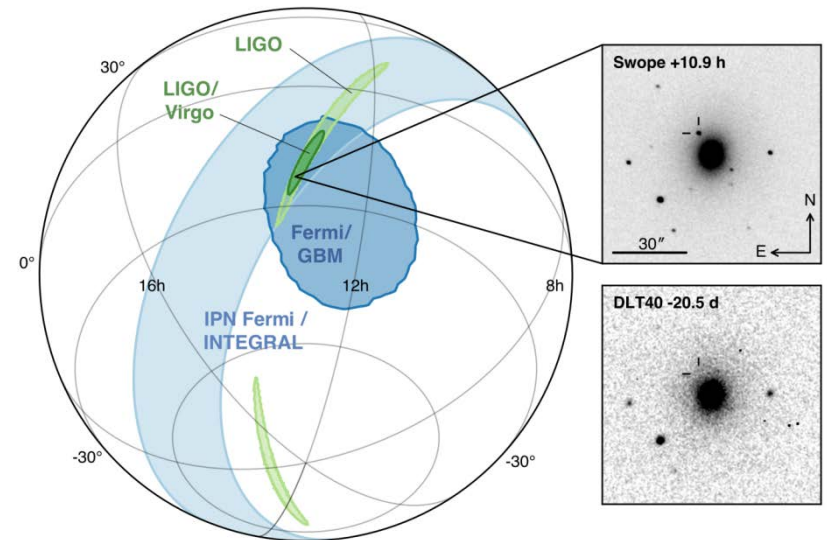


# On a détecté les ondes gravitationnelles !

18 Décembre 2017 – Visite M1 Lyon I

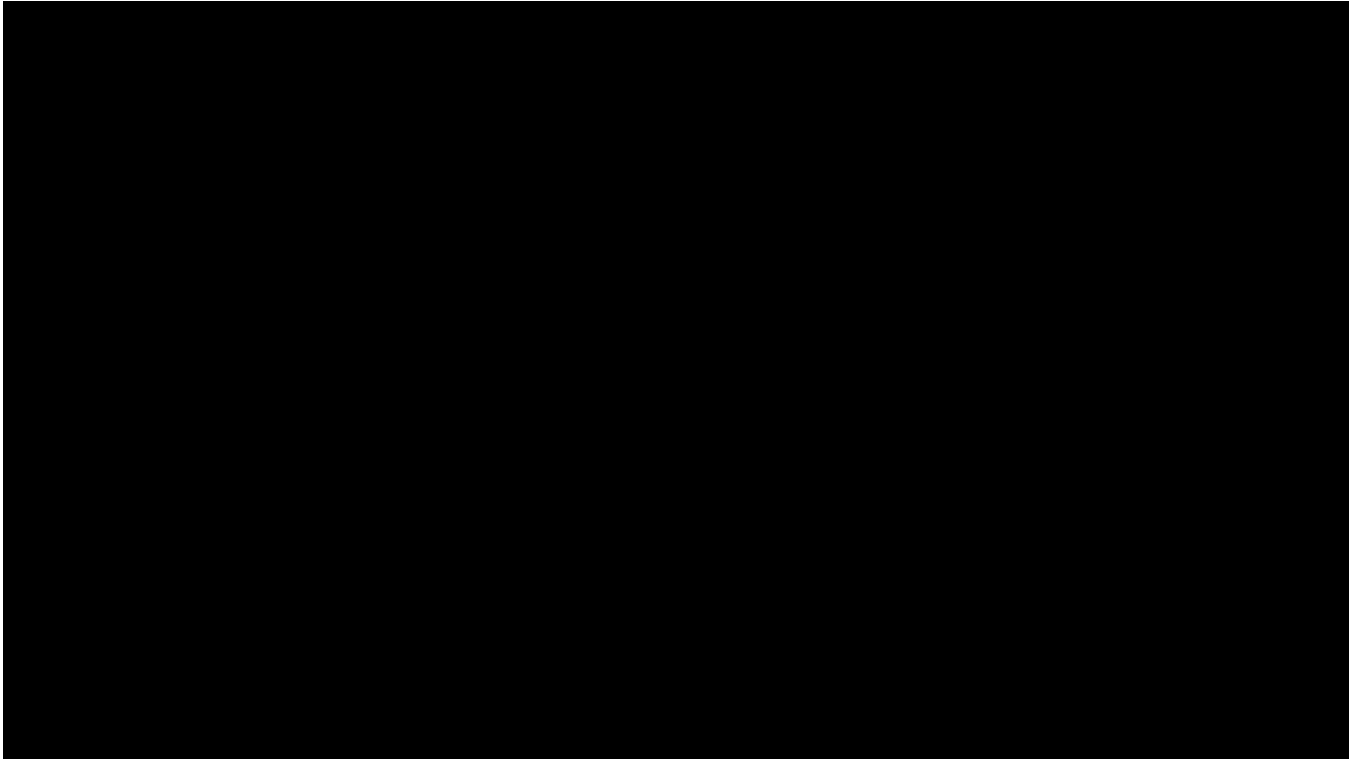
**Nicolas Arnaud** ([narnaud@lal.in2p3.fr](mailto:narnaud@lal.in2p3.fr))

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



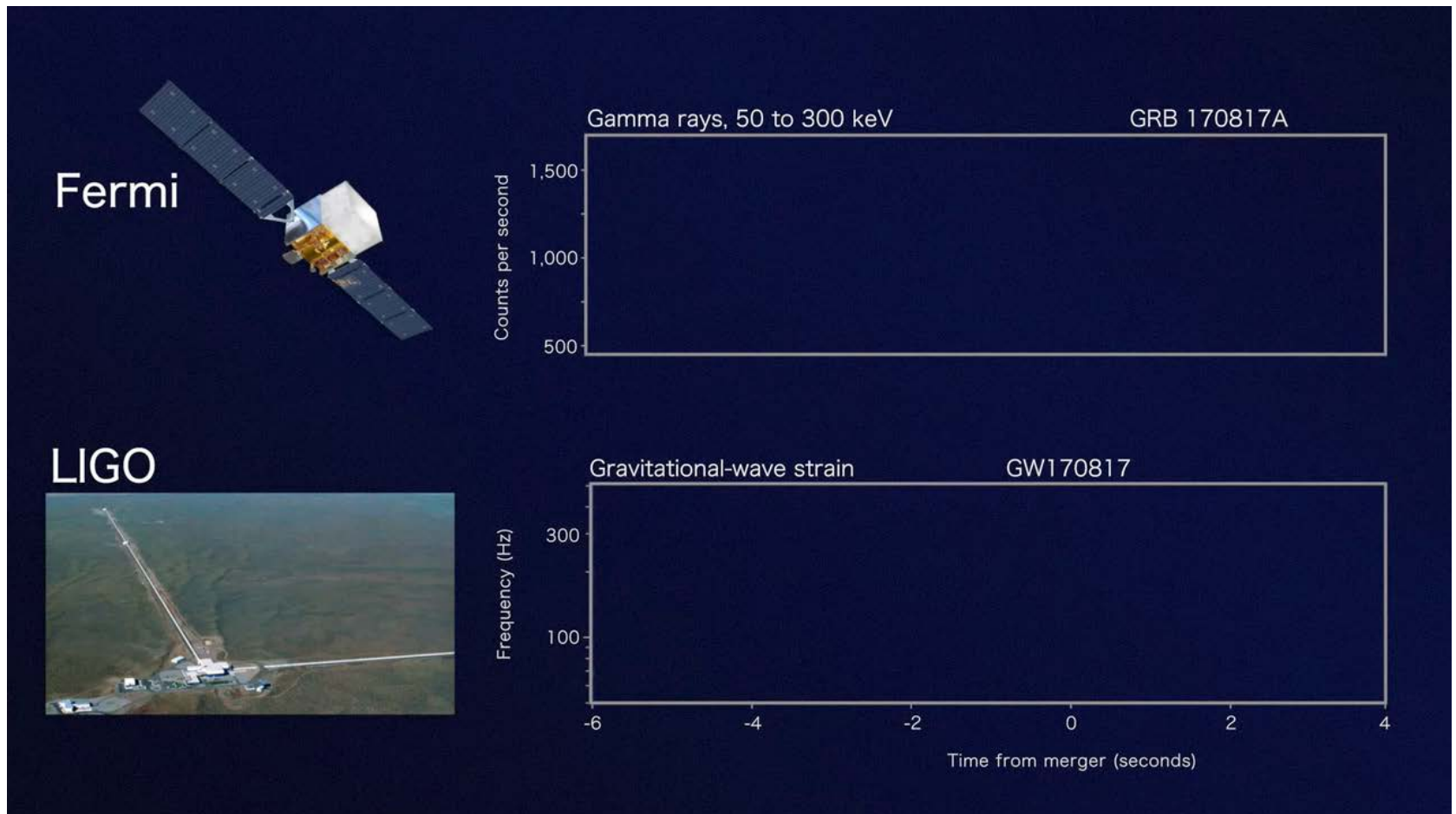
**17-18 août 2017 :  
12 heures extraordinaires**

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



# Jeudi 17 août 2017, 14h41 heure de Paris

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



# Plus tard le même jour ...

• 19h55

→ Localisation LIGO-Virgo

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



Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer



LIGO Hanford



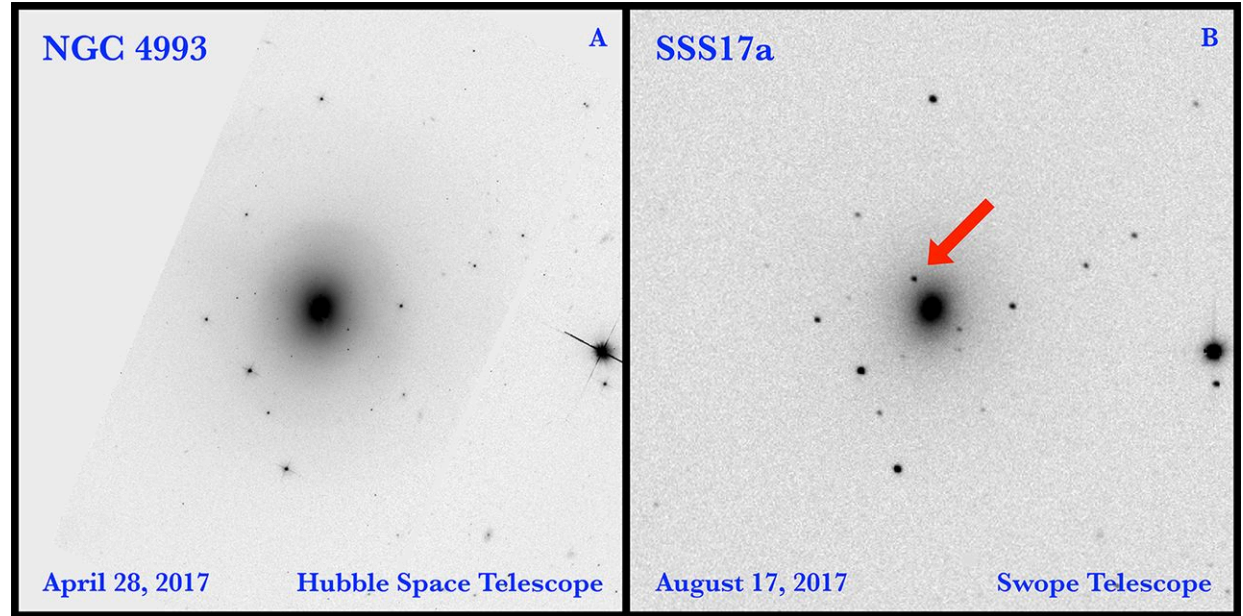
Virgo



LIGO Livingston

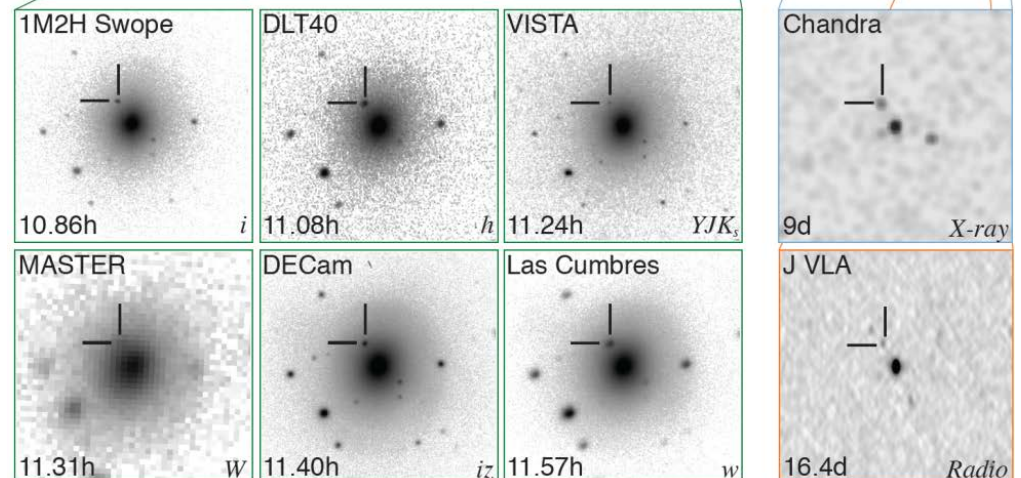
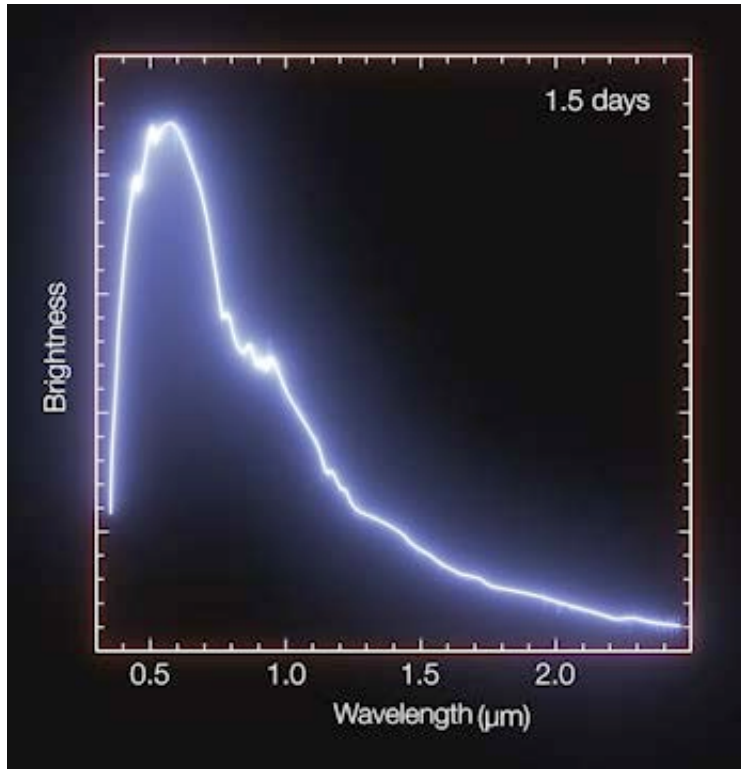
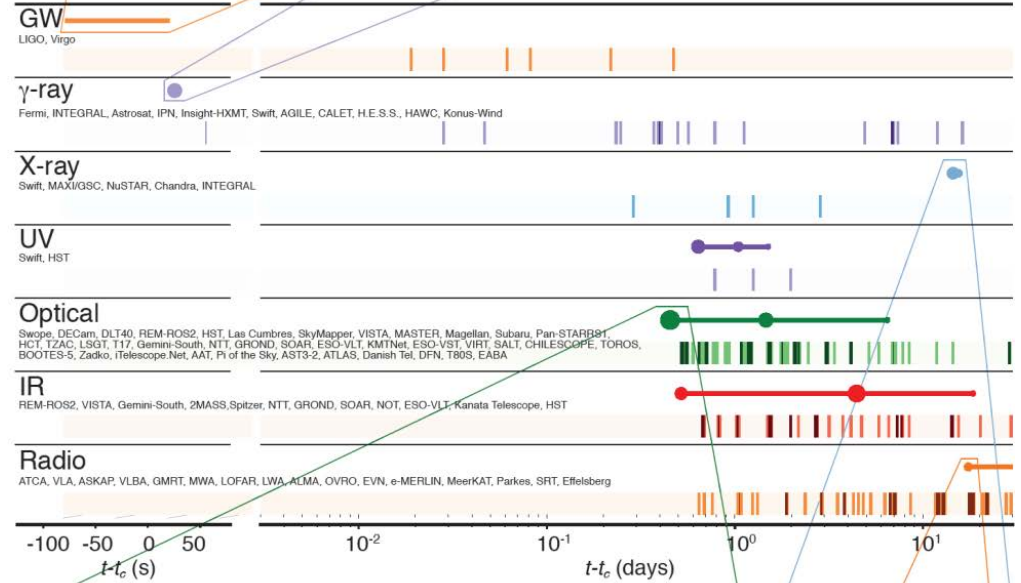
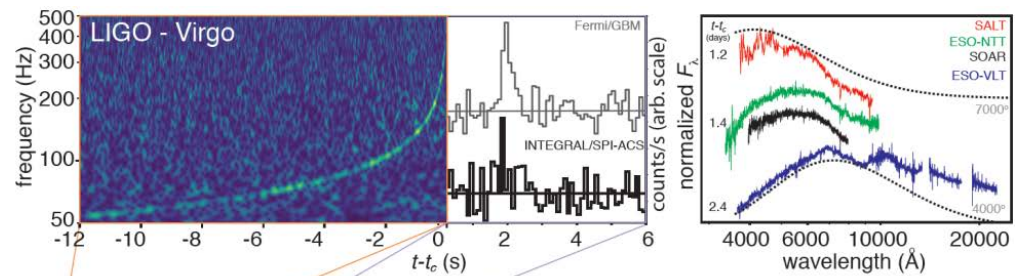
# La nuit suivante ...

- 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



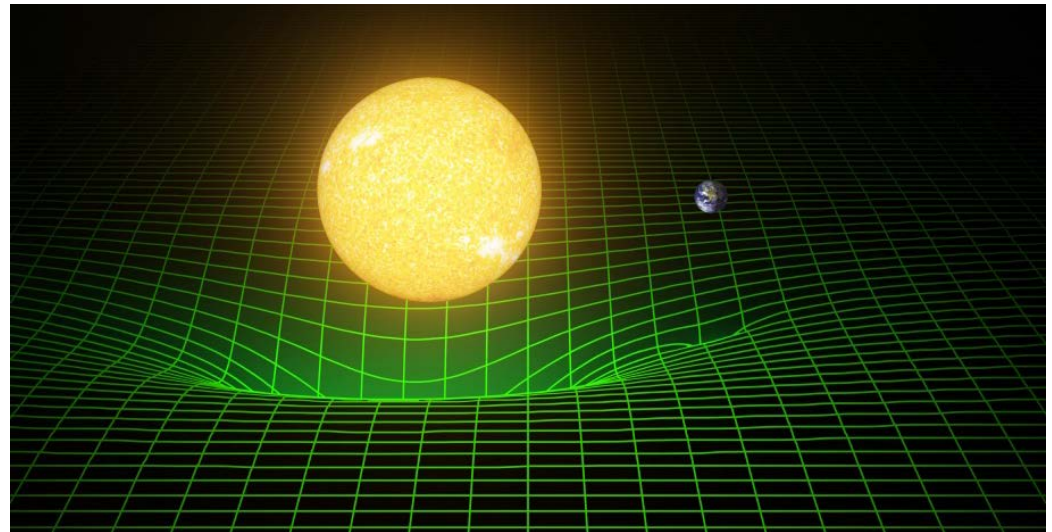
# Détecter les ondes gravitationnelles

*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*



# 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)

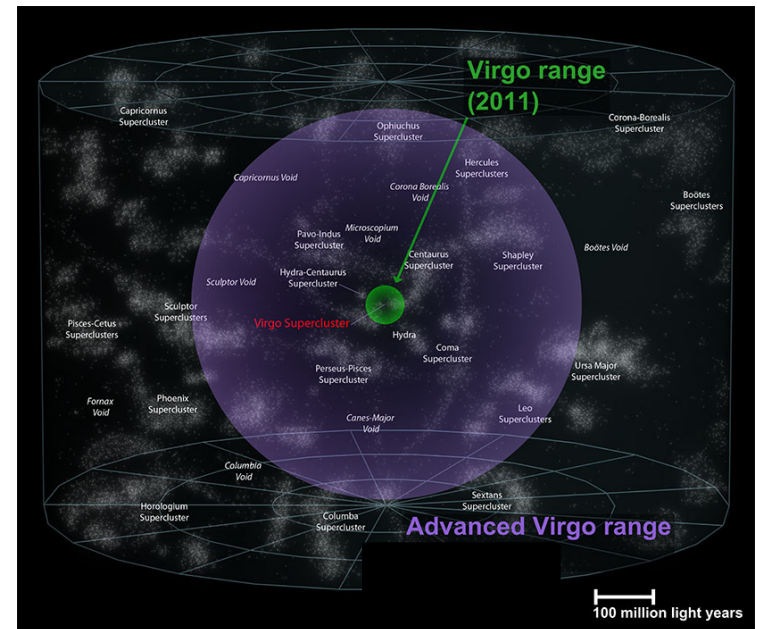
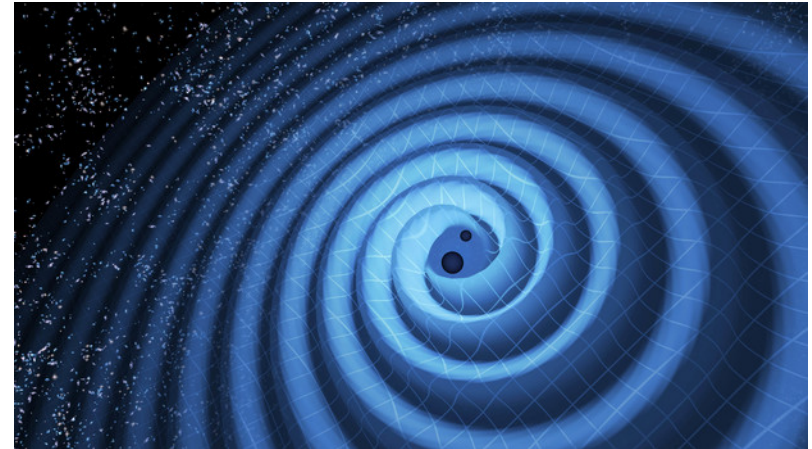


Gravitation ↔ Courbure de l'espace-temps  
Courbure de l'espace temps ↔ Densité d'énergie

- **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**

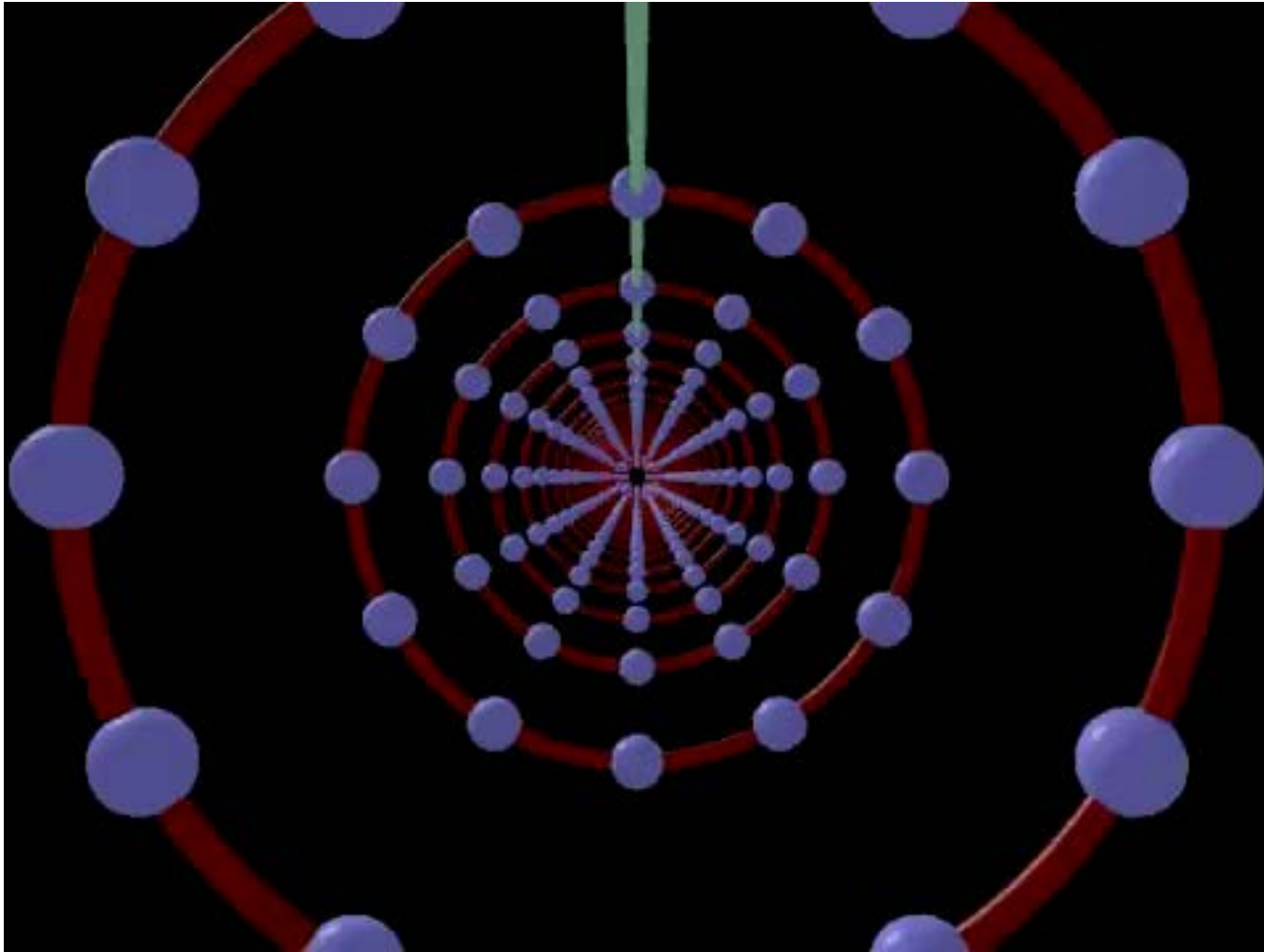
# Les ondes gravitationnelles

- 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



# Sources d'ondes gravitationnelles

- **Formule du quadrupôle d'Einstein** (1916)
  - Puissance rayonnée sous forme d'ondes gravitationnelles
  - Compacité  $C \leq 1$  (=1 : trou noir)
  - Vitesse caractéristique  $v$
  - Facteur d'asymétrie  $a$

$$P \sim \left( \frac{c^5}{G} \right) a^2 C^2 \left( \frac{v}{c} \right)^6$$

Facteur très grand :  $10^{53}$  W

© Joe Weber, 1974

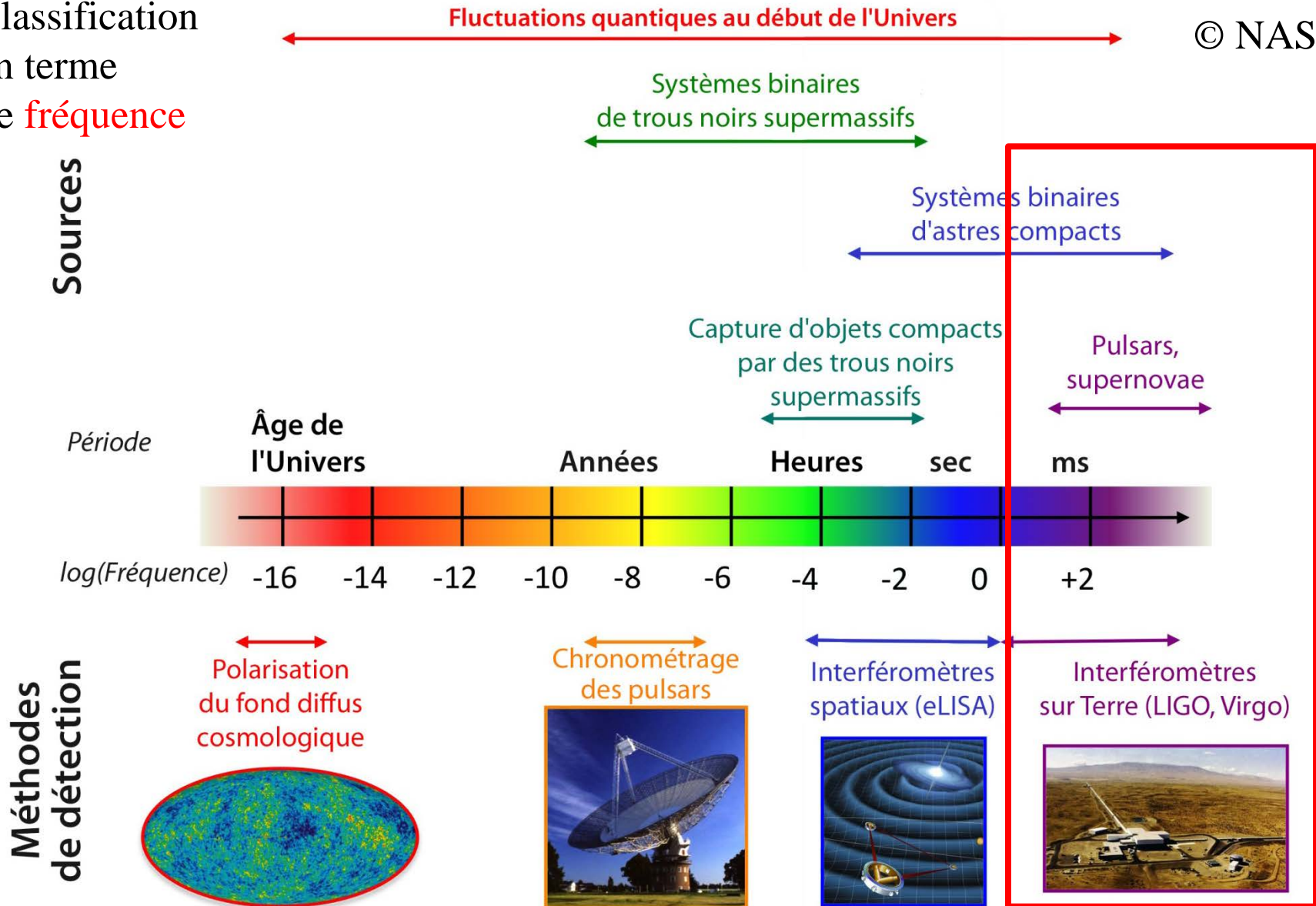
→ Une bonne source d'OGs doit donc être :

- **Asymétrique**
  - Aussi **compacte** que possible
  - **Relativiste**
- Impossibilité de réaliser une expérience de Hertz !
    - Bien que toute masse accélérée émette des OGs, aucune source terrestre n'est assez puissante pour produire un signal détectable
    - Sources d'origine astrophysique (typiquement :  $h \sim 10^{-22} \div 10^{-21}$ )

# Le spectre des ondes gravitationnelles

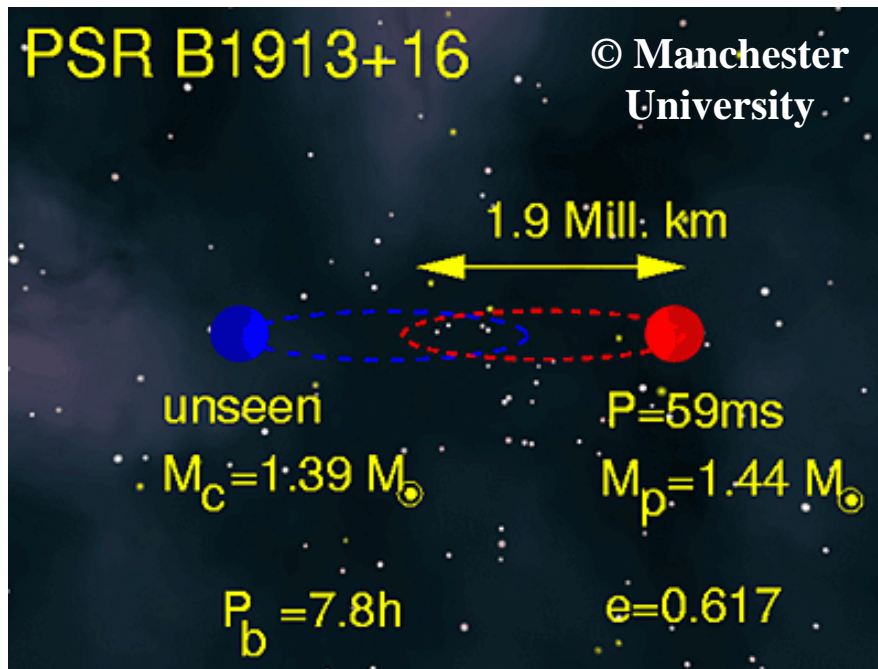
- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



# PSR B1913+16

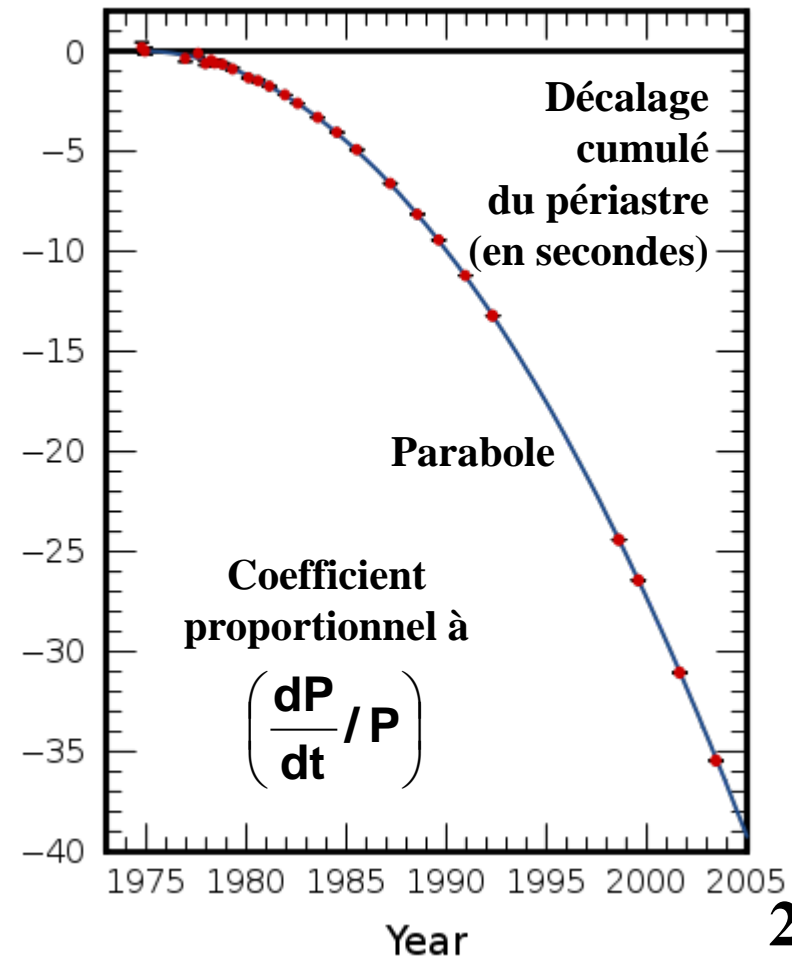
© Manchester University



- 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



# Trous noirs ?

- **Rappel : vitesse de libération**

- Croit comme  $\sqrt{M}$

- Plus le corps est massif, plus son attraction est forte

- Décroit comme  $1/\sqrt{r}$

- Plus on est loin de ce corps et moins on sent son attraction

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

- **Vitesse limite : vitesse de la lumière dans le vide**

- Théorie de la relativité restreinte (Einstein, 1905)

- $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

- **Peut-on avoir  $v_{\text{lib}} = c$  ?**

- **Oui :  $M$  très grand et/ou  $r$  très petit**

- Possibilité explorée dès le 18<sup>e</sup> siècle

- Mitchell (1783)

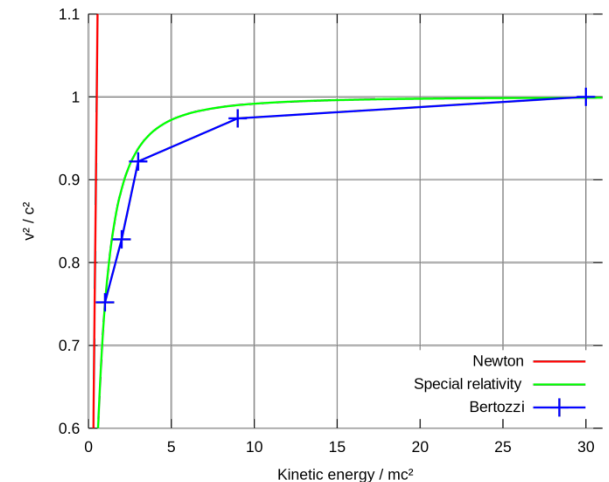
- de Laplace (1796)

} Théorie corpusculaire  
de la lumière

- **De tels astres, s'ils existent, ont un champ gravitationnel si fort que même la lumière ne peut pas s'en échapper !**

- **XIX<sup>e</sup> siècle : lumière  $\Leftrightarrow$  onde**

- Problème mis de côté jusqu'à la théorie de la relativité générale (1915)



# Rayon de Schwarzschild

- **Rayon de Schwarzschild  $R_s$**  (1916)
  - On part de  $v_{\text{lib}} = c$  et on en déduit  $R_s(M)$

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \text{ km} \left( \frac{M}{M_{\text{Soleil}}} \right)$$

- **Très petit pour les corps célestes « habituels »**
  - Planètes, étoiles

- **Compacité**

$$C = \frac{R_s}{\text{rayon}} \leq 1$$

Objet	Terre	Soleil	Naine blanche	Etoile à neutrons	Trou noir
Compacité	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$10^{-4}$	0.3	1

- **Attention : « compact » et « dense » sont deux choses différentes**
  - « Densité » d'un trou noir

$$\rho = \frac{\text{"Masse"}}{\text{"Volume"}} \approx 1,8 \times 10^{16} \text{ g/cm}^3 \left( \frac{M_{\text{Soleil}}}{M} \right)^2$$

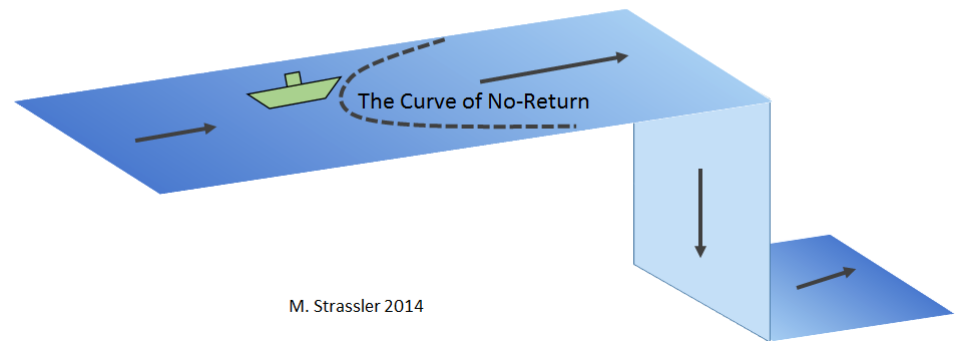
Densité nucléaire :  
 $\sim 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$



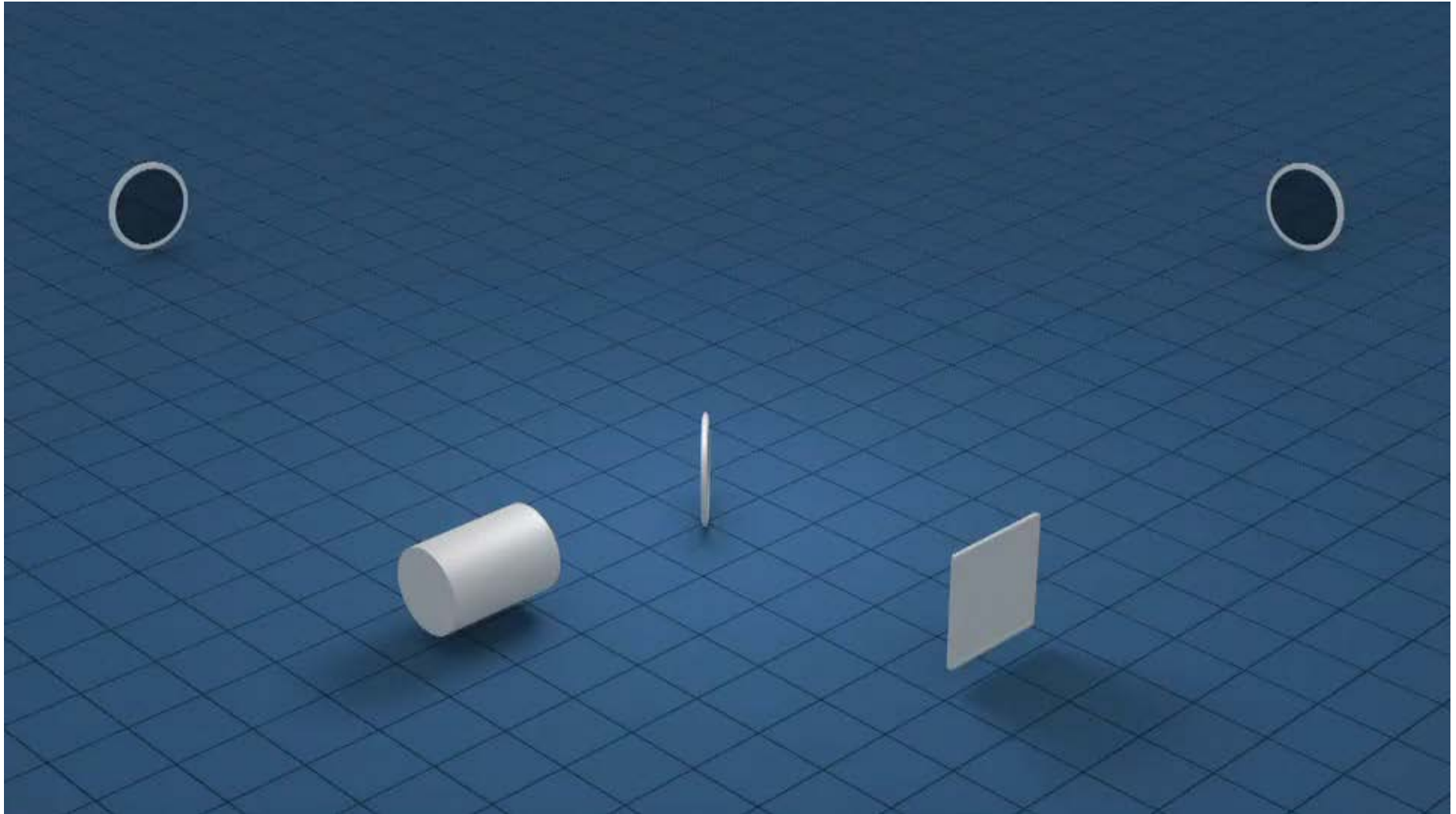
# Trous noirs

- Une région de l'espace-temps dans laquelle la gravitation est si forte que rien, pas même la lumière, ne peut ressortir de son horizon
- Formés par l'effondrement d'étoiles massives à cours de combustible nucléaire
- Peut grossir en accréant de la matière
  - On pense que la plupart des galaxies abritent un trou noir supermassif en leur centre  
→ Exemple : **Sagittarius A\*** au cœur de la Voie Lactée
- **Caractérisés par trois nombres** (Kerr, 1963)
  - Masse
  - Moment angulaire (« spin »)
  - Charge électrique
- **Horizon du trou noir**
  - Pas de retour en arrière possible une fois traversé !
  - Peut seulement grandir

A Person In a Boat that Crosses the Curve of No-Return Will Notice Nothing at the Time, But is Doomed To Go Over The Waterfall



# Principe de fonctionnement

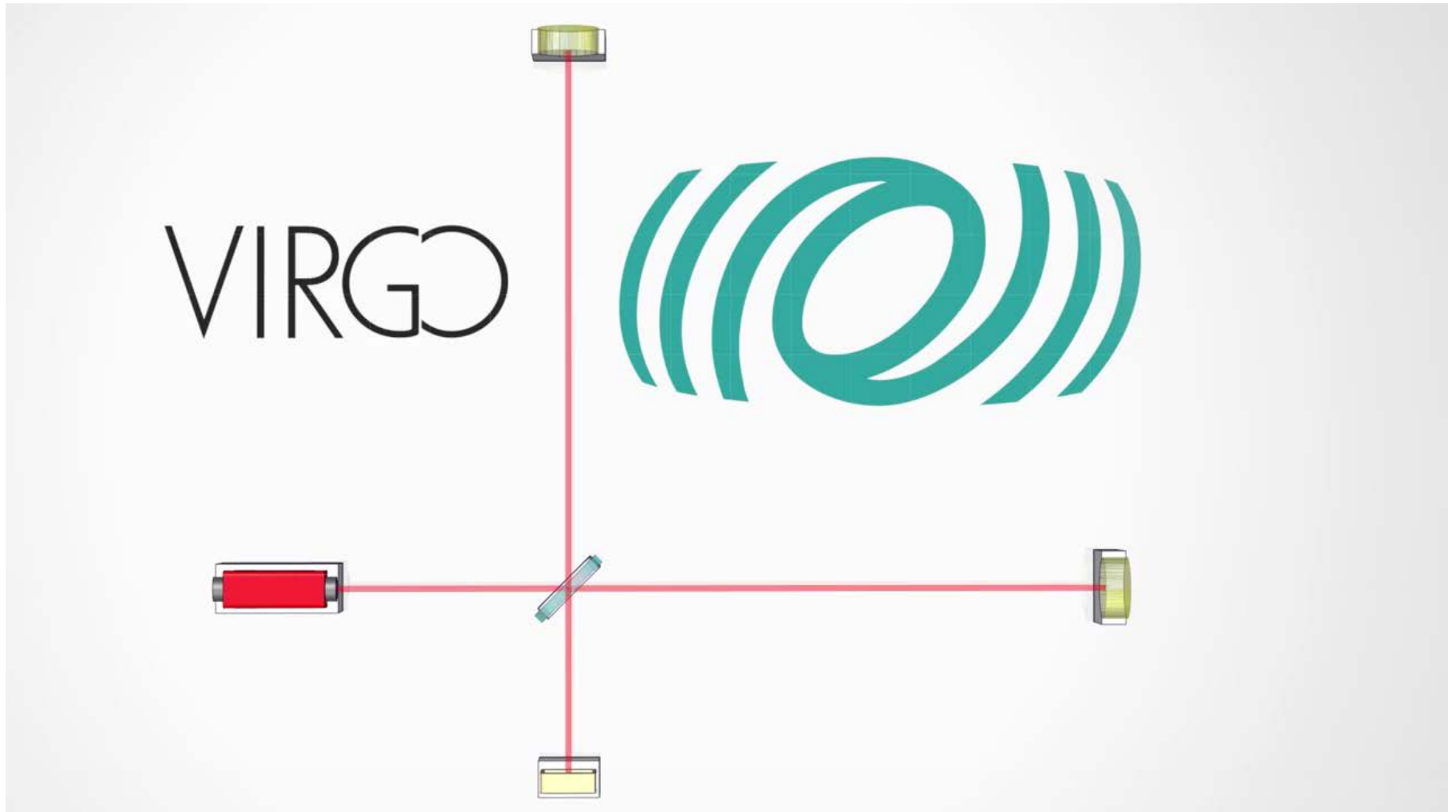


$$\underbrace{\text{Sensibilité}}_{\infty} \propto \frac{1}{(\text{longueur des bras}) \times \sqrt{\text{puissance laser}}}$$

Valeurs très petites

# Un détecteur réel : Virgo avancé

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



# Un réseau de détecteurs

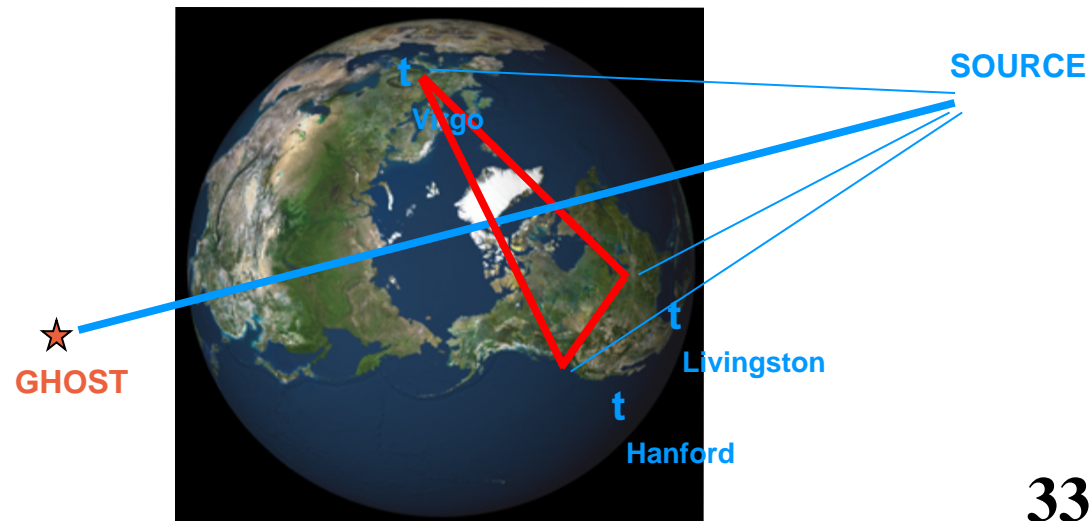
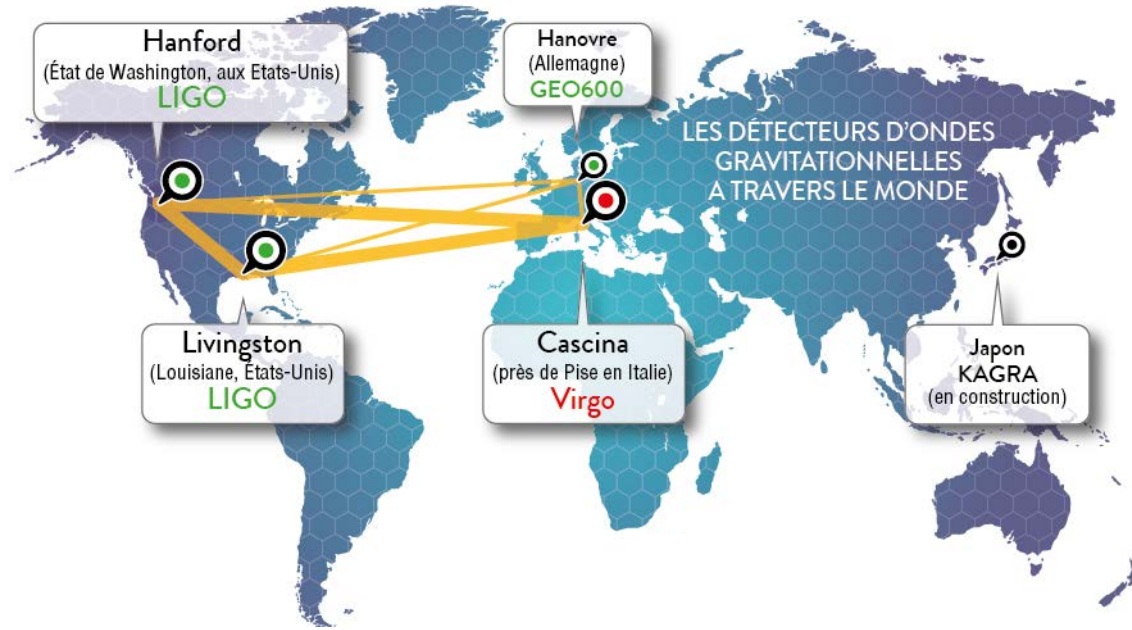


# Un réseau de détecteurs

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

→ Solution : utiliser un réseau d'interféromètres

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

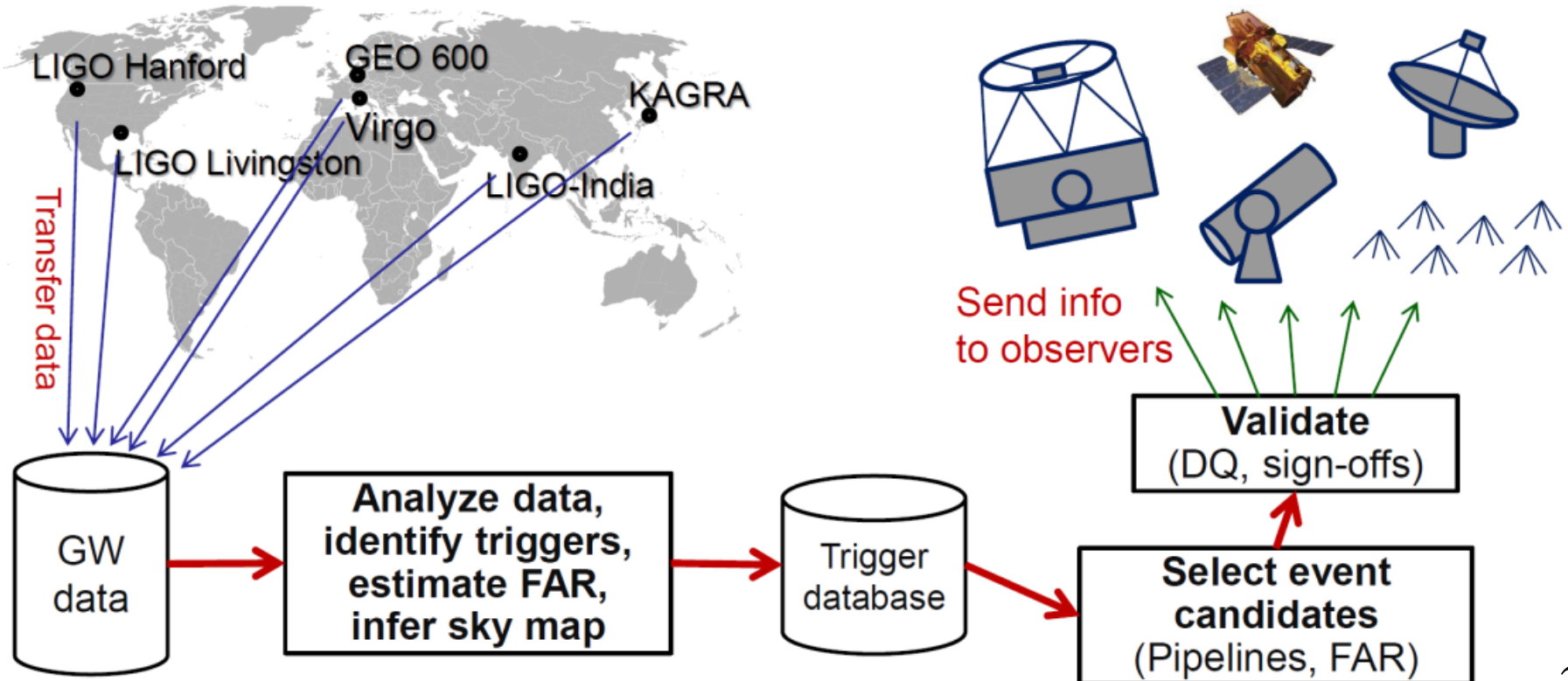


# Réseau : deux puis trois détecteurs

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

(\*) 6 détections publiées au 18 décembre 2017.



# 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 !**

# Protocole

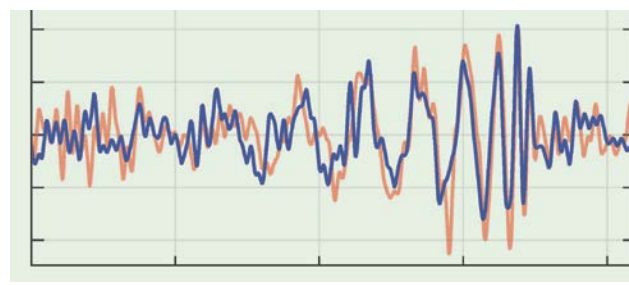
- Identification en temps (quasi-)réel d'un candidat « prometteur »
  - Programmes informatiques automatisés
  - Envoi d'une alerte interne LIGO-Virgo : téléphone, SMS, e-mail
- Examen de l'alerte par une équipe de scientifiques
  - Validation (ou rejet) du candidat
- Alerte envoyée aux télescopes partenaires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

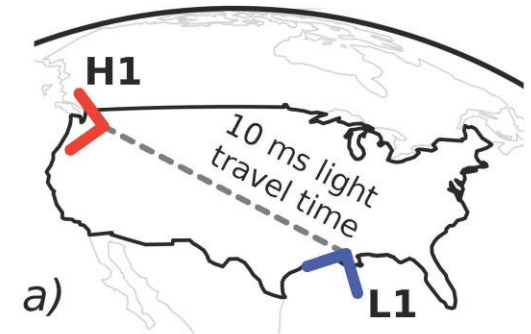
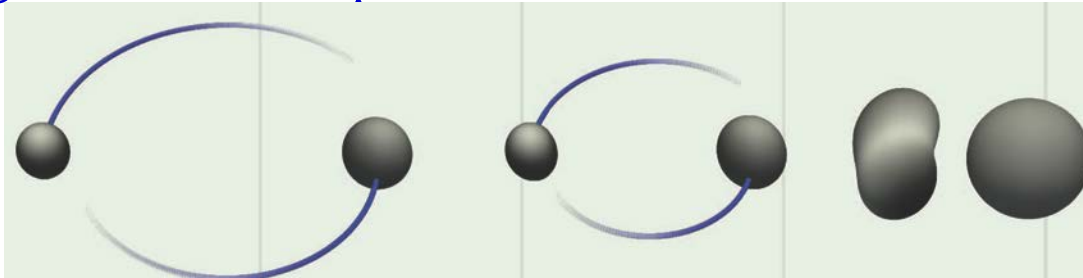
- **Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle**

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

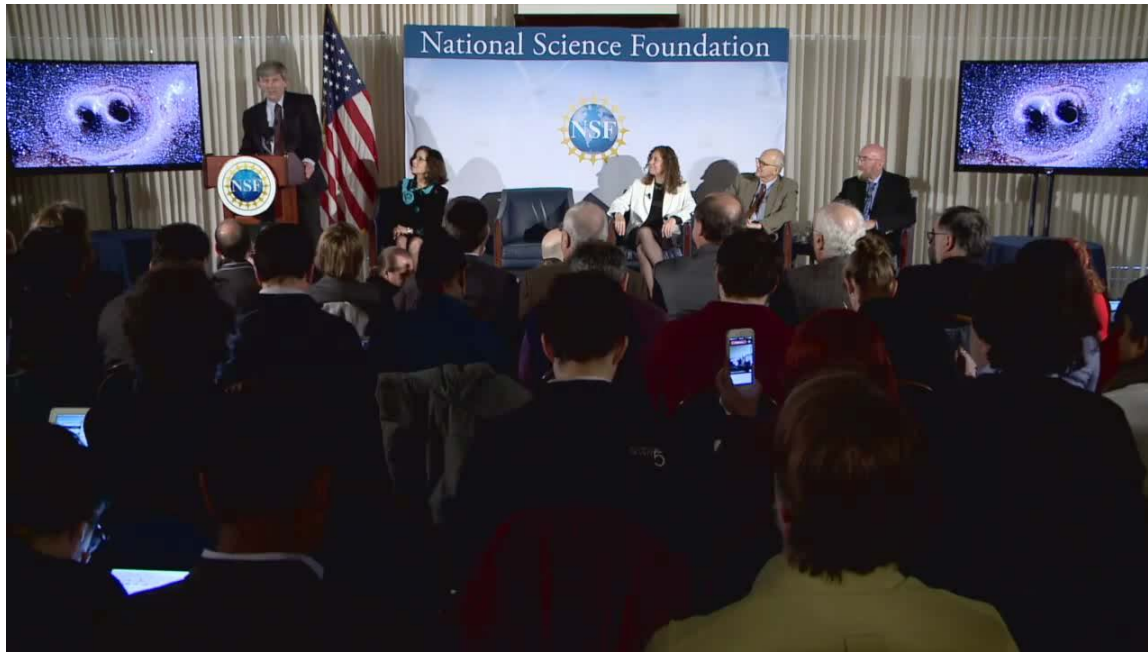


Evénement baptisé **GW150914**

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



# 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>

# Et entre ces deux dates ?

- 5 mois d'analyses poussées auxquelles ont participé des centaines de scientifiques
  - Des réponses précises à apporter à de nombreuses questions
  - Tout en gardant secrète la découverte potentielle
    - Chaque vérification aurait pu l'invalider complètement
- L'événement a-t-il une origine « naturelle » ?
  - Pas un signal simulé artificiellement ni ... un piratage des observatoires LIGO !
  - Pas dû à une perturbation de l'environnement
- Les deux détecteurs fonctionnaient-ils normalement ?
  - Qualité et précision des mesures
  - Configuration des détecteurs « gelée » pendant plusieurs semaines
    - Pour accumuler suffisamment de données représentatives et, ainsi, quantifier la « réalité » du signal – vient-il vraiment du cosmos ?
- Quels résultats scientifiques déduire de cet unique événement (pour le moment) ?
- Ecriture de l'article annonçant la découverte et des articles détaillés associés
  - Découverte annoncée seulement après acceptation de cet article par PRL

# Que s'est-il passé juste après GW150914 ?

- 14/09 2015, 11h51 : **événement enregistré** à Livingston, puis 7 ms plus tard à Hanford
- 3 minutes plus tard : **événement repéré**, messages automatiques envoyés
  - Suivi temps réel important pour la recherche éventuelle de contreparties
- 1 heure plus tard : **premiers échanges d'e-mails** dans les collaborations LIGO et Virgo

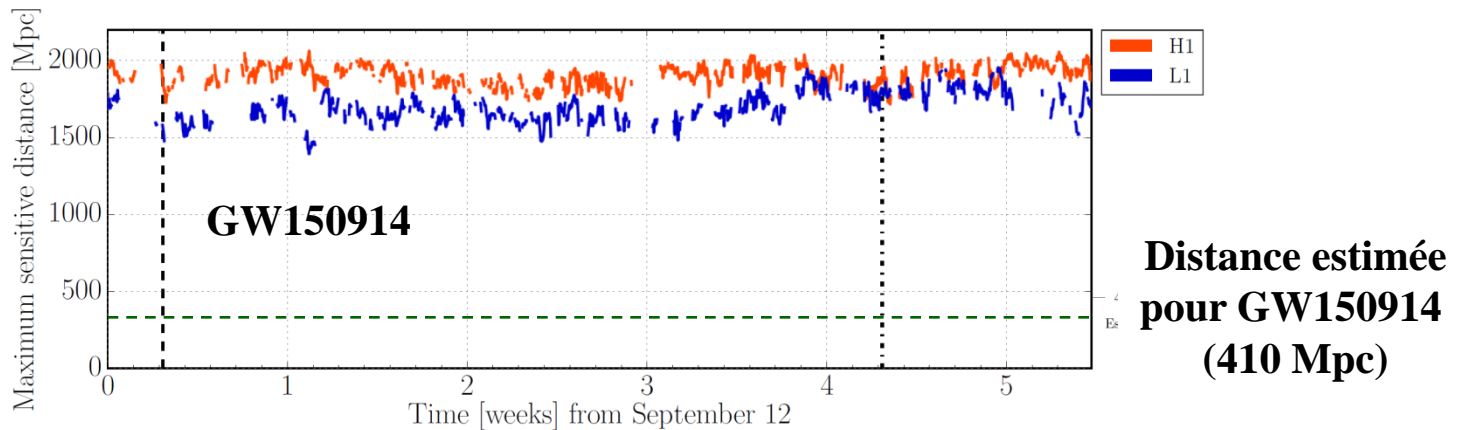
From Marco Drago★  
Subject [CBC] Very interesting event on ER8

Hi all,  
cWB has put on gracedb a very interesting event in the last hour.  
<https://gracedb.ligo.org/events/view/G184098>

- 20 minutes plus tard : **pas de signal artificiel injecté**
  - Confirmation officielle à 17h59 le même jour
- 10 minutes plus tard : une **possible fusion de deux trous noirs**
- 25 minutes plus tard : **qualité des données bonne** a priori
- 15 minutes plus tard : **premières estimations des paramètres du signal**
  - Taux de fausses alarmes  $< 1 / 300$  ans : **un événement significatif !**
- 2 jours plus tard (16/09, 14h39) : alerte envoyée aux télescopes partenaires

# La qualité des données

- Peu après que GW150914 a été identifié comme un événement prometteur, il a été décidé de « figer » le détecteur pour accumuler des données dans cette configuration
- ~40 jours (jusqu'à fin octobre) correspondant à 16 jours de données en coïncidence  
→ Performances constantes sur cette période

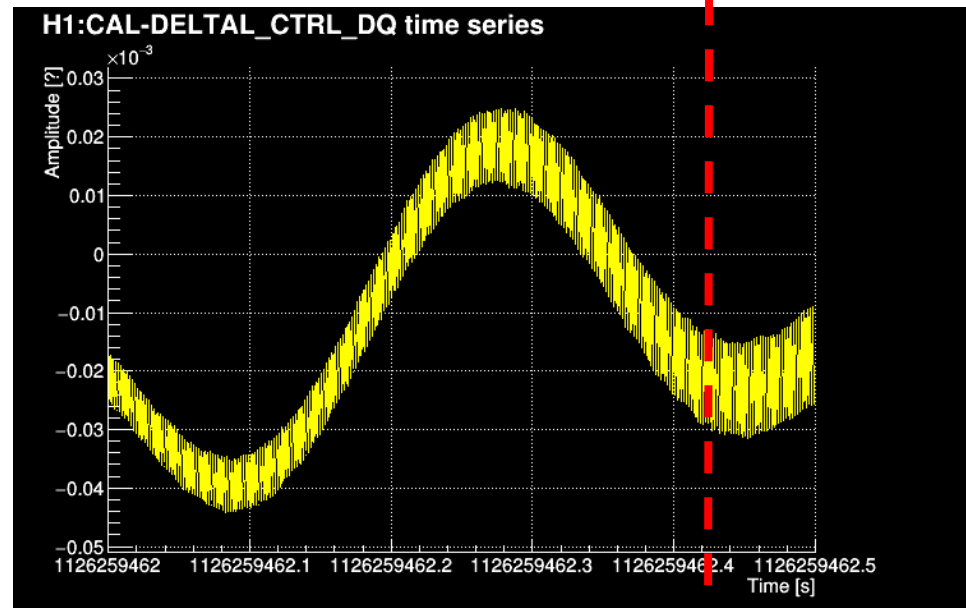
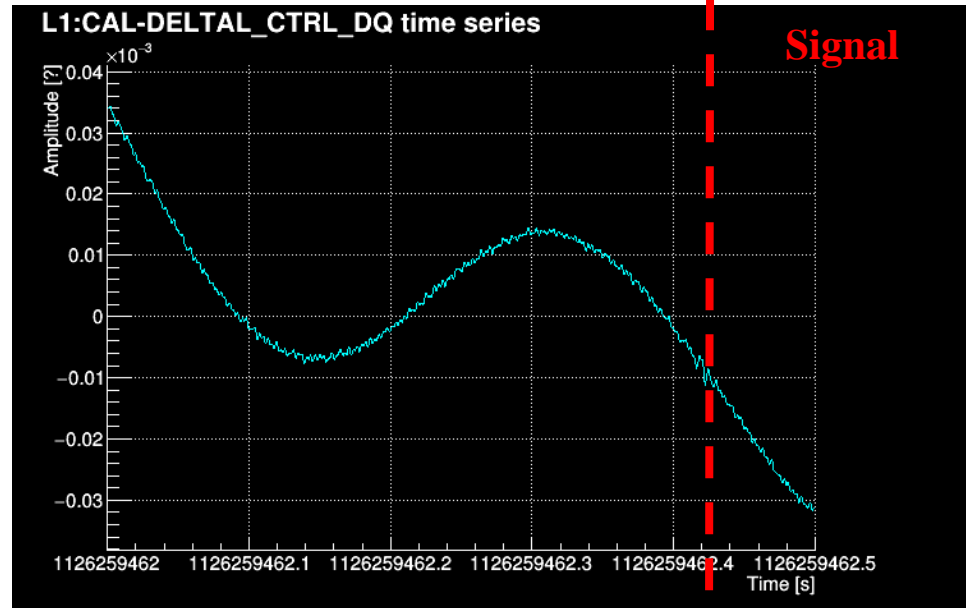


- Des milliers de senseurs surveillent l'état de l'ITF ainsi que l'environnement
  - Identification de couplages avec le canal « ondes gravitationnelles »  $h(t)$ 
    - Estime l'amplitude de la perturbation pour produire un signal comme GW150914
    - Sans oublier la forme très particulière de ce signal
  - Etudes très détaillées – à la fois pour les bruits corrélés et non-corrélés (entre ITFs)
    - Identification (et rejet) des périodes où la qualité des données est mauvaise
- Conclusion claire : rien à signaler de ce côté, tout est normal !



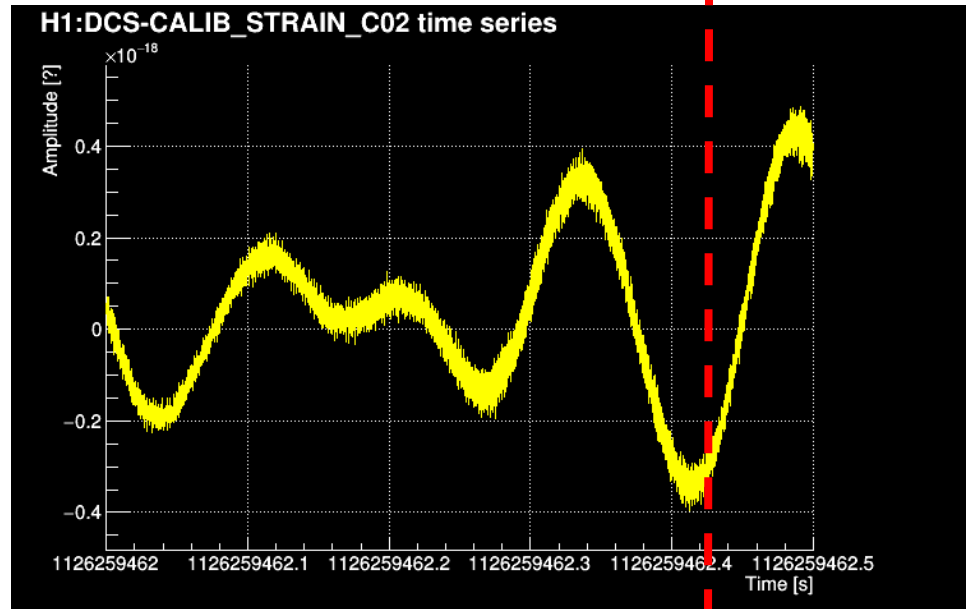
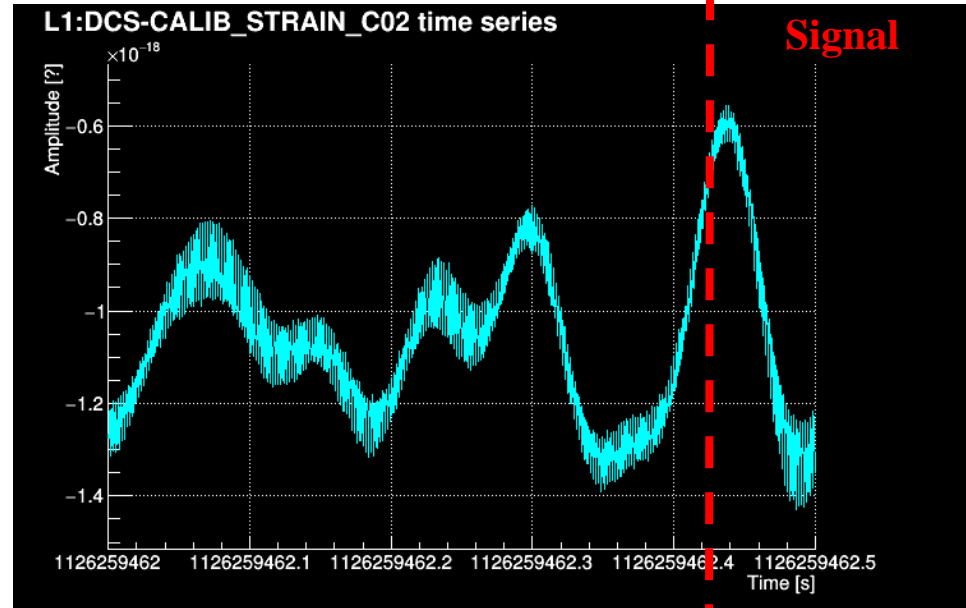
# GW150914: puissance brute

- **Bleu** : aLIGO Livingston
- **Jaune** : aLIGO Hanford



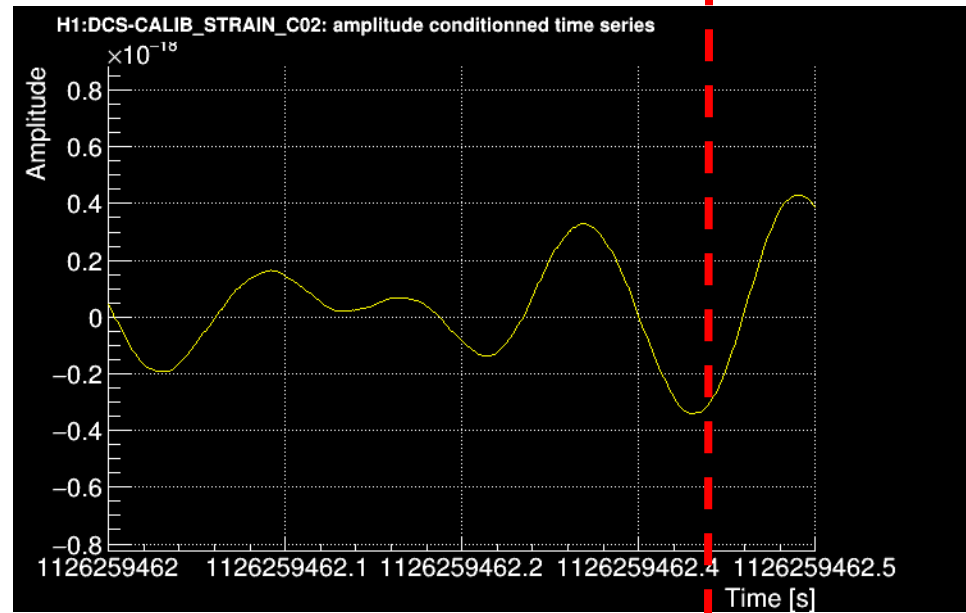
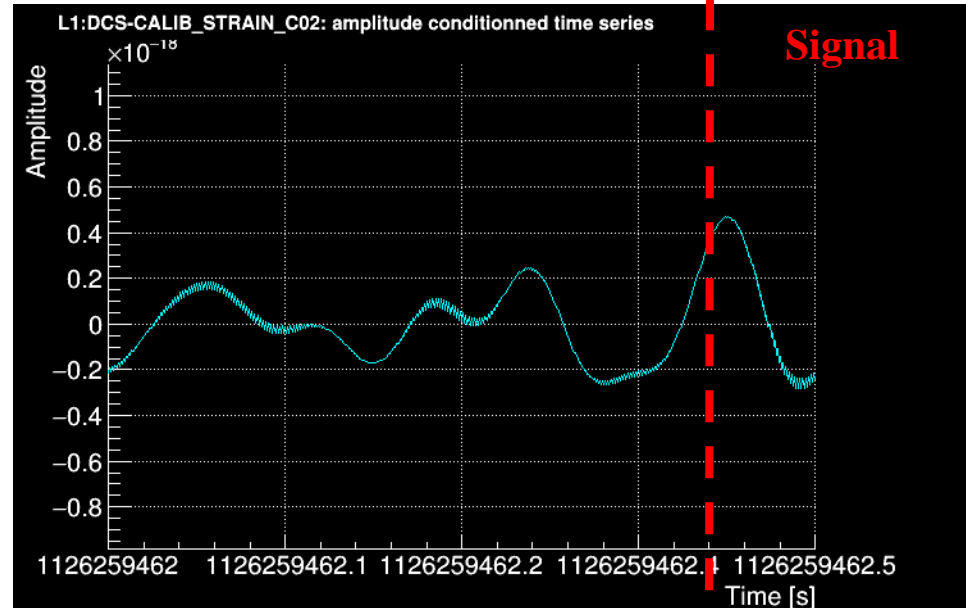
# GW150914: canal h(t) calibré

- On utilise les signaux de contrôle de l'interféromètre pour obtenir le « canal gravitationnel »



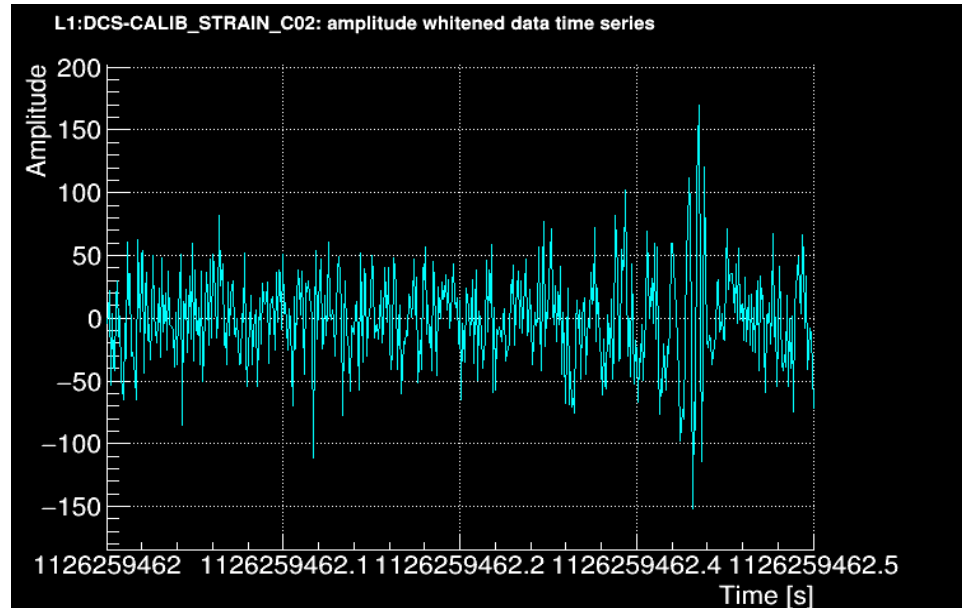
# GW150914: filtrage passe-bande

- 20 Hz  $\rightarrow$  500 Hz

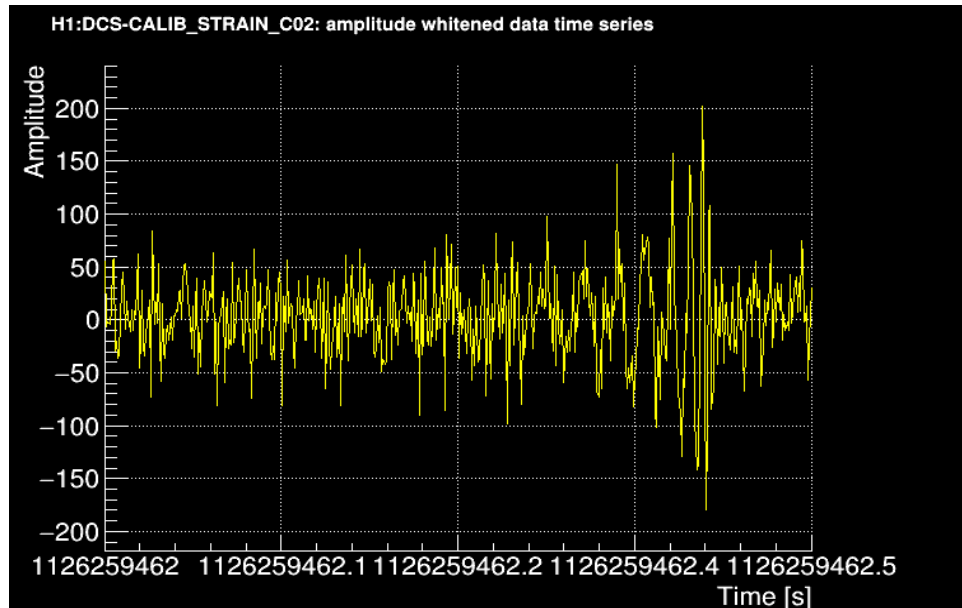


# GW150914: données « blanchies »

- Données pondérées dans l'espace des fréquences par le niveau de bruit attendu → Les données « blanchies » (par opposition au bruit « coloré ») ont une densité spectrale plate (indépendante de la fréquence)

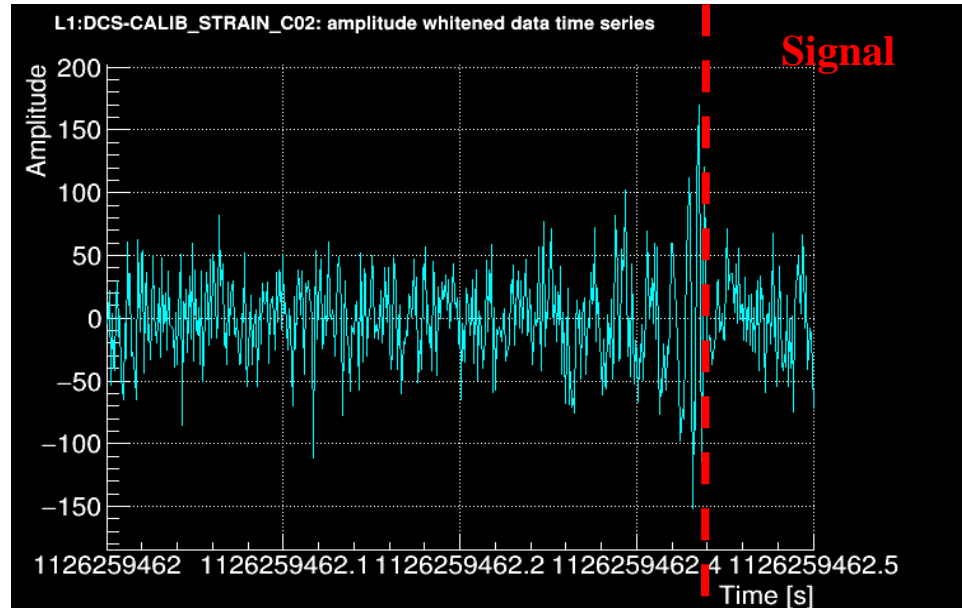


- $\pm 20$  nW pic-pic en sortie de l'interféromètre
- A comparer avec la puissance incidente sur la lame séparatrice :  $\sim 500$  W

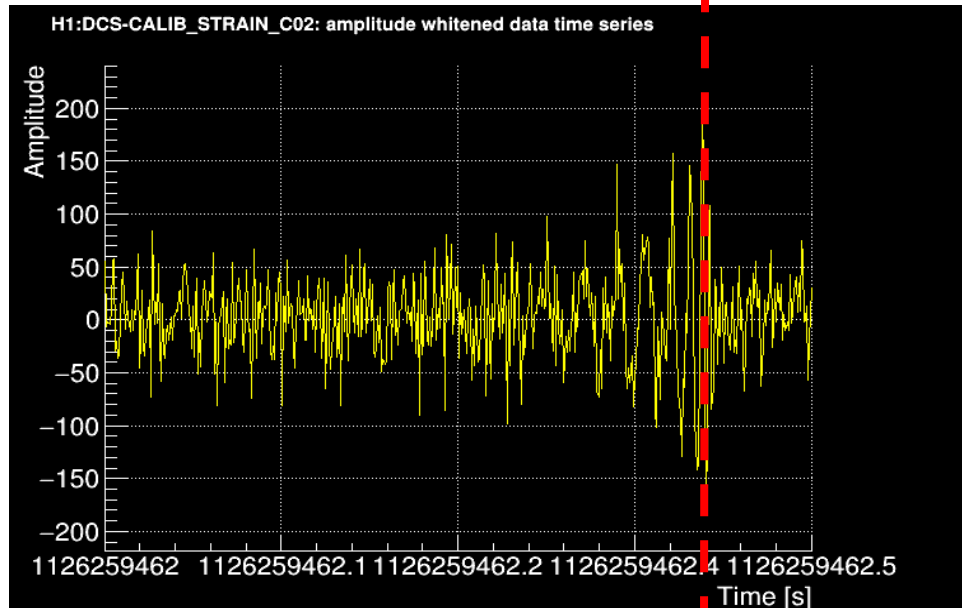


# GW150914: données « blanches »

- Données pondérées dans l'espace des fréquences par le niveau de bruit attendu → Les données « blanches » (par opposition au bruit « coloré ») ont une densité spectrale plate (indépendante de la fréquence)



- $\pm 20$  nW pic-pic en sortie de l'interféromètre
- A comparer avec la puissance incidente sur la lame séparatrice :  $\sim 500$  W



# Estimation du « bruit de fond »

- GW150914 n'est donc pas dû à un problème au niveau de l'interféromètre, ni à une perturbation de l'environnement (corrélée ou pas entre les ITFs)
  - Peut-il être dû à des fluctuations « normales » du bruit de mesure ?
    - Utilisation d'outils mathématiques pour répondre à cette question

- (Seulement) 16 jours de données en coïncidence

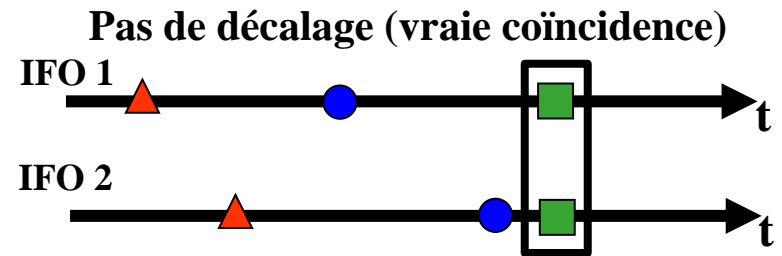
→ Méthode des « décalages temporels » pour générer un lot de données plus conséquent

- Comment ? Rappel : pour une vraie OG, les signaux sont décalés de 10 ms au plus entre les deux ITFs

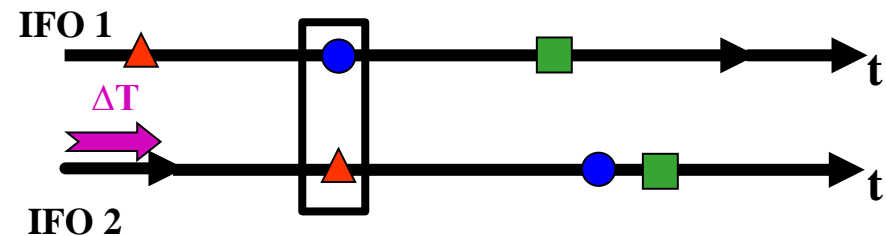
- Trajet de la lumière sur 3000 km

- En décalant les données d'un ITF d'un temps (bien) plus long, on obtient un nouveau jeu de données dans lequel les coïncidences sont dues au bruit

- 16 jours de données en coïncidence → des milliers d'années de « données » dites de bruit de fond

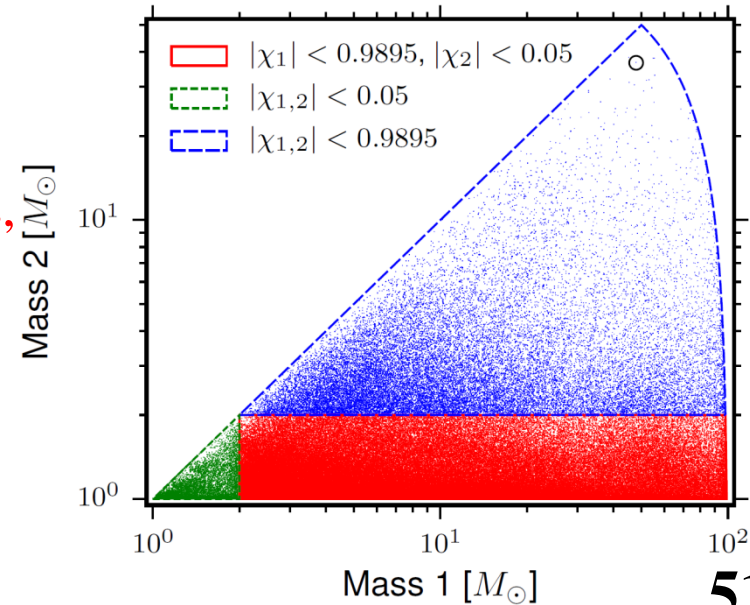
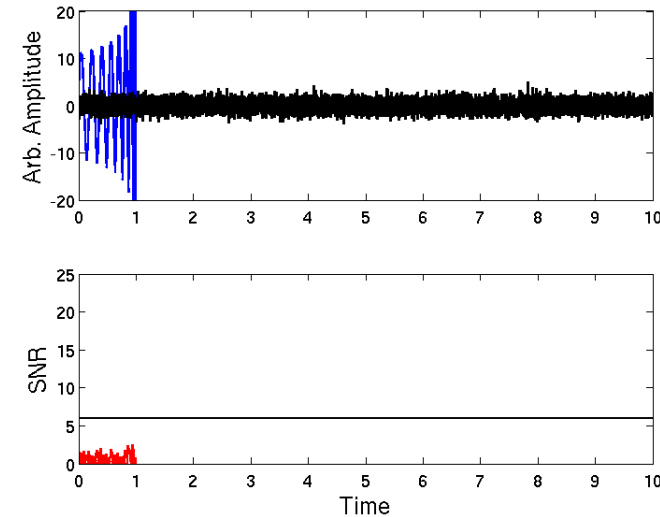


Décalage temporel (coïncidence accidentelle)



# 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 »**



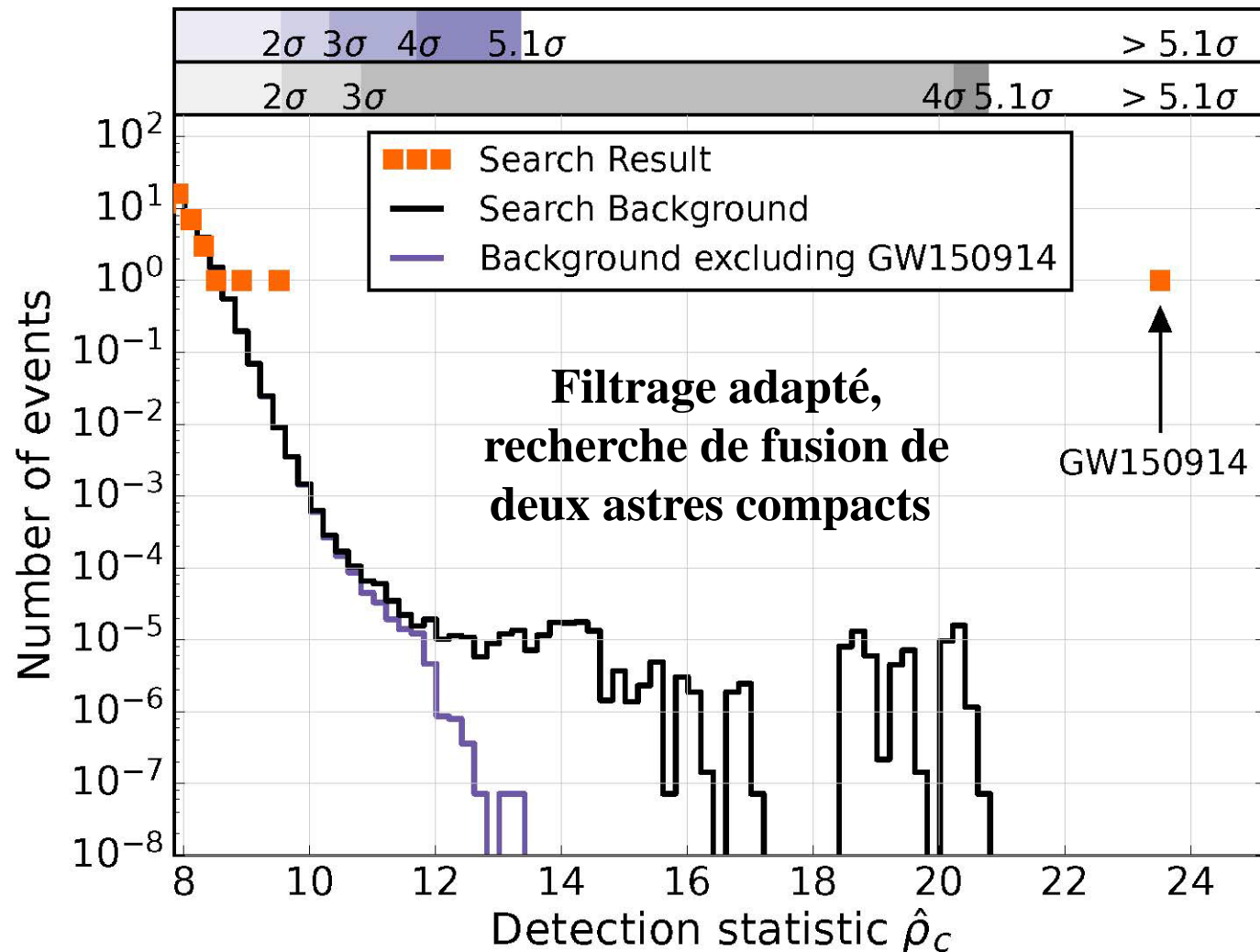
# Mesurer la « réalité » du signal

- Axe des x : quantité utilisée pour classer les événements

- Plus cette valeur est grande et plus l'événement est significatif

- GW150914 : l'événement le plus fort dans les deux ITFs

- Nombre d'événements observés



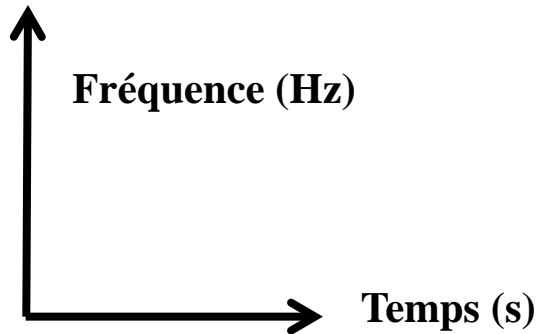
- Lignes continues : 2 estimations du bruit de fond

- SNR  $\sim 23.6$ ; taux de fausse alarme  $< 1$  événement / 203 000 ans  
Probabilité de fausse alarme  $< 2 \times 10^{-7}$  ( $> 5,1 \sigma$ )

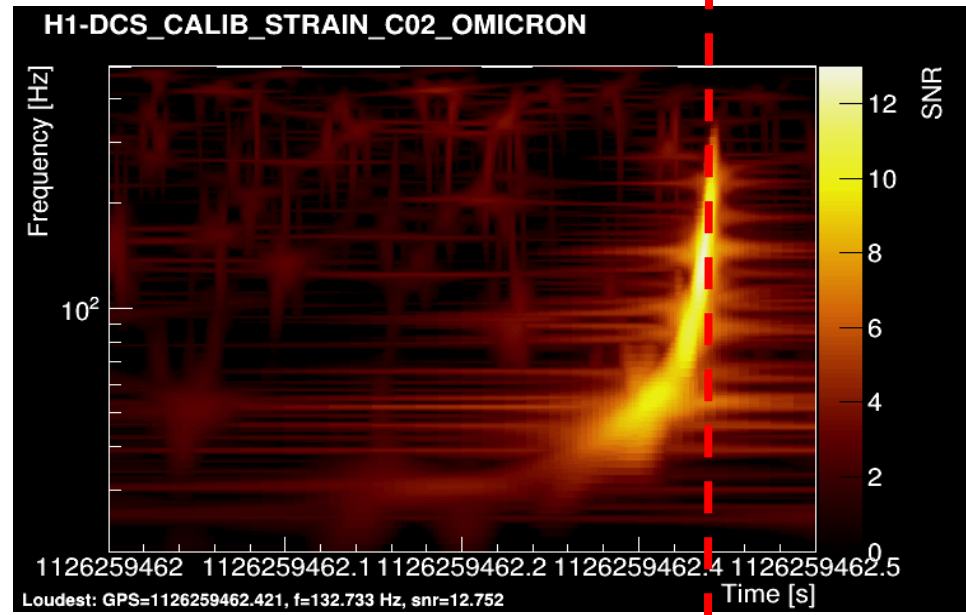
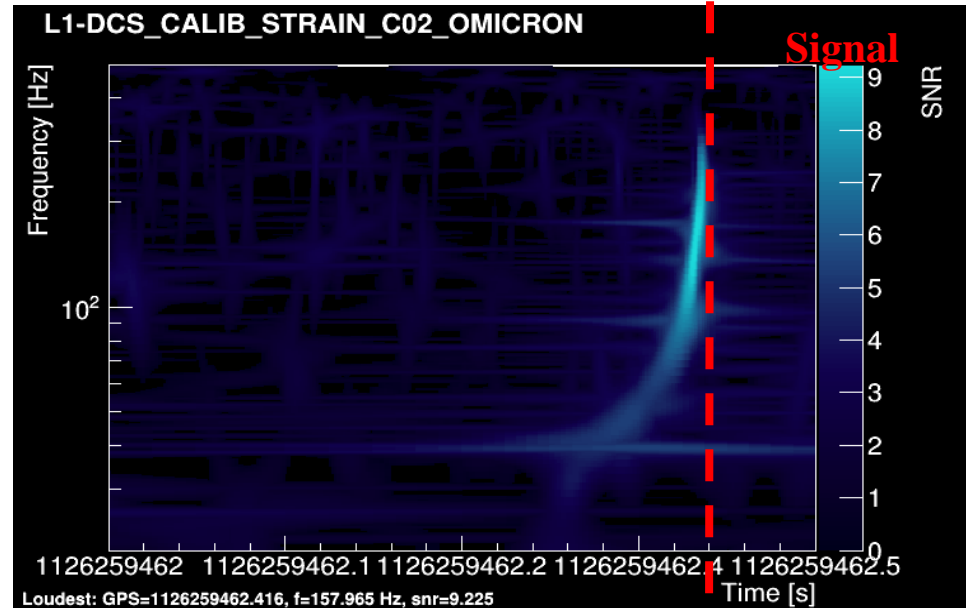


# GW150914: spectrogrammes

- Cartes temps-fréquence

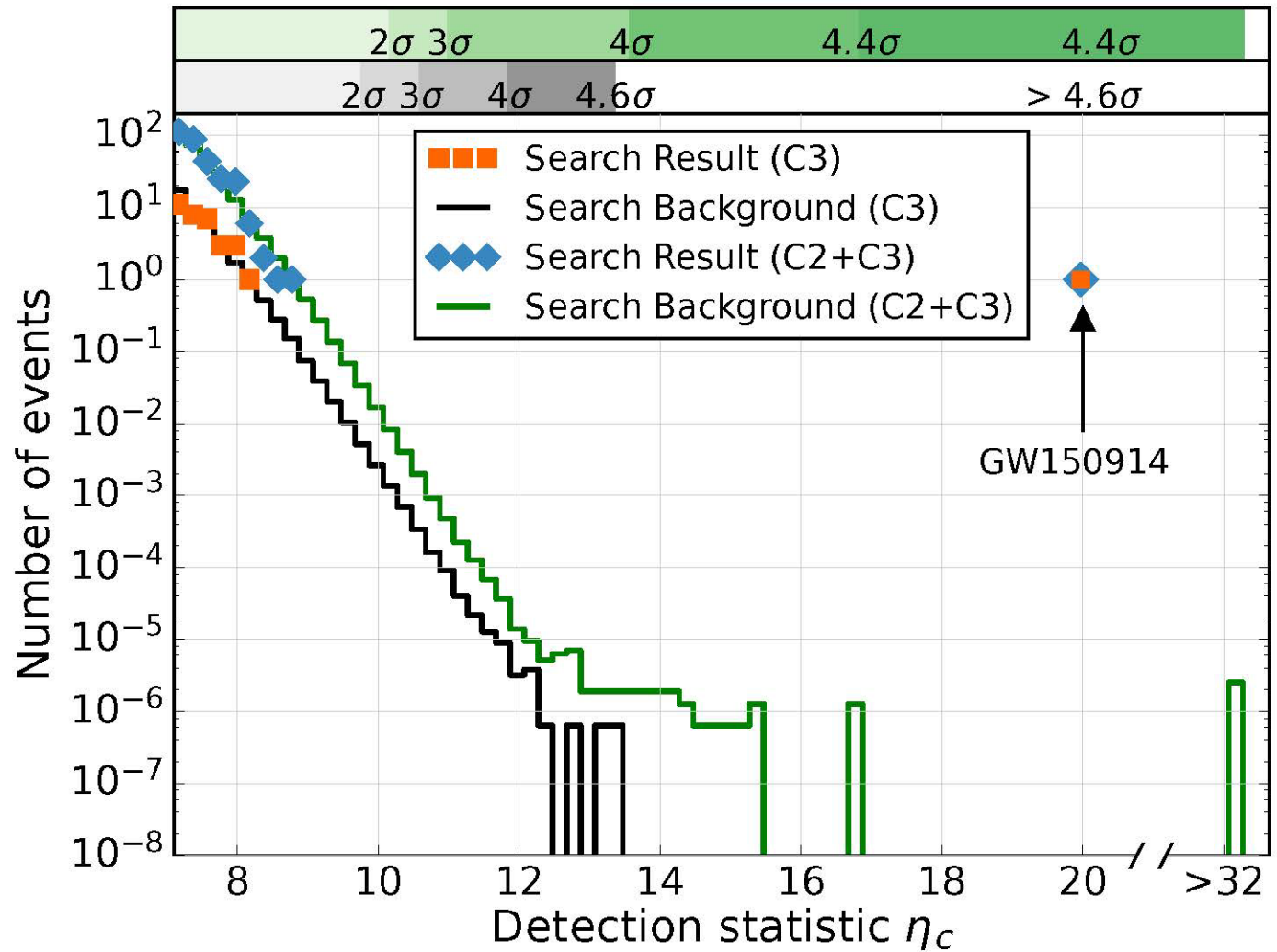


- Recherche d'excès d'énergie par rapport au bruit
  - Utilisation d'ondelettes
- L'excès doit être cohérent (et coïncident en temps) entre les deux interféromètres
- Fonctionnement en temps réel pour O1 !
- GW150914 est suffisamment fort pour être visible « à l'œil »



# Idem pour la recherche de signaux transitoires

- Même type de graphique



- Taux de fausse alarme  $< 1$  événement / 67 400 ans  
 Probabilité de fausse alarme  $< 2 \times 10^{-6}$  ( $> 4,6 \sigma$ )

# 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

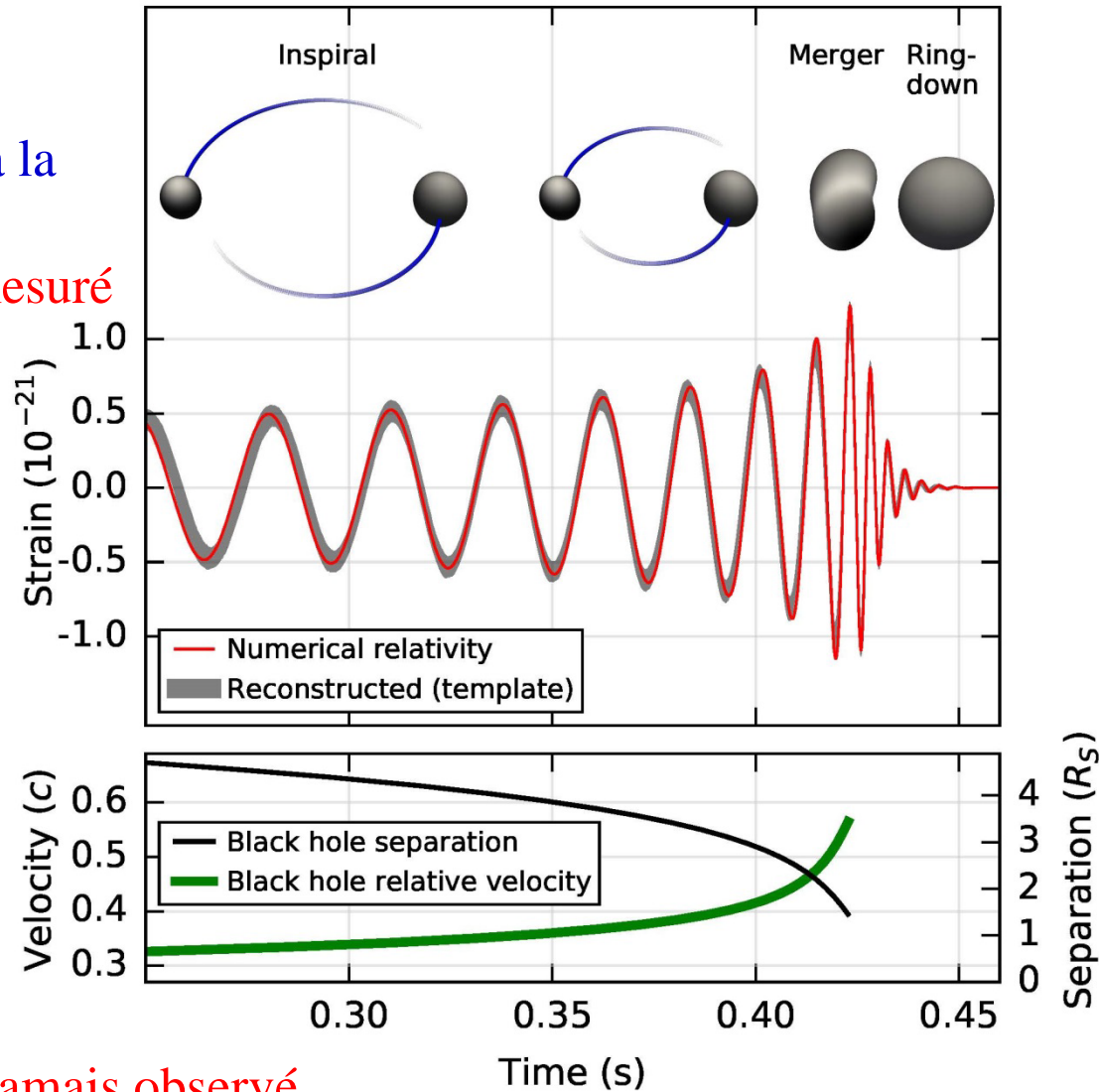
- Deux **objets massifs et compacts** en orbite l'un autour de l'autre à **75 Hz** (la moitié de la fréquence de l'OG), donc à une **vitesse relativiste** et qui se rapprochent très près avant de fusionner  
→ A peine quelques  $R_S$  !

→ Seuls des trous noirs peuvent correspondre à ces observations

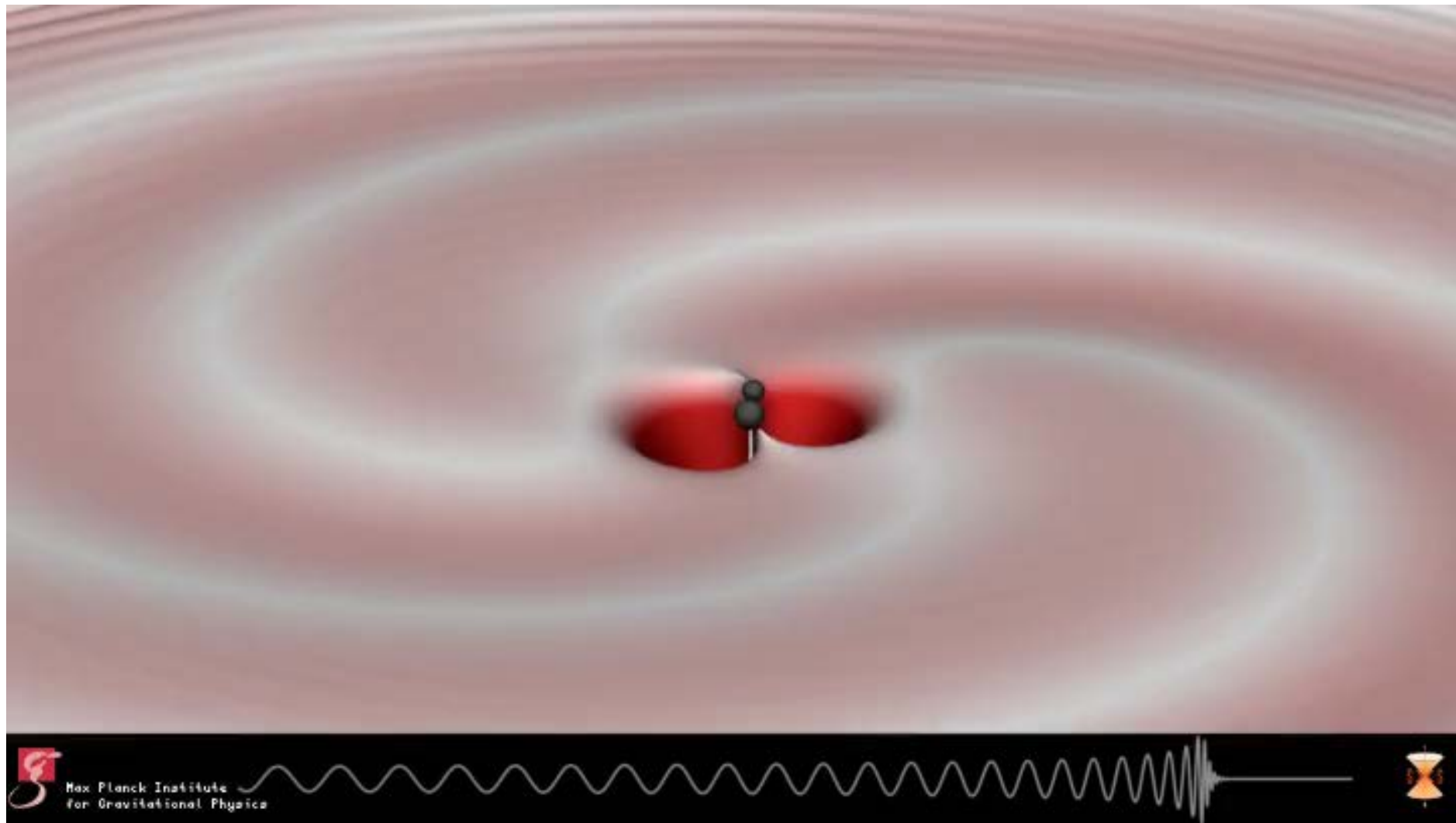
- $\sim 3 M_{\text{Soleil}}$  rayonnées en OG

- **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



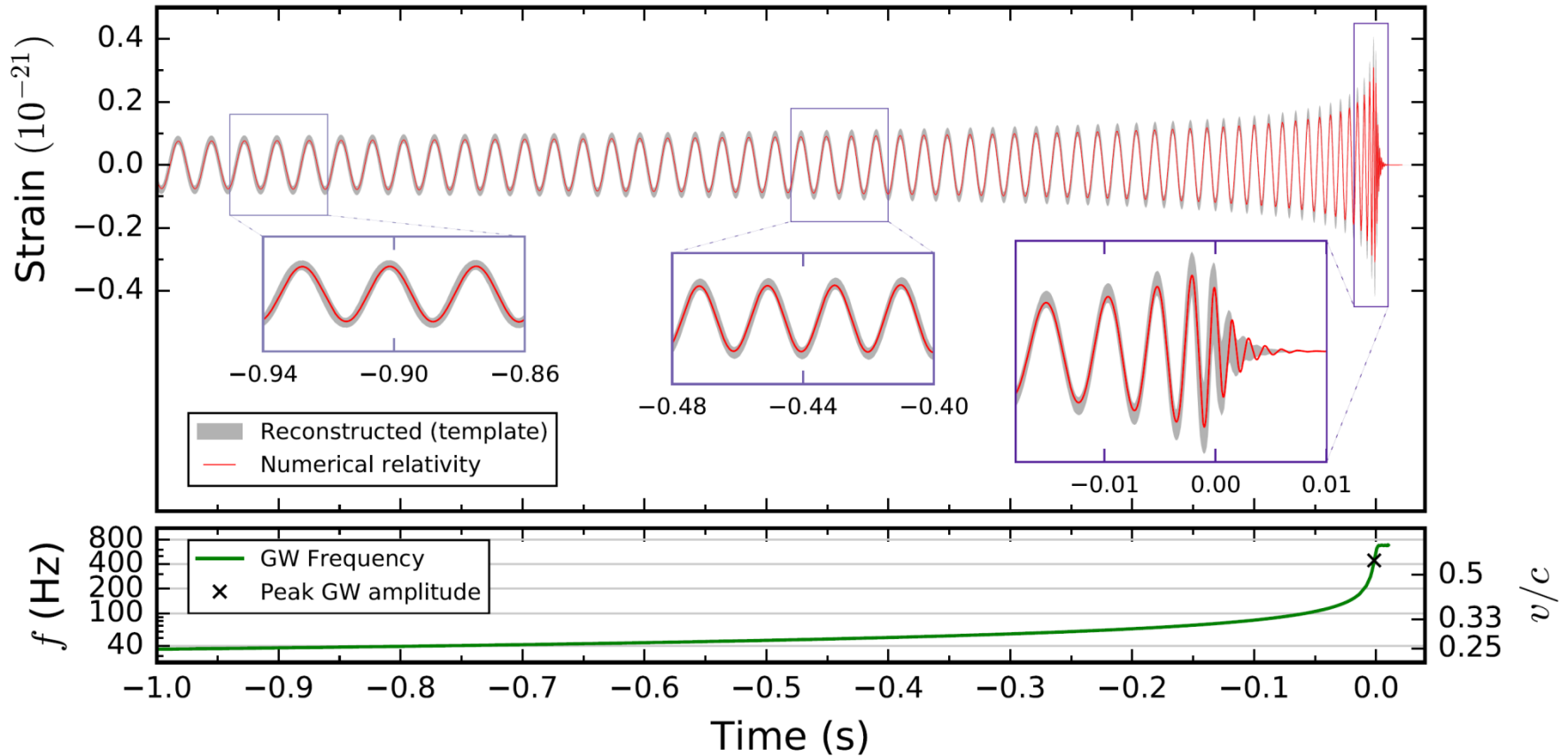
# Simulation de la fusion des deux trous noirs



# **L'événement GW151226**

# GW151226

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



# **L'événement GW170104**

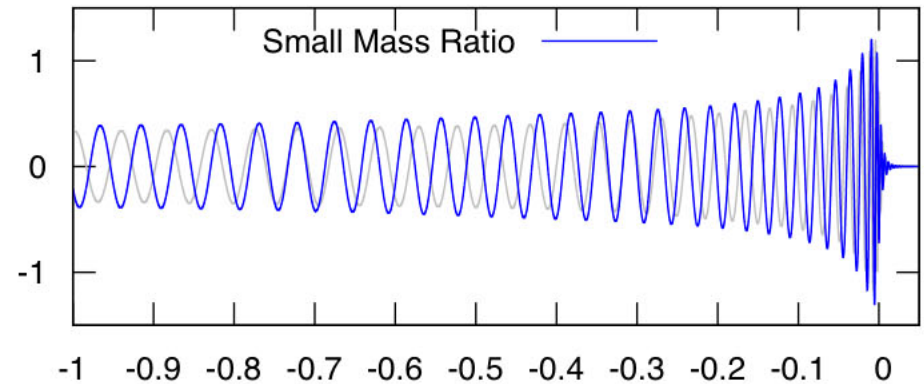
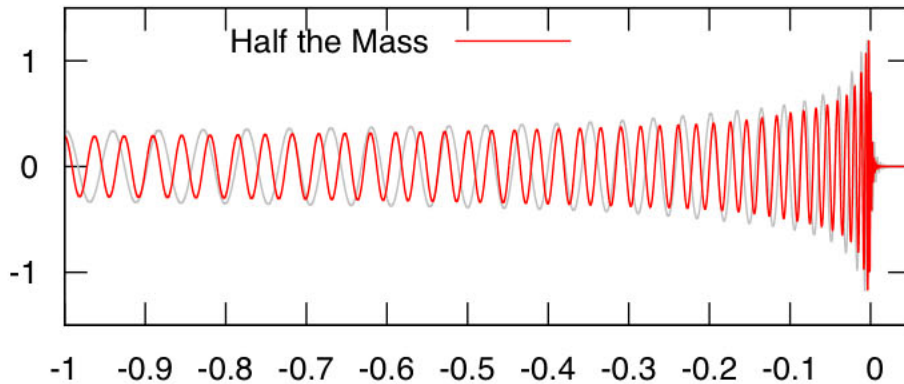
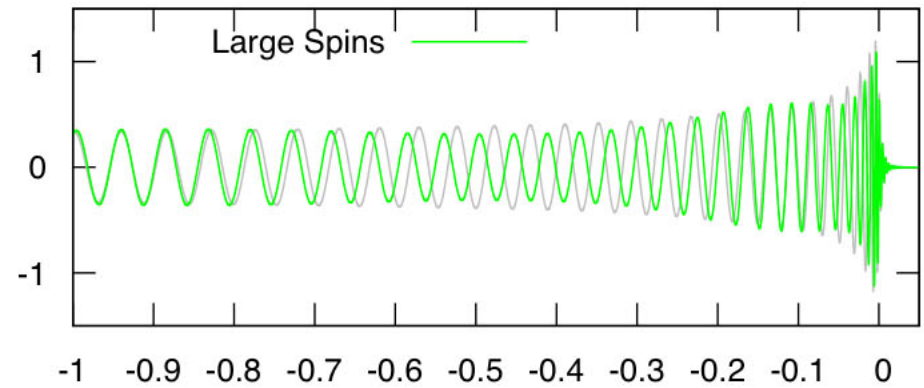
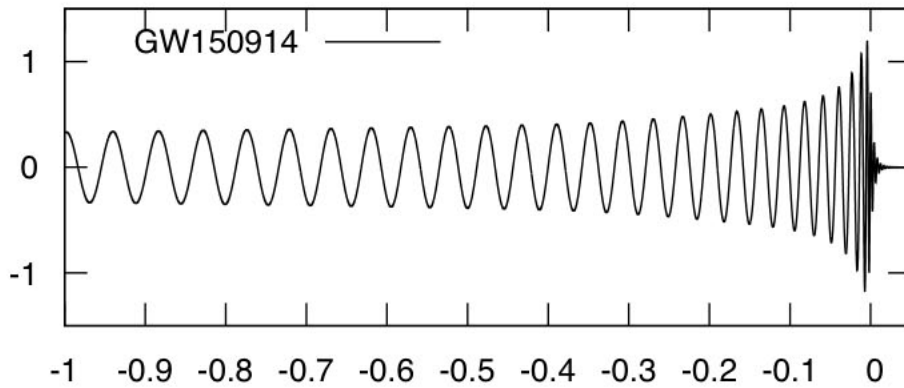
# Mesure des paramètres du signal

- Une quinzaine de paramètres au total
  - **Masses** et **moment angulaires** des deux trous noirs initiaux et du trou noir final, **distance** de la source, etc.
- Utilisation de **méthodes statistiques** – inférence bayésienne – pour
  - obtenir une valeur et une incertitude pour chaque paramètre
  - comparer des modèles de forme d'onde entre eux
- **Résultats astrophysiques**
  - Taux d'occurrence d'événements comme GW150914
    - **Plus d'événements nécessaires pour obtenir une mesure précise**
  - Scénarios de formation de systèmes binaires de trous noirs stellaires
- **Tests de la relativité générale**
  - Aucune déviation significative observée par rapport aux prédictions
  - Meilleure limite sur la masse d'un éventuel graviton
    - **$< 10^{-22} \text{ eV}/c^2$**



# Exemple de mesure

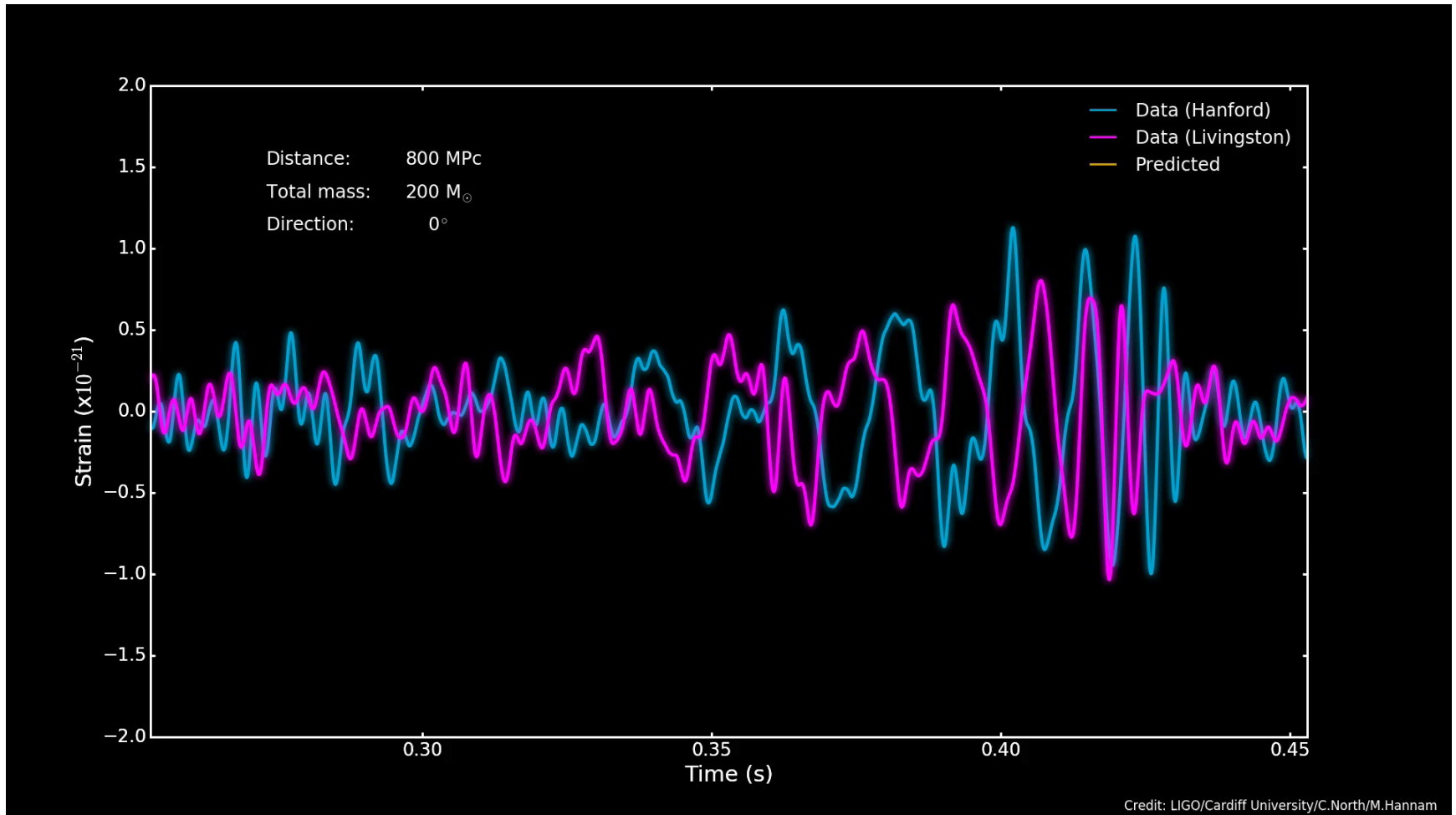
- Impact des paramètres des trous noirs sur la forme d'onde observée



- Evolutions très différentes de la fréquence des signaux au cours du temps  
→ Détermination des jeux de paramètres les plus probables

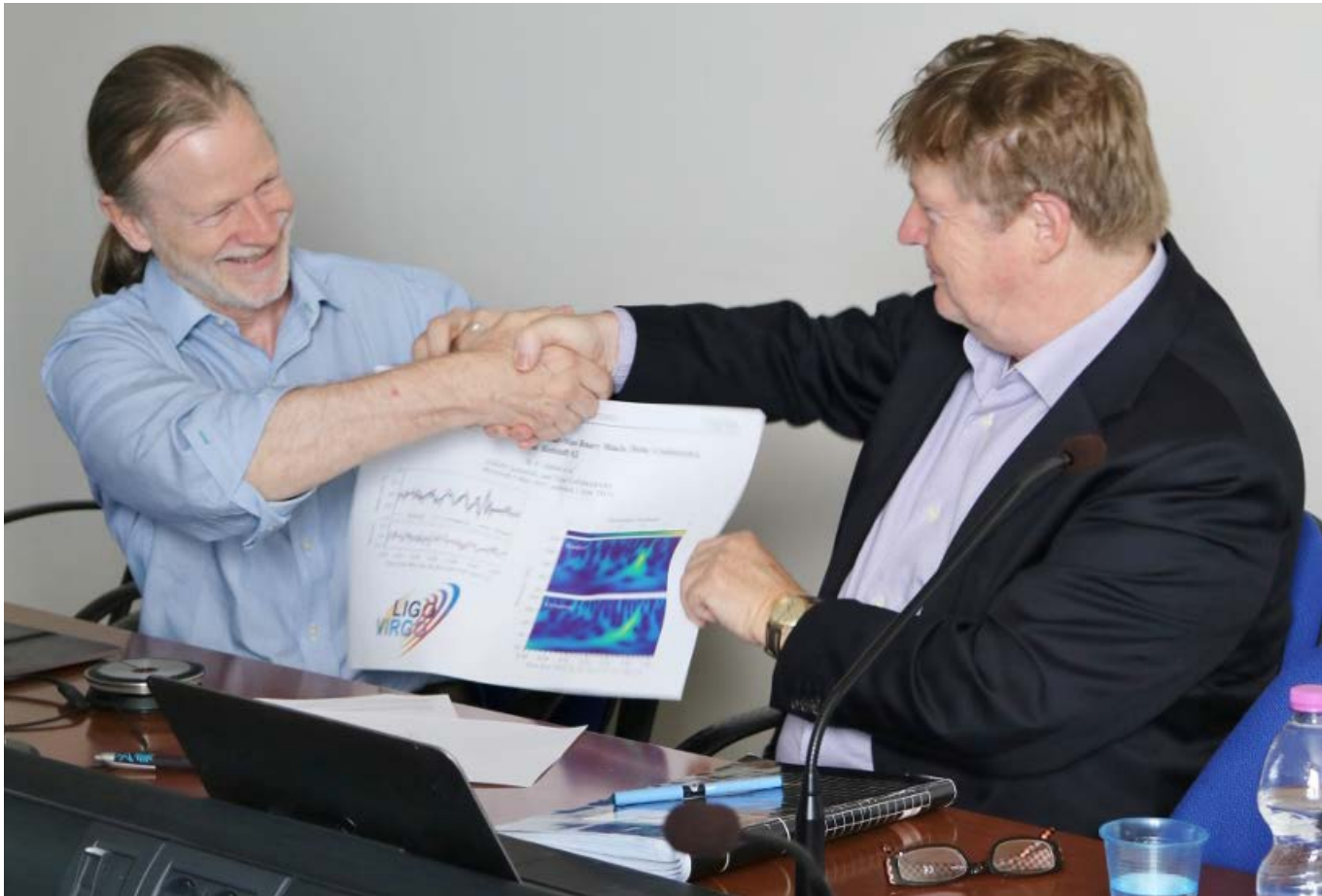
# De la mesure à la source

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



# GW170104

- **Une aventure humaine avant tout !**
  - Poignée de main entre les **porte-paroles** des collaborations **LIGO** (à gauche) et **Virgo** (à droite) le **31 mai 2017**, avant le **point presse** annonçant la 3<sup>ème</sup> détection



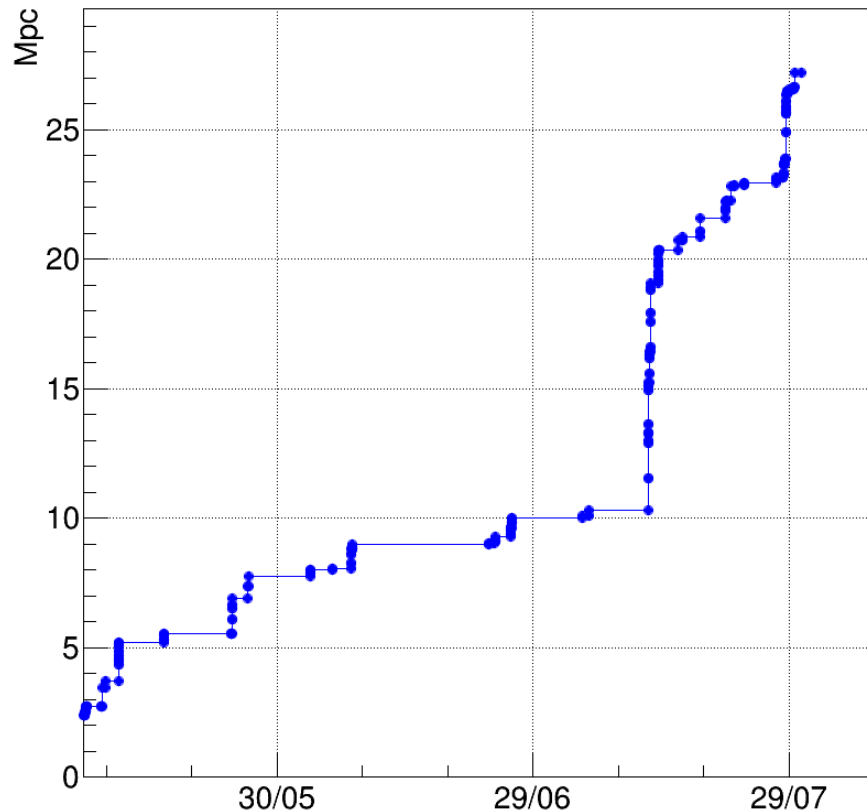
**Prise de données**

**« O2 » pour Virgo**

**1<sup>er</sup> – 25 Août 25 2017**

# Virgo Avancé : rejoindre O2 !

- Chronologie pour « Virgo Avancé »
  - Démarrage de la prise de données : 1<sup>er</sup> 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

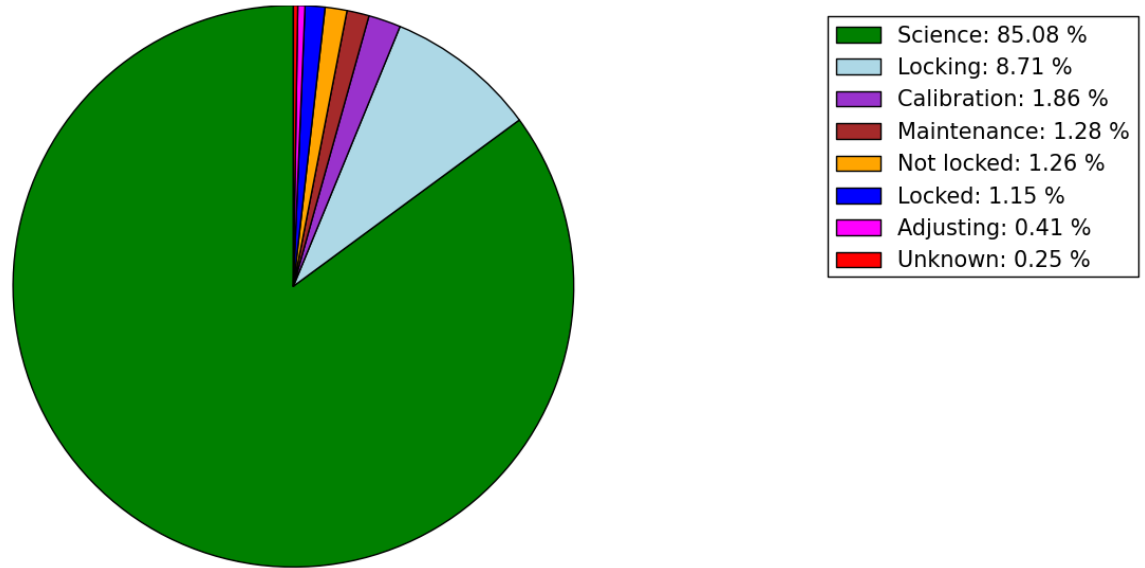
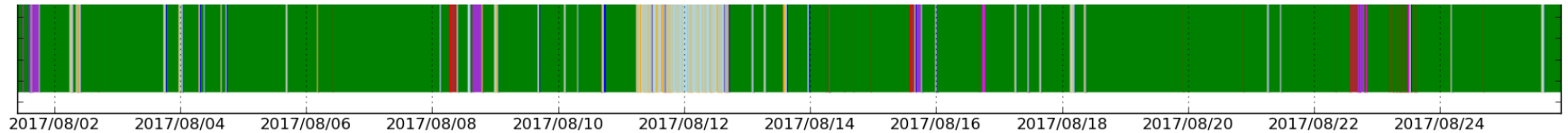
Bras ouest de l'interferomètre Virgo  
(Photo: © Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque)

Mise à jour : 27 septembre, 2017



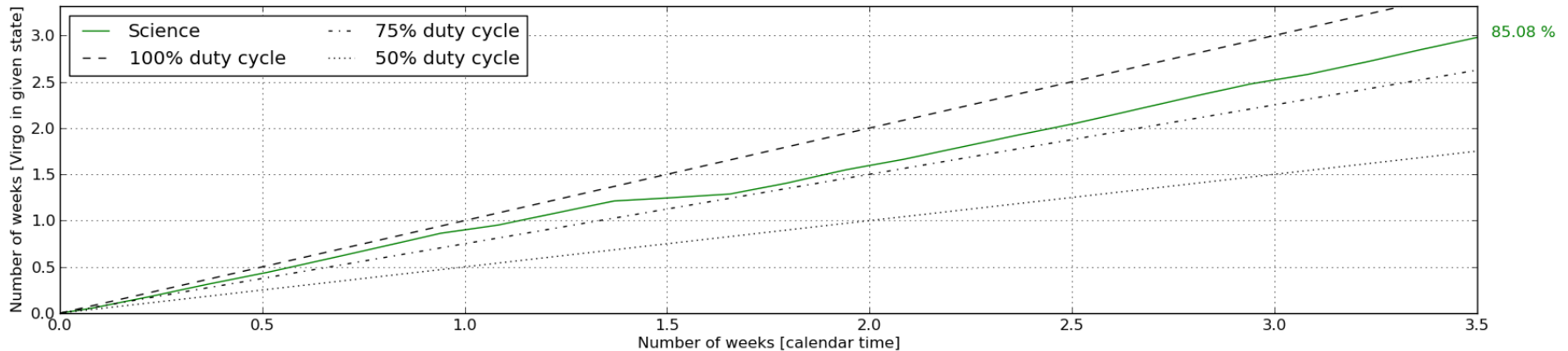
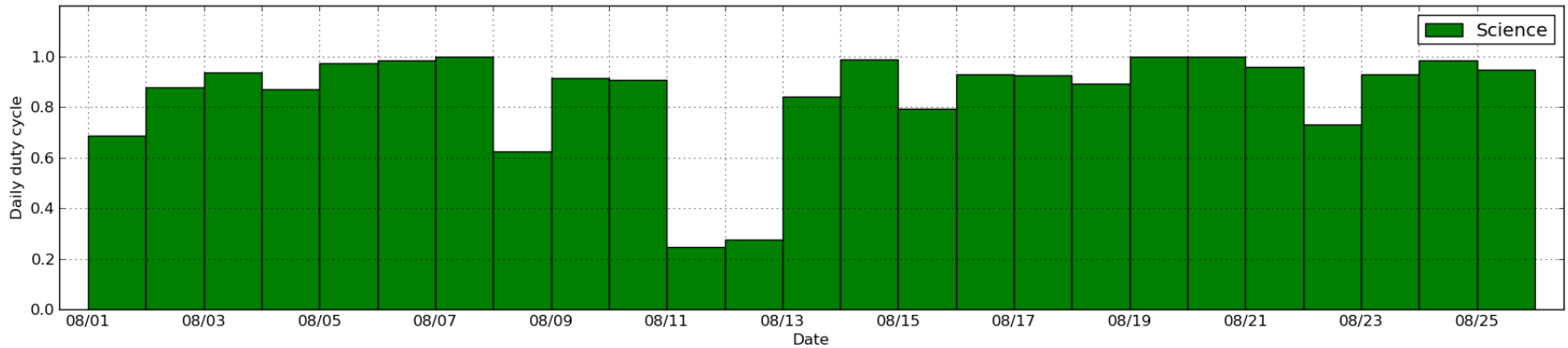
# Résumé des quatre semaines de prise de données

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



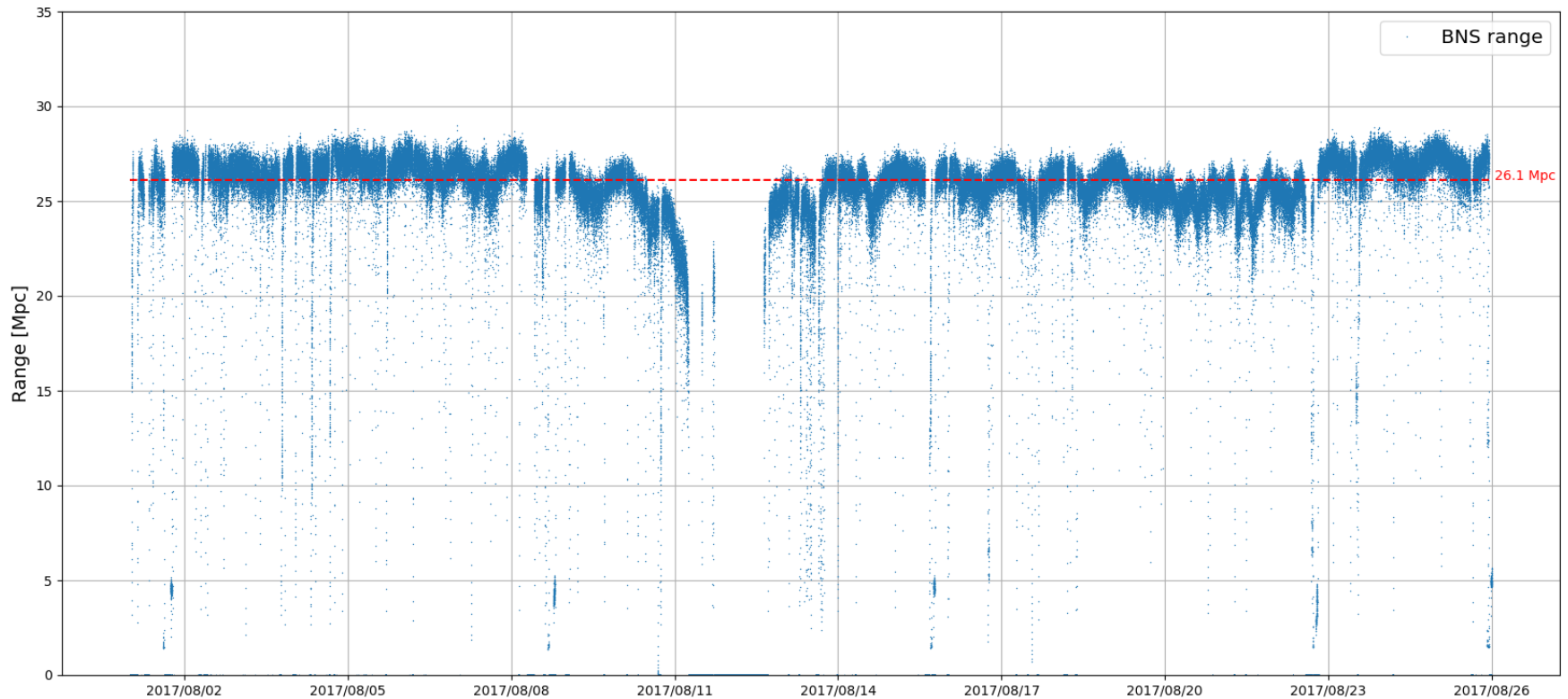
# Résumé des quatre semaines de prise de données

- Cycle utile
  - Suivi jour par jour



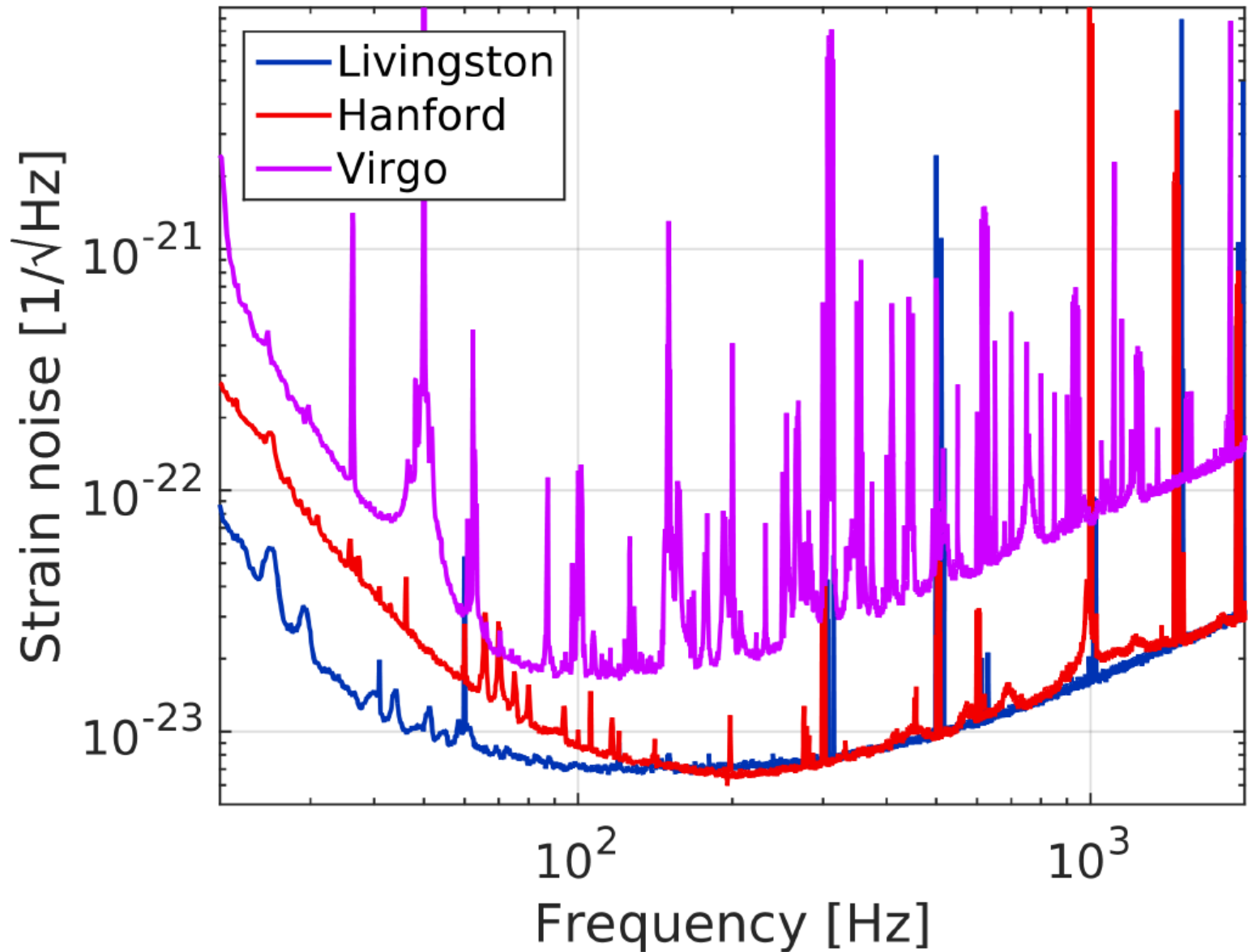
# Résumé des quatre semaines de prise de données

- **Distance de détection moyenne pour une binaire d'étoiles à neutrons**
  - **Résumé en une seule grandeur (dépendante du temps) la sensibilité du détecteur**  
→ Vue partielle de la sensibilité – mais bien souvent suffisante.





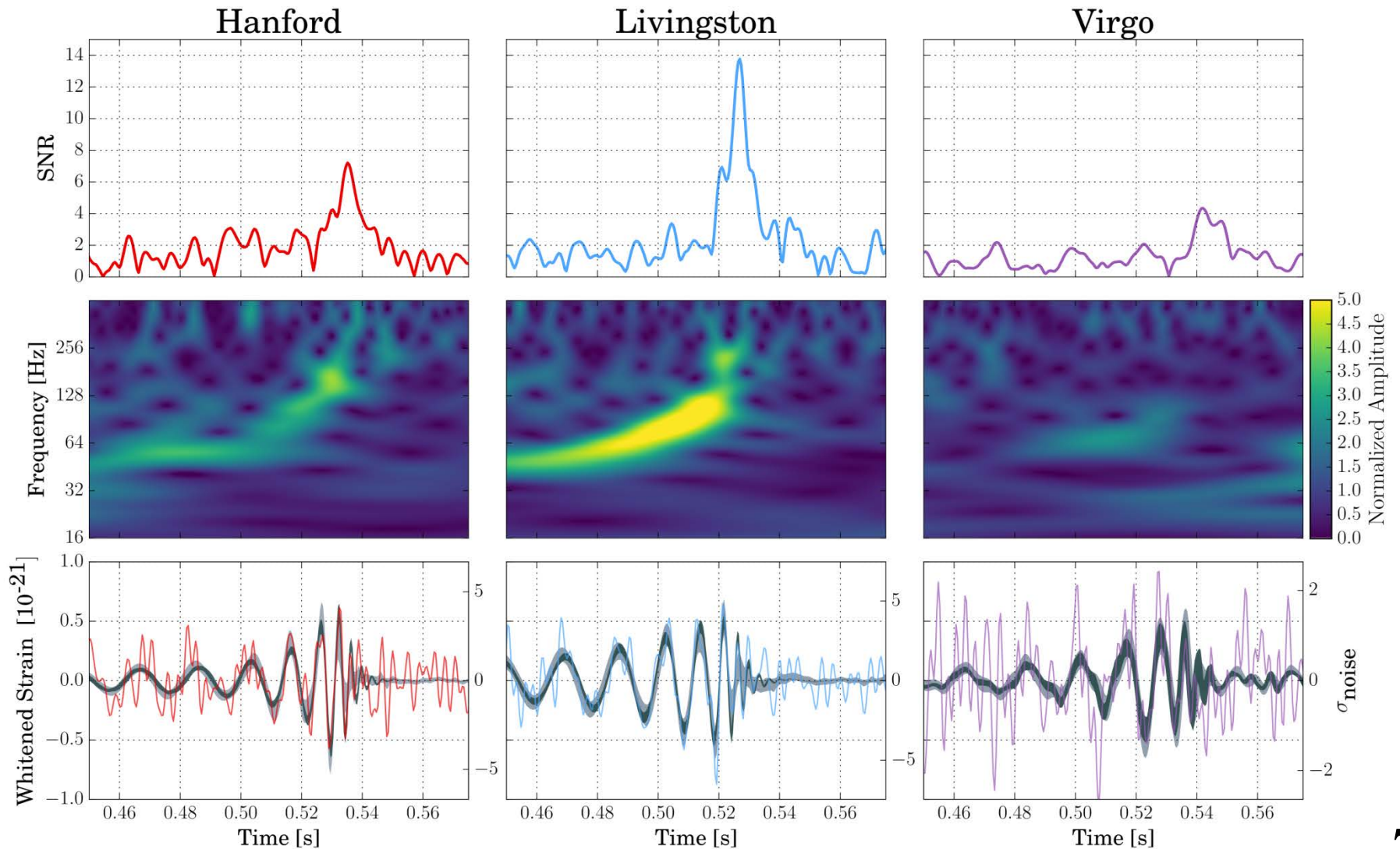
# Sensibilités comparées LIGO-Virgo



# **L'événement GW170814**

# Signaux détectés

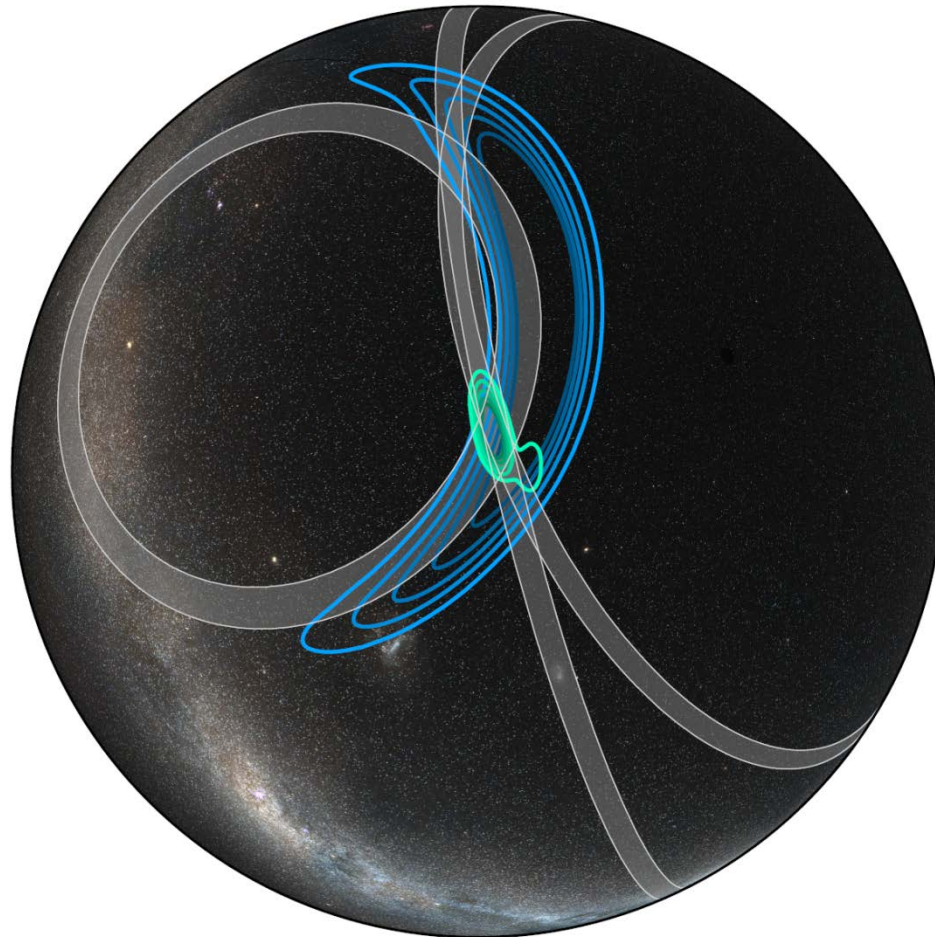
- Des études détaillées confirment la présence d'un **signal dans le détecteur Virgo**



# Localisation LIGO-Virgo de la source dans le ciel

- **Triangulation**

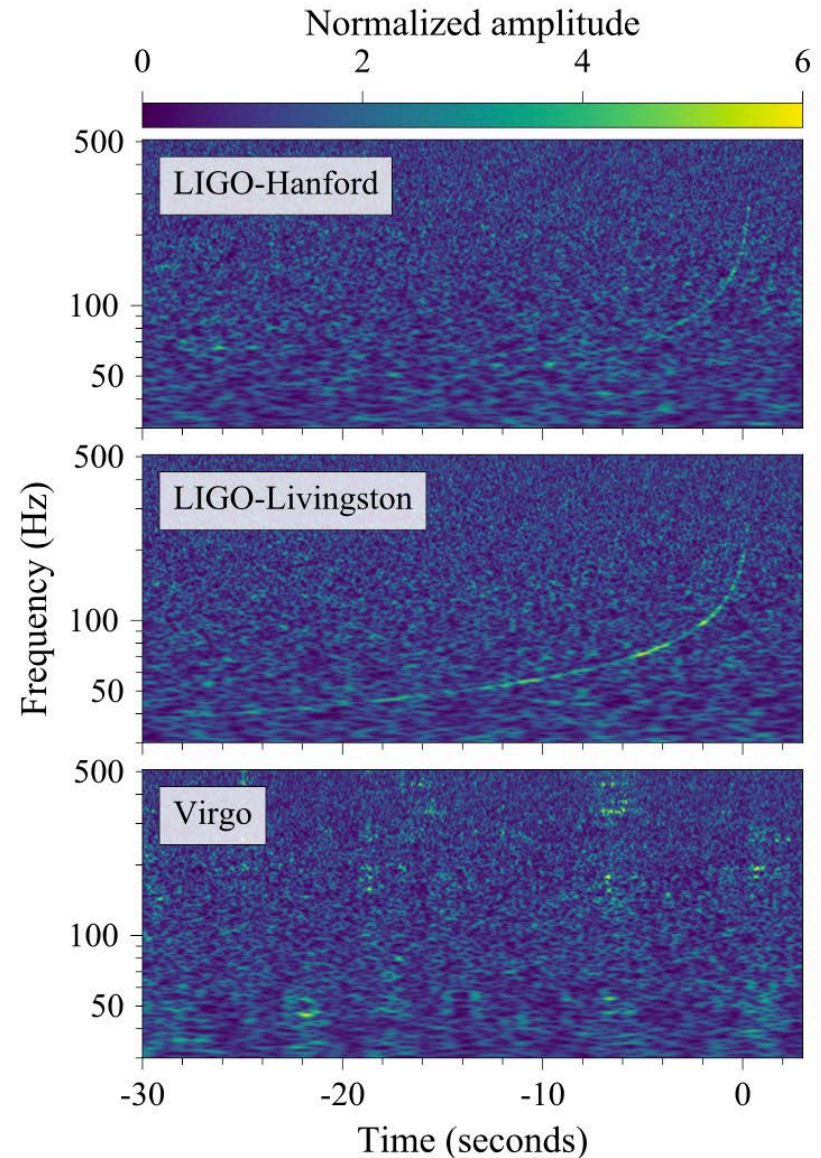
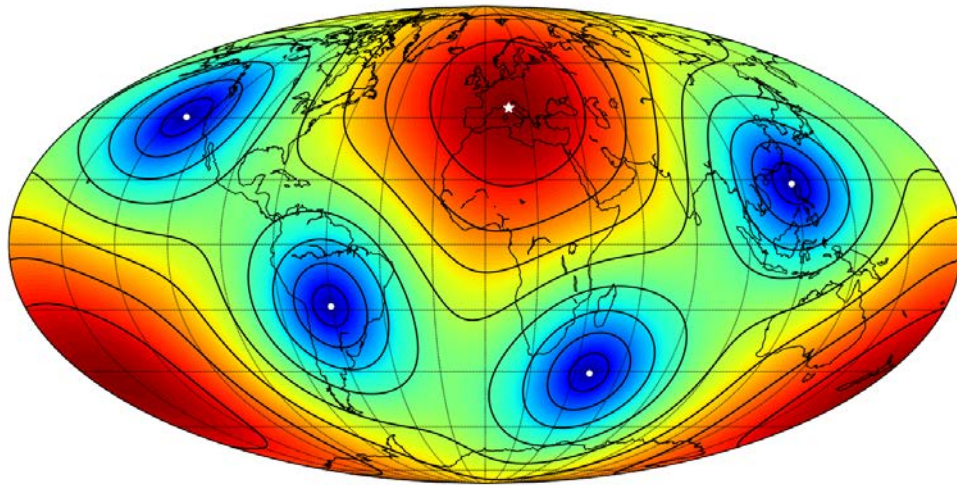
- Délais entre les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs
- Différences de forme et d'amplitude entre ces signaux



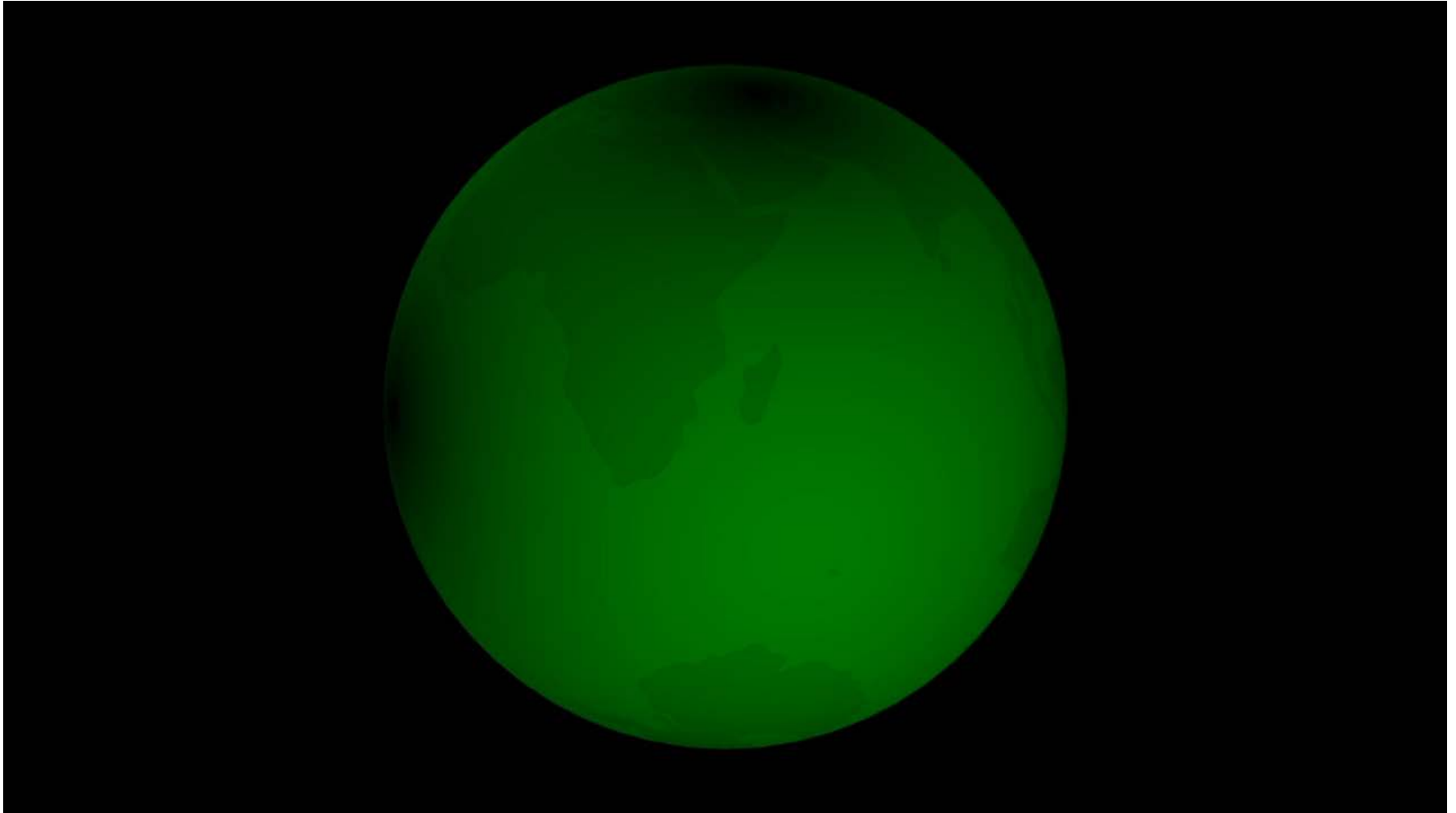
# **L'événement GW170817**

# Ondes gravitationnelles

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

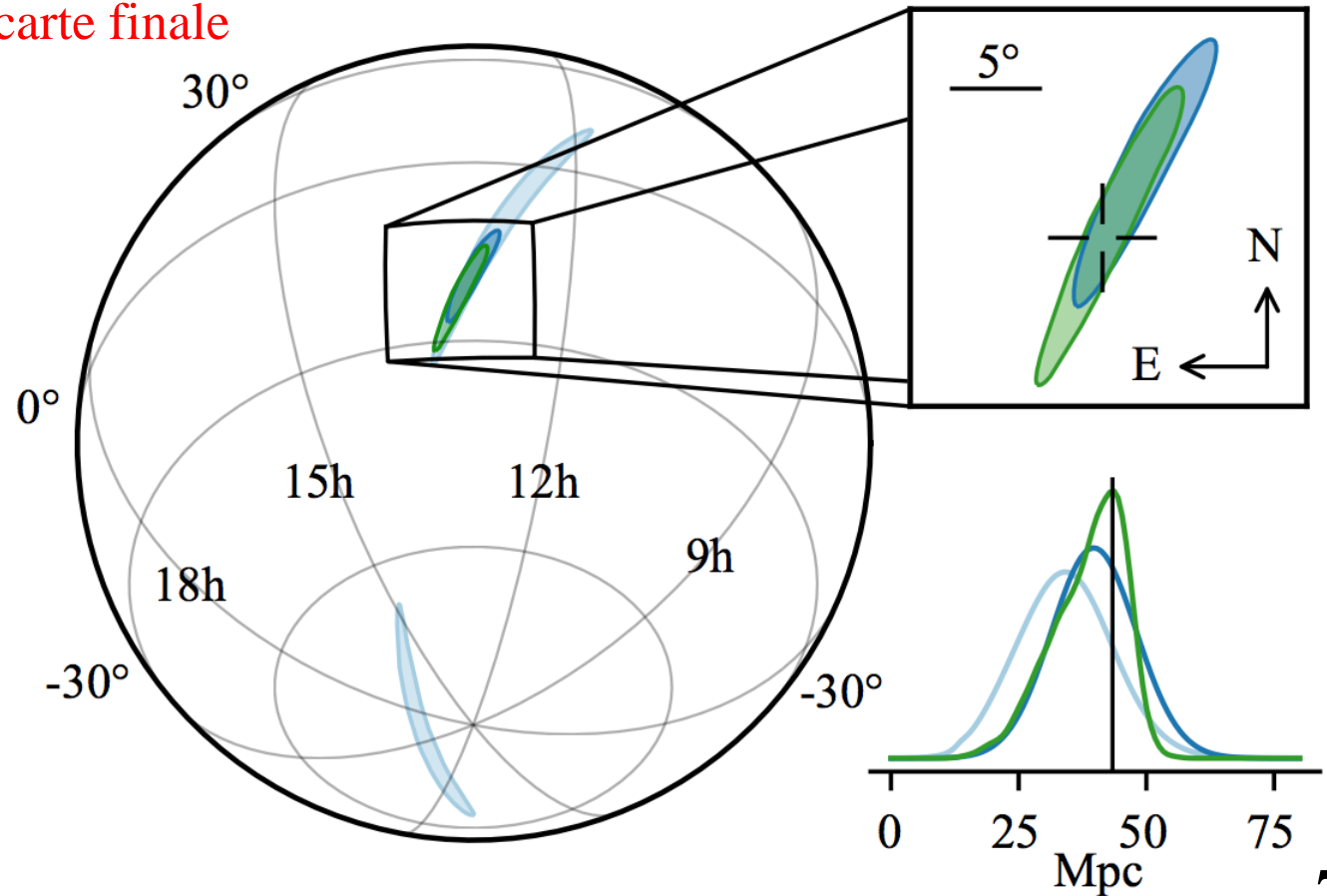


# Localisation de la source par LIGO-Virgo



# Localisation de la source par LIGO-Virgo

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

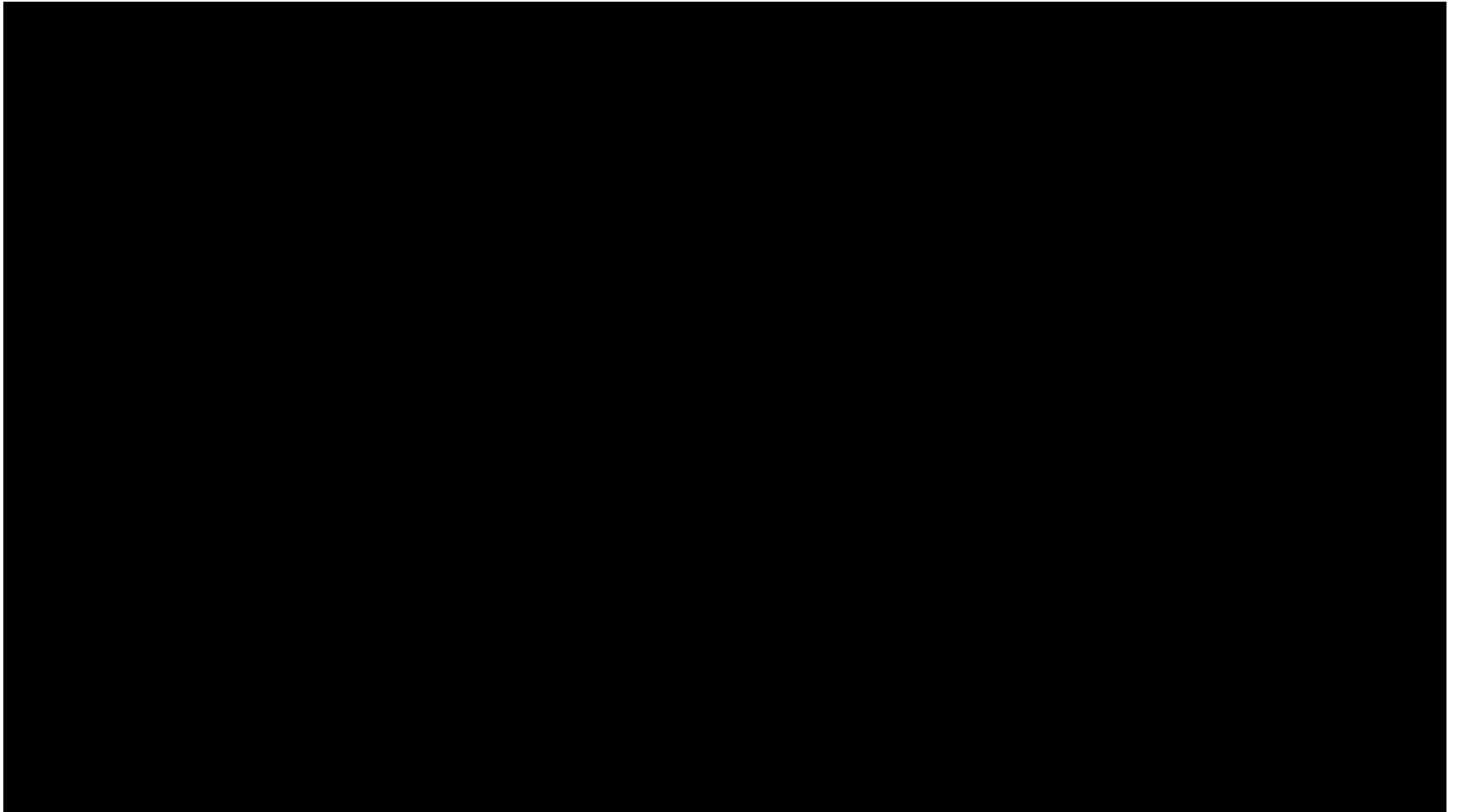




# Recherche de contreparties pour GW170817

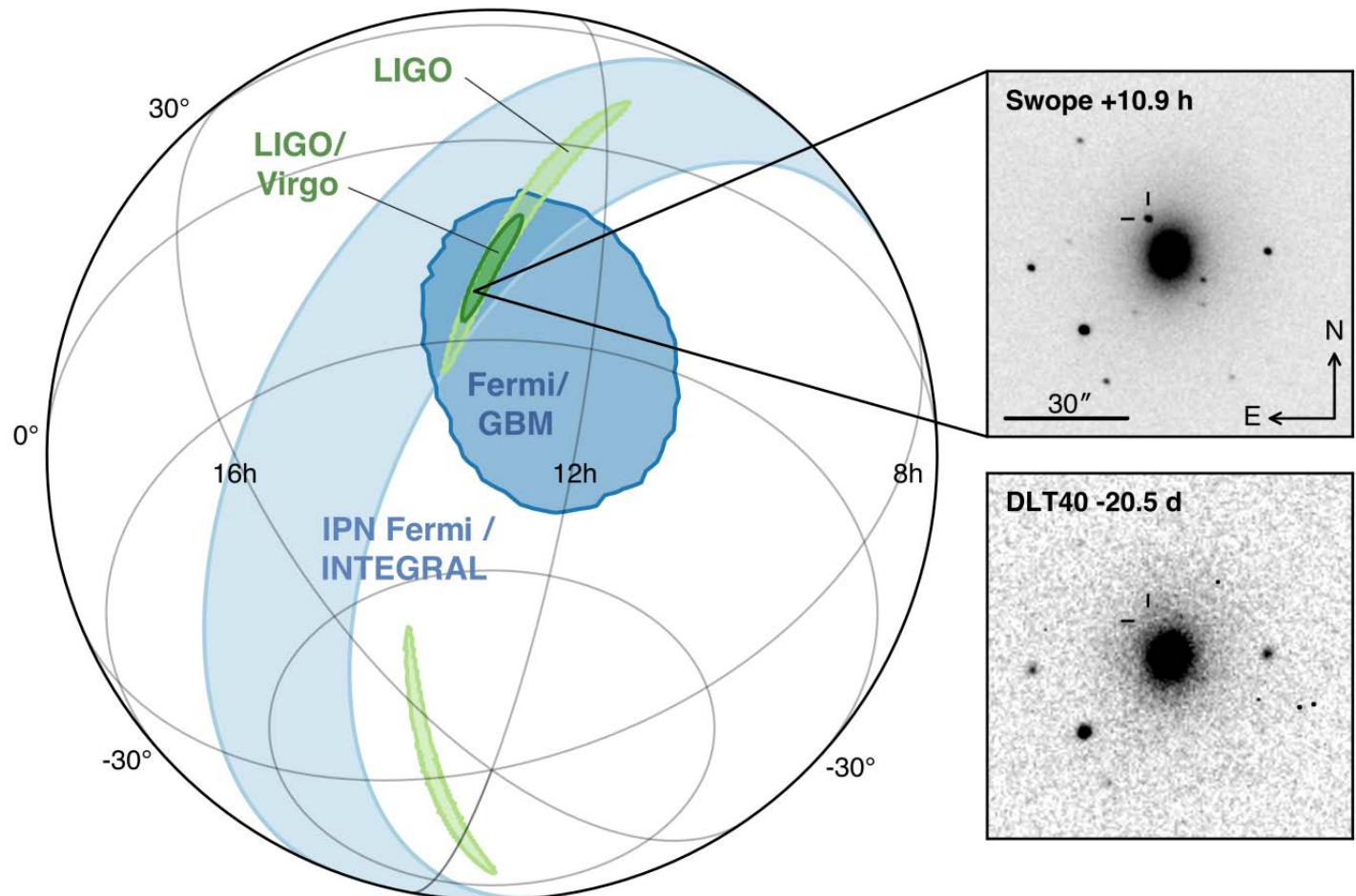
- Alerte envoyée par LIGO-Virgo aux télescopes partenaires
  - Localisation dans le ciel incluse

OzGrav/LSC-Virgo



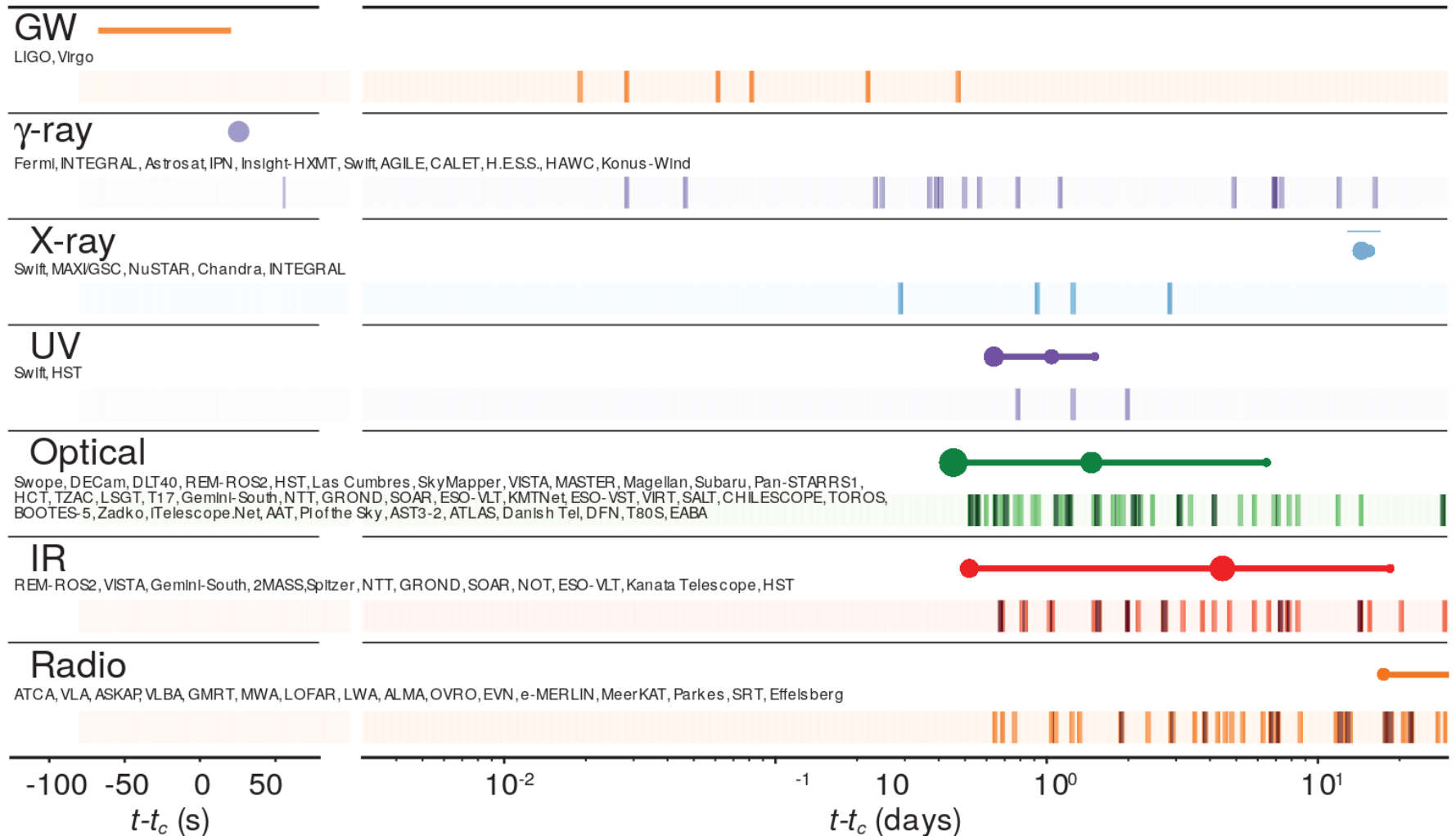
# Localisation de la source dans le ciel

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



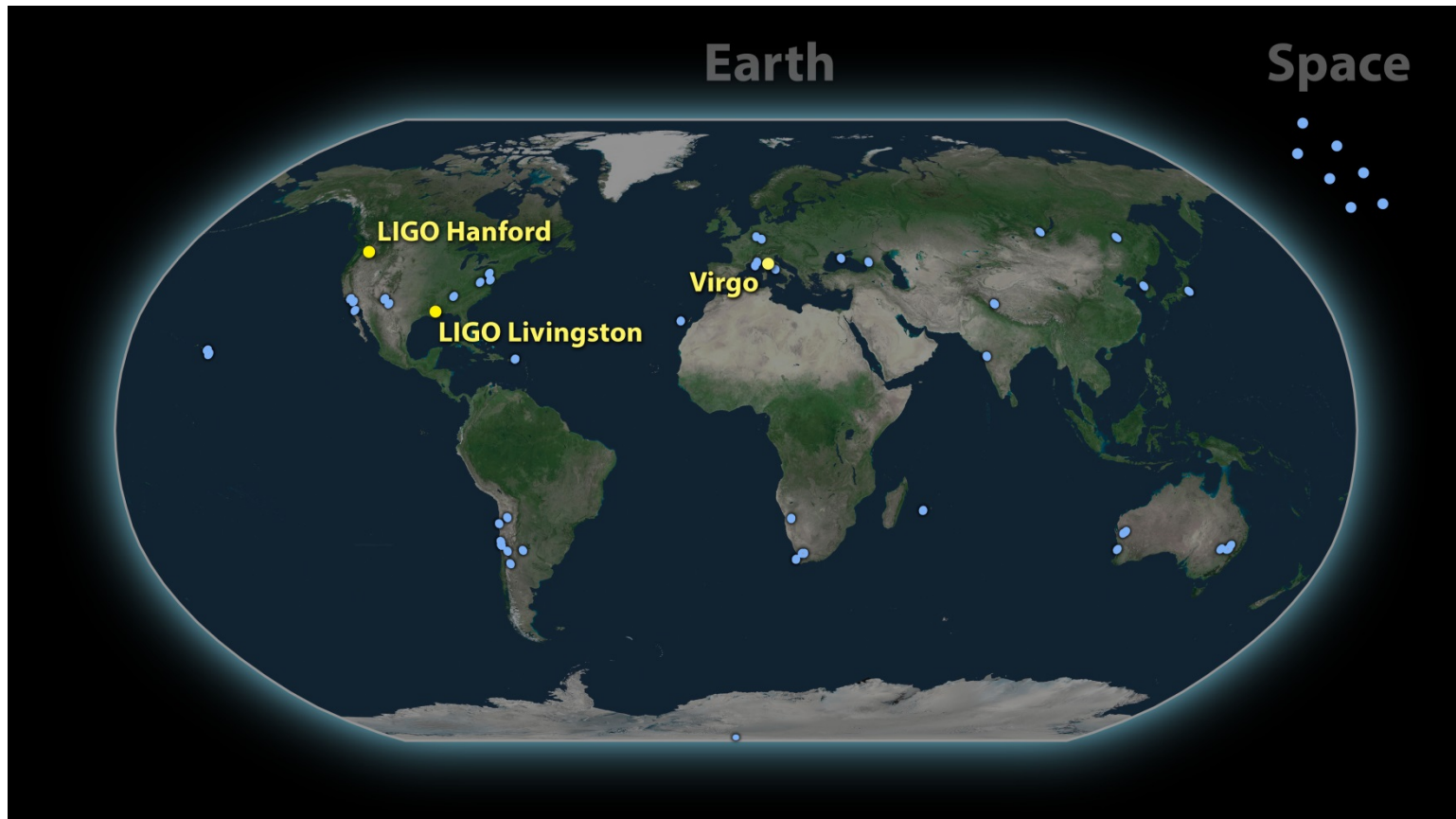
# Astronomie multi-messagers

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



# Un suivi mondial

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



# Mesure de la constante de Hubble

- $v_H = H_0 \times d$  pour des sources proches ( $d \approx 50$  Mpc au plus)
  - $v_H$  : Vitesse de récession (vitesse radiale)
  - $H_0$  : Constante de Hubble
  - $d$  : Distance de la source

- Jusqu'à présent : deux techniques pour mesurer  $H_0$

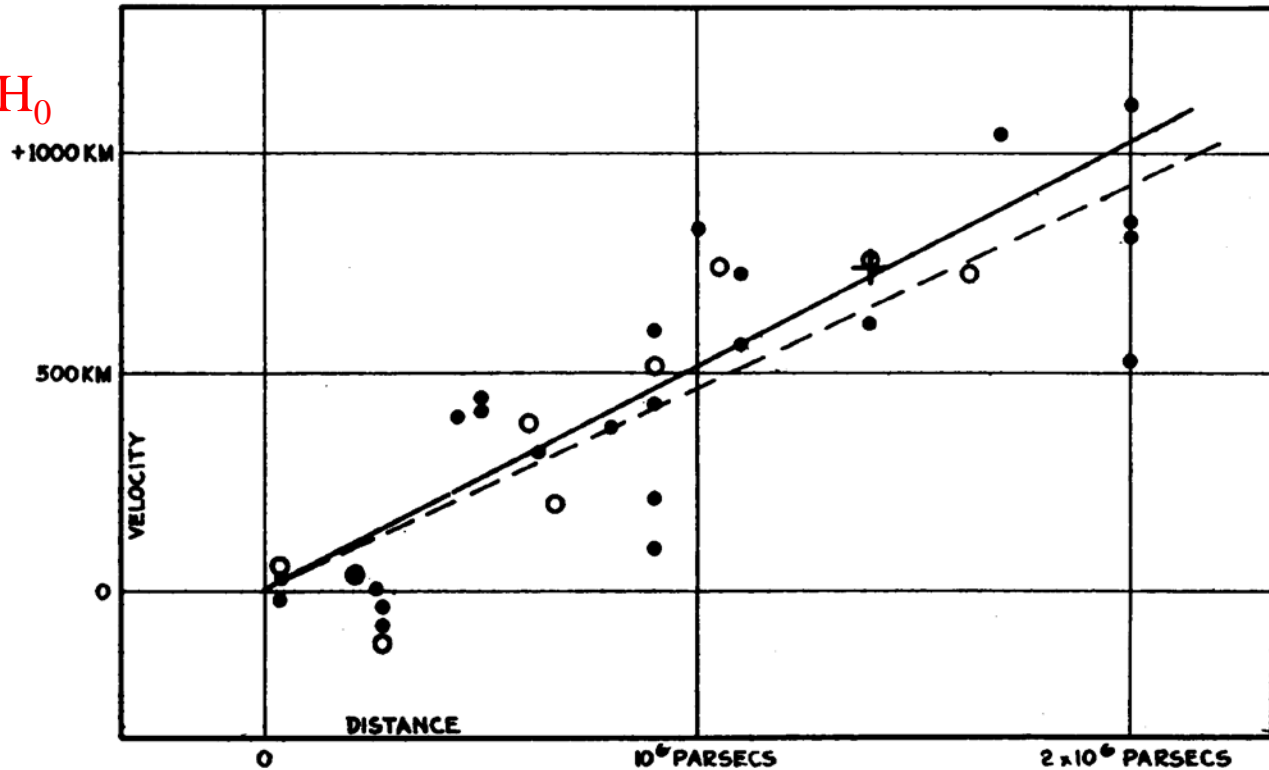
- Supernovae de type I
- CMB

- $H_0 \approx 70$  km / s / Mpc

- Tension entre les résultats obtenus par les deux méthodes

- Ondes gravitationnelles

- Mesure nouvelle, indépendante des deux autres



# Mesure de la constante de Hubble

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

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

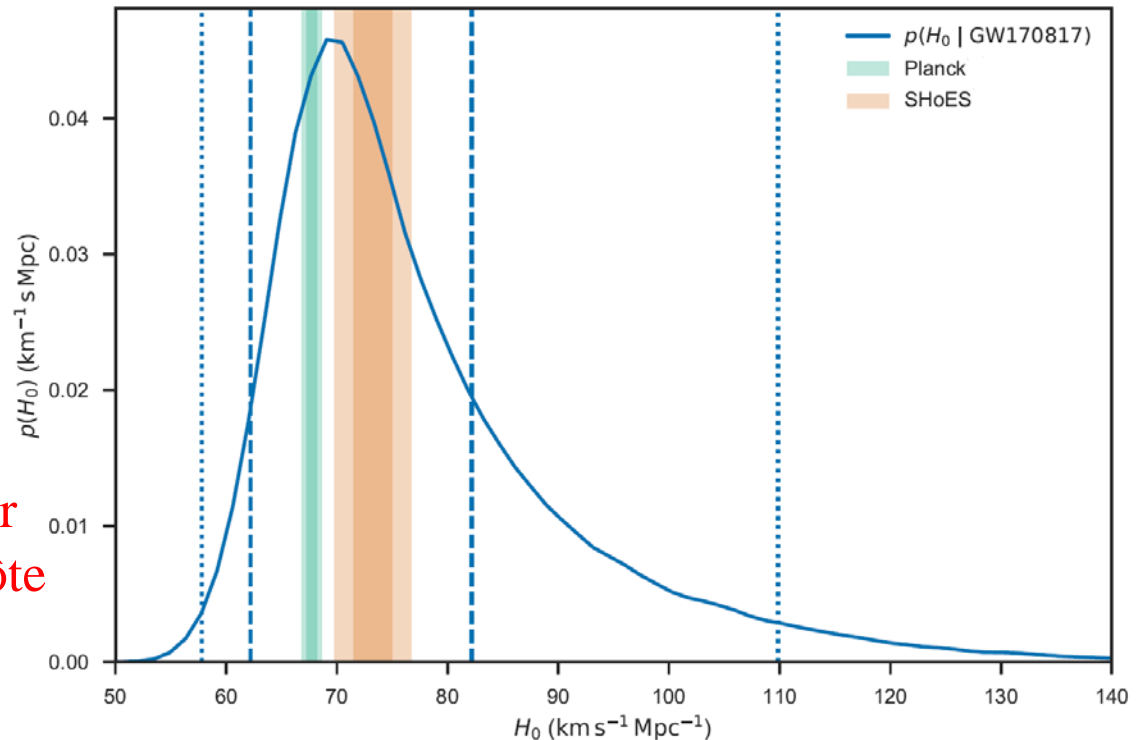
- Distance fournie par les ondes gravitationnelles

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

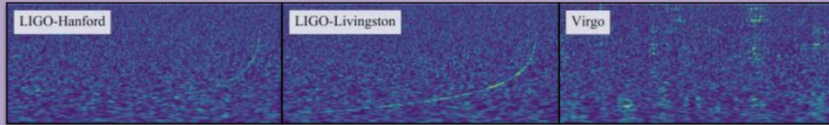
- Vitesse de récession donnée par l'identification de la galaxie hôte

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

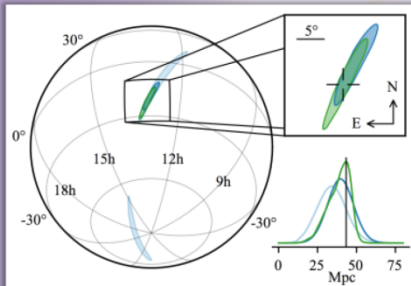
→  $H_0 = 70^{+10}_{-12}$  km / s / Mpc



## TOUT SUR GW170817



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

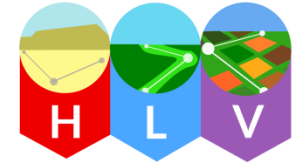
EN = Étoile à Neutrons  
 OG = Onde Gravitationnelle  
 EM = Electromagnétique  
 $M_{\odot} = 1$  masse solaire =  $2 \times 10^{30}$  kg  
 H/L= LIGO Hanford/Livingston, V=Virgo

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

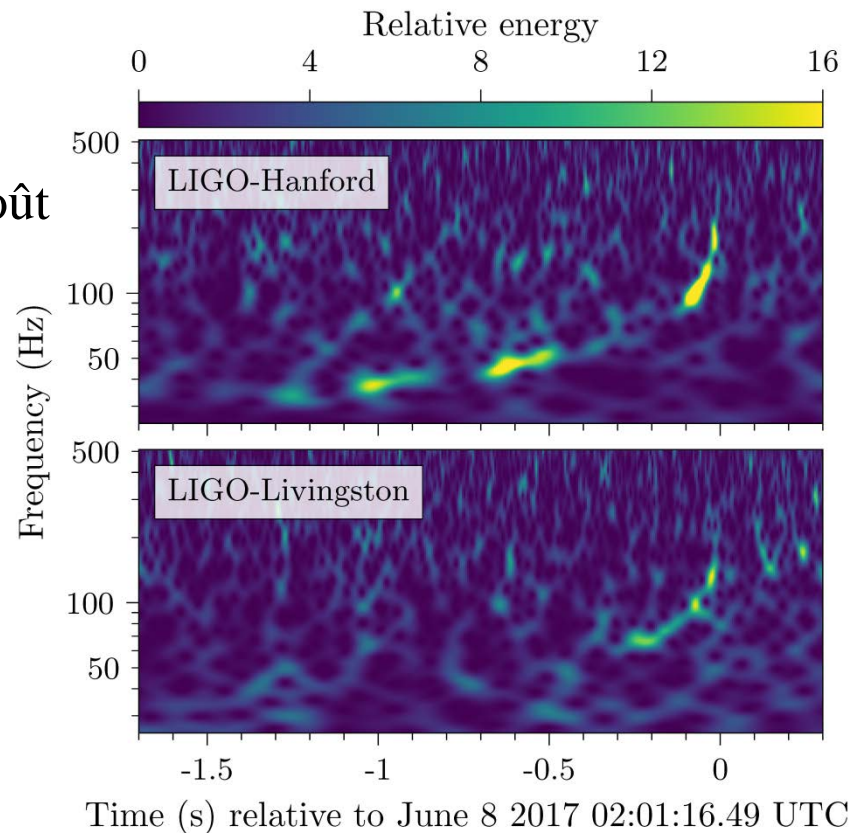
- Première fusion de deux étoiles à neutrons détectée
  - Ondes gravitationnelles + spectre électromagnétique
- Premier événement en ondes gravitationnelles dont la source est identifiée et suivie par de très nombreux télescopes de par le monde
  - Kilonova
- Une partie au moins des sursauts gamma courts 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

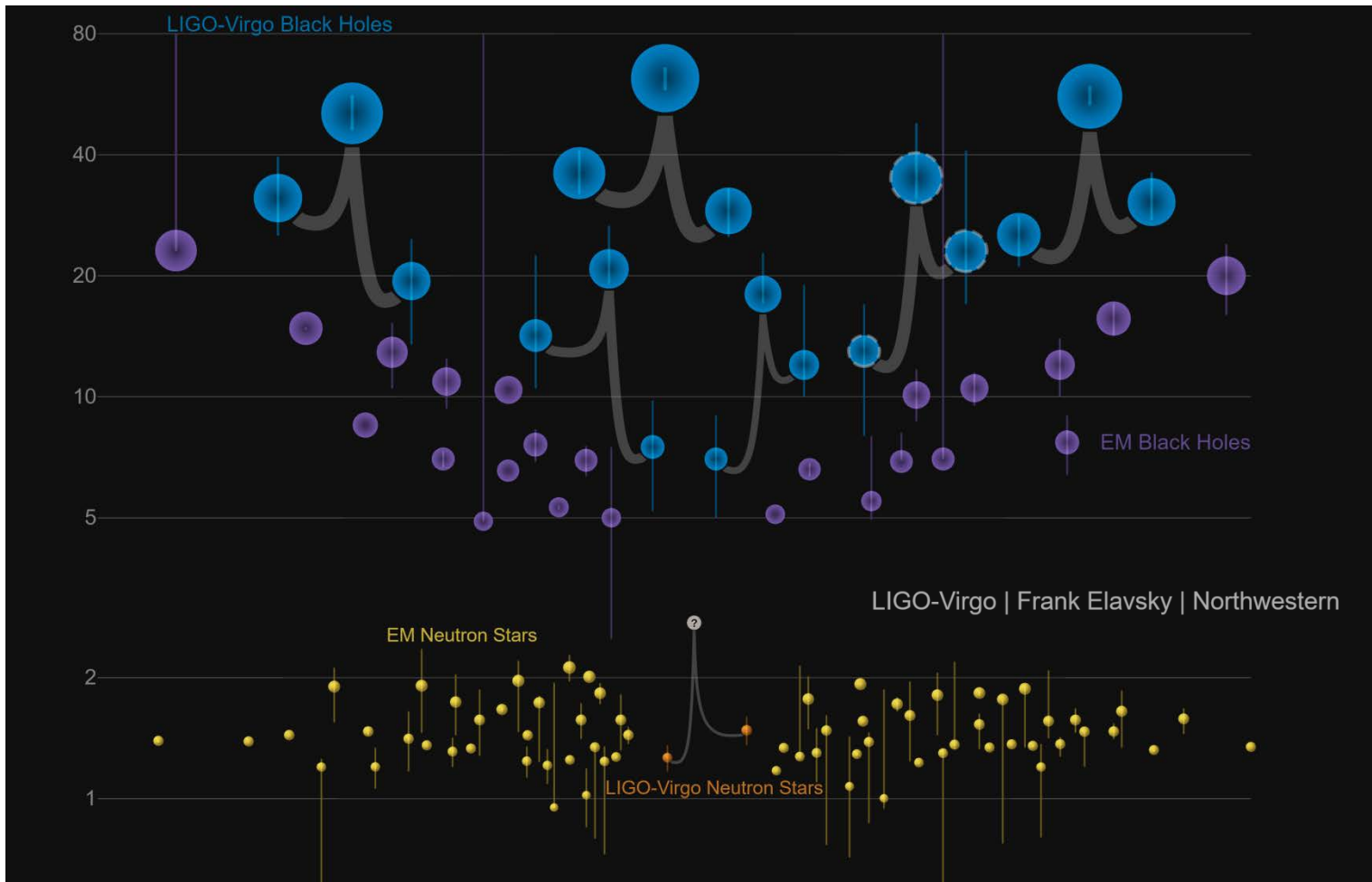
- Signal enregistré par les deux détecteurs LIGO le 8 juin dernier
  - Virgo encore en phase de démarrage
- Une autre fusion de deux trous noirs
  - Le système le plus léger observé jusqu'à maintenant
    - 12 et 7 masses solaires
- Analyse détaillée et annonce décalées suite aux deux événements observés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



# Conclusions

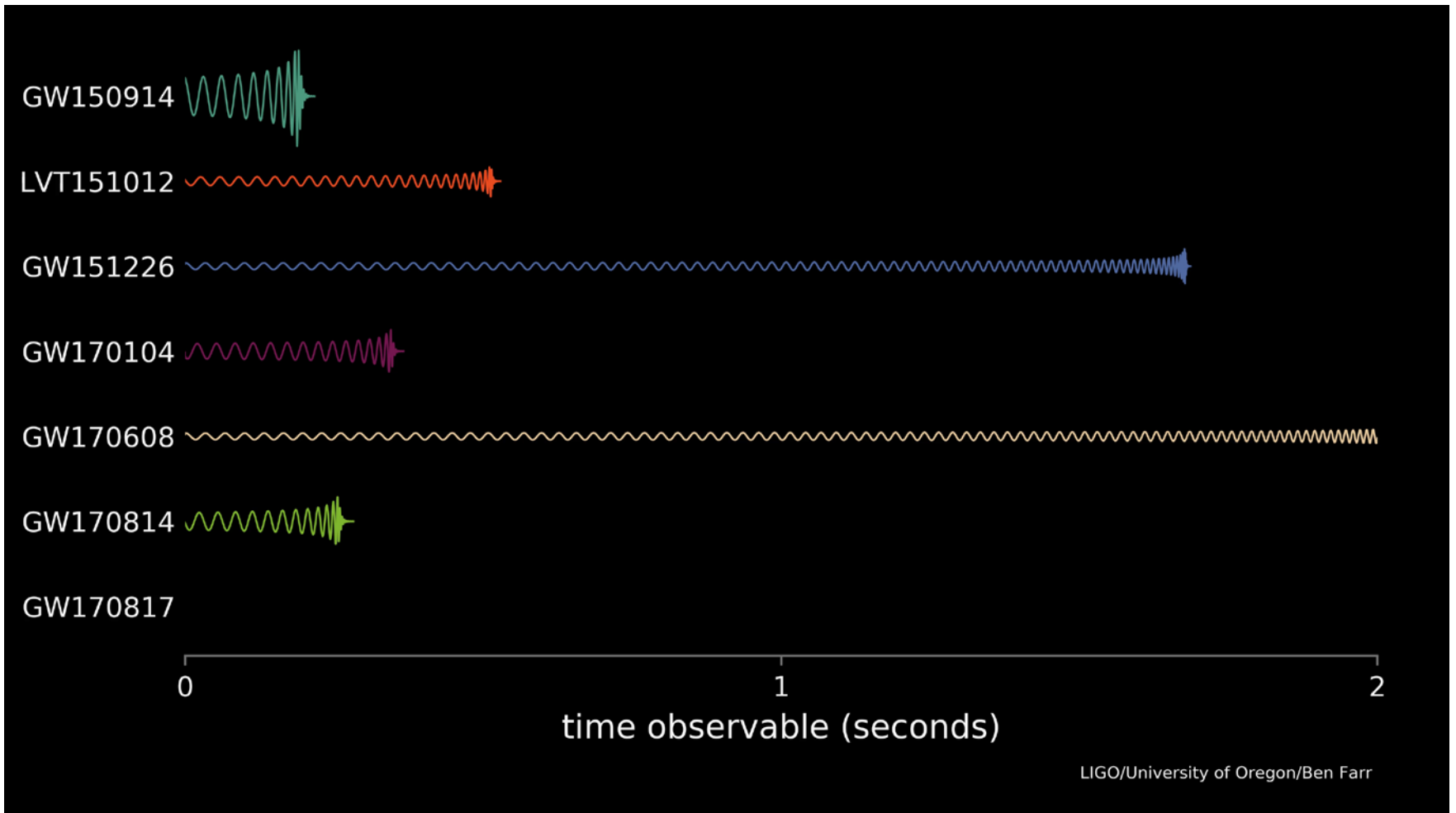
# Détections

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



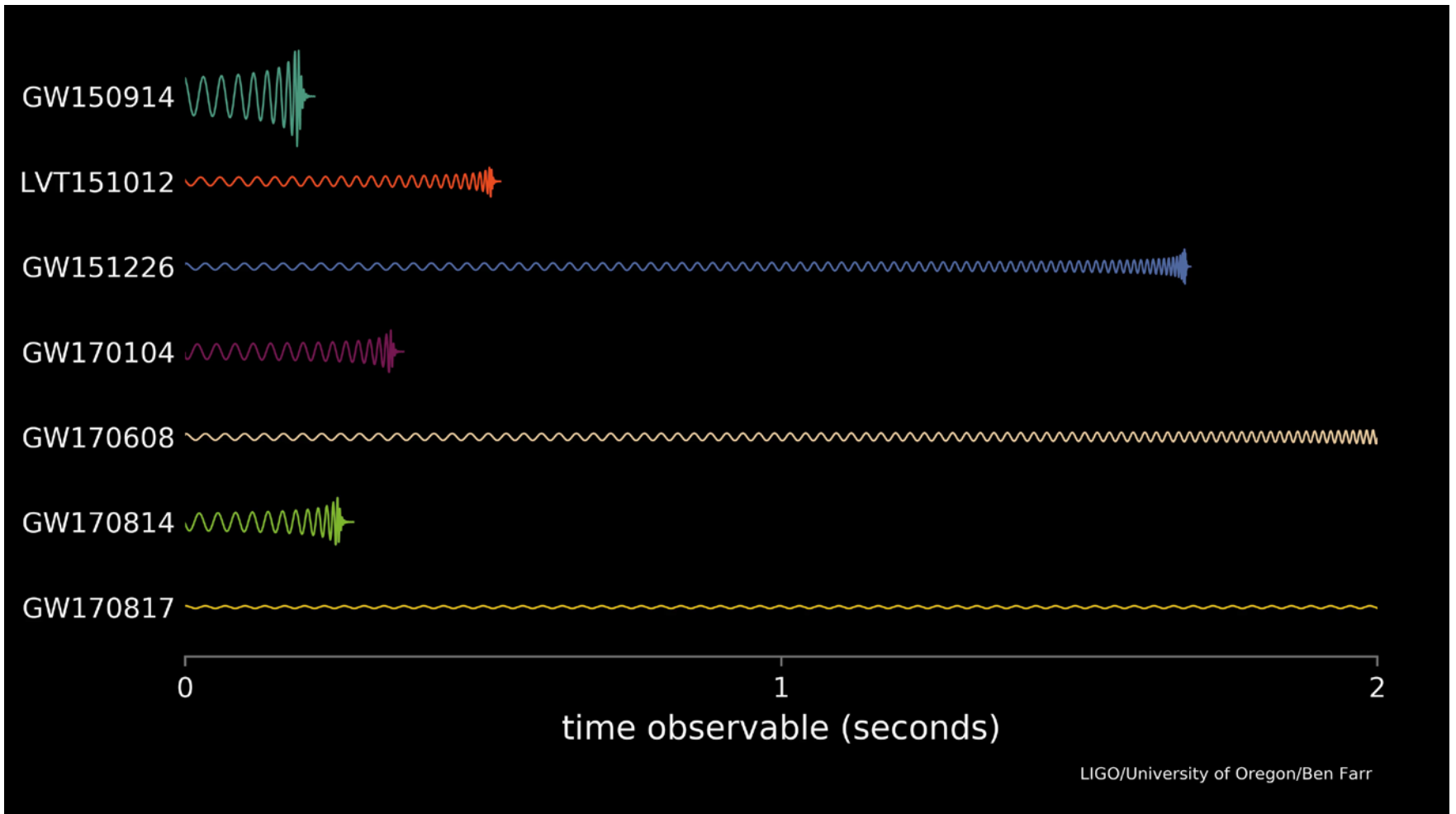
# Détections

- 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

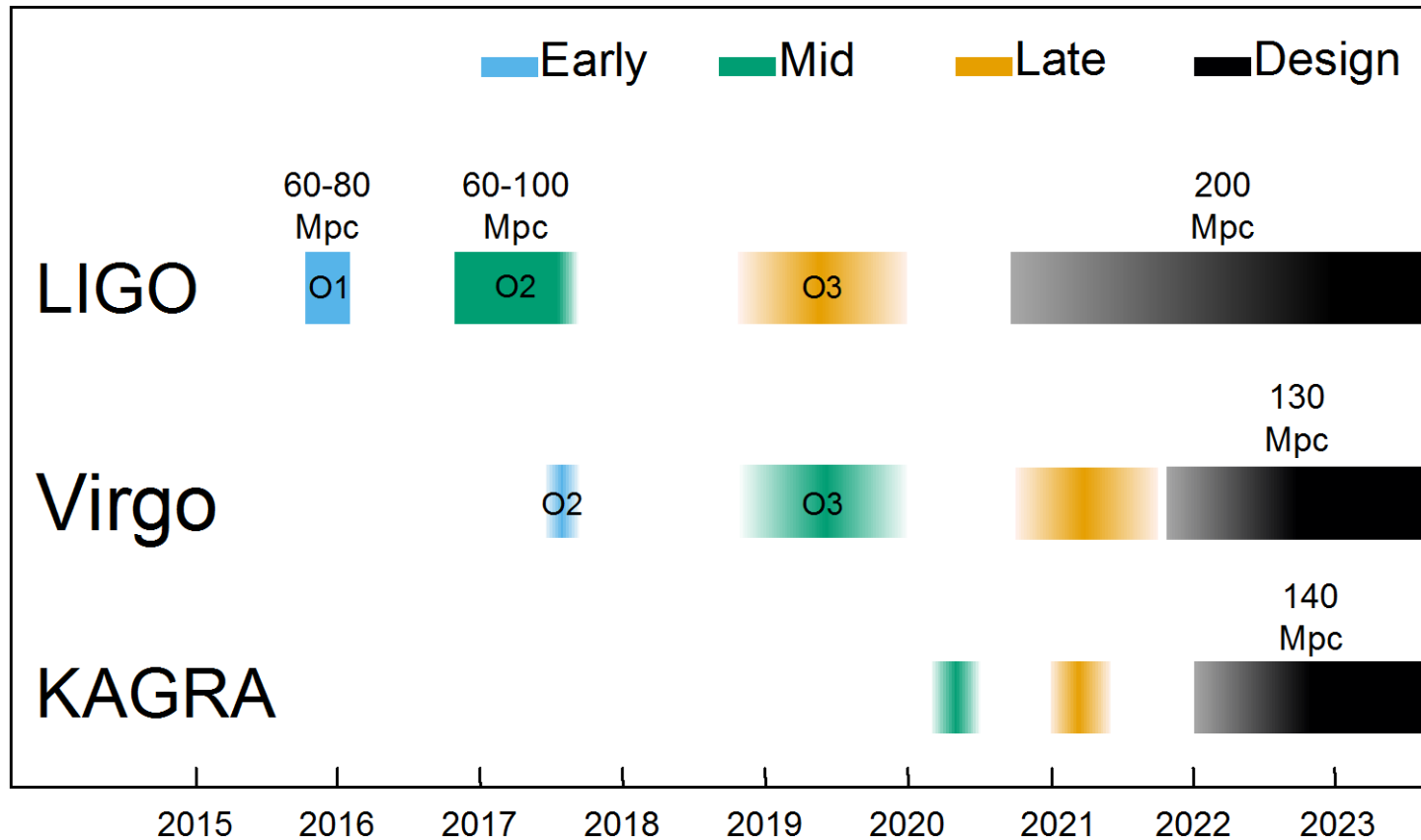


# Conclusions

- 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<sup>er</sup> août 2017**
    - Deux découvertes supplémentaires annoncées
      - ◆ **GW170814** : Première triple détection publiée
      - ◆ **GW170817** : Première détection d'une fusion d'étoiles à neutrons  
+ astronomie multi-messagers
- Agrandissement du réseau dans les prochaines années
  - **KAGRA** (Japon) devrait rejoindre LIGO & Virgo avant la fin de la décennie
  - Peut-être un 3<sup>ème</sup> détecteur LIGO (**LIGO-India**) d'ici une dizaine d'années
- **La sensibilité des détecteurs actuels permet de détecter des ondes gravitationnelles**
  - Améliorations encore nécessaires pour atteindre les sensibilités nominales
    - **Programme d'amélioration en cours jusqu'à l'automne 2018**
  - Activités R&D en cours pour préparer la 3<sup>ème</sup> 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

