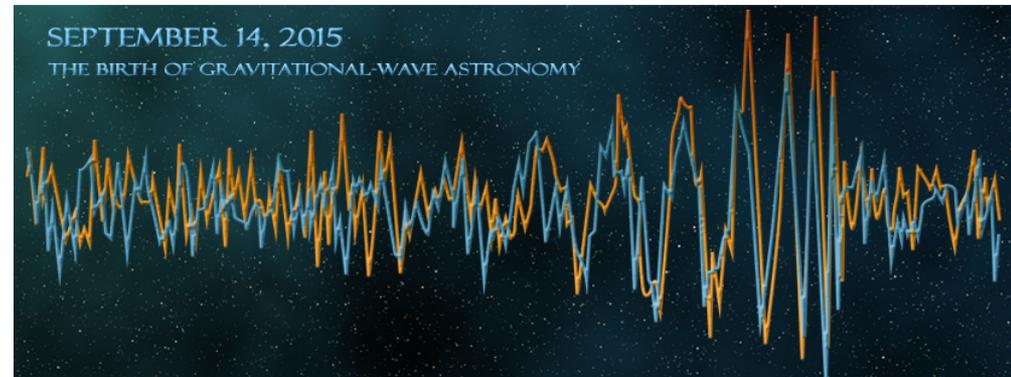


Visite du site de l'expérience **Virgo** : l'**E**uropean **G**ravitational **O**bservatory (**EGO**)

02 Février 2017

Nicolas Arnaud (narnaud@lal.in2p3.fr)

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



 **EGO** EUROPEAN
GRAVITATIONAL
OBSERVATORY




LABORATOIRE
DE L'ACCÉLÉRATEUR
LINÉAIRE

 UNIVERSITÉ
PARIS
SUD
 université
PARIS-SACLAY

Plan

- **Virgo, EGO, vous** et moi ...
- **La découverte** en bref : GW150914
- La saga des **ondes gravitationnelles**
- **Comment les détecter ?**
 - Avec des **interféromètres géants & suspendus** ...
- **Les détections :**
GW150914 & GW151226
- Et maintenant ?



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

**Virgo, EGO,
vous et moi**

Premier contact : Virgo vu du ciel



Une T.G.I.R.

Très Grande Infrastructure de Recherche

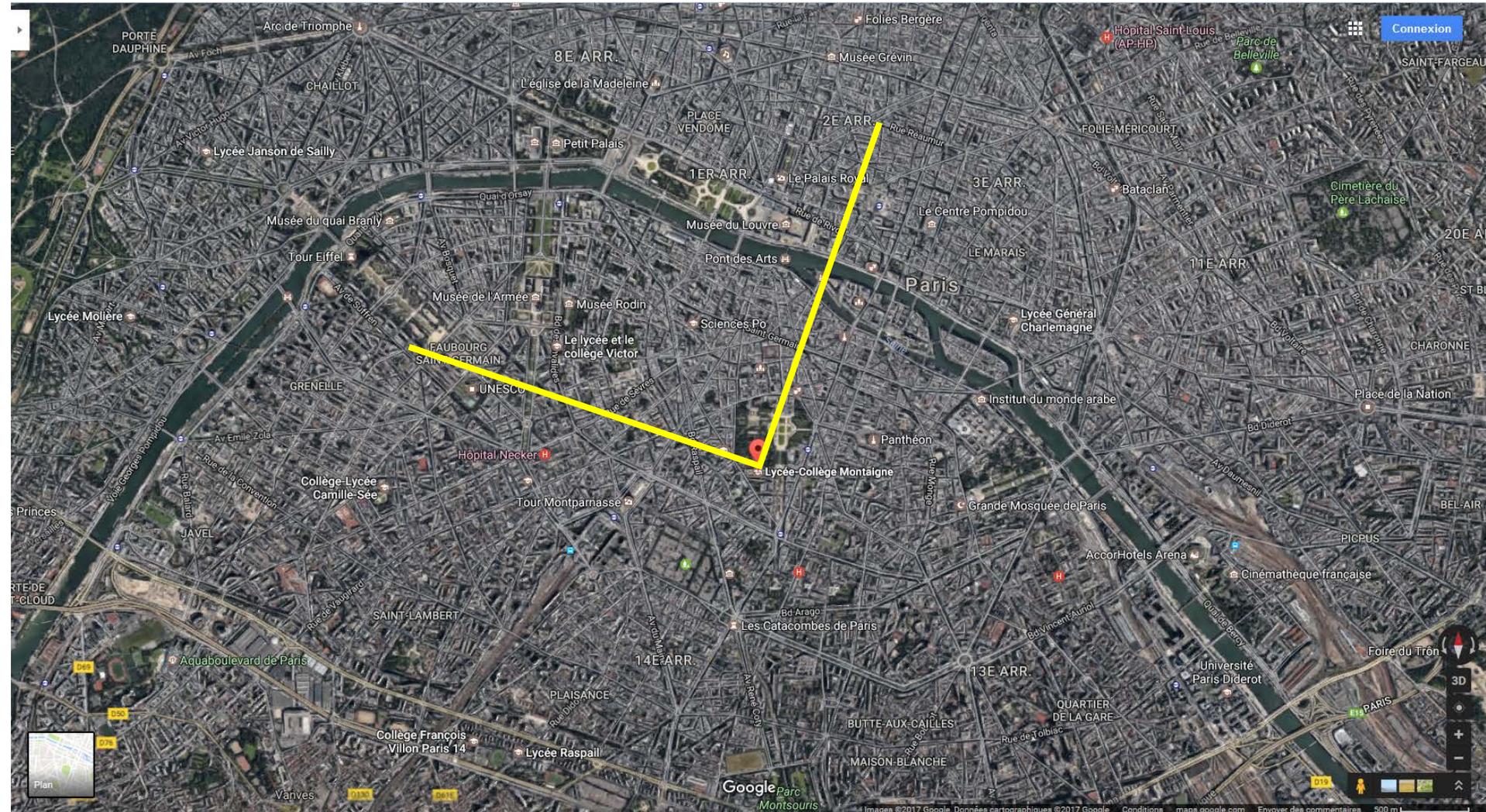
Tour de Pisa

Aéroport de Pisa
Longueur du tarmac : 3 km

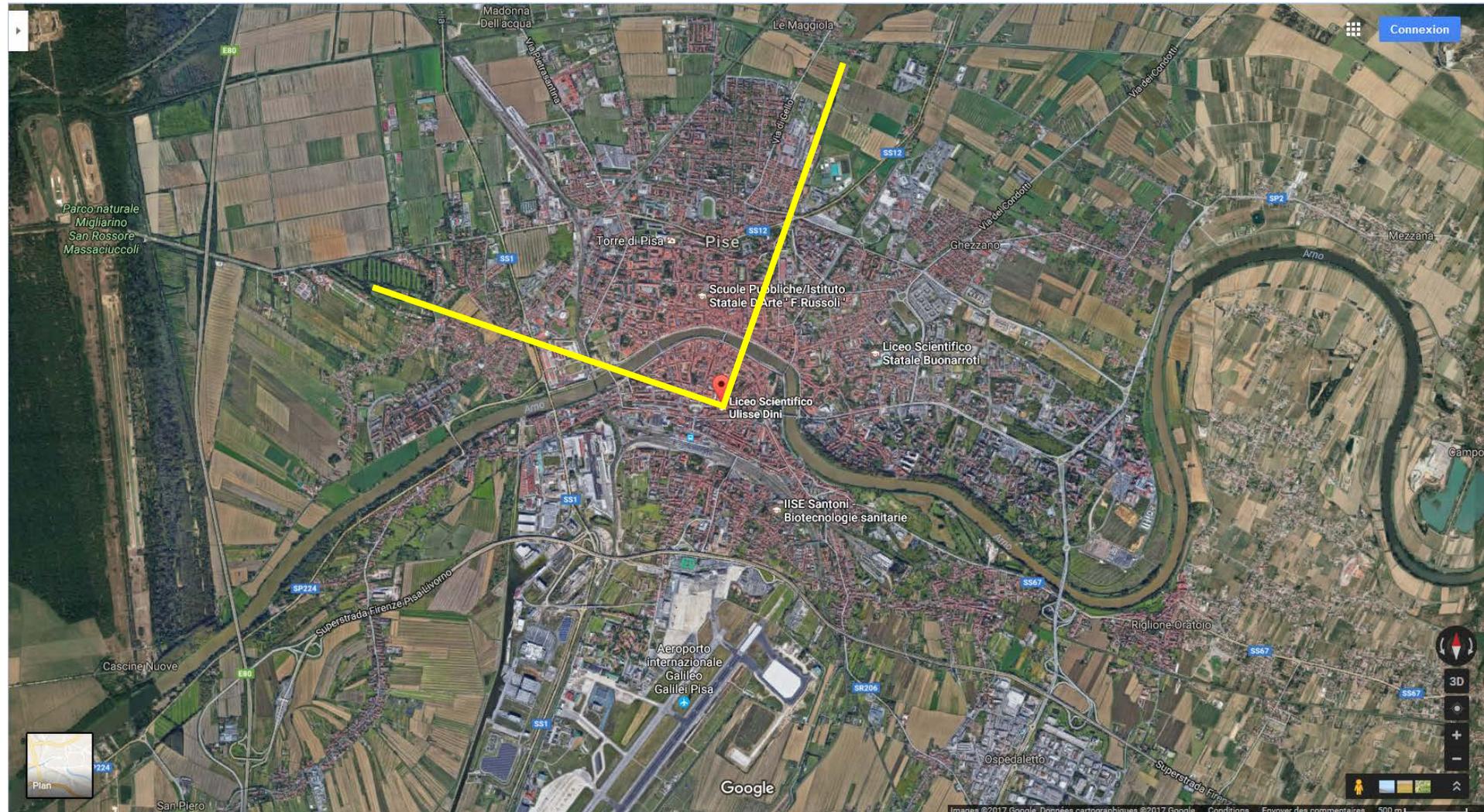
Zoom

Virgo

Virgo à Paris ?



Virgo à Pise ?



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** »

Qui suis-je ?

Jun 2001



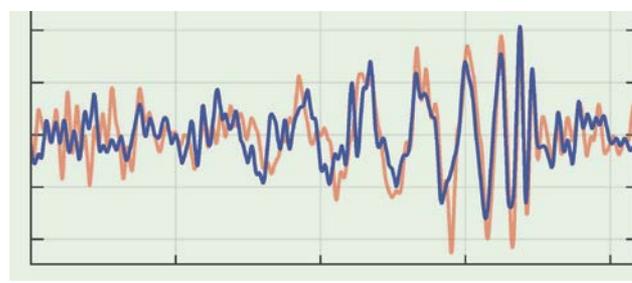
- 42 ans
- Cursus scientifique en région parisienne
 - 1992 : bac C (mention AB)
 - 1992-1995 : Classes préparatoires
 - 1995-1999 : formation d'ingénieur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
 - Stage long d'un an (1997-1998) au LAL
 - 1998-1999 : Master 2 (« DEA») en physique théorique
- 1999-2002 : thèse de physique, toujours au LAL, sur Virgo
- 2002-2003 : post-doc au CERN dans l'expérience LHCb
- 2003 : reçu au concours d'entrée au CNRS ; affectation au LAL
- 2003 – aujourd'hui : physicien au LAL (BaBar, SuperB, Virgo à nouveau)
 - 2005-2008 : séjour au laboratoire SLAC près de San Francisco (Californie)
 - Depuis septembre 2016 : détachement sur le site de l'expérience Virgo

La découverte en bref : GW150914

14 septembre 2015, 11:51 heure de Paris

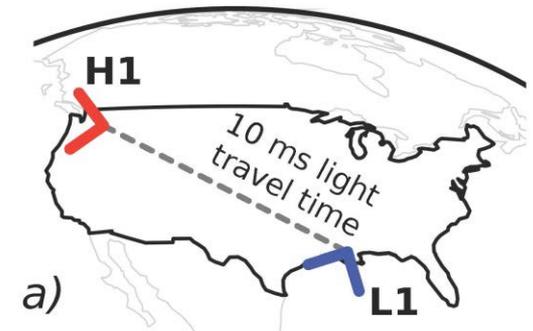
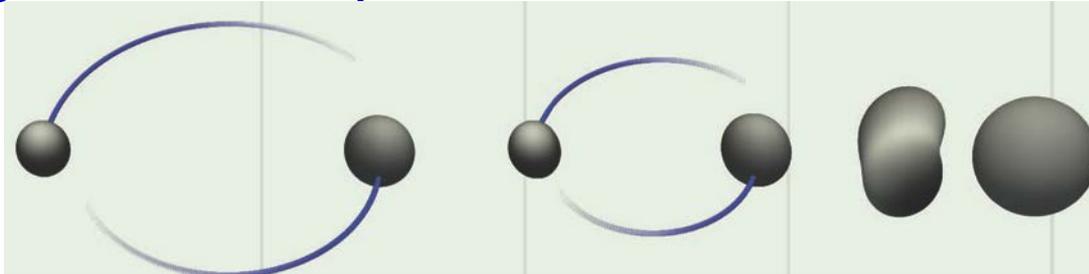
- **Signal observé dans les 2 détecteurs LIGO à 7 ms d'intervalle**

- **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

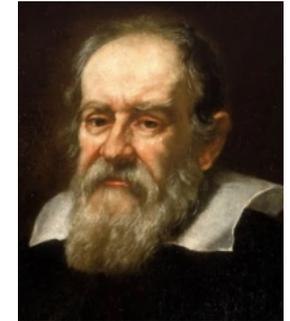
La saga des ondes gravitationnelles

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**



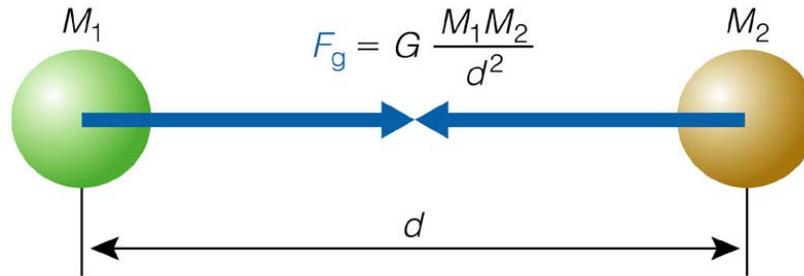
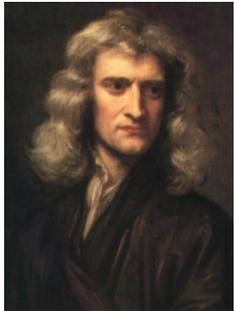
- Première remise en cause sérieuse : le modèle **héliocentrique** de **Copernic** (1543)
- **Galilée** : observations en contradiction avec la théorie de **Ptolémée** (1610)
 - L'église catholique l'oblige à abjurer « l'erreur » de **Copernic**
- **Kepler** (1609-1619) : suppose un modèle héliocentrique & 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 – théorie corpusculaire de la lumière

- John Mitchell (1783)

- Pierre-Simon de Laplace (1796)

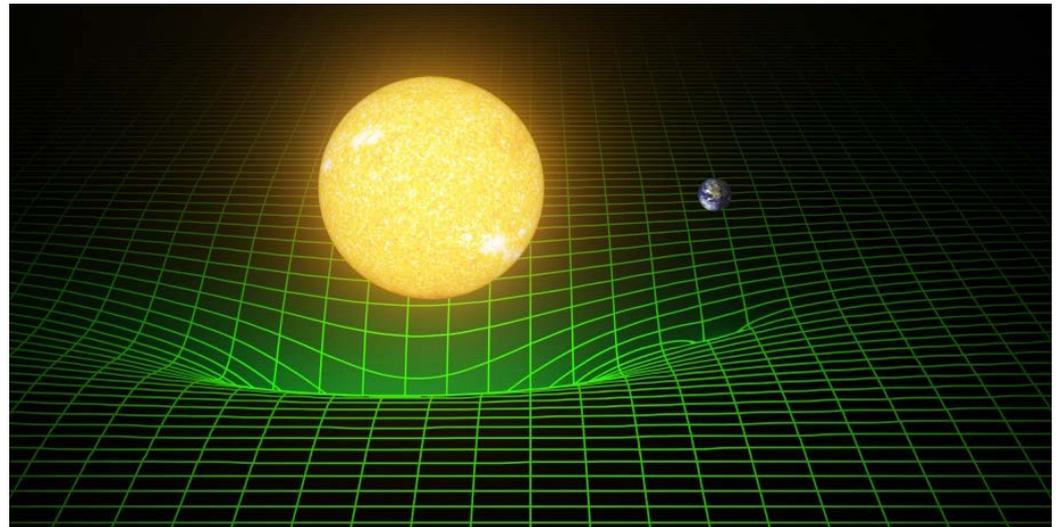
- **De tels astres, s'ils existent, ont un champ gravitationnel si fort que même la lumière ne peut pas s'en échapper !**

- **A l'époque : lumière \Leftrightarrow onde**

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

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)



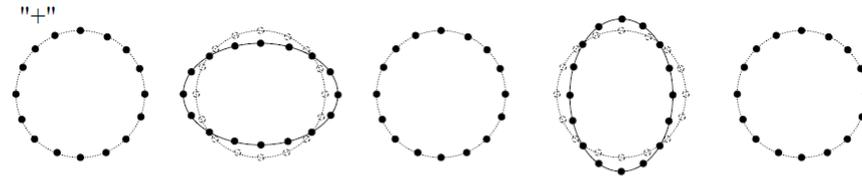
Gravitation ↔ Courbure de l'espace-temps
Courbure de l'espace temps ↔ Densité d'énergie

- **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**

Effet d'une onde gravitationnelle

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

- Polarisation « + »

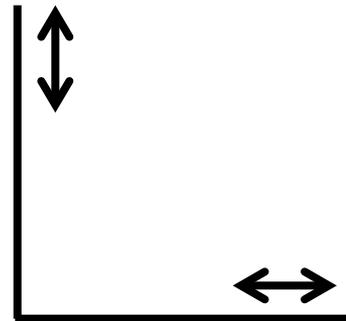


- Polarisation « × »



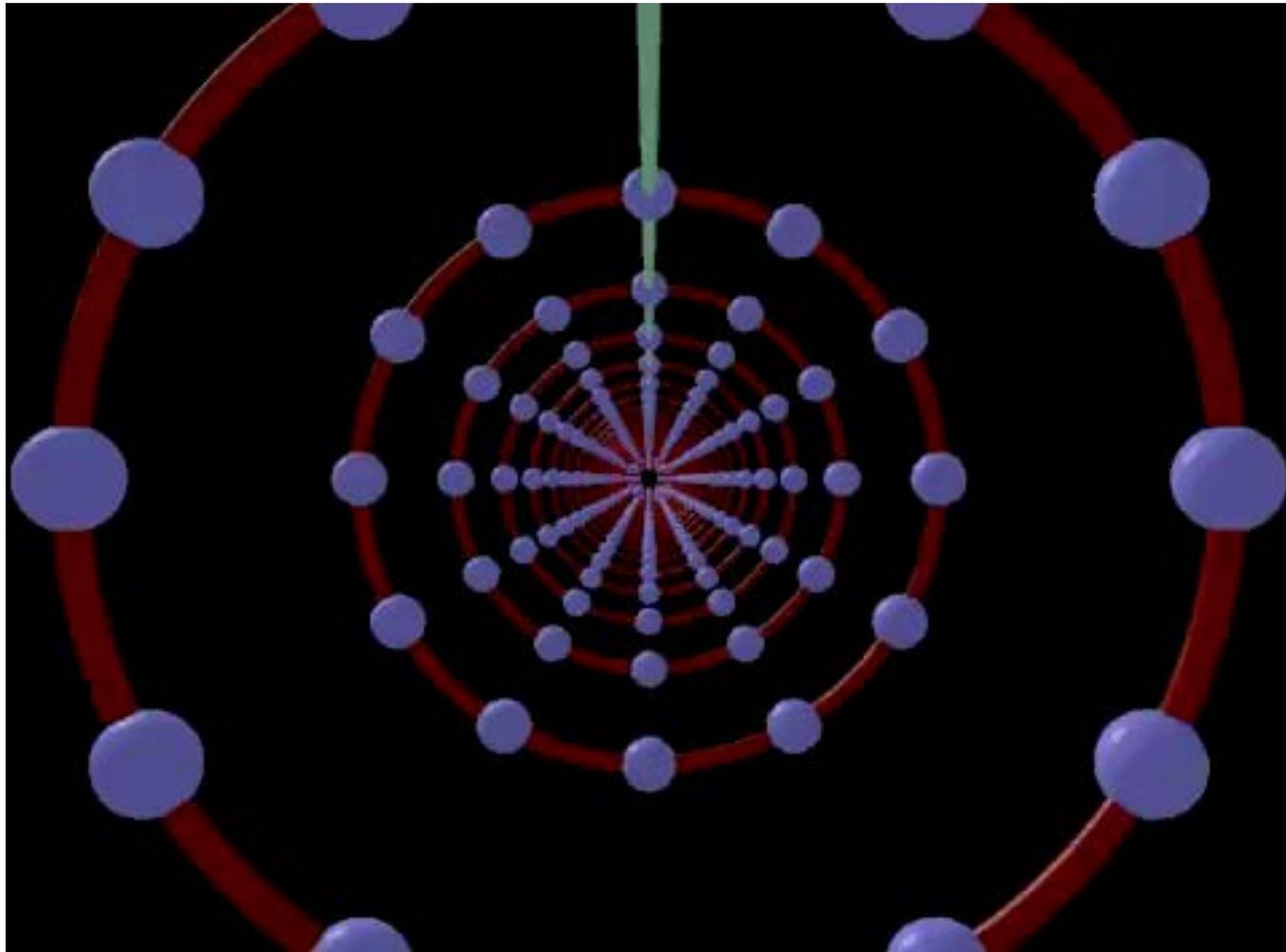
Une période

→ 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 »)

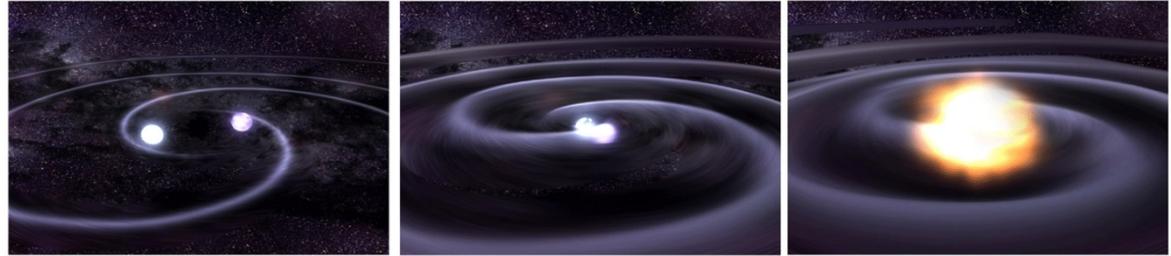
- Effondrement de cœurs d'étoiles (supernovae)

- Sources permanentes

- Pulsars

- Fonds « stochastiques »

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



Le détecteur Virgo

1916-2016: un siècle de progrès

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

1957 : Conférence de Chapel Hill

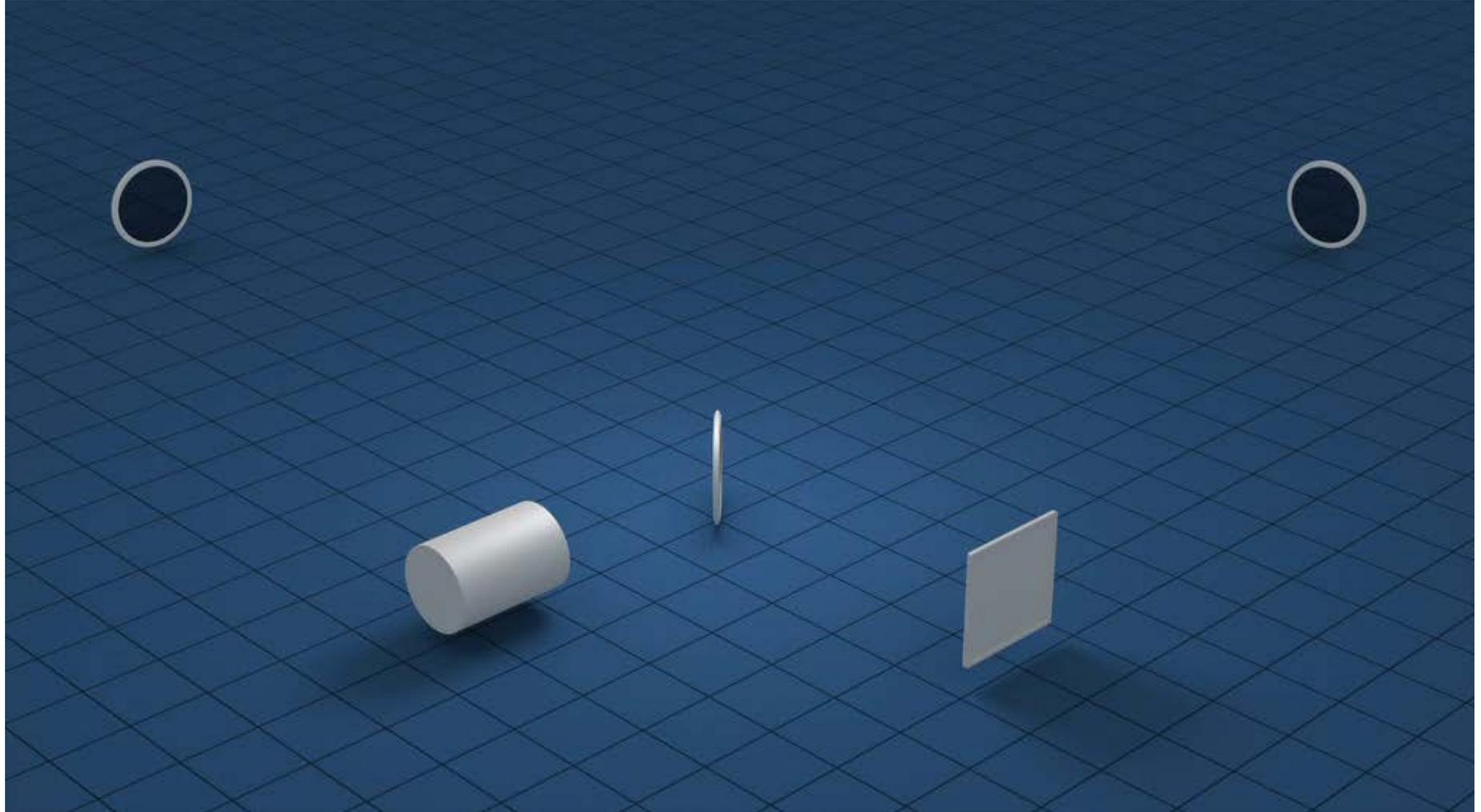
- **1963 : Trous noirs de Kerr**

- **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.)

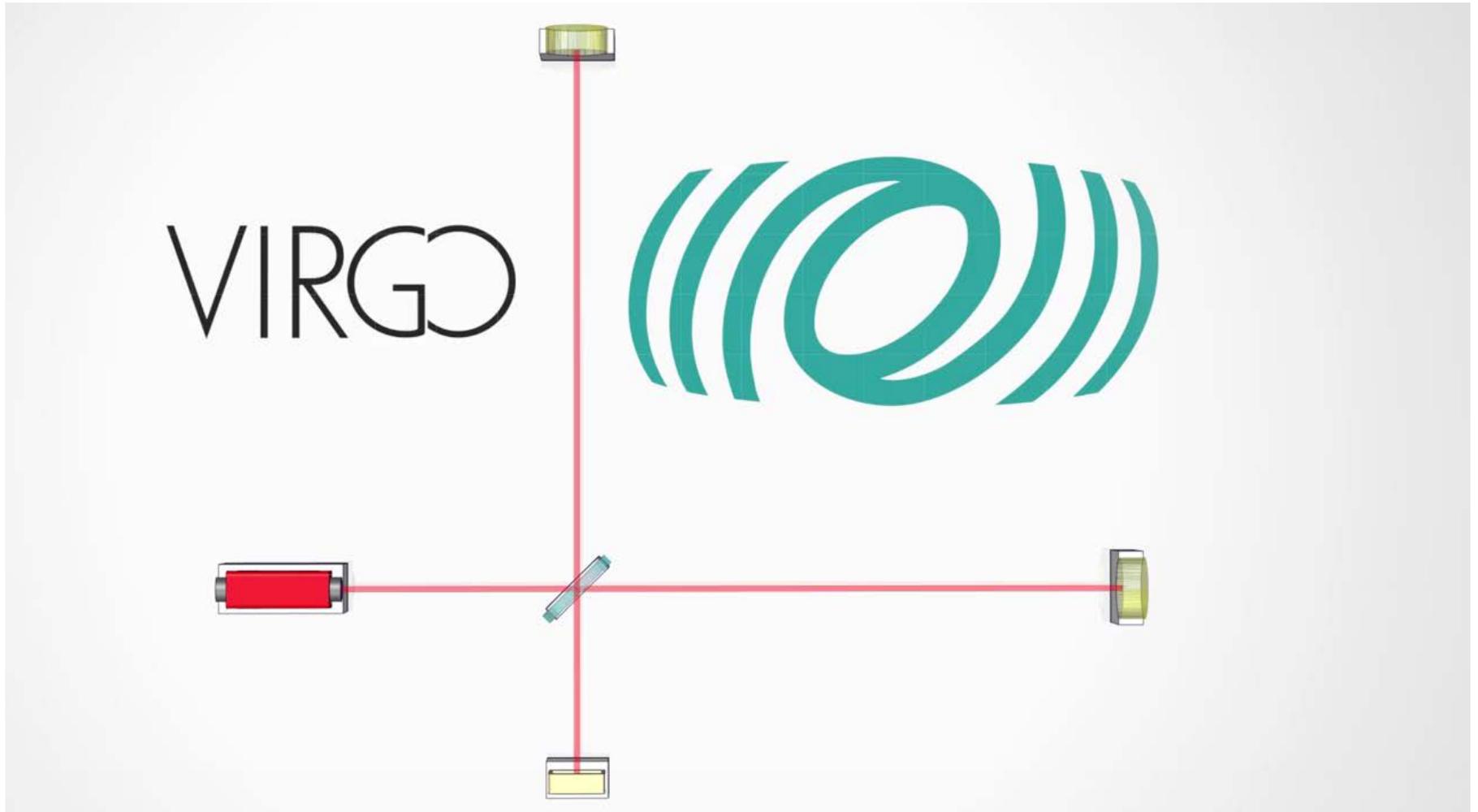
- **1960's : premières barres de Weber**
- **1970 : premier prototype d'ITF (Forward)**
- **1972 : Etudes de faisabilité détaillées (Weiss)**
- **1974 : PSRB 1913+16 (Hulse & Taylor)**
- **Années 1980 : Prototypes (~10 m de long) (Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)**
- **Fin des années 1980 : projets 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**

Principe de fonctionnement



Un détecteur réel : Virgo avancé

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



Un réseau de détecteurs

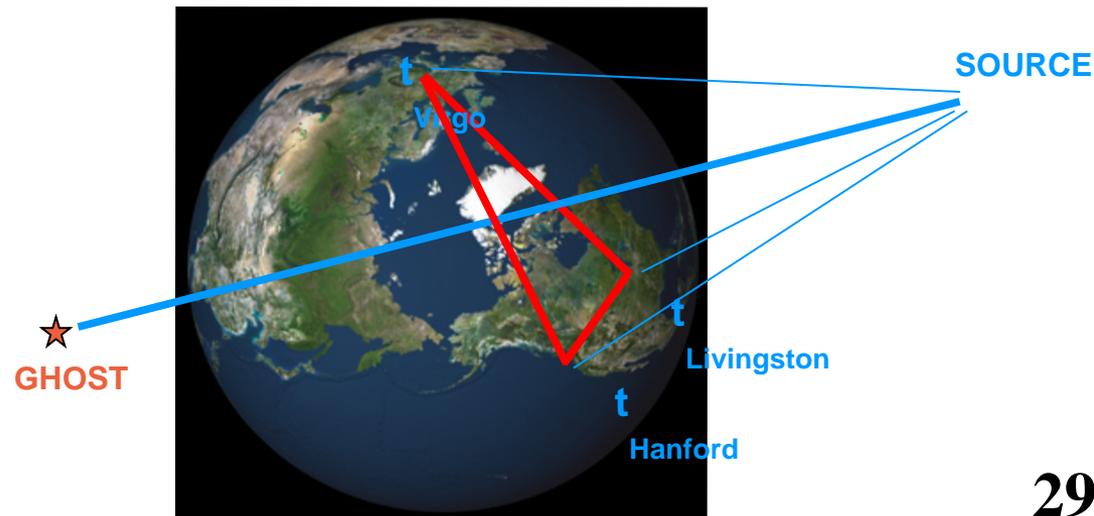
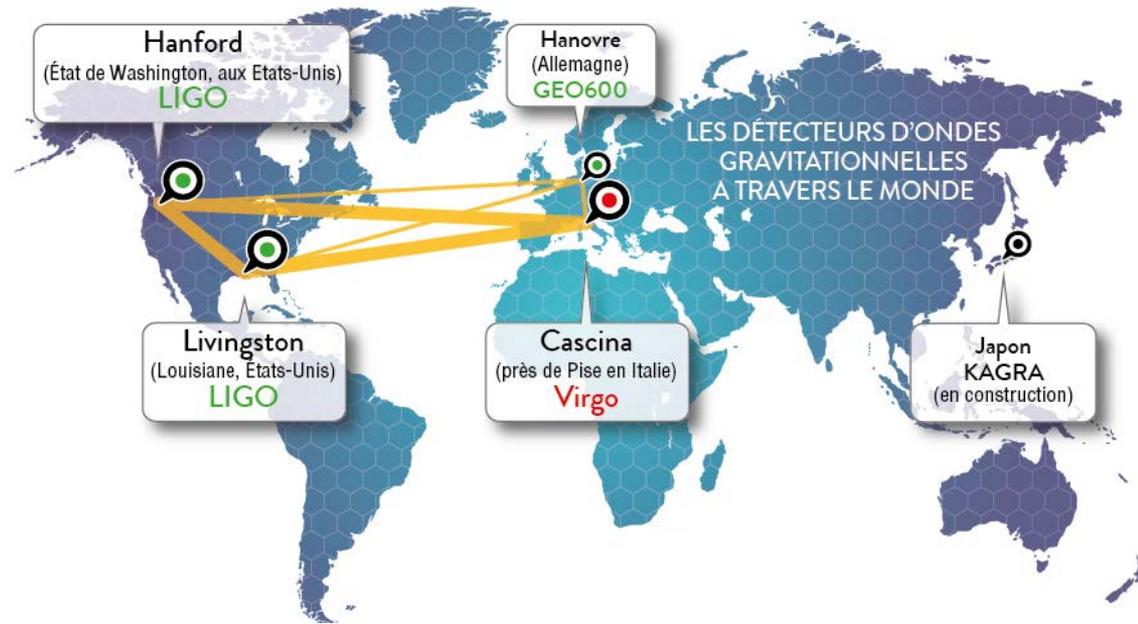


Un réseau de détecteurs

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

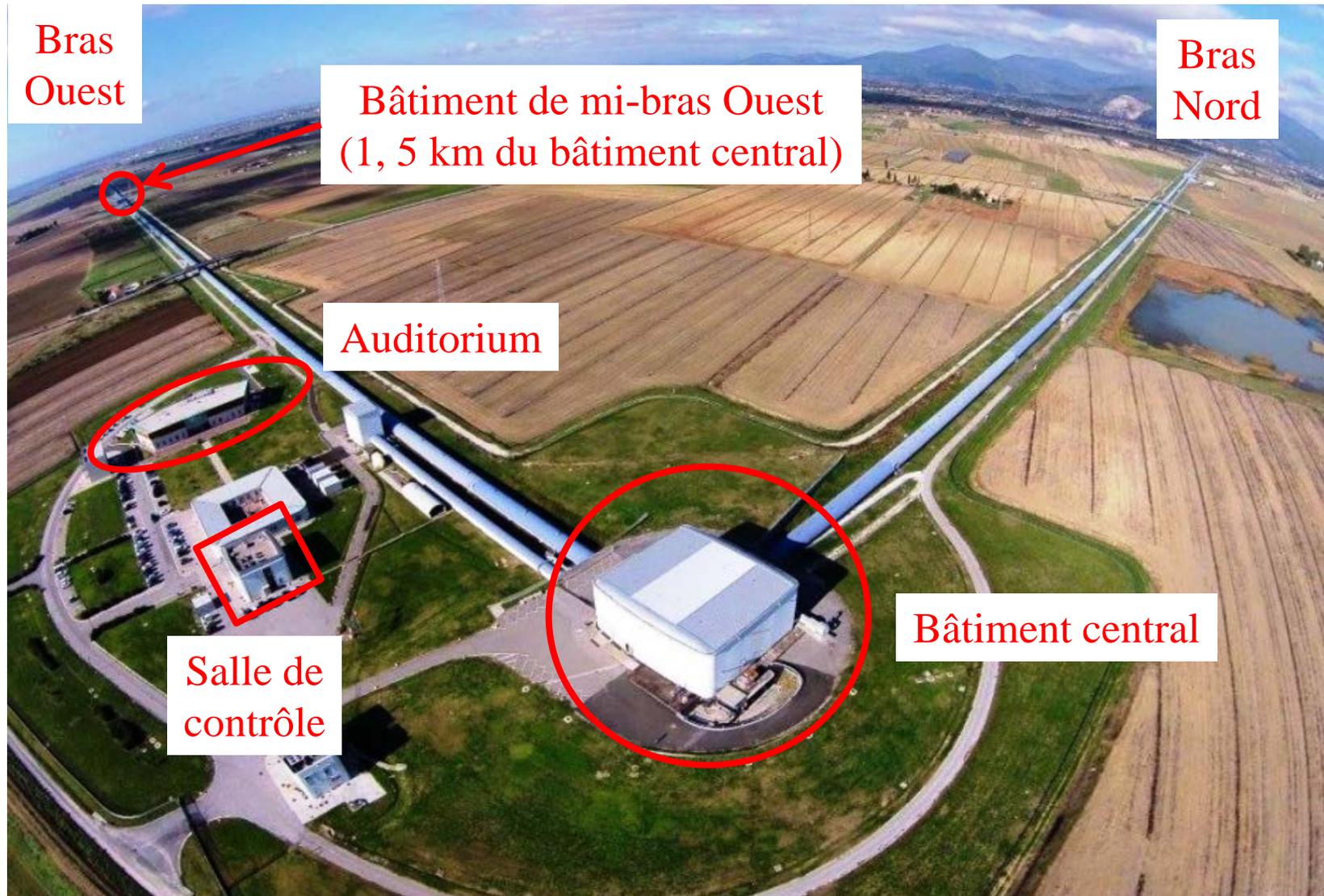
→ Solution : utiliser un réseau d'interféromètres

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



Visite d'EGO : le site du détecteur Virgo

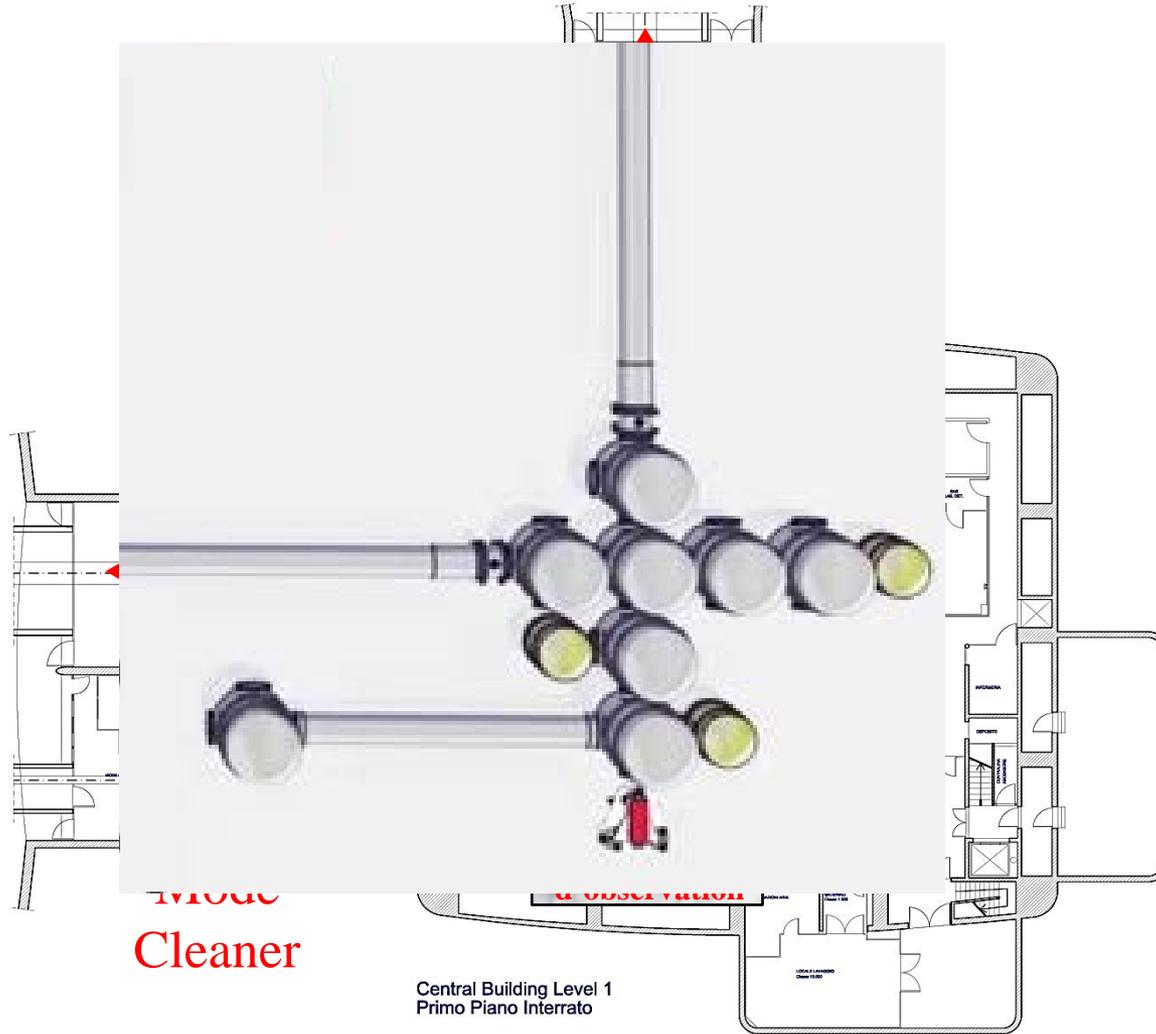
Premier contact : Virgo vu du ciel



Aperçu de la salle de contrôle



Le Bâtiment central



Cleaner

Central Building Level 1
Primo Piano Interrato

Vue de l'intérieur d'un bras

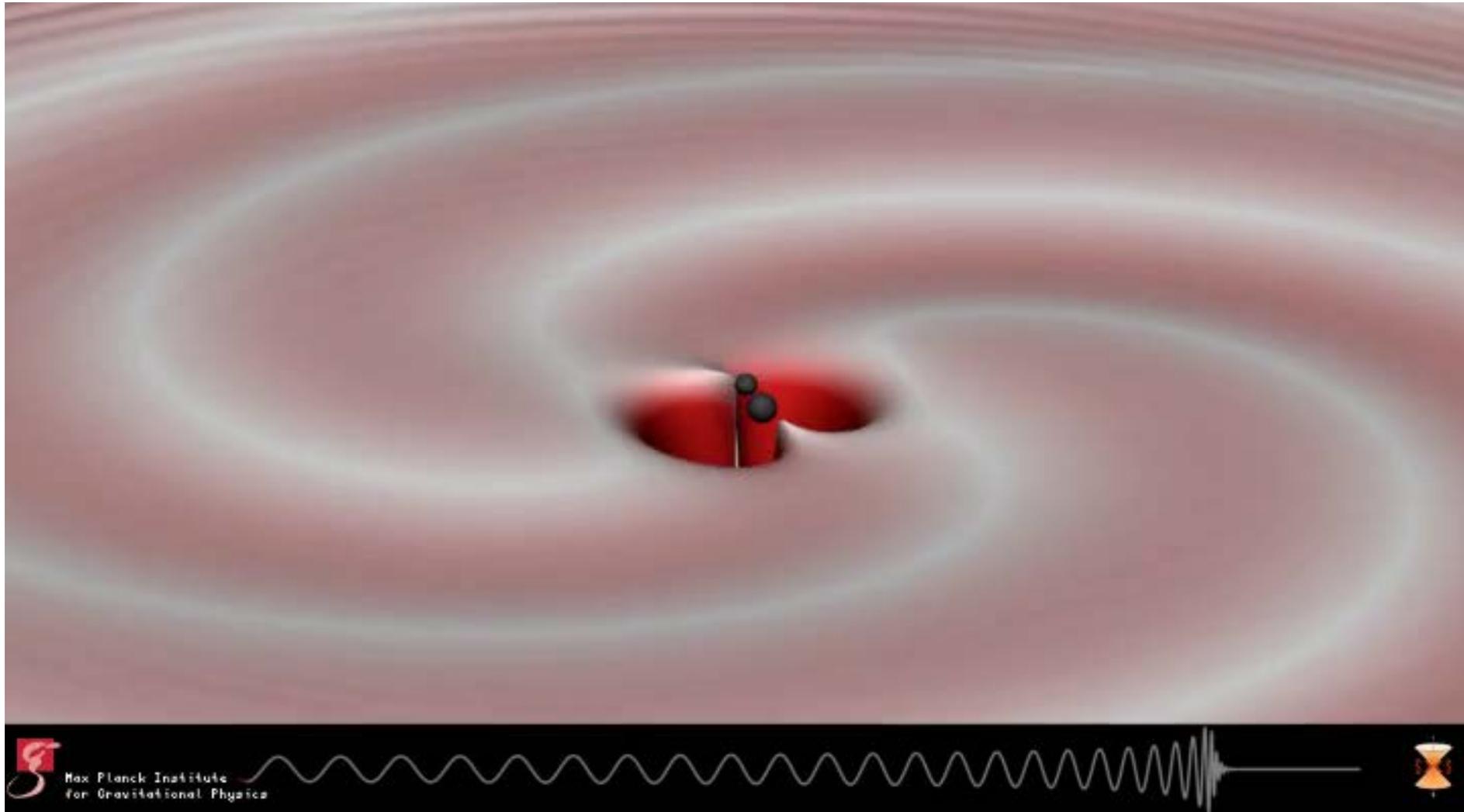
- Vue similaire depuis le bâtiment de mi-bras ouest que vous visiterez tout à l'heure



Premières détections

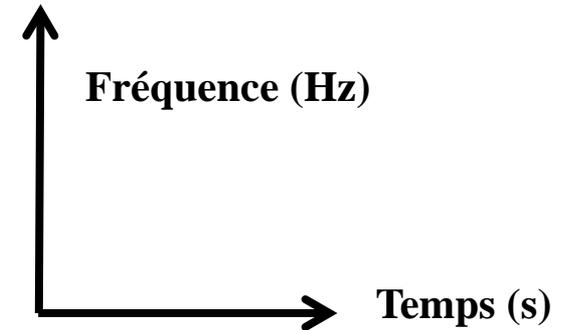
L'événement GW150914

Simulation de la fusion des deux trous noirs

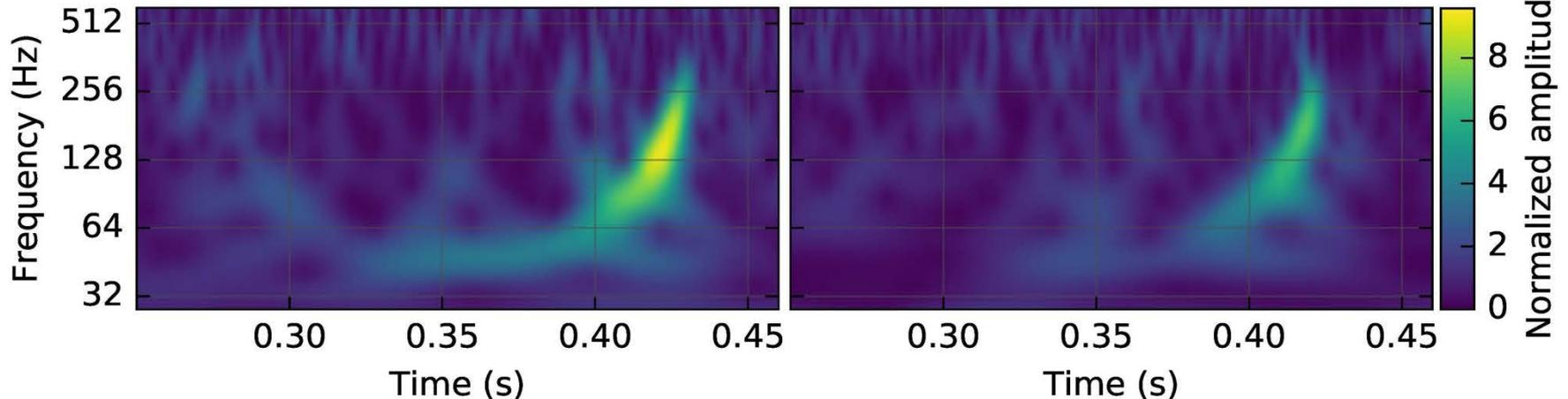


Recherche de signaux transitoires

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



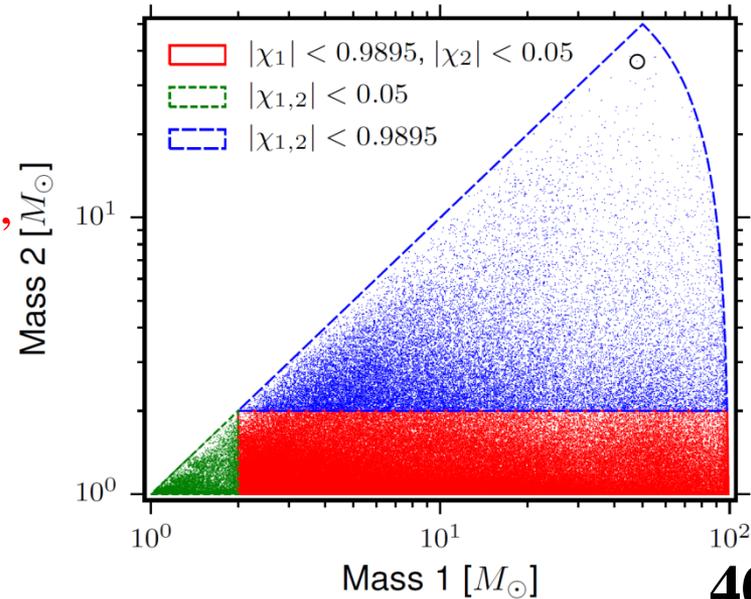
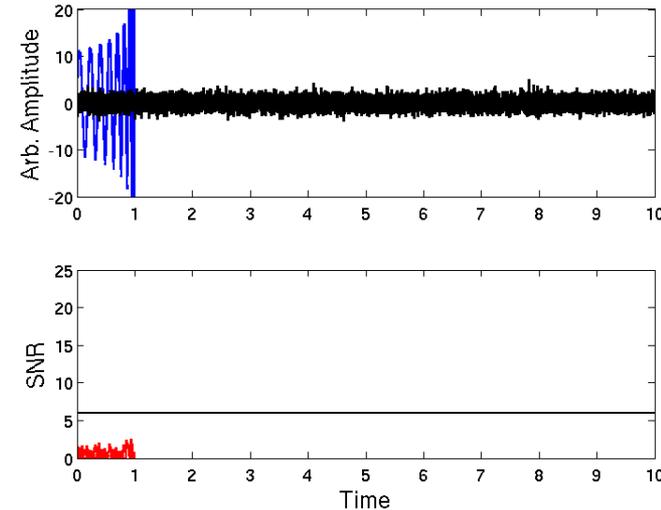
Le signal GW150914 est suffisamment fort pour être visible « à l'œil »



- L'excès doit être cohérent (et coïncident) 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 !

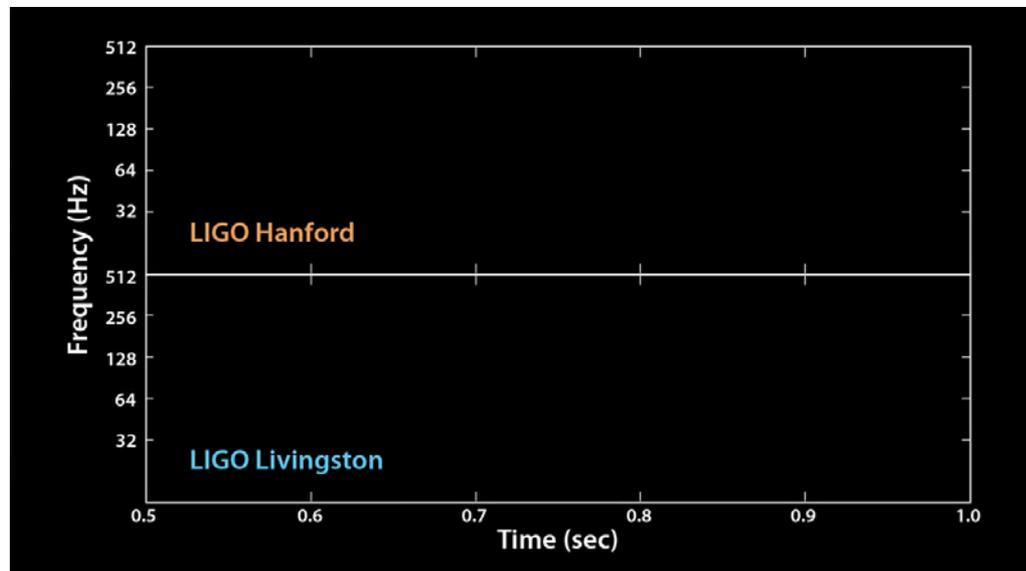
Filtrage adapté ...

- ... 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 »**



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



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

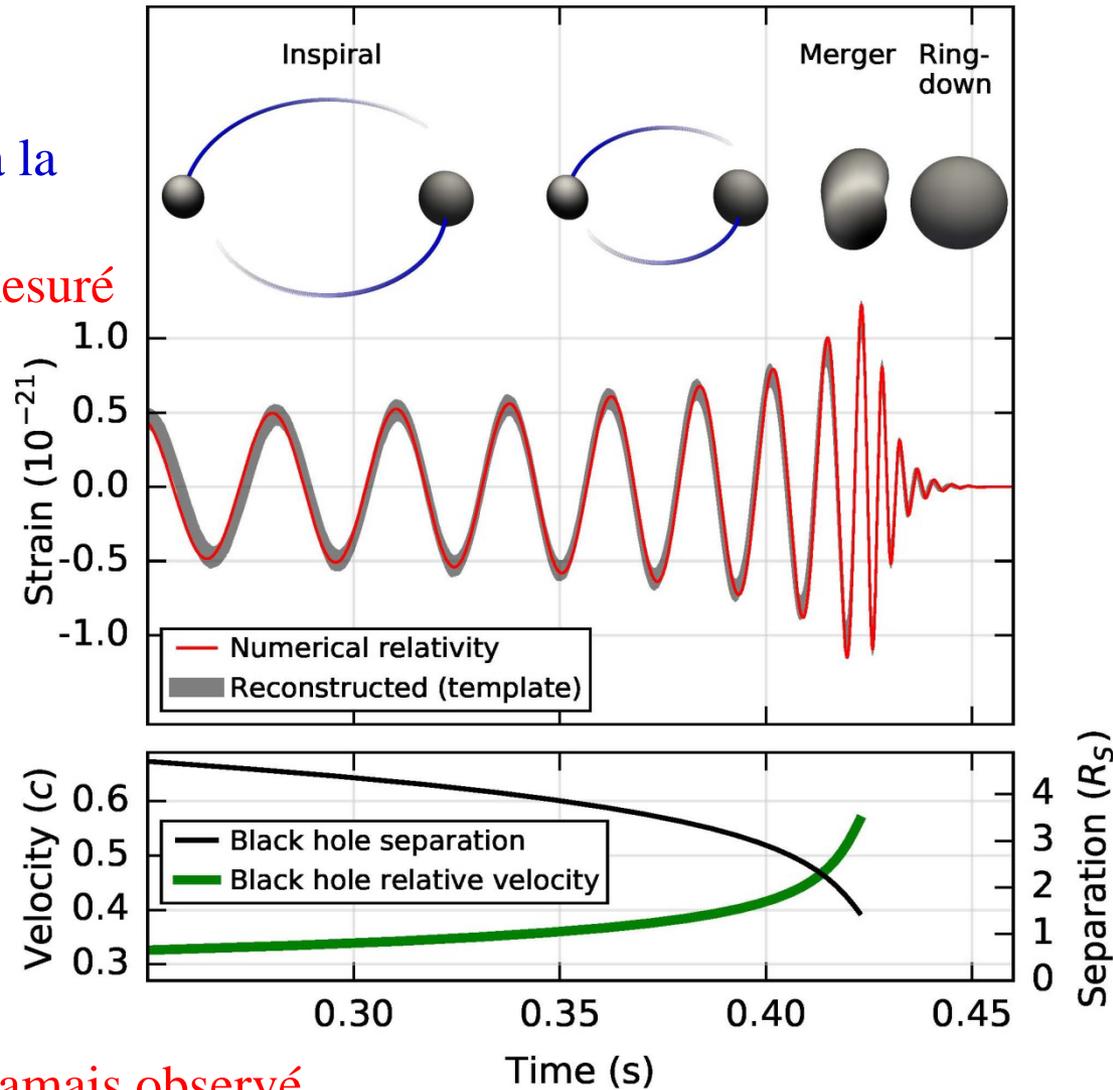
→ A peine quelques R_S !

- Seuls des trous noirs peuvent correspondre à ces observations

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

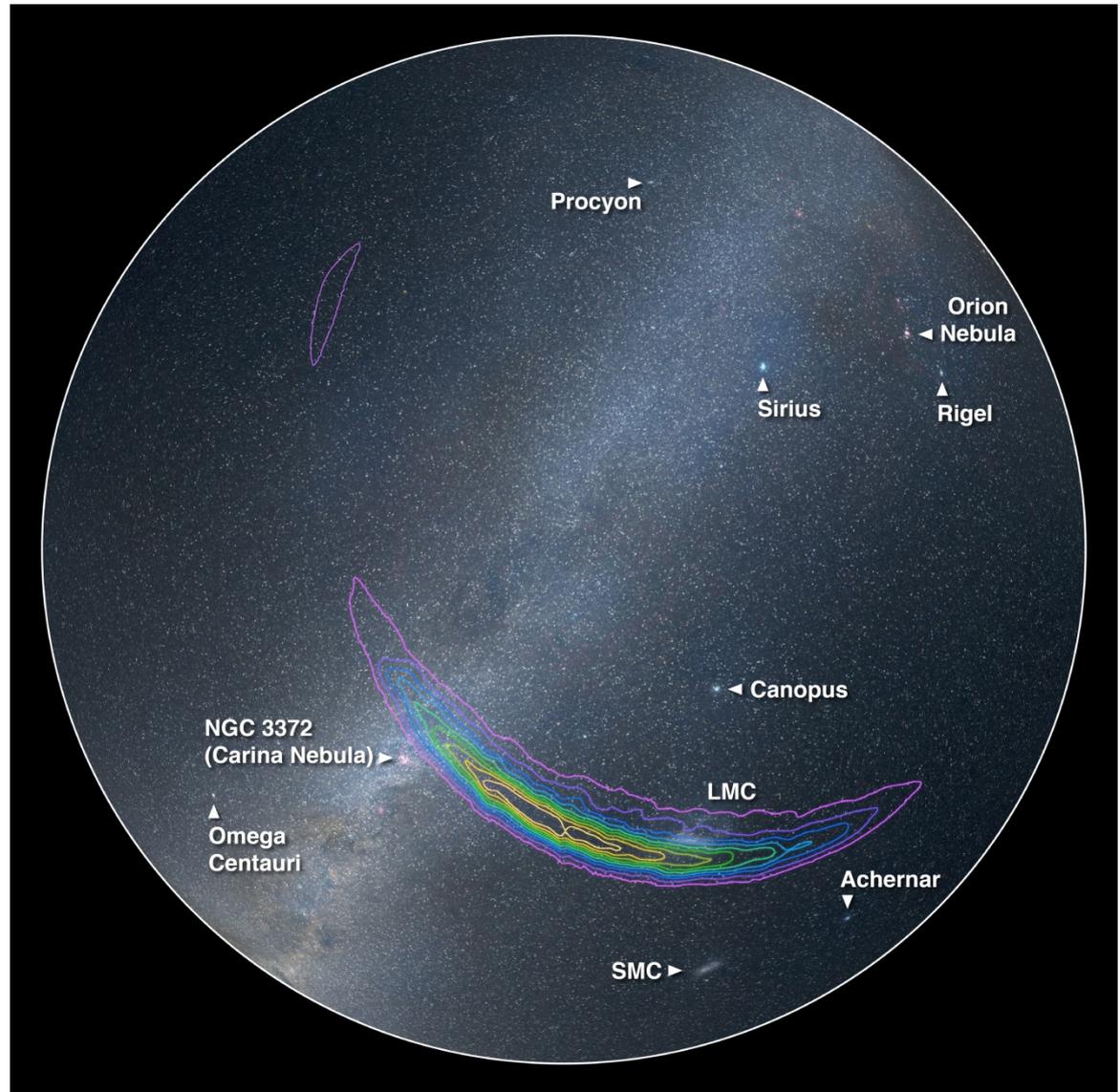
- L'événement le plus énergétique jamais observé

- 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



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



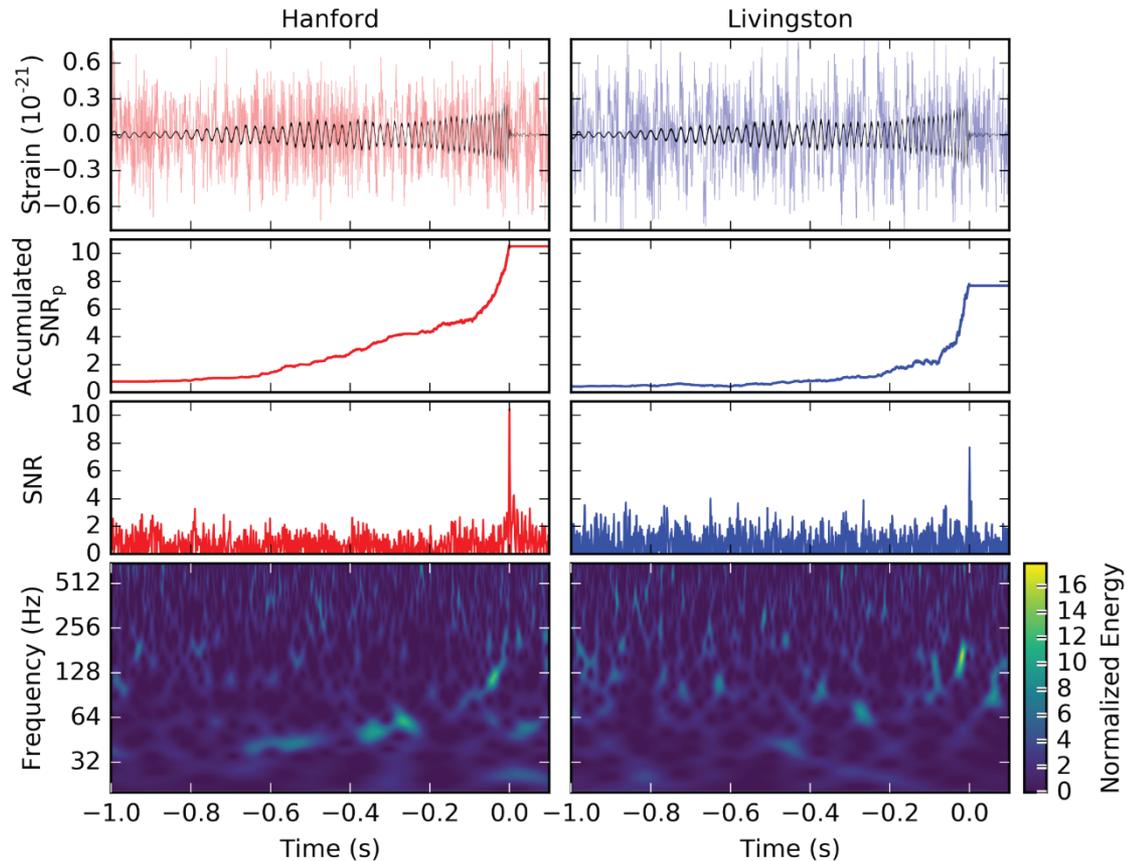
L'événement GW151226

GW151226

- Une autre coalescence de deux trous noirs

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

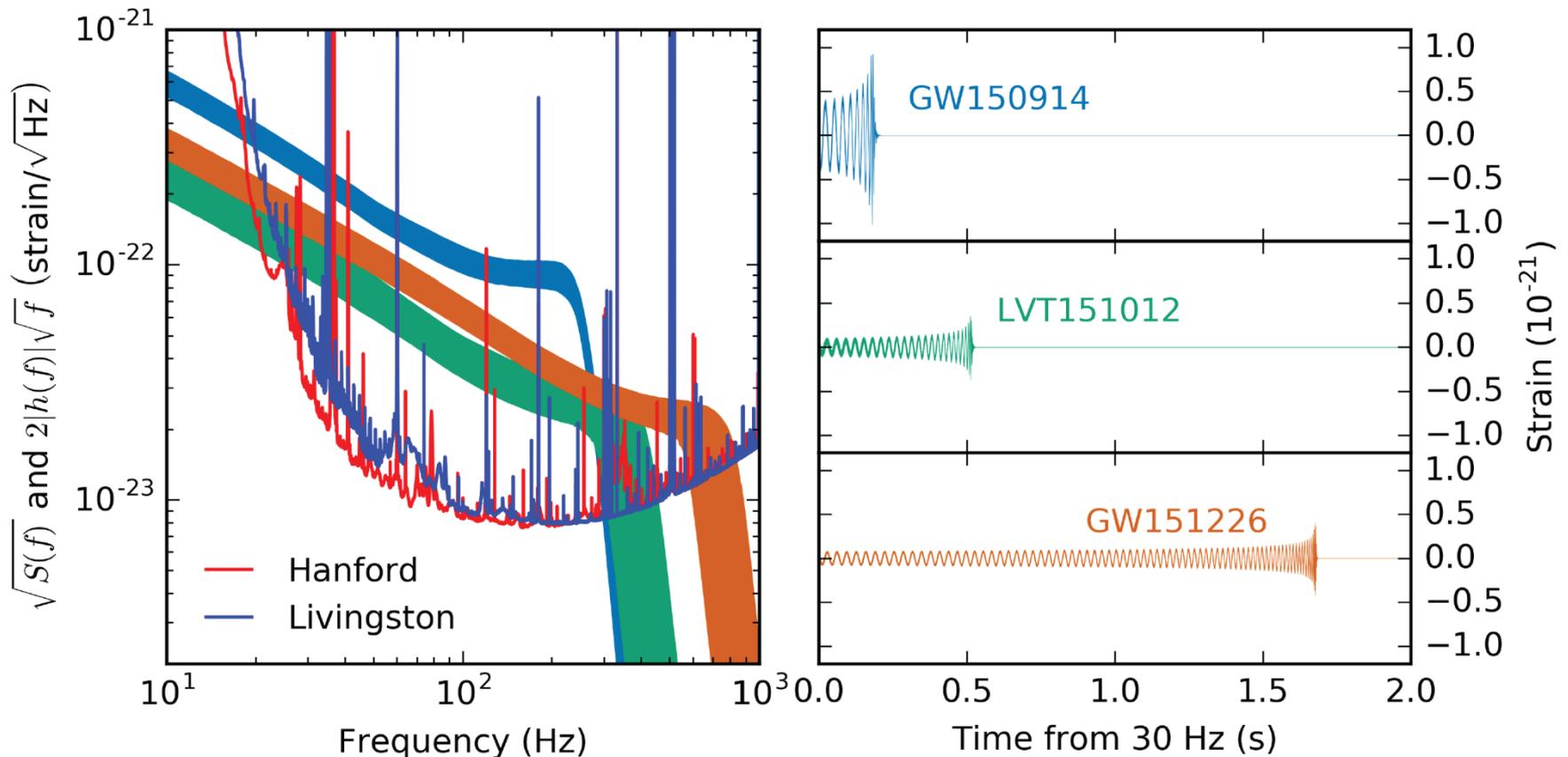
- Nécessité du **filtrage adapté**



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

Bilan : deux détections, un candidat

- **Systemes 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**

- **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 ...

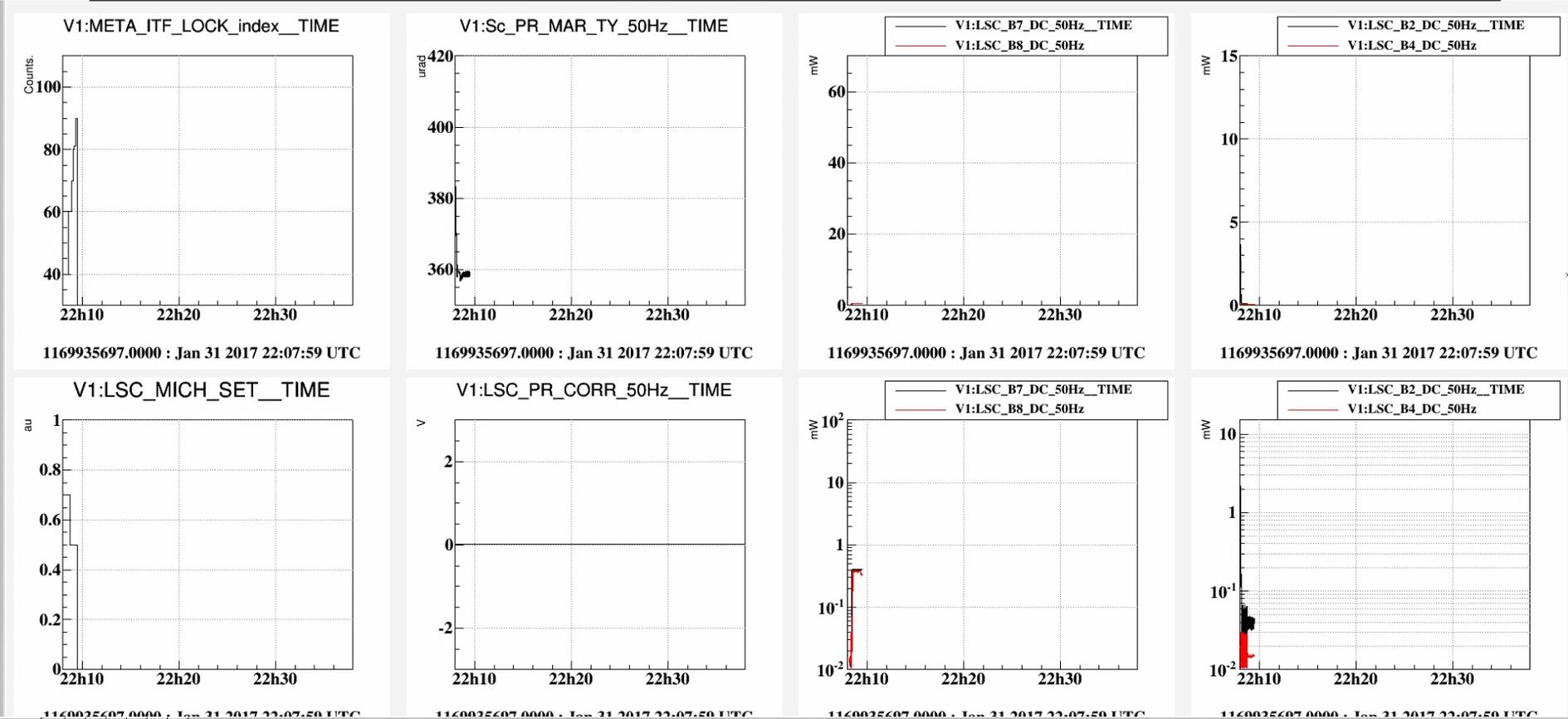
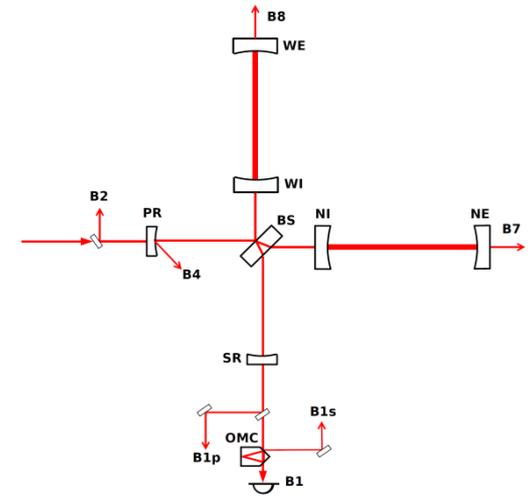


Exemple de contrôle

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

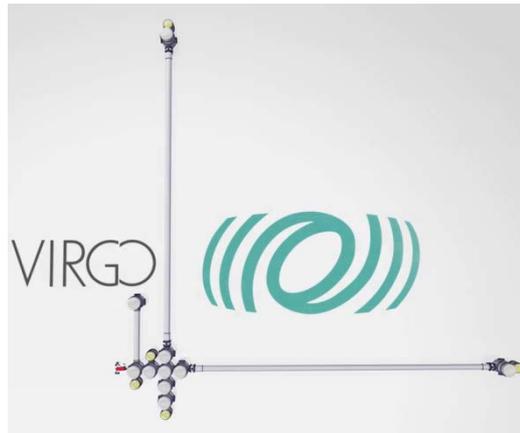


[Version rapide]

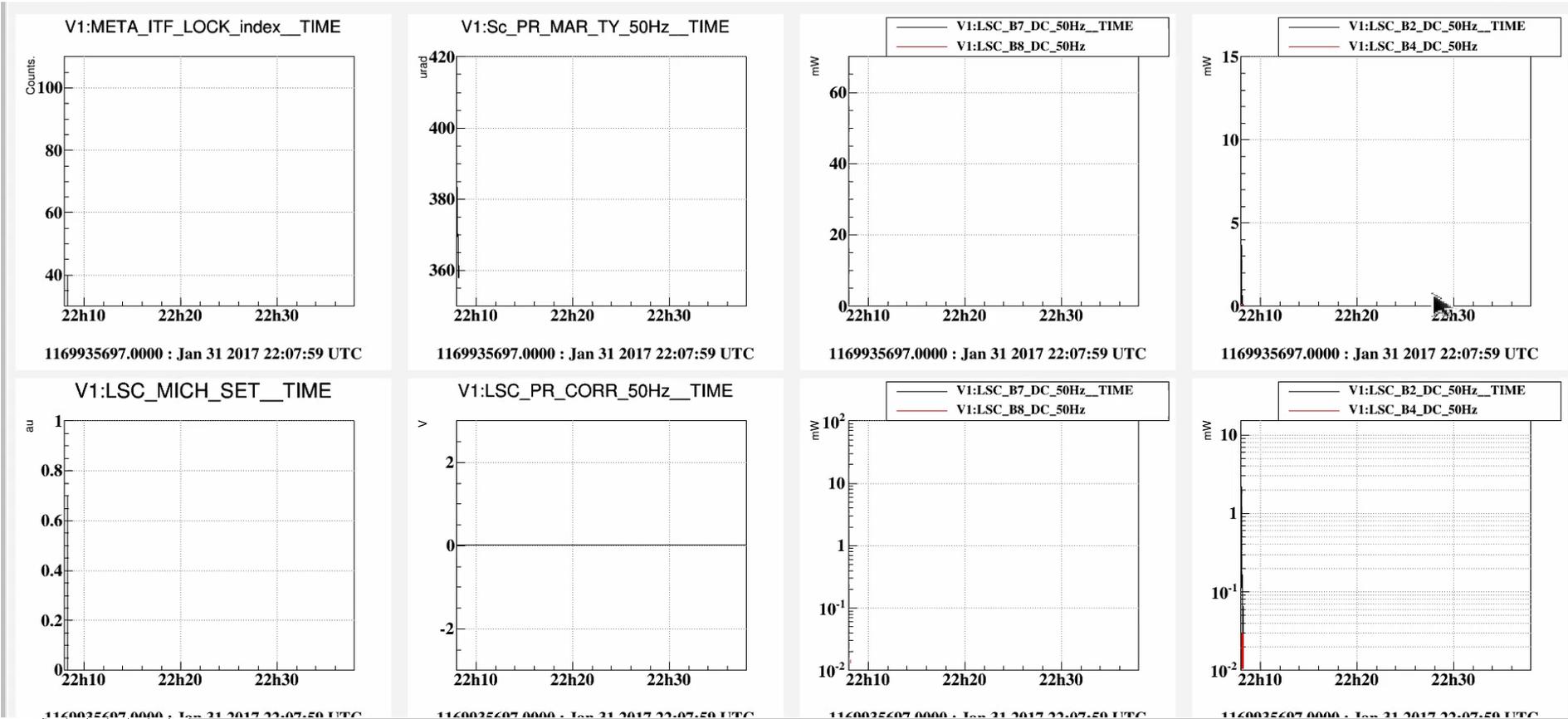
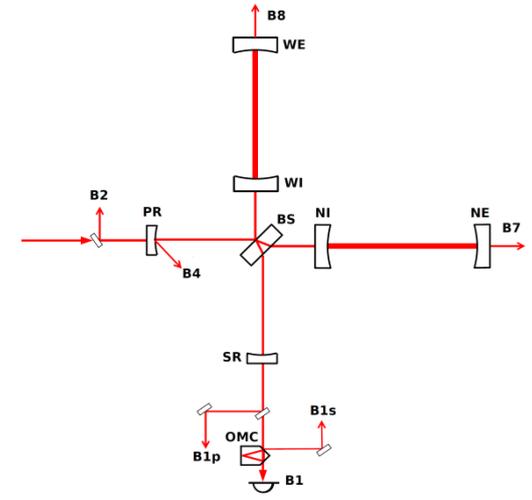


Exemple de contrôle

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



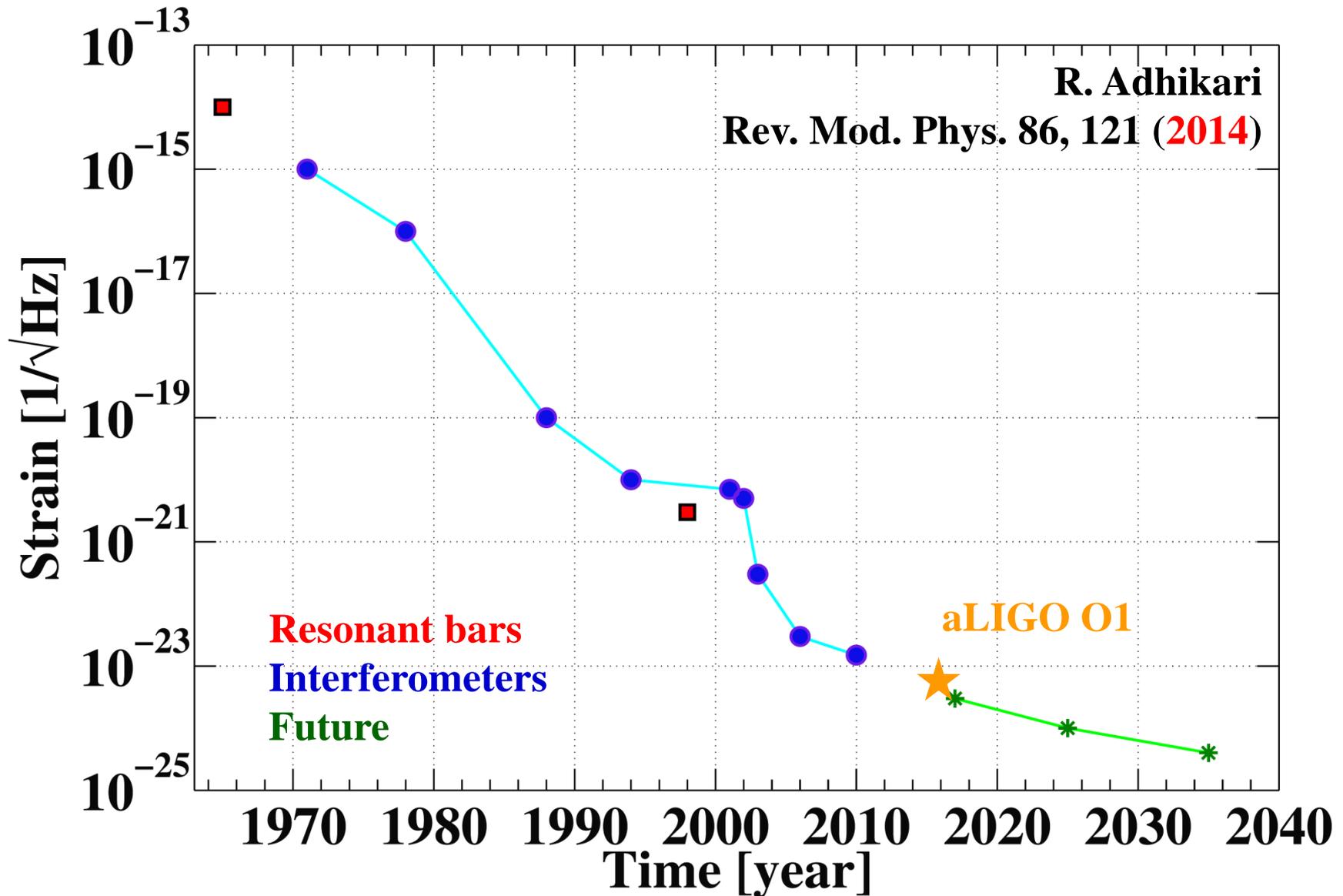
[Version lente]



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



Film CNRS Images

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

