

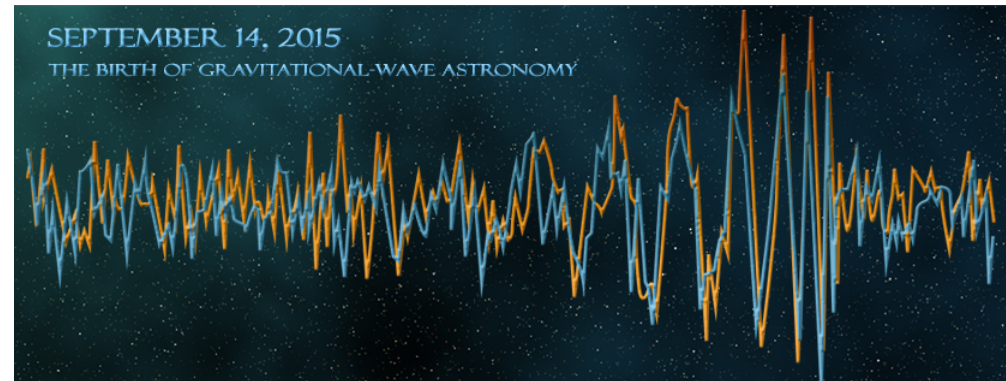
# Détecter les Ondes Gravitationnelles

10 mai 2017

Stage Cosmos à l'Ecole – CPPM

**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)



 EGO EUROPEAN GRAVITATIONAL OBSERVATORY

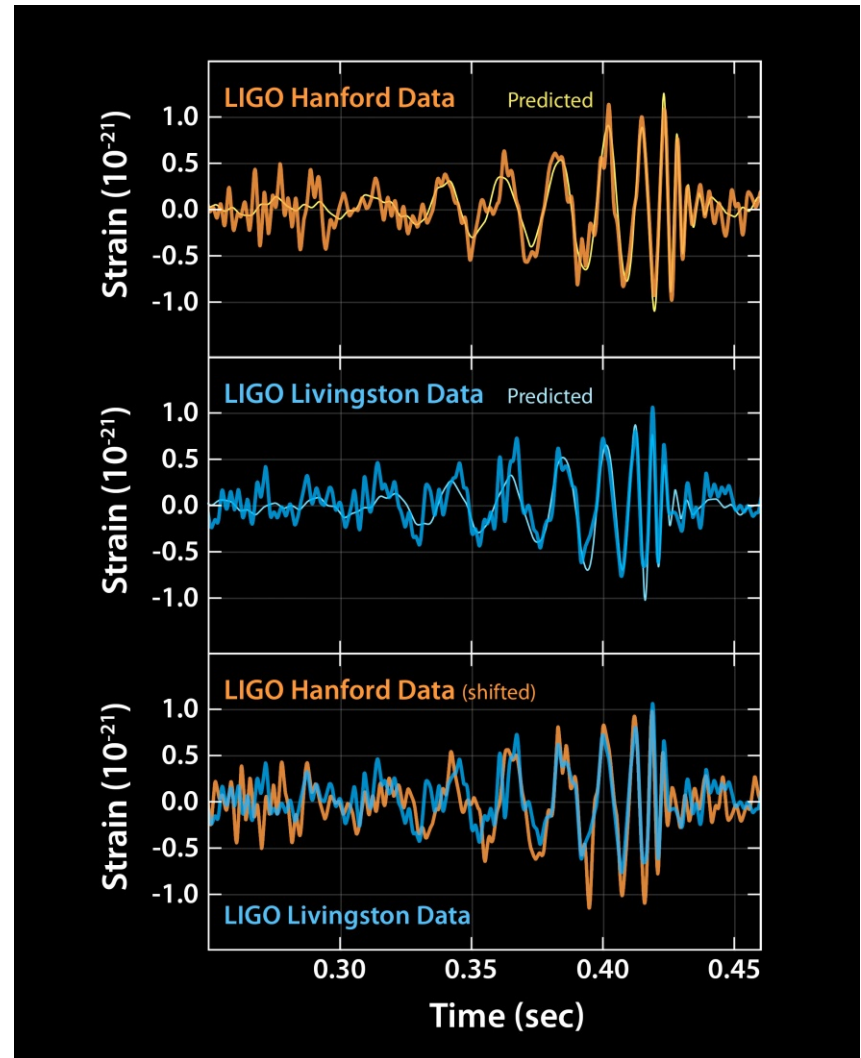


 LABORATOIRE DE L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE

 UNIVERSITÉ PARIS SUD  
université PARIS-SACLAY

# Plan

- La **découverte** en bref : **GW150914**
- La saga des **ondes gravitationnelles**
- **Comment les détecter ?**
  - **Interféromètres géants suspendus**  
→ **Virgo**
- Les événements **GW150914** et **GW151226**
- **Et maintenant ?**
  - Une **nouvelle fenêtre sur l'Univers**
  - Statut actuel des détecteurs
- Conclusion



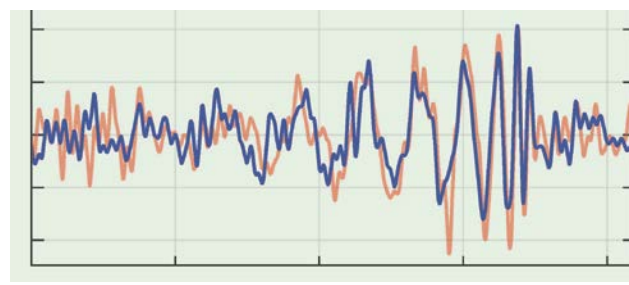
*Merci à tous mes collègues du groupe Virgo du LAL et des collaborations Virgo et LIGO, auxquels j'ai emprunté des idées et du matériel pour cette présentation*

# **La découverte en bref : GW150914**

# 14 septembre 2015, 11:51 heure de Paris

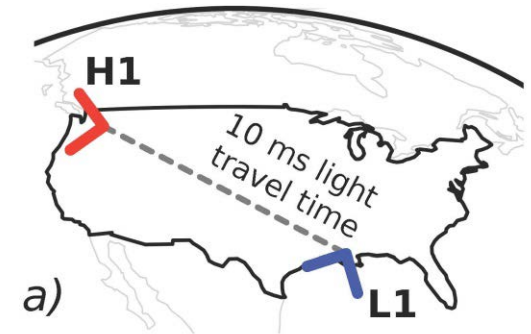
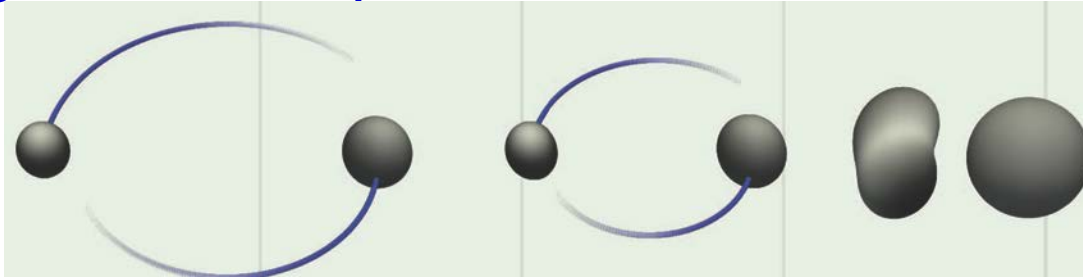
- **Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle**

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



Evénement baptisé **GW150914**

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



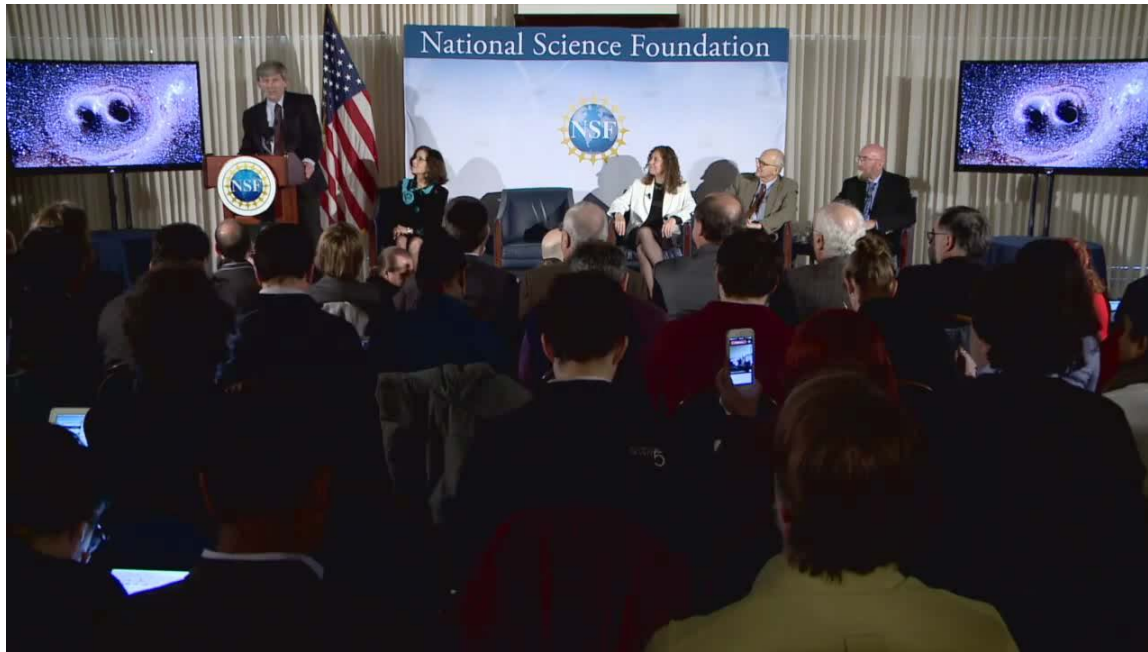
**LIGO Hanford**

**Etat de Washington, USA**



**LIGO Livingston Louisiane, USA**

# 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

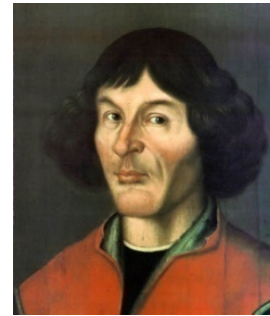
# **La saga des ondes gravitationnelles**

# La mécanique céleste

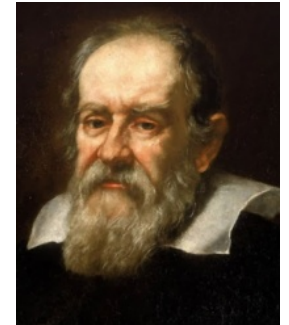
- Modèle **géo**centrique du système solaire (II<sup>ème</sup> siècle de notre ère) de **Ptolémée**
  - La Terre est au centre
  - Tous les « astres voyageurs » orbitent autour d'elle **selon des empilements complexes de sphères**



- Première remise en cause sérieuse : le modèle **héli**centrique 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

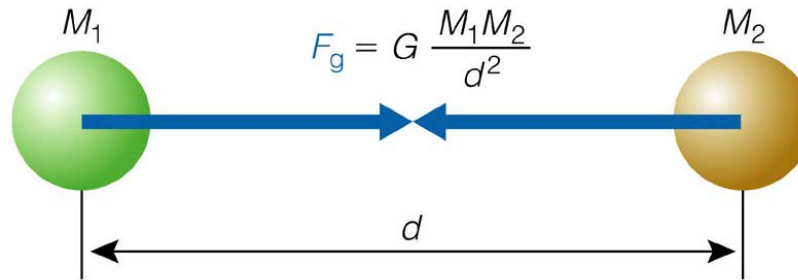
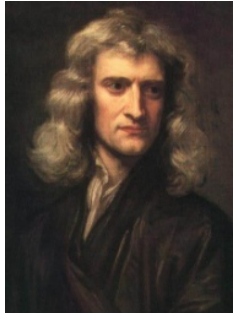




# Loi de la gravitation universelle

« 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)

# Loi de la gravitation universelle

- Cas particulier : l'une des masses est très grande par rapport à l'autre :  $M \gg m$ 
  - Exemples : mouvement de la Terre autour du Soleil  
satellite en orbite terrestre→ Mouvement quasi-circulaire

- **Vitesse de satellisation**

- Mise en orbite autour du corps de masse  $M$  situé à une distance  $r$   
→ 7,9 km / s sur Terre

$$v_{\text{sat}} = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

- **Vitesse de libération**

- Vitesse à atteindre pour échapper à l'attraction du corps de masse  $M$   
→ 11,2 km / s pour la Terre  
→ 42,1 km / s pour le Soleil  
(orbite au niveau de la Terre)

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

- $v_{\text{sat}}$  et  $v_{\text{lib}}$  sont indépendantes de la masse  $m$  et proportionnelles

# 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)

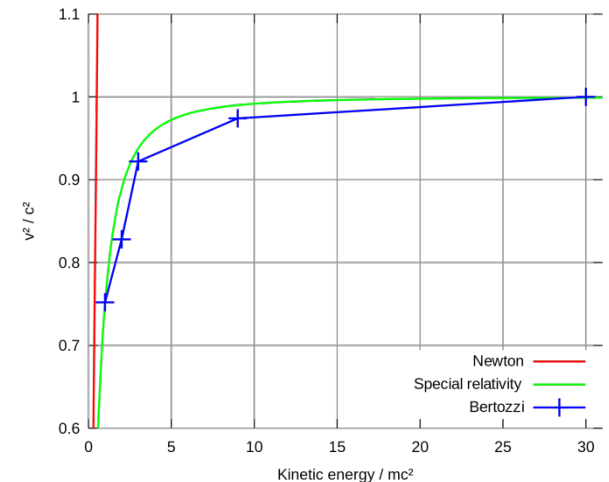
- de Laplace (1796)

} 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

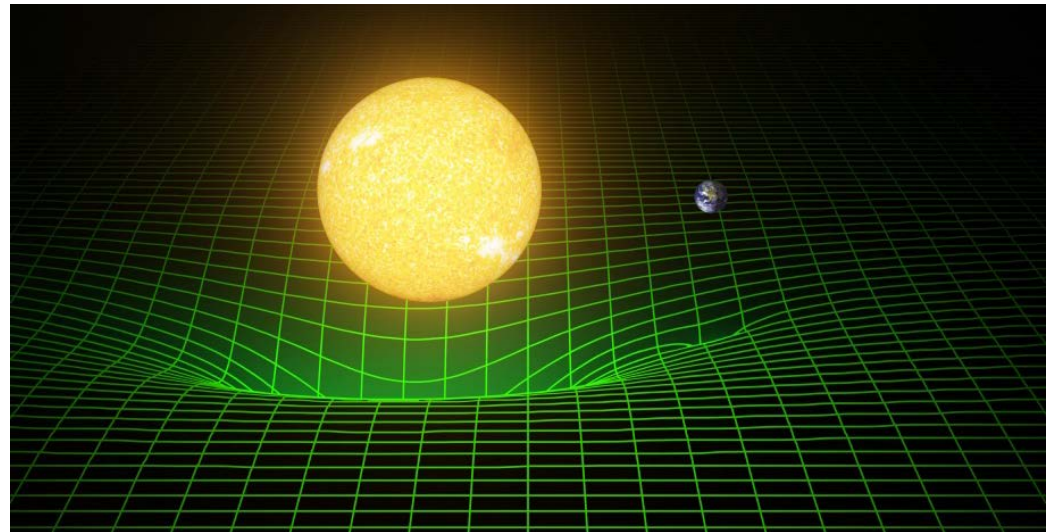
- **Attention : « compact » et « dense » sont deux choses différentes**
  - « Densité » d'un trou noir

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

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

# 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)



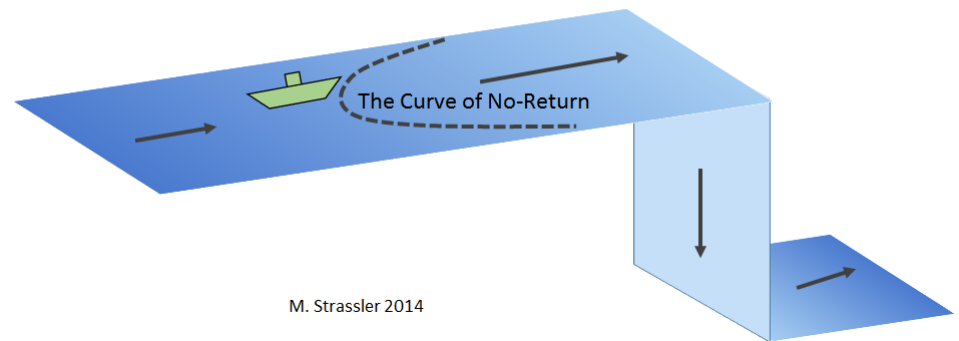
Gravitation ↔ Courbure de l'espace-temps  
Courbure de l'espace temps ↔ Densité d'énergie

- **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**

# Trous noirs

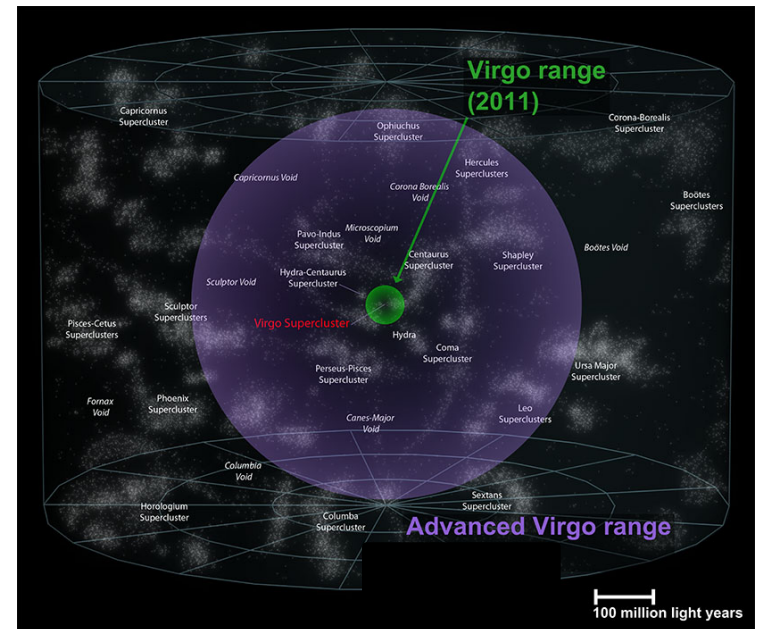
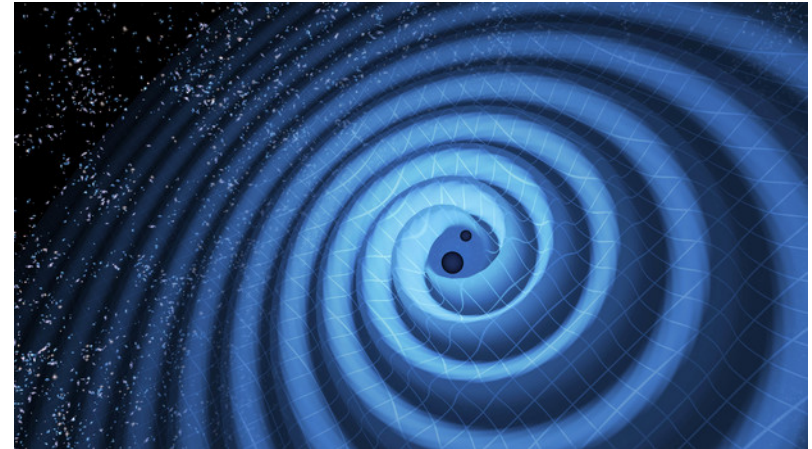
- Une région de l'espace-temps dans laquelle la gravitation est si forte que rien, pas même la lumière, ne peut ressortir de son horizon
- Formés par l'effondrement d'étoiles massives à cours de combustible nucléaire
- Peut grossir en accréant de la matière
  - On pense que la plupart des galaxies abritent 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



# Les ondes gravitationnelles

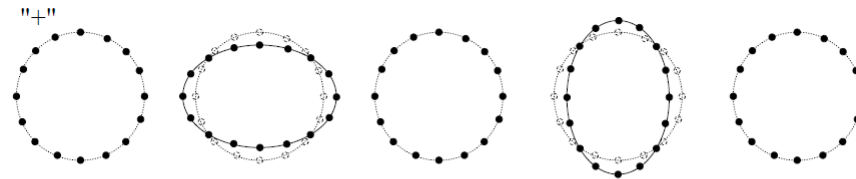
- Une des premières prédictions de la relativité générale (1916)
    - Les masses accélérées induisent des perturbations de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière
  - Pas d'émission d'ondes gravitationnelles (OG) si la source est axisymétrique
    - Une « bonne » source doit avoir 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)



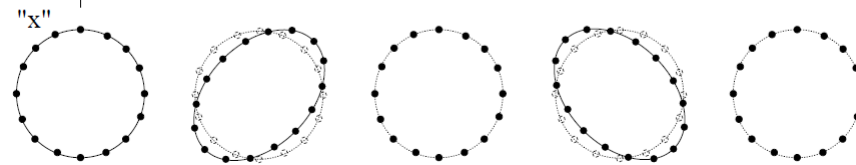
# Effet d'une onde gravitationnelle

- Effet des deux polarisations sur un anneau de « masses test »
  - Variations opposées dans deux directions perpendiculaires

- Polarisation « + »

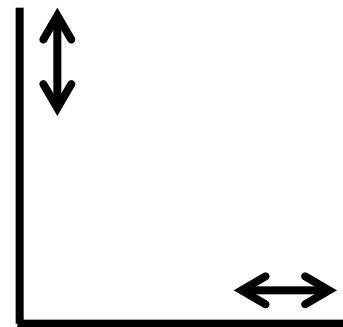


- Polarisation « × »



Une période

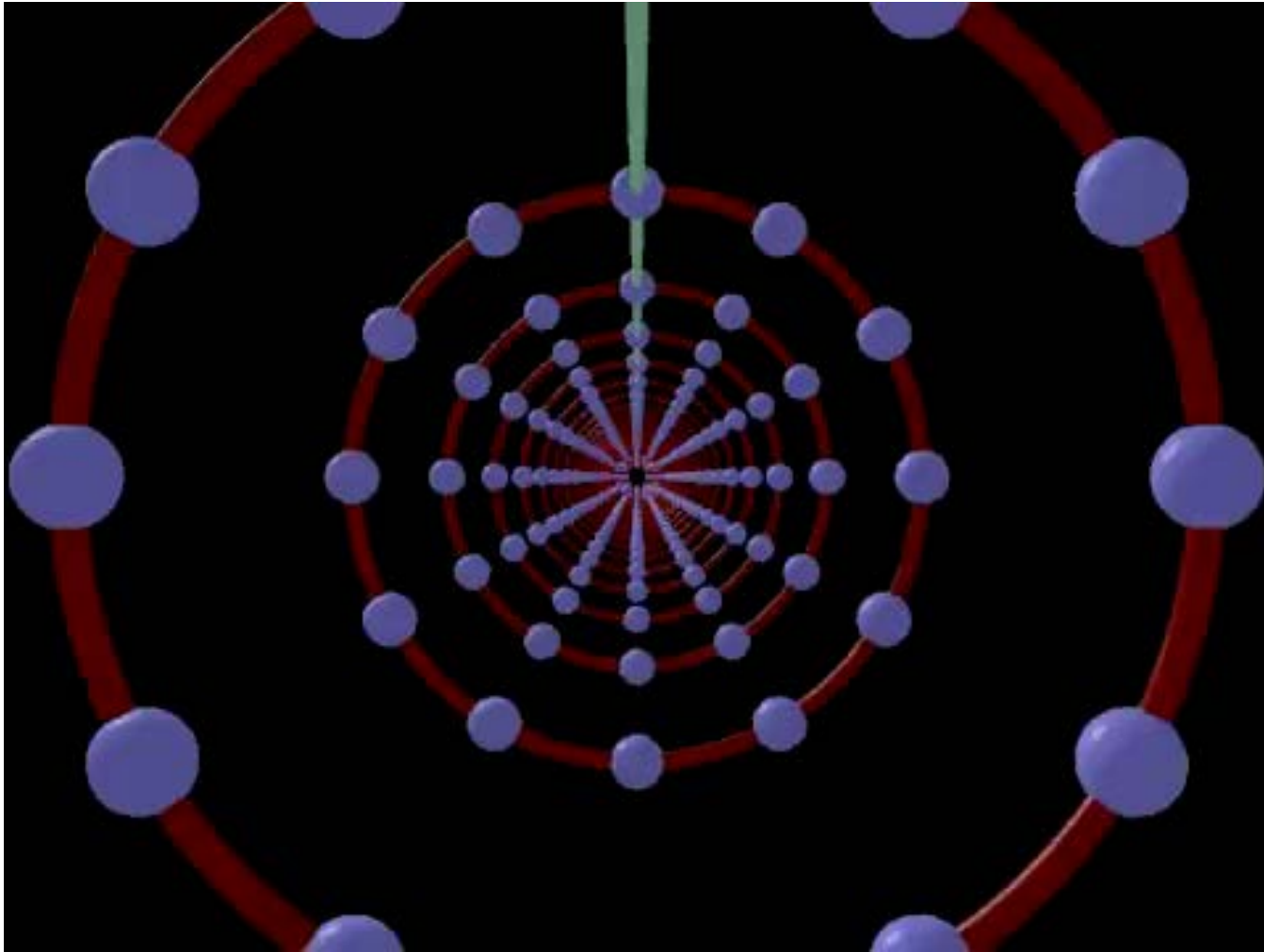
→ Idée : utiliser un détecteur capable de mesurer la différence entre deux longueurs à angle droit ...





# Effet d'une onde gravitationnelle

- En trois dimensions



# Une grande variété de sources

- Classification en terme de

- Durée du signal

- Gamme de fréquence

- Forme d'onde :

- connue/inconnue

- Autres signaux émis simultanément ? Ondes électromagnétiques, neutrinos, etc.

- Coalescence d'un système binaire – « fusion » de deux astres compacts

- Les derniers instants de l'évolution d'un système comme PSR B1913+16

- Les astres compacts se rapprochent à mesure qu'ils perdent de l'énergie (→ OG)

- Trois phases distinctes: « spirale », « fusion » et « désexcitation »

- Modélisées par des calculs analytiques et des simulations numériques

- Sources transitoires (« bursts »)

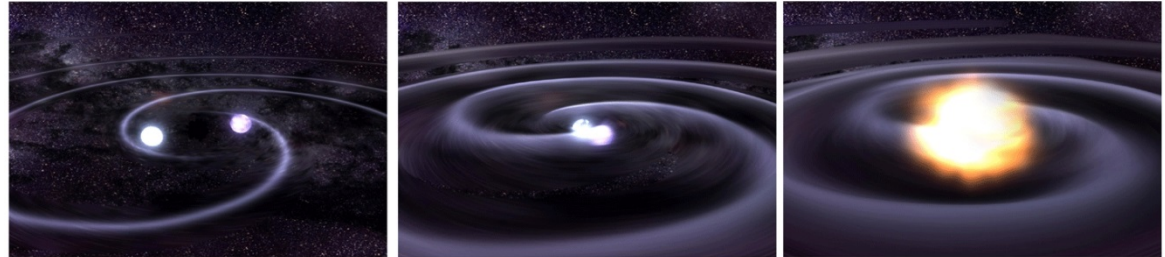
- Effondrement de cœurs d'étoiles (supernovae)

- Sources permanentes

- Pulsars

- Fonds « stochastiques »

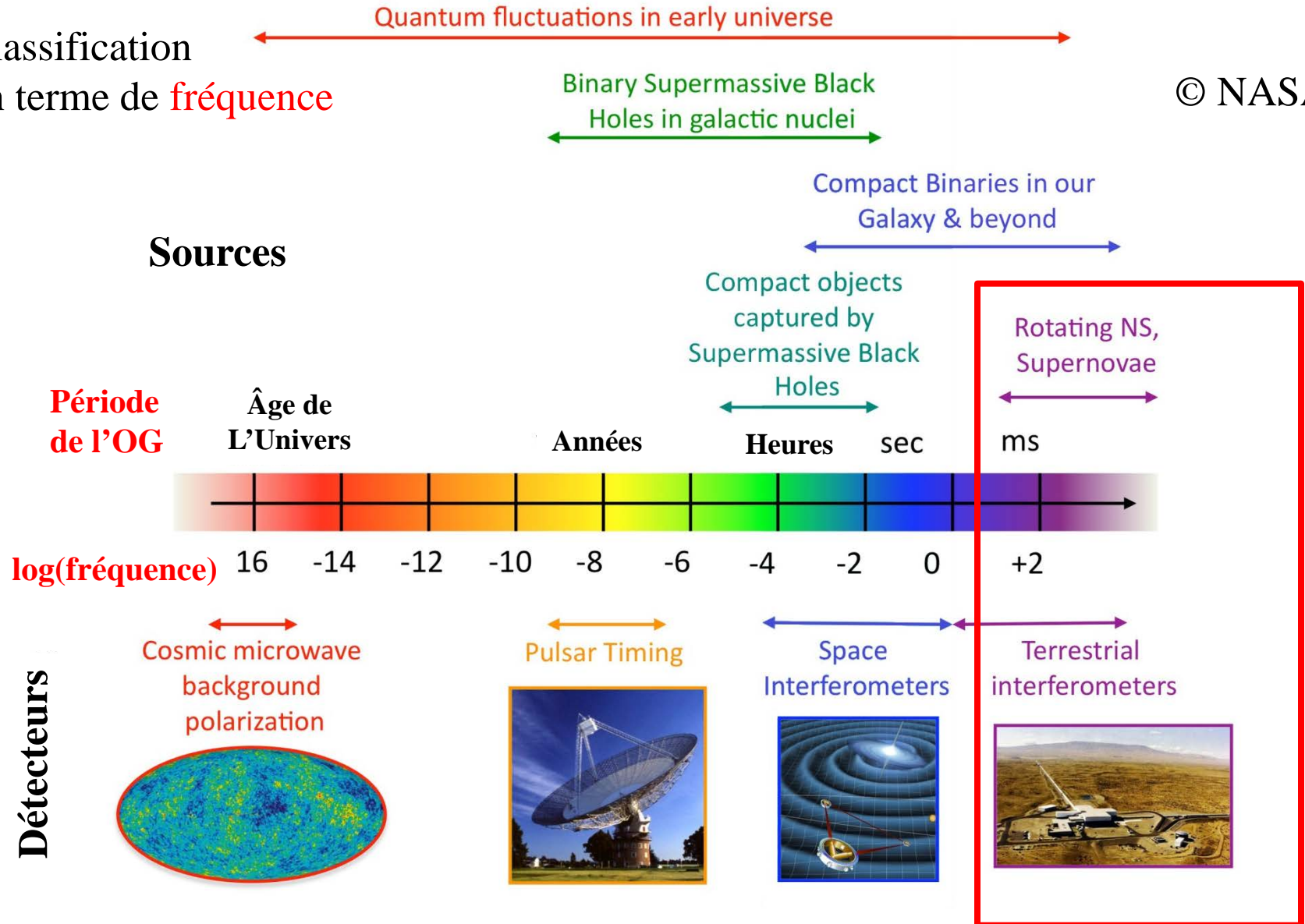
- Probablement beaucoup d'autres sources encore inconnues ...



# Le spectre des ondes gravitationnelles

- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



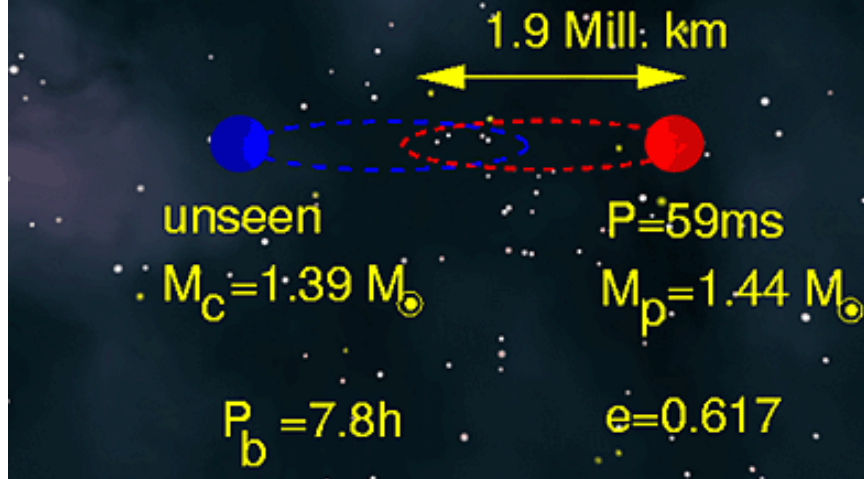
# Détecter les ondes gravitationnelles

# 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

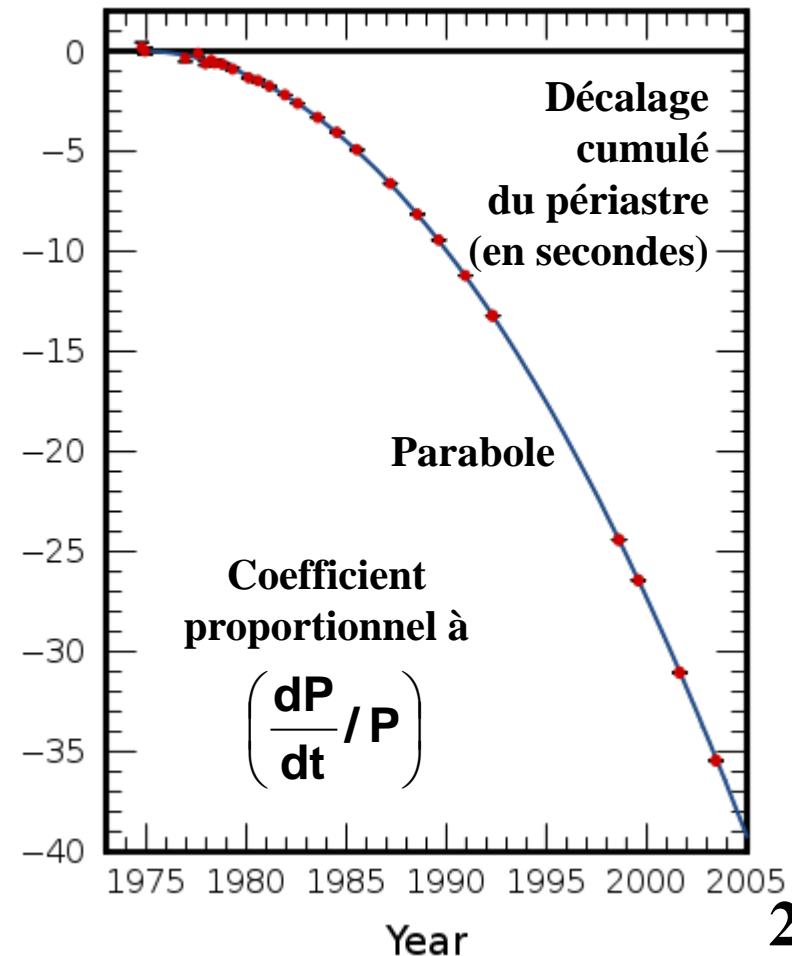
© Manchester University



- 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



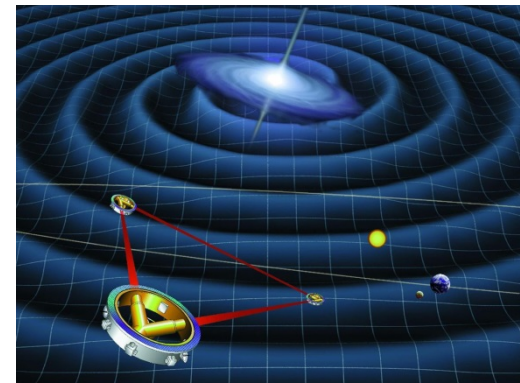
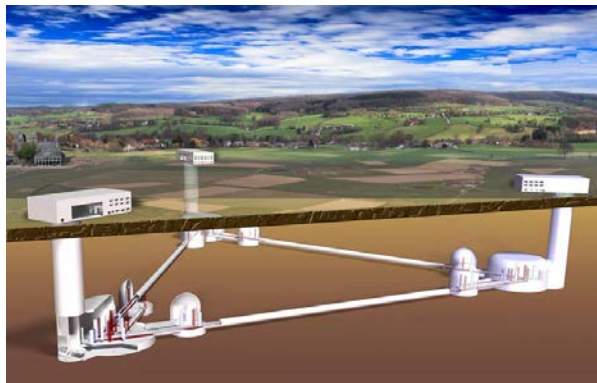
# Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

- **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
  - **Démarrage des détecteurs de 2<sup>ème</sup> génération** (« avancés »)
    - Etudes préliminaires pour la 3<sup>ème</sup> génération de détecteurs (**Einstein Telescope**)
- **Chronométrage des pulsars** « **Pulsar Timing Array** » (<http://www.ipta4gw.org>)
  - Modulation des temps d'arrivée des signaux émis par des pulsars galactiques millisecondes due à des OGs très basses fréquences

- **Dans l'espace**

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



# 1916-2016: un siècle de progrès

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

## **1957 : Conférence de Chapel Hill**

- **1963 : Trous noirs de Kerr**

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

(Bondi, Feynman, Pirani, etc.)

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



# La Collaboration Virgo

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



# La Collaboration Virgo

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



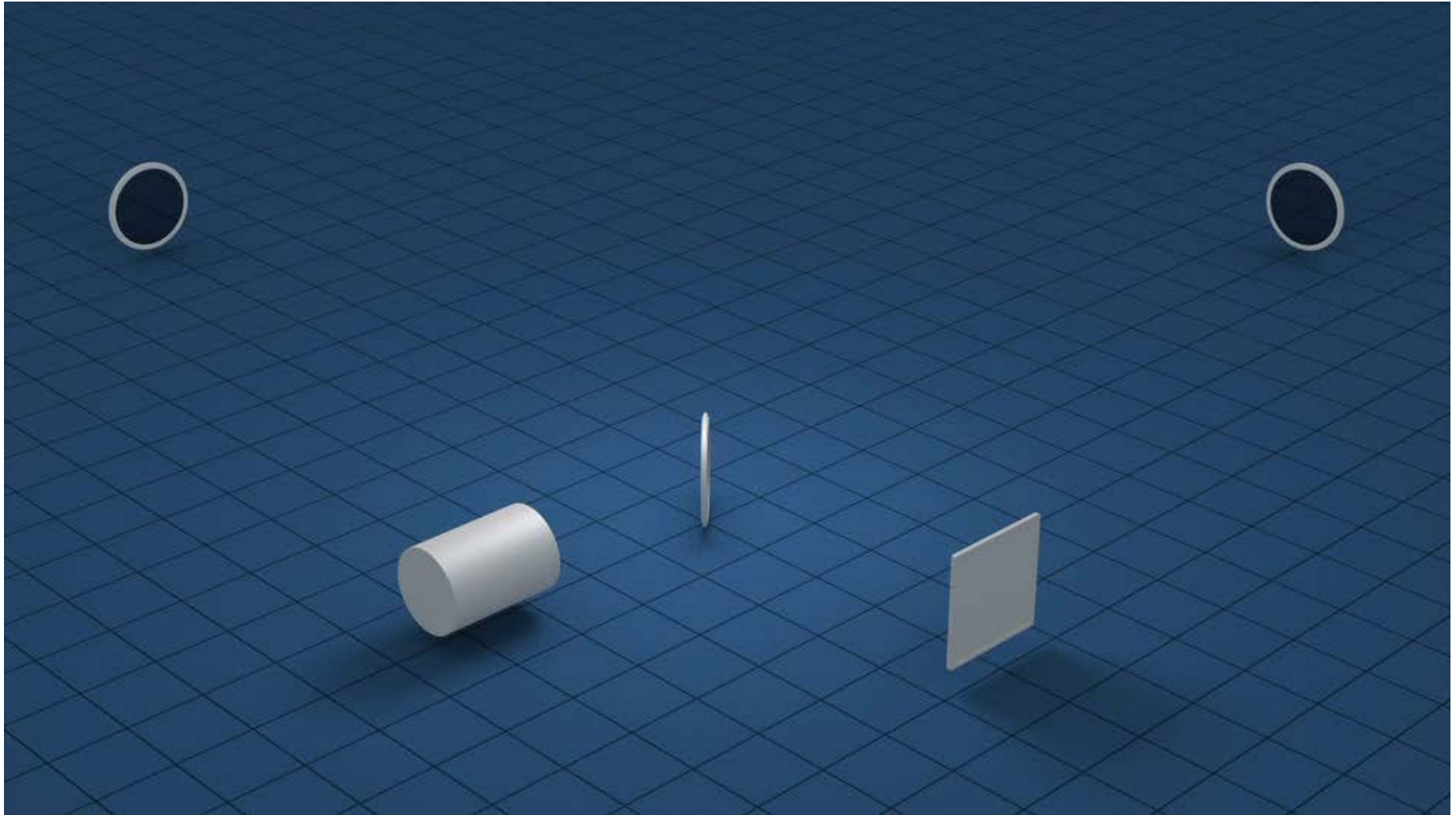
**APC Paris**  
**ARTEMIS Nice**  
**EGO Cascina**  
**INFN Firenze-Urbino**  
**INFN Genova**  
**INFN Napoli**  
**INFN Perugia**  
**INFN Pisa**  
**INFN Roma La Sapienza**  
**INFN Roma Tor Vergata**  
**INFN Padova**  
**INFN TIFPA**  
**LAL Orsay – ESPCI Paris**  
**LAPP Annecy**  
**LKB Paris**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

# Un 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**
- **2017** : **Première prise de données** de « Virgo Avancé »



# Principe de fonctionnement

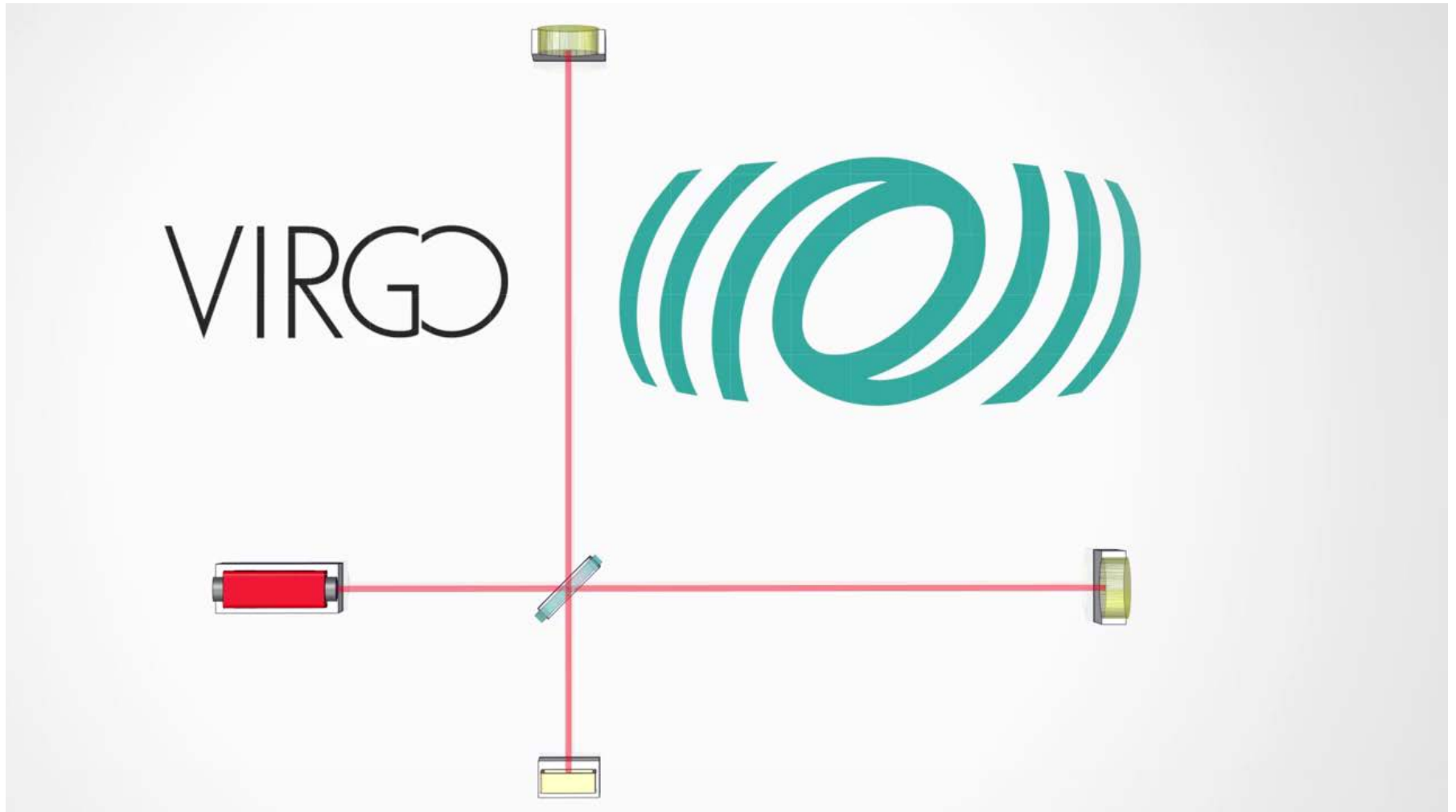


$$\underbrace{\text{Sensibilité}}_{\infty} \propto \frac{1}{(\text{longueur des bras}) \times \sqrt{\text{puissance laser}}}$$

Valeurs très petites

# Un détecteur réel : Virgo avancé

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



# Une T.G.I.R.

*Très Grande Infrastructure de Recherche*

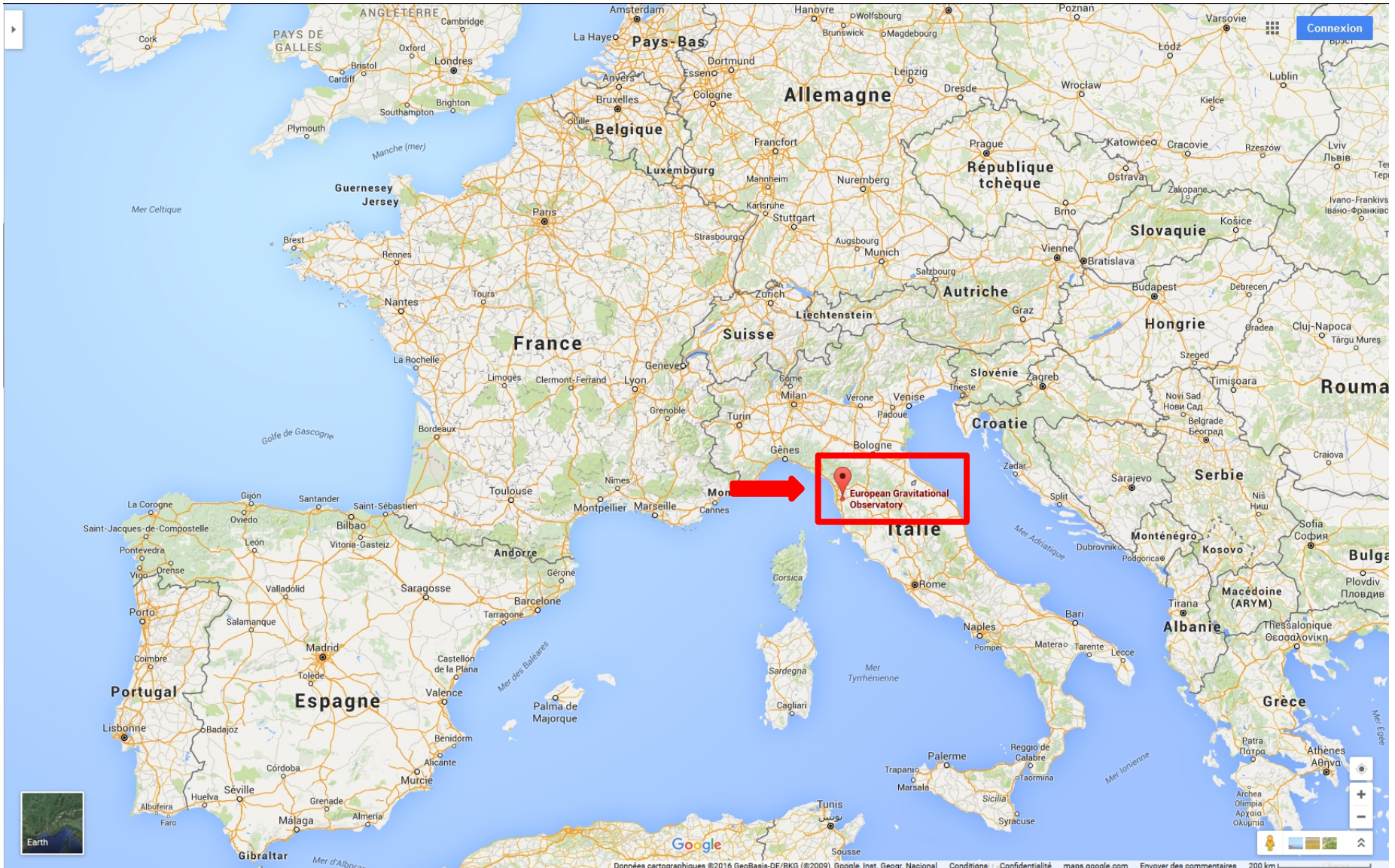
Tour de Pise

Aéroport de Pise  
Longueur du tarmac : 3 km

Zoom

Virgo

# Où est Virgo ?



# Virgo vu du ciel





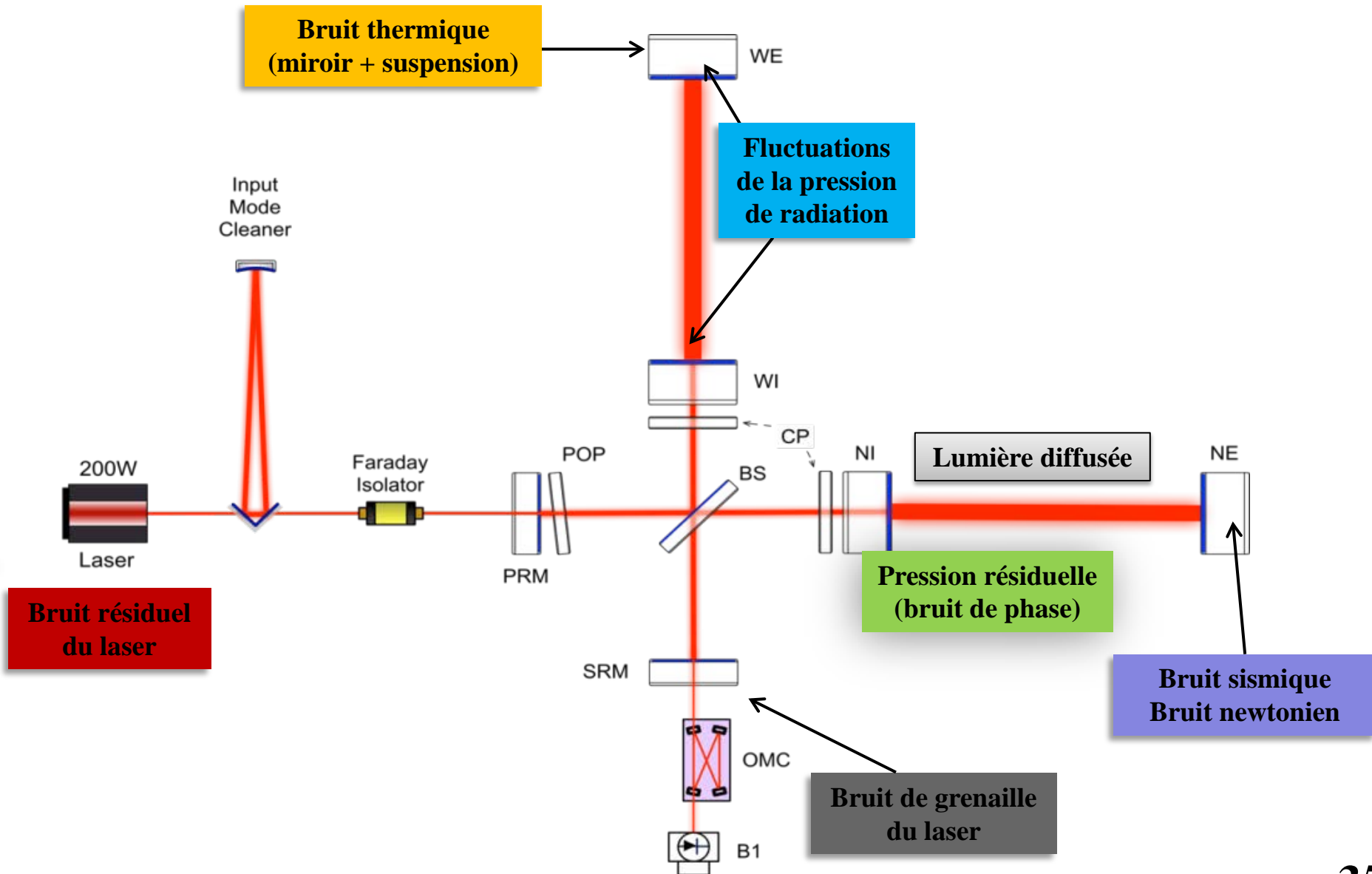
# Si Virgo était à Luminy ...



# Bruits et sensibilité

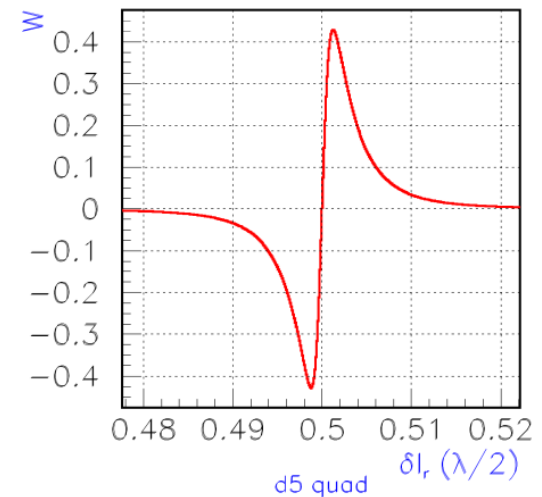
- **Bruit** : toute perturbation parasite (quelle que soit son origine) qui pollue le signal en sortie de l'ITF et donc impacte la détection d'une OG potentielle
- **Le niveau de bruit de l'ITF varie en fonction de la fréquence**
  - On peut détecter une OG de fréquence  $f$  donnée si son amplitude  $h$  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



# Contrôler l'interféromètre

- **Sensibilité**  $\Leftrightarrow$  maintenir l'ITF à son point de fonctionnement
  - Cavités optiques de stockage en résonance  
+ interféromètre sur la frange noire
  - Contrôle des longueurs des cavités au niveau de  $10^{-12}$  m
  - Contrôle de l'alignement des cavités au niveau de  $10^{-9}$  rad
- Un problème très complexe
  - Décomposé en plusieurs étapes successives  
Mouvement libre des miroirs  $\rightarrow$  Contrôle local  $\rightarrow$  Contrôle global
  - Utilisation de « signaux d'erreur » pour mesurer l'écart à la configuration de référence du détecteur  
 $\rightarrow$  Calcul et application de corrections  
(positions, angles) au niveau des miroirs
  - **Boucles de contrôle** : de quelques Hz à quelques kHz
  - **Limitations** : bande passante des contrôles et performances des actionneurs qui appliquent les corrections calculées aux suspensions des miroirs



# De la 1<sup>ère</sup> à la 2<sup>nde</sup> génération de détecteurs

- But : améliorer d'un facteur 10 la sensibilité des détecteurs
  - Augmentation d'un facteur 1000 du volume d'Univers observable !
  - Augmentation significative des taux d'événements attendus
    - A grande échelle, l'Univers est isotrope et uniforme
- Pour y parvenir : des améliorations très variées
  - Augmentation de la puissance du laser
  - Miroirs deux fois plus lourds
  - Augmenter la taille du faisceau incident sur ces grands miroirs
  - Suspensions spéciales pour les miroirs
  - Amélioration du niveau de vide dans les tubes des bras kilométriques
  - Vapeur d'eau piégée par des trappes cryogéniques aux extrémités des bras
  - Instrumentation et bancs optiques sous vide
- LIGO Avancé (aLIGO) financé ~un an avant Virgo Avancé (AdV)
  - Crise financière en 2008-2010...
  - Première prise de données « d'observation » aLIGO en septembre 2015
  - Mise à jour d'AdV toujours en cours
    - Démarrage du détecteur en 2017 ...

# Un réseau de détecteurs

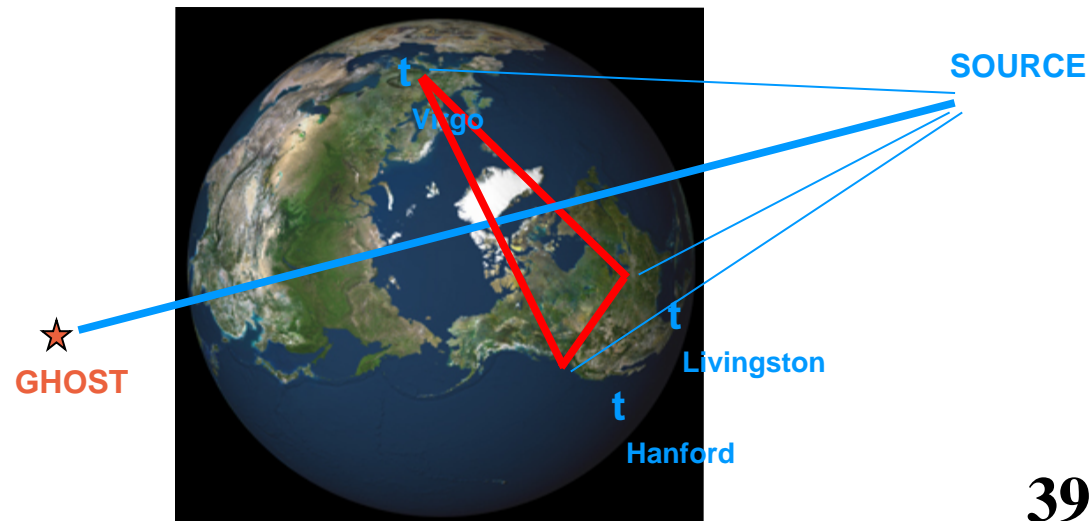
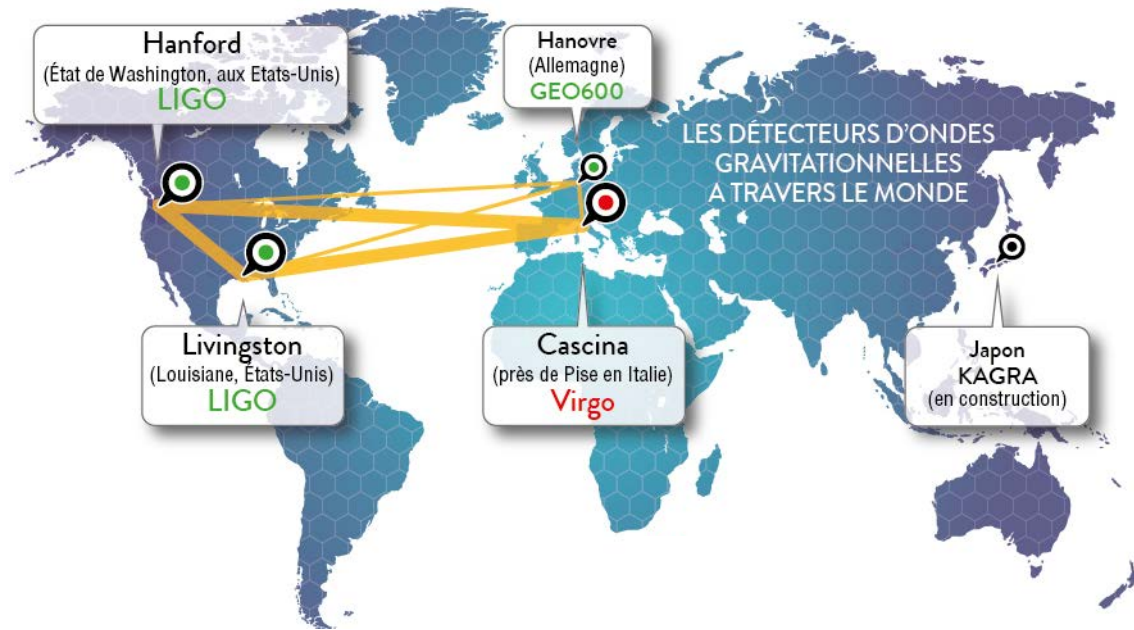


# Un réseau de détecteurs

- 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

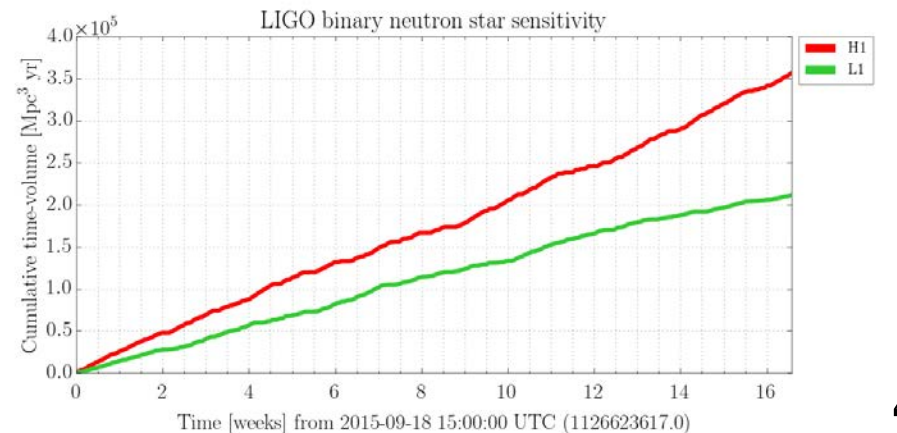
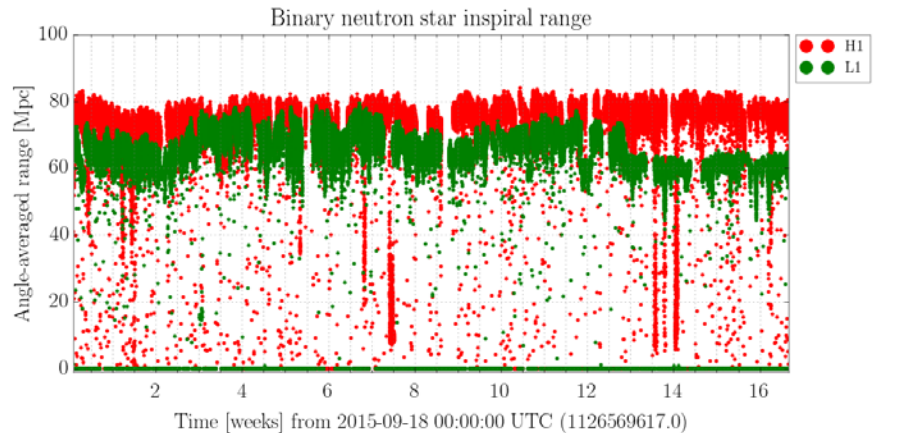
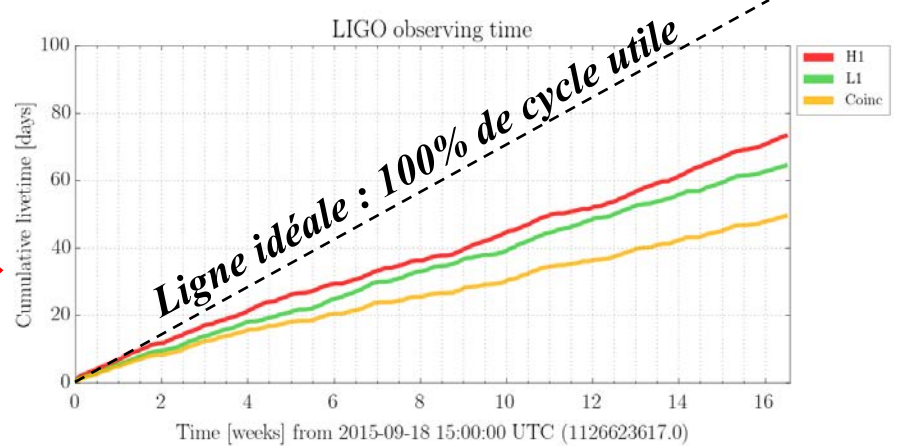


# **Premières détections**



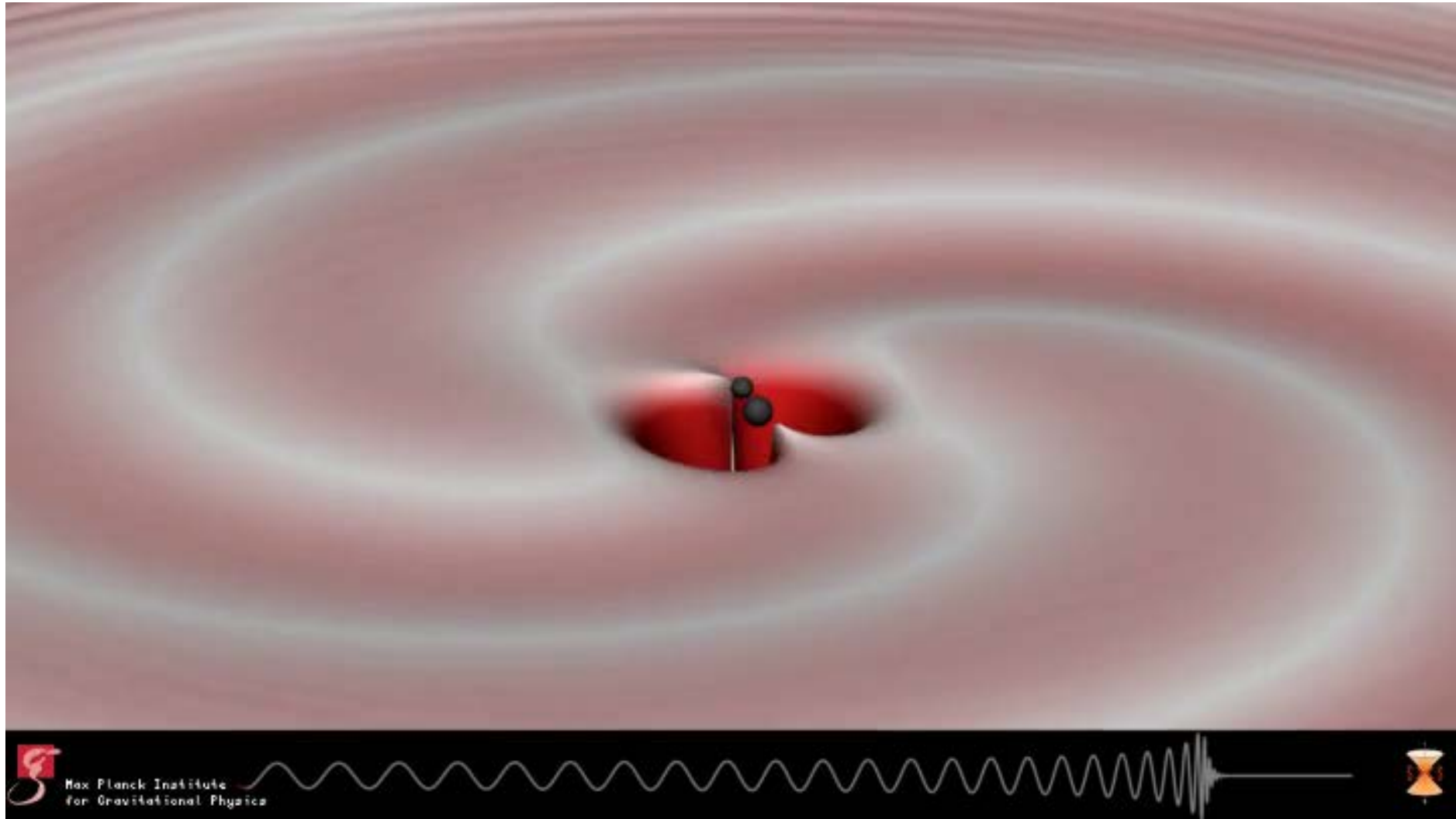
# Prise de données O1

- O1: « prise de données d'Observation 1 »
- Septembre 2015 – Janvier 2016
  - GW150914 enregistré quelques jours avant le démarrage officiel d'O1
  - Sans conséquence : les deux ITFs étaient en fonctionnement nominal
- Graphiques résumant O1
  - Temps d'observation détecteur simple + coïncidence
  - Distance de détection d'un système double d'étoiles à neutrons « horizon »
    - Reflète la sensibilité de l'ITF
  - Sensibilité pour cette même source temps d'observation  $\times$  volume observé
    - Taux d'événements



# **L'événement GW150914**

# Simulation de la fusion des deux trous noirs



# 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

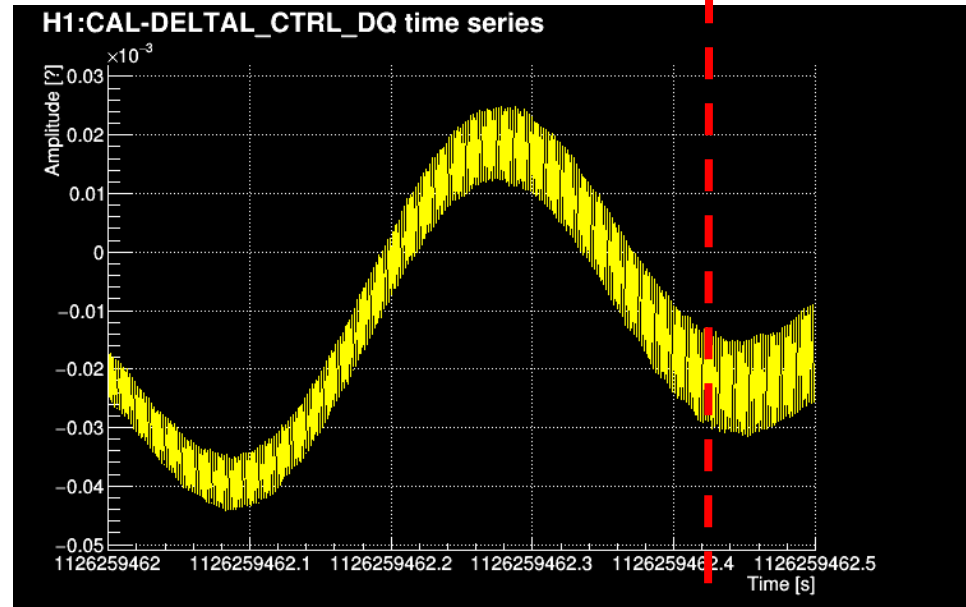
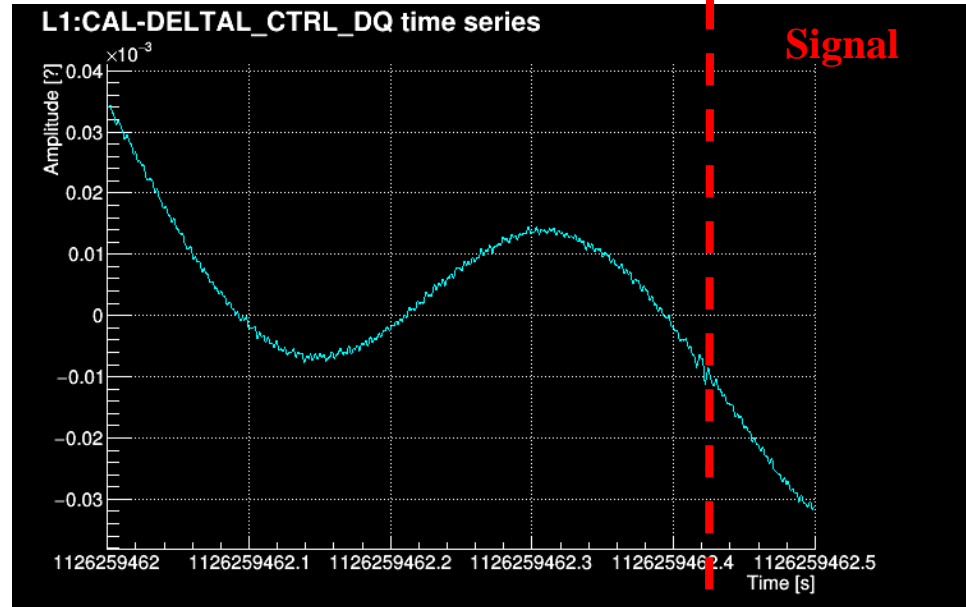
From Marco Drago★  
Subject [CBC] Very interesting event on ER8

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

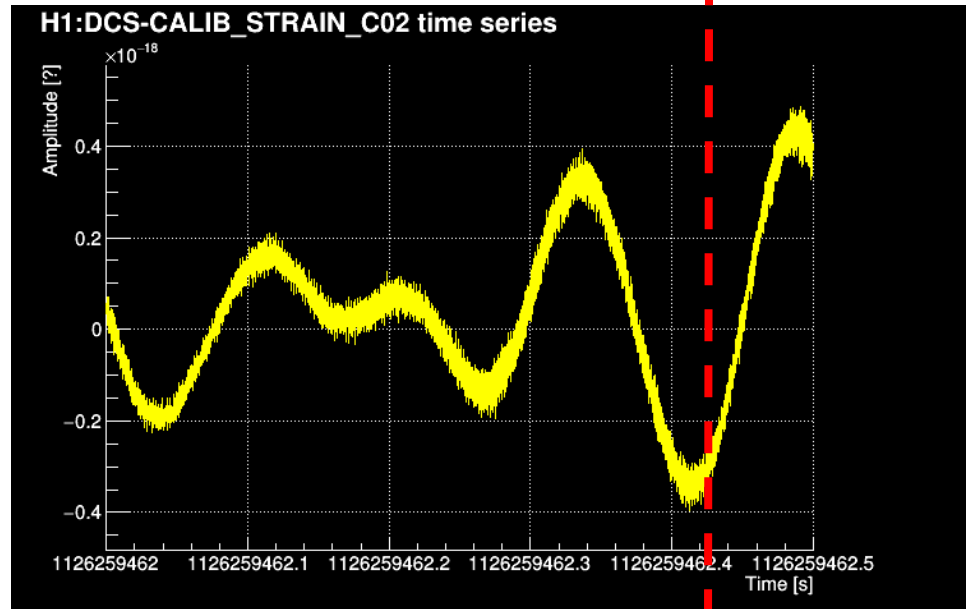
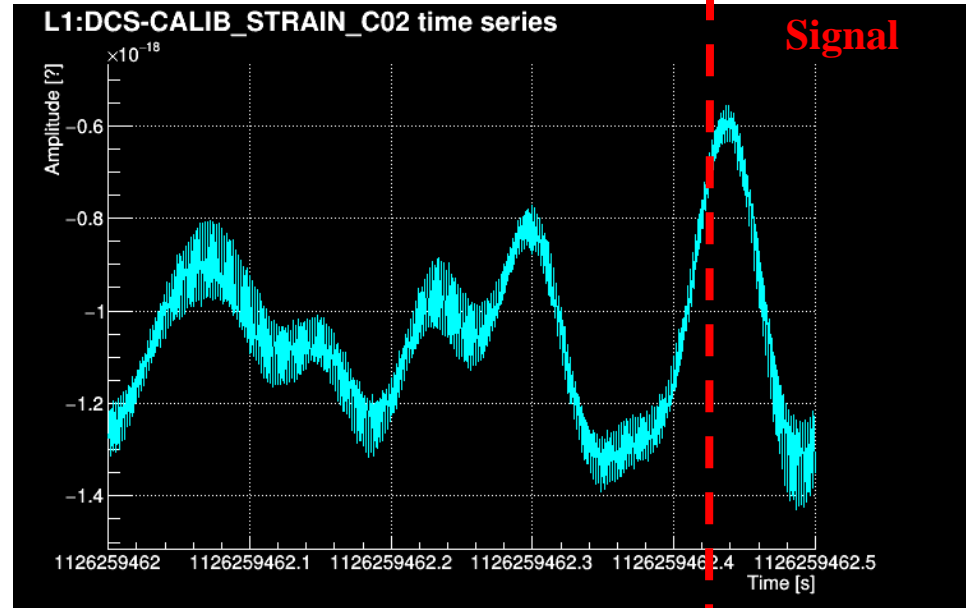
# GW150914: puissance brute

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



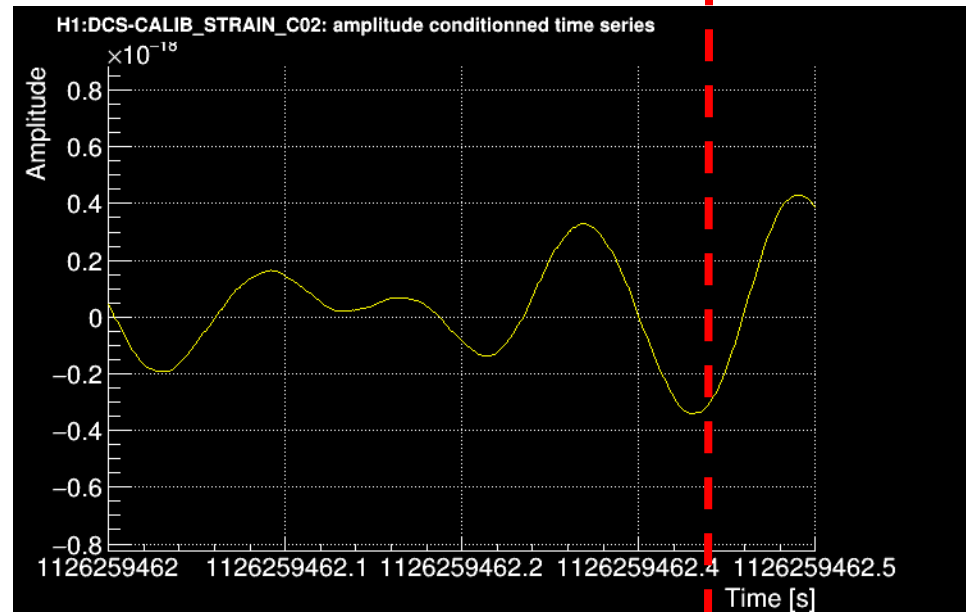
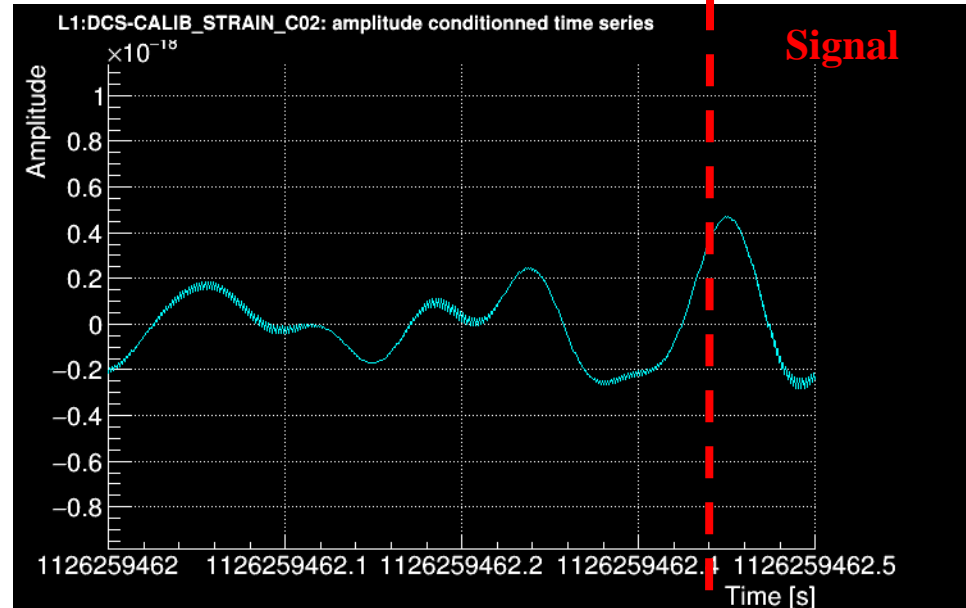
# GW150914: canal h(t) calibré

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



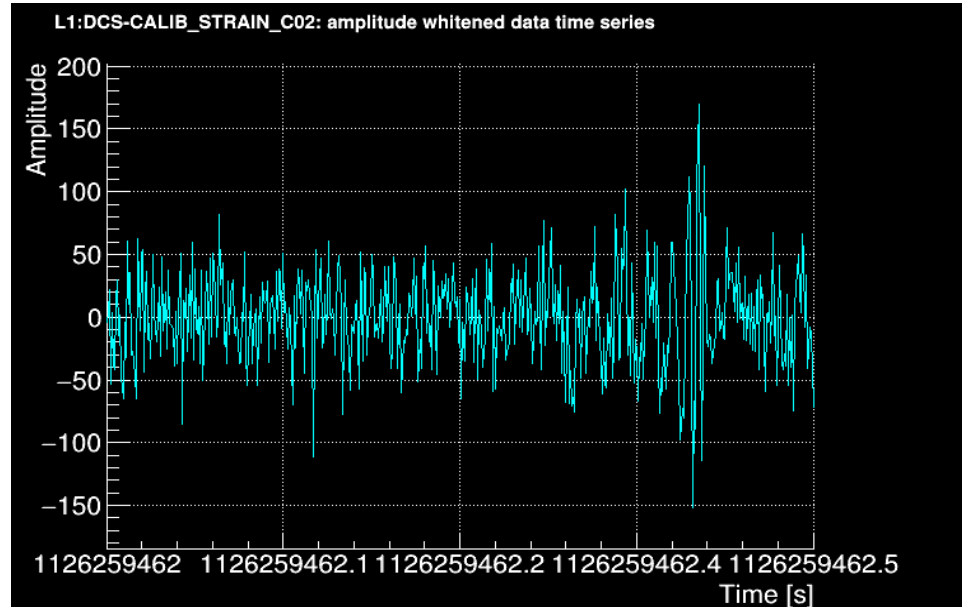
# GW150914: filtrage passe-bande

- 20 Hz  $\rightarrow$  500 Hz

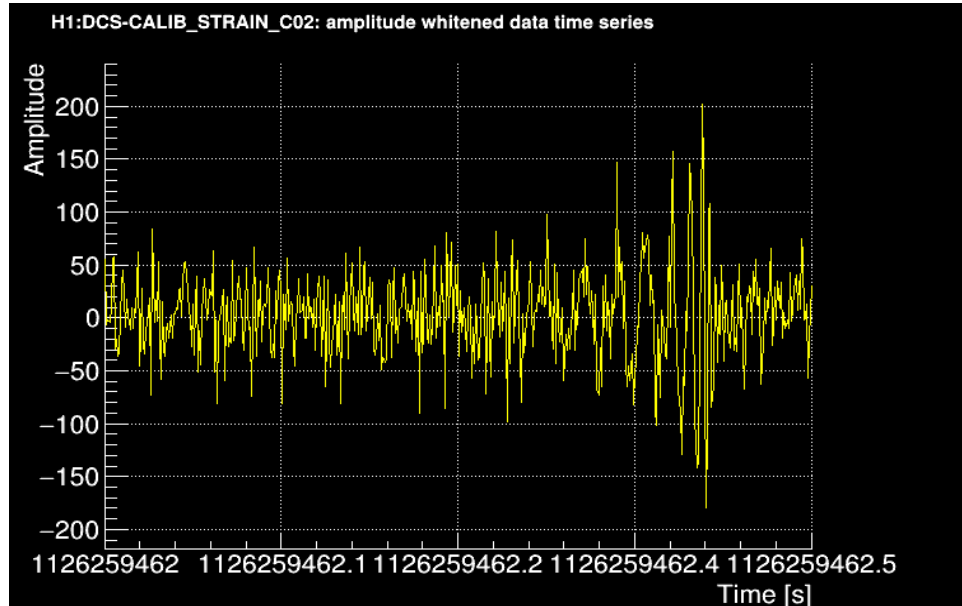


# GW150914: données « blanchies »

- 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)



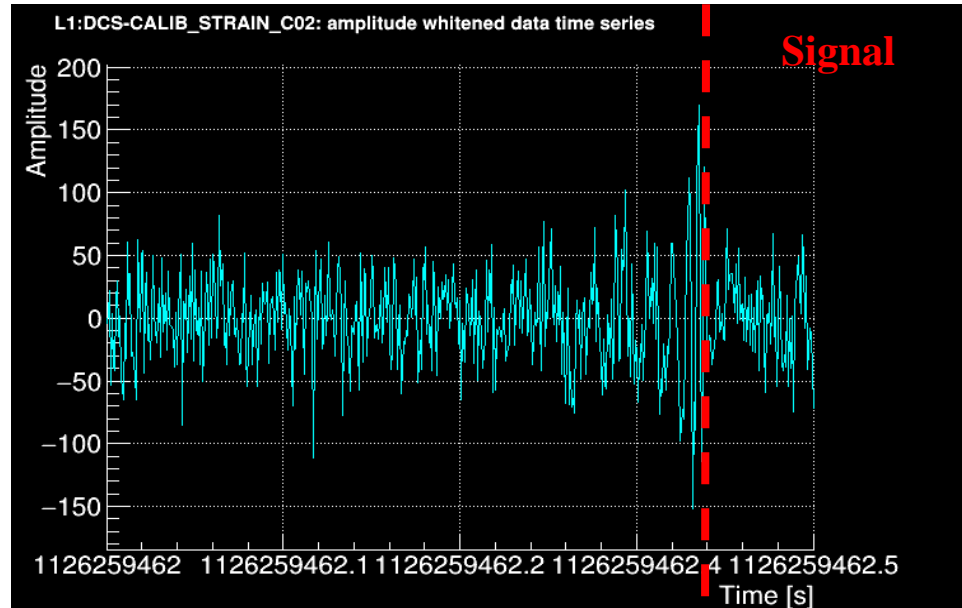
- $\pm 20$  nW pic-pic en sortie de l'interféromètre
- A comparer avec la puissance incidente sur la lame séparatrice :  $\sim 500$  W



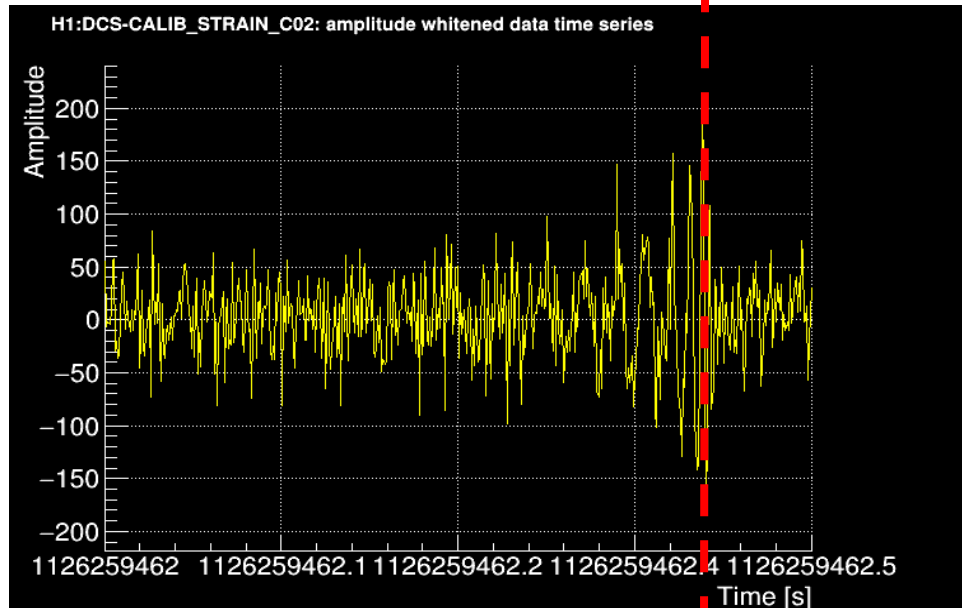


# GW150914: données « blanchies »

- 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)

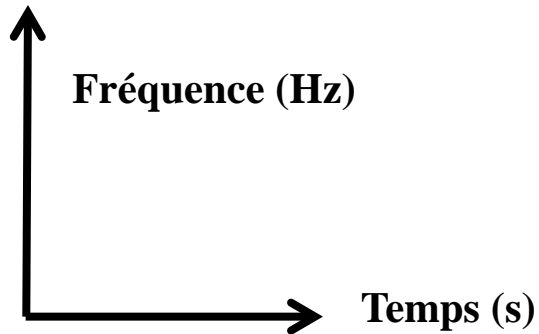


- $\pm 20$  nW pic-pic en sortie de l'interféromètre
- A comparer avec la puissance incidente sur la lame séparatrice :  $\sim 500$  W

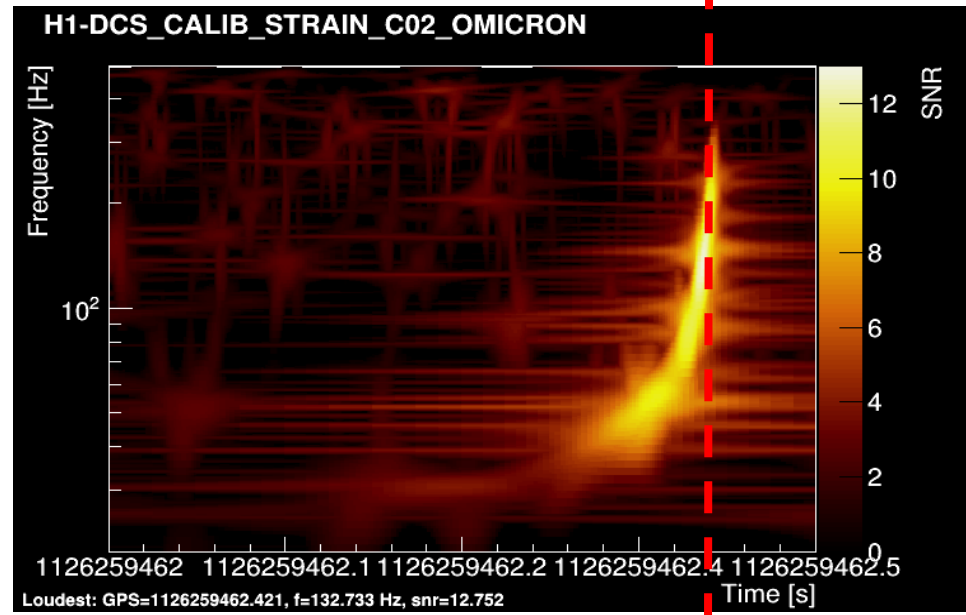
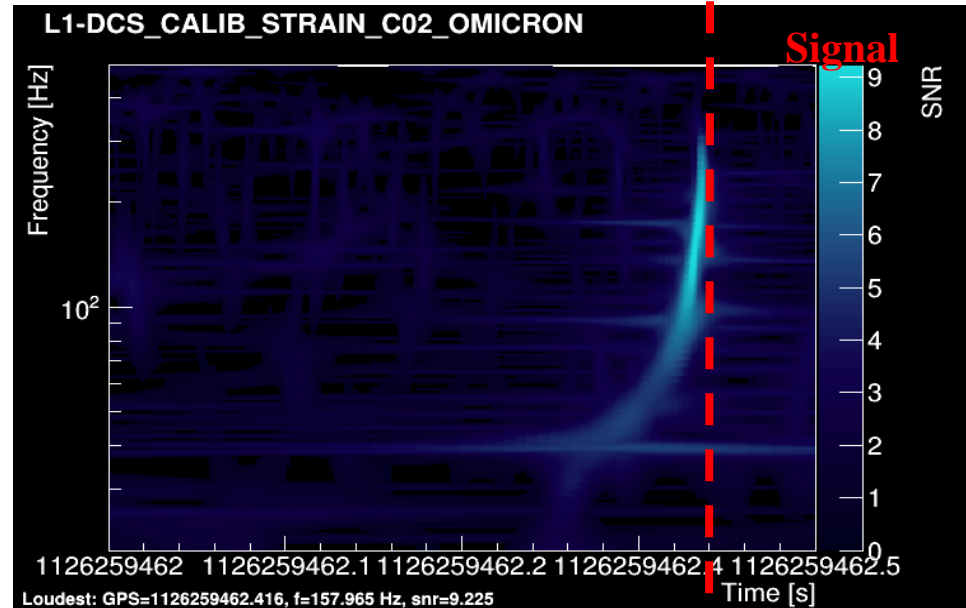


# GW150914: spectrogrammes

- Cartes temps-fréquence

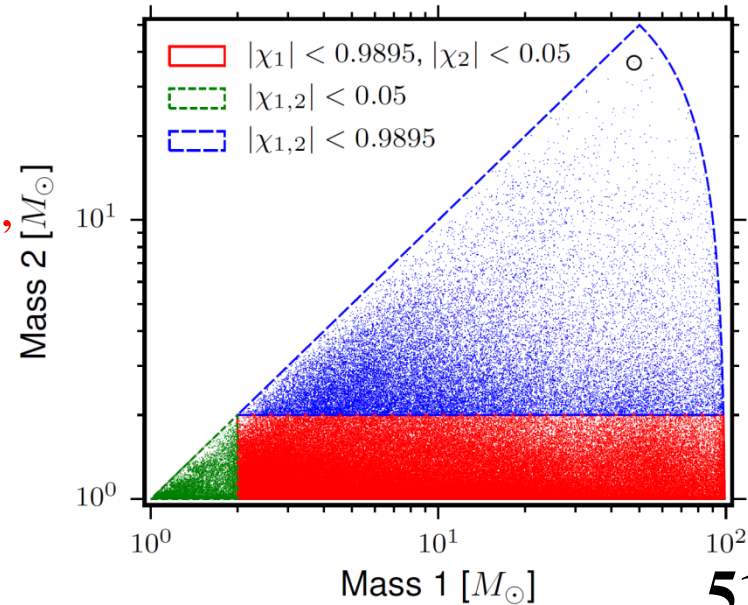
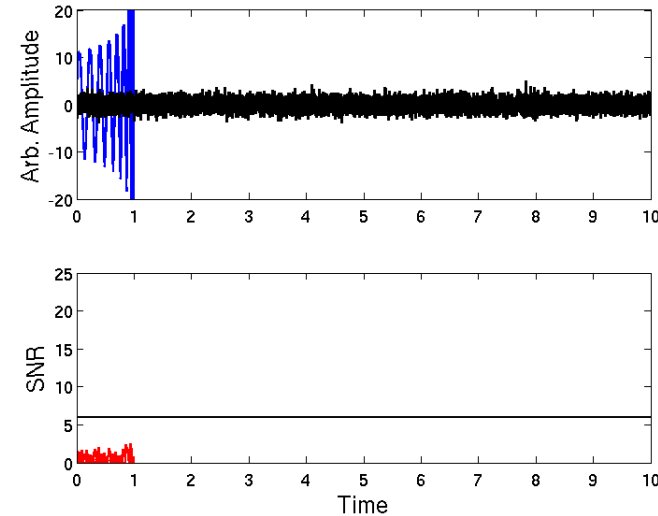


- Recherche d'excès d'énergie par rapport au bruit
  - Utilisation d'ondelettes
- L'excès doit être cohérent (et coïncident en temps) entre les deux interféromètres
- Fonctionnement en temps réel pour O1 !
- GW150914 est suffisamment fort pour être visible « à l'œil »



# 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 »**



# La Terre « secouée » par GW150914

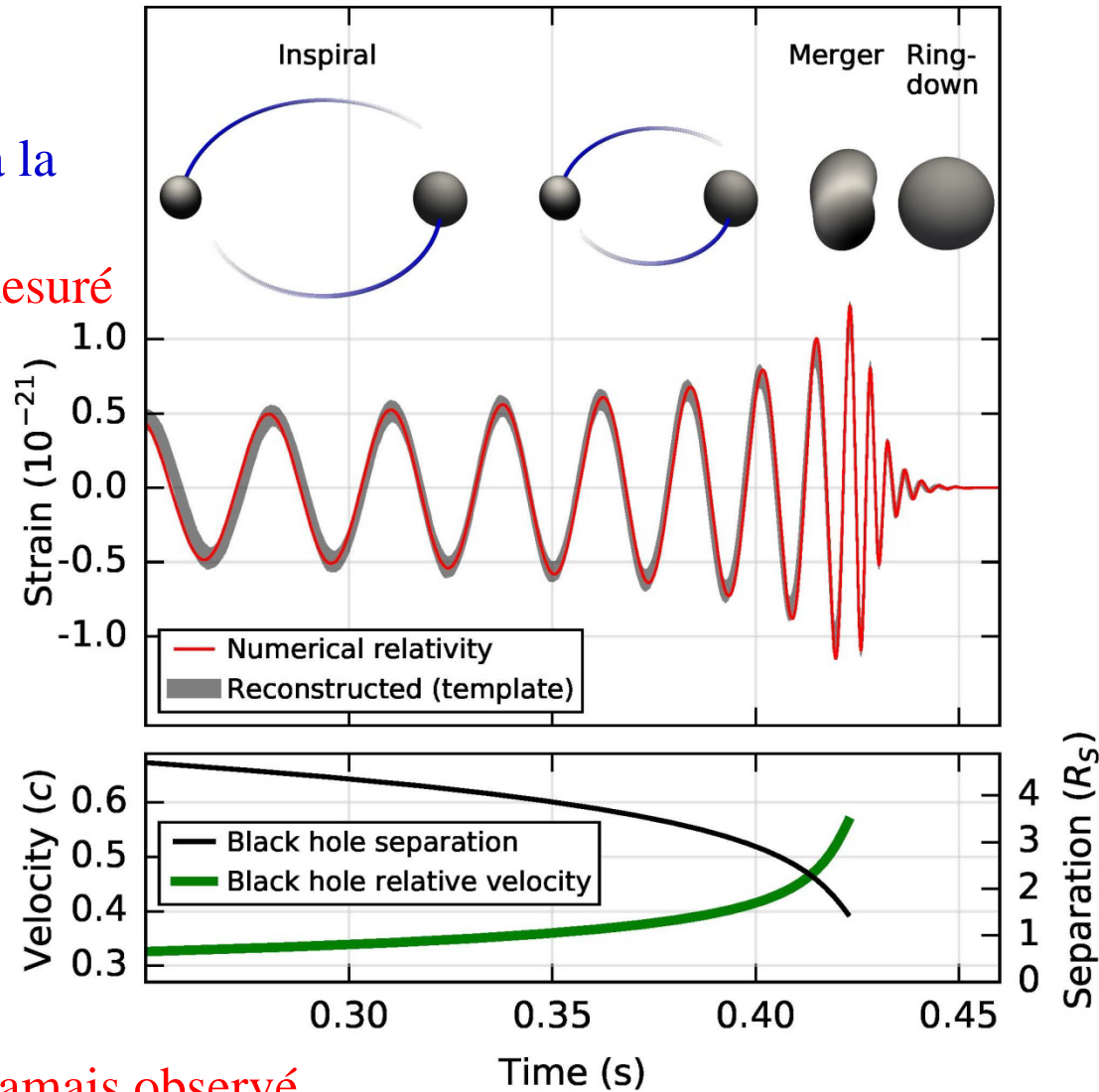
- L'effet présenté est évidemment très très très exagéré ....
  - Mais l'animation donne une bonne idée de l'évolution temporelle du signal



Scale of Effect Vastly Exaggerated

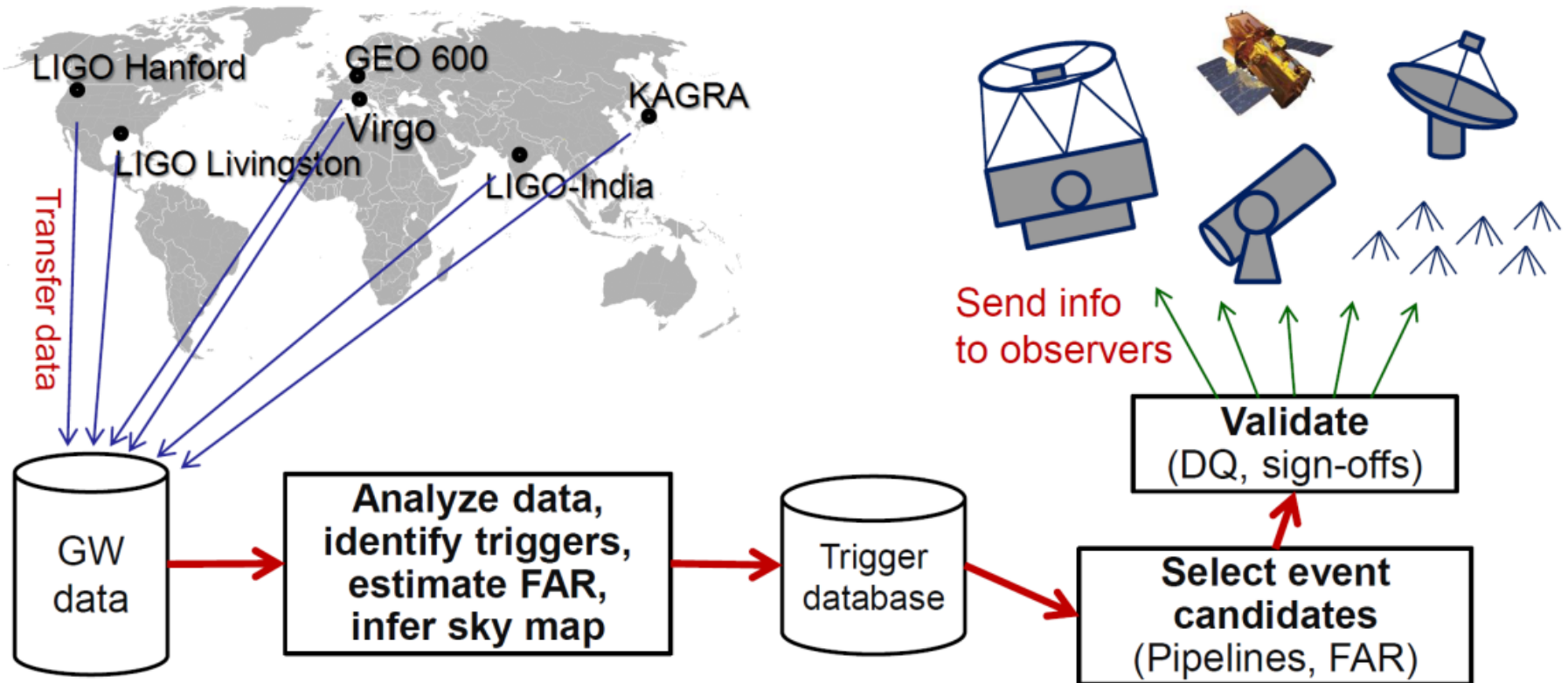
# Au fait, pourquoi deux trous noirs ?

- **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



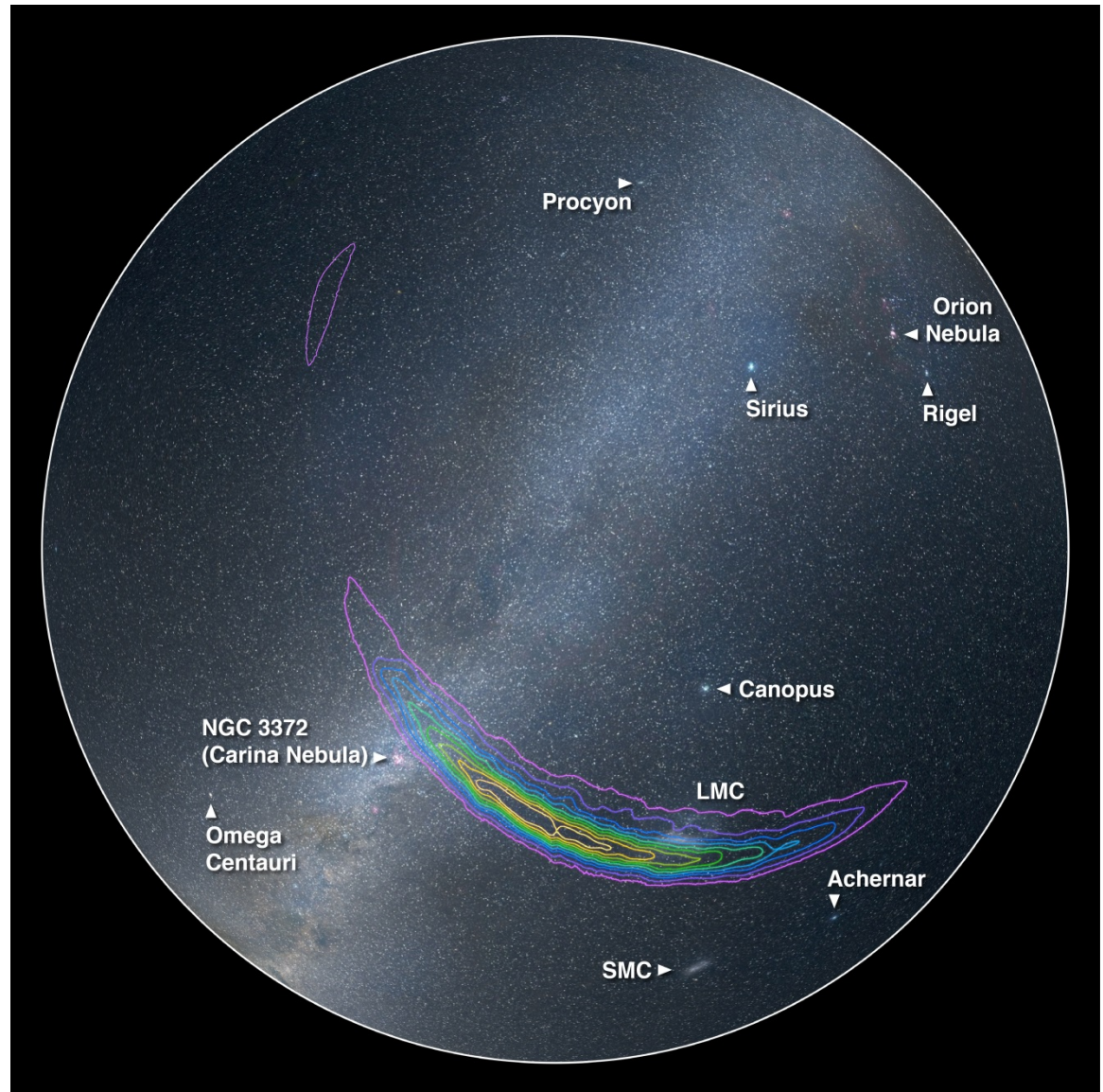
# Recherche de contreparties optiques

- Méthode



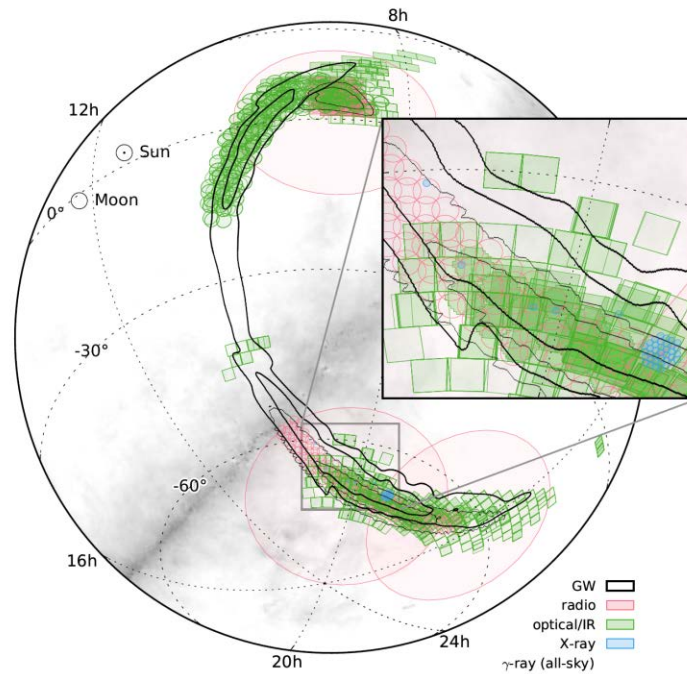
# Carte du ciel associée à GW150914

- Ciel au moment de l'événement
- Contours montrent les zones où la présence de la source est possible
- Taille de la zone la plus probable :  $\sim 590 \text{ degrés}^2$
- Vue de l'Atlantique sud ; Nord en haut ; lever du Soleil ; Voie Lactée en diagonale

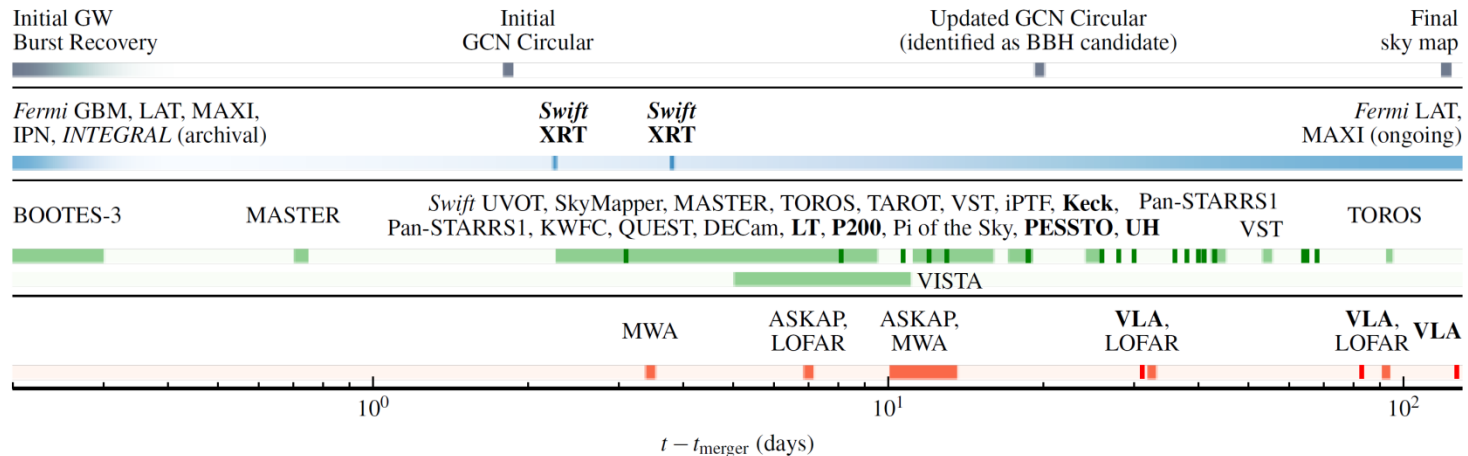


# Recherche de contreparties optiques

- Couverture du ciel



- Observations : aucune contrepartie identifiée



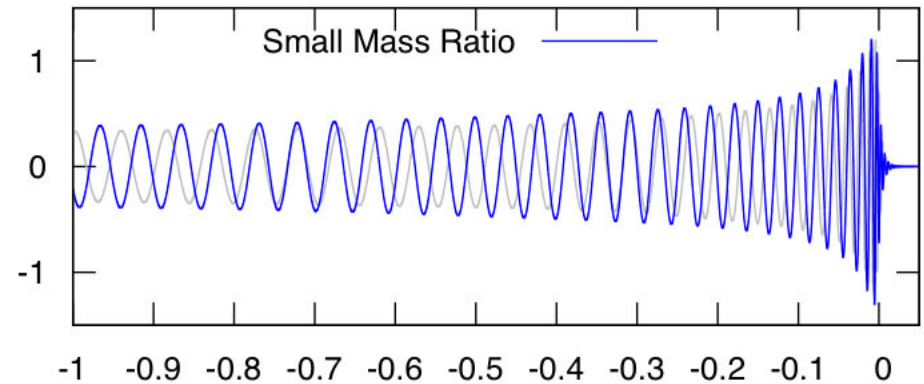
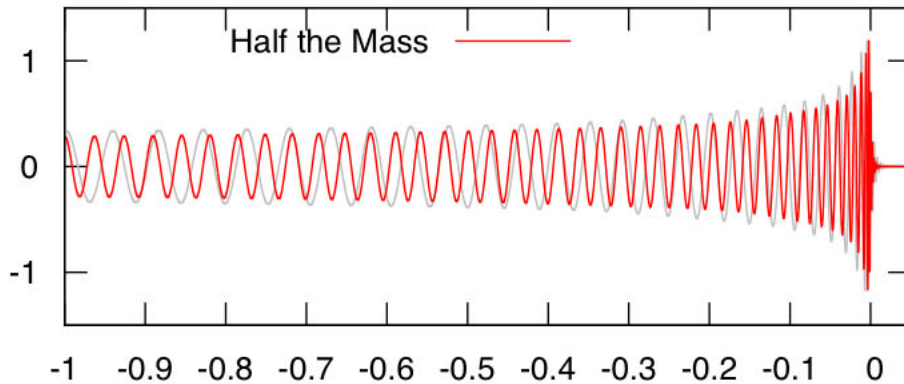
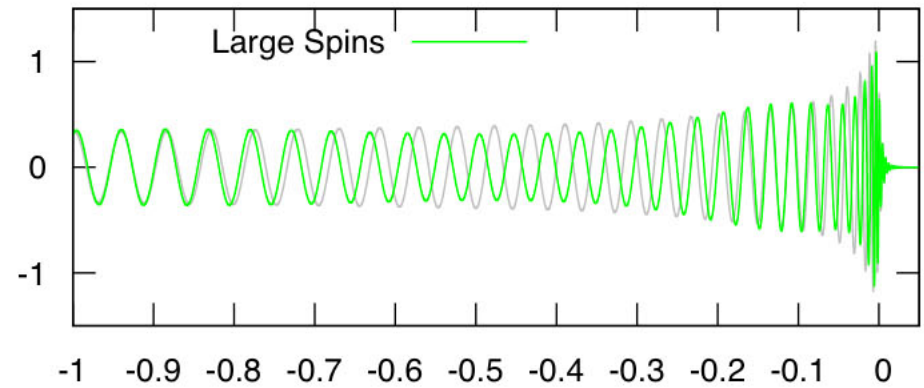
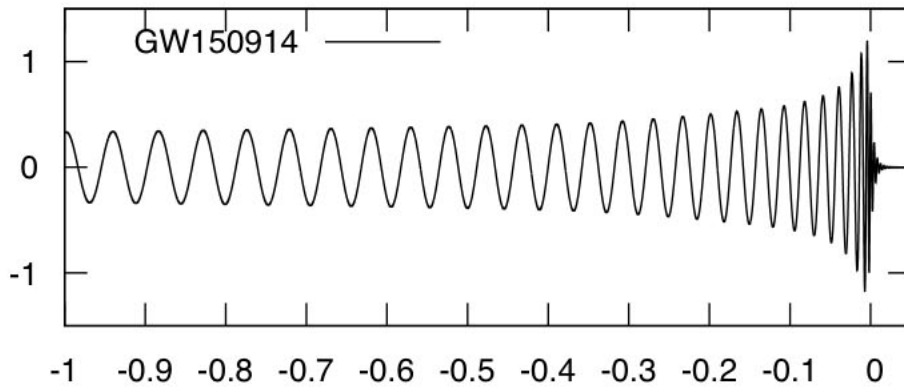


# Mesure des paramètres du signal

- 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

# GW150914: FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	$1 \times 10^{-21}$
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	$\pm 0.002$ fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	$3.6 \times 10^{56}$ erg s <sup>-1</sup>
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M <sub>⊙</sub>
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M <sub>⊙</sub>	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, $3.5 \times 10^5$ km <sup>2</sup>
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< $1.2 \times 10^{-22}$ eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc <sup>-3</sup> yr <sup>-1</sup>
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= $9.46 \times 10^{12}$  km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= $10^3$  Mpc, fm=femtometer= $10^{-15}$  m, M<sub>⊙</sub>=1 solar mass= $2 \times 10^{30}$  kg

## En résumé



Le trou noir final a environ la « taille » de l'Islande

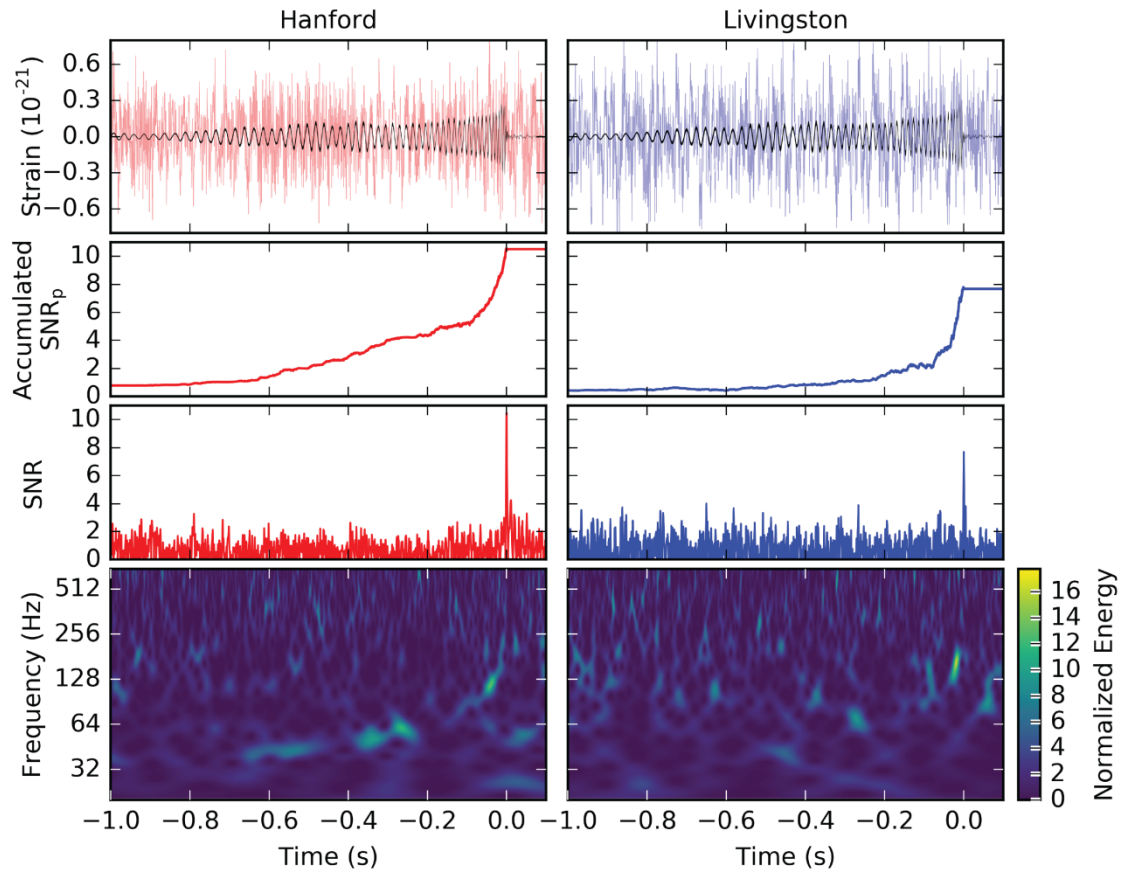
# **L'événement GW151226**

# GW151226

- Une autre coalescence de deux trous noirs

- Tous les signaux ne s(er)ont pas visibles à l'œil nu !

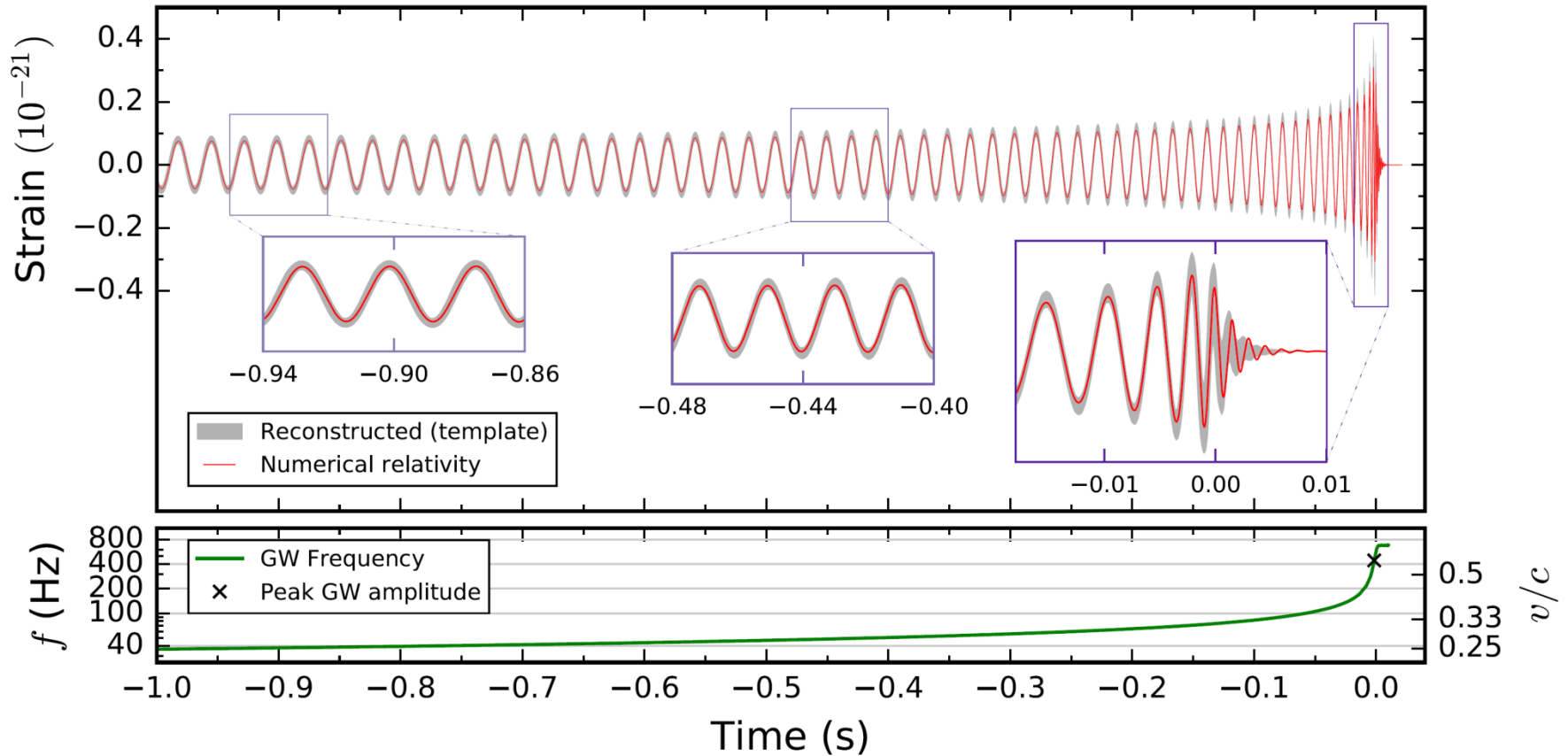
- Nécessité du **filtrage adapté**



- Masses des trous noirs plus petites (14 et 8  $M_{\odot}$ )
  - Amplitude du signal plus faible
  - Plus de cycles dans la bande de détection

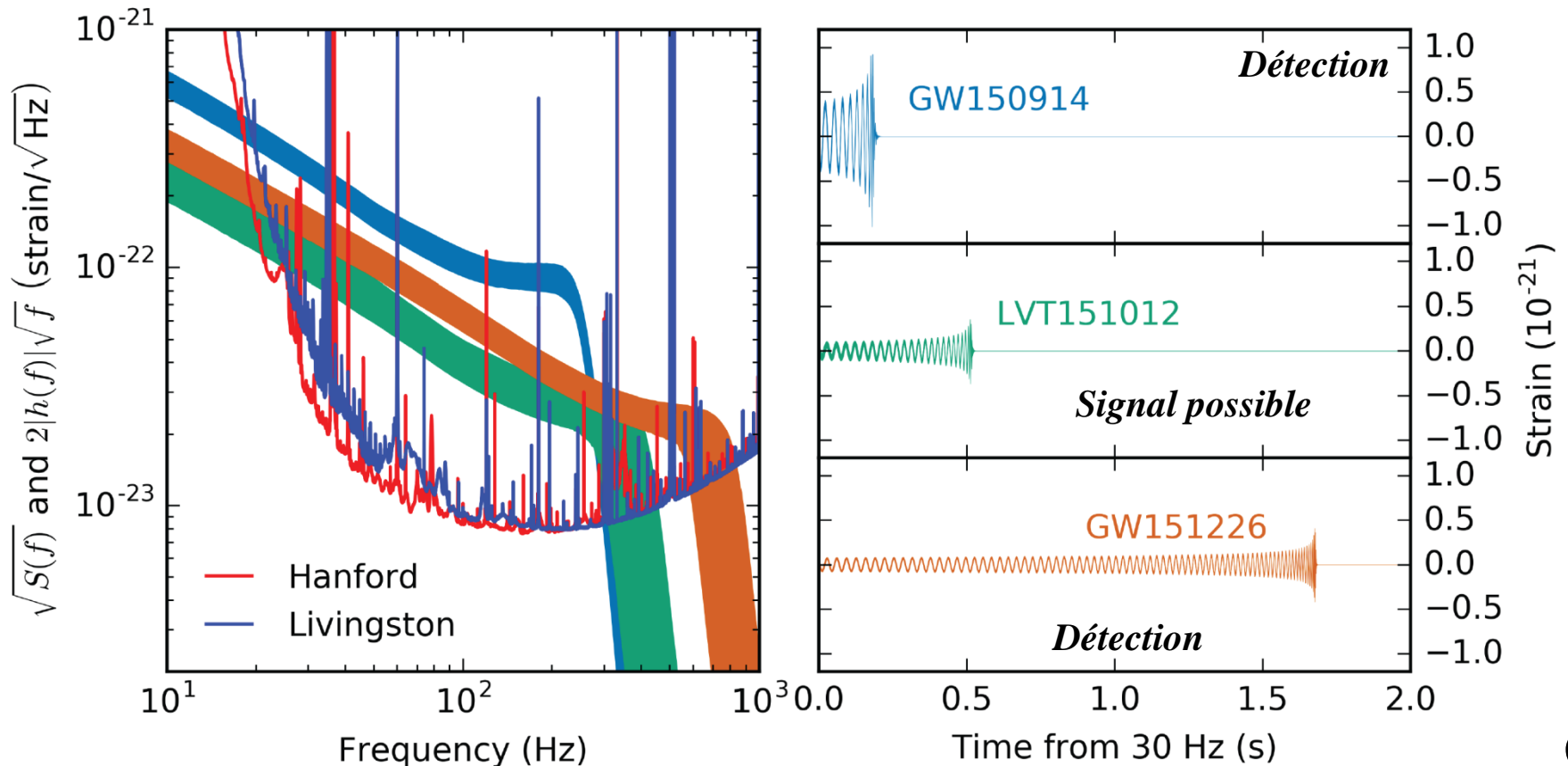
# GW151226

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



# Bilan de la prise de données O1

- Deux détections confirmées, un candidat
- Systèmes binaires de trous noirs
- Pas d'autre type de source observé



**Et maintenant ?**



# Situation actuelle des détecteurs

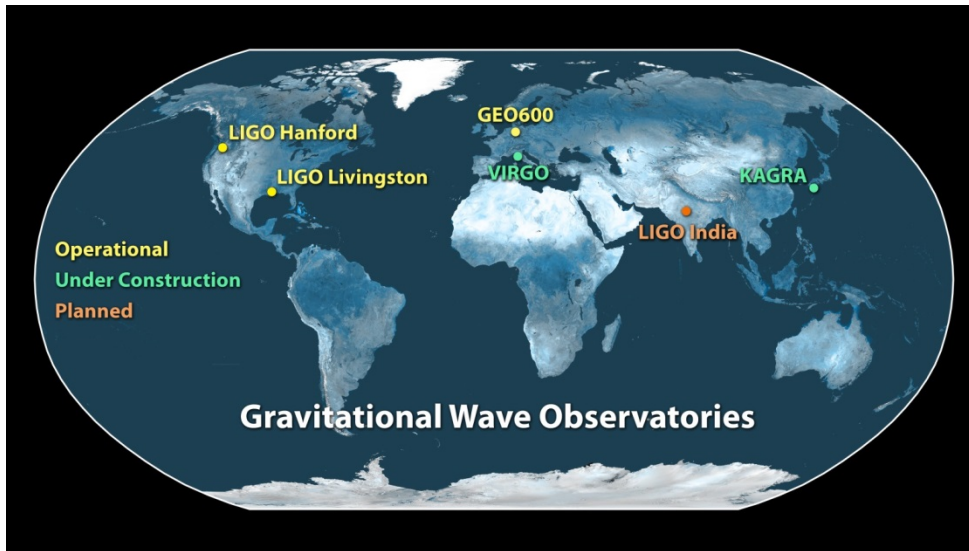
- **Détecteurs LIGO avancés** (points mensuels : <http://www.ligo.org/news/index.php>)
    - Démarrage de la **seconde prise de données** le 30 novembre 2016
    - Au 23 avril : **67 jours de données en coïncidence**,  
**6 candidats** identifiés (taux de fausses alarmes « lâche » : ~1 / mois)  
et transmis aux télescopes partenaires
  - **Détecteur Virgo avancé**
    - **En pleine phase de démarrage du détecteur !**  
→ Un détecteur « nouveau »
    - **Interféromètre contrôlé dans sa configuration nominale**  
→ Amélioration du cycle utile et de la sensibilité
    - **Objectif : rejoindre LIGO « dès que possible »**  
→ Prise de données LIGO jusqu'à la fin du mois d'août
- Encore quelques semaines/~~mois~~ d'effort ...

The logo for VIRGO features a stylized teal graphic on the left, composed of several curved, parallel lines that form a shape reminiscent of a wave or a stylized 'V'. To the right of this graphic, the word "VIRGO" is written in a bold, black, sans-serif typeface.

VIRGO

# Réseau de détecteurs

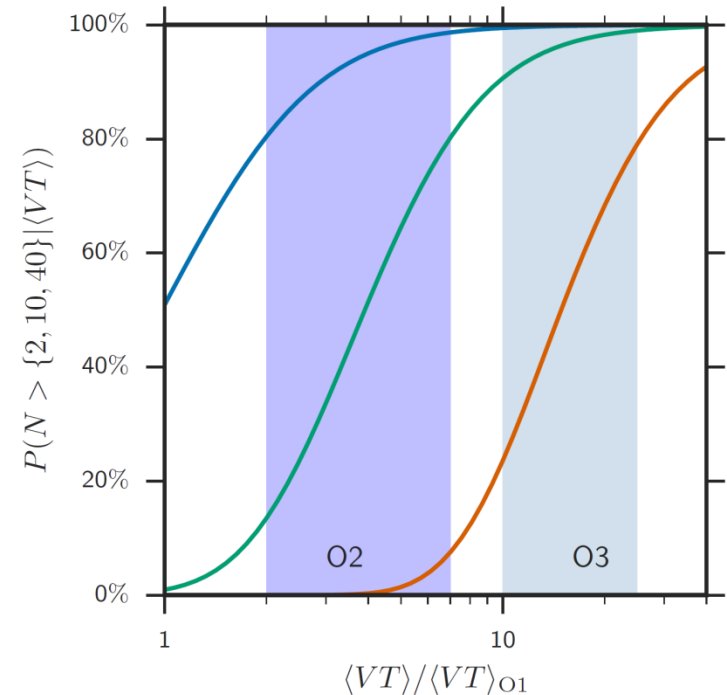
- Bientôt : un réseau de détecteurs terrestres
  - plus large
  - plus performant



→ On s'attend à observer  
(beaucoup) d'autres signaux

Probabilités que le nombre  
de détections excède

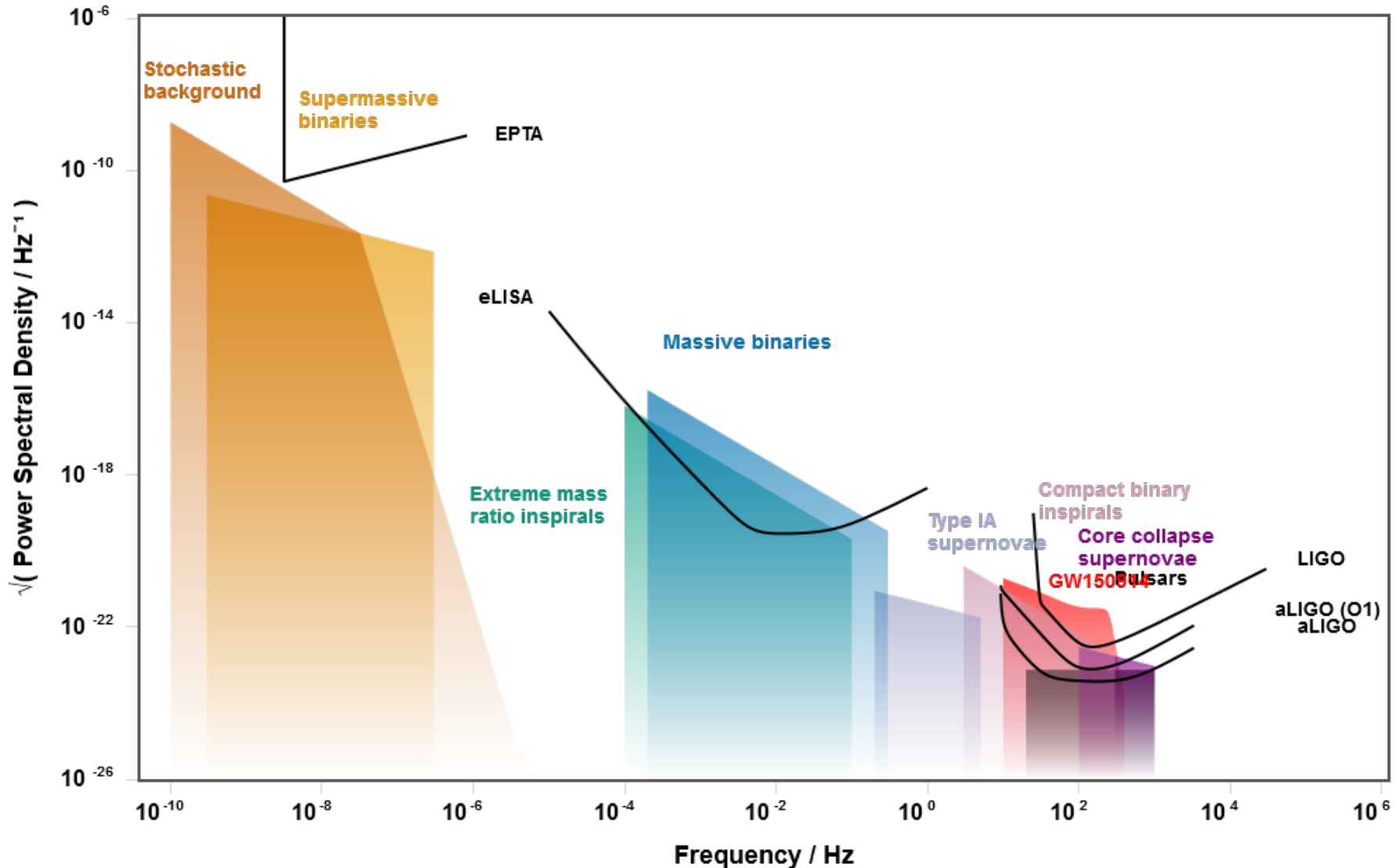
- 2
- 10
- 40



**OX** : prise de données  
« d'observation » numéro **X**

# Une grande variété de sources et de détecteurs

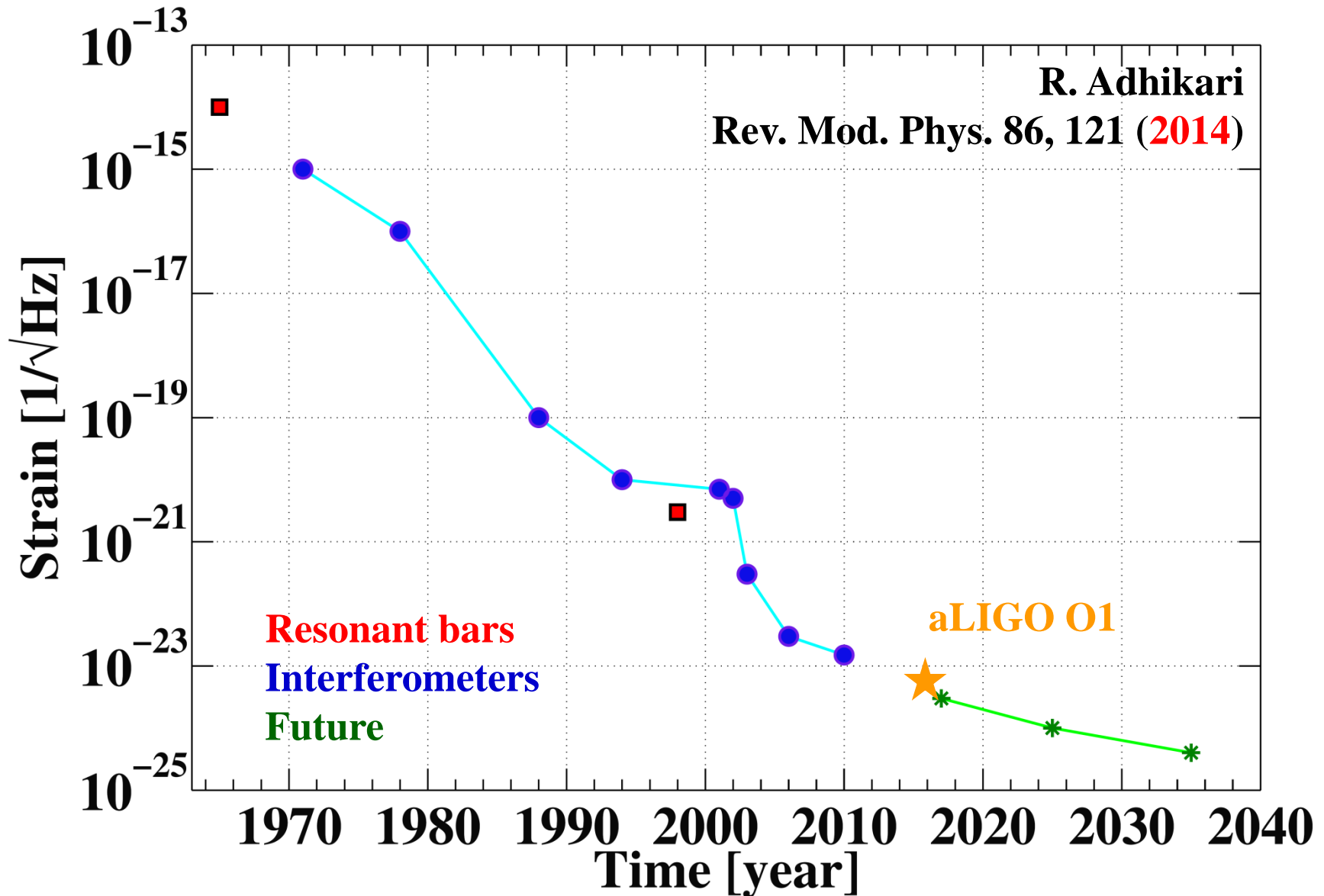
- Site internet associé : <http://rhcole.com/apps/GWplotter>



# Conclusions

- Premières observations directes des ondes gravitationnelles
  - Premières observations directes des trous noirs
  - Les systèmes doubles de trous noirs existent et fusionnent
    - En un temps inférieur à l'âge de l'Univers !
    - Taux d'événements encore incertain
      - Plus d'événements nécessaires pour l'estimer avec précision
  - Des trous noirs ont des masses de l'ordre de  $20-30 M_{\text{Soleil}}$
  - Implications astrophysiques
    - Formation de trous noirs stellaires lourds, de systèmes doubles de trous noirs ...
  - Pas de déviation observée par rapport aux prédictions de la relativité générale
  - LIGO/Virgo ont ouvert une nouvelle fenêtre sur l'Univers
    - A venir : chronométrage des pulsars, eLISA, polarisation du CMB
- Nous sommes à l'aube de l'astronomie en ondes gravitationnelles

# Evolution du pic de sensibilité des détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles



# La Nuit des Ondes Gravitationnelles

**#NuitDesOG**

La nuit  
des  
ondes  
gravita-  
tionnelles

**20 mars 2017**

Paris  
Annecy  
Nice  
Lyon  
Marseille  
Lille  
Dunkerque  
Nancy  
Bordeaux  
Limoges  
Orléans  
Strasbourg  
Cascina (Italie)  
Florence (Italie)

**Des concours ouverts à tous**  
Date limite de dépôt des dossiers le 1er mars 2017  
Inscription préalable obligatoire sur le site

**Une soirée festive**  
Le 20 mars 2017, au grand Rex à Paris et dans de nombreuses villes  
(liste des villes disponibles sur le site)

<http://www.cnrs.fr/nuit-des-ondes-gravitationnelles/>



<http://www.cnrs.fr/nuit-des-ondes-gravitationnelles>

# Film CNRS Images

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

