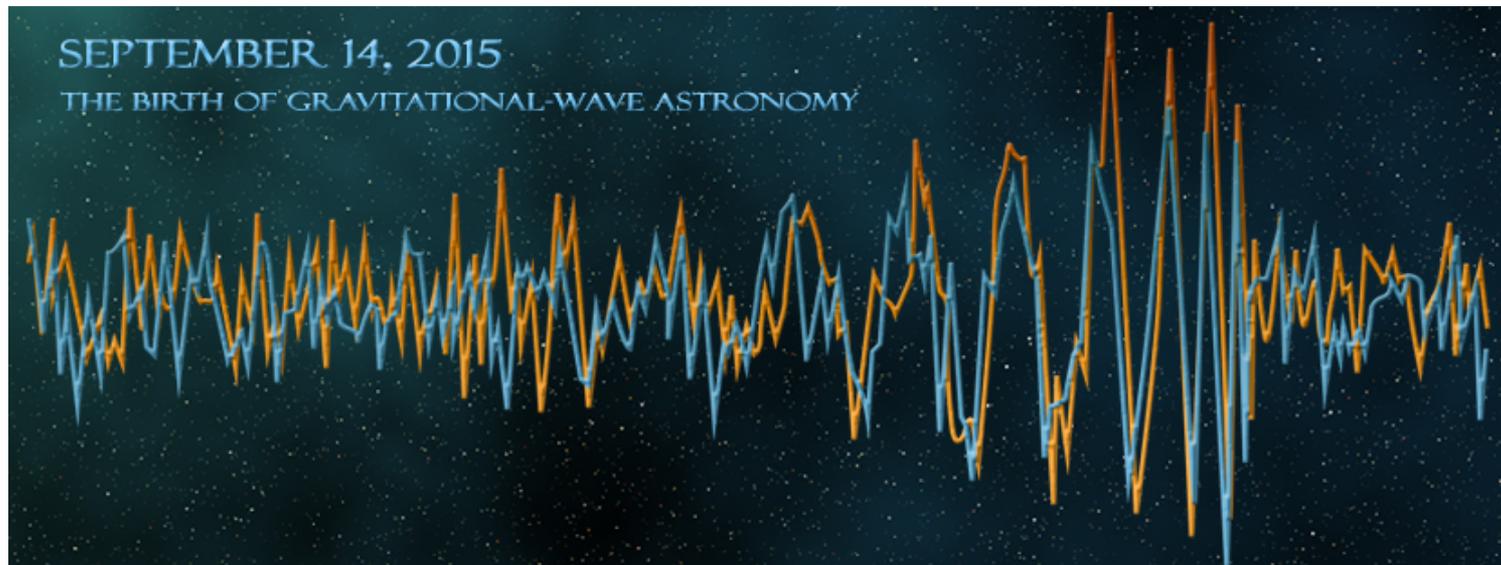


Première détection directe des ondes gravitationnelles

Séance ouverte Ecole Chalonge – de Vega Observatoire de Paris, 31 mars 2016

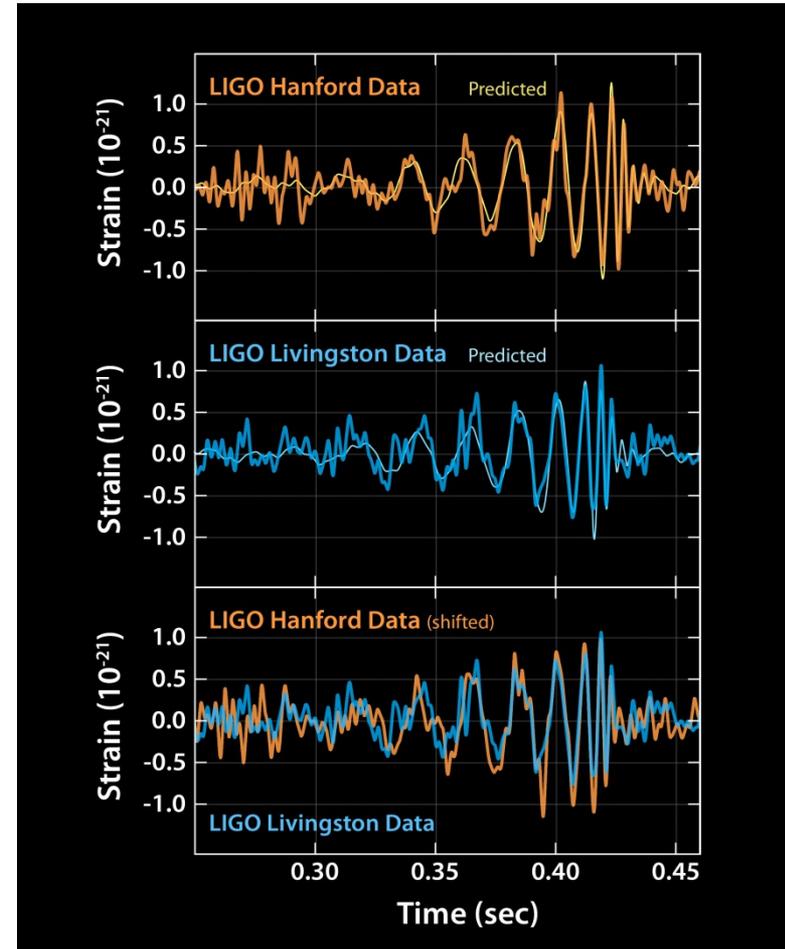
Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS/IN2P3 & Université Paris-Sud)



Plan

- **La découverte** en bref : GW150914
- La saga des **ondes gravitationnelles**
- **Comment les détecter ?**
 - **Interféromètres géants suspendus**
- **Etude de l'événement GW150914**
 - **Pourquoi est-ce un vrai signal ?**
- Et maintenant ?
- Conclusions
- Pour en savoir plus



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

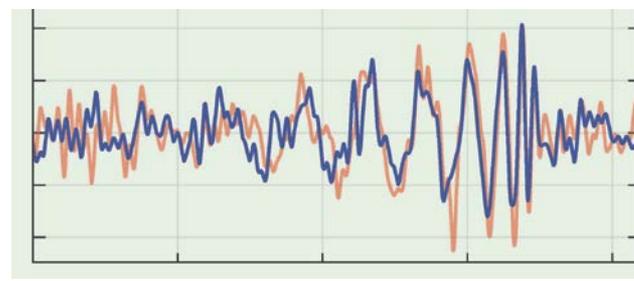
La découverte en bref :

GW150914

14 septembre 2015, 11:51 heure de Paris

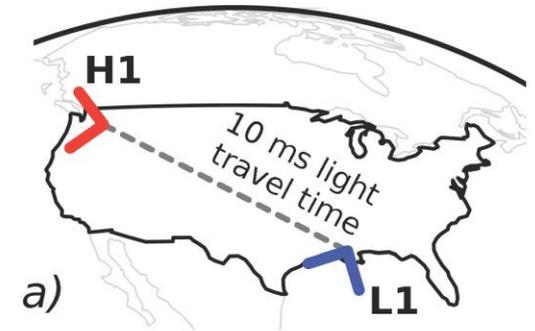
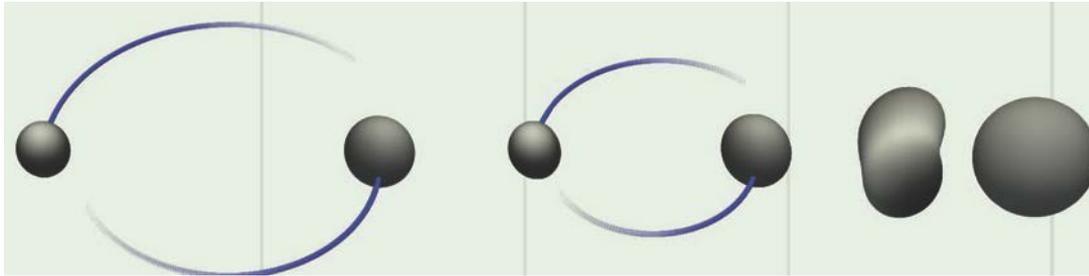
- Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle

- Très court (< 1 s)
- Très fort



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

La saga des ondes gravitationnelles

La mécanique céleste

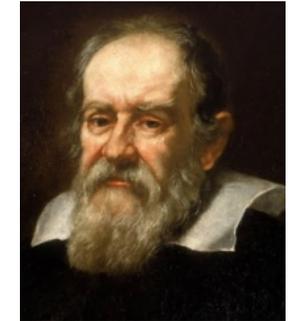
- Modèle **géocentrique** du système solaire (II^{ème} siècle de notre ère) de **Ptolémée**
 - La Terre est au centre
 - Tous les « astres voyageurs » orbitent autour d'elle **selon des empilements complexes de sphères**



- 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**



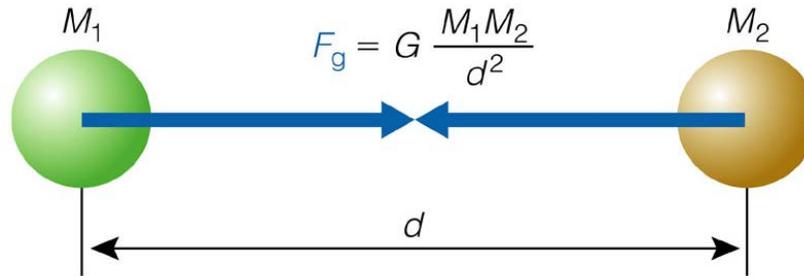
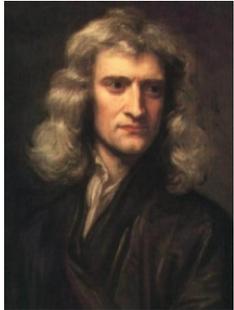
- **Kepler** (1609-1619) : suppose un modèle héliocentrique & des orbites elliptiques
 - Il construit **trois** lois empiriques à partir desquelles il fait des prédictions confirmées par l'observation



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)

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_{sat} et v_{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^e siècle – théorie corpusculaire de la lumière

- John Mitchell (1783)

- Pierre-Simon de Laplace (1796)

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

- A l'époque : 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

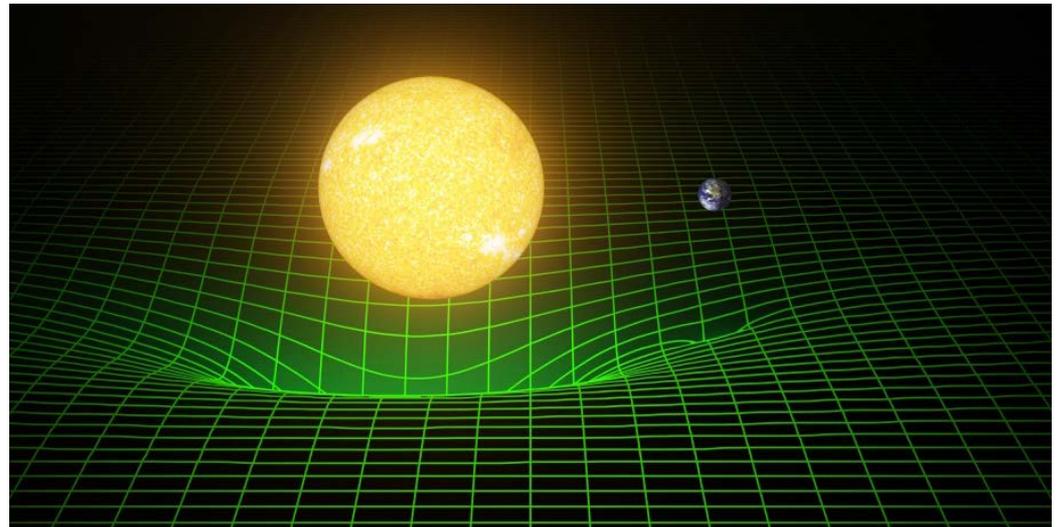
- **Attention : « compact » et « dense » sont deux choses différentes**
 - « Densité » d'un trou noir

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

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)



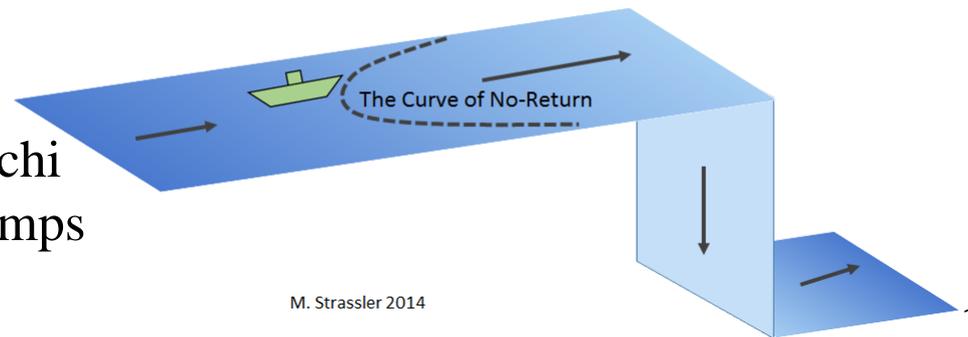
Gravitation \leftrightarrow Courbure de l'espace-temps
Courbure de l'espace temps \leftrightarrow Densité d'énergie

- **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 trous noirs

- Une région de l'espace-temps dans laquelle la gravitation est si forte que rien, pas même la lumière, ne peut s'échapper de son horizon
- Formés par l'effondrement d'étoiles massives qui ont épuisé leur combustible
- Les trous noirs grossissent par absorption de matière
 - Des trous noirs supermassifs existent au centre de la plupart des galaxies
→ Par exemple **Sagittarius A*** au centre de la Voie Lactée
- Caractérisés par trois quantités (Kerr, 1963)
 - Masse
 - Spin – moment angulaire
 - Charge électrique
- **Horizon d'un trou noir**
 - Pas de retour en arrière une fois franchi
 - Peut seulement augmenter avec le temps

Analogie horizon d'un trou noir / chute d'eau

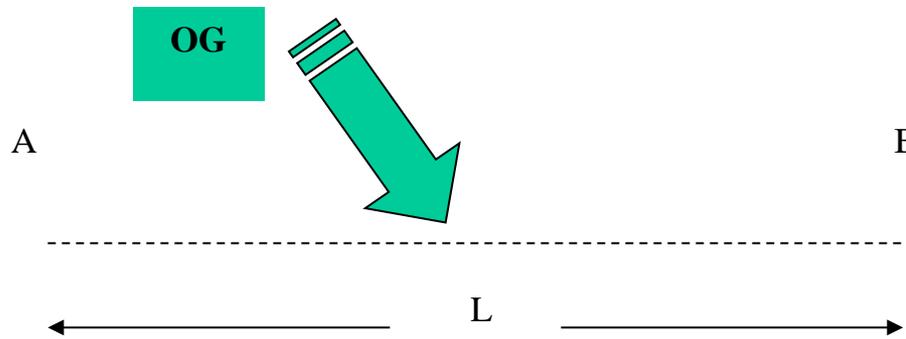


Les ondes gravitationnelles

- 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 dans le vide
- 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 l'inverse de la distance à la source d
 - Les détecteurs d'OG sont directement sensibles à l'amplitude ($h \propto 1/d$) et pas à l'intensité ($h^2 \propto 1/d^2$)
 - Conséquence importante dans la suite pour estimer le « volume d'Univers » auquel un détecteur donné est sensible : $V \propto d^3$
- Gain d'un facteur 2 (10) en distance \Leftrightarrow Volume d'Univers observable augmenté par un facteur 8 (1000)

Effet d'une onde gravitationnelle

- **OG** : perturbation de l'espace-temps
 - Variation relative δL d'une longueur L
 - Variation proportionnelle à l'amplitude h de l'OG



$$\frac{\delta L_{\max}}{L} = \frac{h}{2}$$

**Variation relative
de longueur**

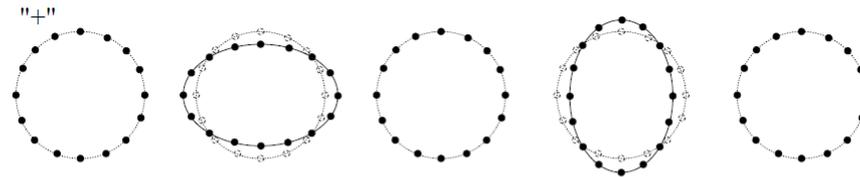
- Pour une amplitude d'OG h donnée, on a intérêt à avoir **L grand** pour que l'effet observé, dL , soit le plus visible possible

$$\delta L_{\max} = \frac{hL}{2}$$

Effet d'une onde gravitationnelle

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

- Polarisation « + »

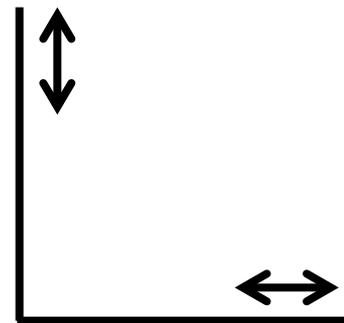


- Polarisation « × »



Une période

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

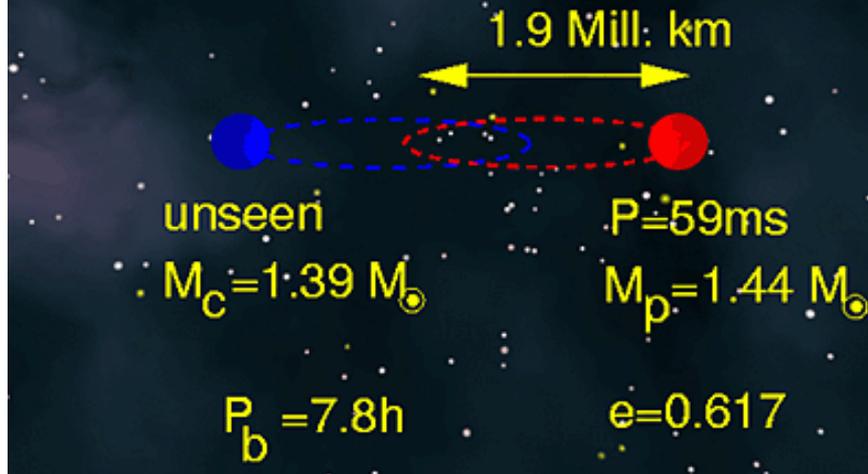


Les ondes gravitationnelles existent-elles ?

- 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

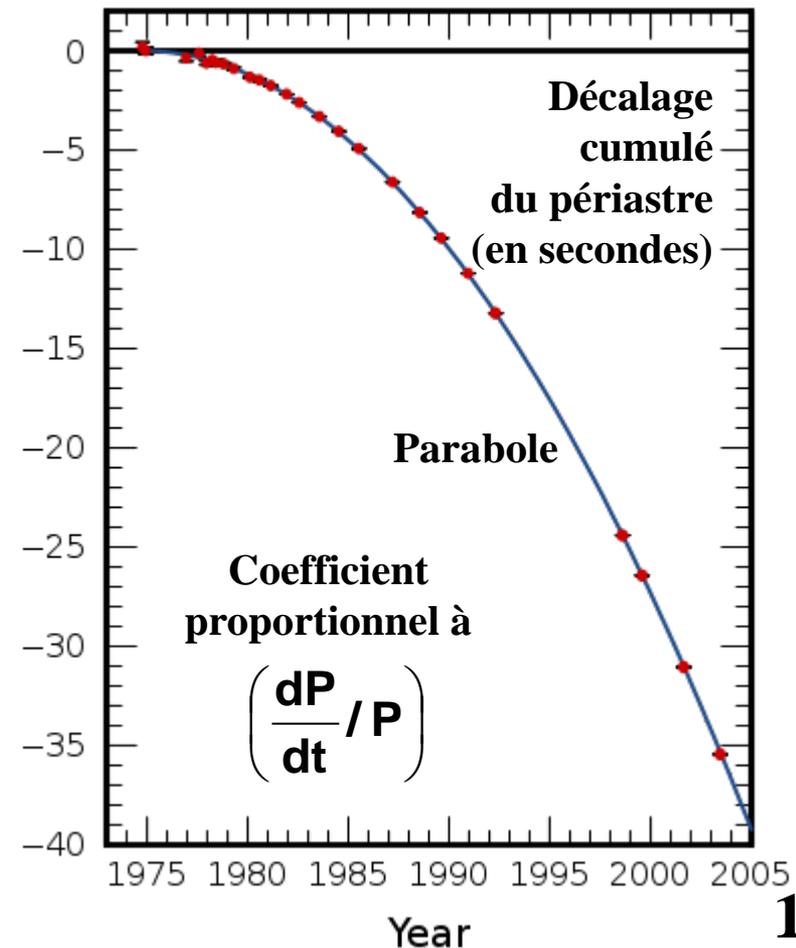
© Manchester University



- Le système perd lentement de l'énergie par émission d'ondes gravitationnelles
 - « Accélération » du mouvement orbital
→ $76,5 \mu s / \text{an}$ – période $P = 7,75 h$
 - Les étoiles se « rapprochent » : $3,5 m / \text{an}$
→ 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



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

→ 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 : $h \sim 10^{-22} \div 10^{-21}$)

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 »)

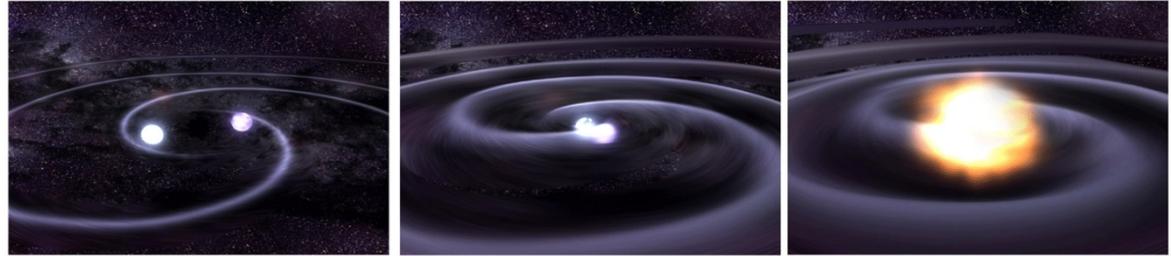
- Effondrement de cœurs d'étoiles (supernovae)

- Sources permanentes

- Pulsars

- Fonds « stochastiques »

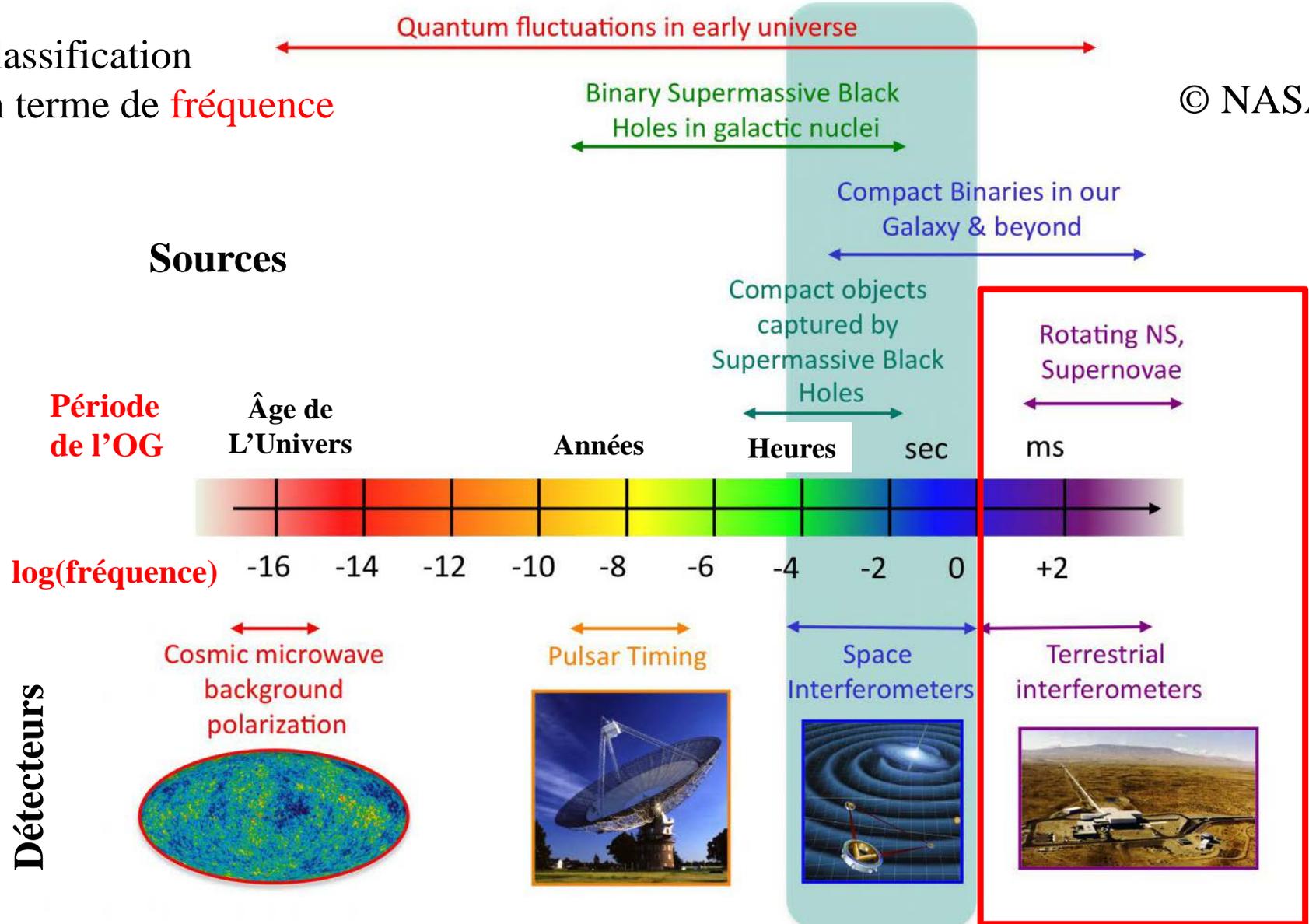
- Probablement beaucoup d'autres sources encore inconnues ...



Le spectre des ondes gravitationnelles

- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



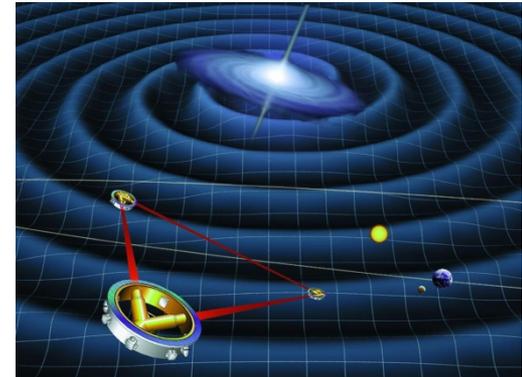
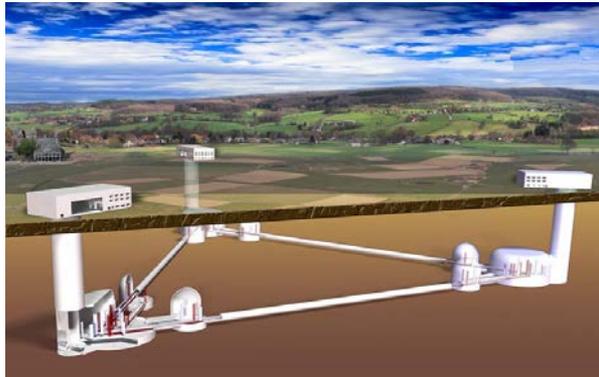
Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

- **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^{ème} génération (« avancés »)**
 - Etudes préliminaires pour la 3^{ème} 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

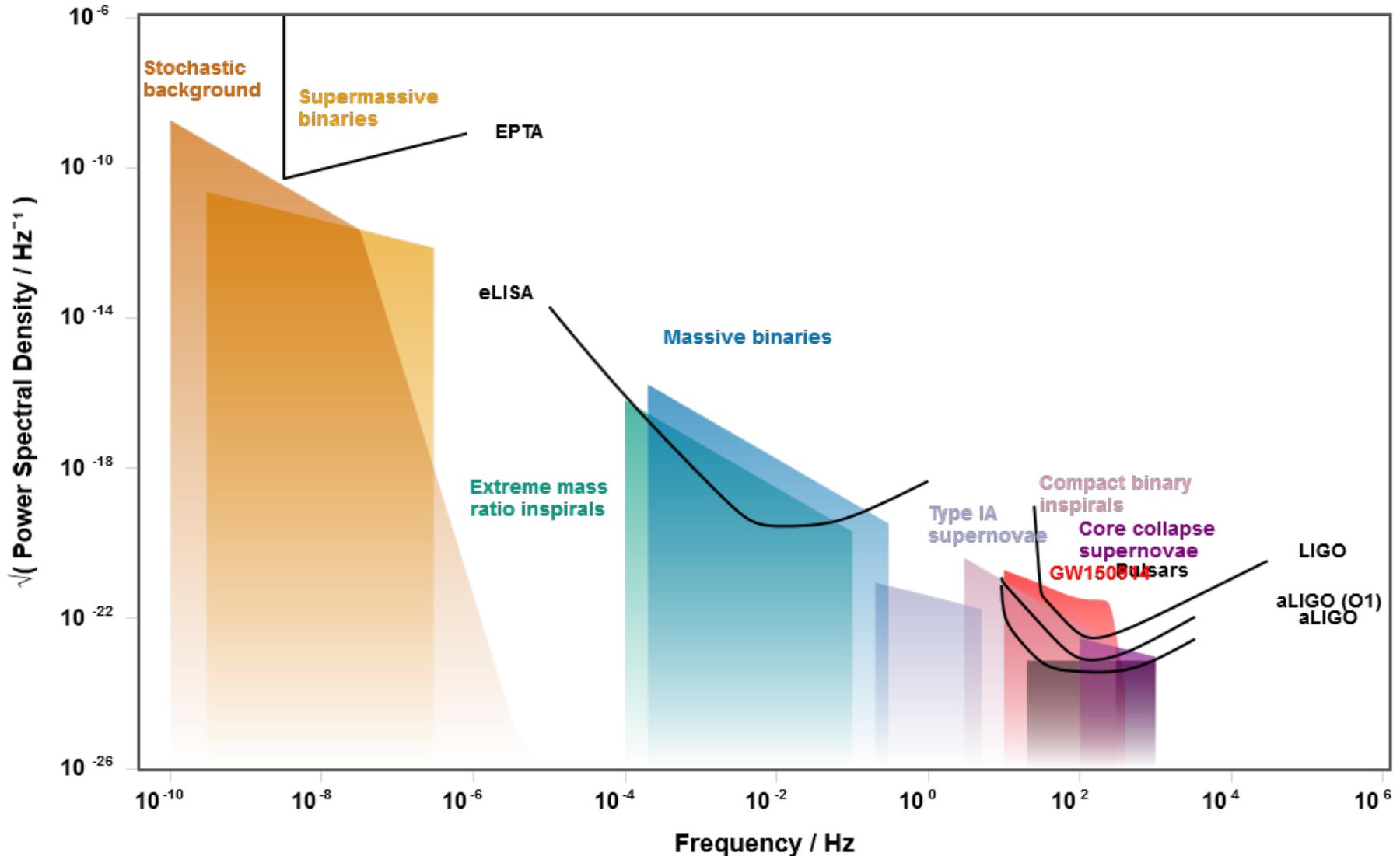
- **Dans l'espace**

- Future mission **eLISA** (<https://www.elisascience.org>, années 2030)
- Technologies testées **actuellement** par la mission **LISA Pathfinder**



Une grande variété de sources et de détecteurs

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



**Détecteurs
interférométriques
géants d'ondes
gravitationnelles**

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**

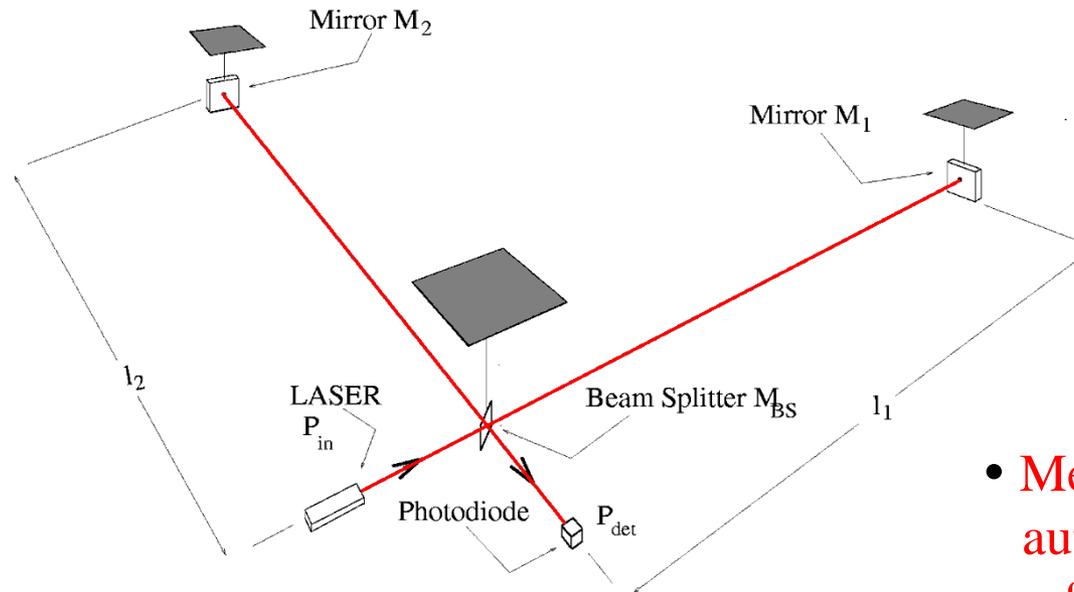
Détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles

- **Mode d'emploi**

- Utiliser des masses test
- Très éloignées
- Mesurer leur déplacement relatif
- Faire en sorte que leur mouvement soit le moins perturbé possible

- **Solution : interféromètre de Michelson**

- **Miroirs suspendus**
- **Bras de 3-4 km**
- **Figures d'interférence**
- **Contrôle actif + réduction des bruits et des couplages expérimentaux**

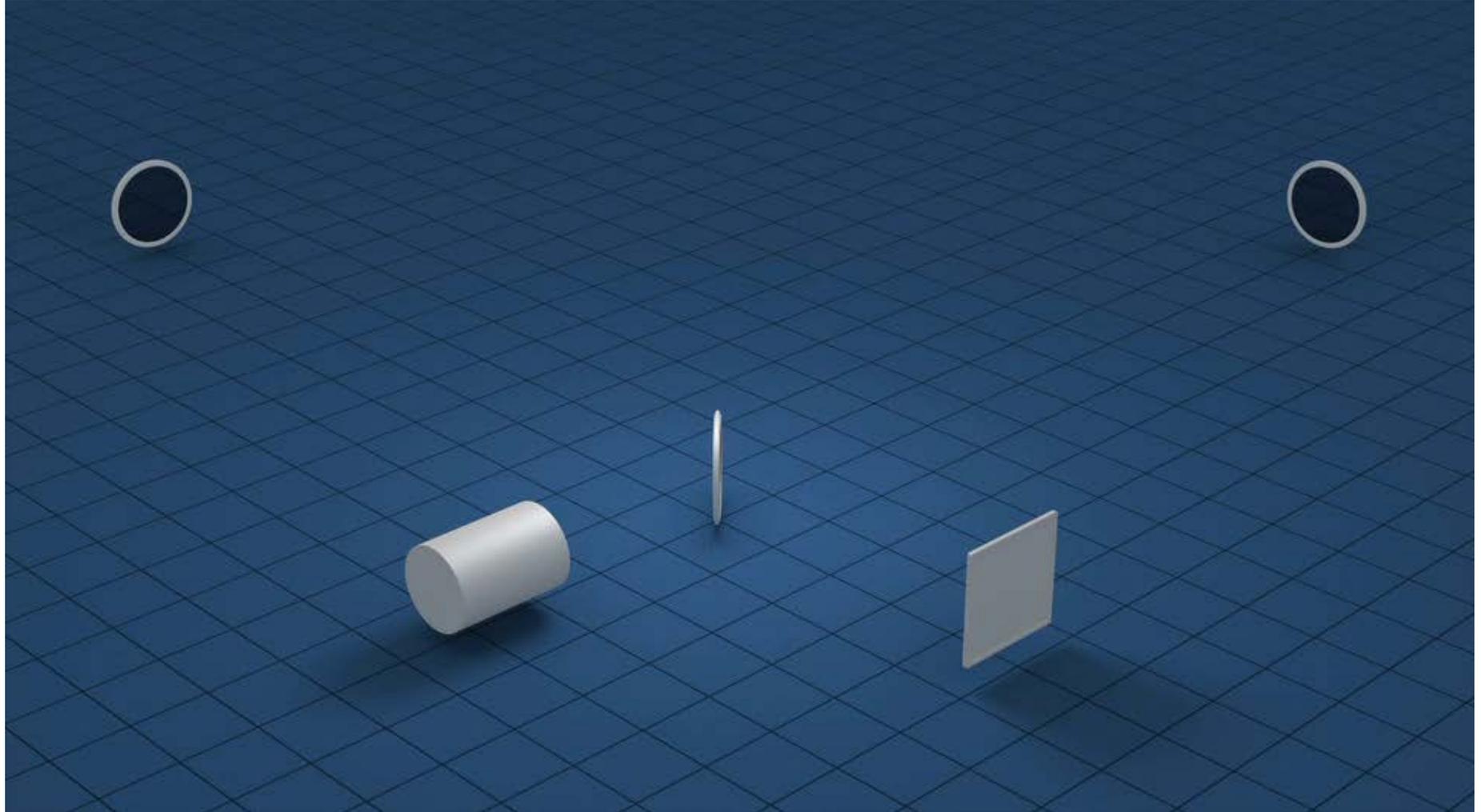


- **Meilleure sensibilité autour de la « frange noire »**

- **Passage d'une OG**

- ⇒ **Modifications du chemin optique dans les bras**
- ⇒ **Variation de la puissance détectée en sortie**

Principe de fonctionnement



Interféromètre de Michelson suspendu

- Miroirs : masses test

- OG incidente

→ Modification des chemins optiques

→ Variation de la puissance lumineuse en sortie

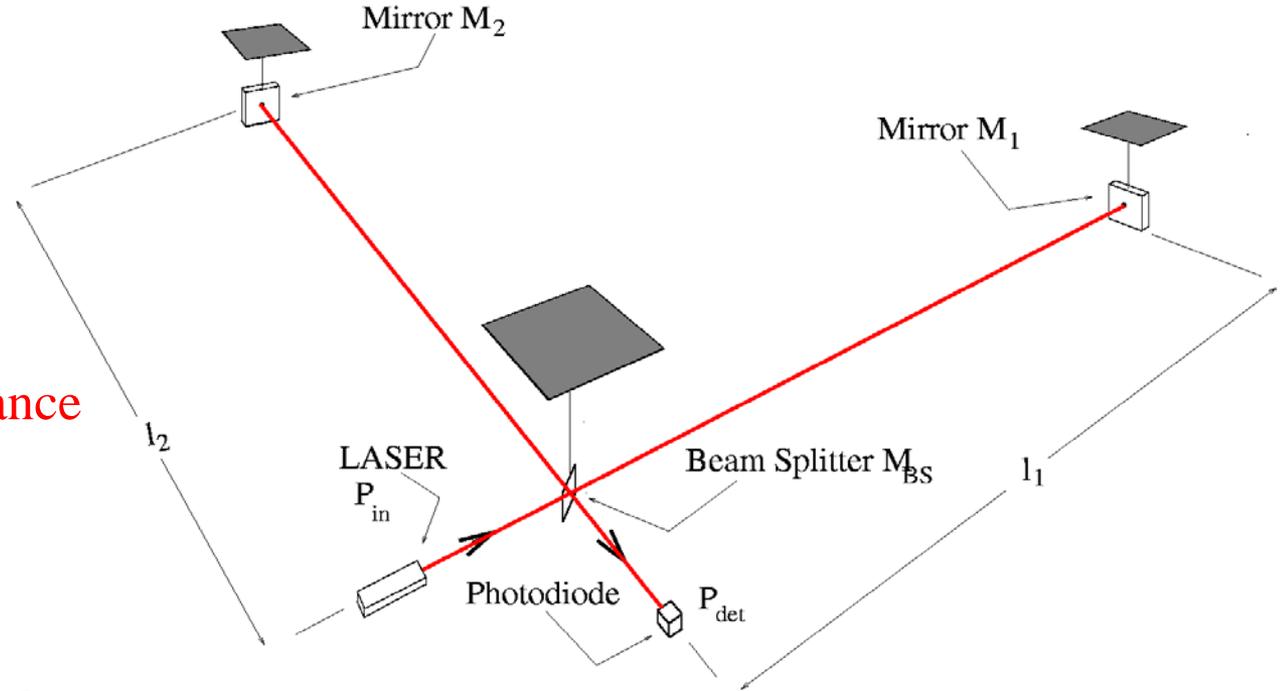
- Puissance en sortie :

$$P_{\text{det}} = \frac{P_{\text{in}}}{2} [1 + C \cos(\Delta\phi)]$$

- Développant la phase on obtient $\Delta\phi = \frac{2\pi(l_2 - l_1)}{\lambda} + \frac{2\pi(l_1 + l_2)h(t)}{\lambda} \equiv \Delta\phi_{\text{OP}} + \delta\phi_{\text{GW}}(t)$

- Finalement : $P_{\text{det}} \approx \frac{P_0}{2} [1 + C \cos(\Delta\phi_{\text{OP}}) - C \sin(\Delta\phi_{\text{OP}}) \times \delta\phi_{\text{GW}}(t)]$ **Variation de puissance détectée $\propto h(t)$**

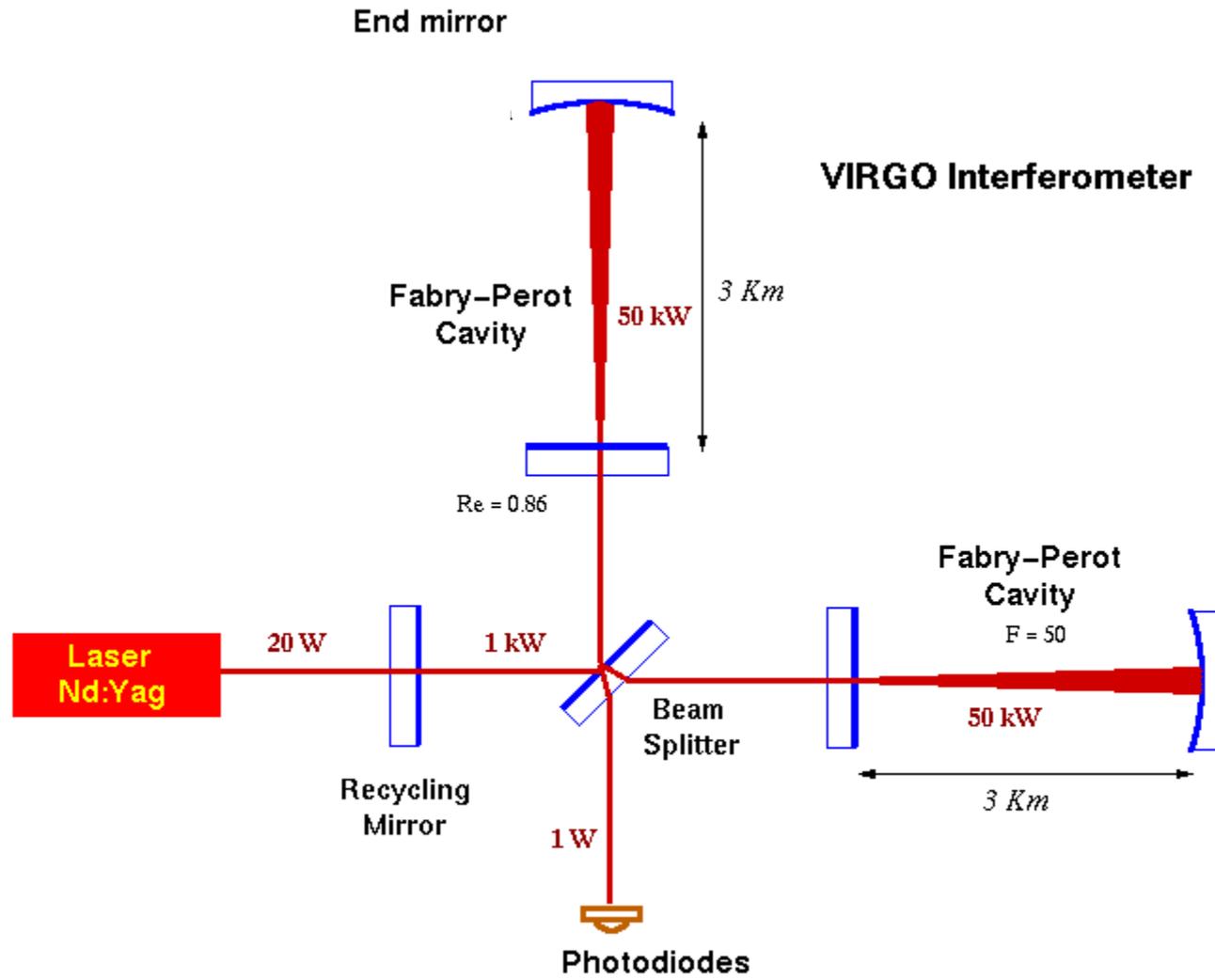
Point de fonctionnement légèrement décalé de la frange noire



Améliorer la sensibilité

- Sensibilité de l'interféromètre $\propto \frac{1}{(\text{longueur des bras}) \times \sqrt{\text{puissance laser}}}$
- Laser de puissance, stabilisé en puissance, en fréquence et en pointé
 - Dizaines (ou centaine) de watts
- Bras kilométriques (Virgo : 3km ; LIGO : 4km)
 - Au-delà l'encombrement du détecteur devient problématique
- Cavités Fabry-Perot dans les bras kilométriques
 - Longueur du chemin optique augmentée d'un facteur 300 (Advanced Virgo)
- Ajout d'un miroir de recyclage entre le laser et la séparatrice
 - Interféromètre réglé sur la frange noire + miroirs de fond très réfléchissants : toute la puissance lumineuse est réfléchie vers le laser
- Miroirs sans défauts géométriques et avec des pertes minimales
 - Paramètres définissant les gains des cavités optiques

Schéma du détecteur Virgo

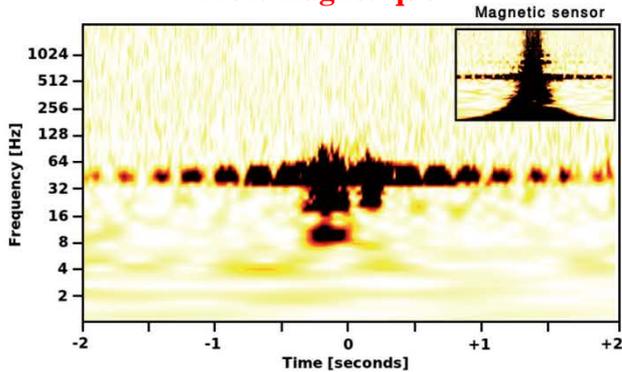


Bruits et sensibilité

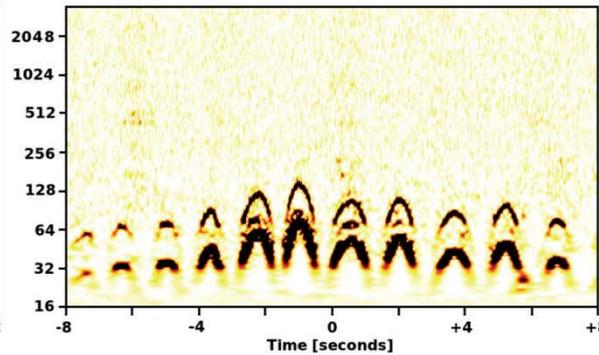
- **Bruit** : toute perturbation parasite (quelle que soit son origine) qui pollue le signal en sortie de l'ITF et donc impacte la détection d'une OG potentielle
- **Le niveau de bruit de l'ITF varie en fonction de la fréquence**
 - On peut détecter une OG de fréquence f donnée si son amplitude h est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

Exemples de bruits

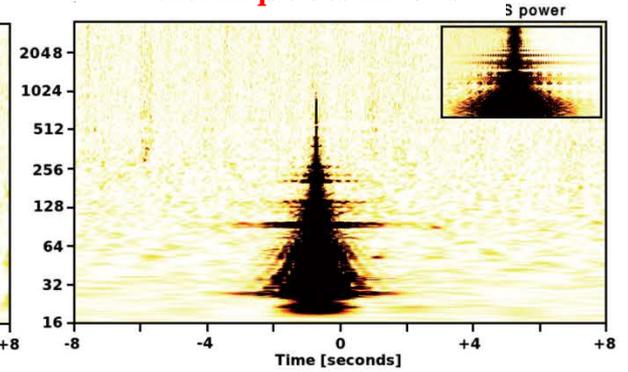
Bruit magnétique



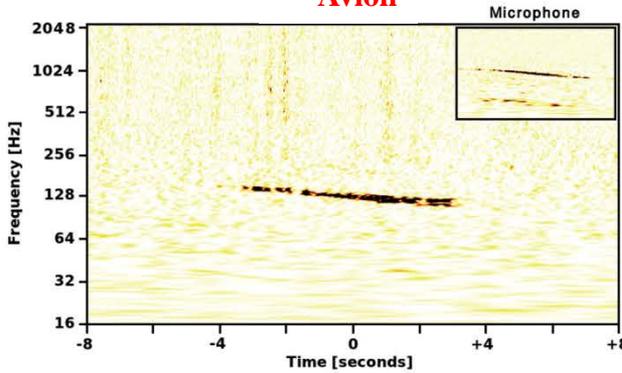
Lumière diffusée



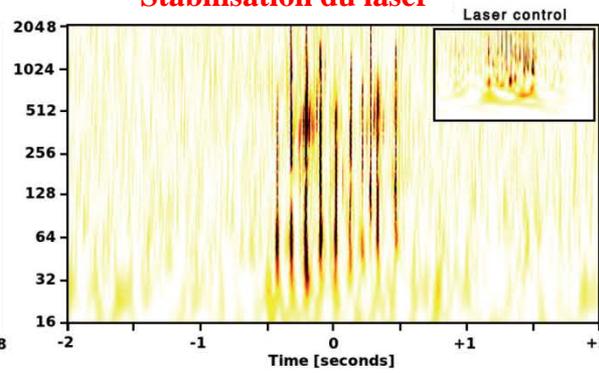
Système de compensation thermique des miroirs



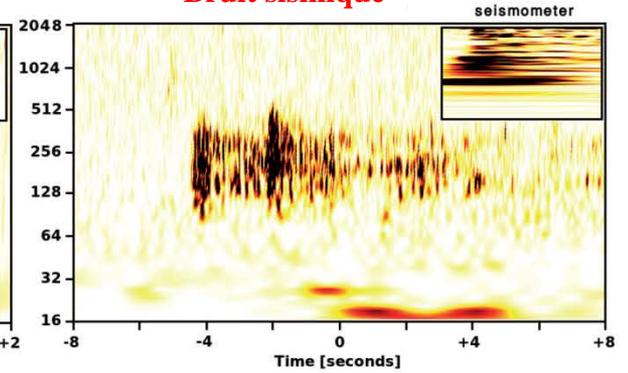
Avion



Stabilisation du laser



Bruit sismique



Fréquence (Hz)

Temps (s)



Code couleur : niveau de bruit
dans une bande de fréquence particulière
à un instant donné

Courbe de sensibilité

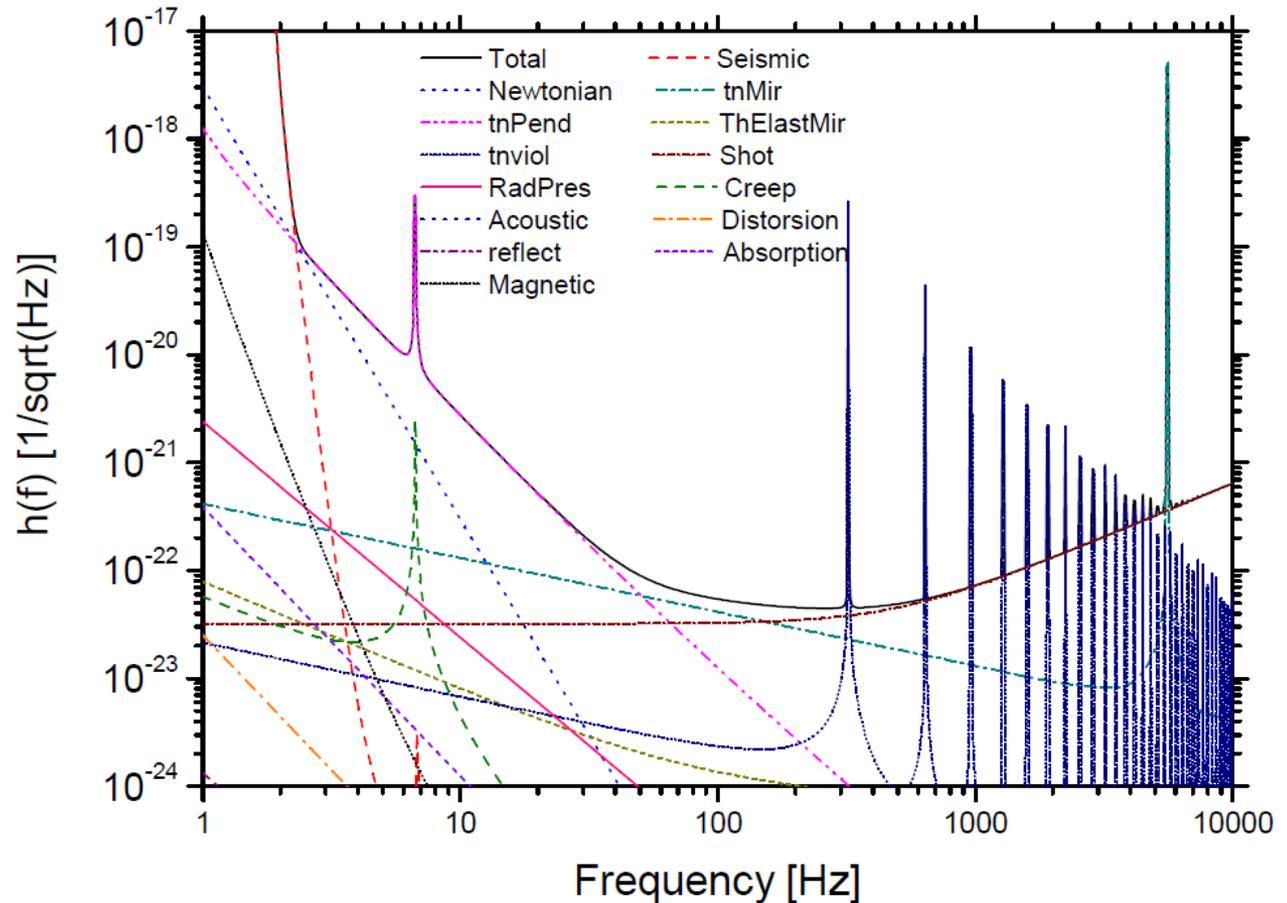
- Exemple: la courbe de sensibilité « de design » du détecteur Virgo initial

- Echelle log-log

- Fréquence d'échantillonnage : 20 kHz

- Courbe noire : somme quadratique de tous les bruits
 - La courbe de sensibilité

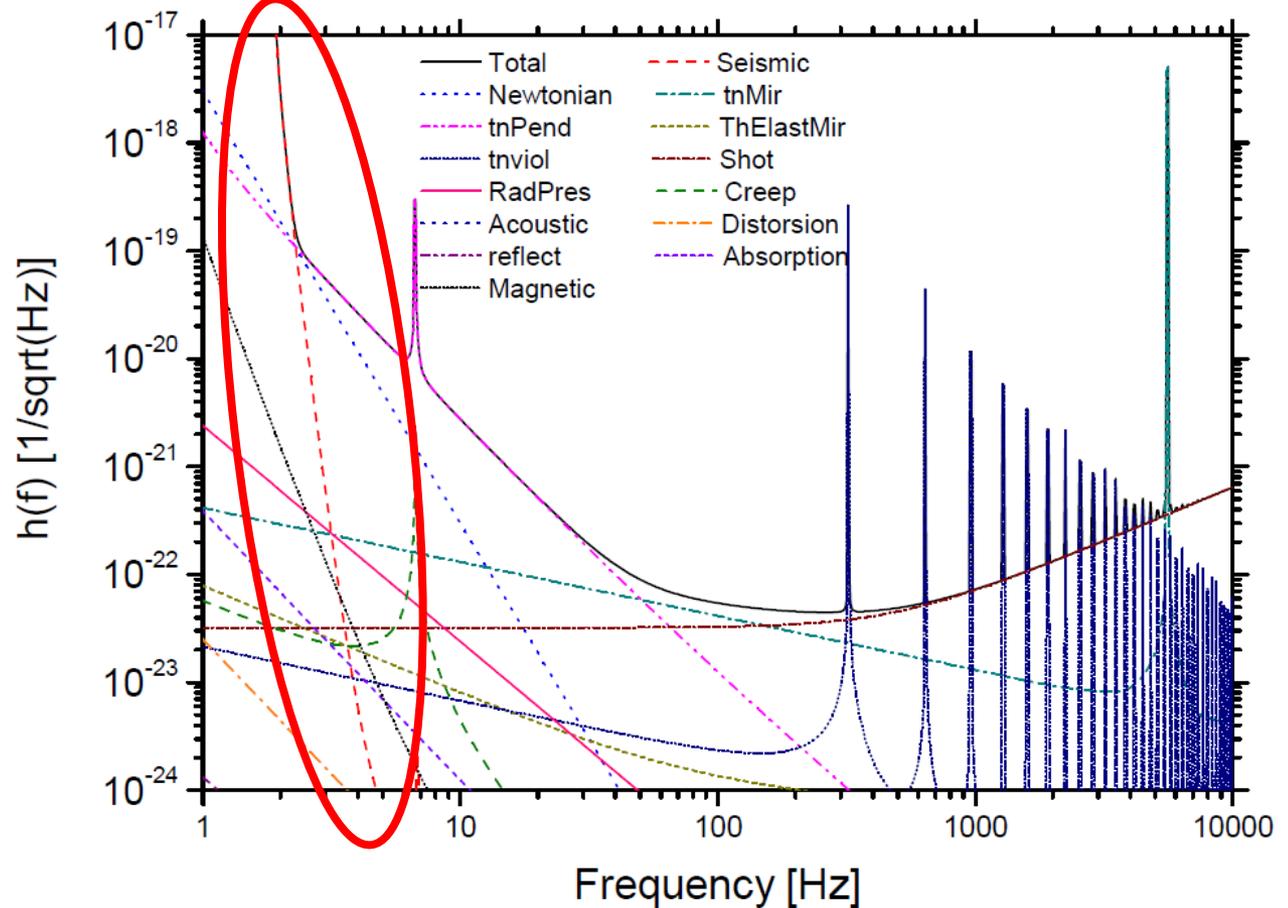
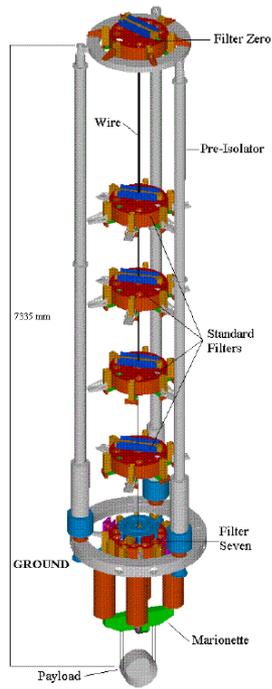
- Densité spectrale d'amplitude (ASD)
 - Unité : $1/\sqrt{\text{Hz}}$



Bruit dans la bande de fréquence $[f_{\min}; f_{\max}]$: $\sqrt{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \text{ASD}^2(f) df}$

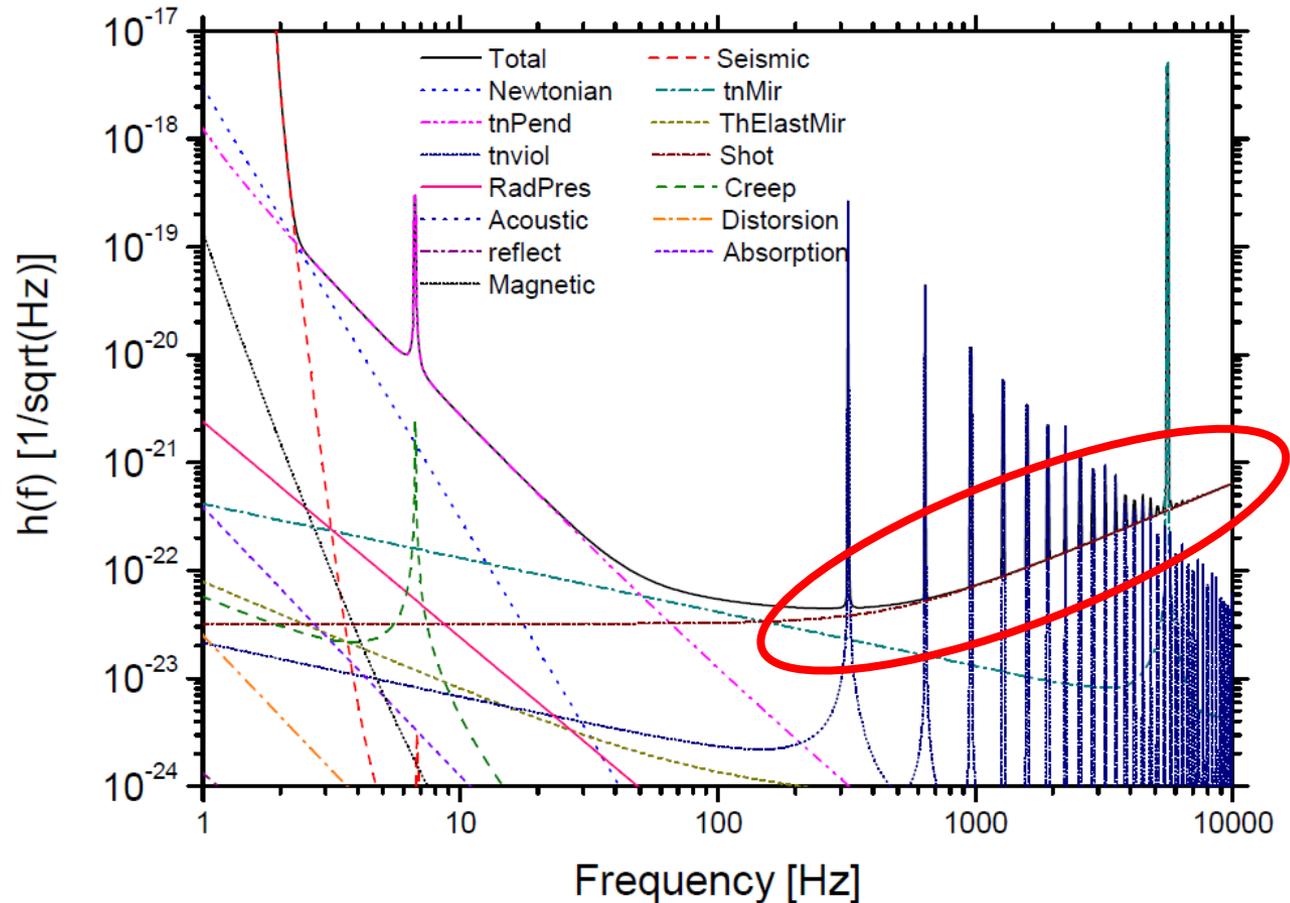
Courbe de sensibilité

- **Bruit sismique**
- **Limite fondamentale à basse fréquence**
- **Atténué par les « superatténuateurs »**
 - **Suspensions des miroirs**



Courbe de sensibilité

- Bruits quantiques : **bruit de grenaille** and pression de radiation
- Fluctuations du nombre de photons
 - En anglais : « shot noise »
- Dominant à hautes fréquences, à partir de qqs centaines de Hz
 - Cavités Fabry-Perot : filtres passe-bas
- Varie comme $1/\sqrt{P}$
 - Plus la puissance laser est élevée et plus le bruit de grenaille est faible



Courbe de sensibilité

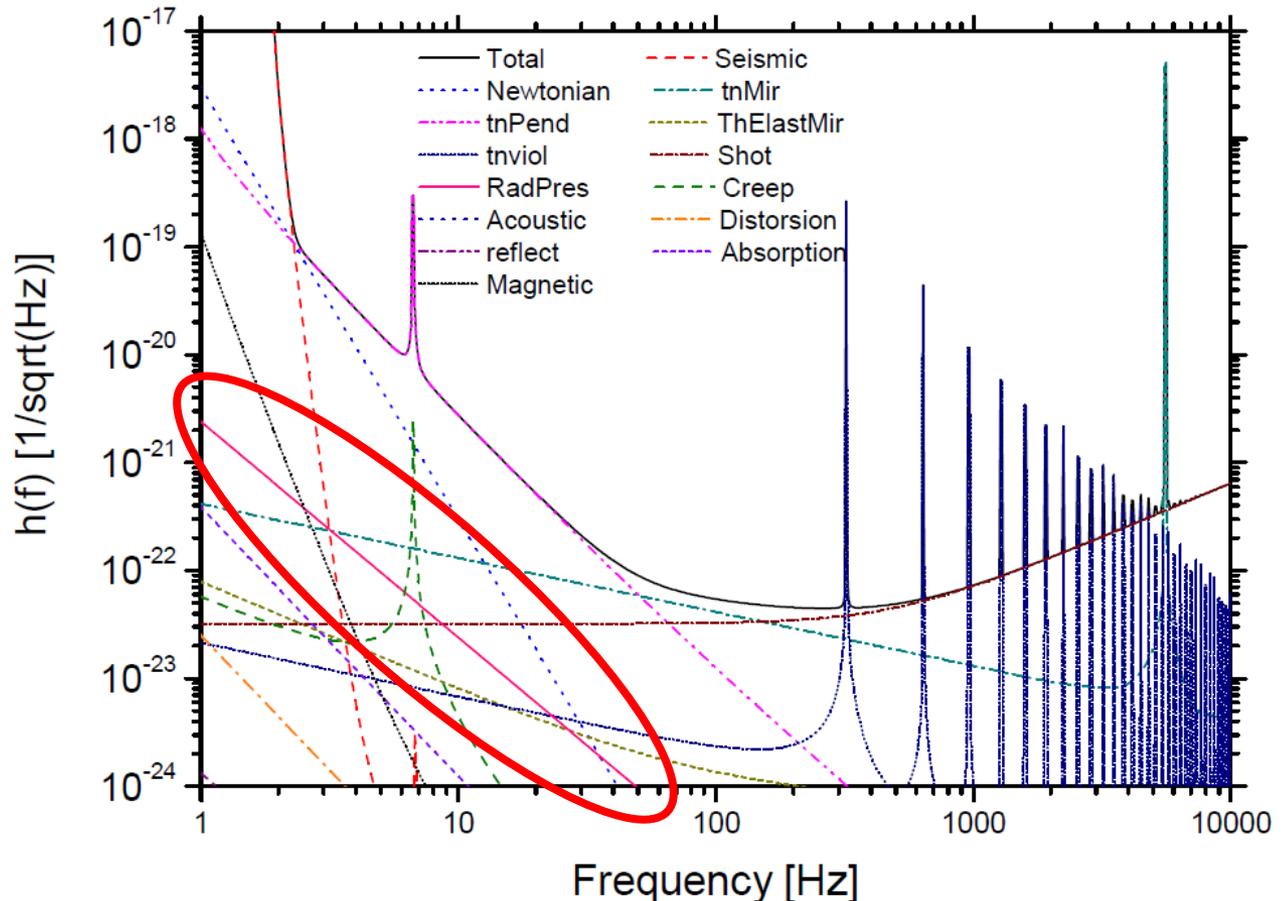
- Bruit quantiques : bruit de grenaille et **pression de radiation**

- Fluctuations de la pression de radiation dues aux chocs des photons sur les miroirs

- Varie comme \sqrt{P}
 - L'inverse du bruit de grenaille !

- Bruit non limitant pour Virgo mais **important pour Advanced Virgo**

→ Activités R&D autour des « états compressés de lumière » (**light squeezing**) pour contourner la limite quantique

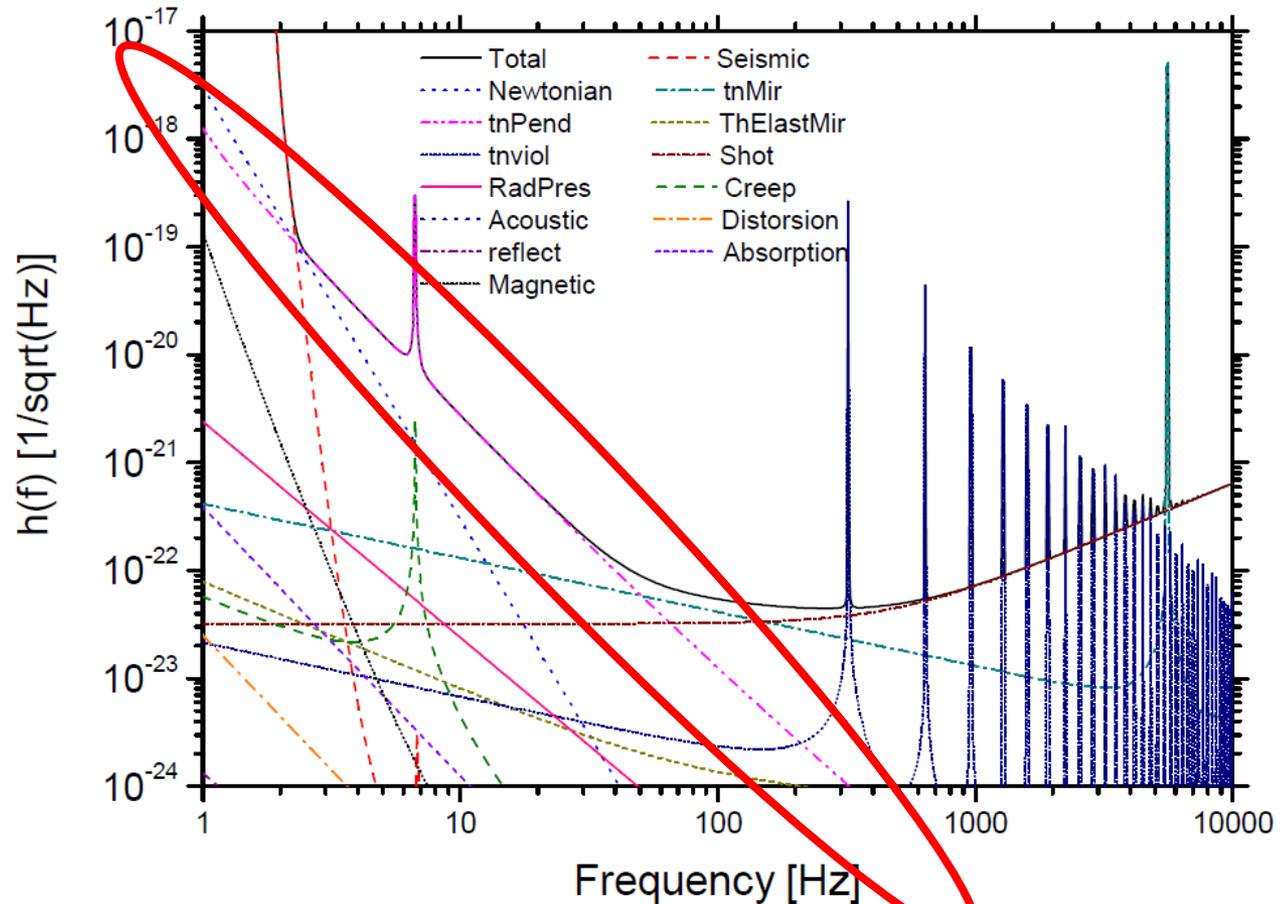
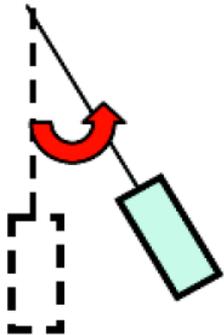


Courbe de sensibilité

- **Bruits thermiques** : origines très variées

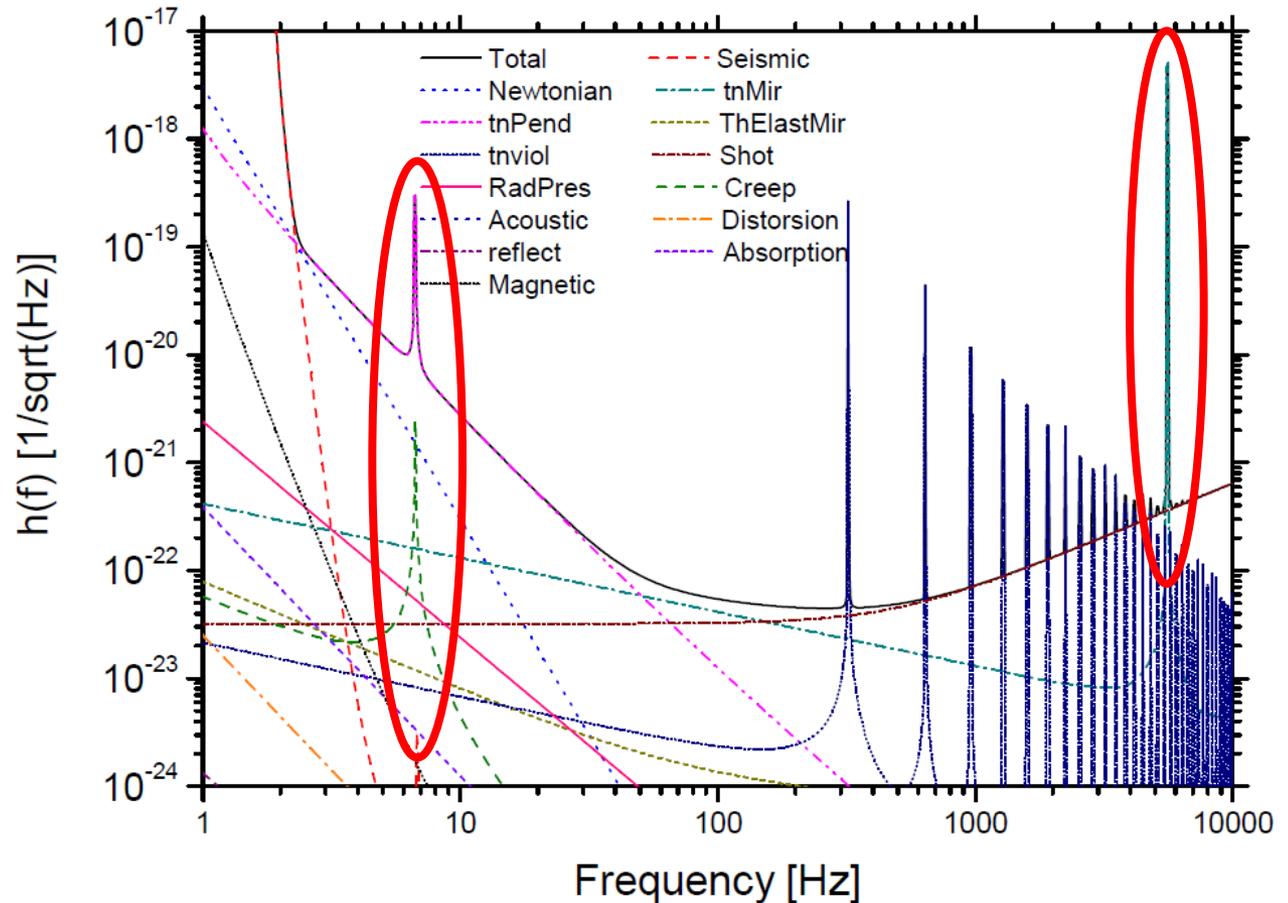
- **Mode pendule**

- Fréquence : 0,6 Hz
→ Très basse fréquence
- Mais facteur de qualité très élevé
→ Domine le bruit jusqu'à quelques dizaines de Hz



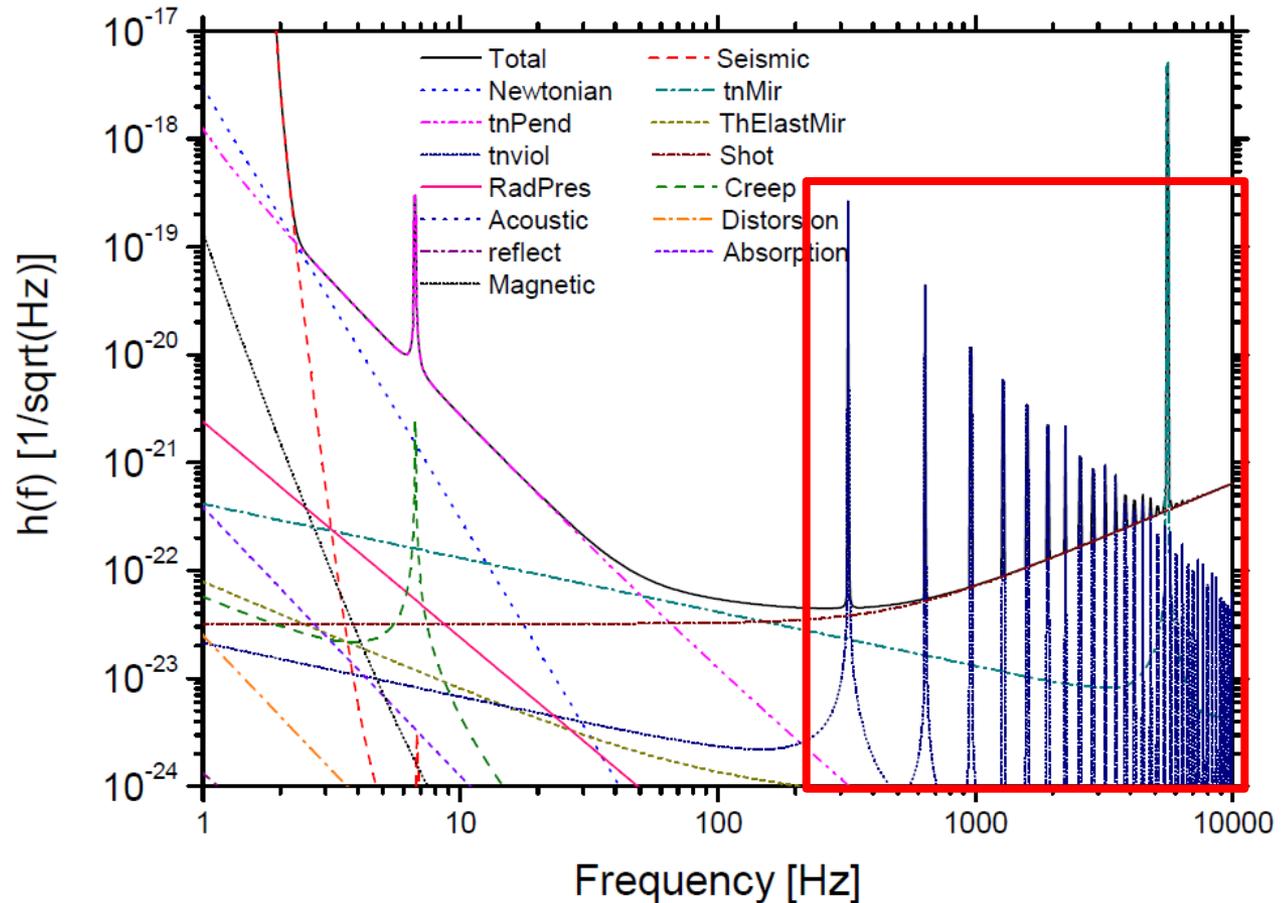
Courbe de sensibilité

- **Bruits thermiques** : origines très variées
- **Résonance verticale convertie en mvt horizontal**
 - Couplages
- **Résonance du substrat des miroirs**
 - Facteur de qualité élevé



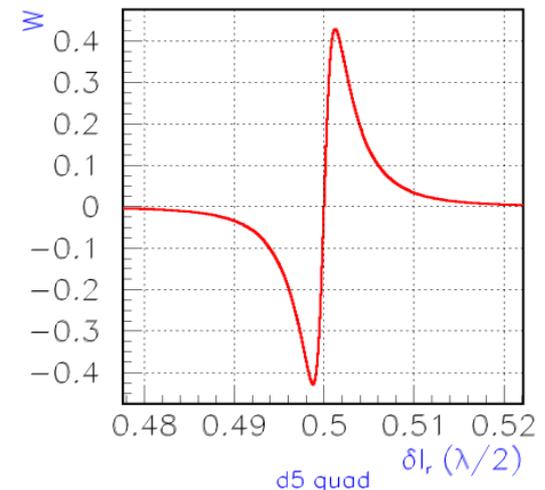
Courbe de sensibilité

- **Bruits thermiques** : origines très variées
- **Modes violon des miroirs**
 - Fondamental + harmonique



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 successivesMouvement 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^{ère} à la 2^{nde} génération de détecteurs

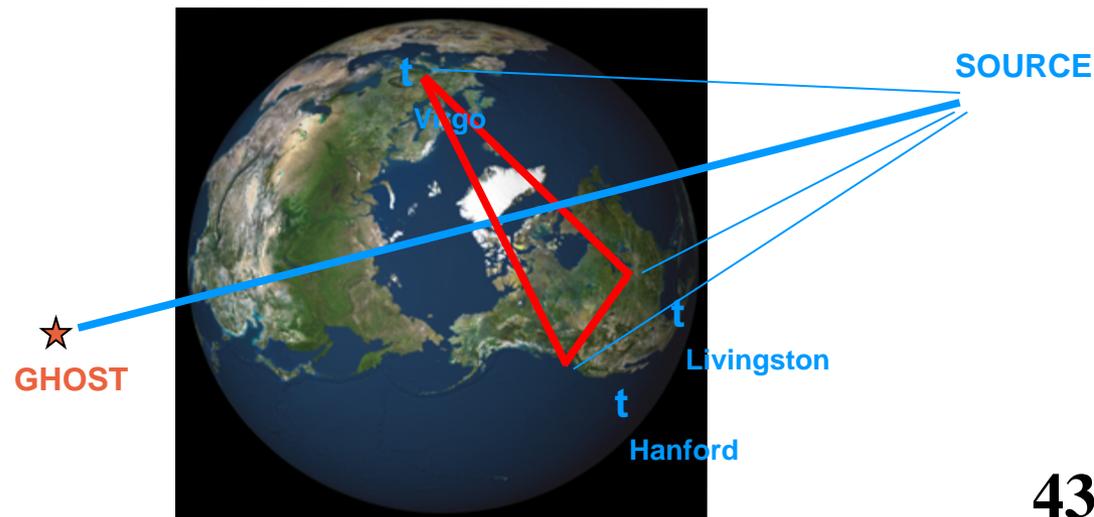
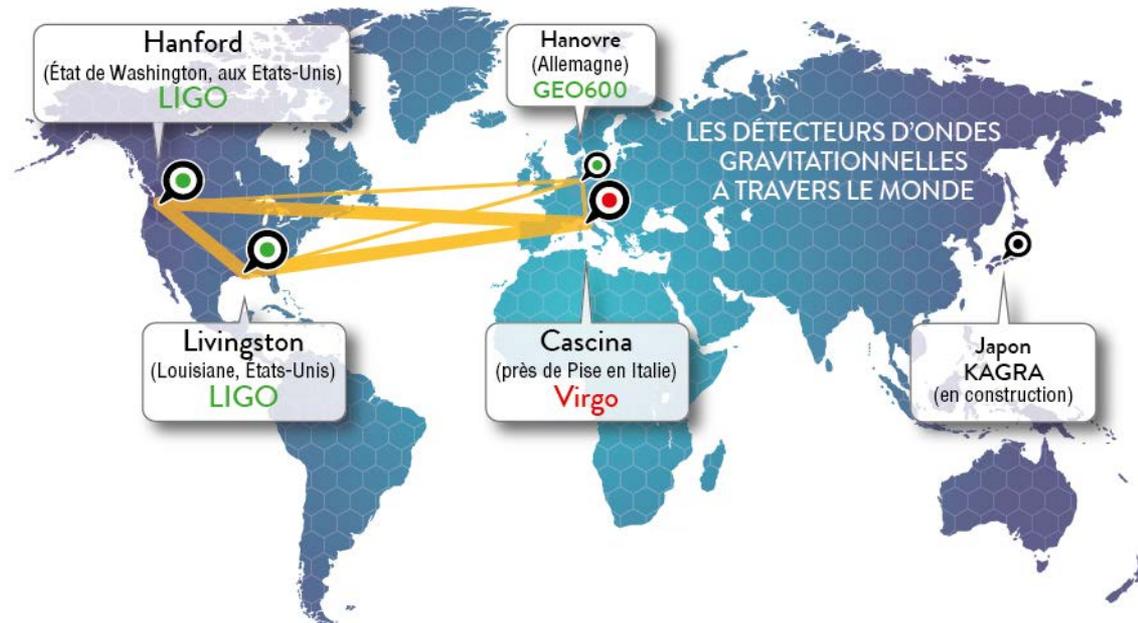
- But : améliorer d'un facteur 10 la sensibilité des détecteurs
 - Augmentation d'un facteur 1000 du volume d'Univers observable !
 - Augmentation significative des taux d'événements attendus
 - A grande échelle, l'Univers est isotrope et uniforme
- Pour y parvenir : des améliorations très variées
 - 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 d'ici un an ...

Un réseau de détecteurs

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

→ Solution : utiliser un réseau d'interféromètres

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



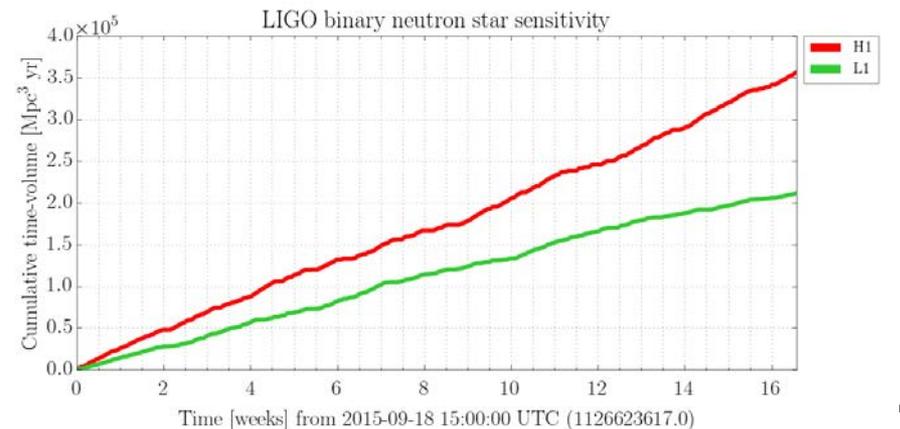
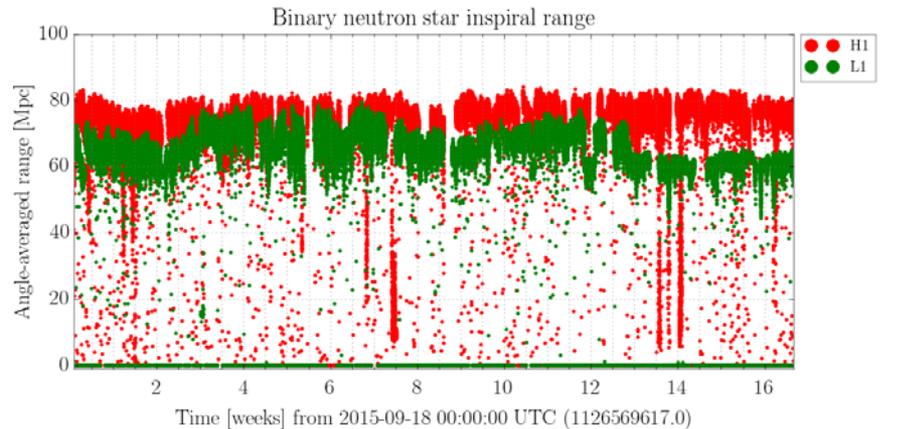
Un réseau de détecteurs



Etude de l'événement GW150914

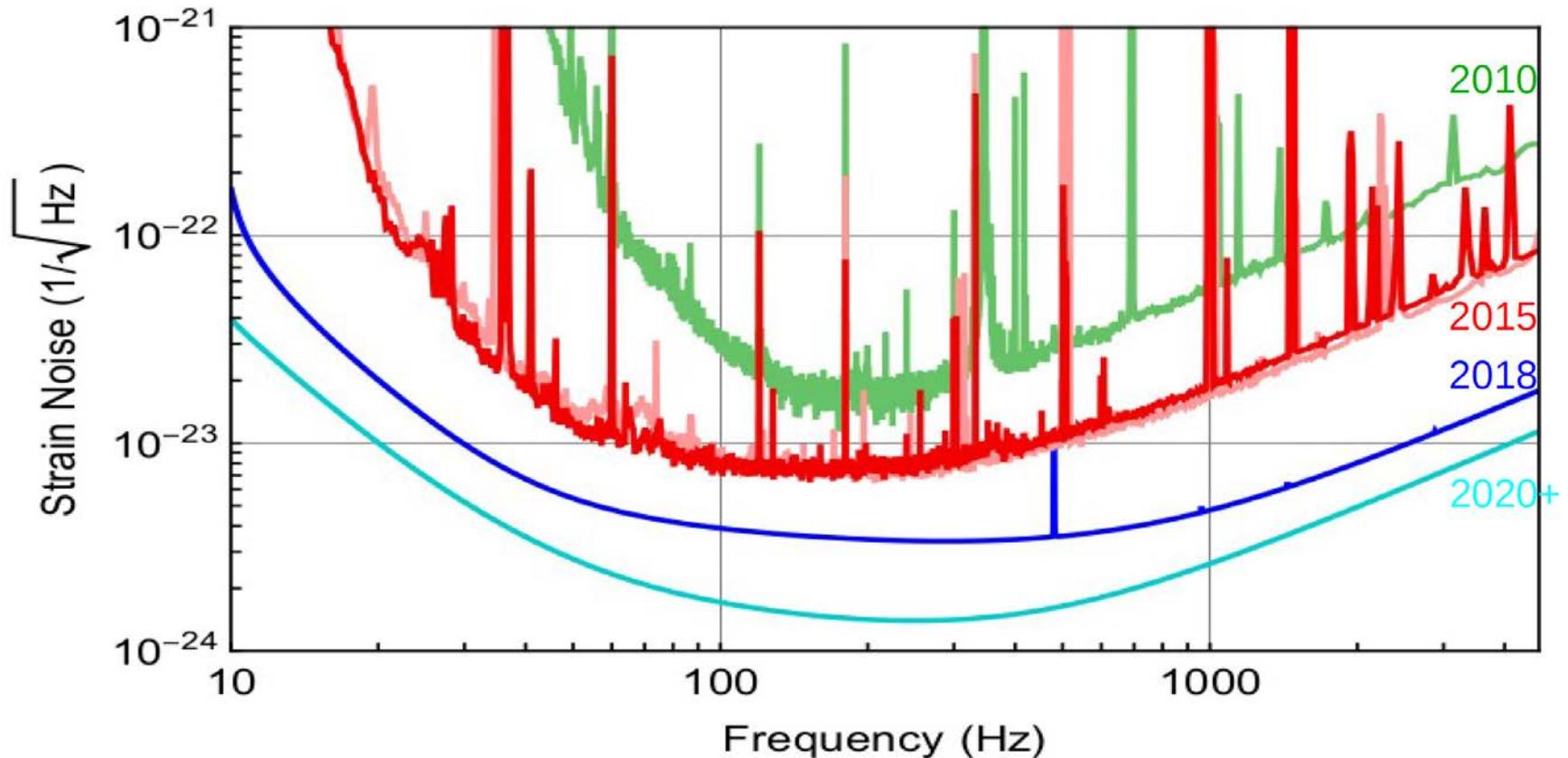
Prise de données O1

- 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



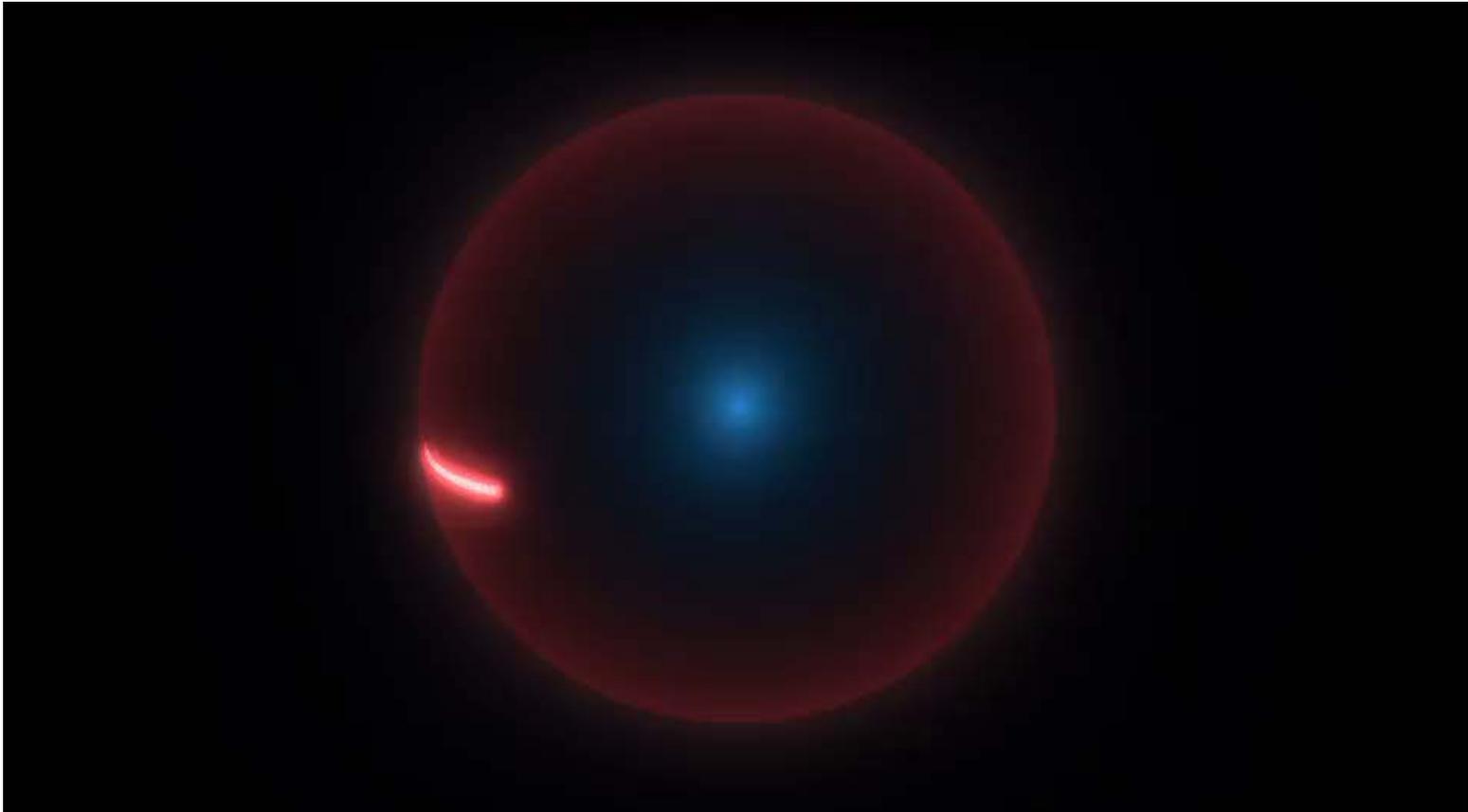
Une sensibilité record

- Sensibilité très largement améliorée
 - Amélioration d'un facteur 3-4 sur une large gamme de fréquence
→ Facteur 30-60 au niveau du volume d'Univers observé
- Gain impressionnant à basse fréquence – où se situe le signal GW150914



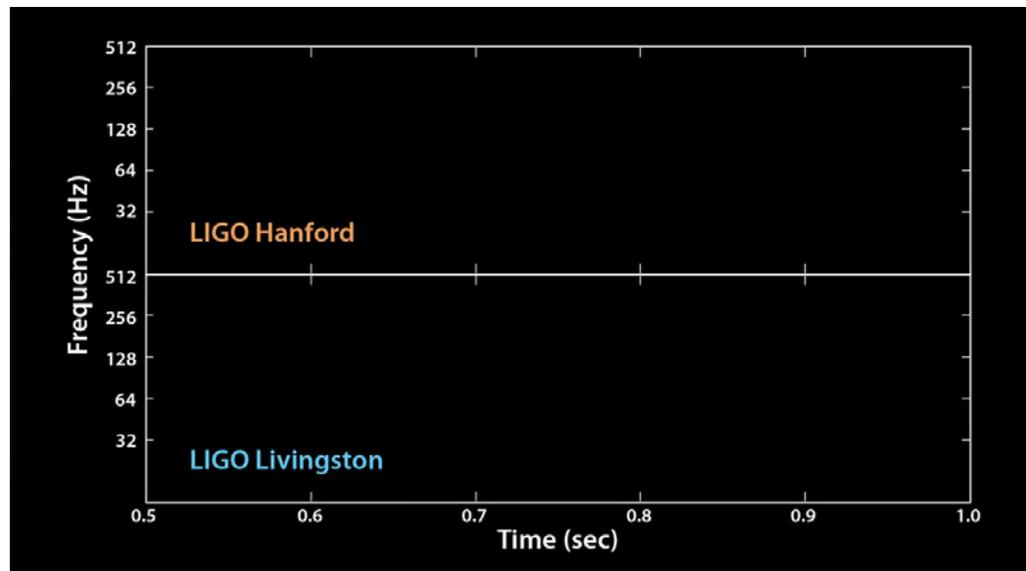
Puissances de dix

- Un zoom vers « l'infiniment petit », à partir d'un atome d'hydrogène et jusqu'au **niveau de variation de longueur mesuré par les détecteurs LIGO**
 - Pour y parvenir : amplification du signal + réduction au maximum des bruits



Le « gazouillis » de GW150914

- GW150914 n'est pas un signal audible mais son contenu en fréquence correspond à la gamme de fréquence à laquelle l'oreille humaine est sensible
→ **Conversion de la forme d'onde en son**
- Signal répété huit fois
 - Vrai signal : deux fois
 - Signal déplacé à des fréquences plus élevées : deux fois
→ Signal plus audible
 - Vrai signal : deux fois
 - Signal déplacé à des fréquences plus élevées : deux fois



Que s'est-il passé juste après GW150914 ?

- 14/09 2015, 11h51 : **événement enregistré** – 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

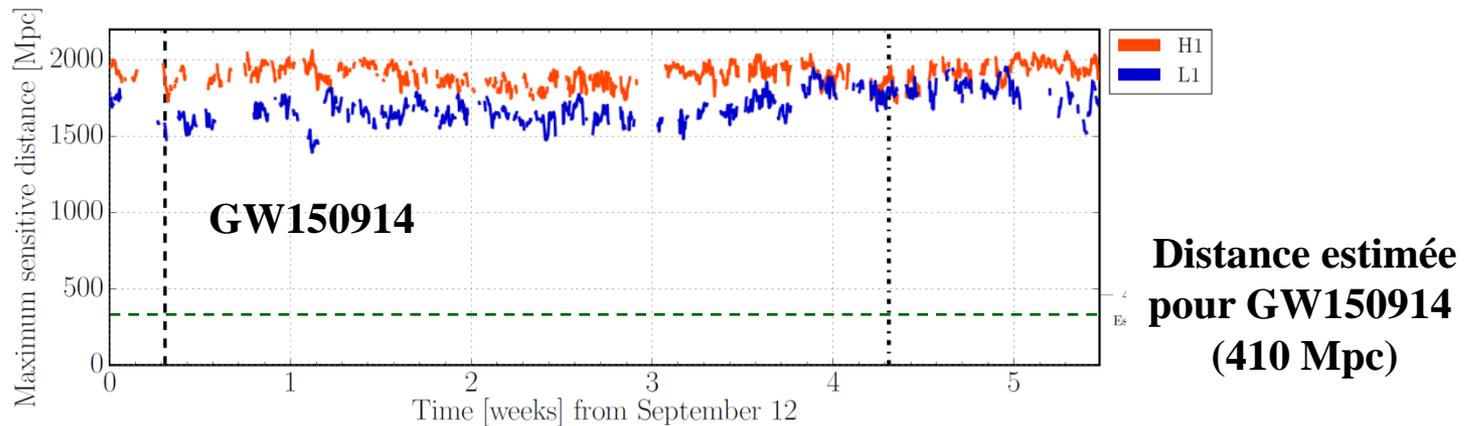
From Marco Drago★
Subject [CBC] Very interesting event on ER8

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

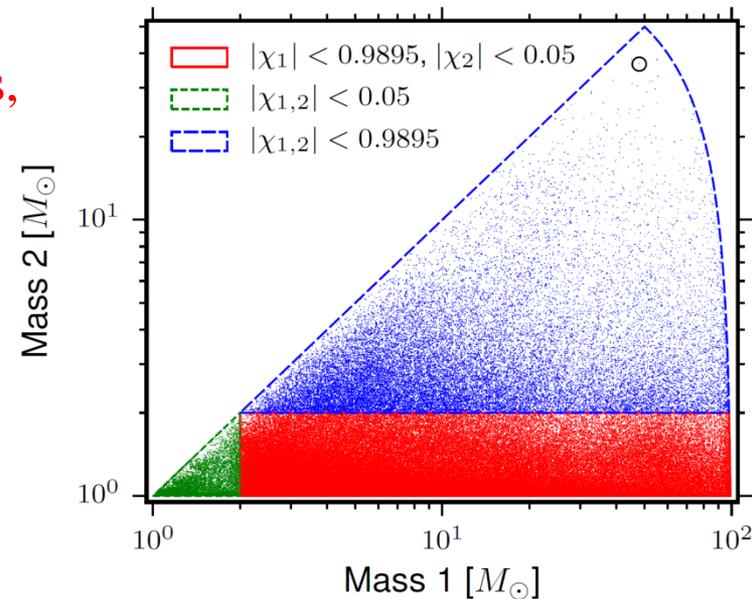
- Peu après que GW150914 a été identifié comme un événement prometteur, il a été décidé de « figer » le détecteur pour accumuler des données dans cette configuration
 - ~40 jours (jusqu'à fin octobre) correspondant à 16 jours de données en coïncidence
 - Performances constantes sur cette période



- 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 !

Recherche de fusion d'astres compacts

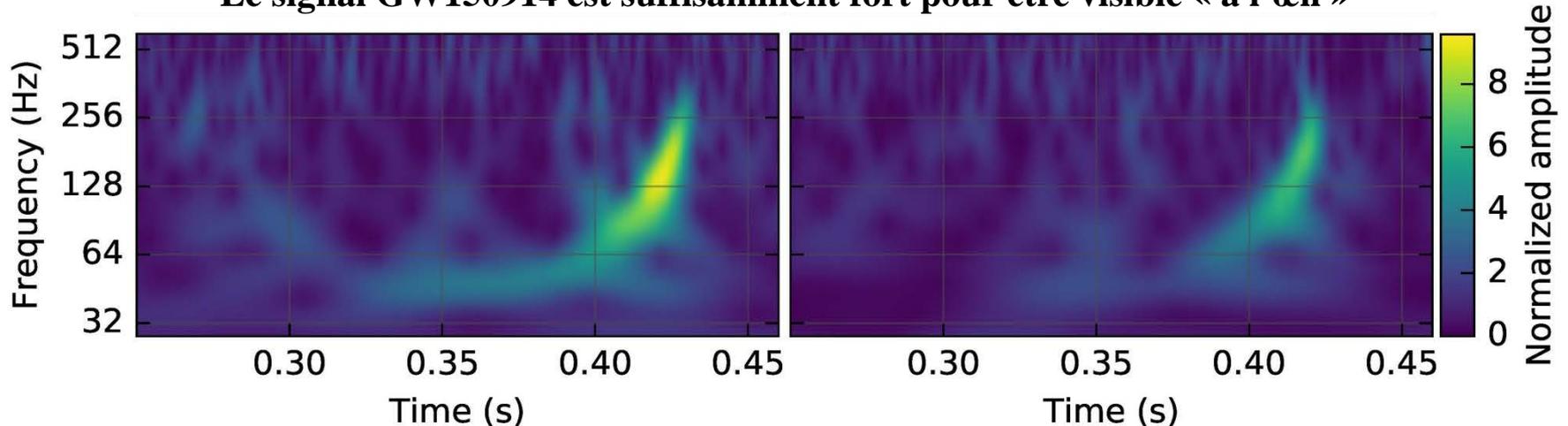
- Cas où les formes d'onde attendues sont connues
 - Technique du **filtrage adaptée** (optimale)
 - On « compare » (opération mathématique) les données avec un « calque » qui correspond au signal cherché. Si les données contiennent un signal qui « ressemble » beaucoup au calque, l'algorithme le fait « 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 « ressemblant » au même calque
- Analyses détaillées des données par deux groupes de travail indépendants (voire concurrents ...)



Recherche de signaux transitoires

- Recherche d'excès d'énergie – par rapport au bruit – dans les diagrammes temps-fréquence
 - Utilisation d'ondelettes

Le signal GW150914 est suffisamment fort pour être visible « à l'œil »



- L'excès doit être cohérent (et coincident) entre les deux interféromètres
- Efficacité similaire à celle des recherches par filtrage adapté pour les systèmes binaires de trous noirs
 - Fonctionnement en temps réel pour O1 !

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

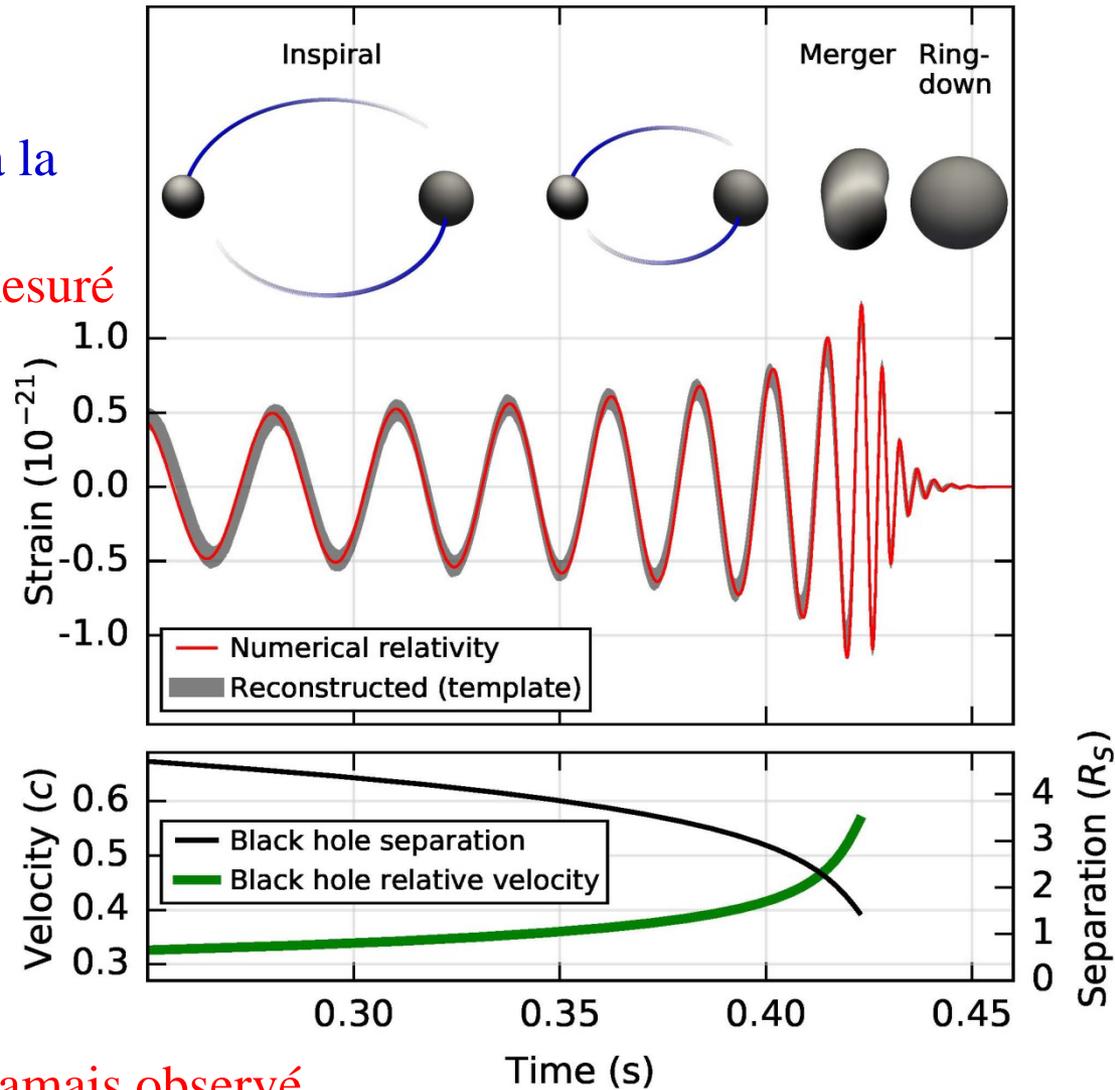
→ A peine quelques R_S !

- 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



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**

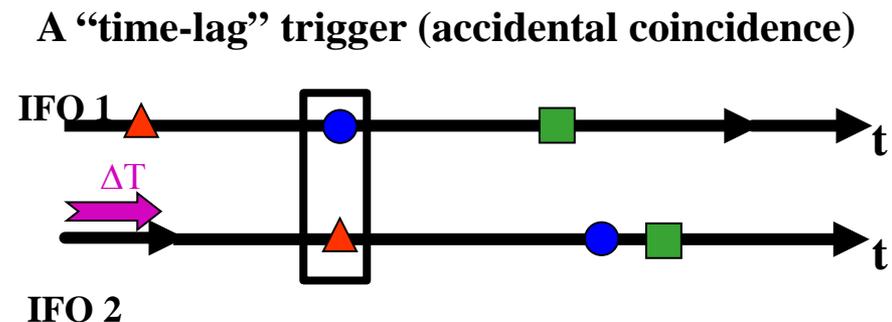
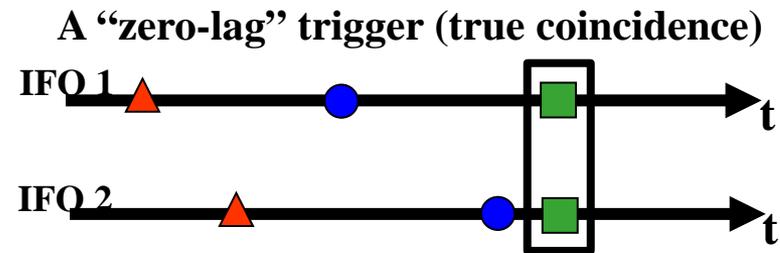
→ Méthode des « décalages temporels » pour générer un lot de données plus conséquent

- 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



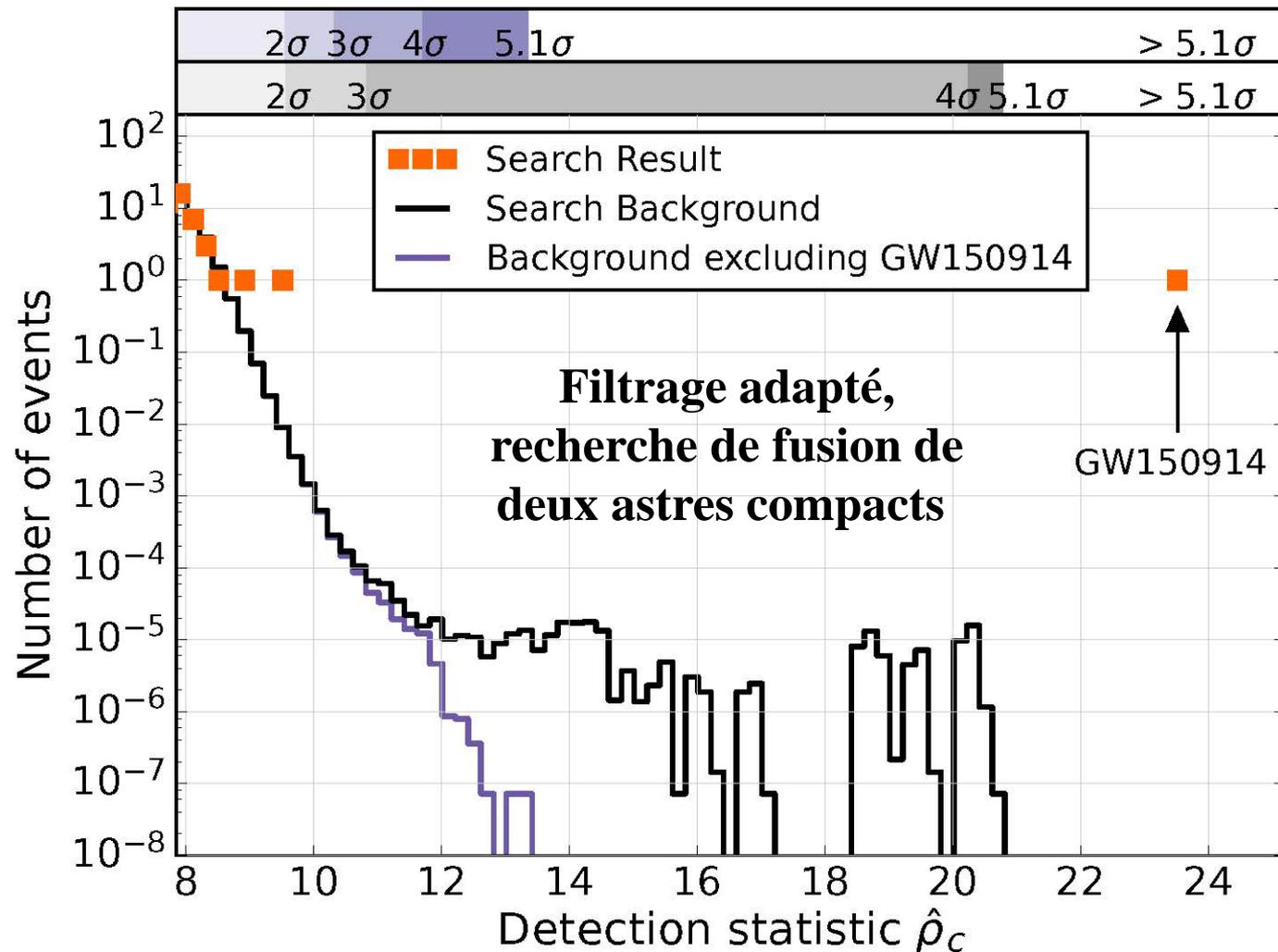
Mesurer la « réalité » du signal

- 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**

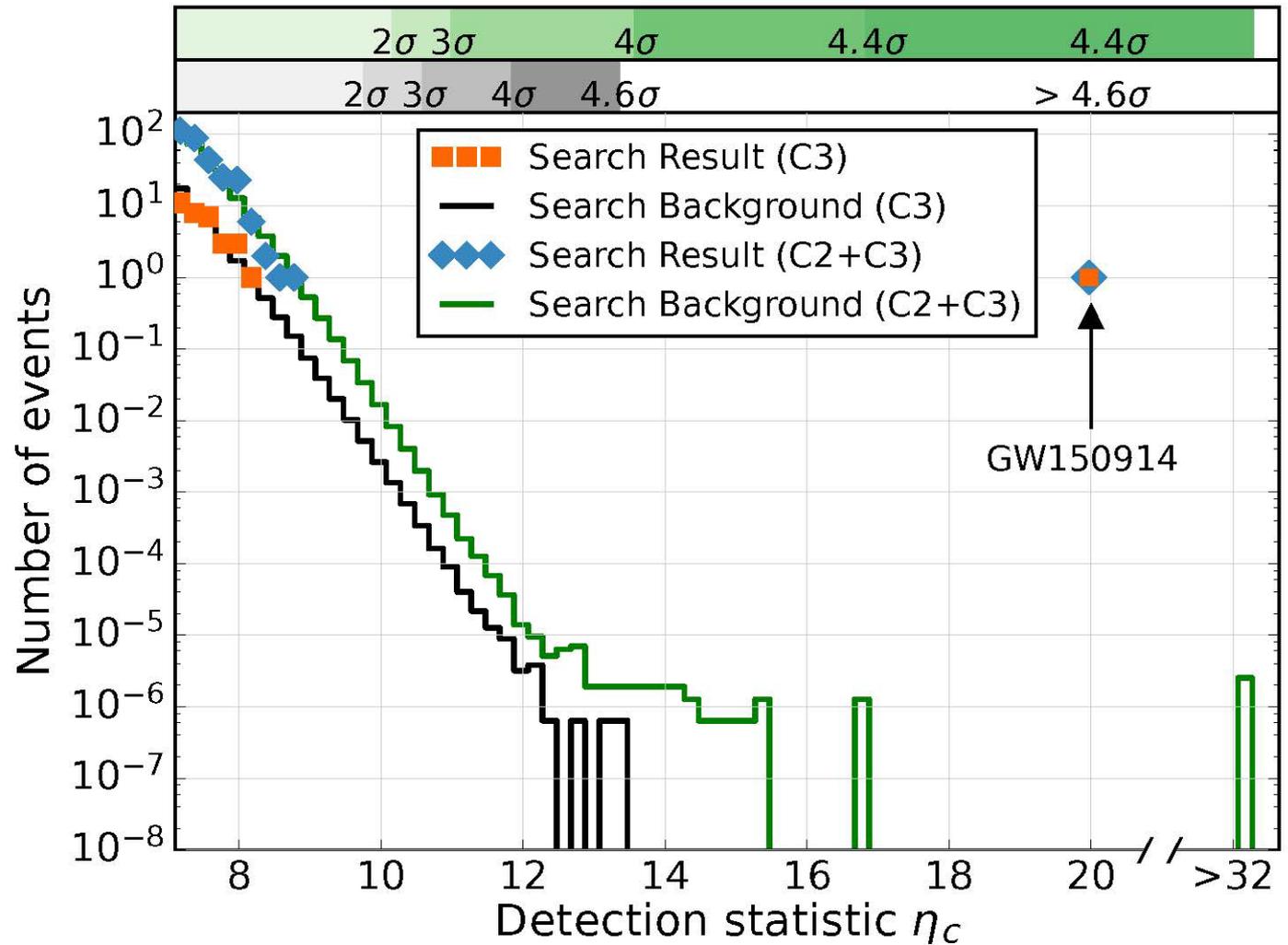


- Lignes continues : 2 estimations du bruit de fond

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

Idem pour la recherche de signaux transitoires

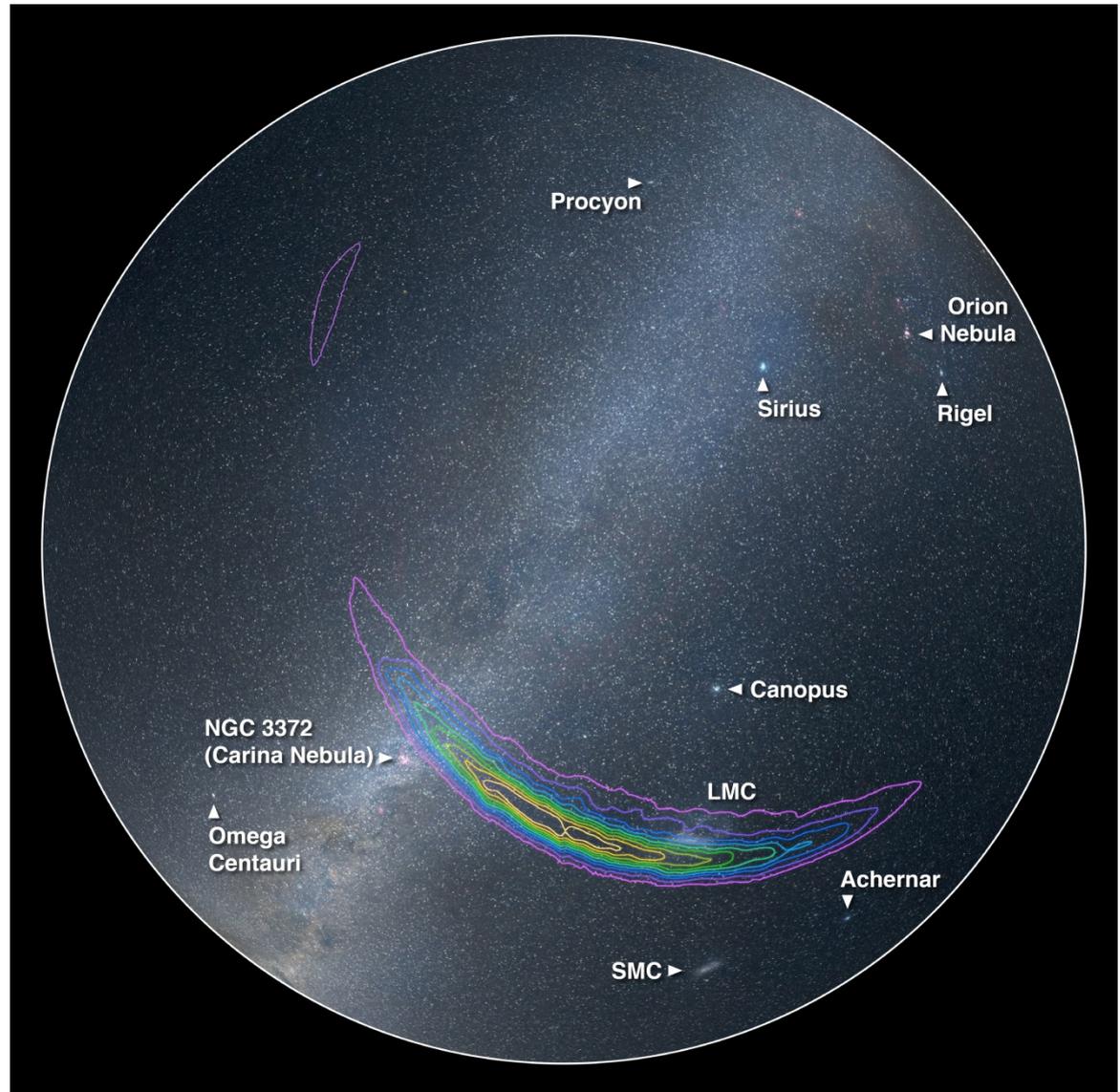
- Même type de graphique



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

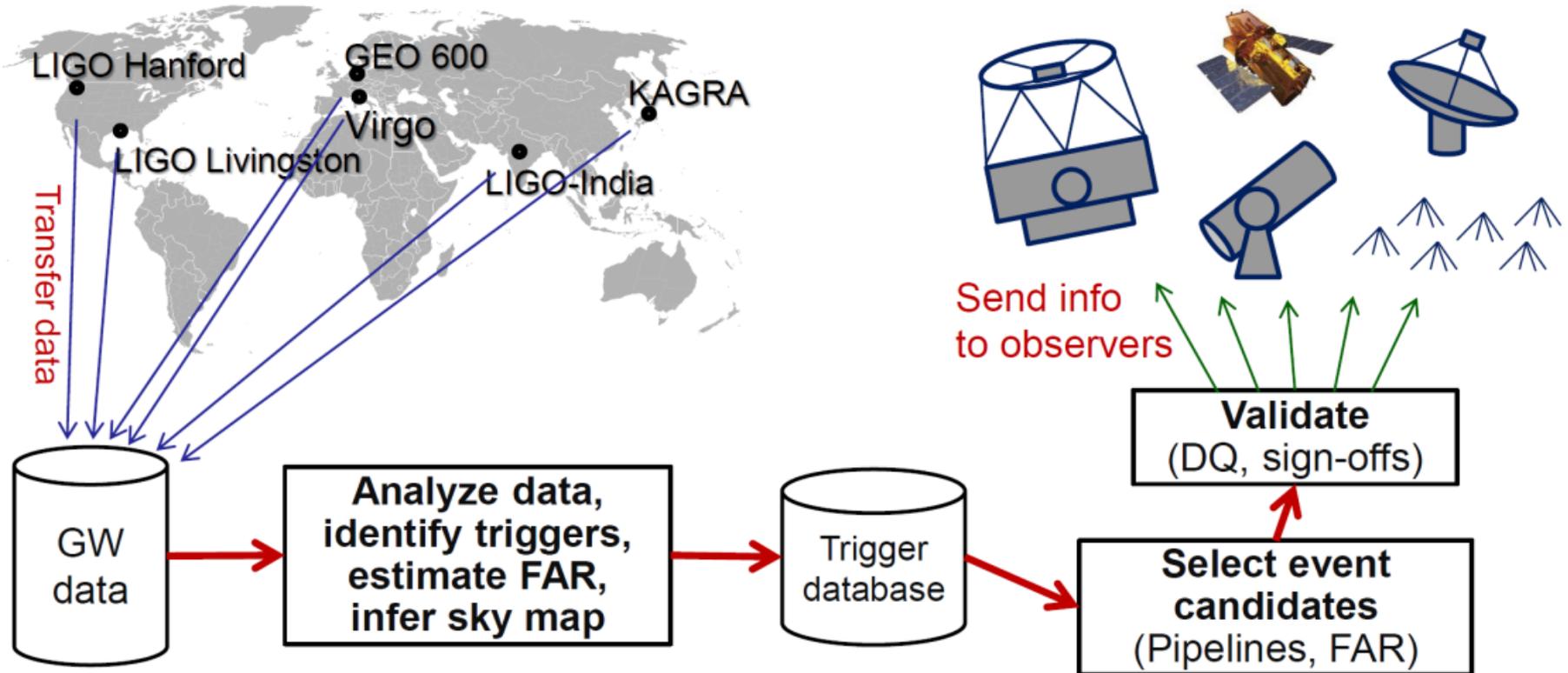
Carte du ciel associée à GW150914

- 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 et Voie Lactée en diagonale



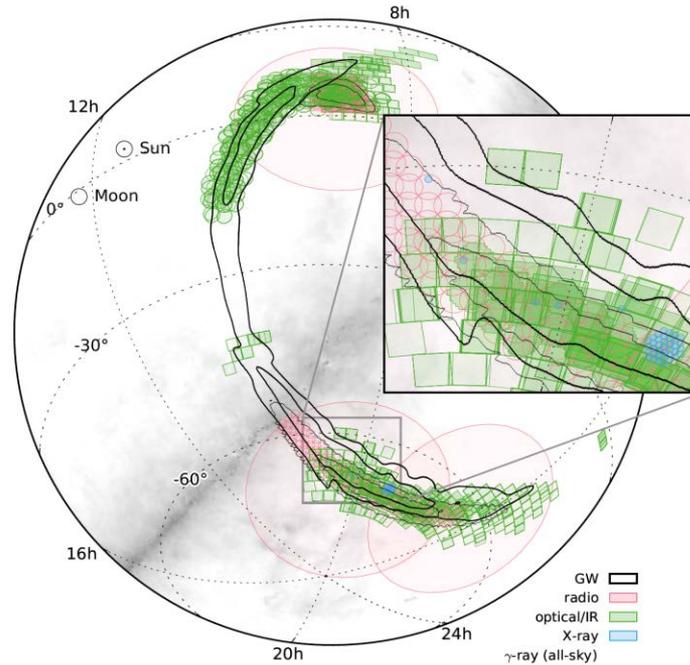
Recherche de contreparties optiques

- Méthode

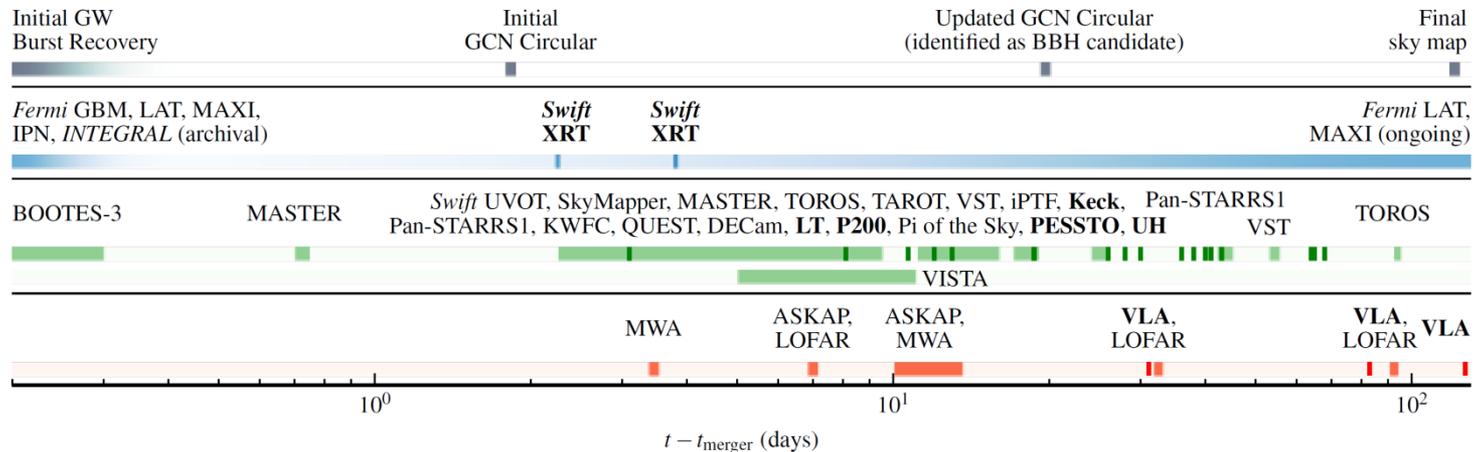


Recherche de contreparties optiques

- Couverture du ciel



- Observations : aucune contrepartie identifiée

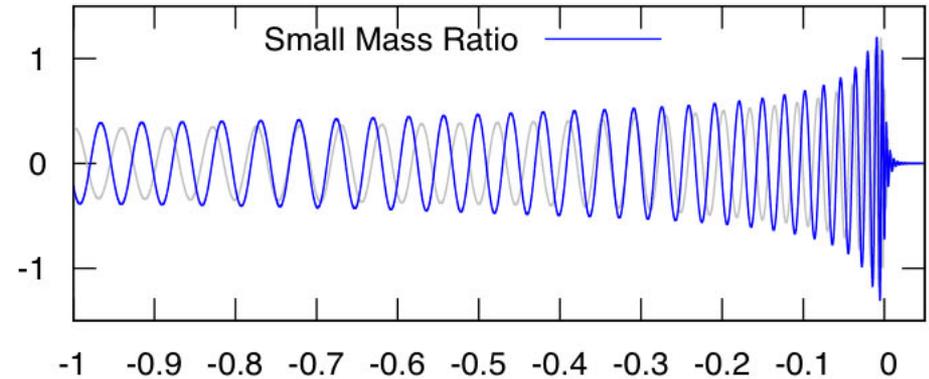
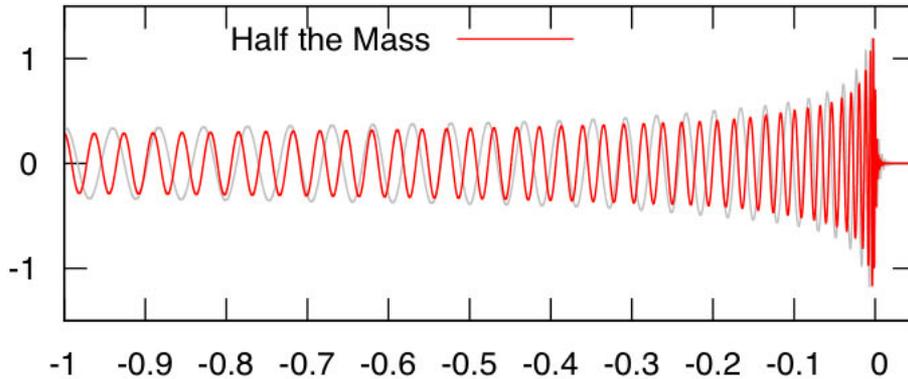
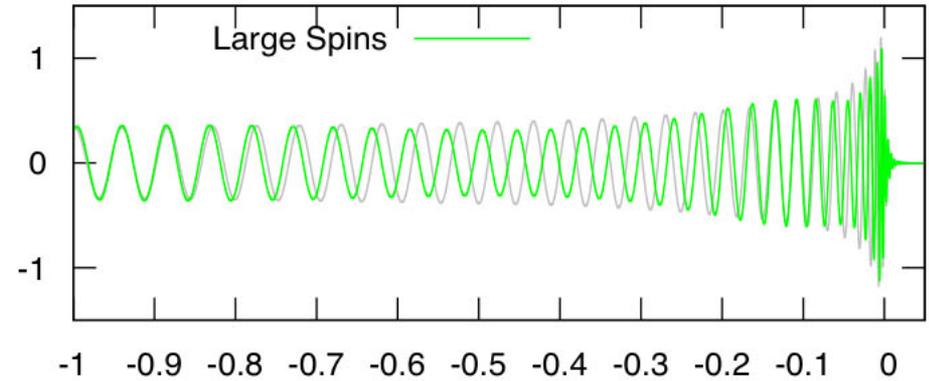
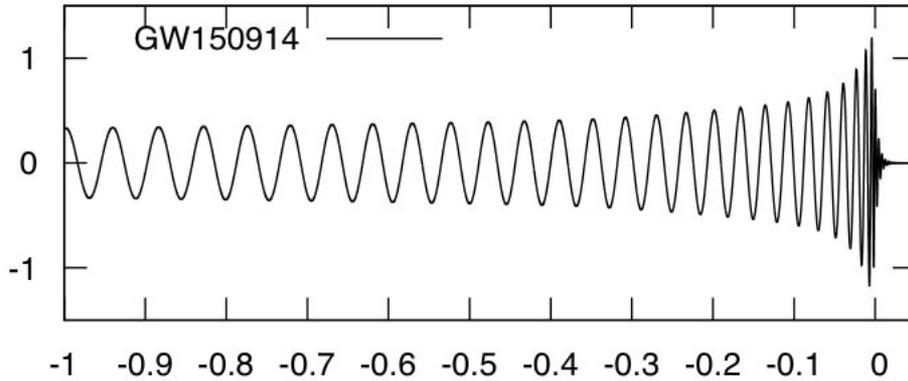


Mesure des paramètres du signal

- 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	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	± 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	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M _⊙	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, 3.5×10^5 km ²
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 ⁻³ yr ⁻¹
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.		

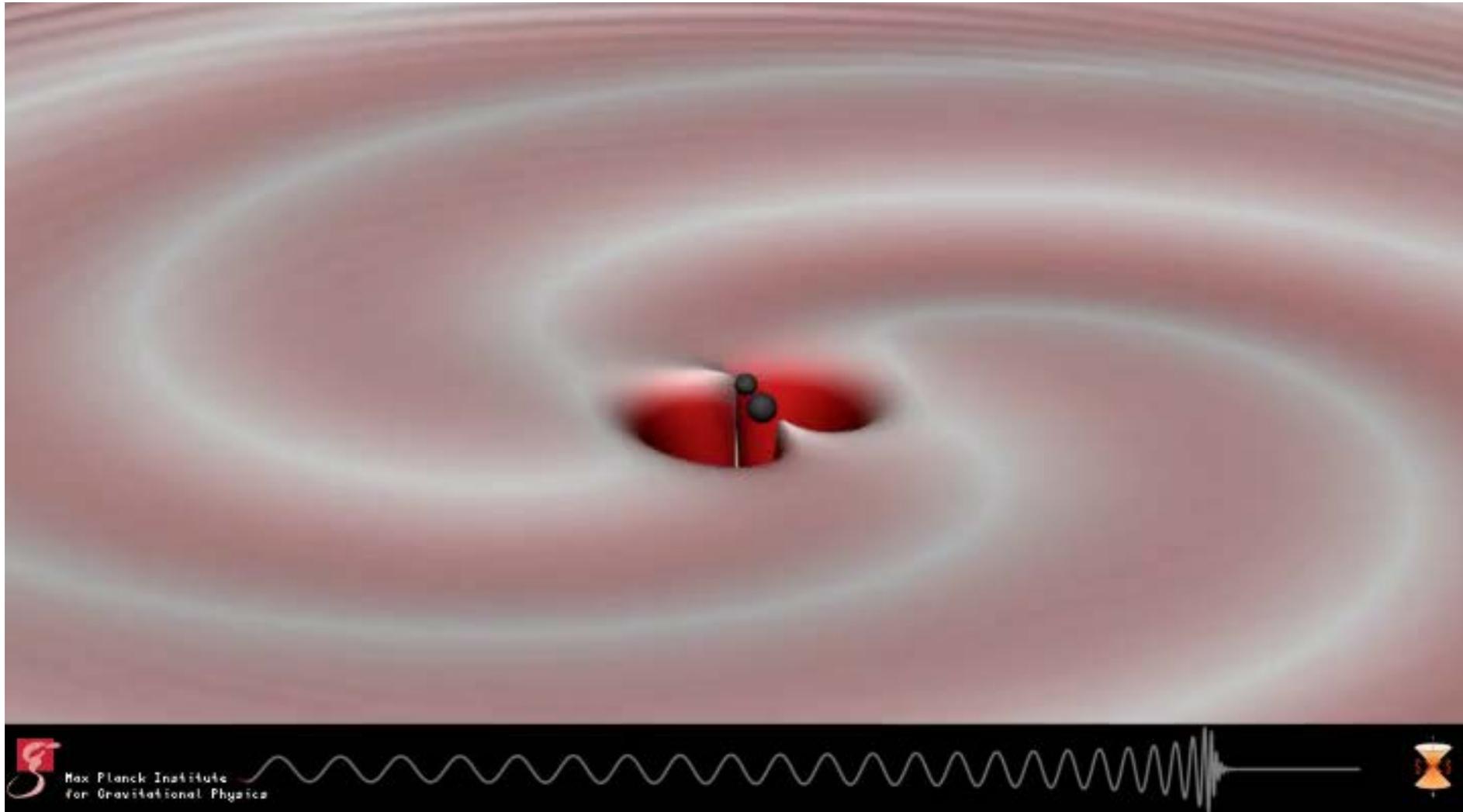
Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= 9.46×10^{12} km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc, fm=femtometer= 10^{-15} m, M_⊙=1 solar mass= 2×10^{30} kg

En résumé



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

Simulation de la fusion des deux trous noirs



Film CNRS Images

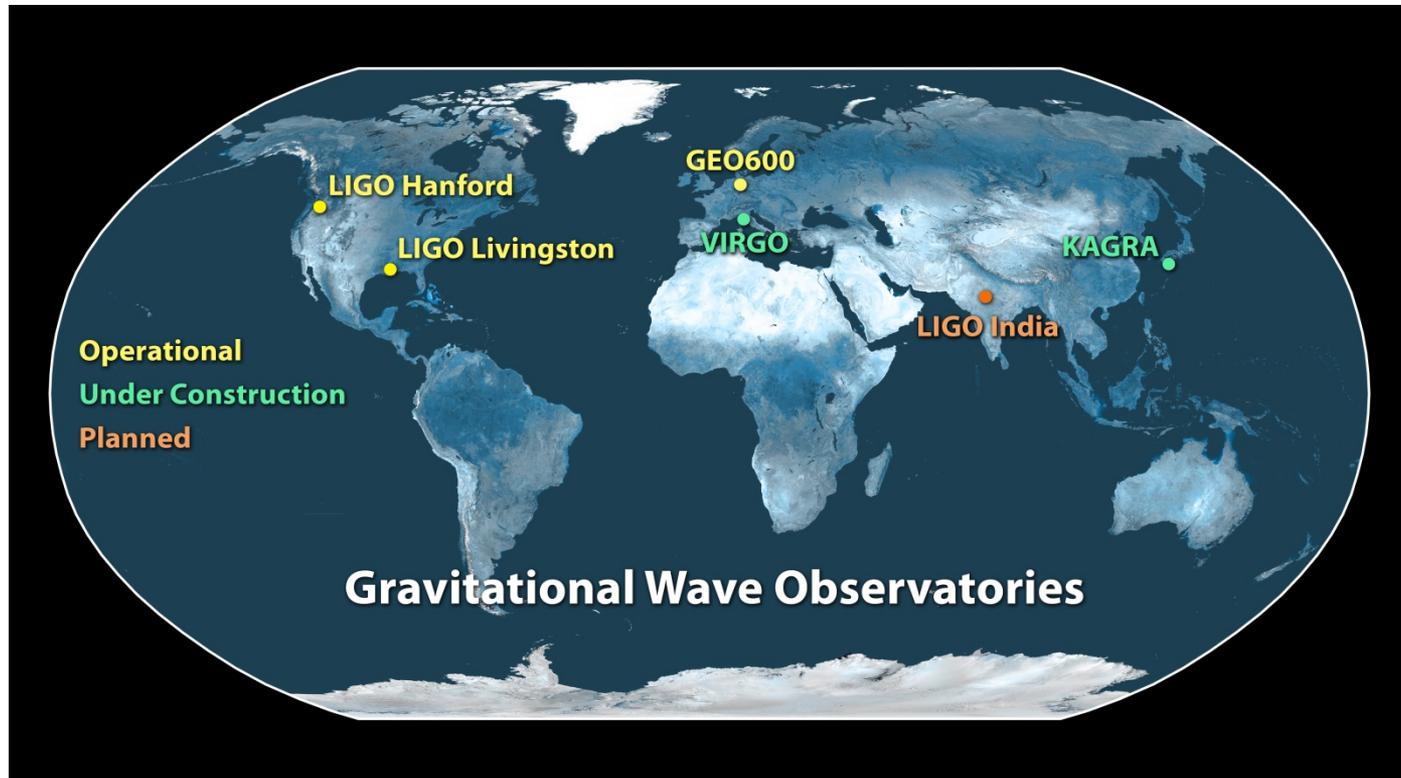
- <https://lejournal.cnrs.fr/videos/ondes-gravitationnelles-les-detecteurs-de-lextreme>
 - 6 minutes, 2016



Et maintenant ?

Perspectives pour la prise de données O2 et au-delà

- Les analyses de la prise de données O1 sont encore en cours
 - Publications portant sur l'ensemble de la prise de données dans les prochains mois
- Dans les prochaines années : un réseau de détecteurs plus large



- Amélioration de la sensibilité des instruments
 - On devrait observer d'autres signaux

Conclusions

- Première observation directe des ondes gravitationnelles
- Première observation directe 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 et commencé à observer certains des événements les plus violents qui s'y déroulent

Pour en savoir plus

- En français
 - Communiqué de presse : <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/4409.htm>
 - Ressources supplémentaires accessibles en bas de cette page web

