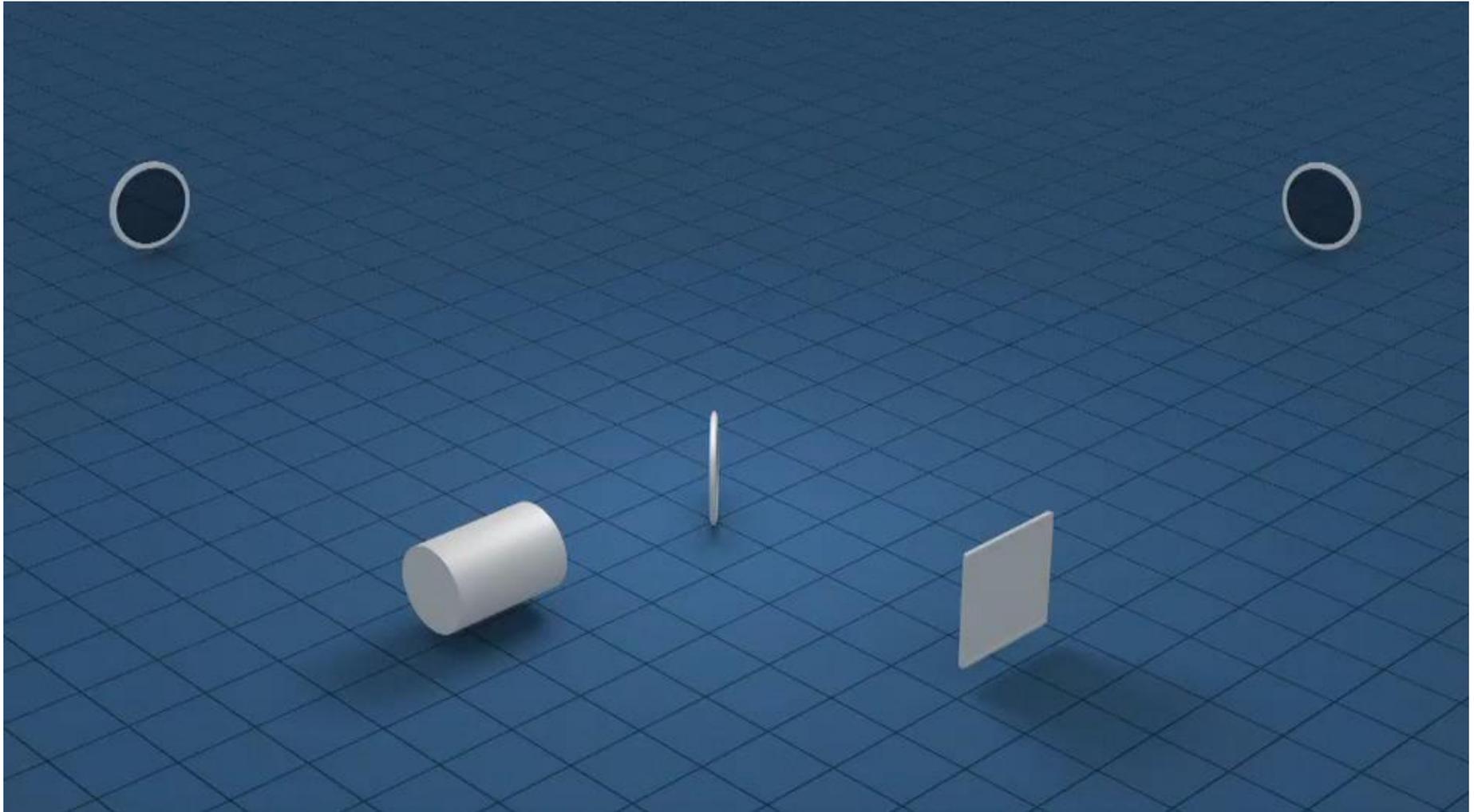
*Expérience*

(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**
- **À suivre ...**

} **Premières découvertes !**

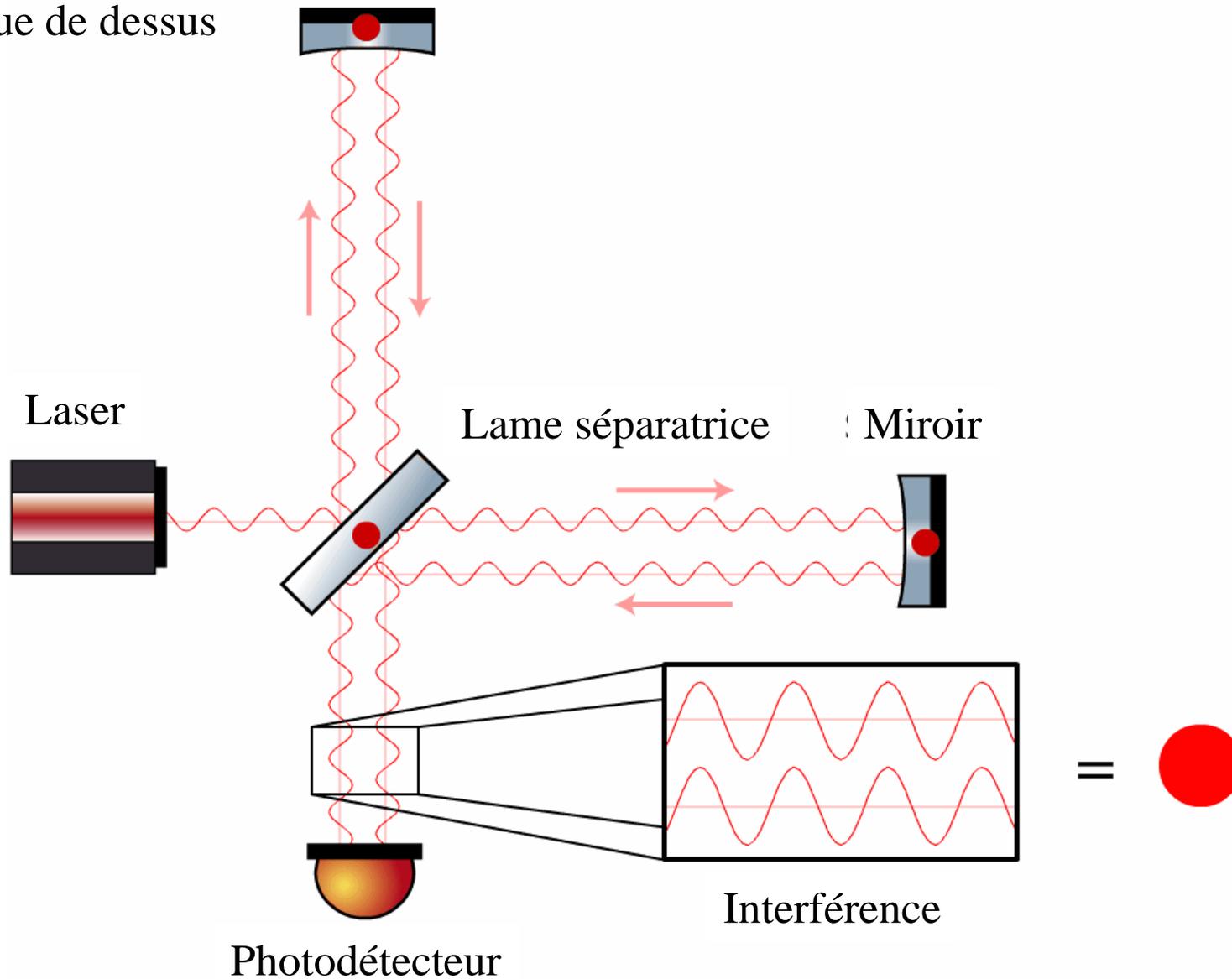
# Principe de fonctionnement



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

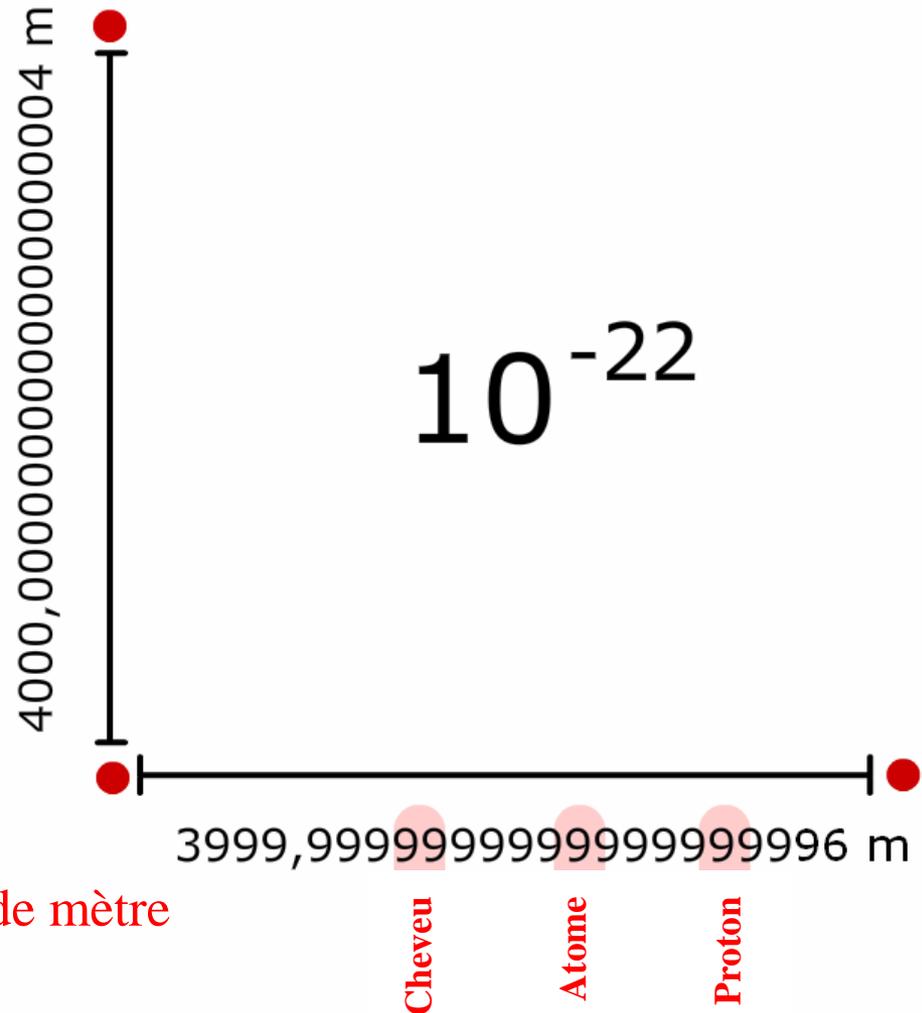
# Principe de fonctionnement

- Vue de dessus



# Une sensibilité record

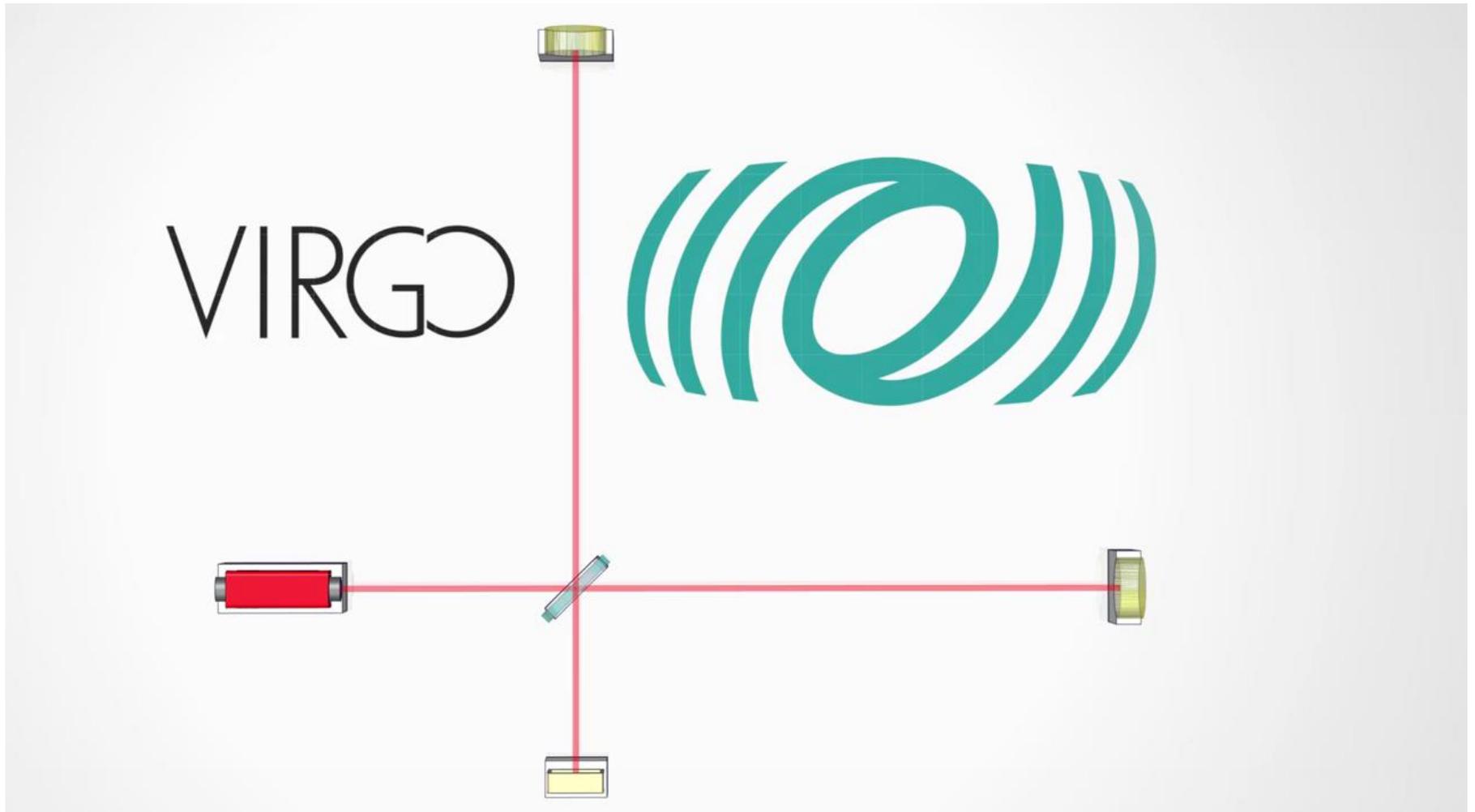
- Variation relative de longueur ( $\Delta L/L$ ) très faible
  - De l'ordre d'une fraction de millième de milliardième de milliardième ( $10^{-21}$ ) !
- $10^{-21}$ 
  - Taille d'un atome rapportée à la distance Terre-Soleil
  - Distance entre le Soleil et l'étoile Proxima du Centaure mesurée à 0,02 mm près



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

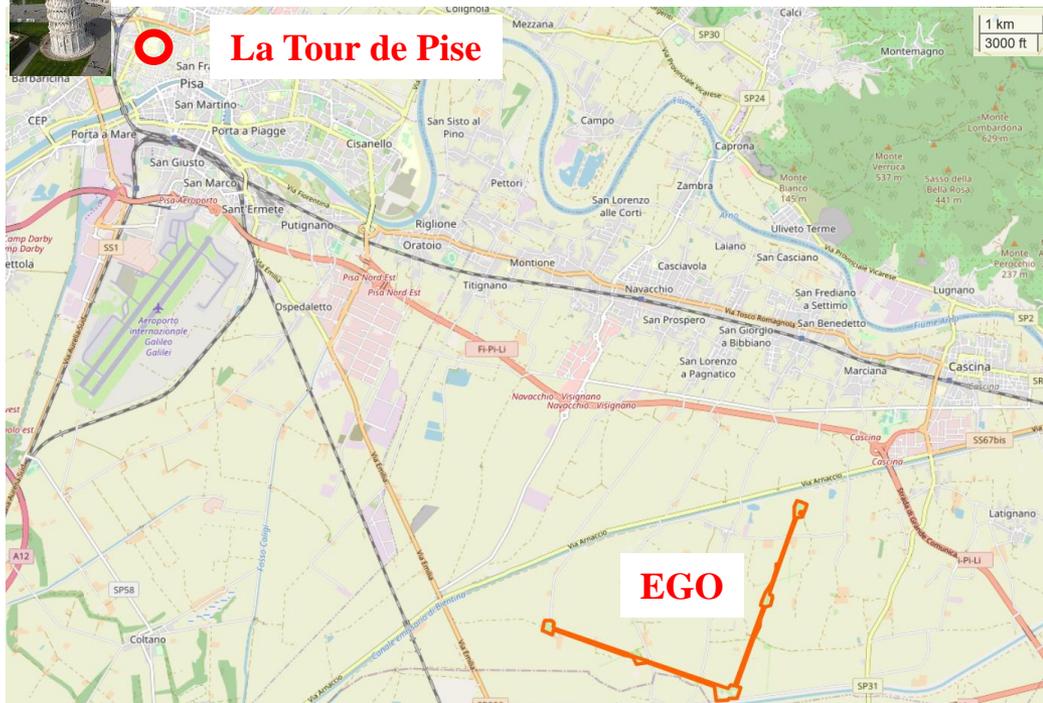
# Un détecteur réel : Virgo avancé

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



# Où est Virgo ?

- **E**uropean **G**ravitational **O**bservatory (**EGO**) :  
le laboratoire hôte du détecteur Virgo
  - Situé à Cascina, environ  
10 km au sud-est de Pise (Italie)



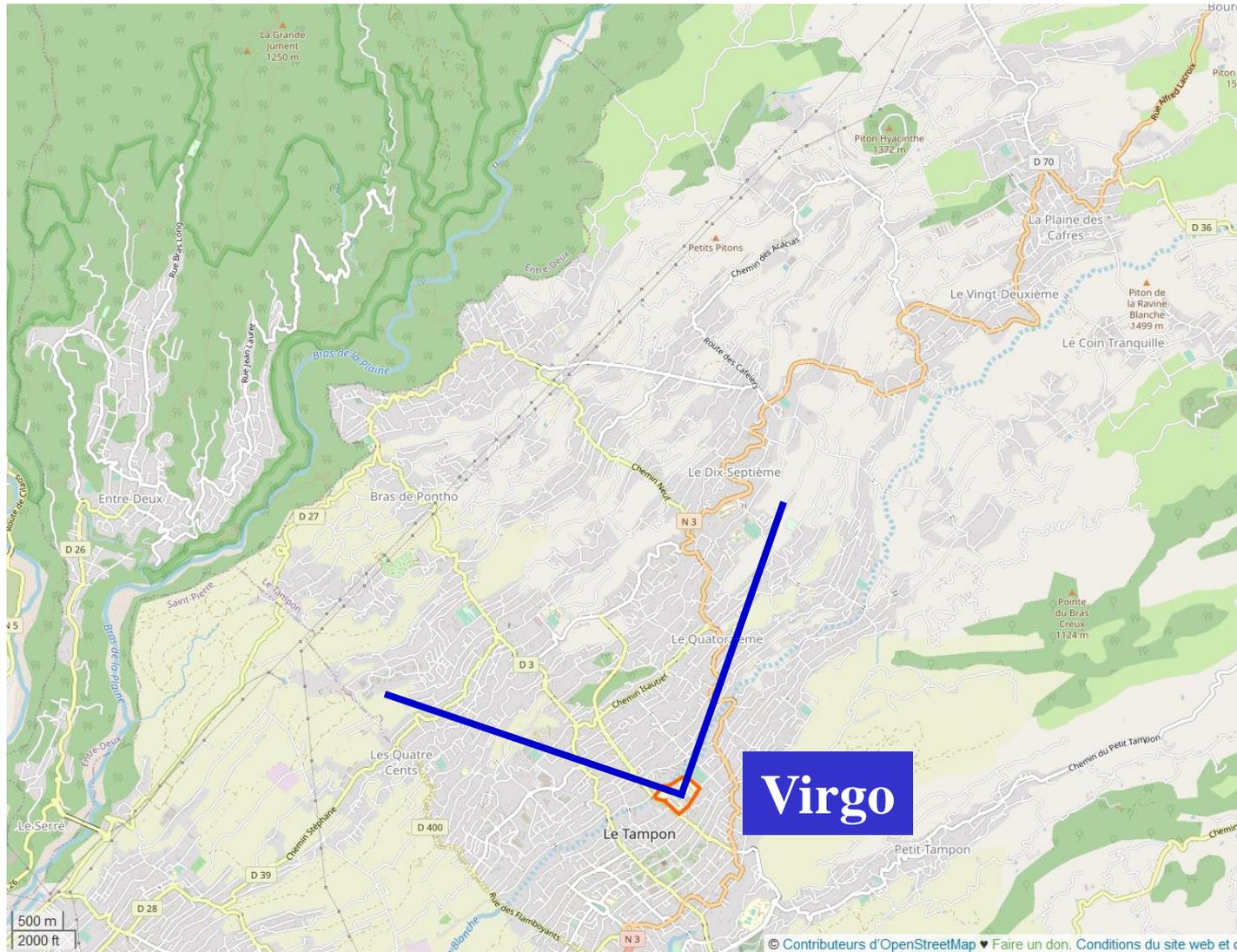
# Virgo vu du ciel



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

# Si Virgo était au Tampon

- Centre : le lycée Roland Garros



# Un bref historique

- **Années 1980** : Collaboration entre **Alain Brillet** (CNRS, Orsay, lasers, à gauche) et **Adalberto Giazotto** (INFN, Pise, suspensions, à droite)
- **1989** : **Proposal**
- **27 juin 1994** : **Approbation du projet** par le CNRS et l'INFN
- **Mai 1997** : **Design report** final
- **2003** : **Fin de la construction**
- **2007-2010** : **Prises de données** Virgo puis Virgo+
- **2011-2016** : **Passage** de « **Virgo** » à « **Virgo Avancé** »
- **2015** : **observation** par les détecteurs **LIGO Avancés** de **deux ondes gravitationnelles**  
→ **2016** : **annonces des découvertes** par les collaborations **LIGO** et **Virgo**
- **Août 2017** : **Première prise de données** de « **Virgo Avancé** »
  - **Observations d'ondes gravitationnelles** : **GW170814**, **GW170817**



# La Collaboration Virgo



- ~800 membres
  - ~530 auteurs des publications  
→ Plus que doublé depuis les premières detections de 2015-17

- ~140 laboratoires de 15 pays

- Rassemblés en ~35 groupes de 9 pays



- Médias sociaux

- [https://twitter.com/ego\\_virgo](https://twitter.com/ego_virgo)
- <https://www.facebook.com/EGOVirgoCollaboration>
- [https://www.instagram.com/ligo\\_virgo](https://www.instagram.com/ligo_virgo)
- <https://www.youtube.com/c/EGOtheVirgoCollaboration>

- Sites internet

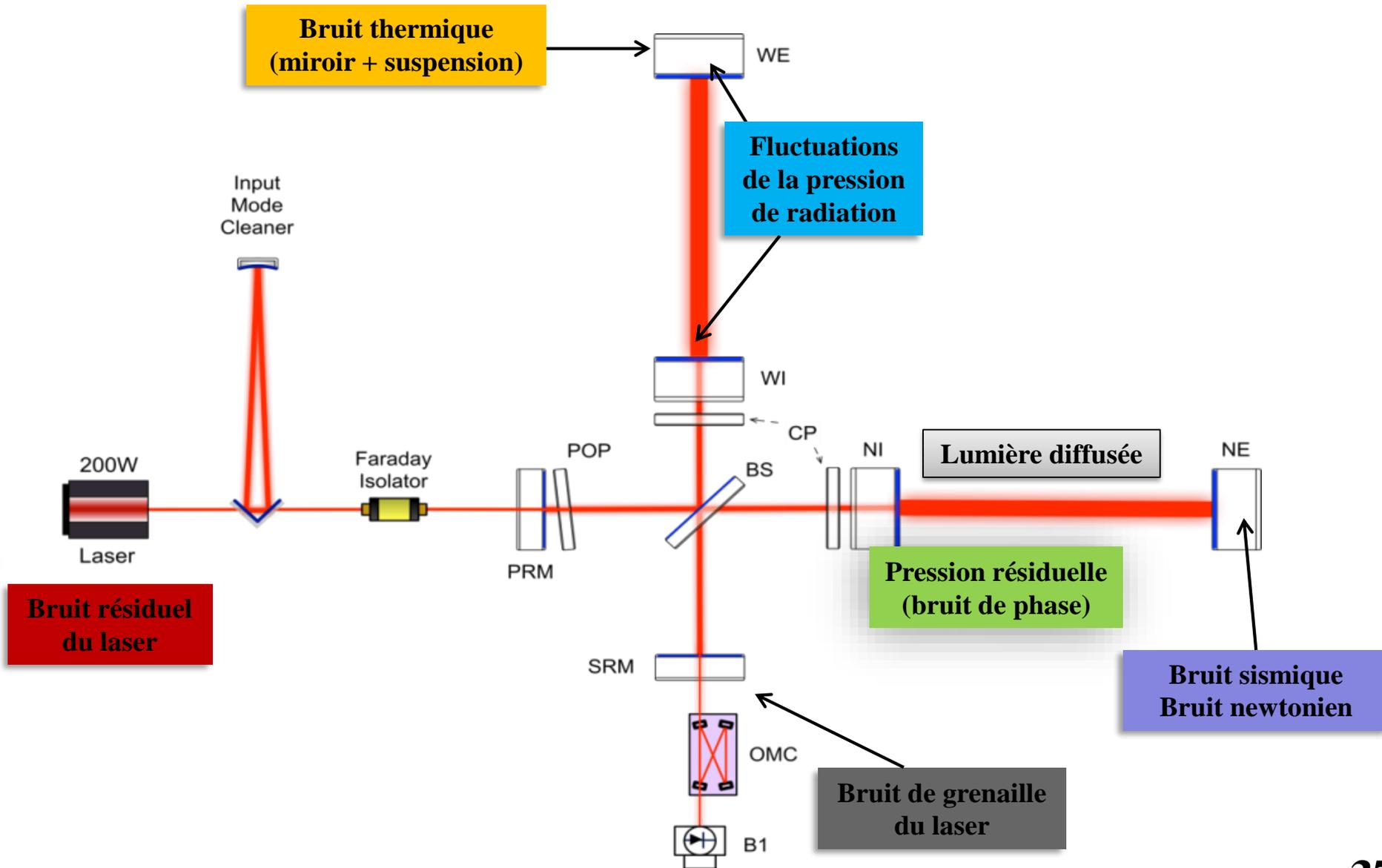
- Virgo: <https://www.virgo-gw.eu>
- EGO: <https://www.ego-gw.it>



# Bruits et sensibilité

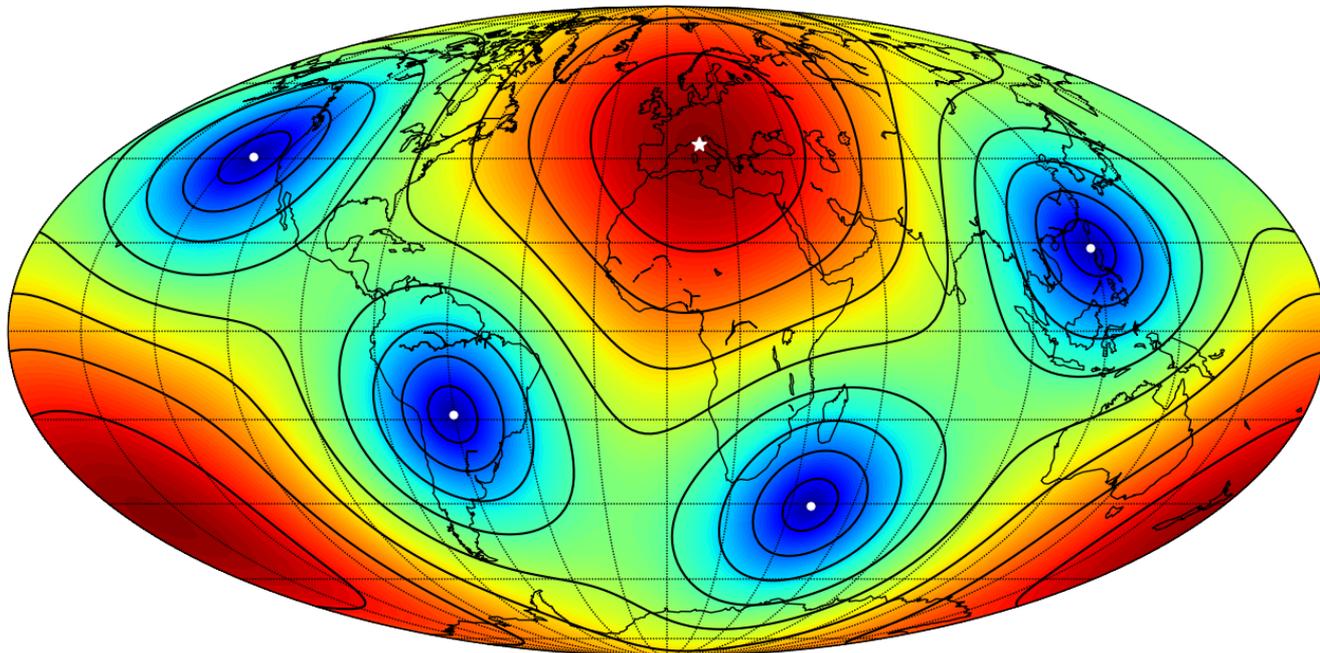
- **Bruit** : toute perturbation parasite (quelle que soit son origine) qui pollue le signal en sortie de l'ITF et donc impacte la détection d'une OG potentielle
- **Le niveau de bruit de l'ITF varie en fonction de la fréquence**
  - On peut détecter une OG de fréquence  $f$  donnée si son amplitude  $h$  est « plus forte » que le niveau de bruit à cette même fréquence
- **Les ITFs sont des détecteurs sensibles dans une large gamme de fréquences**
  - La fréquence d'une OG peut varier de manière importante au cours du temps  
→ Même si le signal est court !
  - L'évolution précise de cette fréquence au cours du temps est caractéristique pour certains des signaux attendus – en particulier celui détecté lors de GW150914 !
- **Des sources de bruits très variées**
  - **Bruits fondamentaux**  
→ Impossibles à éviter ; la conception de l'ITF vise à les minimiser
  - **Bruits instrumentaux**  
→ Pour chaque bruit : identifier sa cause, y mettre fin ou l'atténuer
  - **Bruits environnementaux**  
→ Isoler au mieux l'ITF ; surveiller l'environnement

# Les principaux bruits du détecteur



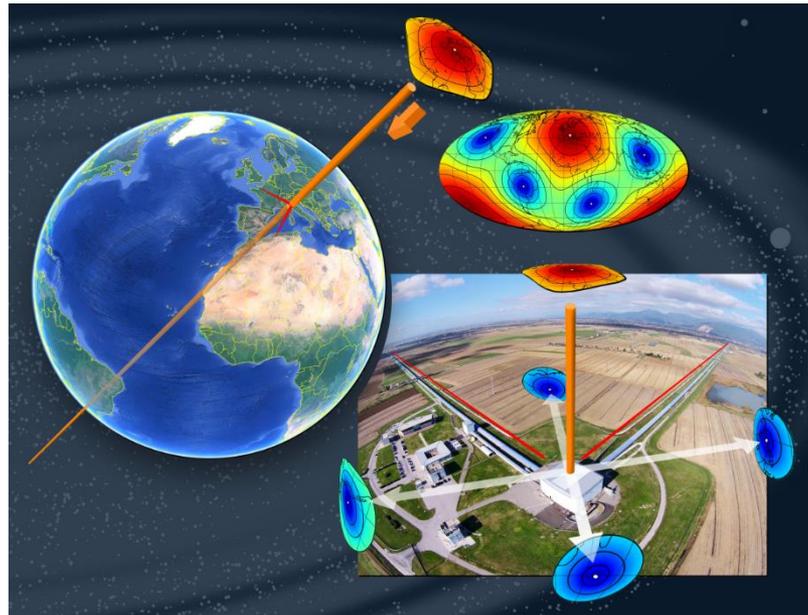
# Diagramme d'antenne de Virgo

- Un interféromètre n'est pas directionnel
  - Il observe simultanément dans la plupart des directions  
→ Plus un **micro** qu'un télescope !
- Deux directions optimales : zénith et nadir – ondes gravitationnelles transverses
- Quatre directions aveugles
  - Toutes dans le plan du détecteur
  - Le long de la bissectrice des bras et à 90 degrés de celle-ci



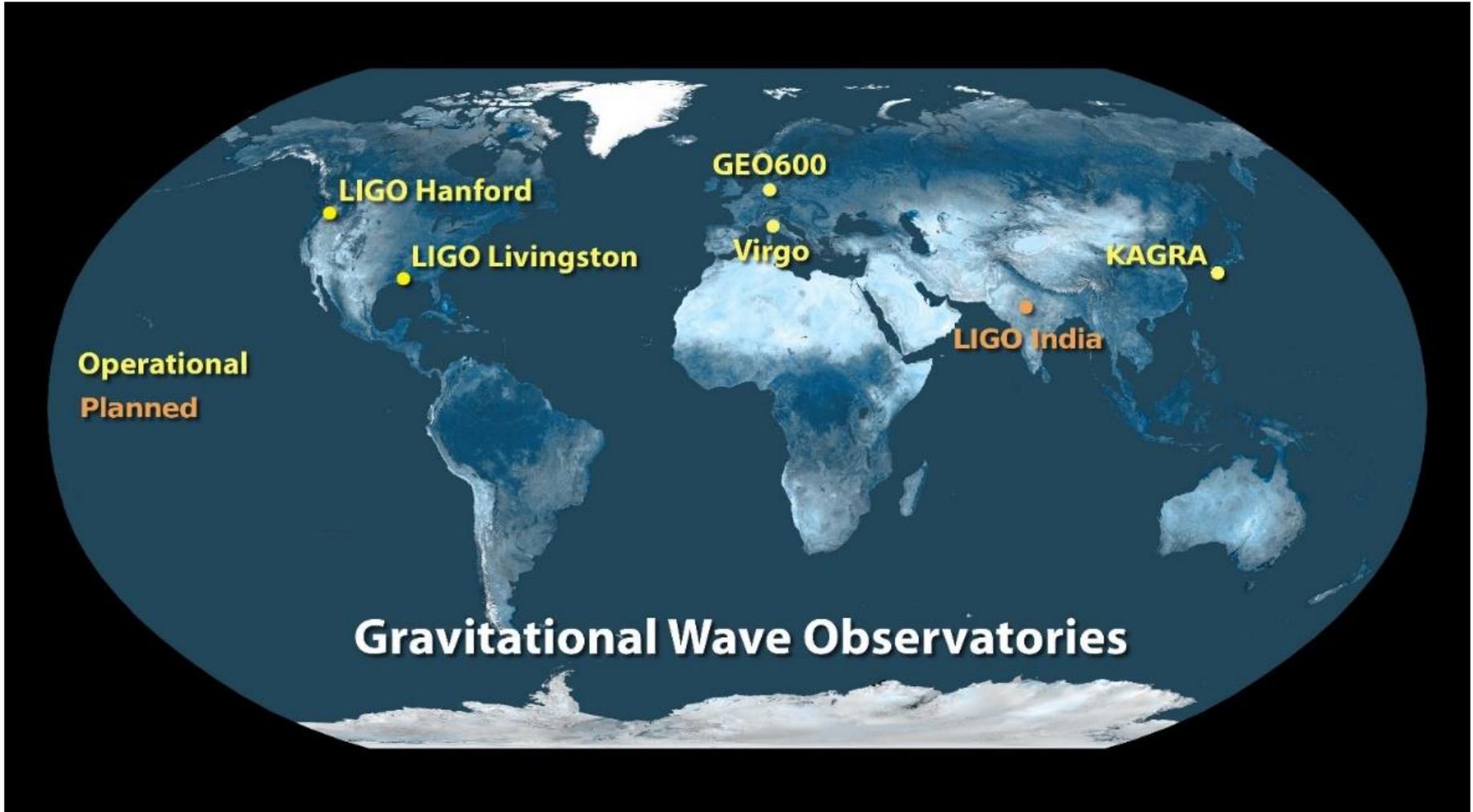
# Diagramme d'antenne de Virgo

- **Un interféromètre n'est pas directionnel**
  - Il observe simultanément dans la plupart des directions  
→ Plus un **micro** qu'un télescope !
- **Deux directions optimales** : zénith et nadir – ondes gravitationnelles transverses
- **Quatre directions aveugles**
  - Toutes dans le plan du détecteur
  - Le long de la bissectrice des bras et à 90 degrés de celle-ci



# Un réseau de détecteurs : LVK

- LIGO-Virgo-KAGRA : « **LVK** »



# Un réseau de détecteurs : LVK

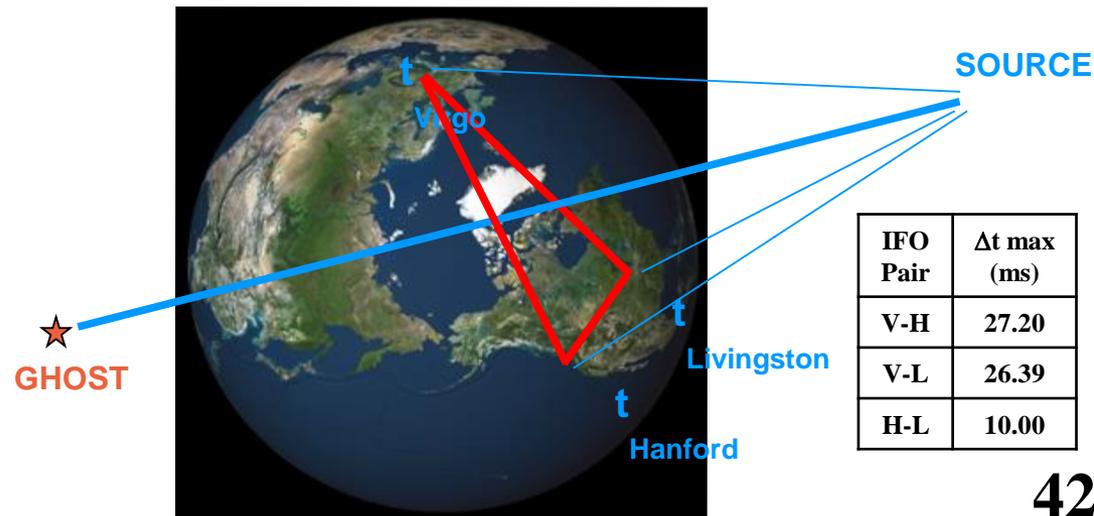
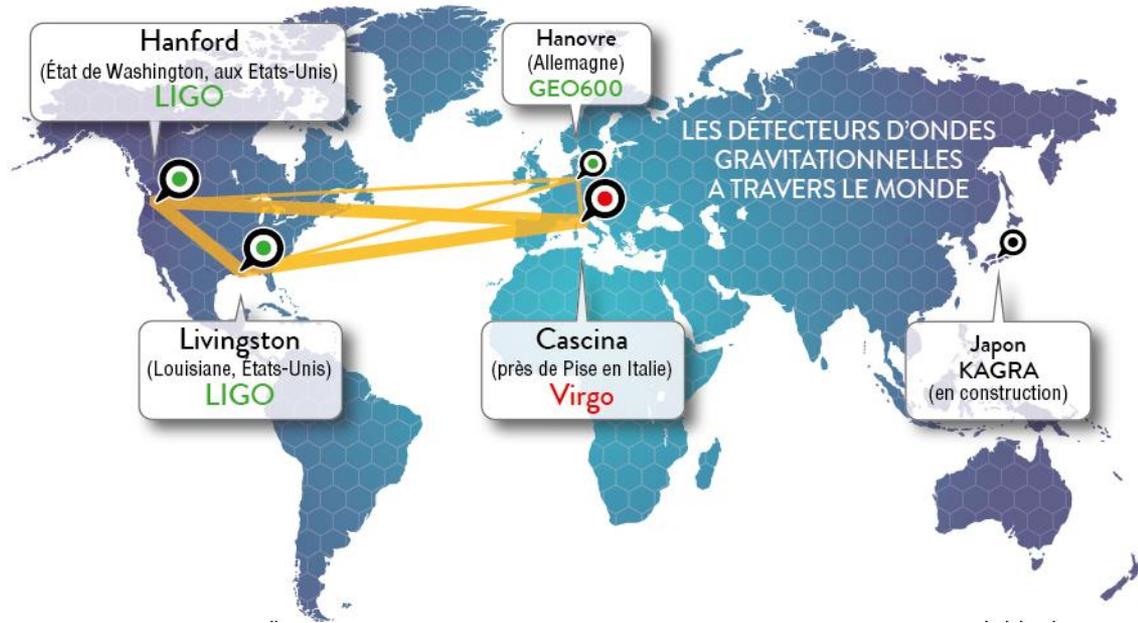


# Un réseau de détecteurs

- Un seul détecteur ne suffit pas pour réaliser une détection
  - 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

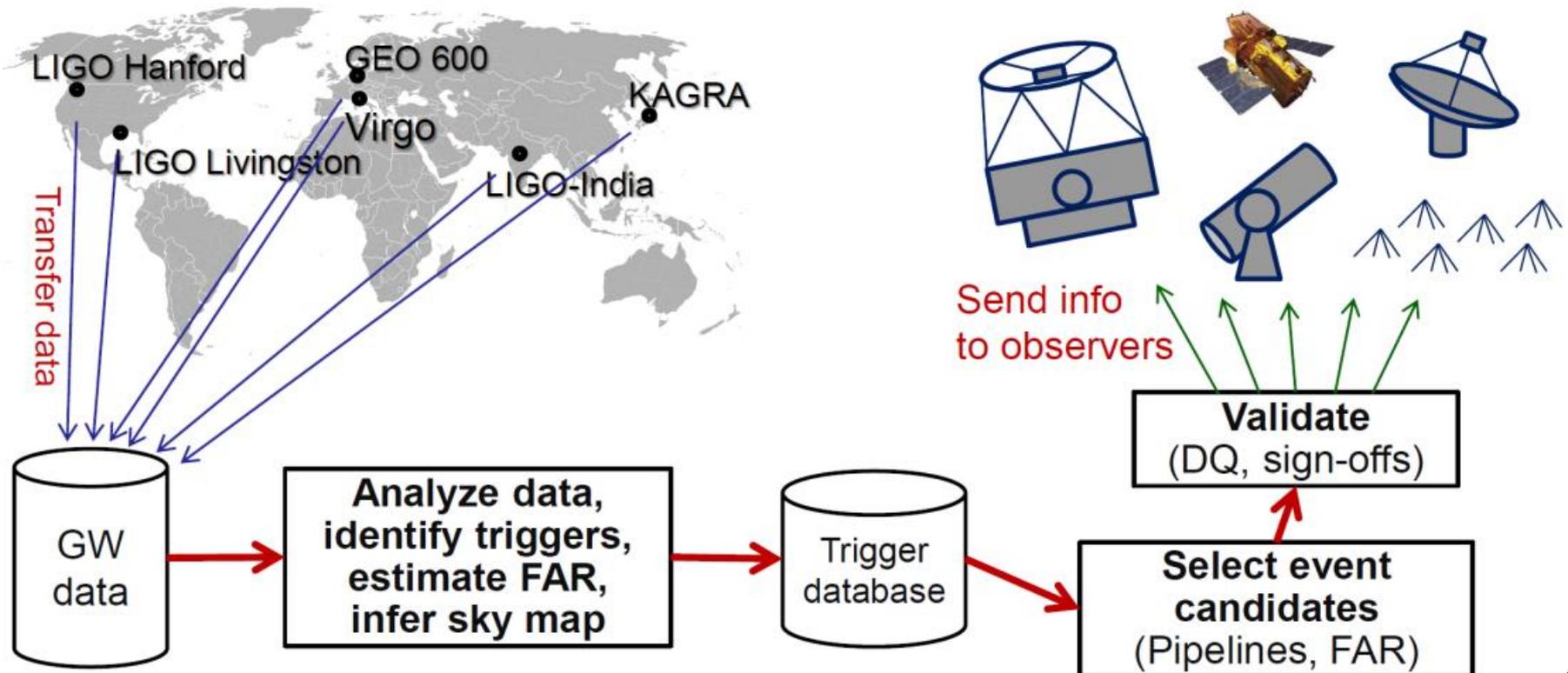


# Un réseau de partenaires

- **Recherche de contreparties** au signal d'ondes gravitationnelles

- Électromagnétiques
- Neutrinos
- Particules

Des dizaines de télescopes impliqués dans ces recherches

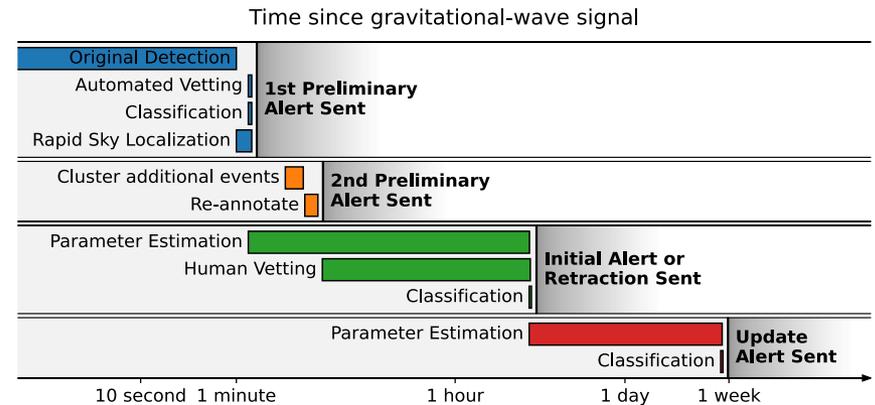


# Détections : 90<sup>(\*)</sup> !

(\*) Publiées à ce jour par [LIGO-Virgo-KAGRA](#)  
dans notre [catalogue d'événements transitoires](#) « [GWTC](#) »

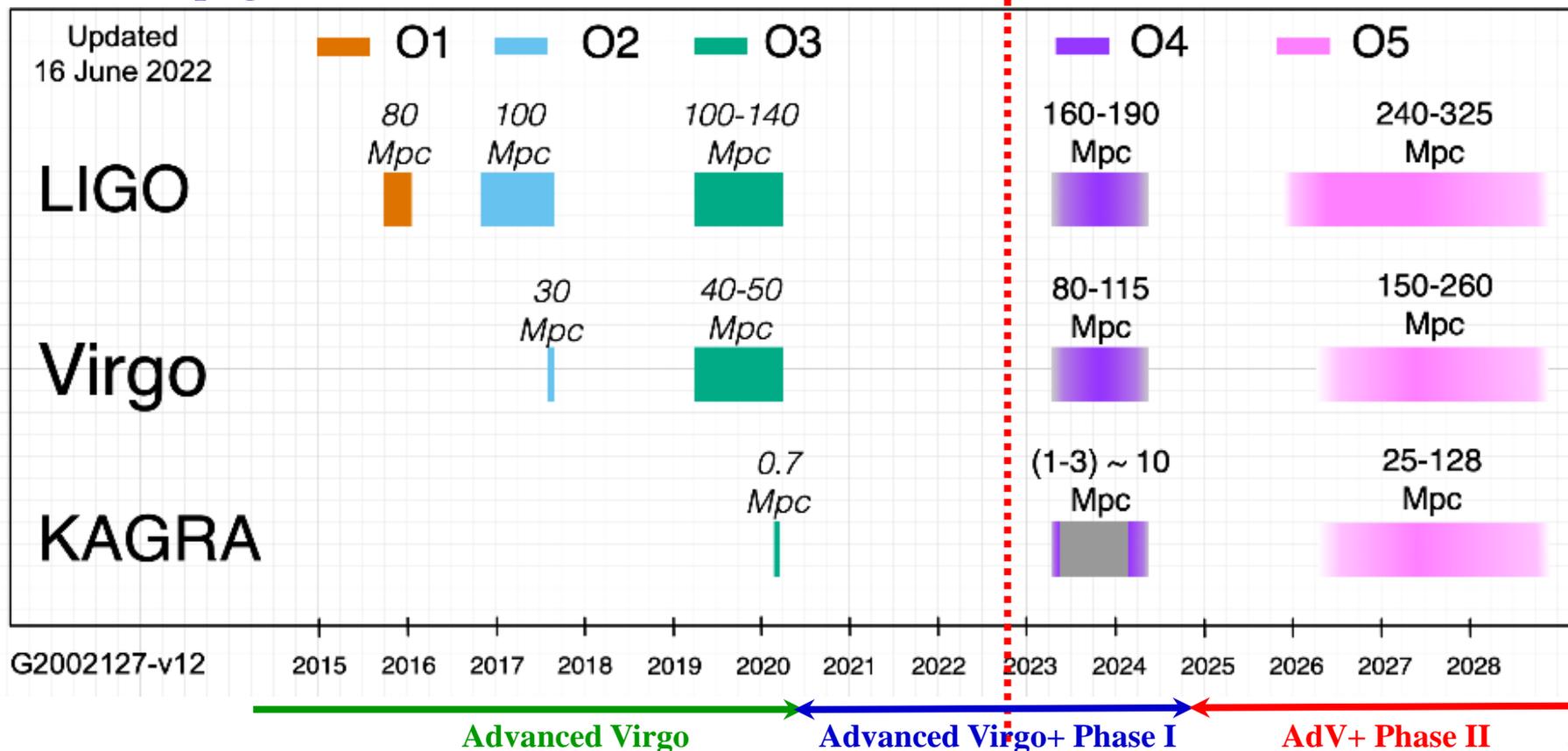
# Protocole

- **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



# Des prises de données et des améliorations

- **Approche globale** pour « maximiser » la production scientifique du **réseau LVK**
  - **Stratégie commune** définie au niveau des directions des collaborations participantes
    - Périodes de prises de données :
      - Observing Runs (On)**      **Passé :  $n=1,2,3$**     **Futur :  $n=4,5,etc.$**
    - Campagnes d'améliorations



# La première détection : l'événement GW150914

**Nomenclature :** GW<YY><MM><DD> ou

GW<YY><MM><DD>\_<h><m><s> si plusieurs signaux le même jour

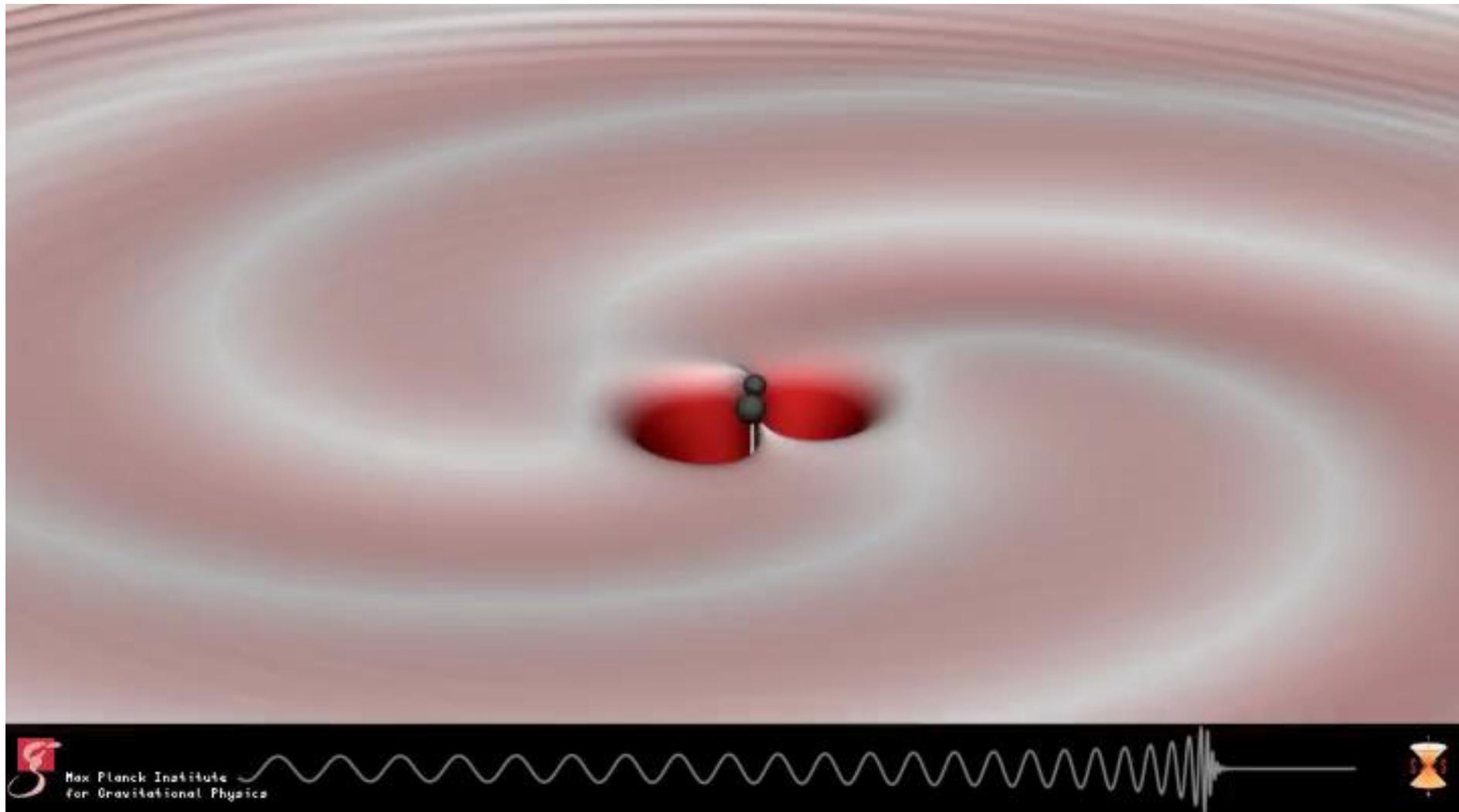
→ Événement détecté le DD/MM/20YY à <h>:<m>:<s> UTC

- GW : Gravitational Wave (« Onde Gravitationnelle »)
- <YY> : les deux derniers chiffres de l'année
- <MM> : le numéro du mois (deux chiffres)
- <DD> : le numéro du jour (deux chiffres)
- <h>:<m>:<s> : l'heure (à la seconde près) UTC (le temps GPS)

⇒ GW150914 ou GW150914\_095045 pour le nom complet

« 2015/09/14 » est un format de date américain

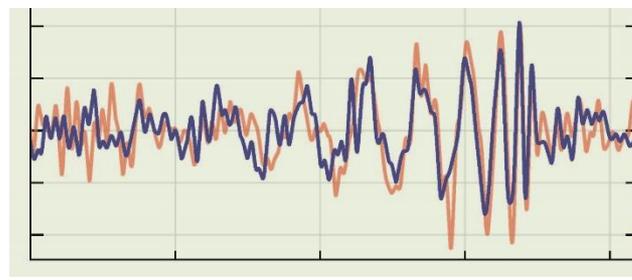
# Simulation de la fusion des deux trous noirs



# 14 septembre 2015, 11:51 heure de Paris

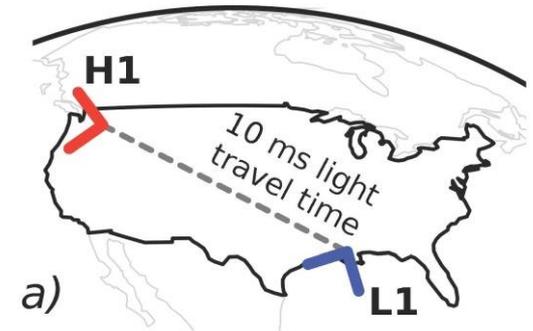
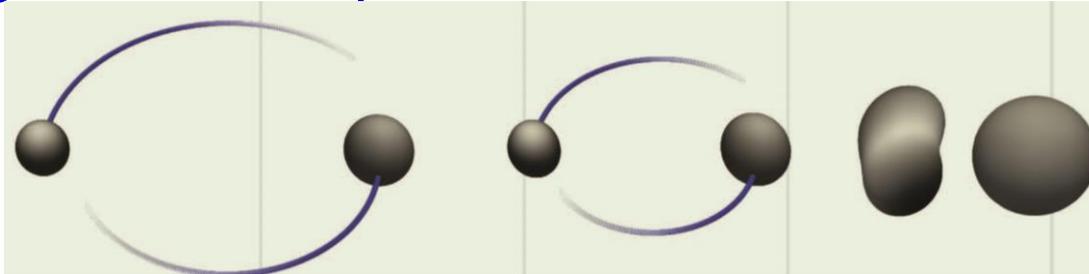
- Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle

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

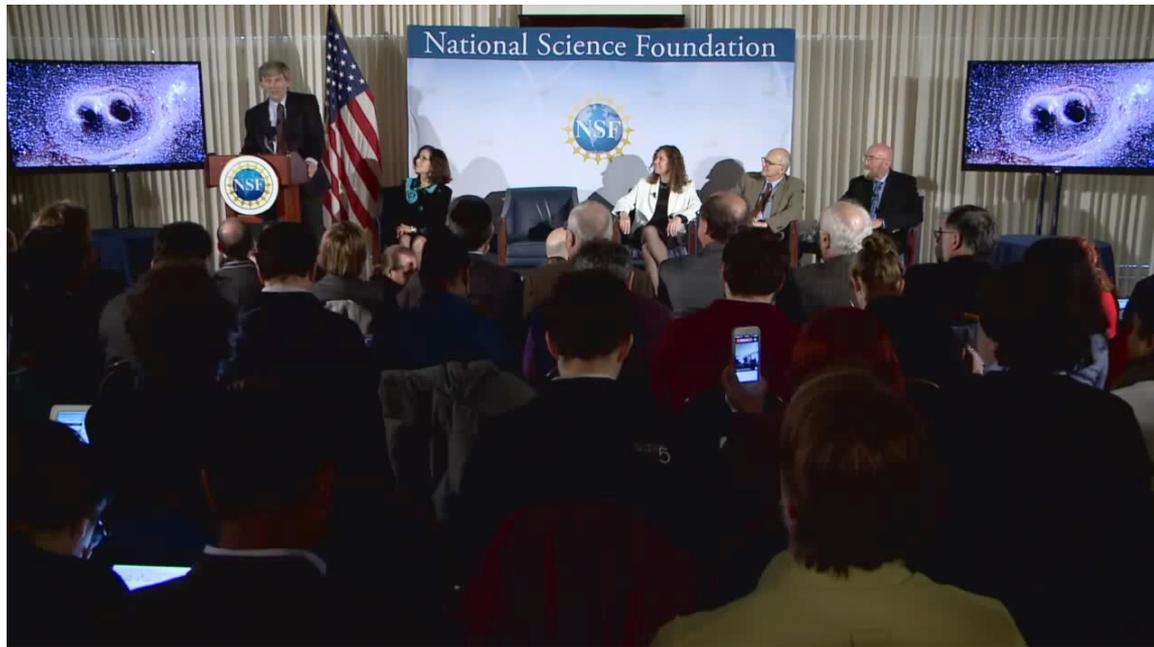


Evénement baptisé GW150914

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



# 11 février 2016, 16:30 heure de Paris



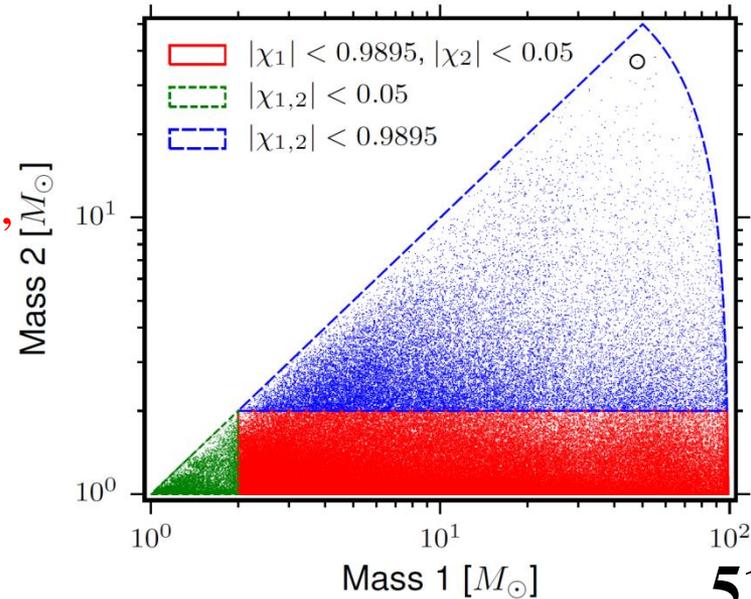
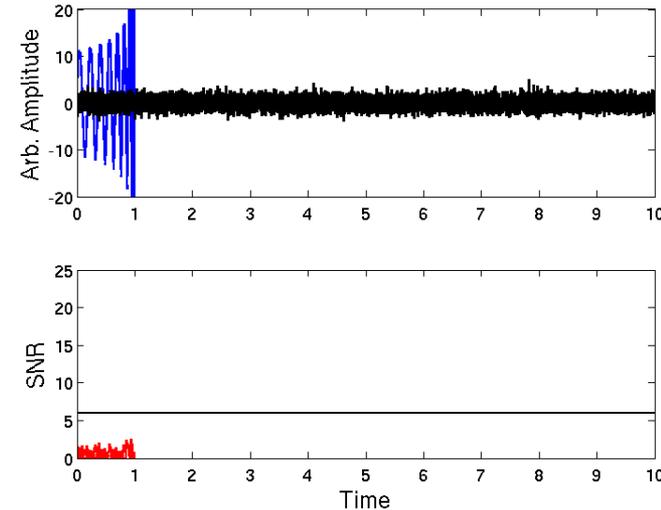
« *Ladies and gentlemen,  
we have detected  
gravitational waves,  
we did it.* »

David Reitze,  
directeur des  
observatoires LIGO

- **Conférences de presse simultanées** à Washington, Cascina (site de Virgo, Italie), Paris, Amsterdam, etc.
- **Article scientifique** (en anglais) publié en ligne
  - **Signé par les deux collaborations LIGO et Virgo**
  - <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- **Mise en ligne de nombreux articles associés détaillant la découverte**
  - Liste complète : <https://www.ligo.caltech.edu/page/detection-companion-papers>

# Filtrage adapté ...

- ... ou la manière **optimale** de **chercher un signal connu**
  - Même **faible** – en particulier : **invisible à l'œil nu** !
- On « **compare** » (opération **mathématique**) les données avec un « **calque** » qui correspond au signal cherché. **Si les données contiennent un signal qui « ressemble » beaucoup au calque, l'algorithme le fait « ressortir ».**
- En fait des (centaines de) milliers de calques
  - Correspondant chacun à des jeux de paramètres (inconnus) différents
  - Calcul analytique + simulations numériques
  - **Espace des paramètres, « pavé » par des calques, efficaces chacun dans une petite région**→ Voir exemple ci-contre
  - chaque point correspond à un calque
- **Recherche de signaux forts dans les deux ITFs, coïncidents en temps et « ressemblants »**



# 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

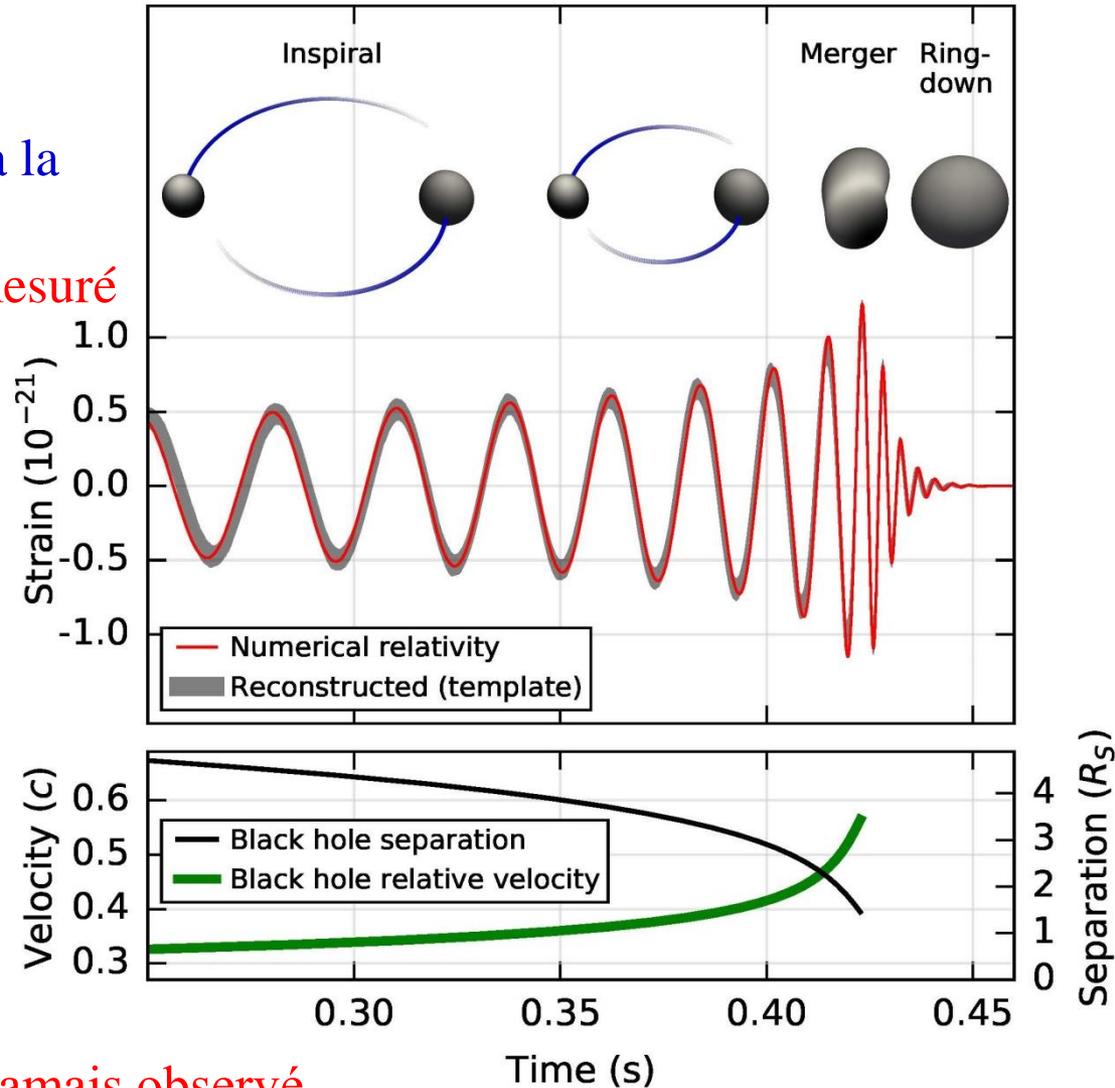
- Deux **objets massifs** et **compacts** en orbite l'un autour de l'autre à **75 Hz** (la moitié de la fréquence de l'OG), donc à une **vitesse relativiste** et qui se rapprochent très près avant de fusionner  
→ A peine quelques  $R_S$  !

→ Seuls des trous noirs peuvent correspondre à ces observations

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

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

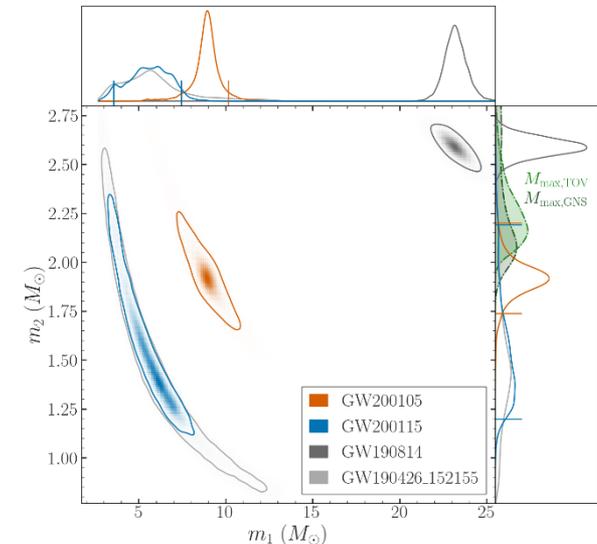
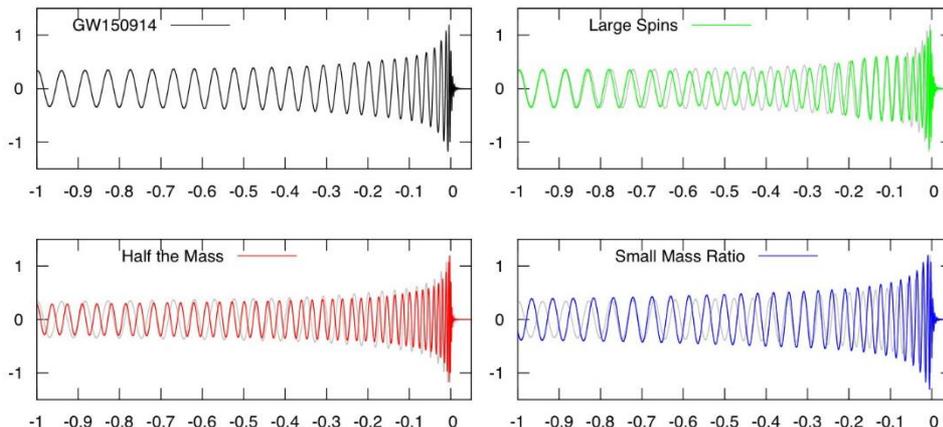
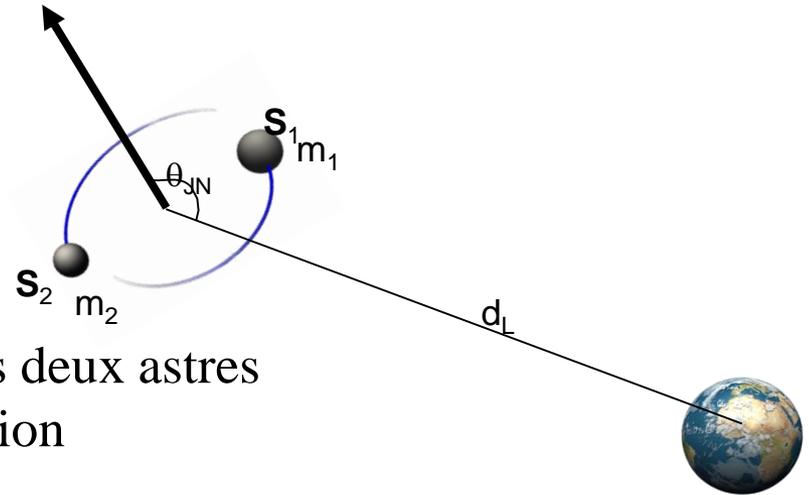
- Plus que tous les sursauts gamma détectés jusqu'à aujourd'hui
- Puissance crête plus de 10 fois supérieure à celle émise par l'Univers visible



# **Estimation des paramètres de la source (masses, etc.)**

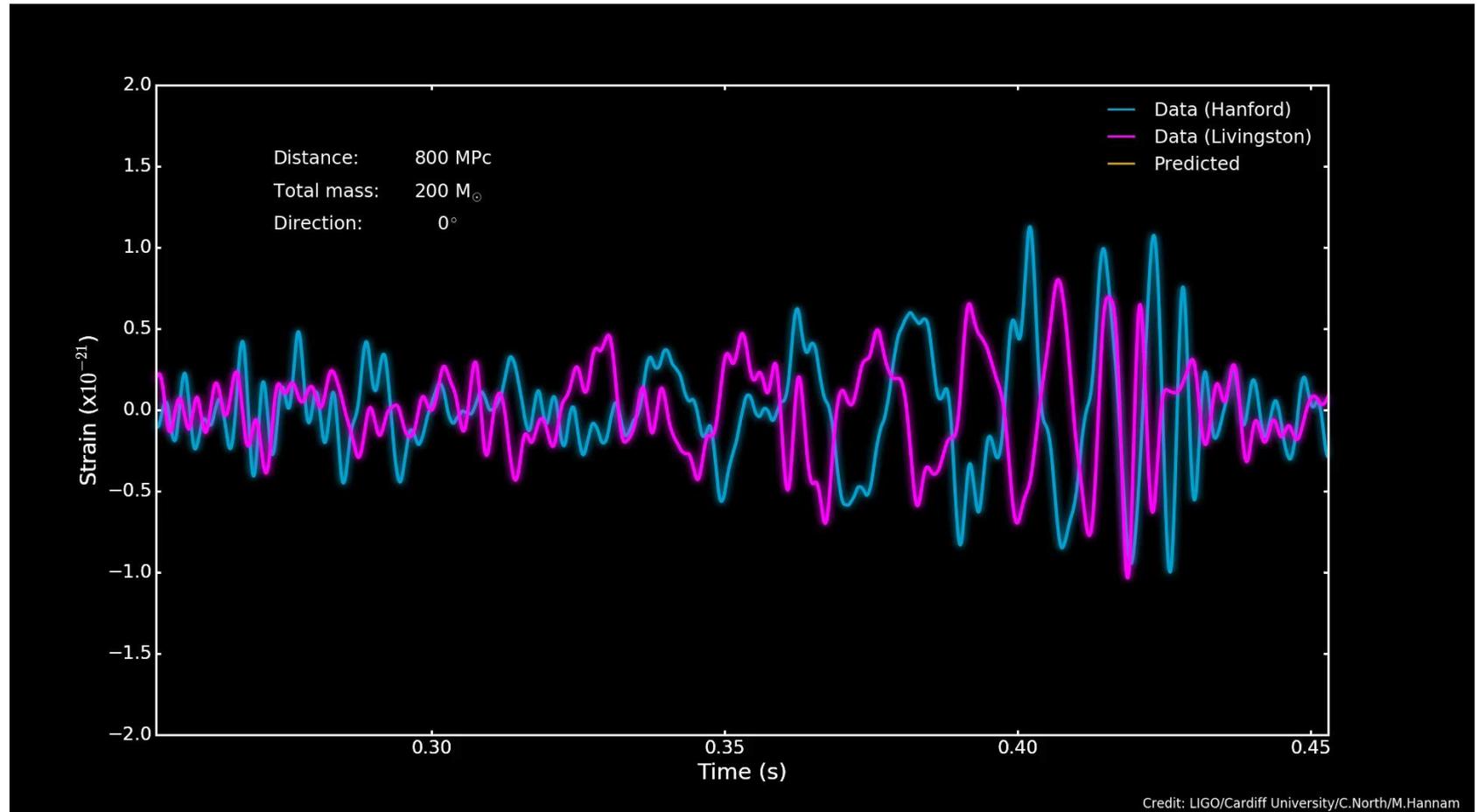
# Mesure des paramètres du signal

- Une quinzaine de paramètres au total
  - **Masses** et **moments angulaires** des deux astres compacts initiaux et de l'astre final
  - Description du **système binaire** formé par les deux astres
    - ◆ Distance de la source, inclinaison, précession
- Utilisation de **méthodes statistiques** – inférence bayésienne – pour
  - obtenir une valeur et une incertitude pour chaque paramètre
    - ◆ Prise en compte des corrélations
  - comparer des modèles de forme d'onde entre eux



# L'exemple de l'événement GW170104

- Principe de la **mesure des paramètres** de la source du signal d'OGs

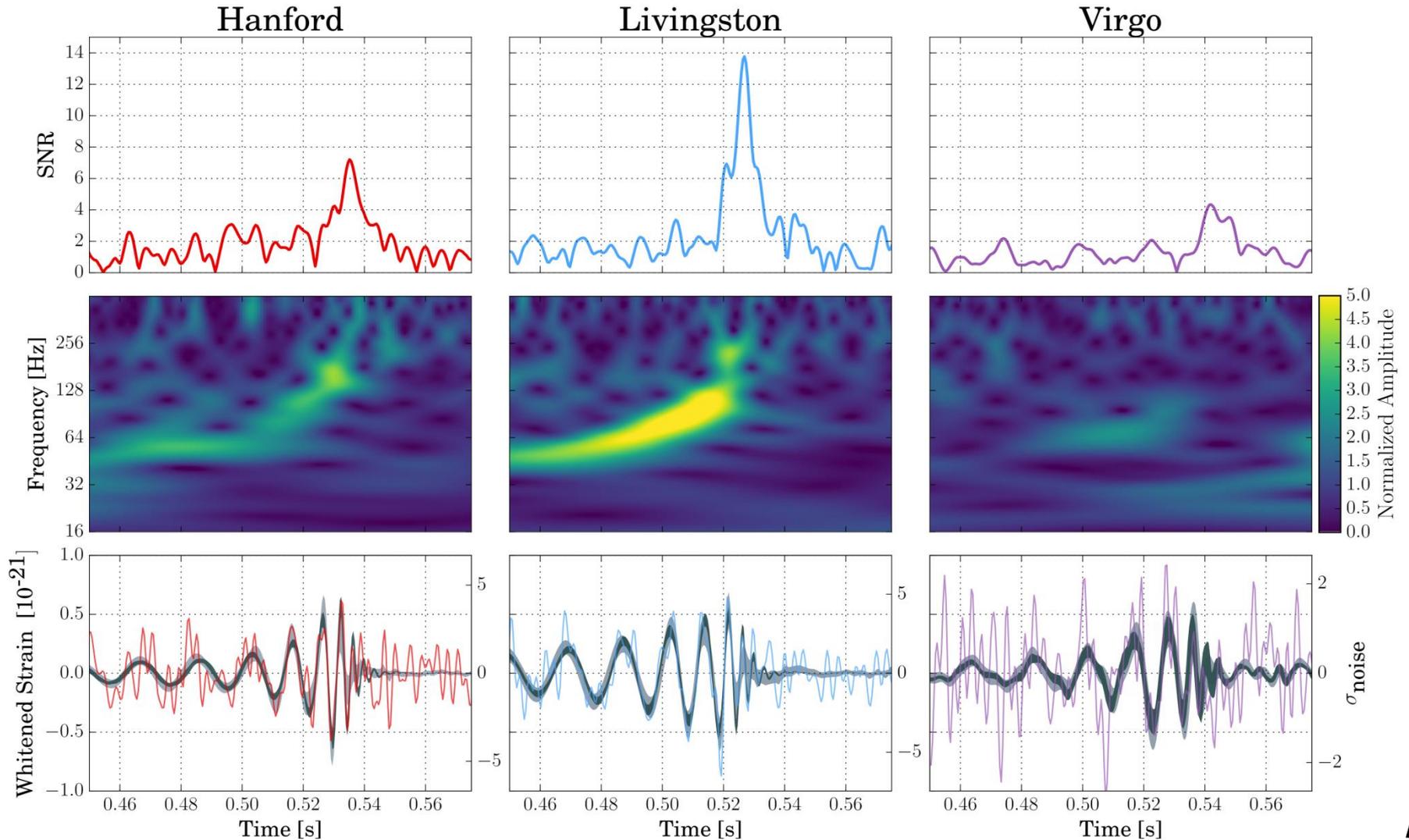


- **Evolution très différente de la fréquence des signaux au cours du temps**  
→ Détermination du **jeu de paramètres le plus probable**

# **L'événement GW170814**

# GW170814 : 1<sup>ère</sup> détection triple

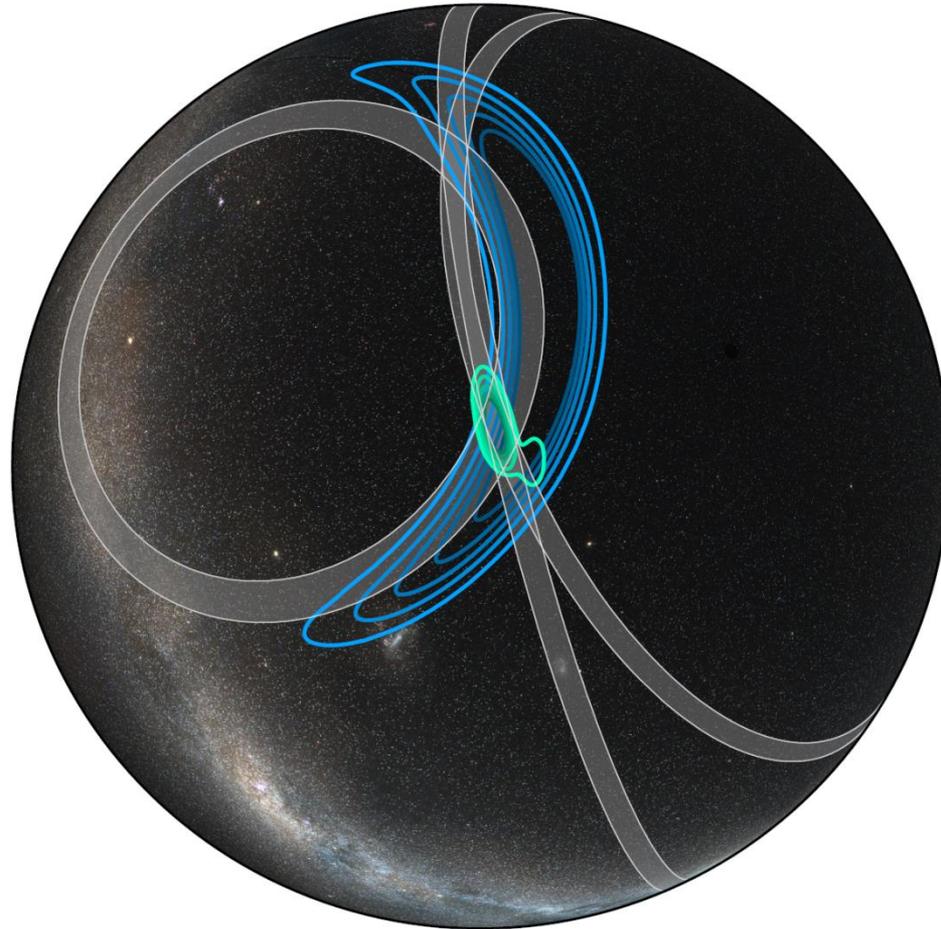
- Des études détaillées confirment la présence d'un **signal dans le détecteur Virgo**



# 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

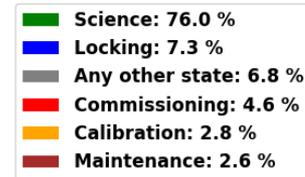
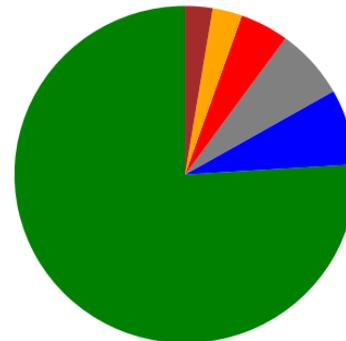
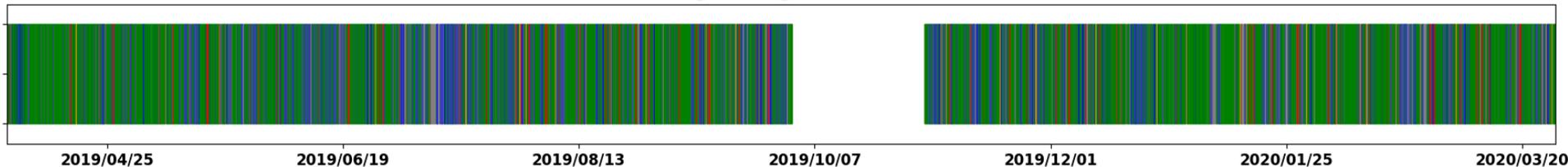


# **La prise de données O3 : avril 2019 – mars 2020**

# La prise de données LIGO-Virgo « O3 »

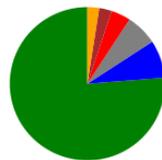
- Le cycle utile de Virgo pendant le run O3
  - La fraction du temps pendant laquelle le détecteur prend des « bonnes » données

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

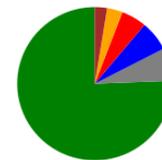


Advanced Virgo in O3

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



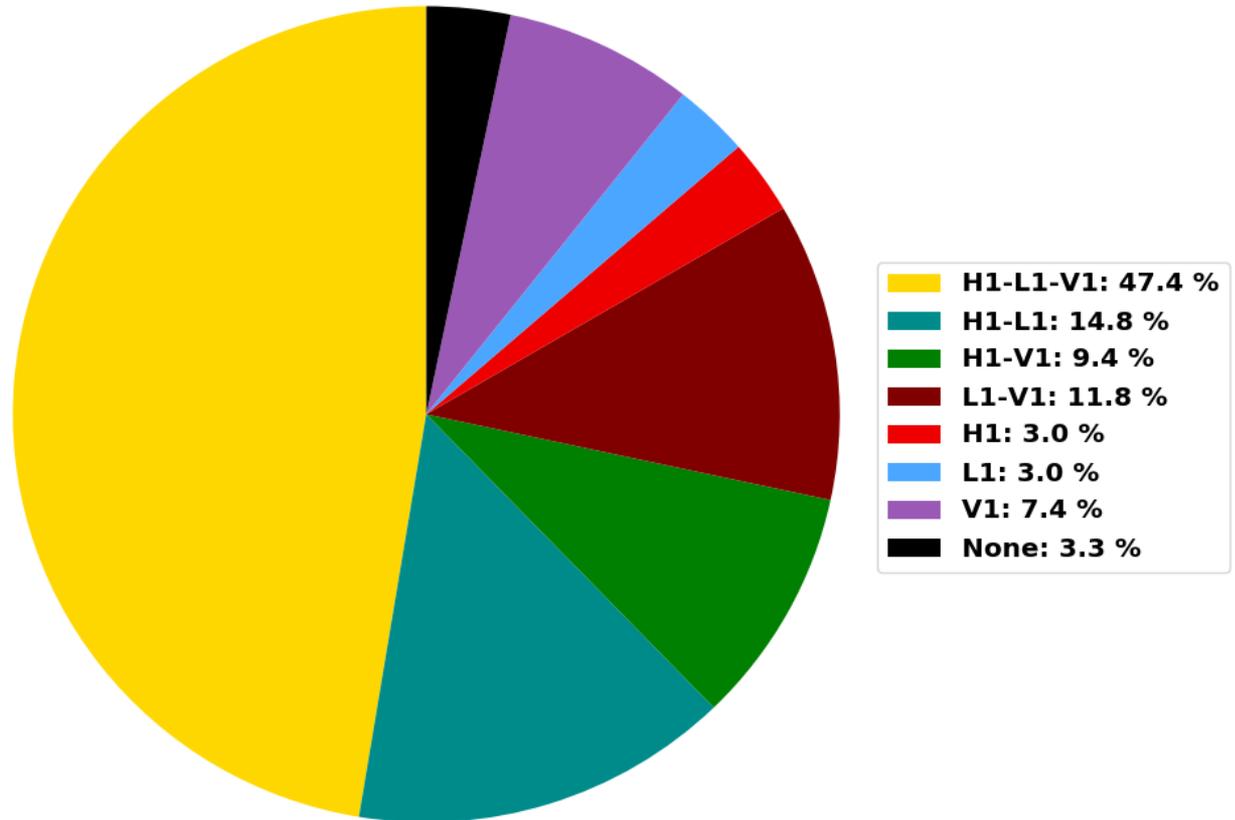
O3b: 2019/11/01 -> 2020/03/27



# La prise de données LIGO-Virgo « O3 »

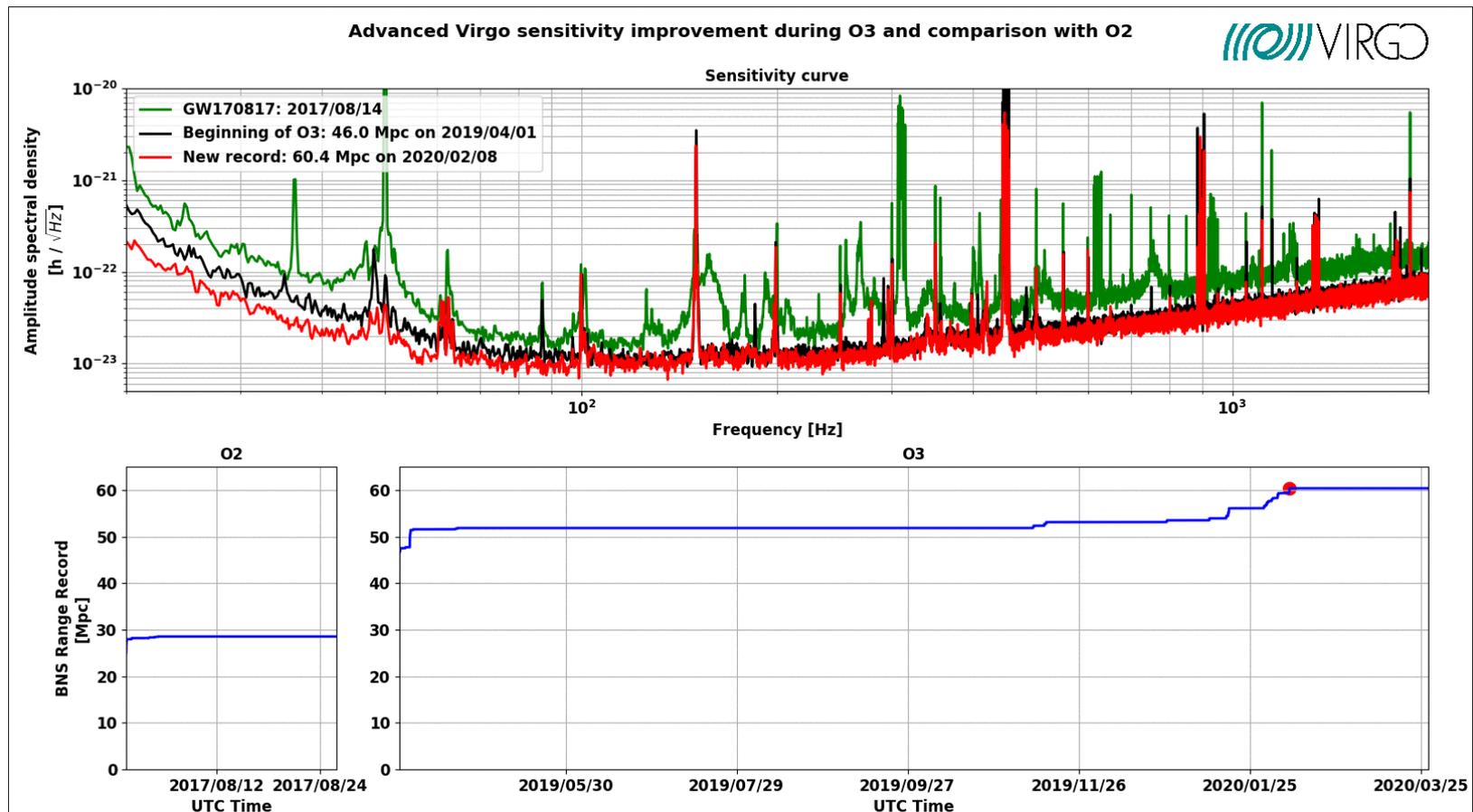
- Cycle utile global du réseau LIGO-Virgo pendant O3

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



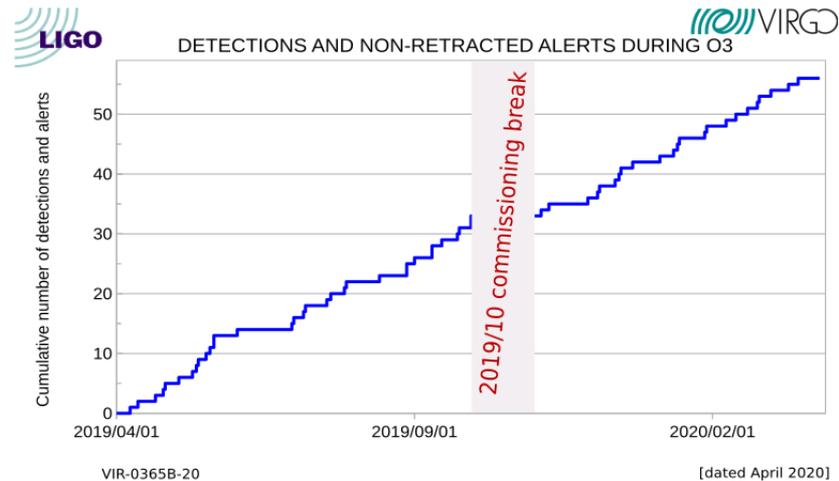
# La prise de données LIGO-Virgo « O3 »

- **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



# Et les détections s'accumulent ...

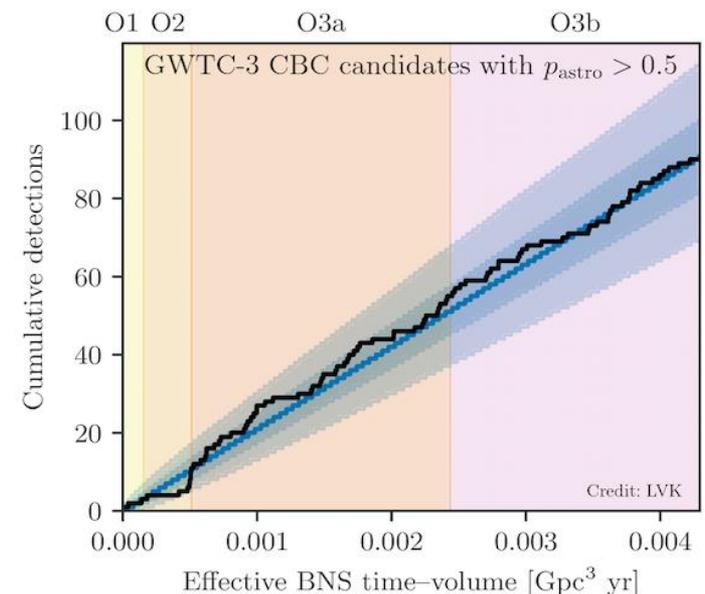
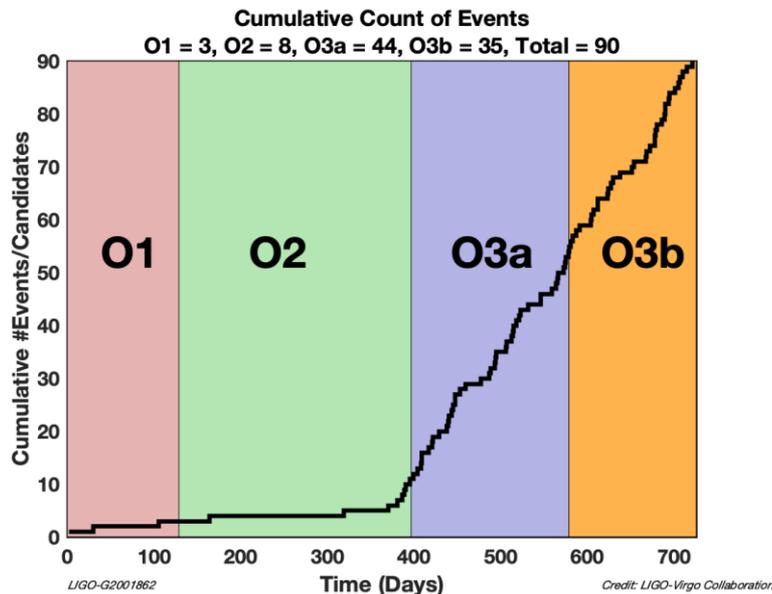
- **Alertes publiques** pendant O3



- **Nombre cumulé de signaux publiés** : O1, O2 et O3 combinés

- En fonction du **calendrier**

- En fonction de la **sensibilité du réseau**



# Une belle moisson de détections

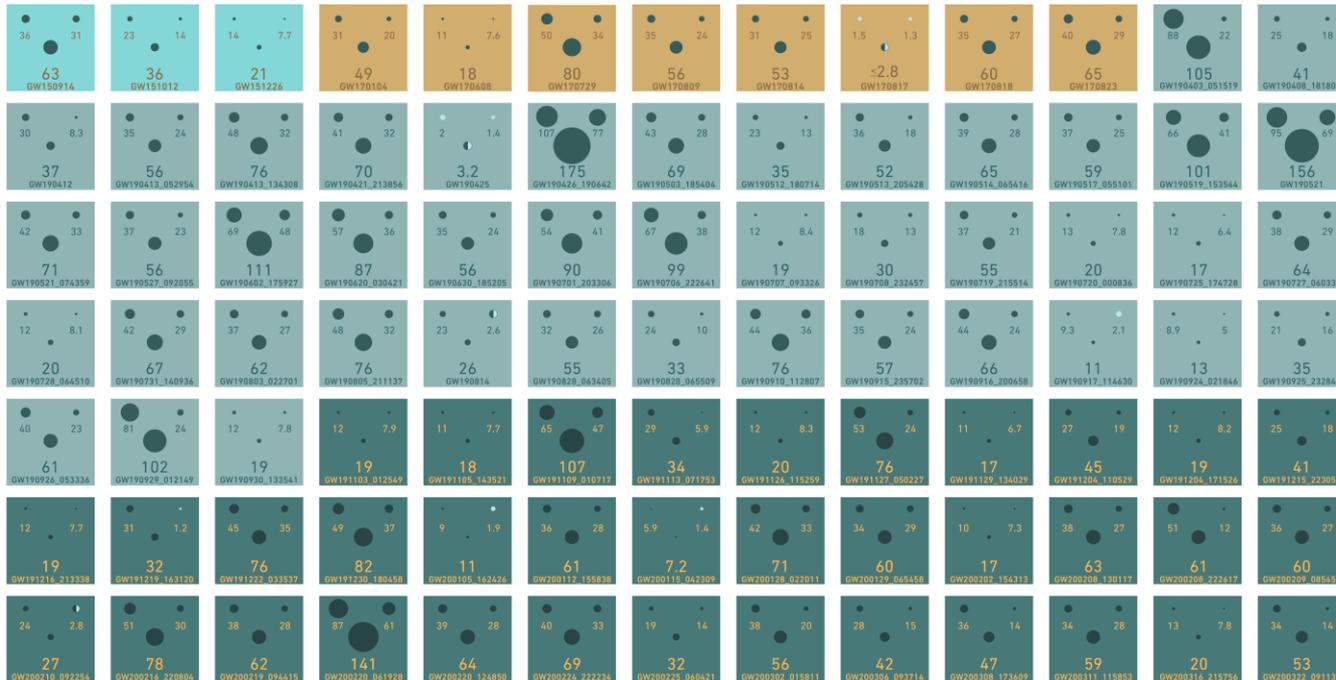
- 90 signaux dans la dernière (3<sup>ème</sup>) édition du catalogue LVK : GWTC-3

## DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES → DEPUIS 2015

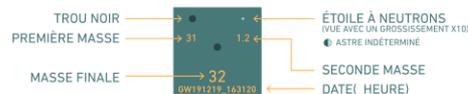
PÉRIODES D'OBSERVATION 01 2015-2016

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.



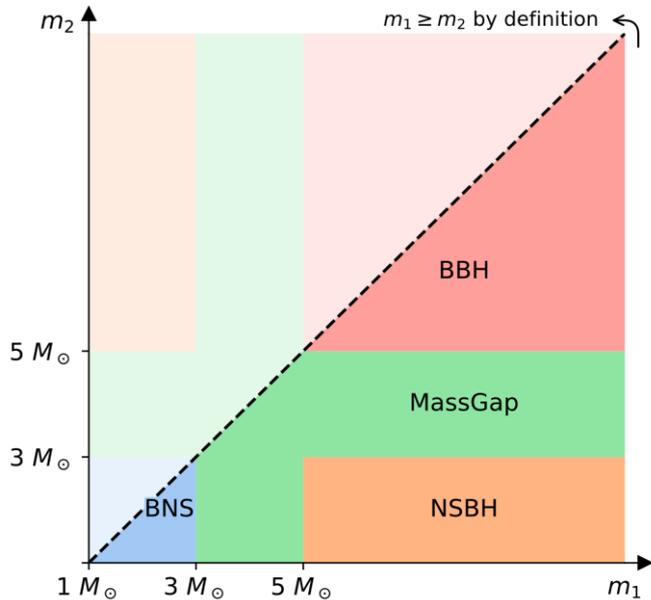
AEC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery



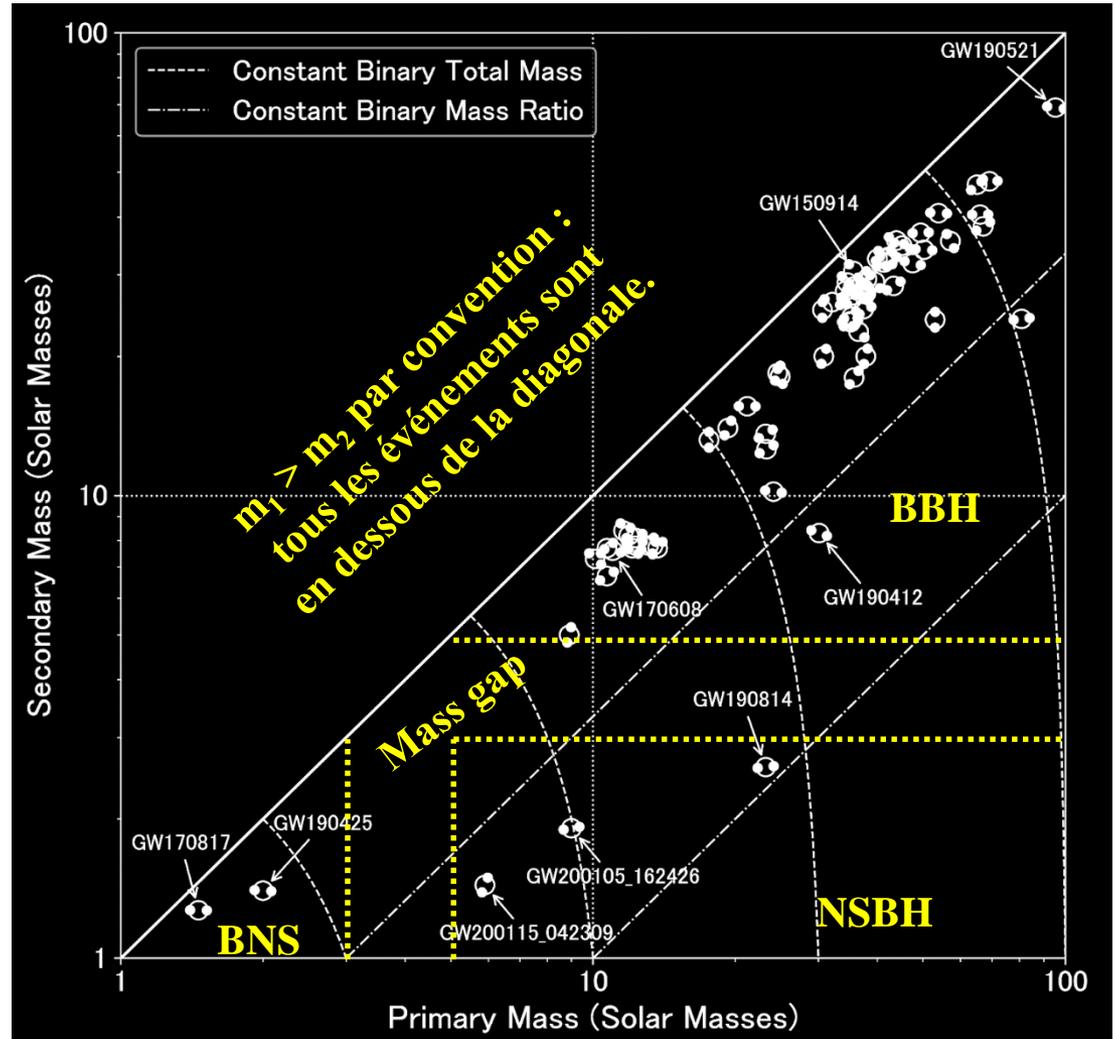
# Une belle moisson de détections

- **Classification des signaux** en fonction des masses des astres du **système binaire**

▪ O1 → O3



- **BBH : Binary Black Hole**  
→ Fusion de deux trous noirs
- **BNS : Binary Neutron Star**  
→ Fusion de deux étoiles à neutrons
- **Mass gap**  
→ Fossé en masse (pas d'astre connu dans cette gamme de masses)
- **NSBH : Neutron Star – Black Hole**  
→ Fusion d'une étoile à neutrons et d'un trou noir



# Depuis la fin de O3

- Programme ambitieux d'amélioration de tous les détecteurs
  - Prévu de longue date
    - Des années à l'avance :  
conception, construction, installation, mise en service, réglages, optimisation
  - Calendrier commun au sein du réseau LVK
- Virgo : projet « Advanced Virgo Plus »
  - Proposé en 2017
  - Deux phases, centrées chacune sur la lutte contre une catégorie de bruit précise
    - ◆ Phase I : Entre O3 et O4 – c'est-à-dire en ce moment
    - ◆ Phase II : Entre O4 et O5 – 2025-2026
- La recherche des ondes gravitationnelles est encore une discipline jeune
  - Chaque amélioration majeure produit un détecteur (en partie) nouveau qu'il faut étudier et comprendre pour pouvoir ensuite le contrôler et en tirer le meilleur
    - Dégradation des performances d'abord, amélioration dans un second temps.



# La prise de données O4

- Organisation similaire à O3
  - **Un an** au total, avec une **pause de quelques semaines au milieu (réglages, etc.)**
  - **Trois détecteurs** (LIGO et Virgo), plus KAGRA par intermittence
- **Calendrier sévèrement impacté par la pandémie de covid-19**
  - O4 aurait dû se terminer ... maintenant (fin 2022)!
- Calendrier actuel : **démarrage de O4 prévu en mars 2023**
  - **Ajustements possibles**
    - En fonction du **statut des détecteurs**
      - ◆ Une fois la prise de données commencée, on ne touche a priori plus à rien !
  - **Connexions fortes avec les astronomes**
    - Réseau LVK et télescopes nécessaires pour les observations multi-messagers
- **Calendrier public** – mis à jour régulièrement
  - <https://observing.docs.ligo.org/plan>

## LIGO, VIRGO AND KAGRA OBSERVING RUN PLANS

(15 September 2022 update; **next update by 15 November 2022**)

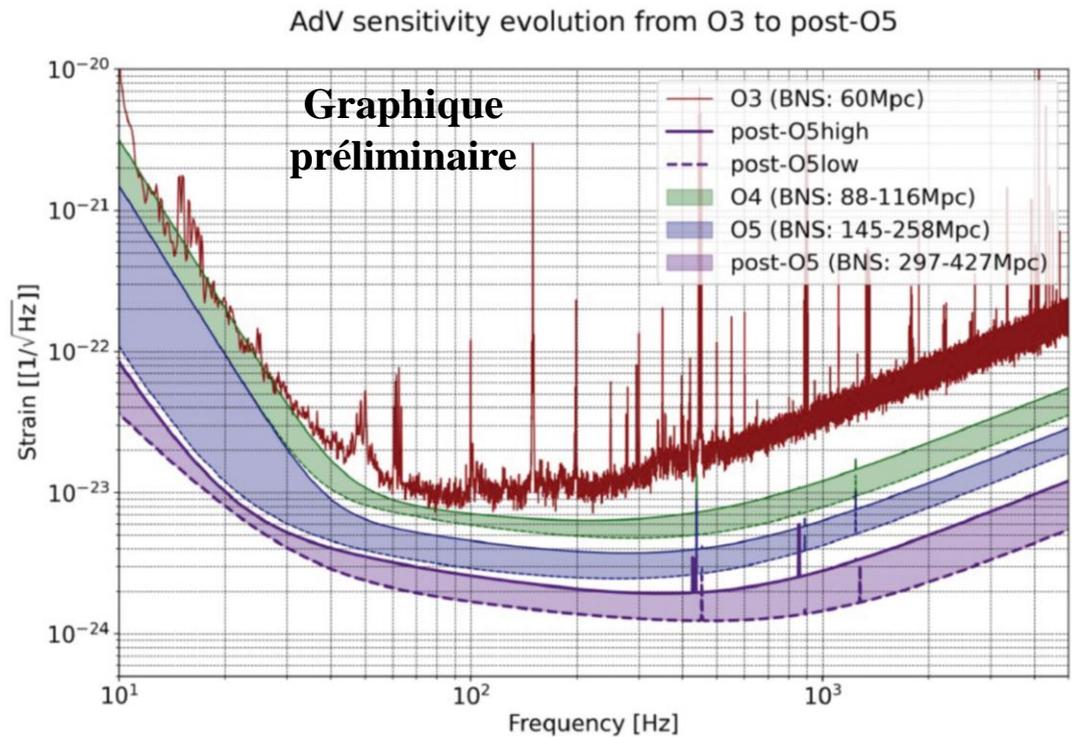
LIGO, Virgo, and KAGRA are closely coordinating to start the O4 Observing run together. As a result of the most recent evaluation of the schedule for O4 readiness, we project to **start the O4 Observing Run in March 2023**, with an Engineering Run to start one month before the observing run begins; low-latency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

**The run is planned to start with LIGO Hanford, LIGO Livingston, Virgo, and KAGRA.**

While the commissioning of the detectors is progressing, the plan towards readiness continues to be reviewed. The updated O4 start date is driven by further unanticipated delays in the detectors' upgrade and commissioning programs. O5 plans are still in formulation; we note that based on experience during previous observing runs, we anticipate the need in O5 for one or more commissioning breaks of a few months duration each to address issues and make improvements based on observing experience.

# Et après ?

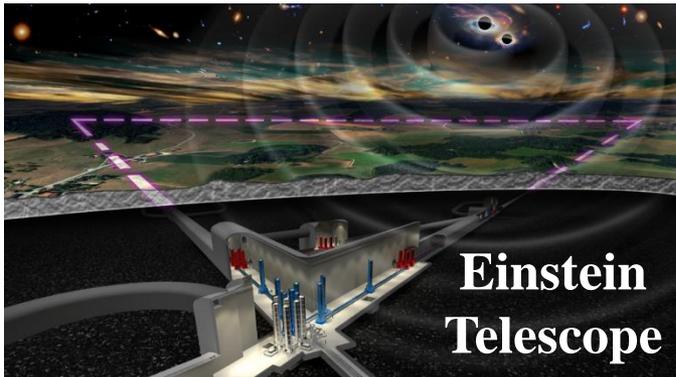
- **Projet Virgo\_nEXT** (« post-O5 »)
  - Aller jusqu'aux limites de l'infrastructure habituelle
  - Servir de relais avant les détecteurs de 3<sup>ème</sup> génération
    - ♦ Cf. transparent suivant
      - **Tester des technologies**
      - **Limiter les risques**
      - **Formation des scientifiques**



- Projet encore en phase « conceptuelle »
  - Présenté aux agences de financement de Virgo – en France et en Europe
    - **Meilleure définition du projet en 2023**

# Et encore après ?

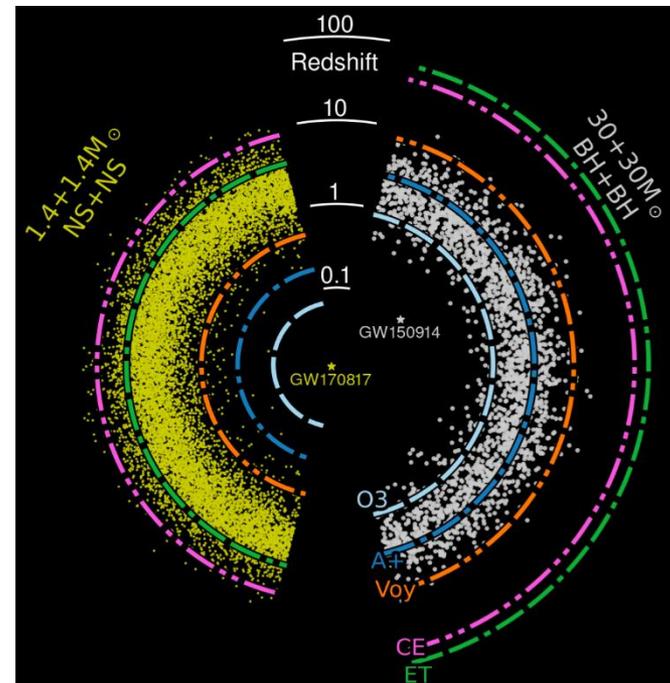
- Préparation de la 3<sup>ème</sup> génération de détecteurs
  - Europe : projet Einstein Telescope (ET)
  - États-Unis : projet Cosmic Explorer (CE)



<https://www.youtube.com/watch?v=HJGVs6-wJG4>

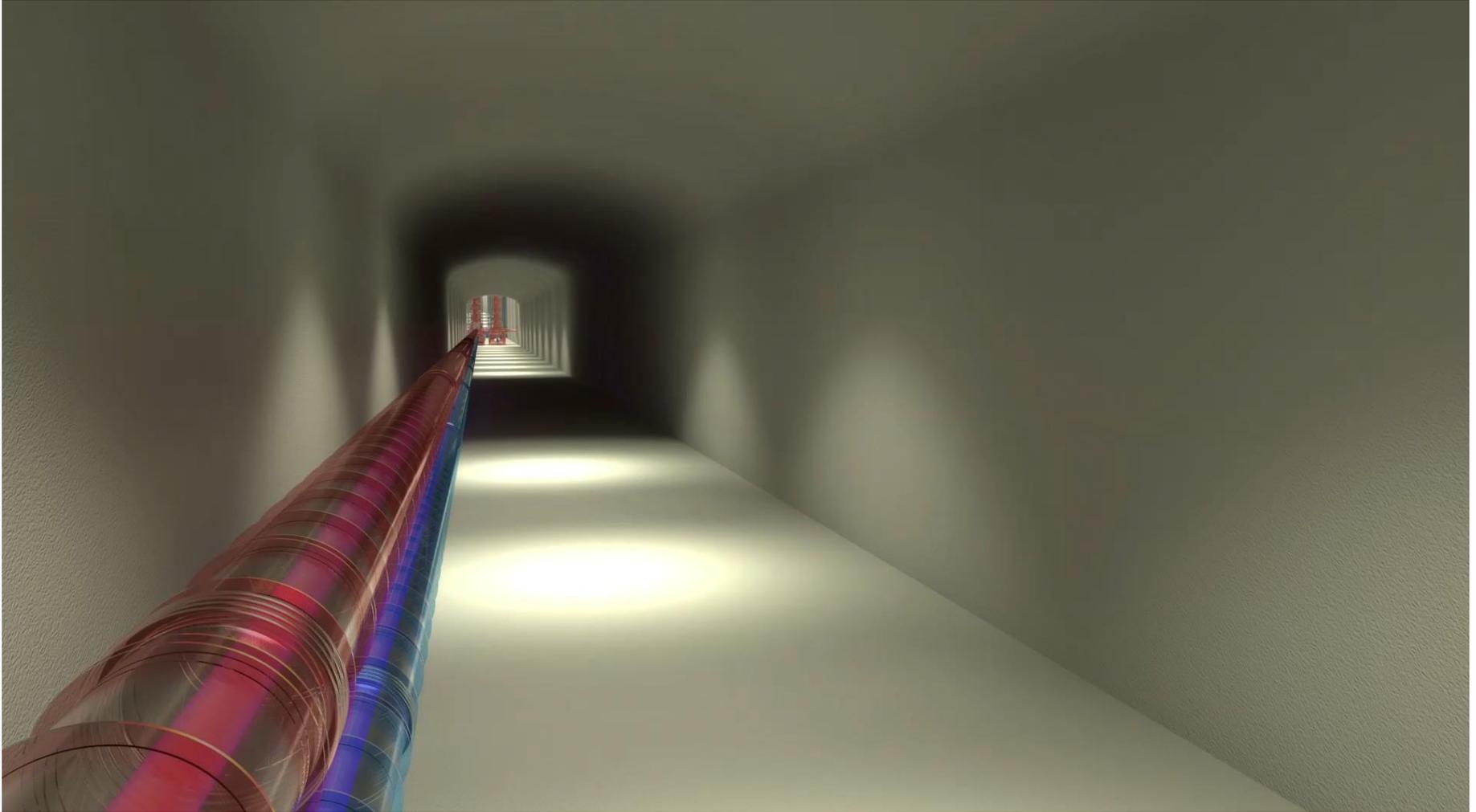


- Des détecteurs encore plus gigantesques
  - Une sensibilité largement accrue qui permettra de détecter beaucoup, beaucoup plus de signaux
    - Y compris des sources très lointaines
    - Capacités de localisation sans précédent
- Astronomie multi-messagers



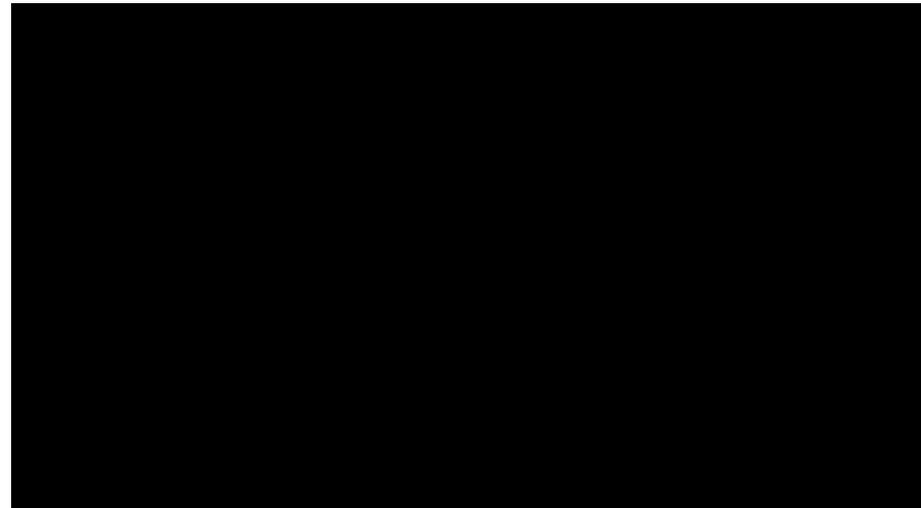
# Et encore après ?

- Projet **E**instein **T**elescope (**ET**)



# Conclusion

- Les **ondes gravitationnelles** sont maintenant un messager de l'Univers bien établi
- La quête continue avec **des instruments de plus en plus performants**
- Les détecteurs de l'extrême
  - CNRS Images, 6 minutes, 2016
  - Virgo and EGO - At the frontier of knowledge and at the service of society
    - EGO, 3 minutes, 2022 [en anglais]



- En savoir plus : **des ressources en français** – originales ou traduites
  - <http://public.virgo-gw.eu/ressources-pedagogiques>
- Pour les **professeurs**, les **élèves** et **le grand public** !