

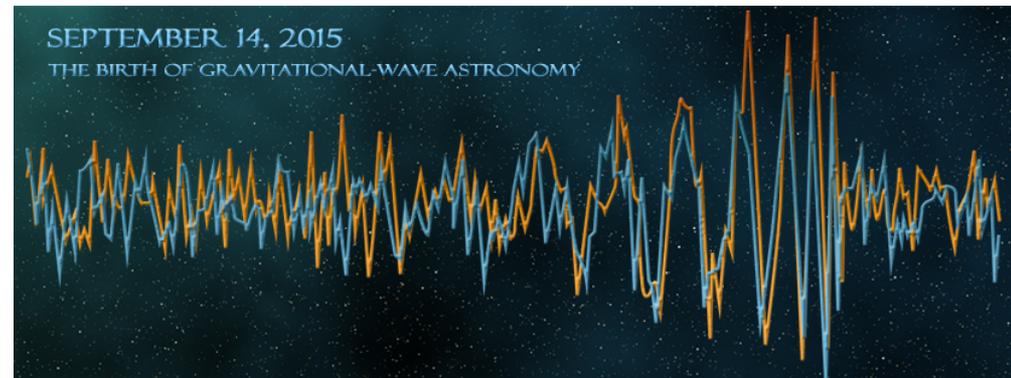
Détecter les Ondes Gravitationnelles

24 Février 2017, Visite IN2P3 Michel-Ange

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

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

<https://events.ego-gw.it/indico/conferenceDisplay.py?confId=50>



 **EGO** EUROPEAN
GRAVITATIONAL
OBSERVATORY

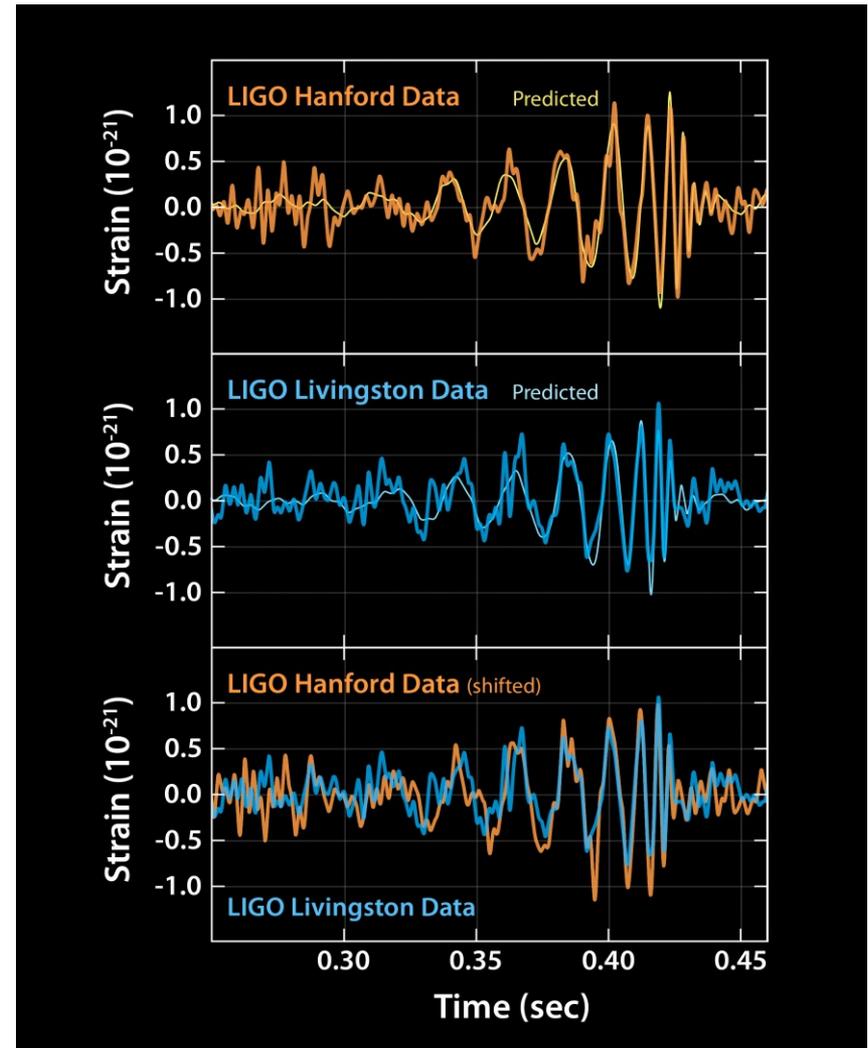



LABORATOIRE
DE L'ACCÉLÉRATEUR
LINÉAIRE

 UNIVERSITÉ
PARIS
SUD
 université
PARIS-SACLAY

Plan

- La **découverte** en bref : **GW150914**
- La saga des **ondes gravitationnelles**
- **Comment les détecter ?**
 - **Interféromètres géants suspendus**
- **L'événement GW150914**
- **Et maintenant ?**
 - Une **nouvelle fenêtre sur l'Univers**



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 **2**

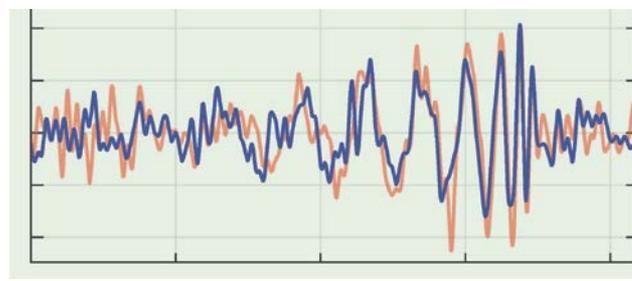
La découverte

en bref : GW150914

14 septembre 2015, 11:51 heure de Paris

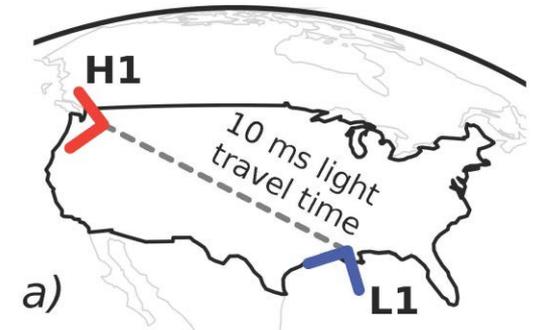
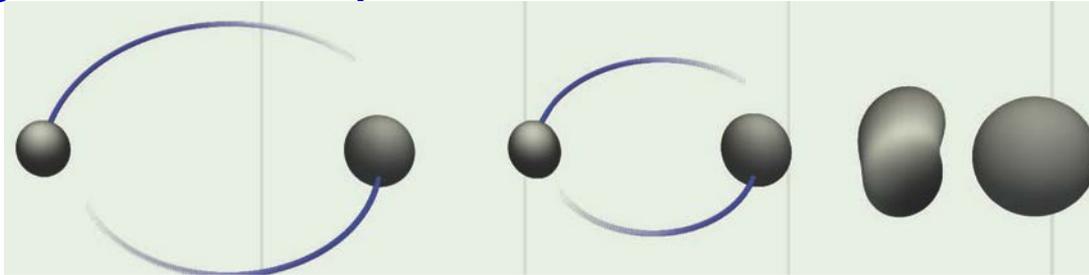
- **Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle**

- **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**



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

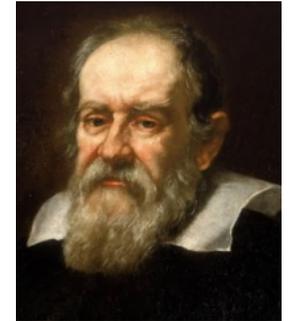
- Modèle **géocentrique** du système solaire (II^{ème} siècle de notre ère) de **Ptolémée**
 - La Terre est au centre
 - Tous les « astres voyageurs » orbitent autour d'elle **selon des empilements complexes de sphères**



- 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

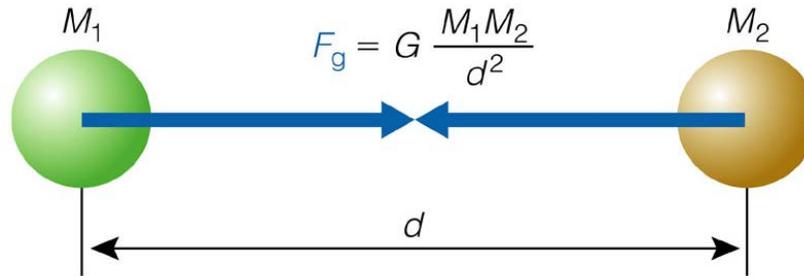
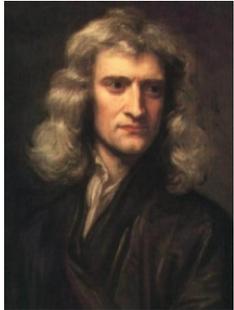
→ Il construit **trois** lois empiriques à partir desquelles il fait des prédictions confirmées par l'observation



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

- Mitchell (1783)

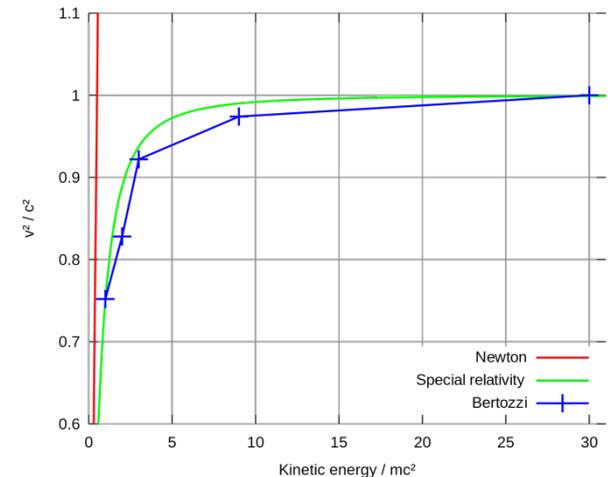
- de Laplace (1796)

} 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^e 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

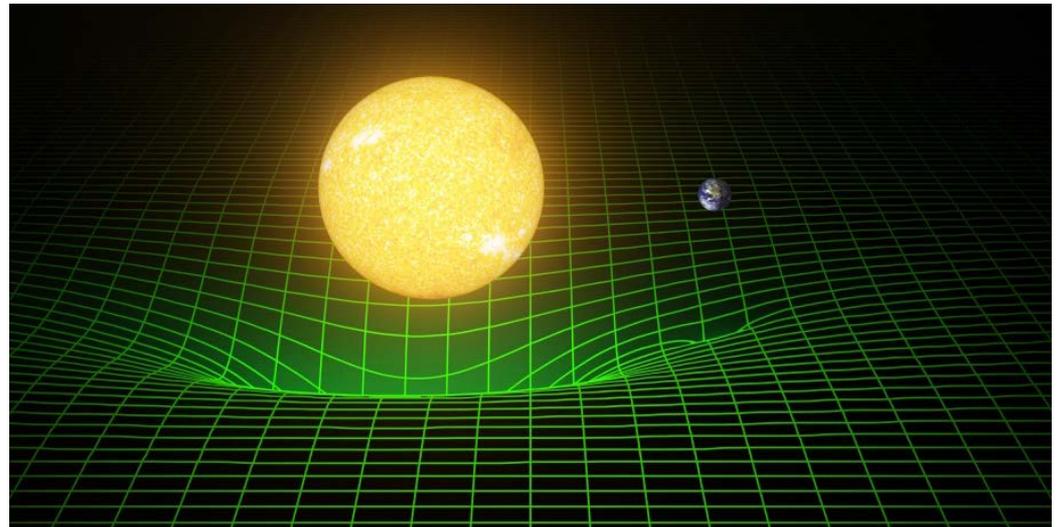
- **Attention : « compact » et « dense » sont deux choses différentes**
 - « Densité » d'un trou noir

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

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)

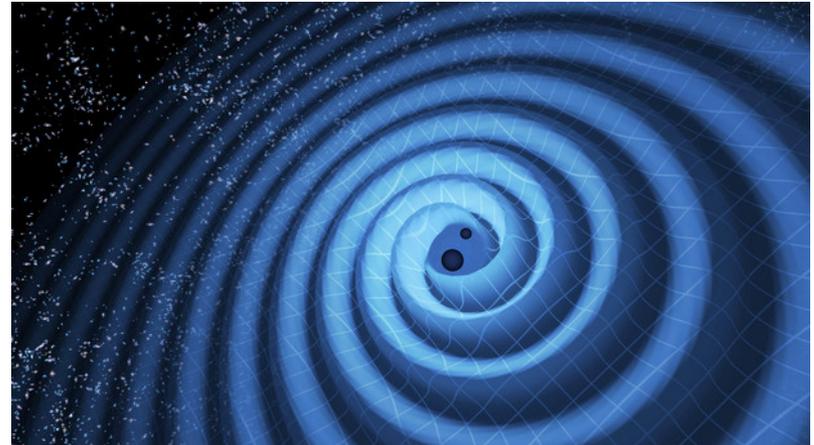


Gravitation ↔ Courbure de l'espace-temps
Courbure de l'espace temps ↔ Densité d'énergie

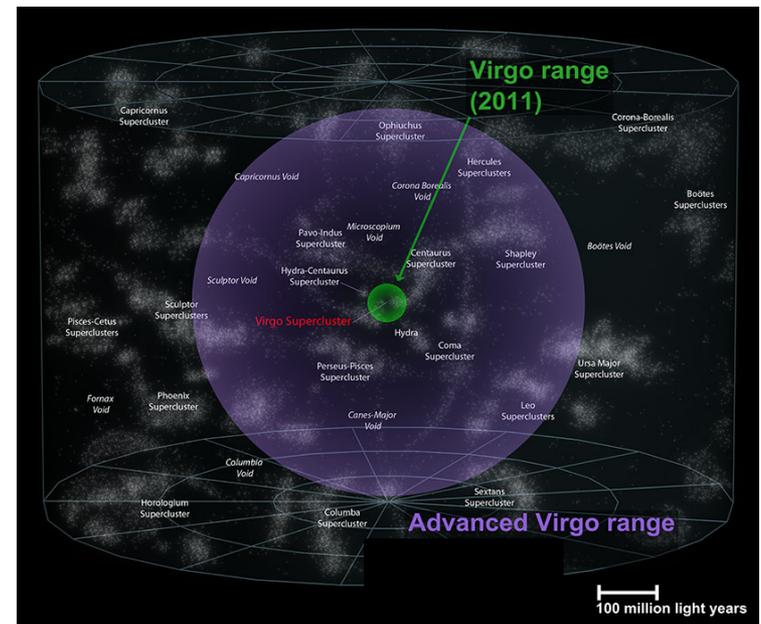
- **Généralisation** de la théorie de la gravitation universelle de Newton
 - **Explication de phénomènes** dont la mécanique newtonienne ne rendait pas compte : avance du périhélie de Mercure, etc.
 - **Prédiction de nouveaux effets** : expansion de l'Univers, trous noirs, lentille gravitationnelle,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

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



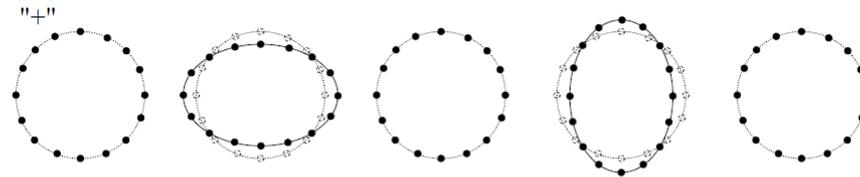
- Gain d'un facteur 2 (10) en sensibilité
⇔ Gain d'un facteur 2 (10) en distance
⇔ Volume d'Univers observable augmenté par un facteur 8 (1000)



Effet d'une onde gravitationnelle

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

- Polarisation « + »

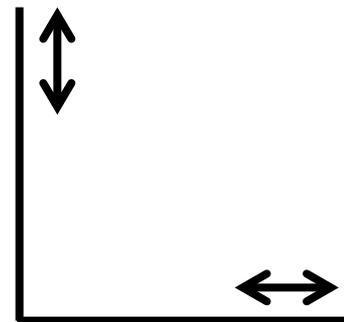


- Polarisation « × »



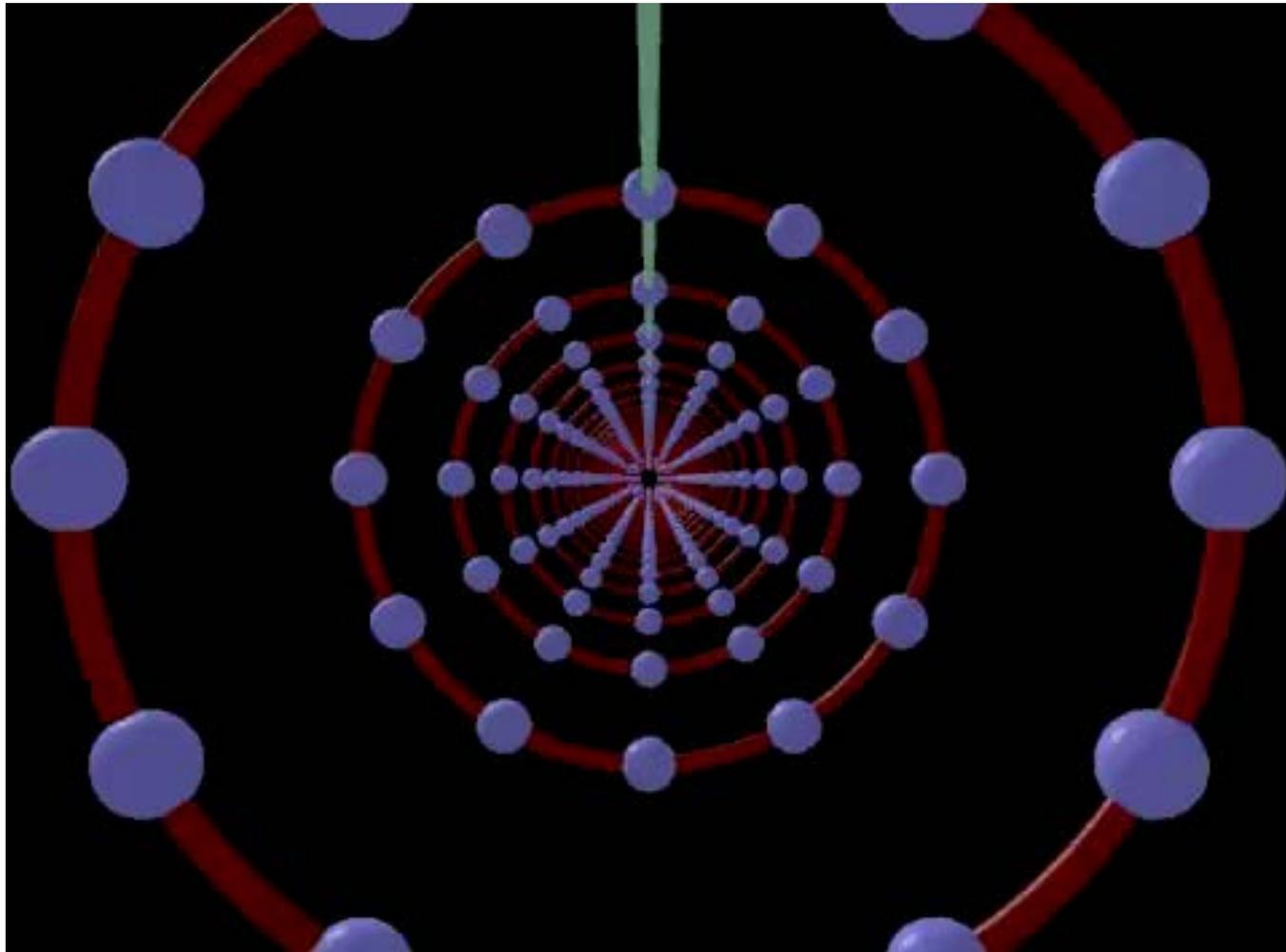
Une période

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



Effet d'une onde gravitationnelle

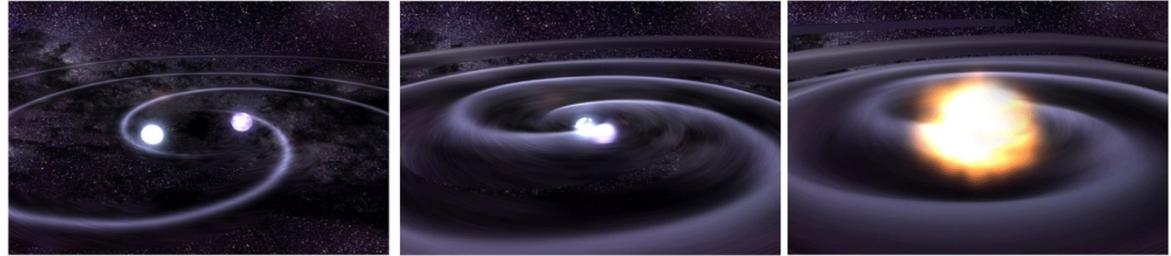
- En trois dimensions



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

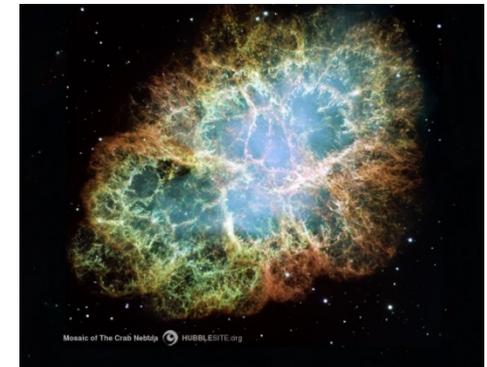
- Les derniers instants de l'évolution d'un système comme PSR B1913+16
→ Les astres compacts se rapprochent à mesure qu'ils perdent de l'énergie (→ OG)
- Trois phases distinctes: « spirale », « fusion » et « désexcitation »
→ Modélisées par des calculs analytiques et des simulations numériques

- Sources transitoires (« bursts »)

- Effondrement de cœurs d'étoiles (supernovae)

- Sources permanentes

- Pulsars
- Fonds « stochastiques »

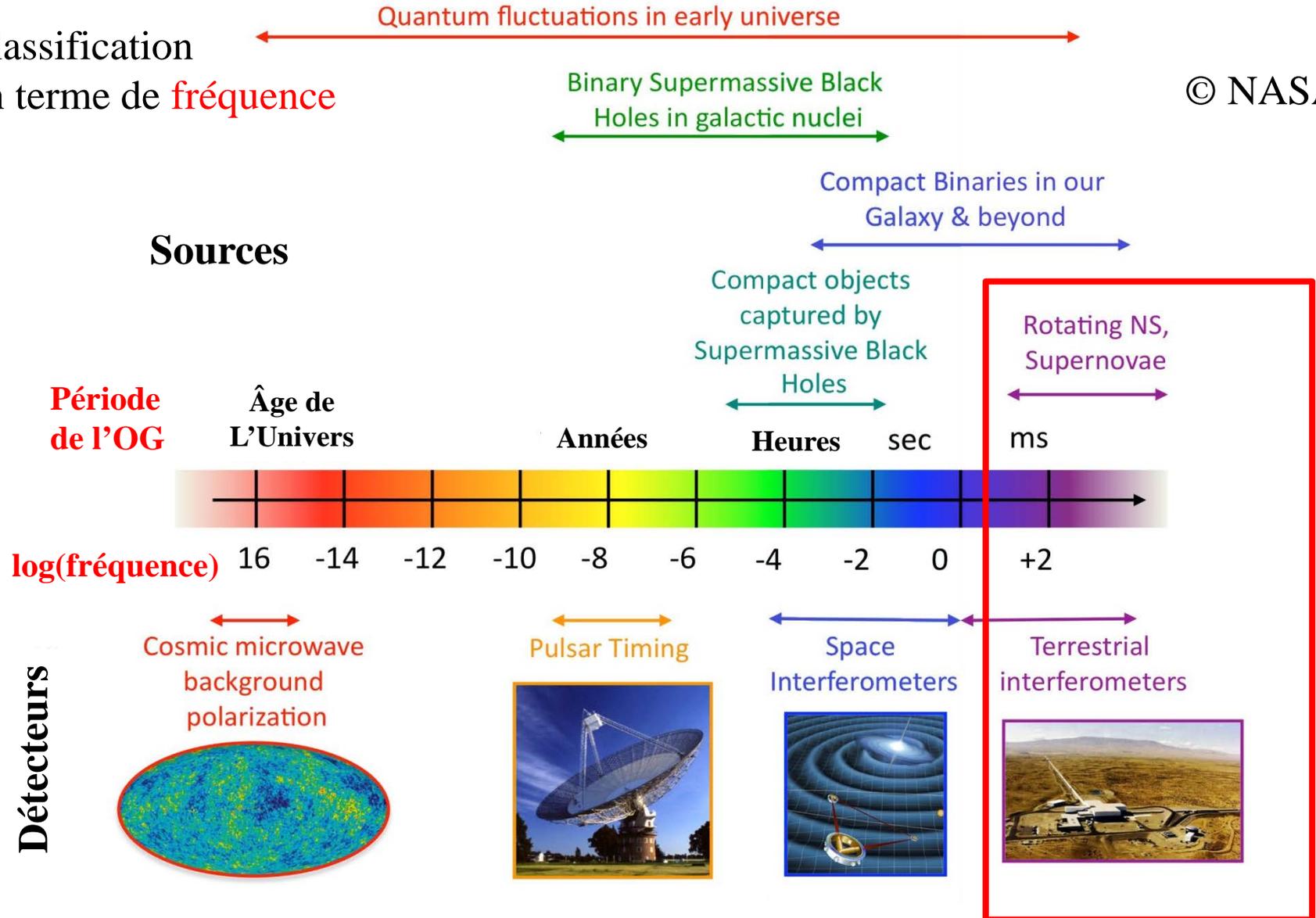


- Probablement beaucoup d'autres sources encore inconnues ...

Le spectre des ondes gravitationnelles

- Classification en terme de **fréquence**

© NASA



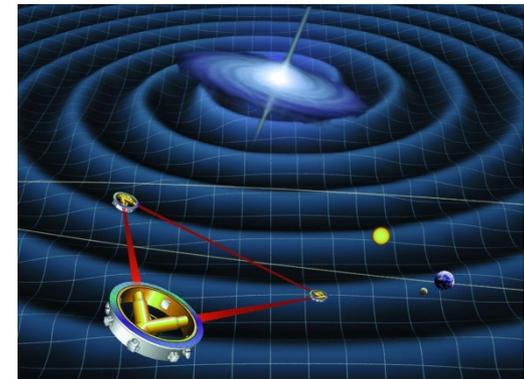
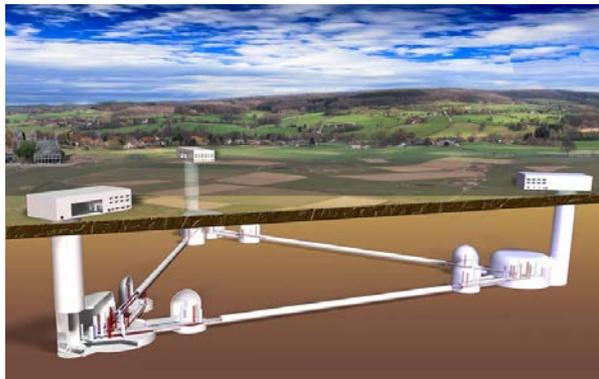
Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

- **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>, lancement dans 10-15 ans)
- Technologies testées **récemment** (et avec **succès**) par la mission **LISA Pathfinder**



Détecter les 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**

La Collaboration Virgo

• 6 pays européens



• 21 laboratoires

• ~300 membres environ (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

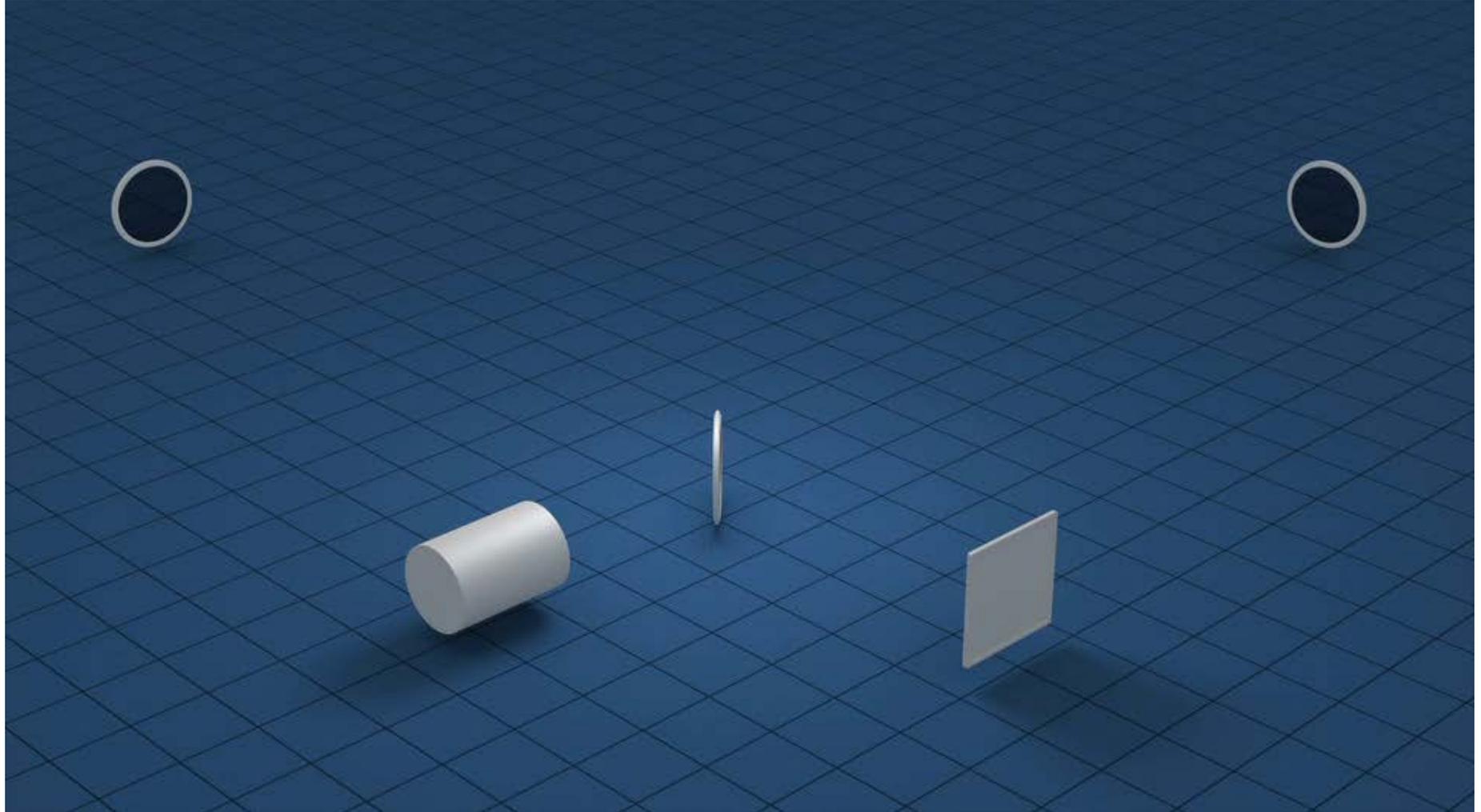
RMKI Budapest

Valence University

Un bref historique

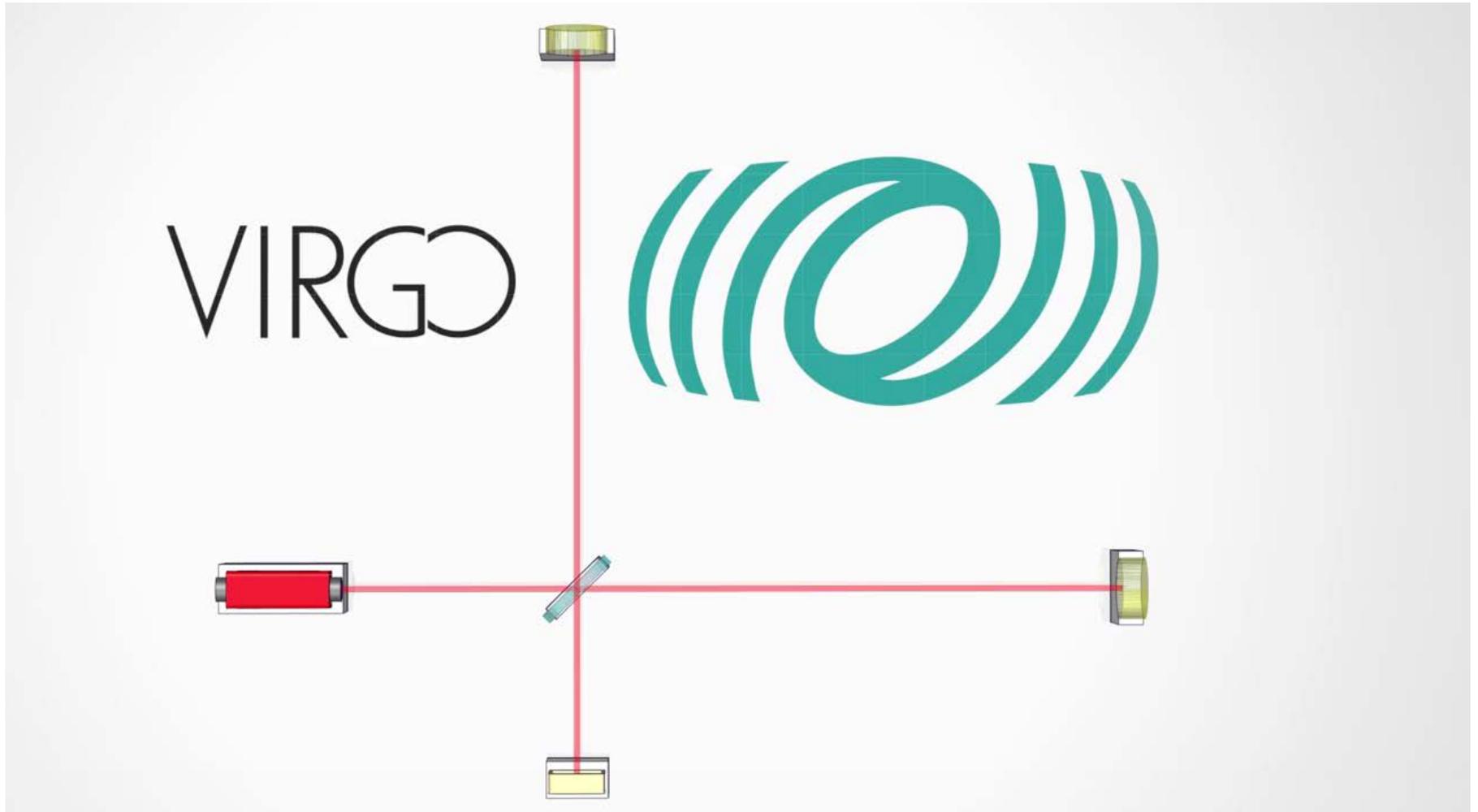
- **Années 1980** : Collaboration entre **Alain Brillet** (CNRS, Orsay, lasers) et **Adalberto Giazotto** (INFN, Pise, suspensions)
- **1989** : **Proposal**
- **27 juin 1994** : **Approbation du projet** par le CNRS et l'INFN
- **Mai 1997** : **Design report** final
- **2003** : **Fin de la construction**
- **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



Un détecteur réel : Virgo avancé

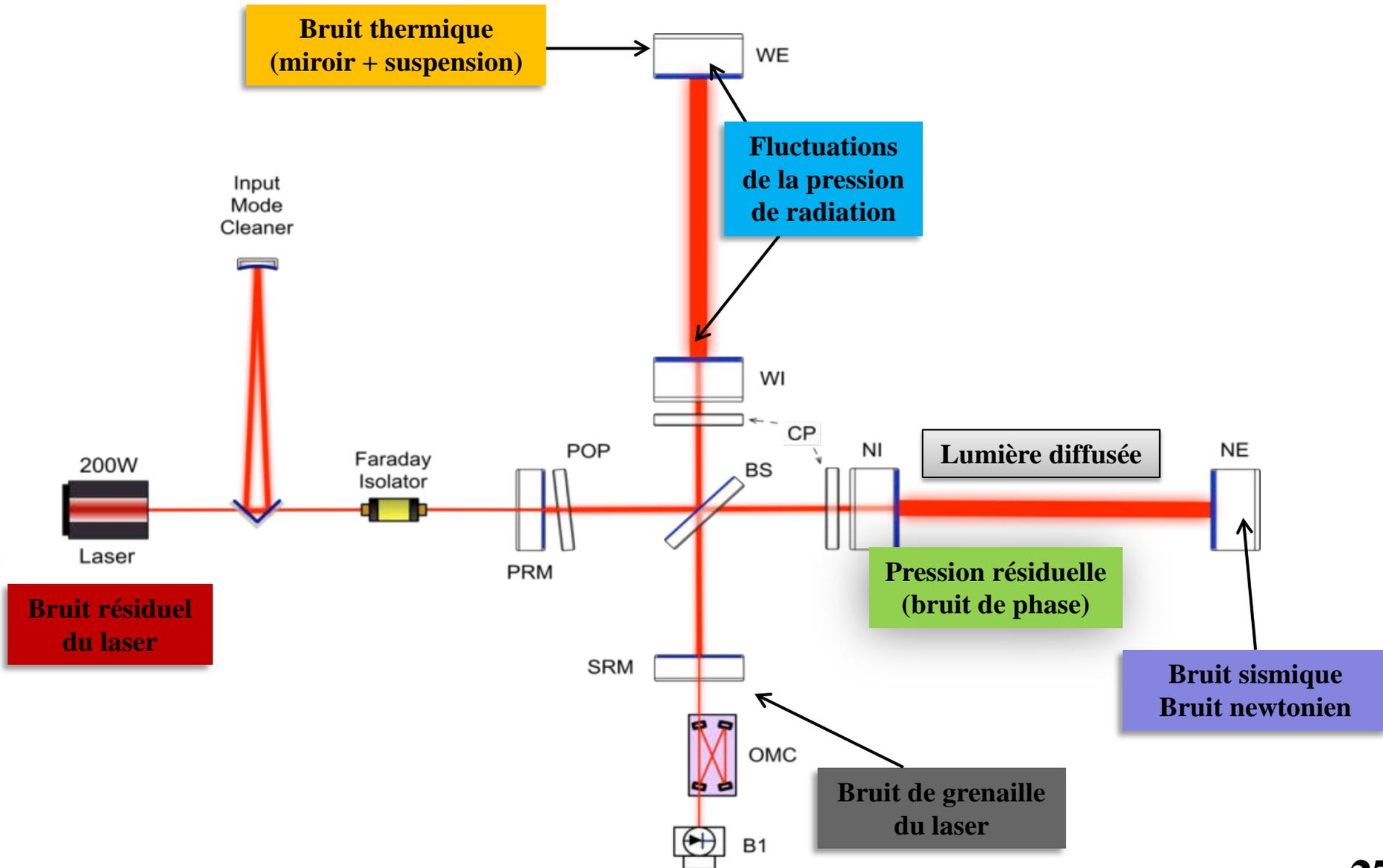
- <https://www.youtube.com/watch?v=6raomYII9P4>, © Marco Kraan, Nikhef (Pays-Bas)



Si Virgo était à Michel-Ange ...

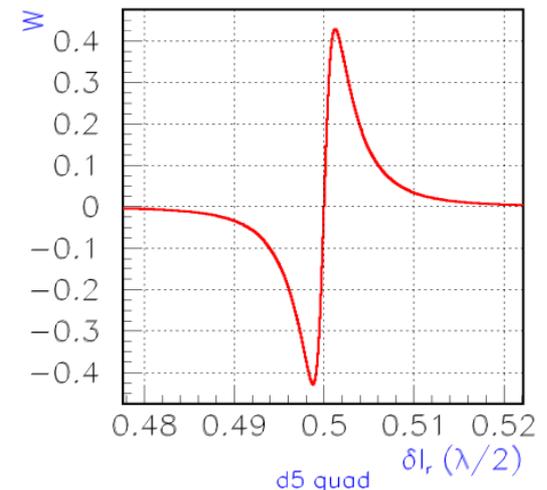


Les principaux bruits du détecteur



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 actuateurs 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 en 2017 ...

Un réseau de détecteurs

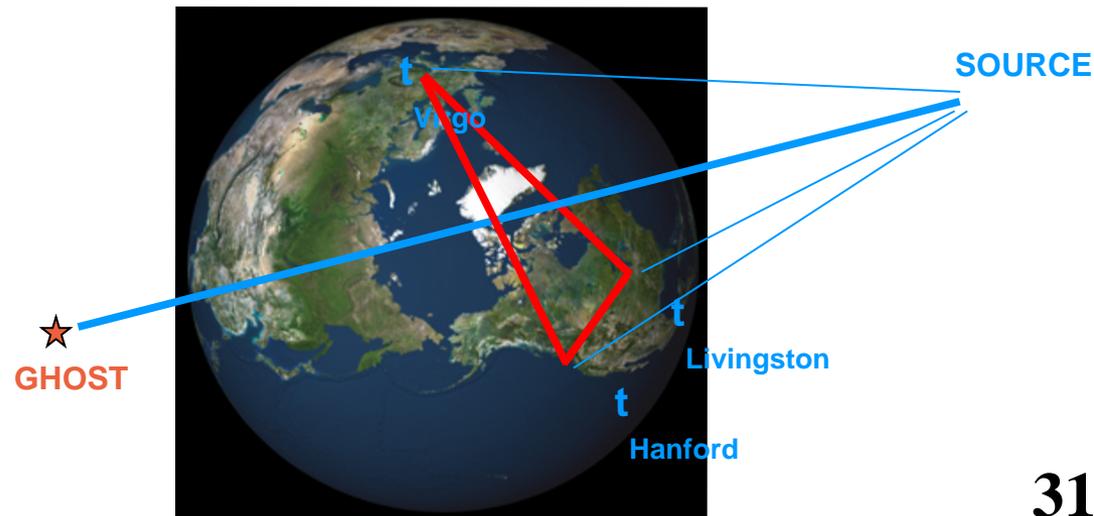
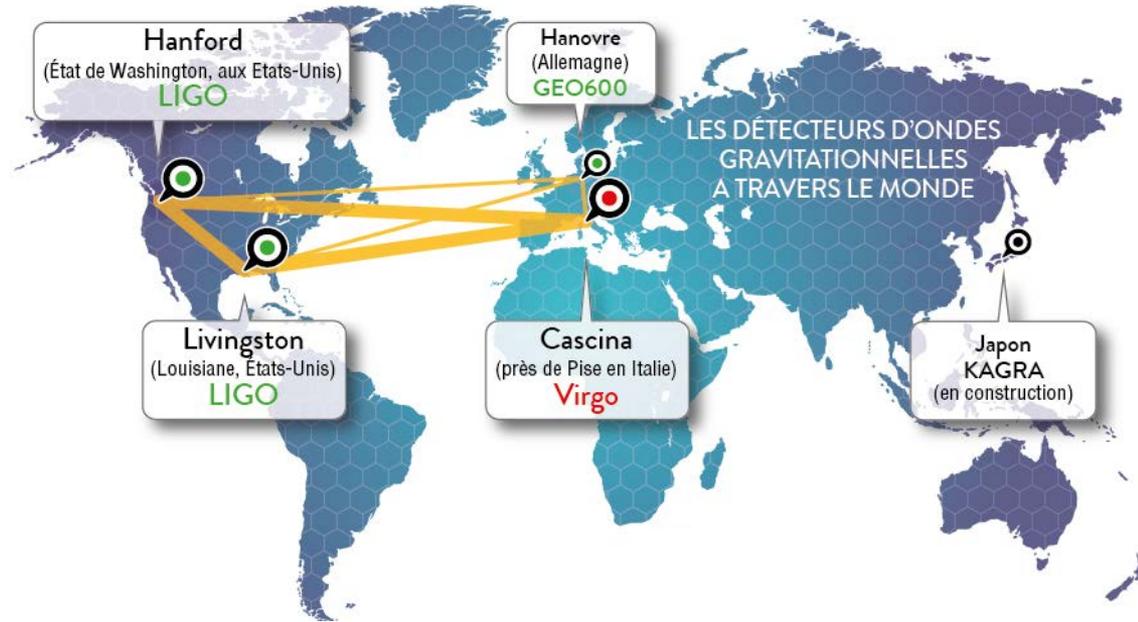


Un réseau de détecteurs

- 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

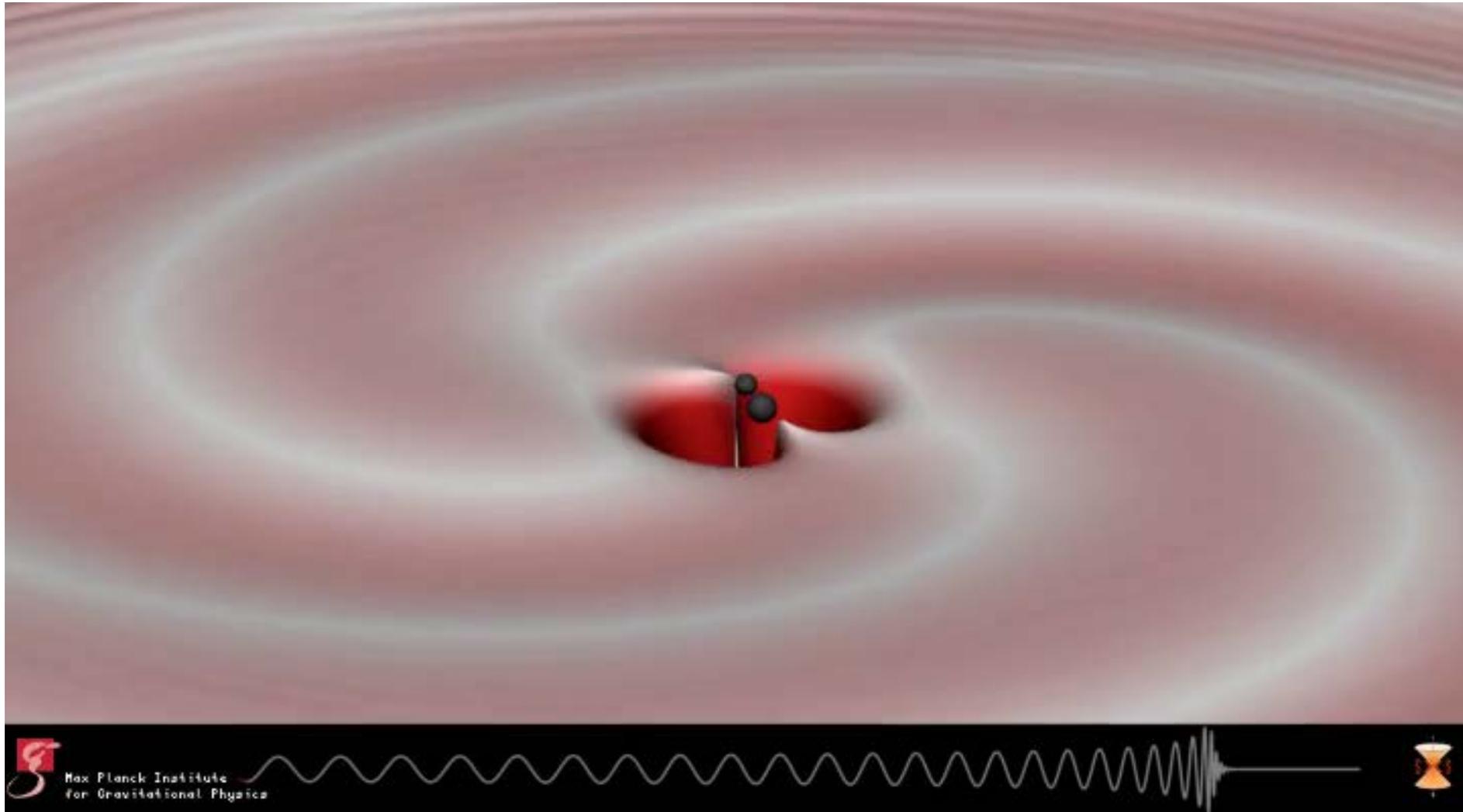
- Accords de collaboration entre les différents projets
 - Partage des données, analyses et publications communes
- ITF : détecteurs non directionnels
- Triple coïncidence nécessaire pour reconstruire la position de la source dans le ciel



Premières détections

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

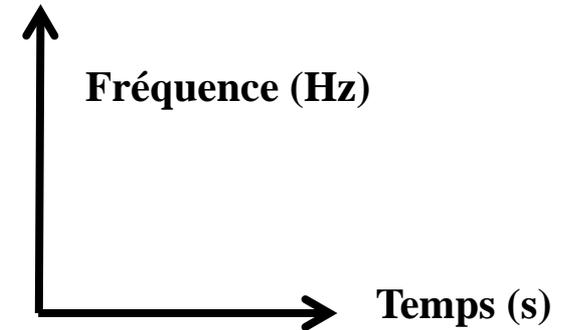
From Marco Drago★
Subject [CBC] Very interesting event on ER8

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

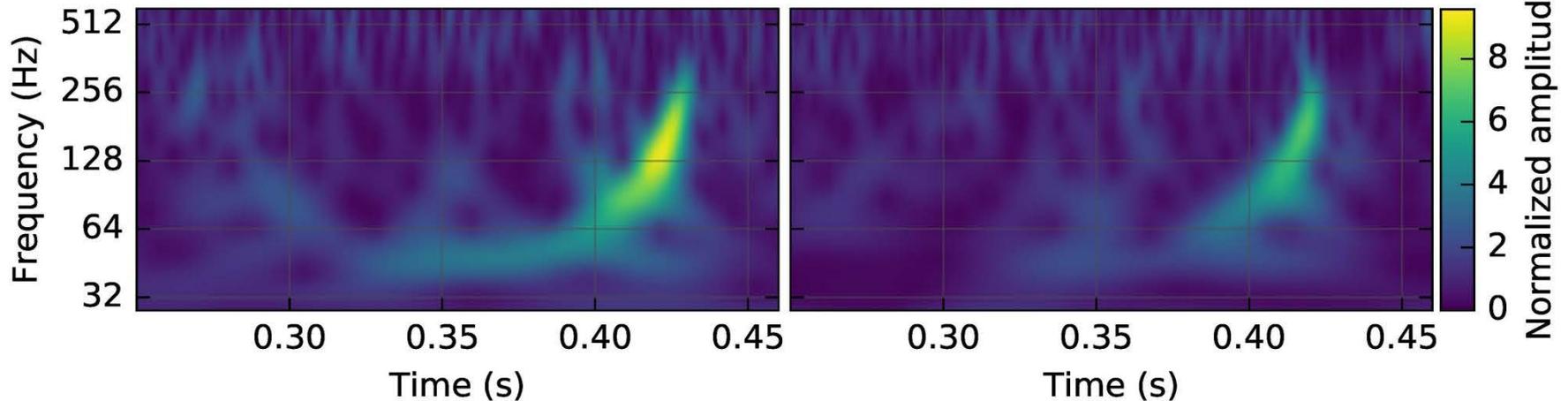
- 20 minutes plus tard : **pas de signal artificiel injecté**
 - Confirmation officielle à 17h59 le même jour
- 10 minutes plus tard : une **possible fusion de deux trous noirs**
- 25 minutes plus tard : **qualité des données bonne** a priori
- 15 minutes plus tard : **premières estimations des paramètres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

Recherche de signaux transitoires

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



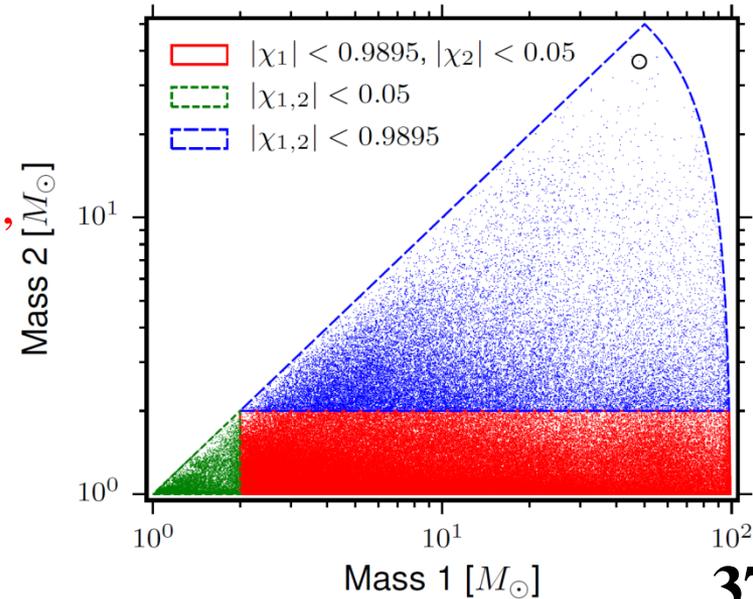
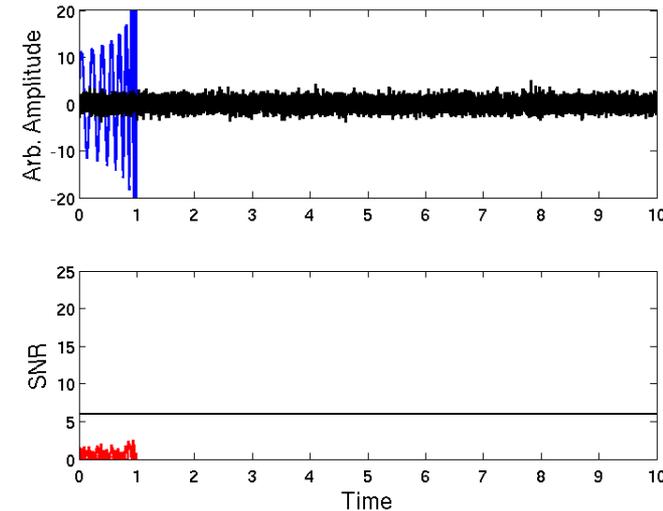
Le signal GW150914 est suffisamment fort pour être visible « à l'œil »



- 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 !

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

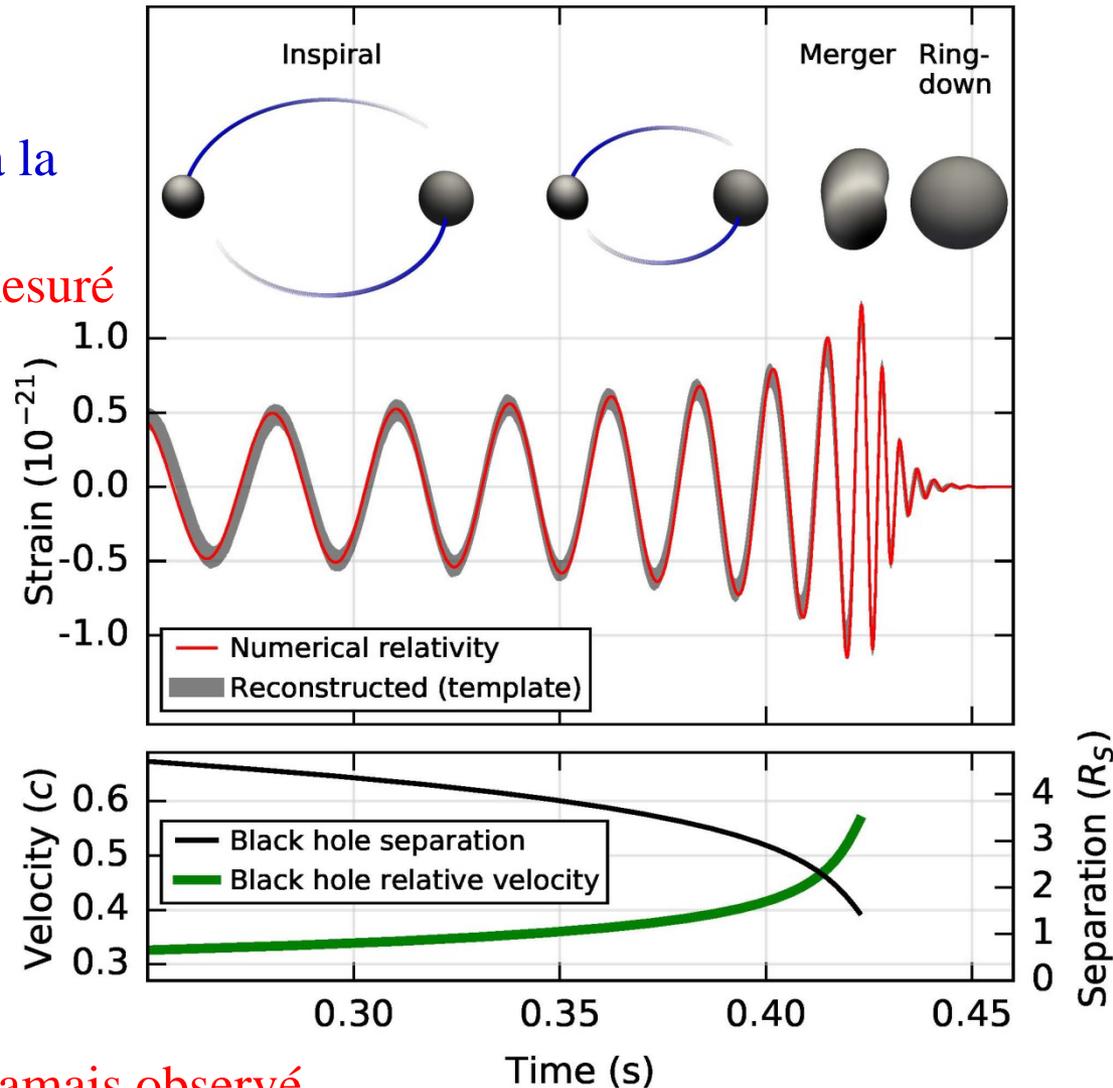
- L'effet présenté est évidemment très très très exagéré
 - Mais l'animation donne une bonne idée de l'évolution temporelle du signal



Scale of Effect Vastly Exaggerated

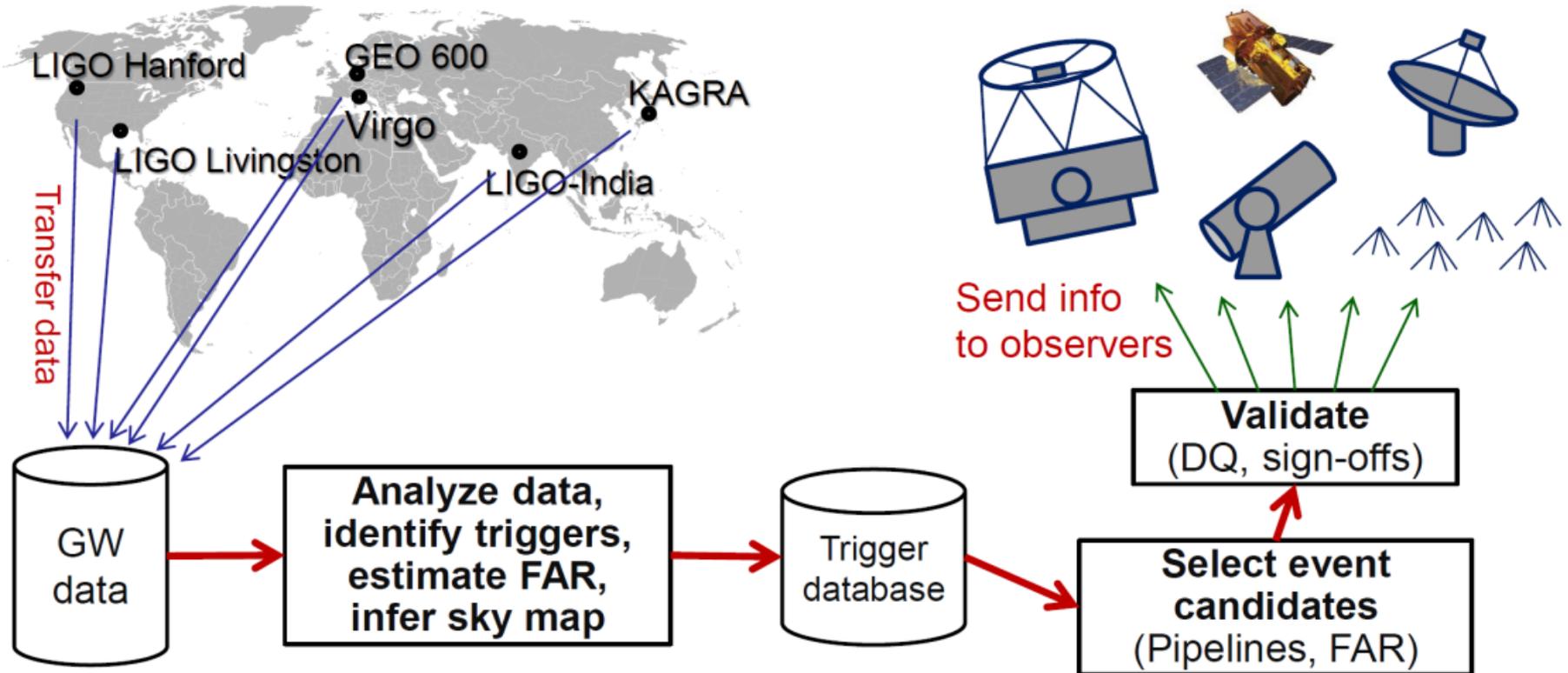
Au fait, pourquoi deux trous noirs ?

- **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



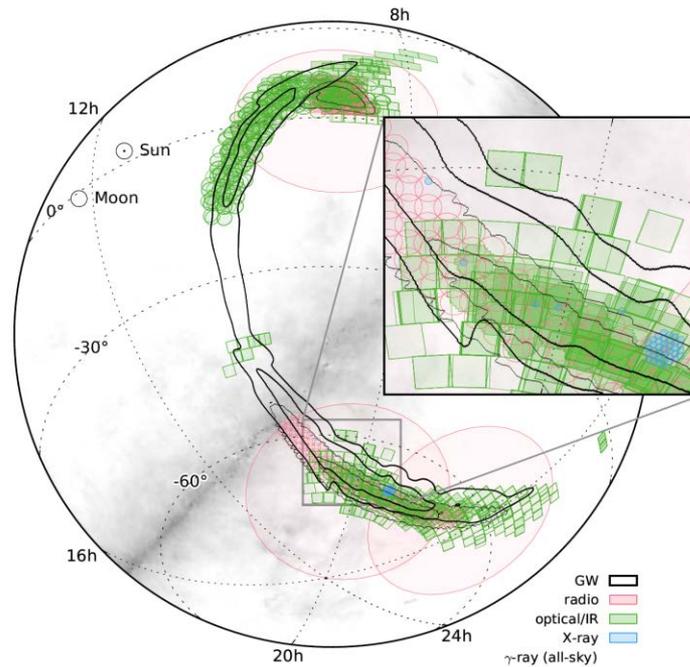
Recherche de contreparties optiques

- Méthode

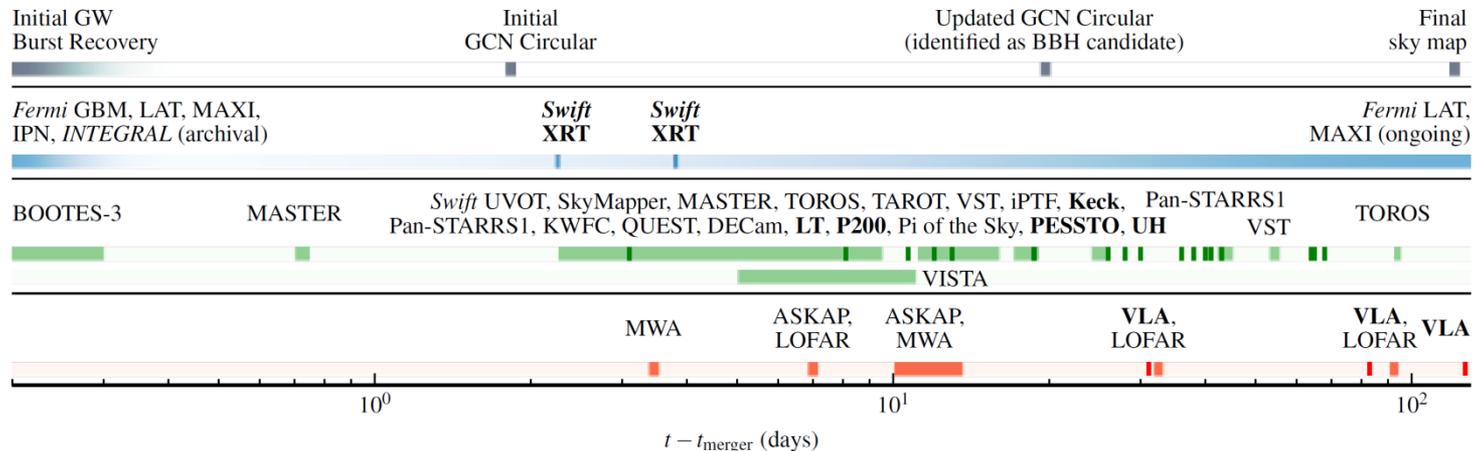


Recherche de contreparties optiques

- Couverture du ciel



- Observations : aucune contrepartie identifiée

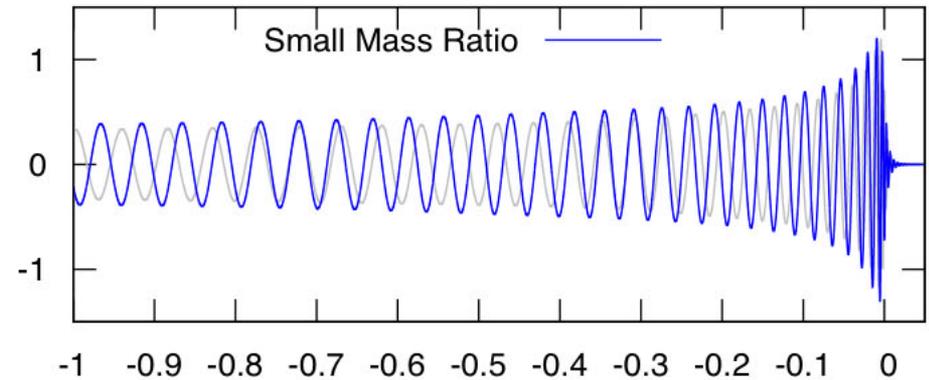
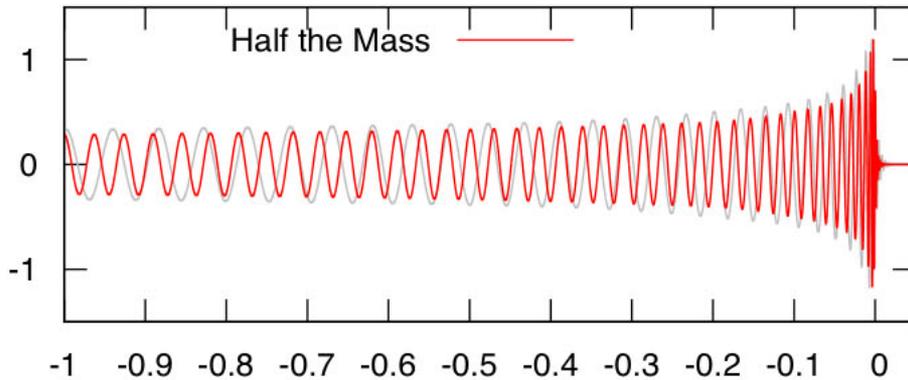
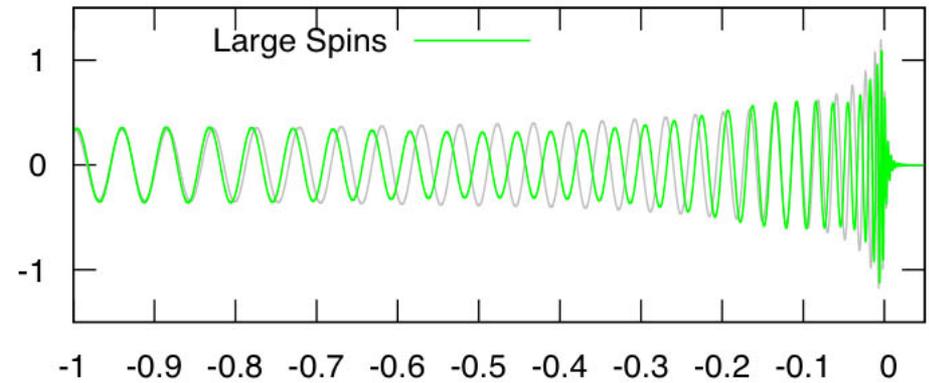
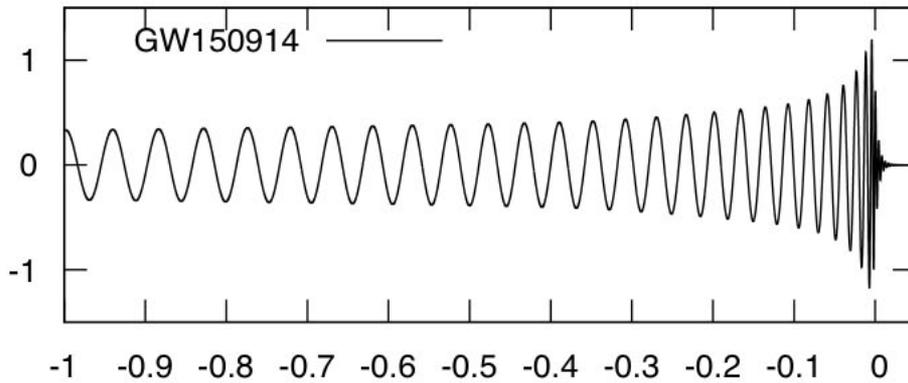


Mesure des paramètres du signal

- 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

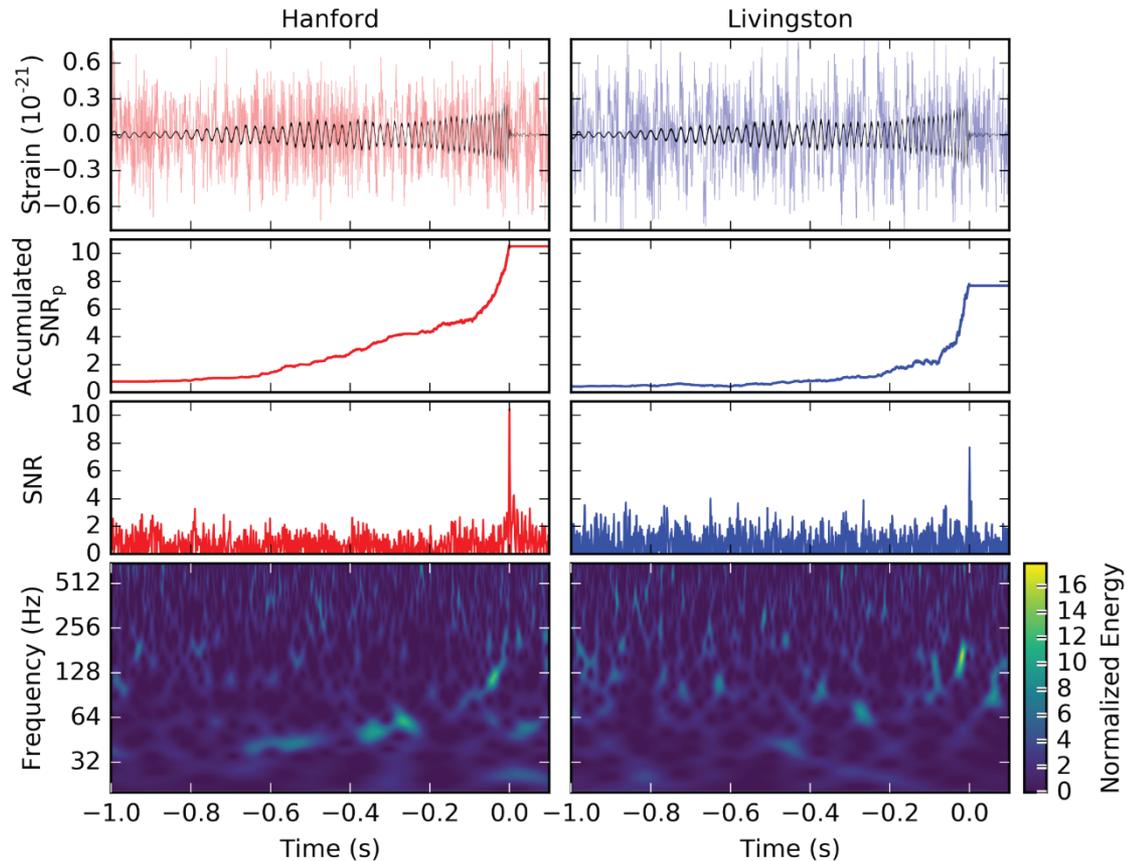
L'événement GW151226

GW151226

- Une autre coalescence de deux trous noirs

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

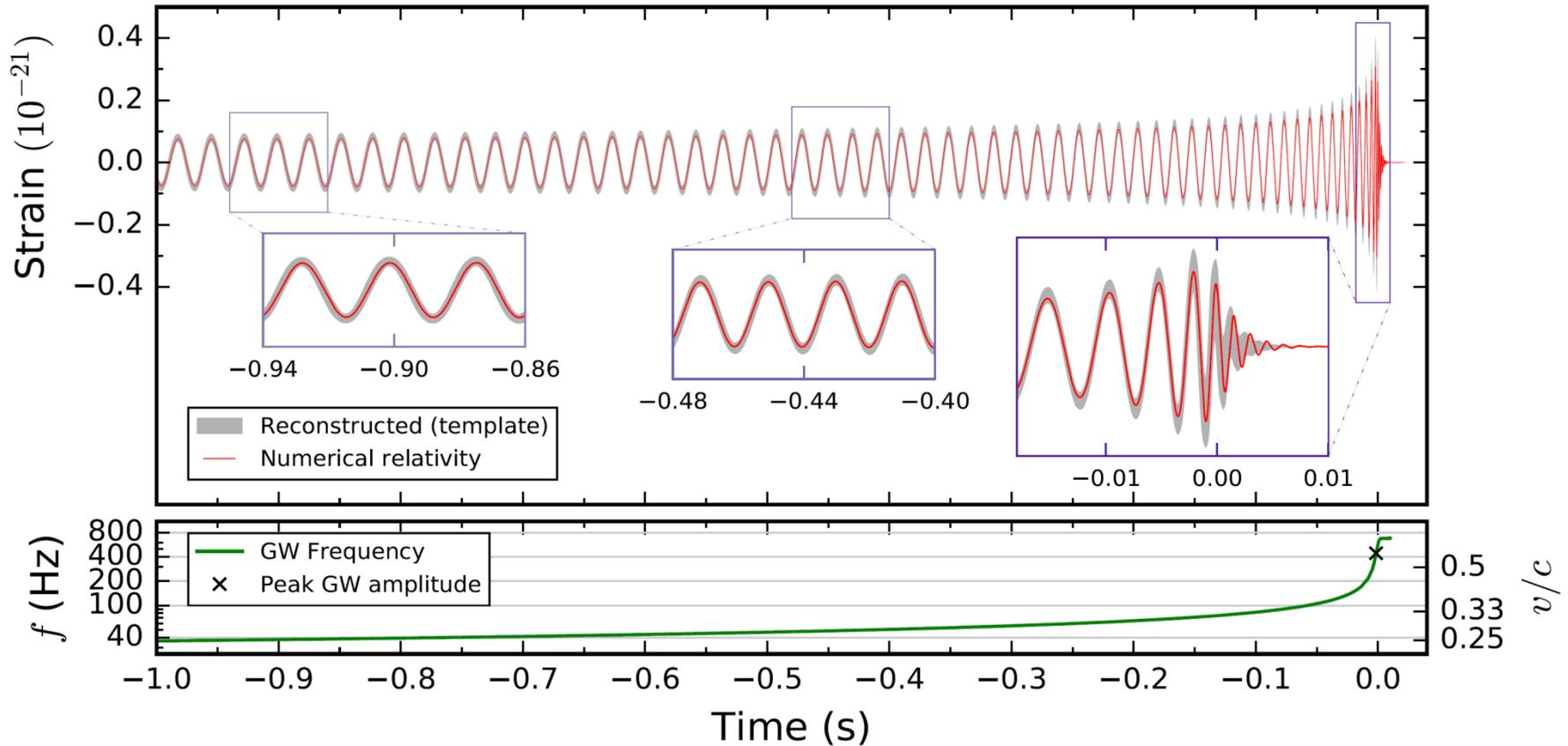
- Nécessité du **filtrage adapté**



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

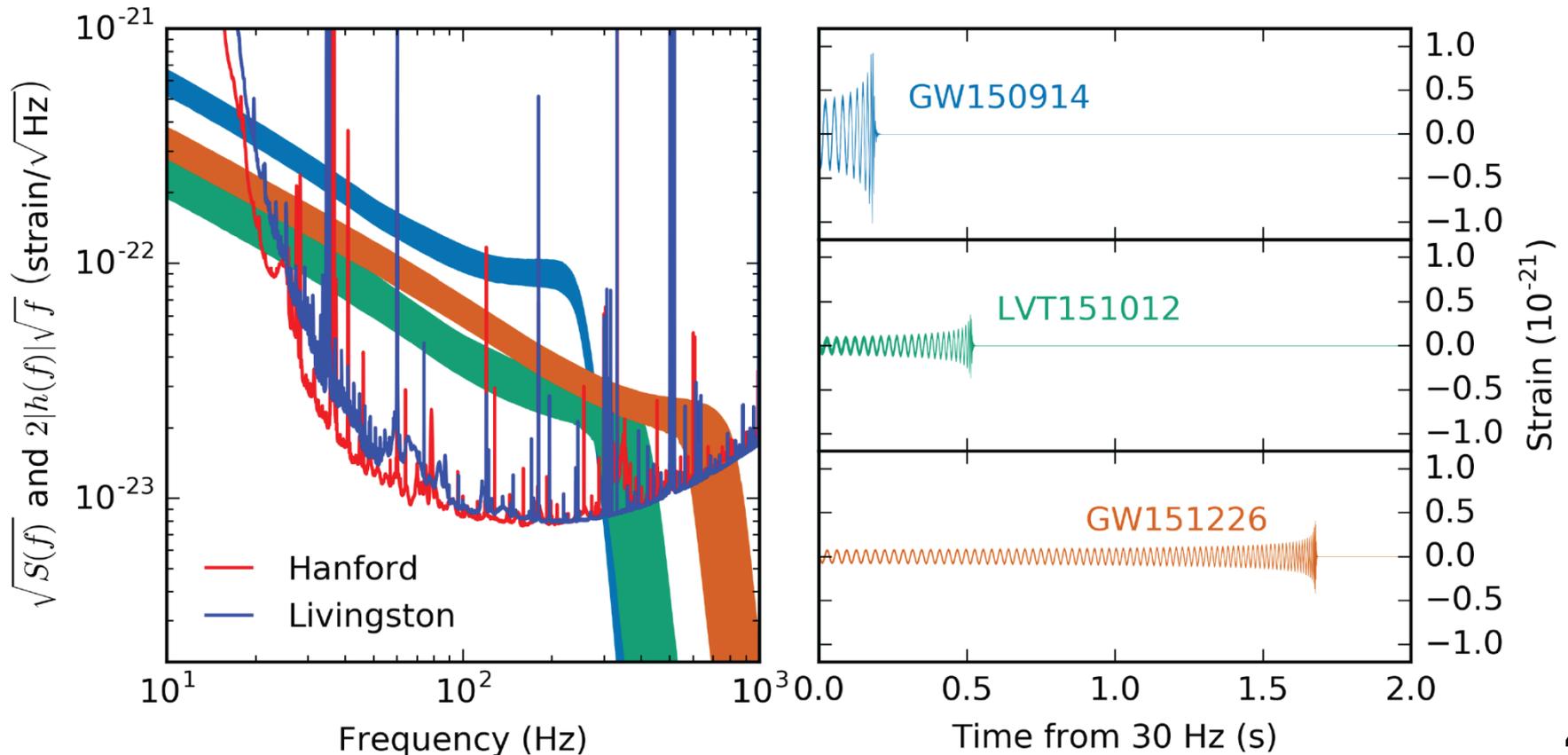
GW151226

- **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**

- Démarrage de la **seconde prise de données** le 30 novembre 2016
- Point fin janvier : **12 jours de données en coïncidence** au 23 janvier,
2 candidats identifiés et transmis aux télescopes partenaires

- **Détecteur Virgo avancé**

- **En pleine phase de démarrage** du détecteur !
- **Progrès importants** dans la compréhension et le contrôle de l'instrument
→ Un « nouveau » détecteur
- **Objectif : rejoindre LIGO « dès que possible »**
→ Encore quelques semaines/mois d'effort ...

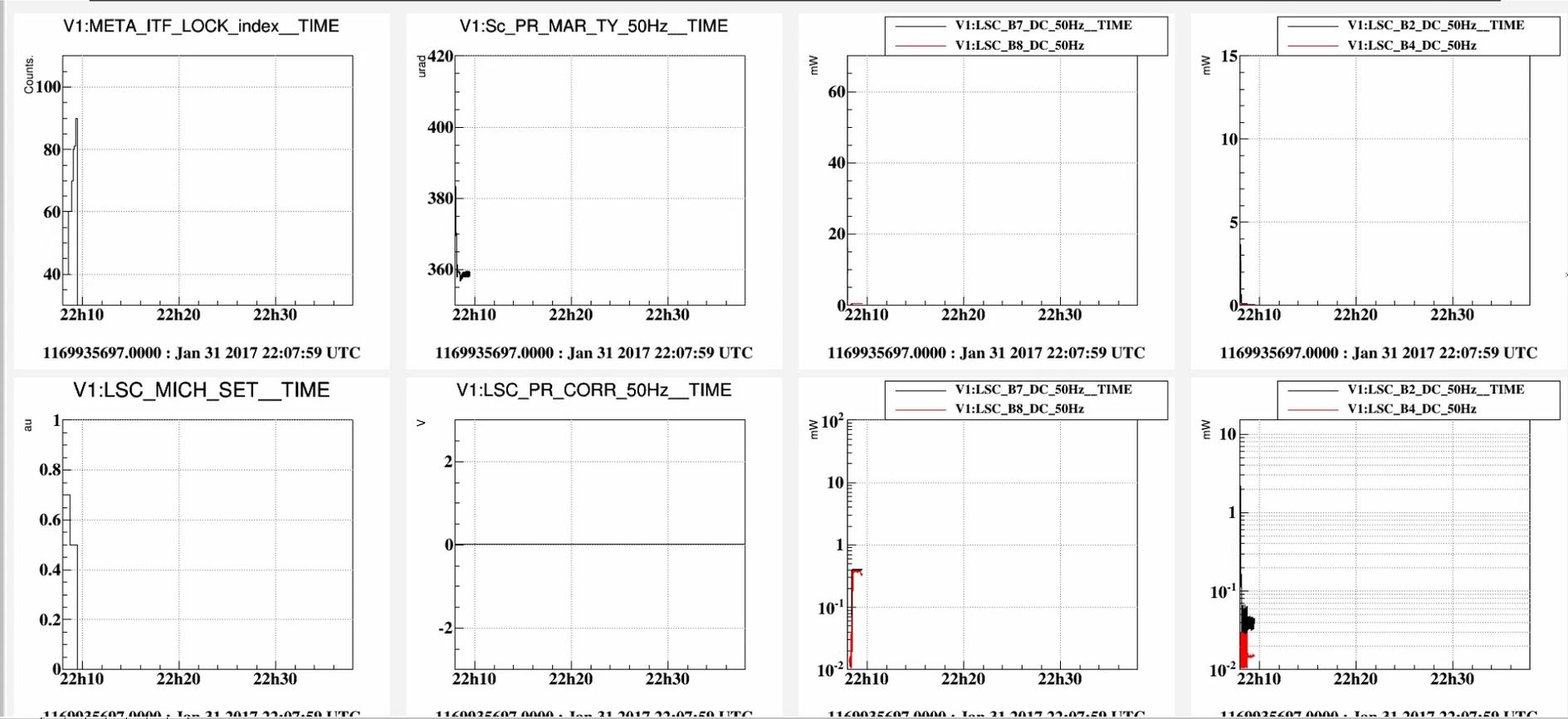
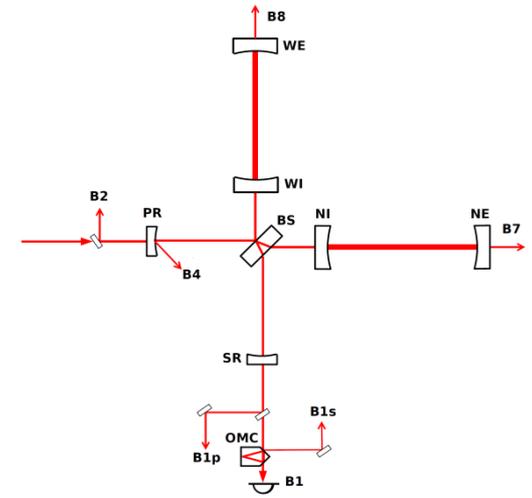


Exemple de contrôle

- 31 janvier 2017
- PR-ITF
Offset frange noire : 0.1

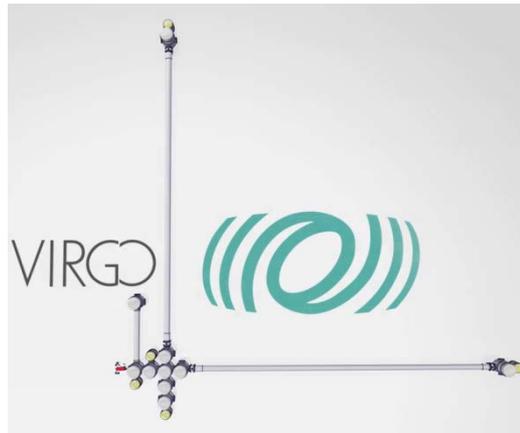


[Version rapide]

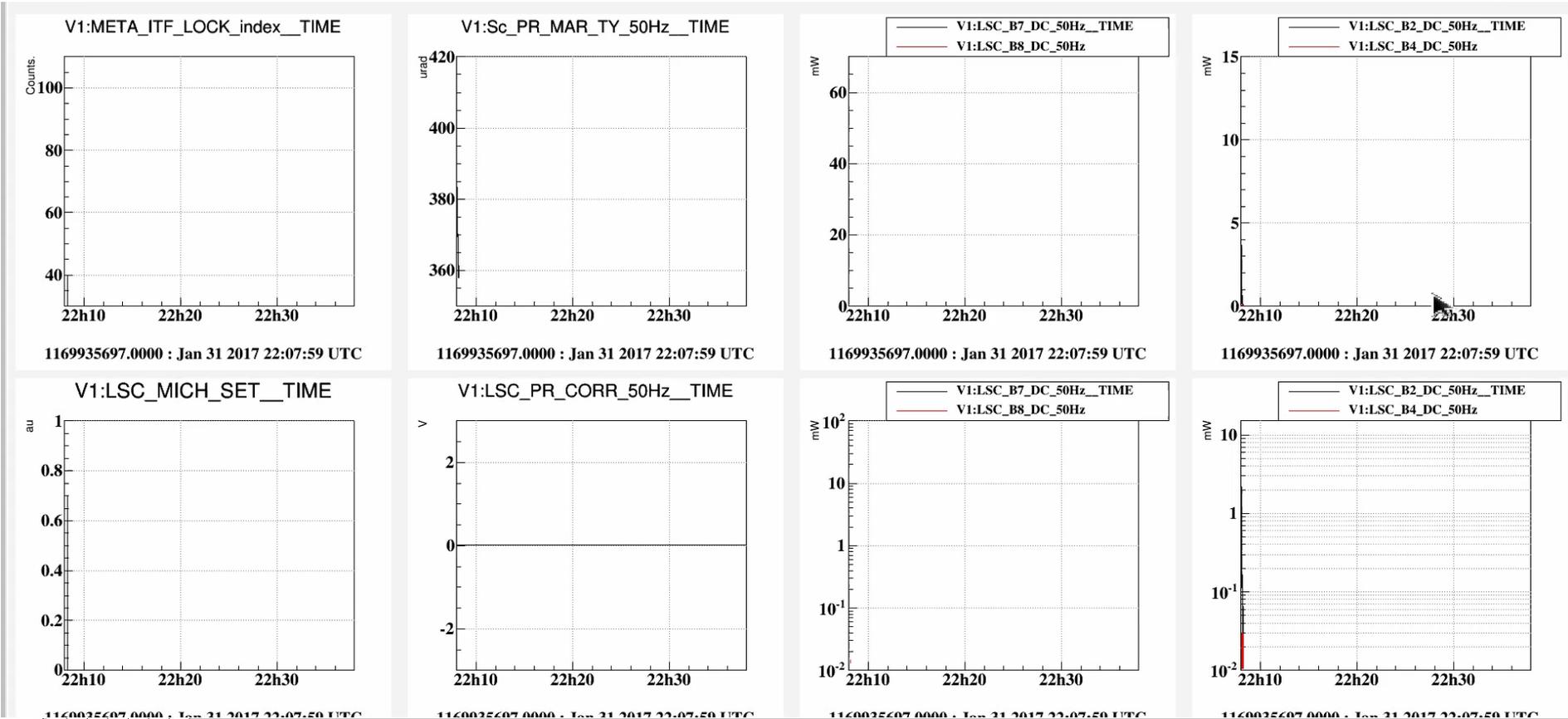
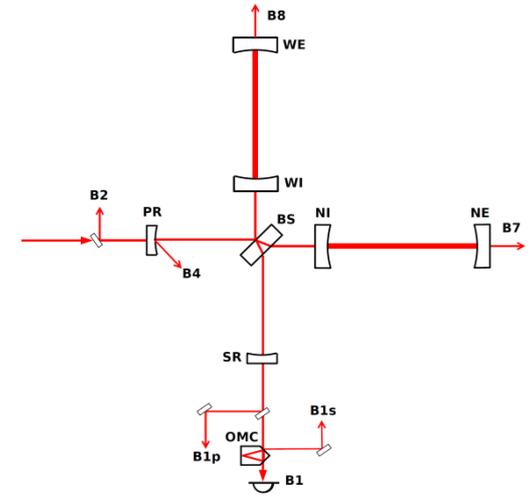


Exemple de contrôle

- 31 janvier 2017
- PR-ITF
Offset frange noire : 0.1

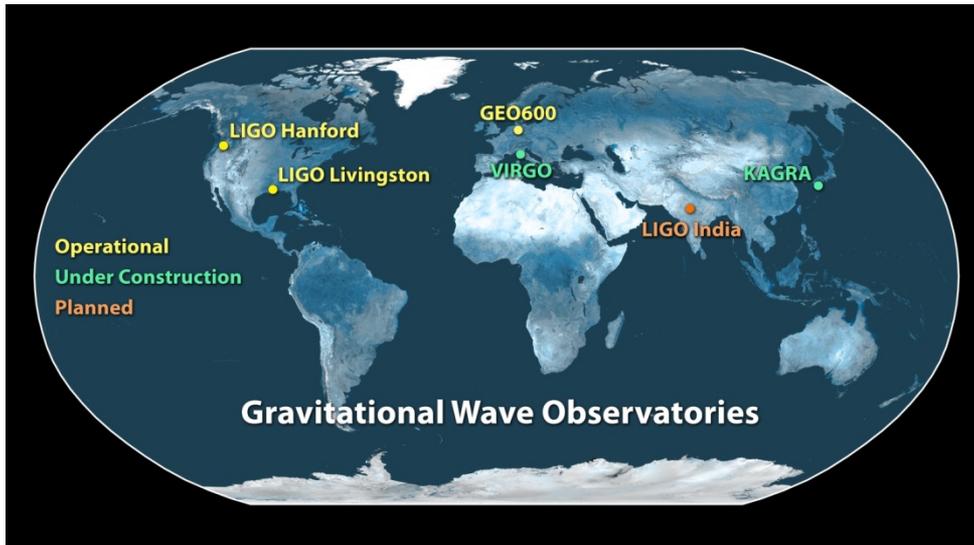


[Version lente]



Réseau de détecteurs

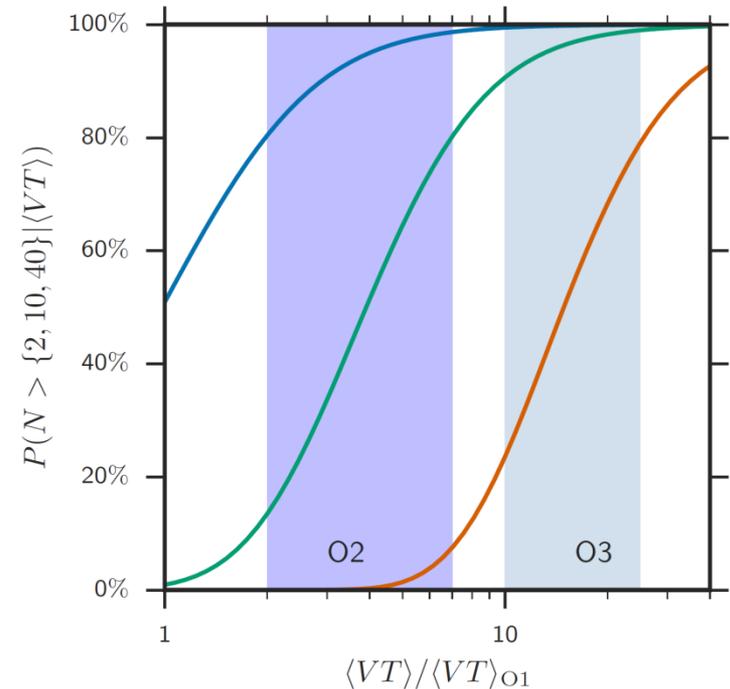
- Bientôt : un réseau de détecteurs terrestres
 - plus large
 - plus performant



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

Probabilités que le nombre
de détections excède

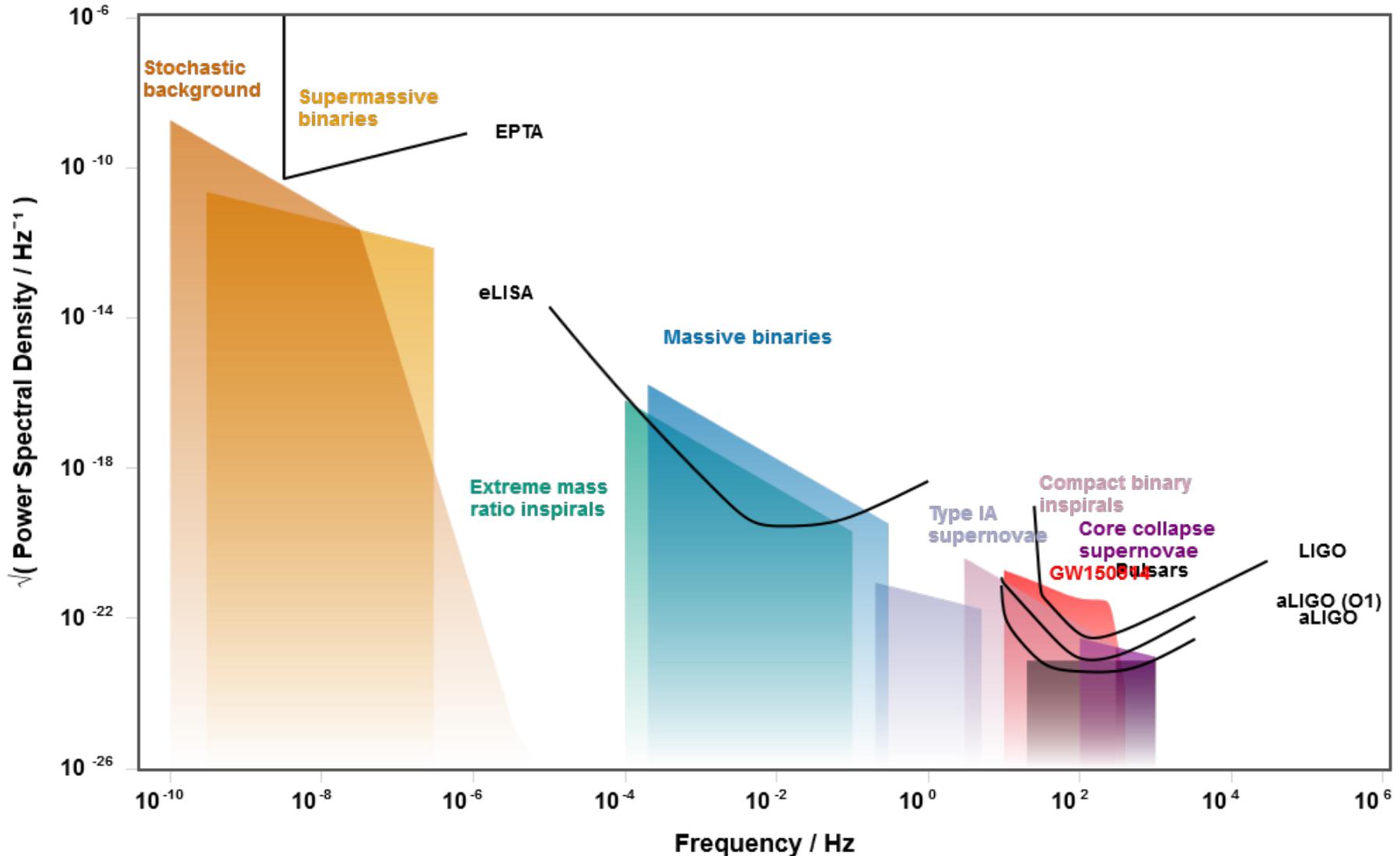
- 2
- 10
- 40



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

La Nuit des Ondes Gravitationnelles

#NuitDesOG

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

20 mars 2017

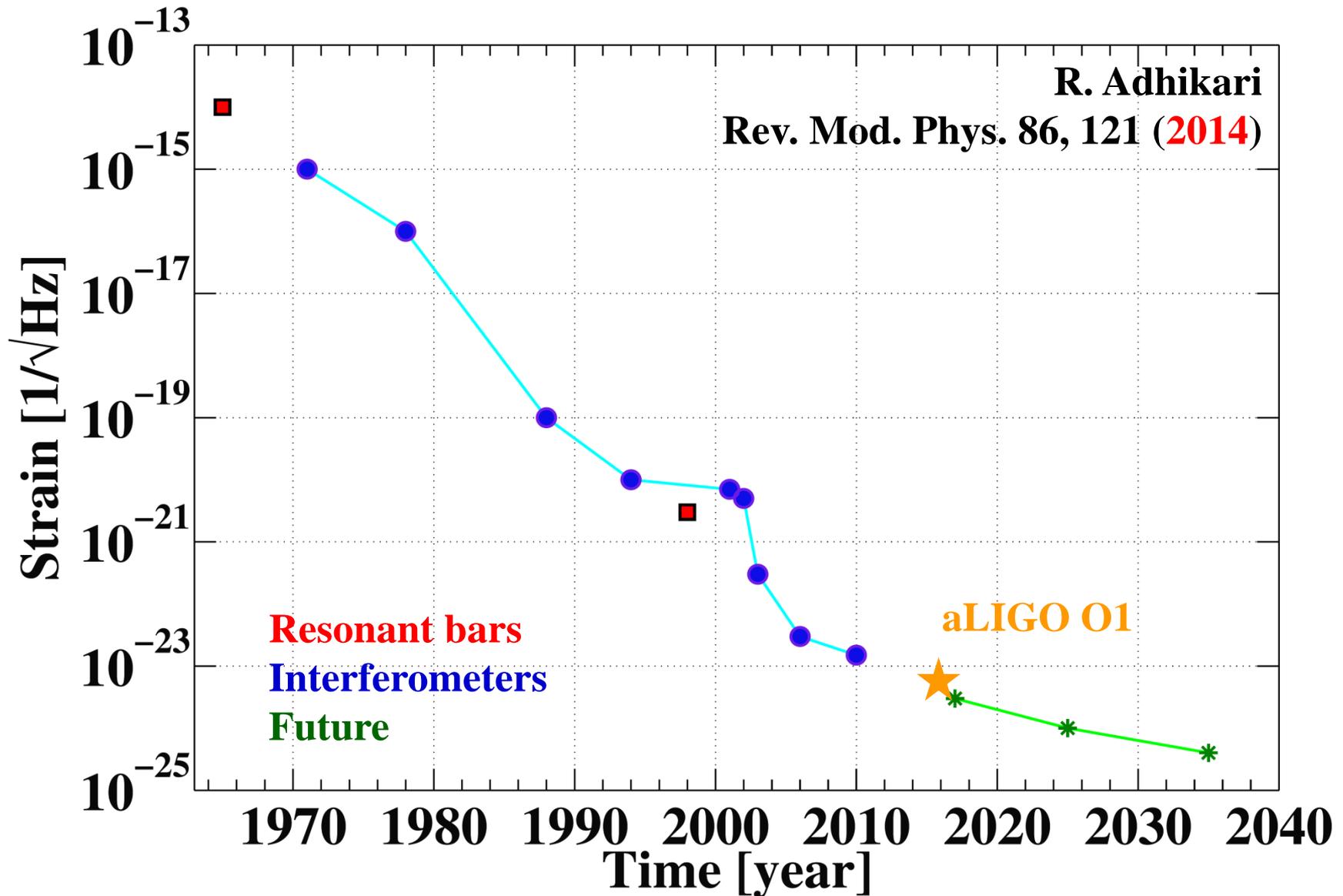
Des concours ouverts à tous
Date limite de dépôt des dossiers le 1er mars 2017
Inscription préalable obligatoire sur le site

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/>



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



Film CNRS Images

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

