



La détection des ondes gravitationnelles

Une belle aventure !

D. Verkindt, LAPP, Université de Savoie Mont-Blanc, CNRS

Le plan de cette aventure

- **Quelques rappels historiques**
- **Principe de la détection interférométrique**
- **Recherche de signaux CBC**
- **Premiers résultats**

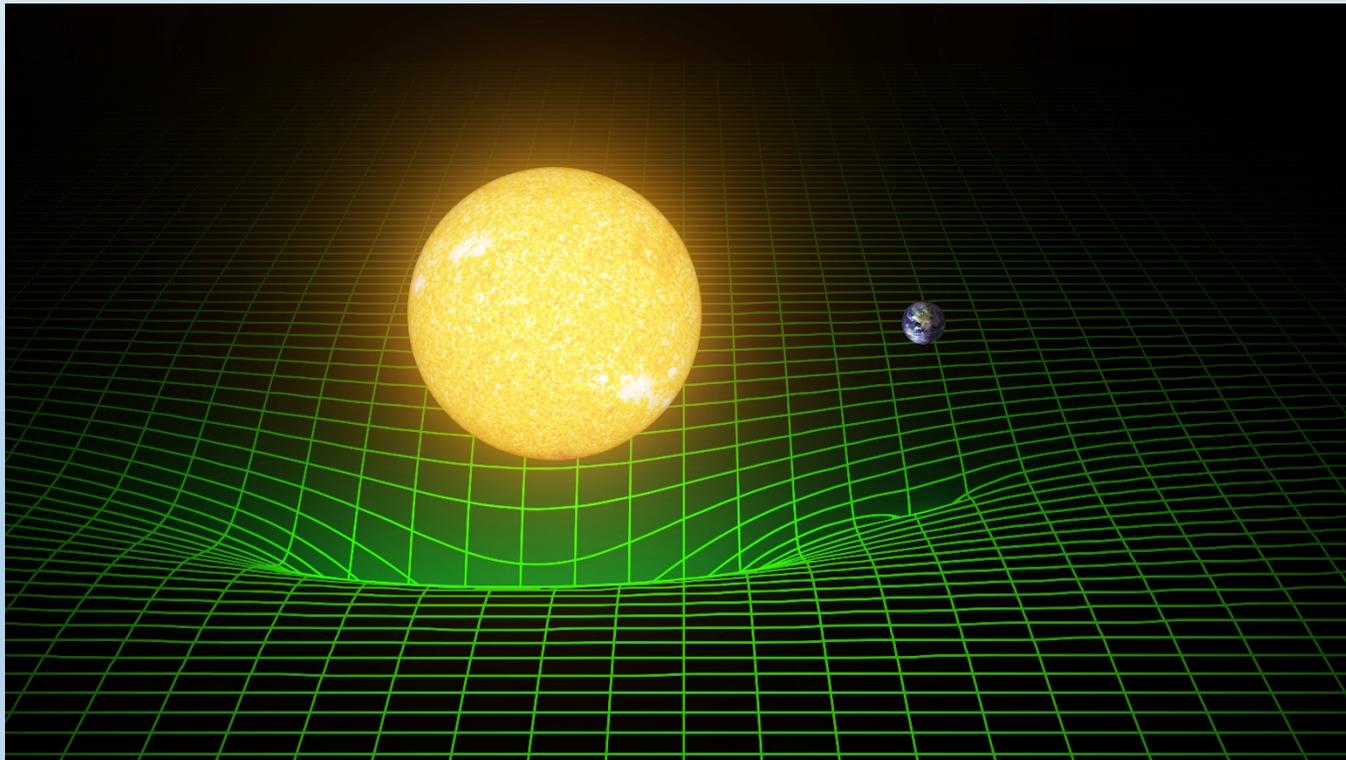
Résumé: Suite à la première détection directe d'une onde gravitationnelle réalisée par la collaboration LIGO-Virgo le 14 septembre 2015, un nouveau type d'astronomie est né.

Cette nouvelle astronomie observe les infimes déformations de l'espace-temps et non plus seulement la lumière des étoiles. Après un rappel de ce que sont les ondes gravitationnelles et du principe de fonctionnement des détecteurs interférométriques, cette conférence fera un rappel historique des efforts constants réalisés depuis plus de 50 ans pour construire des détecteurs toujours plus performants, décrira les bruits qui les limitent et montrera comment des signaux d'onde gravitationnelle ont finalement pu être extraits de ces bruits et identifiés comme tels.

A l'origine des ondes gravitationnelles

La théorie de la relativité générale d'Albert Einstein : nouvelle vision de la gravitation

- La gravitation n'est plus une force
- Espace et temps sont liés
- Espace-temps déformable dynamiquement



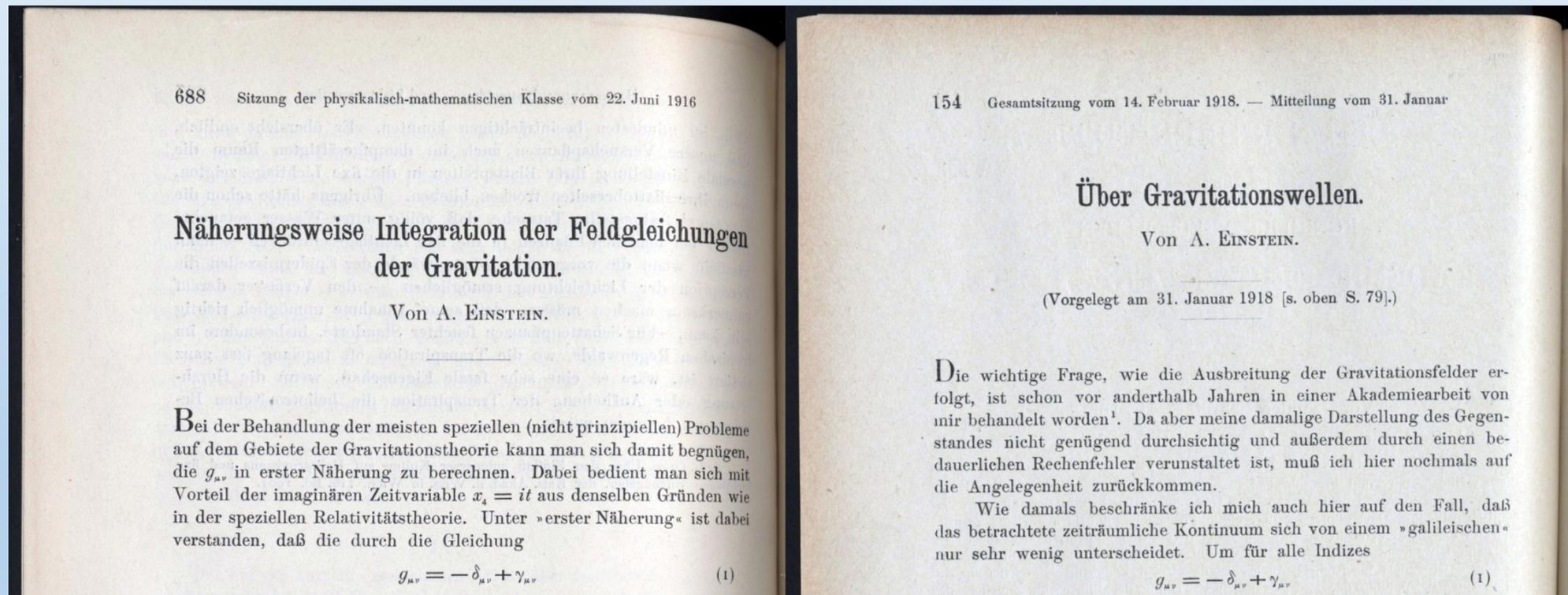
*“Spacetime tells matter how to move
And matter tells spacetime how to curve”*

J. A. Wheeler

La naissance des ondes gravitationnelles

22 juin 1916: « Näherungsweise Integration... », A. Einstein, Preuss. Akad. Wiss. Berlin p. 688 (1916).
linéarisation des équations de la relativité générale et première description des ondes gravitationnelles

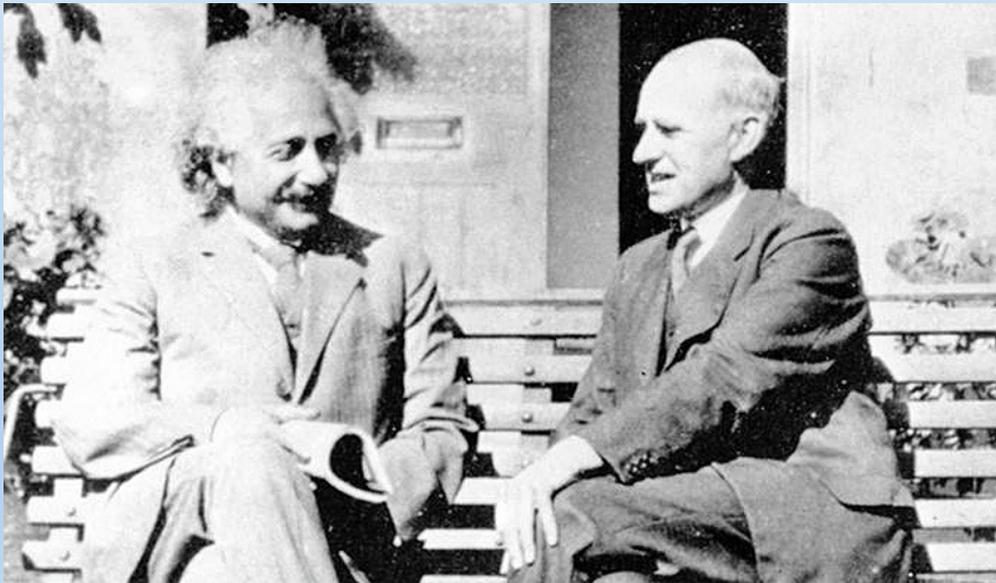
31 janvier 1918: « Über Gravitationswellen », A. Einstein, Preuss. Akad. Wiss. Berlin p. 154 (1918).
formule du quadripôle et correction d'une erreur de l'article de 1916



Les ondes gravitationnelles existent-elles vraiment?

Beaucoup de physiciens sont sceptiques quant à l'existence des ondes gravitationnelles... Einstein lui-même change plusieurs fois d'avis sur leur existence et estime que, si elles existent, elles sont sans doute indétectables.

Le 1er Décembre 1922, Arthur Stanley Eddington écrit un article intitulé « Propagation of Gravitational Waves » où il tente de montrer que les ondes gravitationnelles n'existent pas et ne sont qu'un artefact mathématique qui « se propage à la vitesse de la pensée ».



The Propagation of Gravitational Waves.

By A. S. EDDINGTON, F.R.S.

(Received October 11, 1922.)

1. The problem of the propagation of disturbances of the gravitational field was investigated by Einstein in 1916, and again in 1918.* It has usually been inferred from his discussion that a change in the distribution of matter produces gravitational effects which are propagated with the speed of light; but I think that Einstein really left the question of the speed of propagation rather indefinite. His analysis shows how the co-ordinates must be chosen if it is desired to represent the gravitational potentials as propagated with the speed of light; but there is nothing to indicate that the speed of light appears in the problem, except as the result of this arbitrary choice. So far as I know, the propagation of the absolute physical condition—the altered curvature of space-time—has not hitherto been discussed.

Weyl† has classified plane gravitational waves into three types, viz.: (1) longitudinal-longitudinal; (2) longitudinal-transverse; (3) transverse-transverse. The present investigation leads to the conclusion that transverse-transverse waves are propagated with the speed of light *in all systems of co-ordinates*. Waves of the first and second types have no fixed velocity—a result which



A. S. Eddington

Intermède cosmologique et quantique

1923 Solutions exactes décrivant un univers en expansion (Friedman)

1927 Univers en expansion issu de l'explosion d'un atome primordial (Lemaitre) : "big bang"

1929 Loi de Hubble décrivant la fuite des galaxies (expansion de l'univers)

1946/48 Theory du CMB (Fond de Rayonnement Cosmologique) (Dicke, Gamow, Alpher & Herman)

1920-1950 âge d'or de la mécanique quantique

...

...

1957 Conférence de Chapel Hill

Discours de clôture de Peter Bergmann:

« ...Il existe un troisième type d'expérience qui apparemment n'est pas réalisable, et ne le sera sans doute pas avant longtemps. Ce type d'expérience correspond à la détection des ondes gravitationnelles »

Le premier détecteur

En 1959, J. Weber publie un article où il décrit son programme de travail pour construire un détecteur d'onde gravitationnelle: « Detection and Generation of Gravitational Waves »

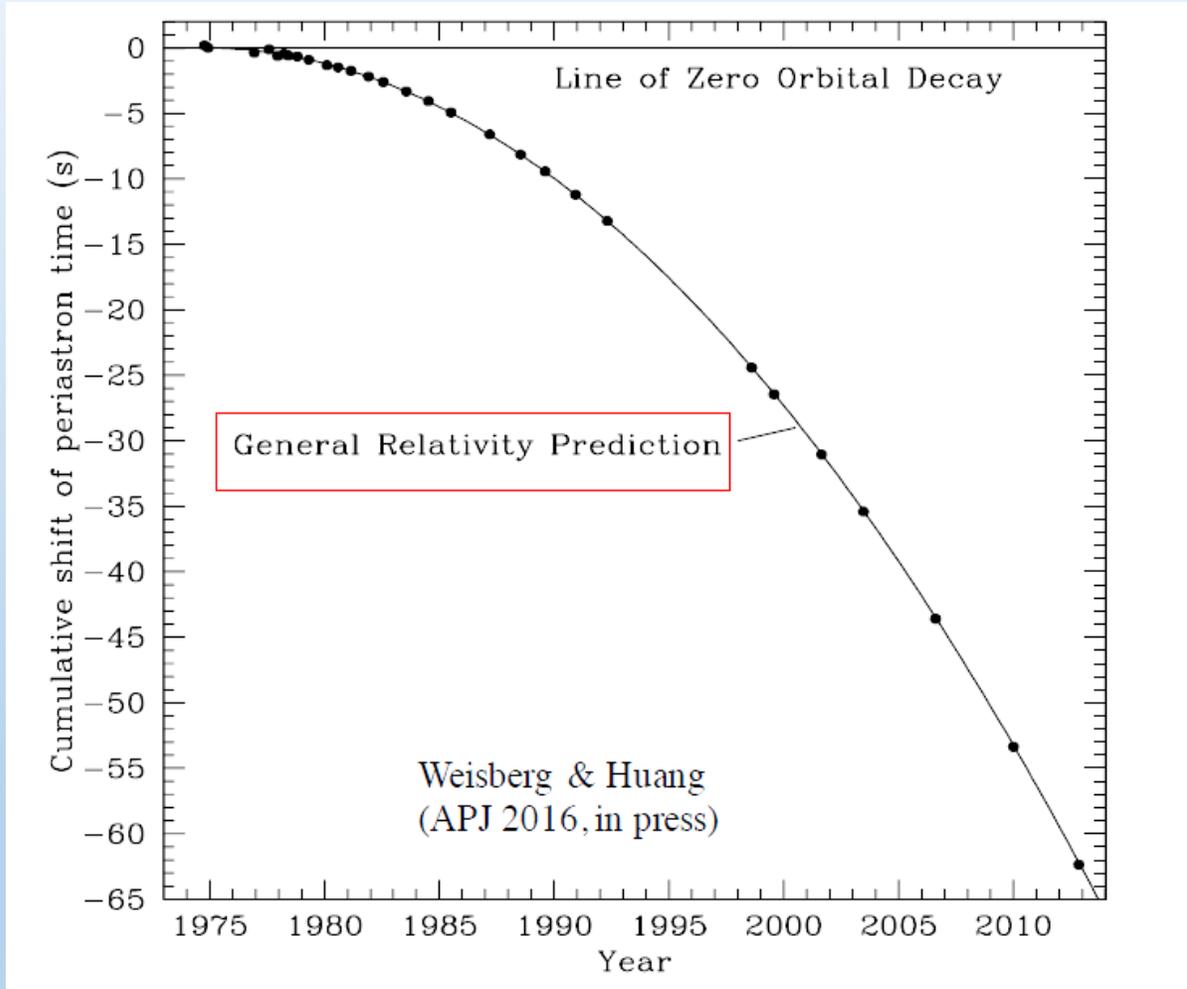
Et construit le premier détecteur d'onde gravitationnelle...

Une barre d'aluminium résonant à 1660 Hz dont la vibration est détectée par des capteurs piézoélectriques

De 1959 à 1962, il sera aidé par son étudiant: R. L. Forward



Le pulsar binaire PSR1913+16



La période orbitale de PSR1913+16 diminue (de plus en plus vite) au cours du temps



PSR1913+16 émet des ondes gravitationnelles (dont la fréquence augmente au cours du temps)



Les ondes gravitationnelles existent

$$P_{GW} \propto \frac{c^5}{G} \varepsilon^2 \left(\frac{R_s}{R}\right)^2 \left(\frac{v}{c}\right)^6$$

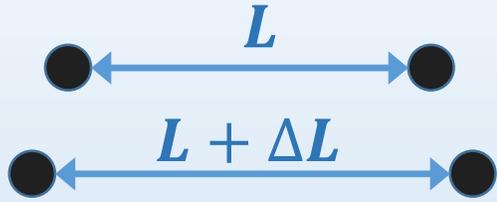
$$h = \frac{2G}{r c^4} \ddot{Q}$$

Et emportent de l'énergie

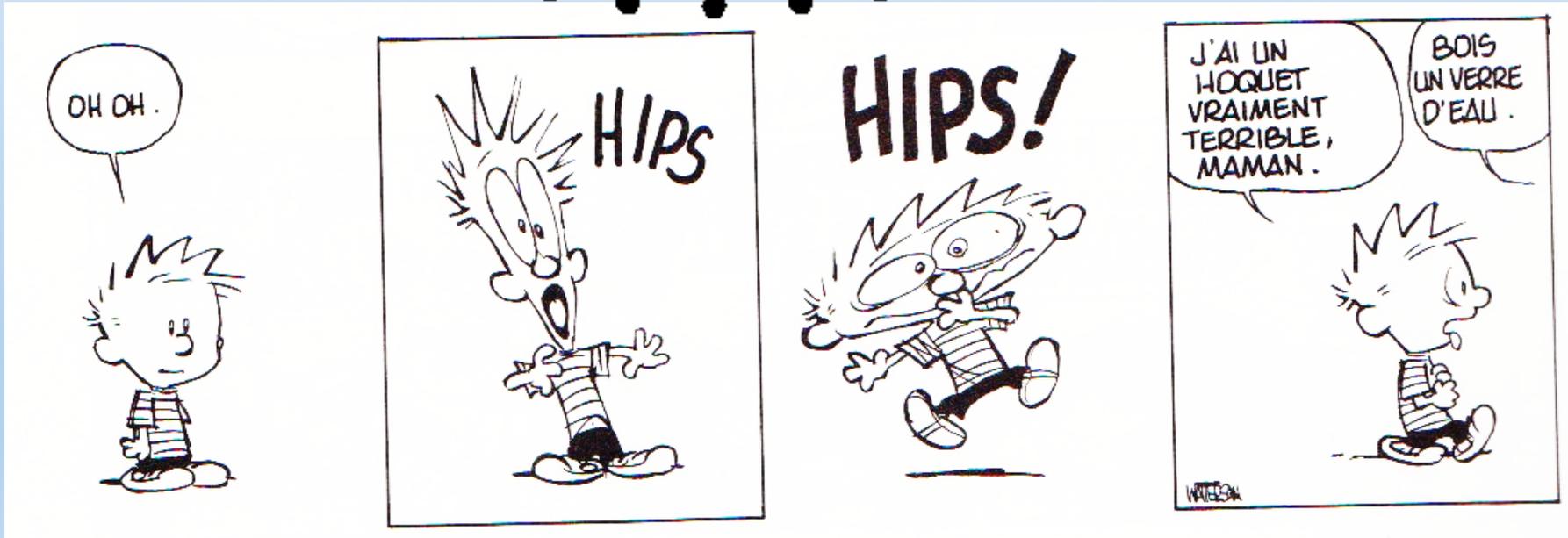
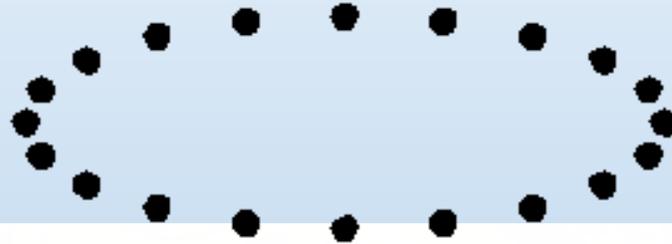
Vue d'artiste de PSR1913+16

Principe de la détection interférométrique

Effet d'une onde gravitationnelle



$$h \sim \Delta L / L$$



Comment détecter les variations de longueur ?

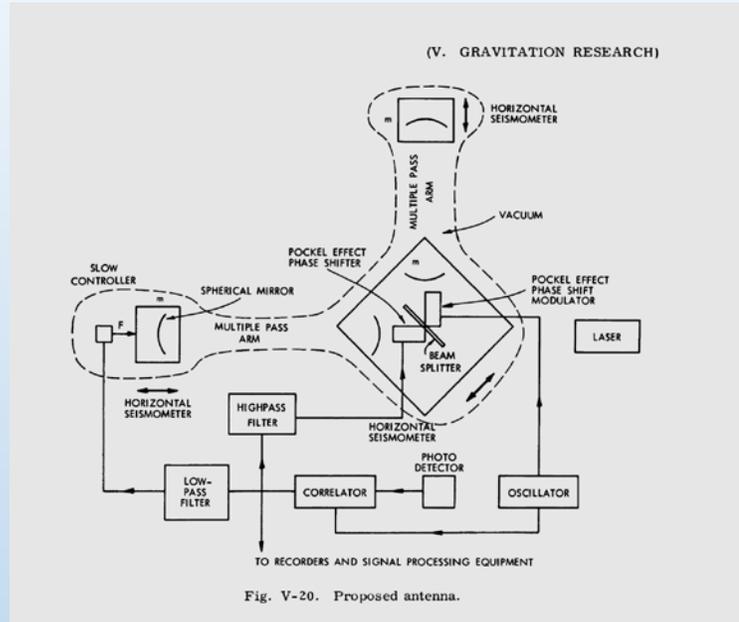
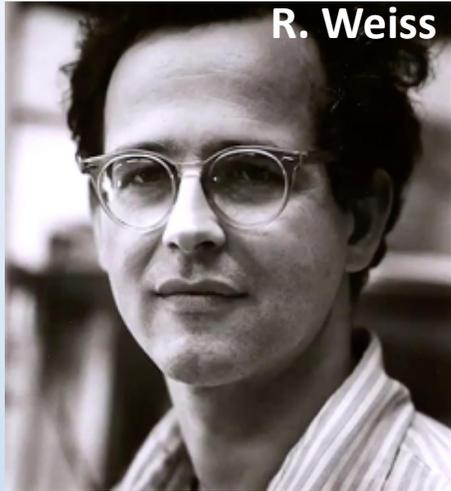
- La lumière pour mesurer les distances
- L'interféromètre pour mesurer les variations ΔL

$$h \sim \Delta L / L$$



Les premiers interféromètres détecteurs d'onde gravitationnelle

Les premiers détecteurs interférométriques



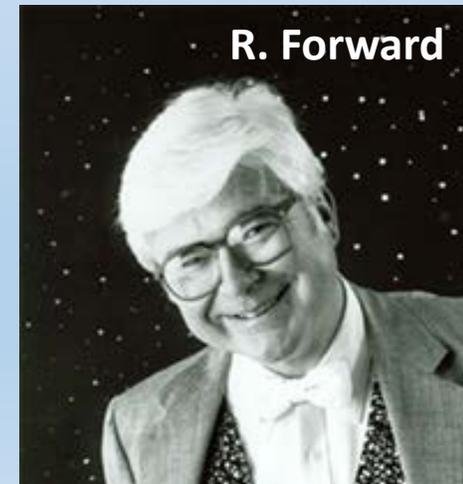
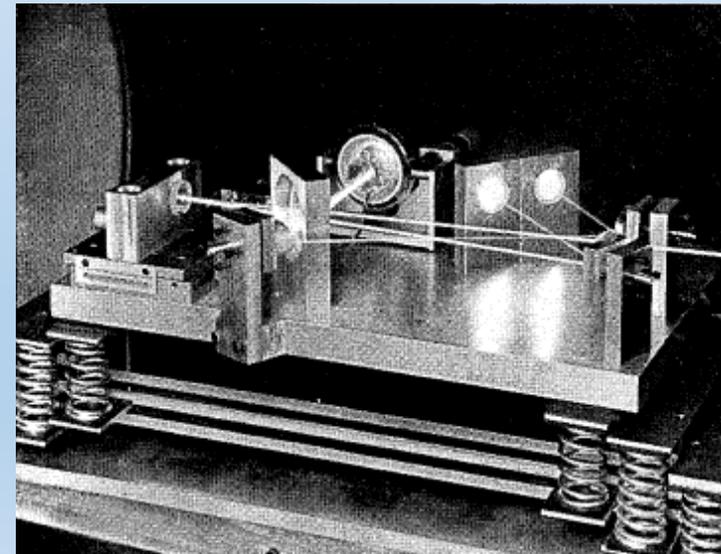
1972: Première analyse détaillée des bruits et de la sensibilité d'un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles
"Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna",
R. Weiss, Quarterly Reports of the Research Laboratory of Electronics MIT **105**, p. 54 (1973).

Un projet initié au Hughes Research Labs en 1966
« Generation and Detection of Dynamic Gravitational-Gradient fields »,
R.L. Forward, L.R. Miller - Journal of Applied Physics, 1967

« Photon-noise-limited laser transducer for gravitational antenna »,
Moss GE, Miller LR, Forward RL, Appl Opt. 1971 Nov 1;10(11):2495-8

"Wideband laser-interferometer gravitational-radiation experiment",
R.L. Forward, *Phys Rev D*, 17, 379 (1978)

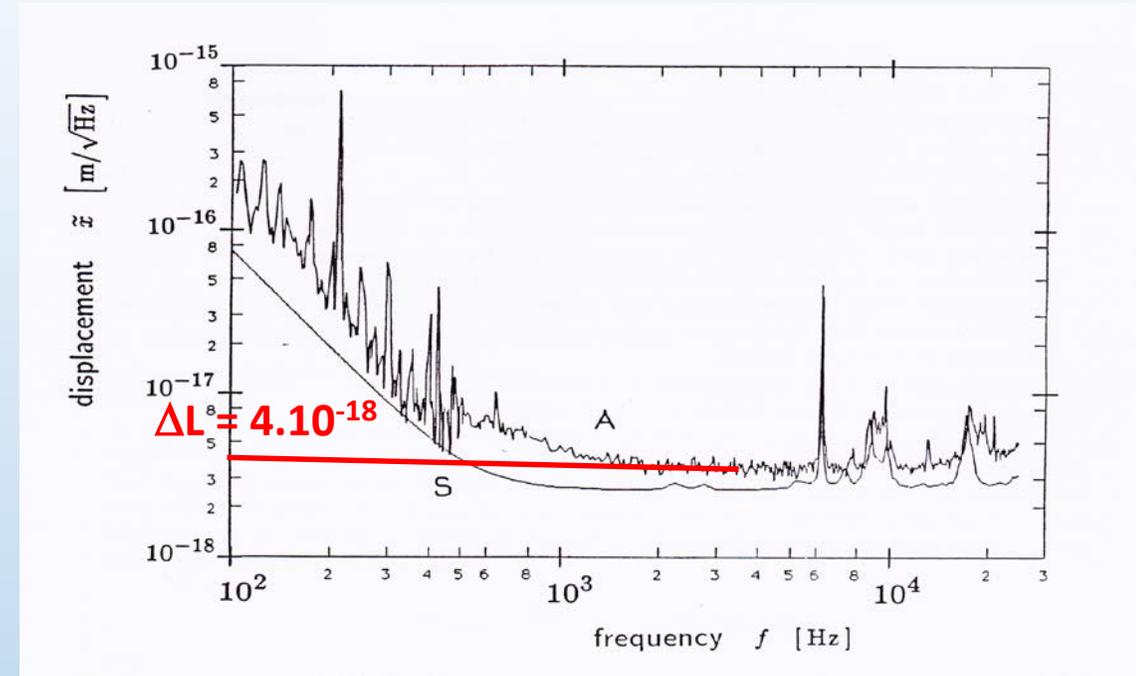
$$\Delta L = 3 \cdot 10^{-16} \text{ m/Hz}^{-1/2} \text{ entre 1 kHz et 3 kHz.}$$



Les premiers détecteurs interférométriques

Les années 1980:
Etudes, idées nouvelles
et plusieurs prototypes de détecteur interférométrique

- Glasgow (10 m)
- Garching (3m puis 30 m)
- MIT (1.5m)
- Caltech (40 m)



R. Drever



A. Rudiger



A. Brillet



A. Giazotto



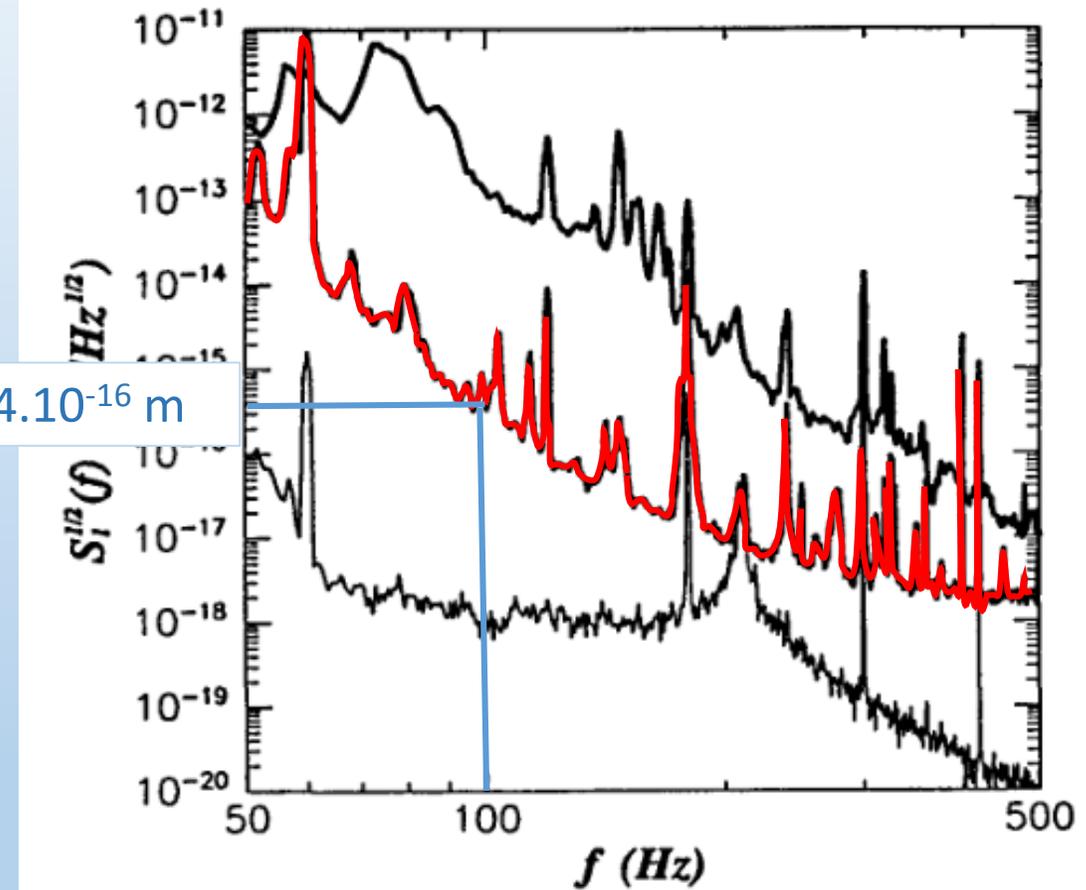
S. Whitcomb

Les premiers détecteurs interférométriques

Prototype de 40 m construit à Caltech



K. Thorne R. Drever R. Vogt



Les premiers interféromètres géants

Amplitude de l'onde gravitationnelle : $h = \Delta L / L$

Allonger les bras → Augmenter la sensibilité de l'interféromètre

30 mètres → 3 kilomètres

Premiers interféromètres géants

1979: Rai Weiss propose la construction de détecteurs kilométriques

1983: MIT et Caltech proposent la construction de détecteurs kilométriques

1985: A. Brillet rencontre A. Giazotto lors du Marcel Grossmann Meeting à Rome

1985: Plans for a large gravitational wave antenna in Germany (Garching group)

1989: Proposition du projet GEO en Europe (Garching+Glasgow)

1989: proposition de détecteurs kilométriques LIGO

1989: Rédaction détaillée pour le projet Virgo

1990: Approbation de LIGO par la NSF

1992: Approbation de Virgo par le CNRS et l'INFN

1994: Approbation du projet GEO600

Premiers interféromètres géants

Caltech

GRP-341

The LIGO/VIRGO Gravitational-Wave Detection System

Kip S. Thorne

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology Pasadena, CA 91125; and
Institute for Theoretical Physics, University of California Santa Barbara, CA 93106

Submitted to *Proceedings of Fourth Rencontres on Particle Astrophysics*,
Blois France, July 1992, ed. J. Tran Thanh Van (Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette, France)

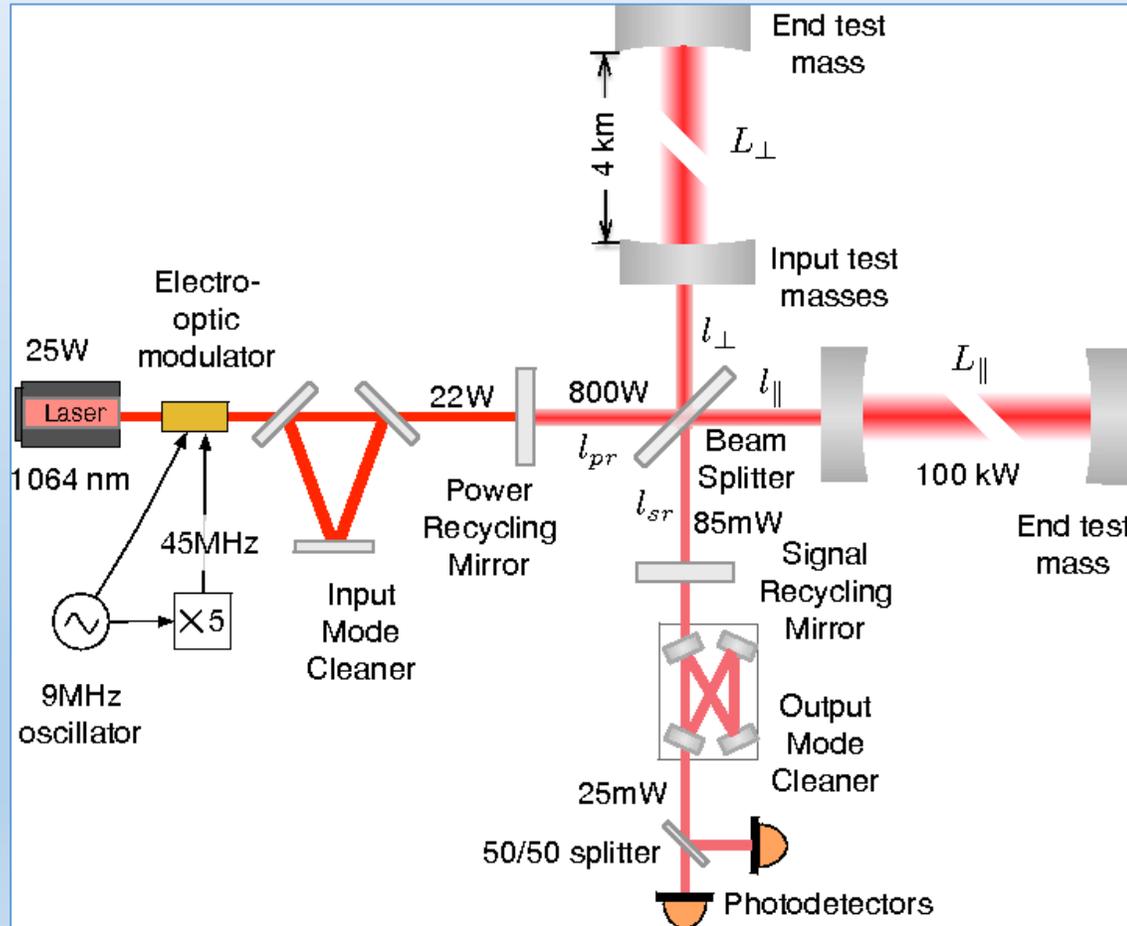
Research supported in part by National Science Foundation Grants PHY-9213508
and PHY-8904035.

Les interféromètres LIGO et Virgo

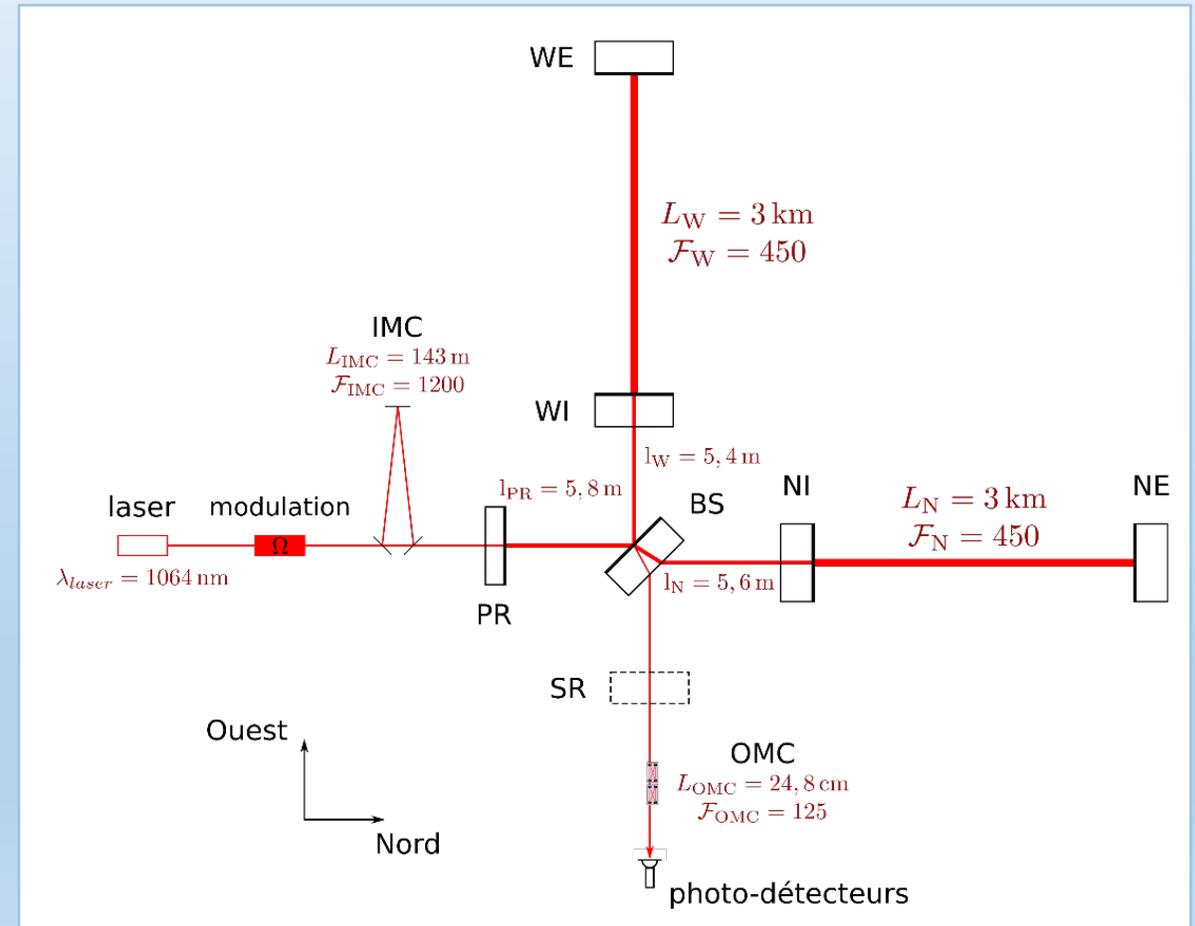
Détecteurs interférométriques LIGO et Virgo

- Laser ultra stable à 1064 nm (IR)
- Miroirs : défauts de surface de l'ordre du nanomètre
- Cavités Fabry-Pérot avec les miroirs d'entrées $\rightarrow L_{\text{eff}} = 860 \text{ km}$
- Recyclage de la puissance avec PR
- Super-atténuateurs et contrôles actifs < Hz
- Ensemble sous vide

LIGO



Virgo



Détecteurs interférométriques LIGO et Virgo



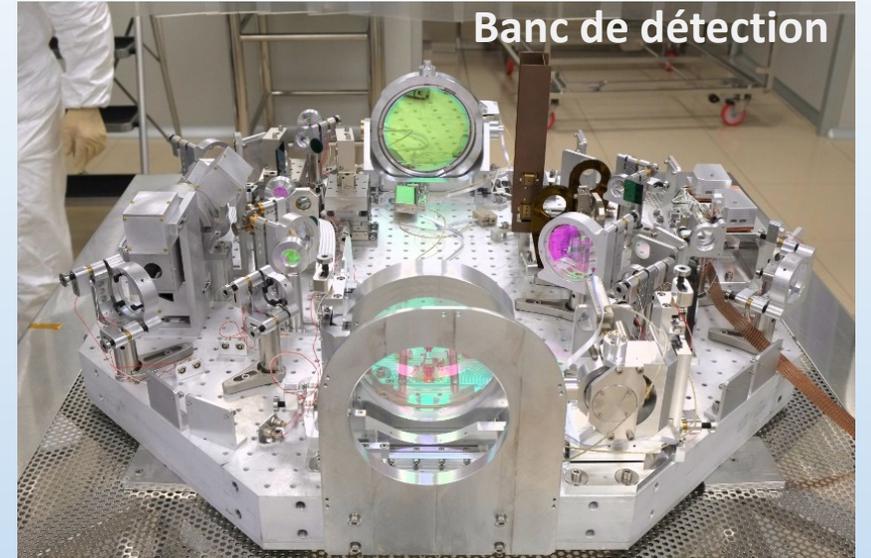
Le détecteur interférométrique Virgo



Miroir suspendu



Miroirs



Banc de détection



Enceintes à vide

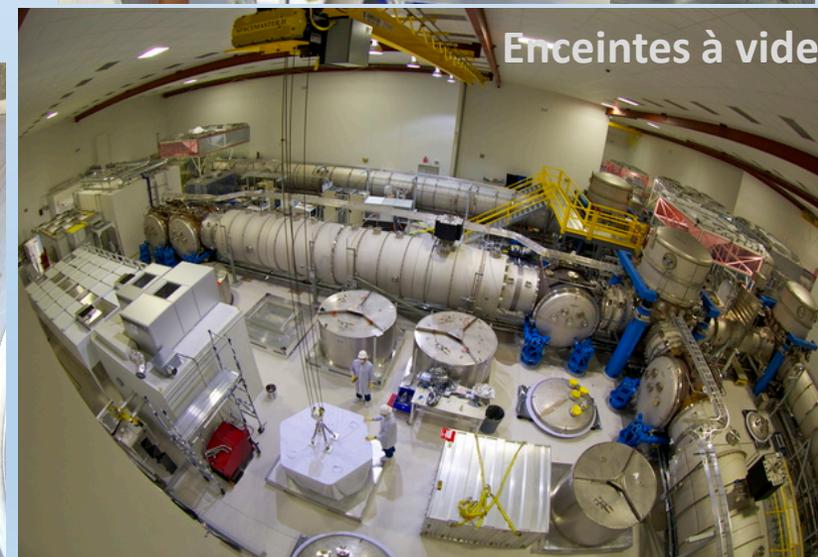
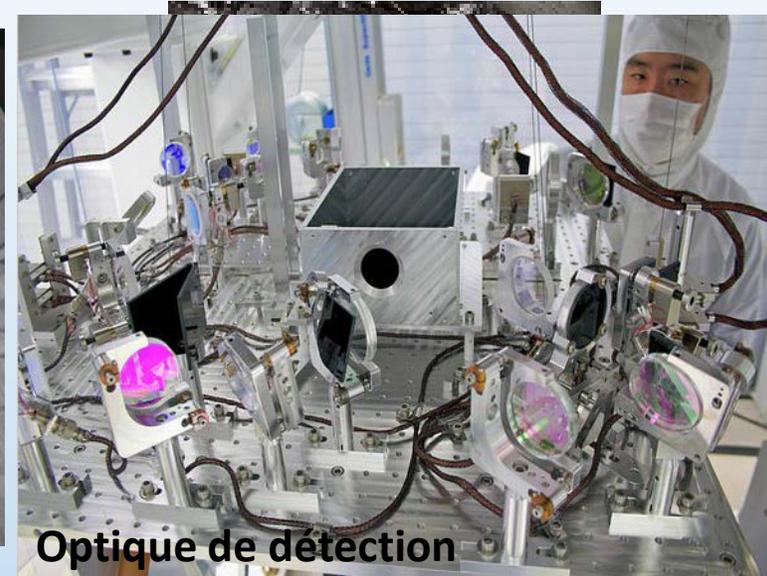
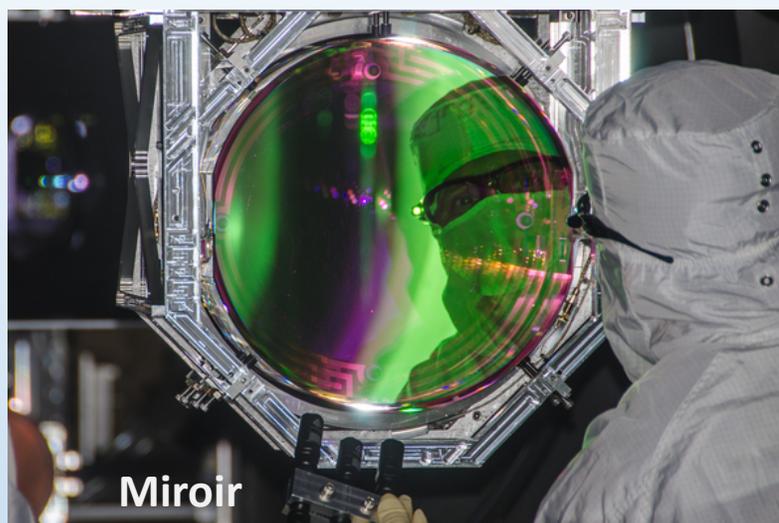


Salle de contrôle



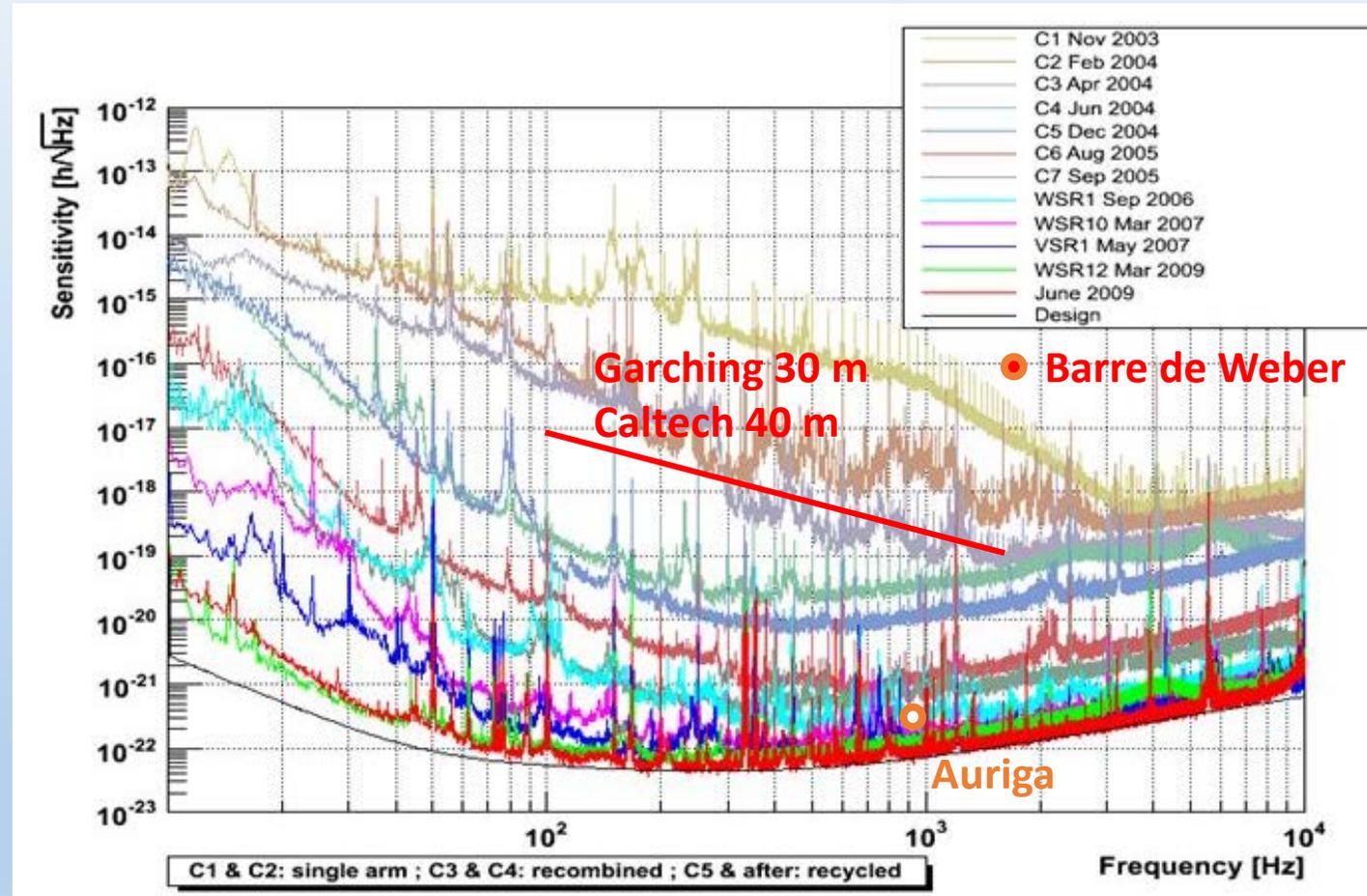
Tube à vide, bras ouest

Les détecteurs interférométriques LIGO



Les interféromètres kilométriques

Ce fut un long chemin d'innovations, de prototypes, de construction, de mise au point du détecteur, d'améliorations de la sensibilité et d'étude des bruits...

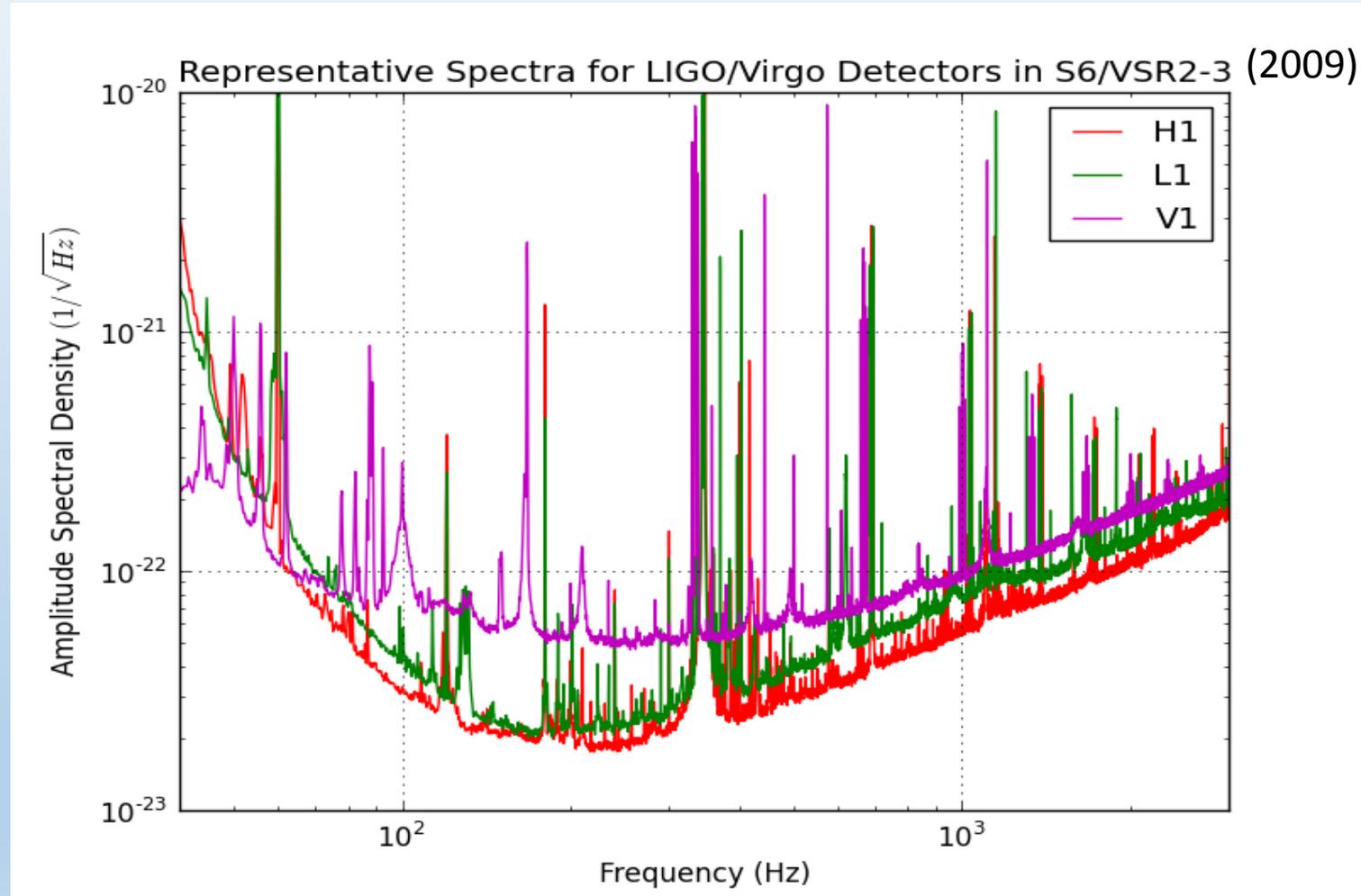


Les interféromètres kilométriques

2007: LIGO et Virgo sont prêts à réaliser leur première prise de données scientifiques commune

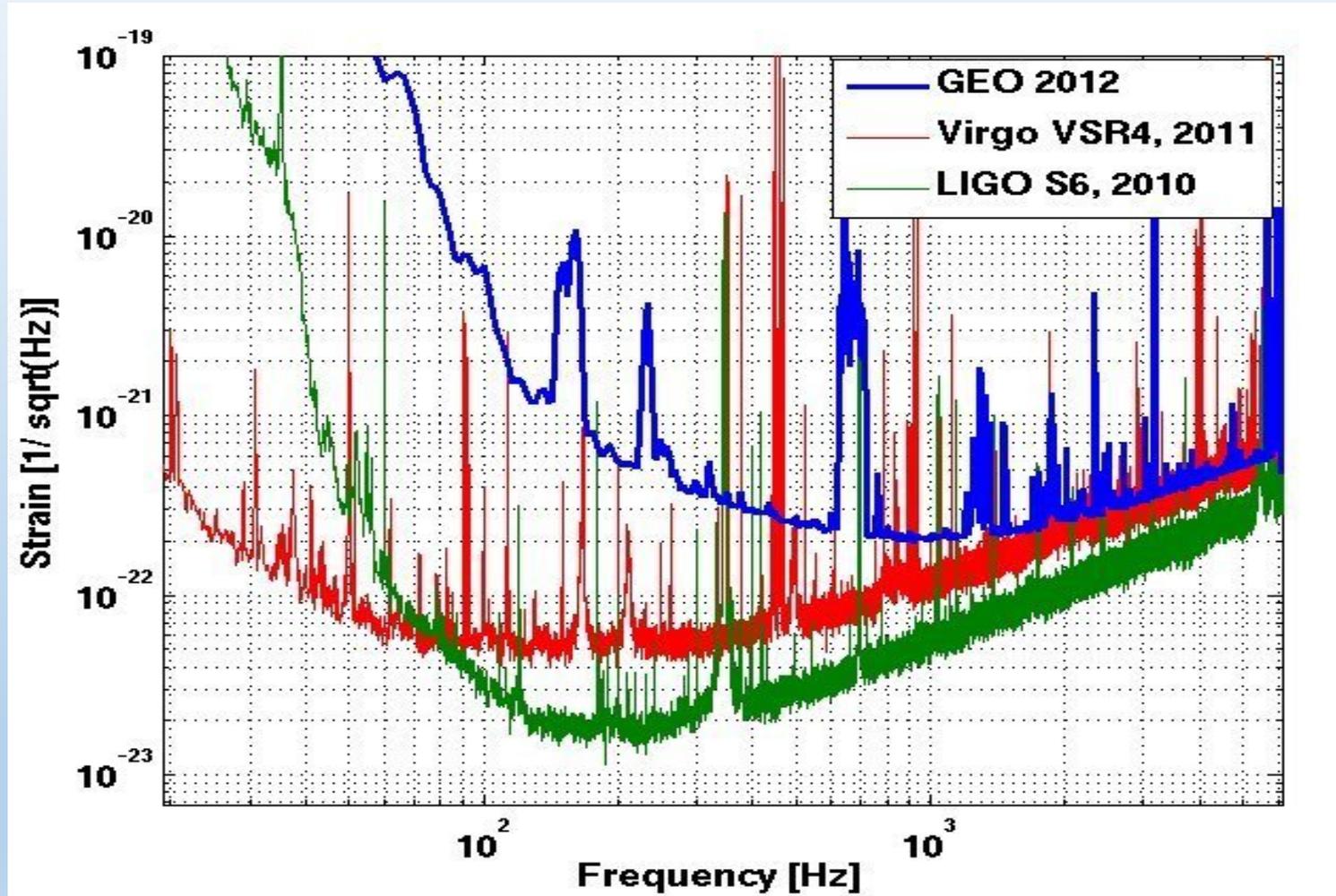


Les interféromètres kilométriques



Petit rappel:
Si $h \sim 10^{-22}$ et $L = 3 \text{ km}$
 $\Rightarrow \Delta L \sim 3 \cdot 10^{-19} \text{ m}$

Les interféromètres kilométriques

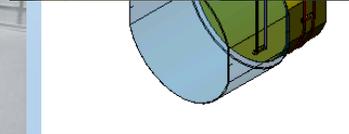
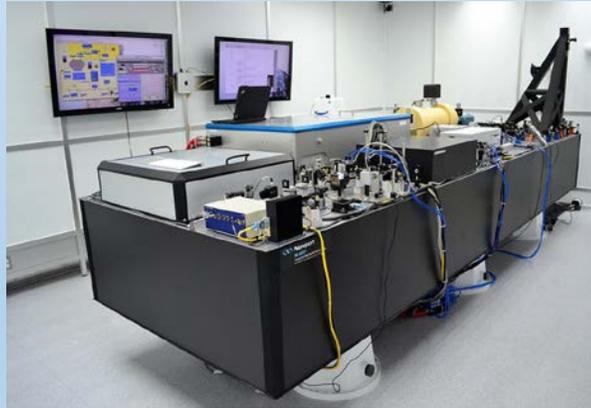
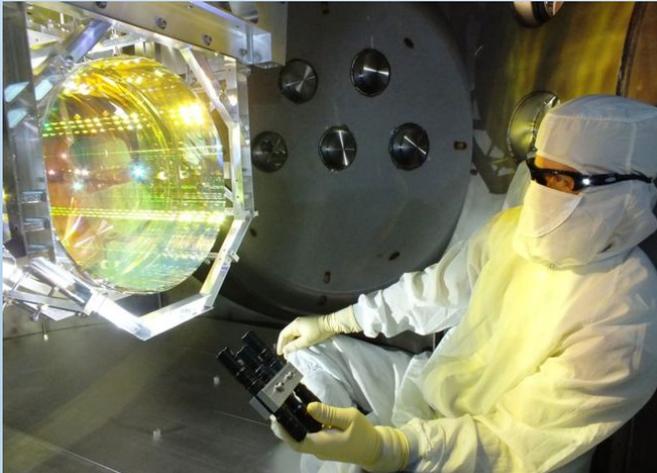
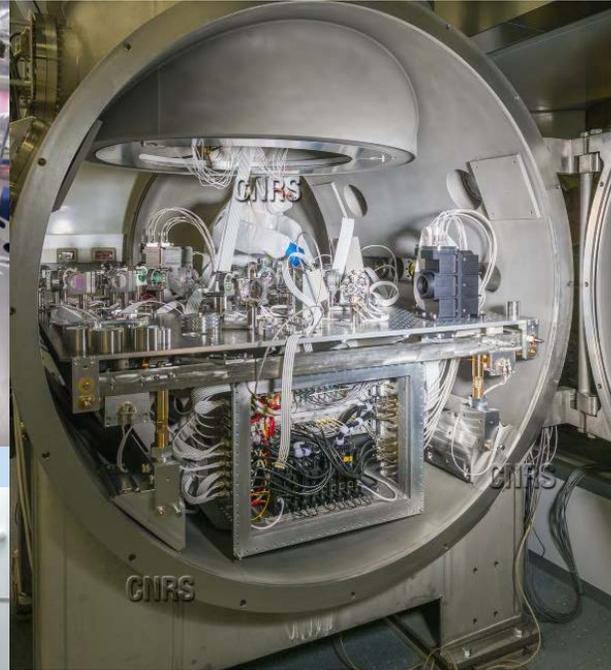


Petit rappel:
Si $h \sim 10^{-22}$ et $L = 3$ km
 $\Rightarrow \Delta L \sim 3 \cdot 10^{-19}$ m

Les détecteurs avancés

Octobre 2011: Les prises de données s'arrêtent.

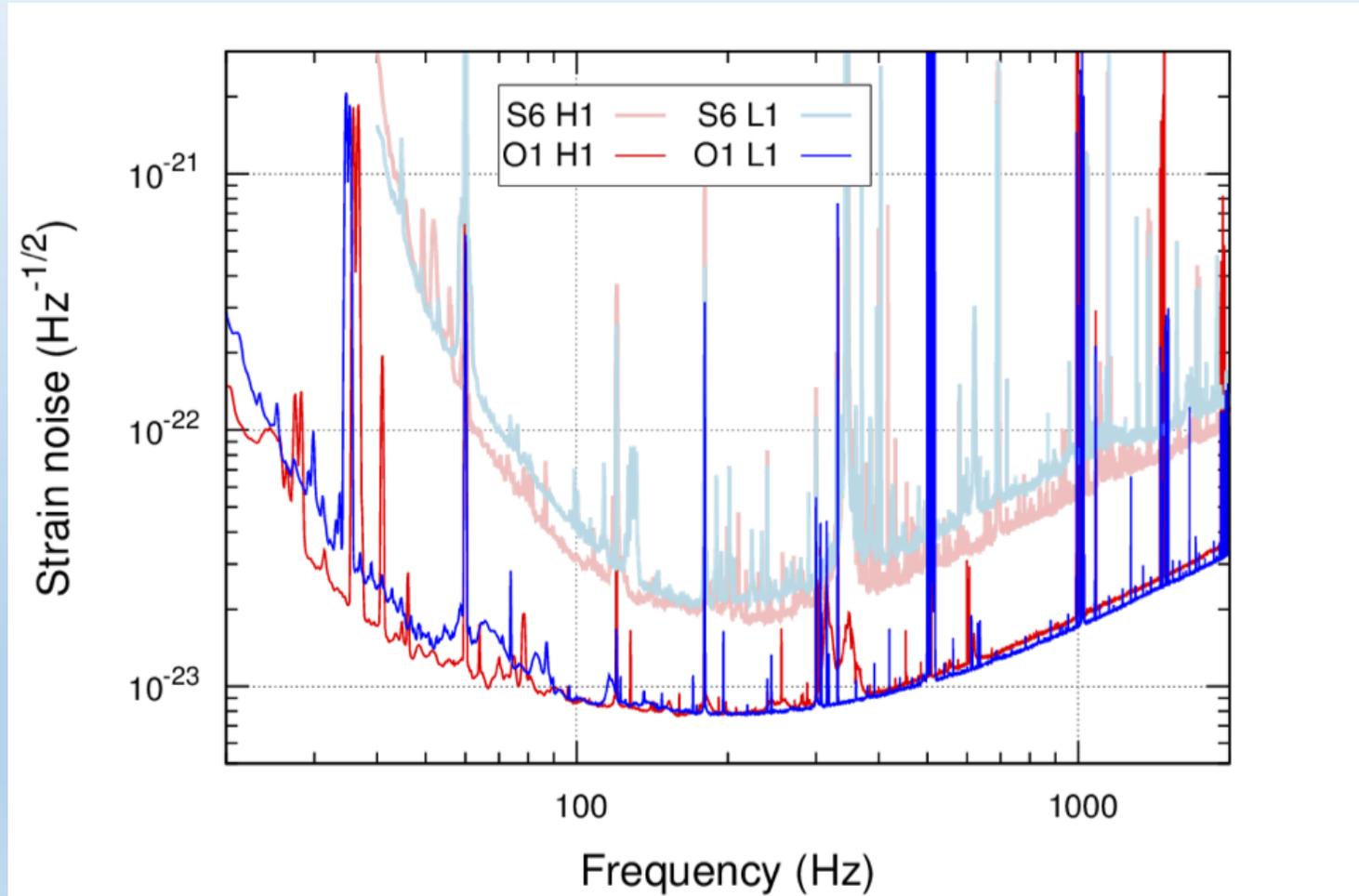
Les détecteurs sont modifiés pour améliorer la sensibilité → Advanced LIGO et Advanced Virgo



Les détecteurs avancés

Septembre 2015 – janvier 2016:

Les détecteurs Advanced LIGO réalisent leur première prise de données scientifique



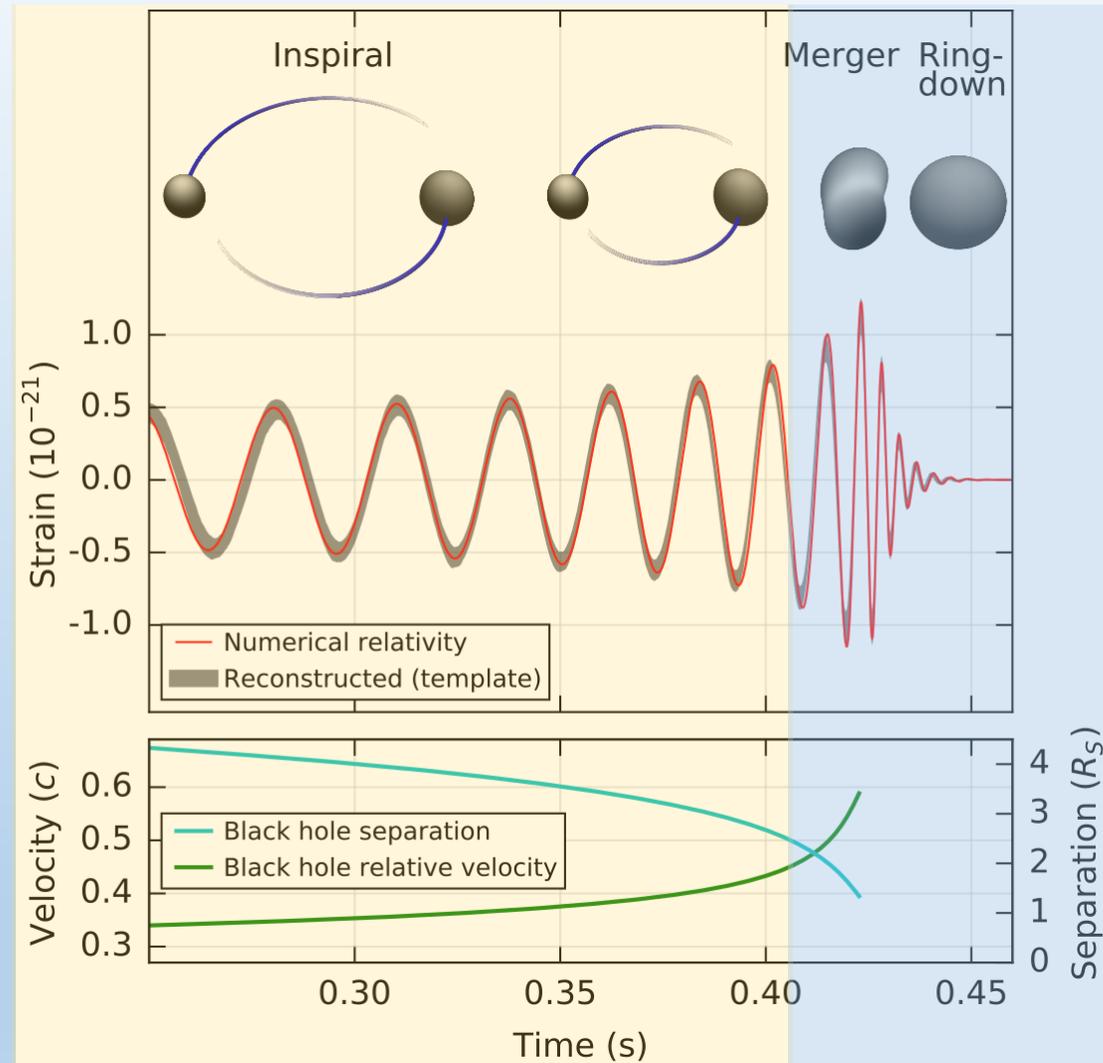
Recherche de signaux CBC

Extraire le signal du bruit → évènements

Réduction des bruits → éliminer les faux évènements

Détection = évènements restants → alerte

Un signal de CBC (Compact Binary Coalescence)



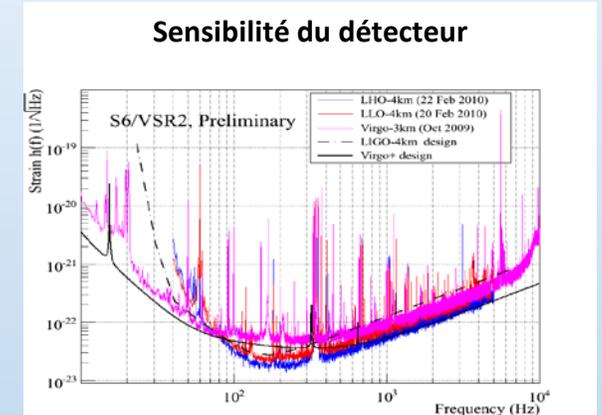
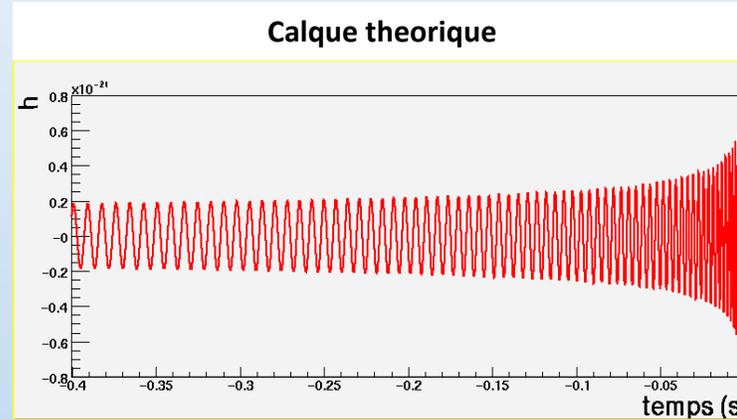
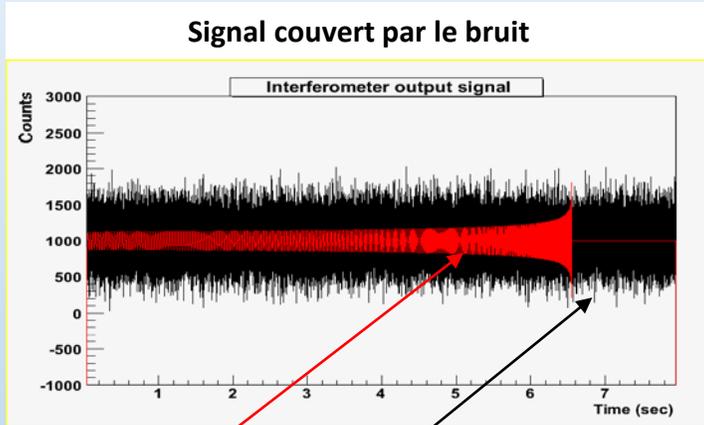
From PN calculations to Numerical Relativity

Extraction du signal de CBC

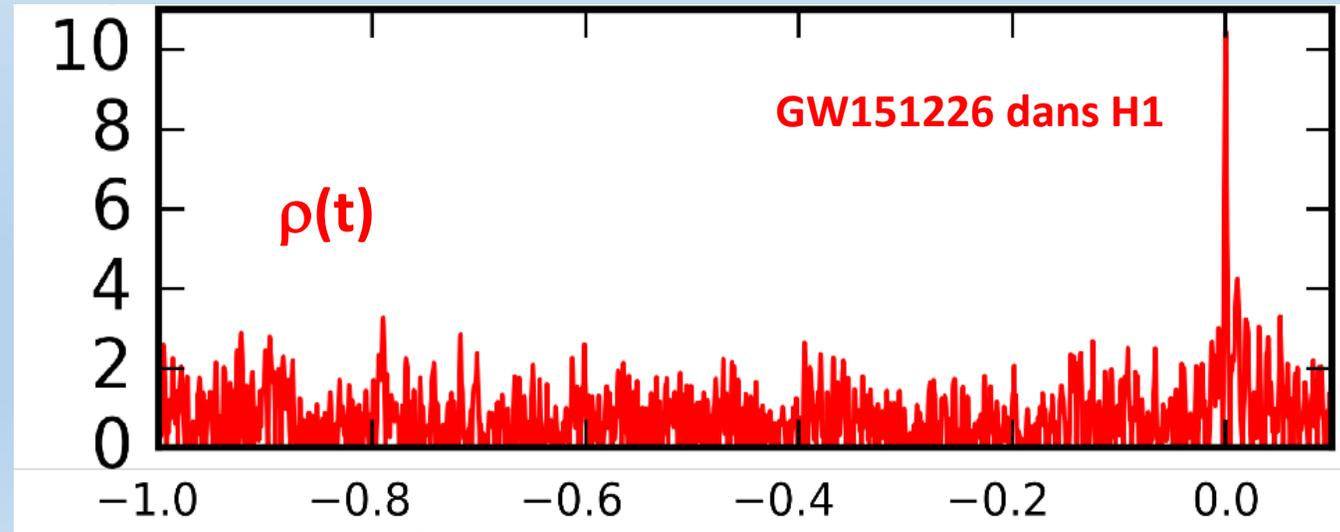
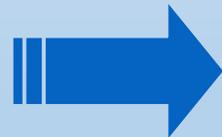
Filtrage adapté: comparaison du signal analysé à un ensemble de « calques »
« calque » = forme théorique du signal attendu



4 paramètres intrinsèques à la source:
2 masses et 2 spins → 250.000 calques



Signal
Bruit



Les bruits qui limitent le détecteur Advanced Virgo

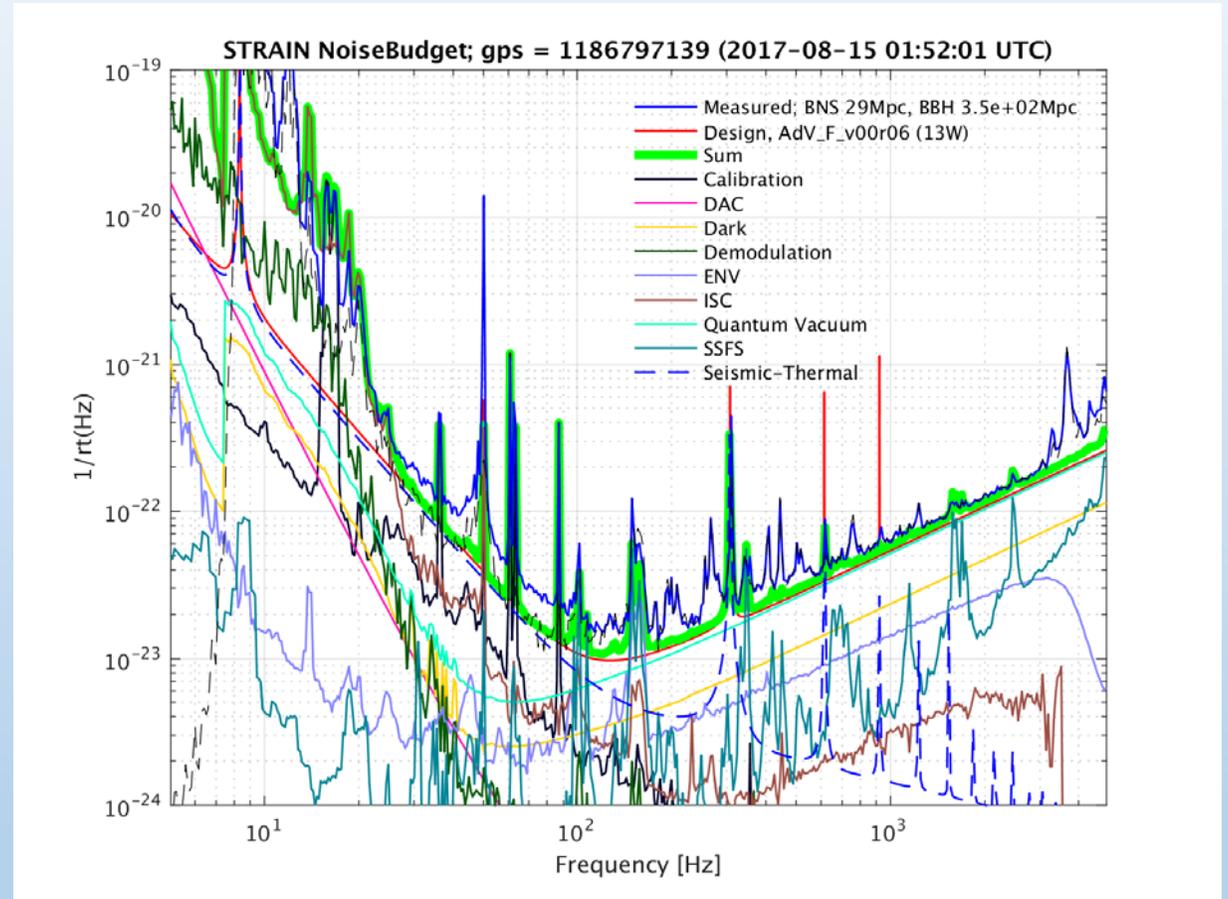
Des bruits fondamentaux limitent la détection donc imposent la sensibilité minimale du détecteur:

Bruit sismique

Bruit thermique des miroirs

Bruit de photons

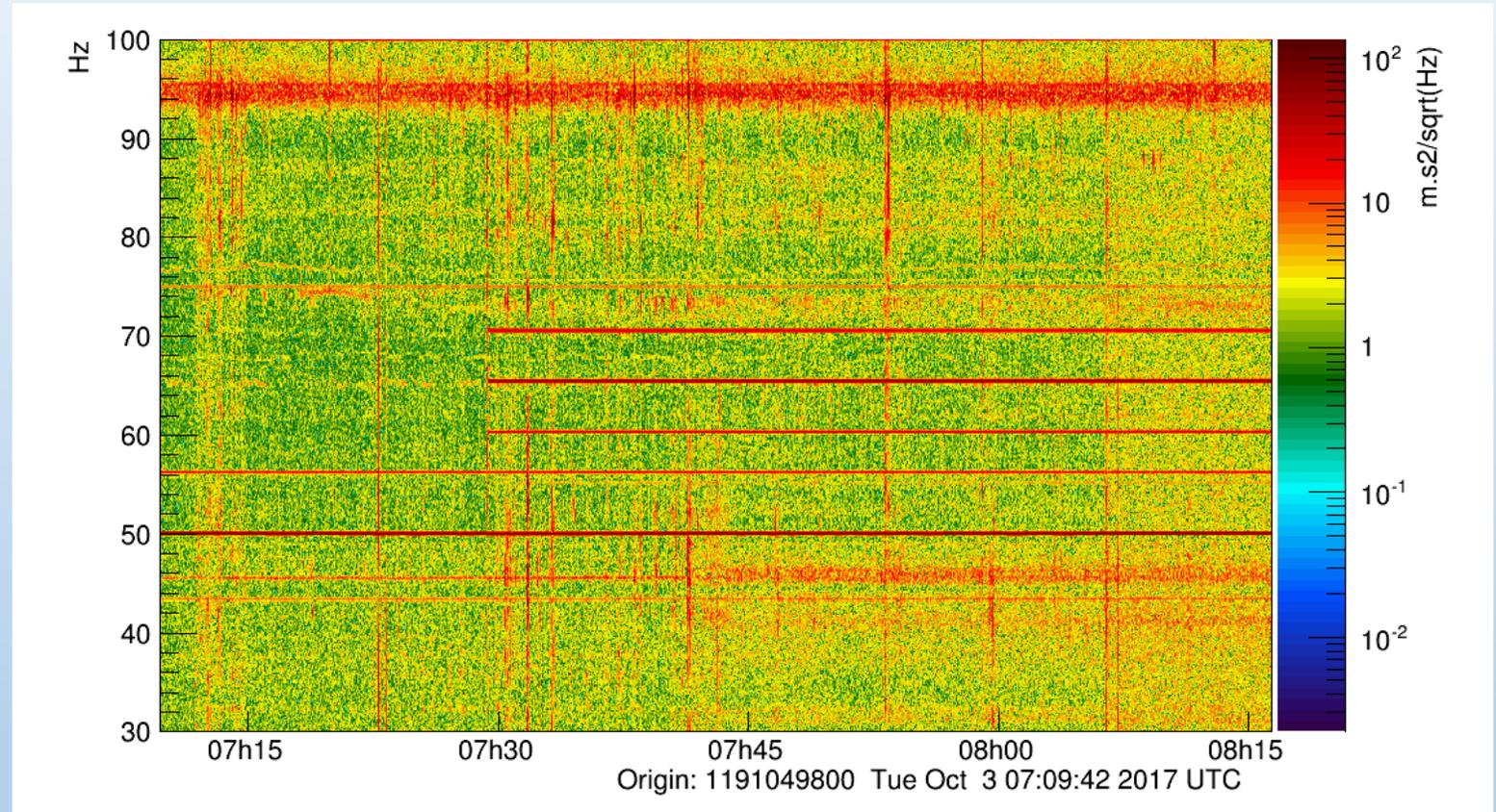
Etc...



Les bruits transitoires dans le détecteur Advanced Virgo

Bruits transitoires : variation brève de la puissance en sortie de l'interféromètre

Des lignes spectrales et des bruits transitoires s'ajoutent à ces bruits et viennent également limiter la capacité de détection

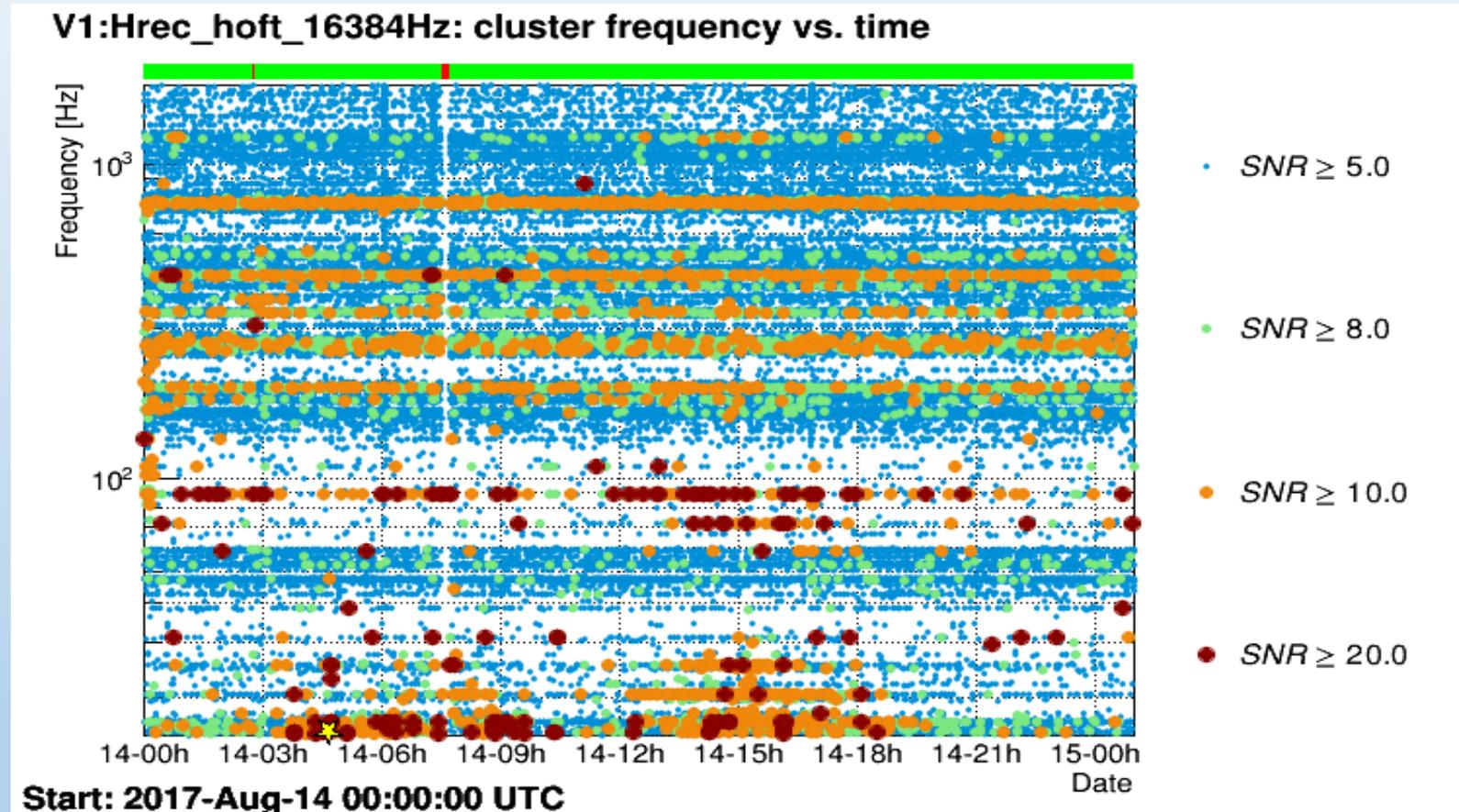


Les bruits transitoires dans le détecteur Advanced Virgo

Bruits transitoires : variation brève de la puissance en sortie de l'interféromètre

Des lignes spectrales et des bruits transitoires s'ajoutent à ces bruits et viennent également limiter la capacité de détection

De nombreux bruits transitoires (environ un par seconde avec un $SNR > 5$) polluent les données

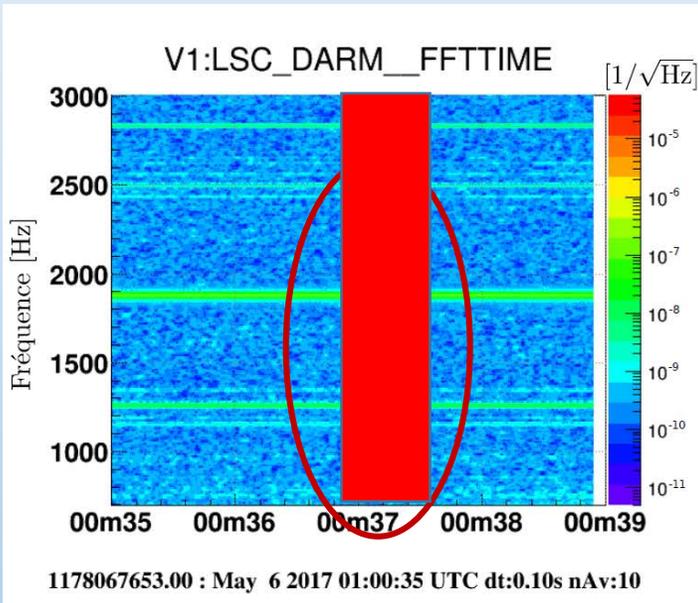


Omicron triggers (Omicron = recherche excès d'énergie dans le plan temps-fréquence après Q-transform)

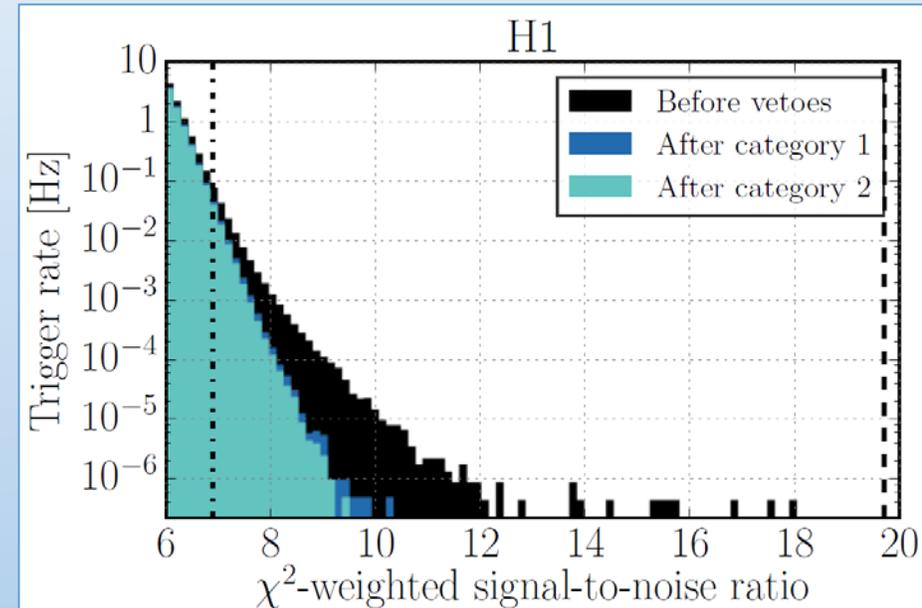
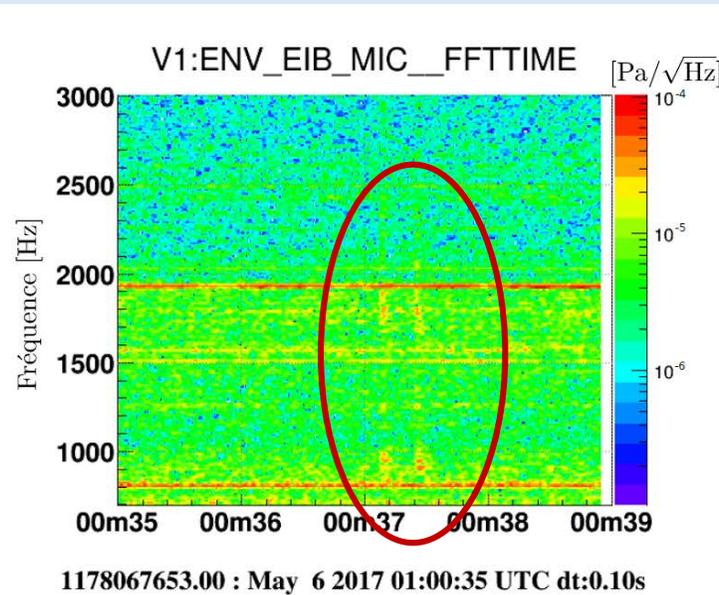
Réduction des bruits

Bruits transitoires d'origine connue \rightarrow application de vetos

Sortie de l'interféromètre



Surveillance acoustique

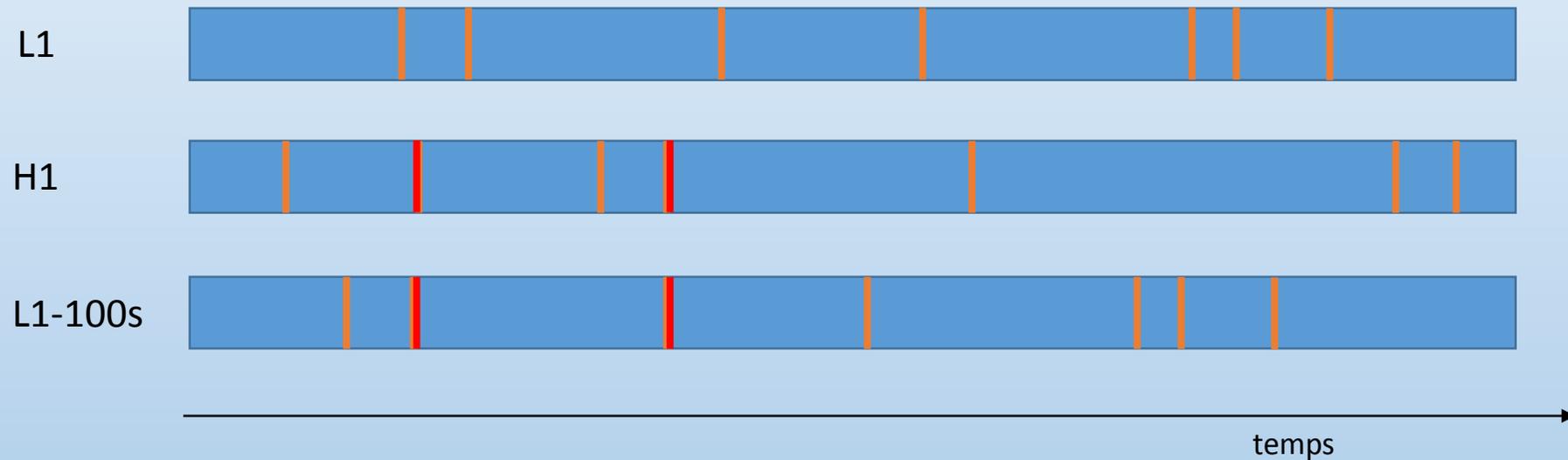


Données non analysées
Ou évènements rejetés en sortie d'analyse

Réduction des bruits

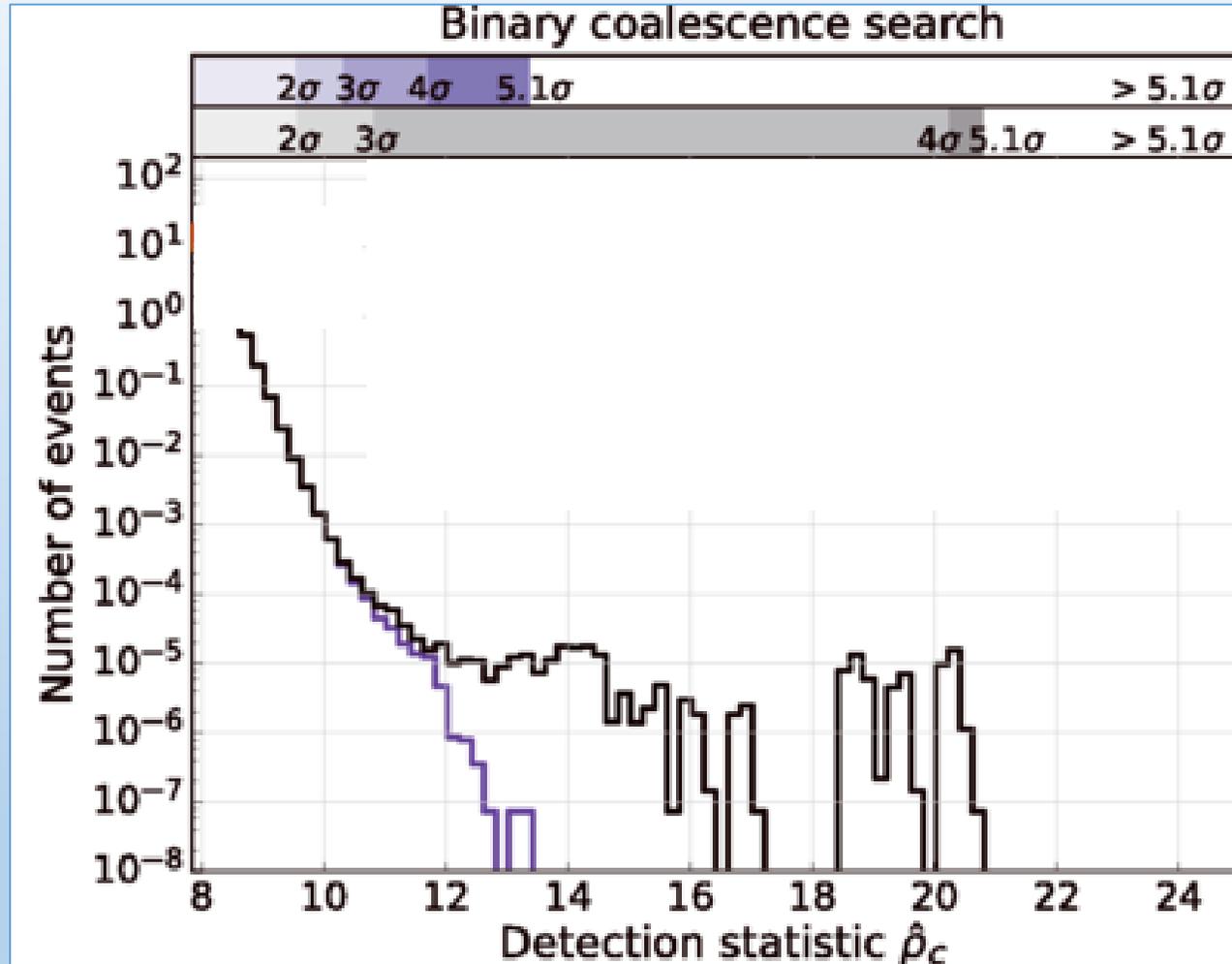
Bruits transitoires d'origine inconnue → coïncidence entre détecteurs

Estimation du bruit de fond en réalisant des décalages temporels de $N \times 0.1s$ entre détecteurs



**2 évènements de
bruit de fond**

Exemple de résultat de l'analyse



GW150914:
FAR < 1 / 200000 ans

FAR = False Alarm Rate = probabilité qu'un bruit transitoire soit présent dans les N détecteurs avec un SNR au moins aussi élevé que celui de l'évènement.

$$\hat{\rho} = \rho / \{ [1 + (\chi_r^2)^3] / 2 \}^{1/6}$$

$$\hat{\rho}_c = \sqrt{\hat{\rho}_{H1}^2 + \hat{\rho}_{L1}^2}$$

Bruit de fond estimé à partir de 16 jours d'observation en coïncidence (entre le 12 septembre et le 20 octobre 2015)

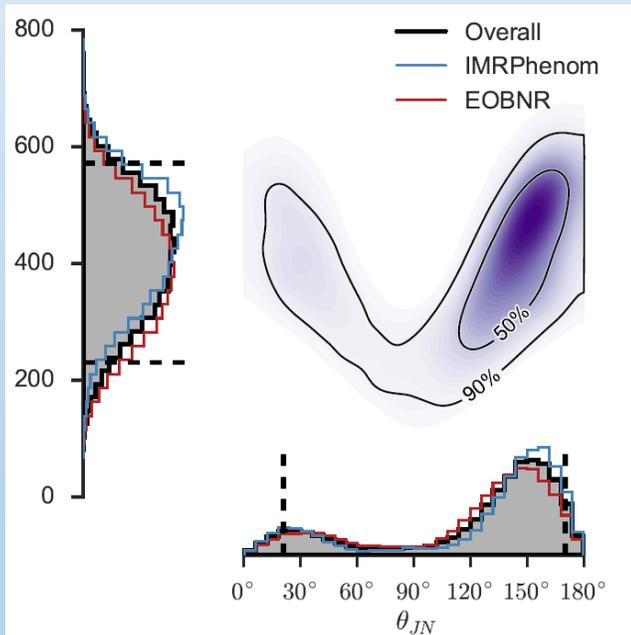
Remonter à la source

A partir de la forme théorique du signal
et en utilisant une analyse statistique
sur les paramètres utilisés par cette forme théorique

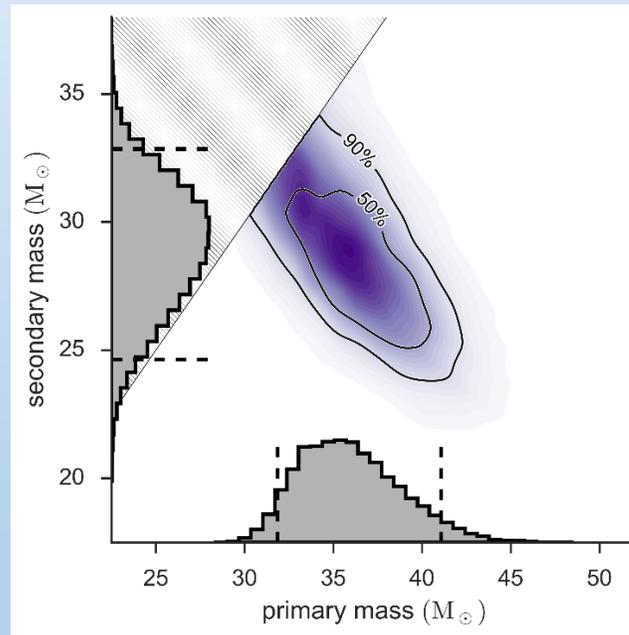


Estimation de plusieurs paramètres de la source.

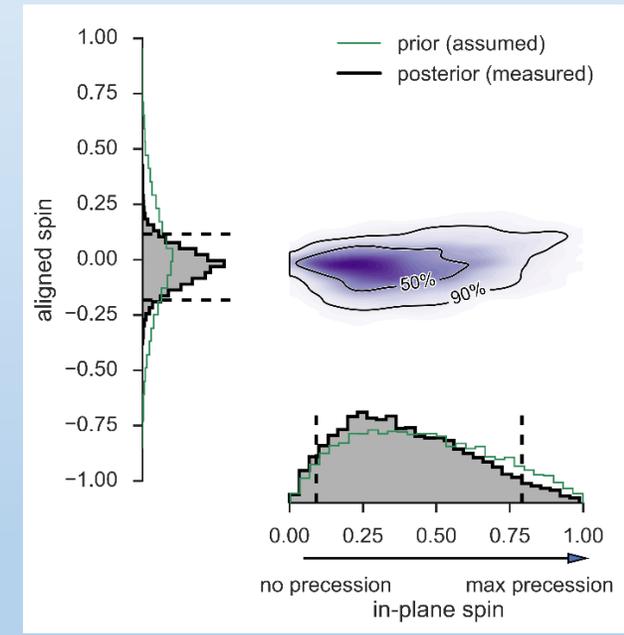
Distance / Orientation



Masses



Spins

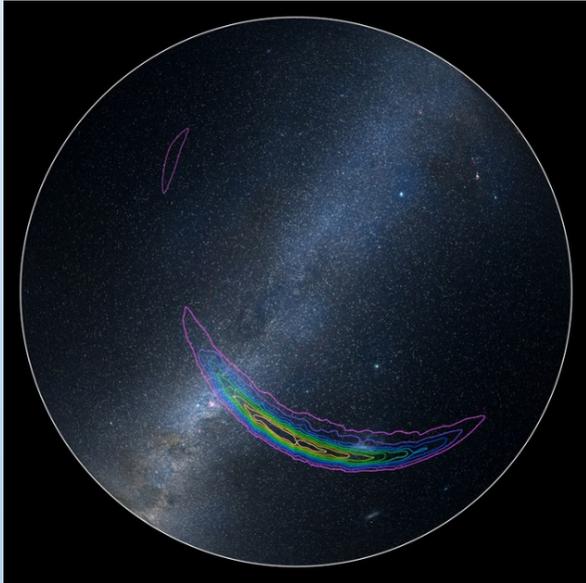


Origines des incertitudes: calibration, nombre de cycles, rapport signal sur bruit...

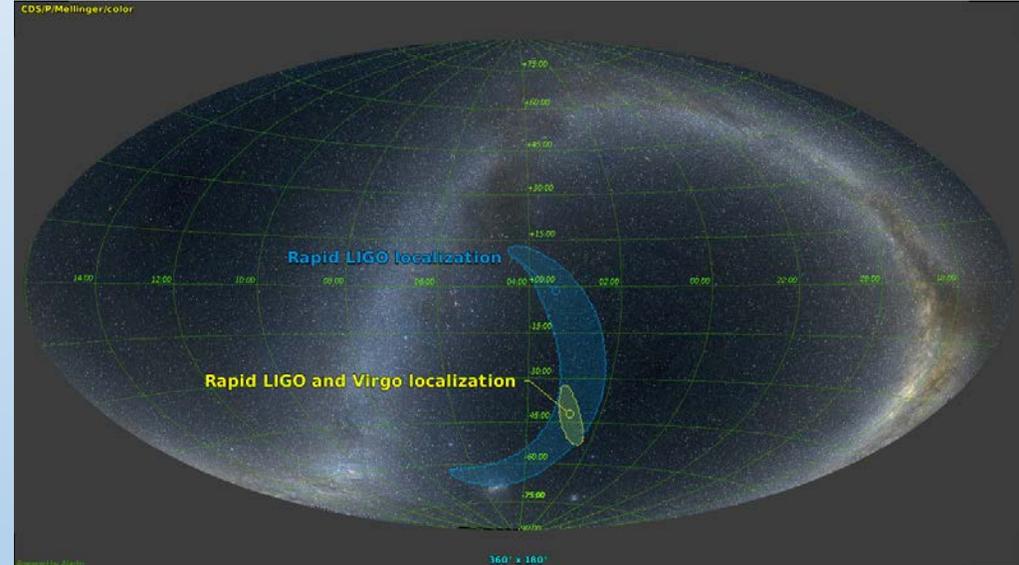
Déclenchement d'une alerte

- Evènements en coïncidence avec FAR < 1/mois = évènements intéressants → alertes
- Estimation des paramètres de la source (masses, spins, distance)
- Localisation de la source (besoin de trois détecteurs)
- Envoi d'une alerte aux télescopes et satellites
- Contreparties détectées (neutrinos, gamma, X, optique, radio)

Voir la présentation
d'Eric Chassande-Mottin



GW150914: source localisée
dans un volume de 10^{-2} Gpc³
 $\sim 10^5$ galaxies

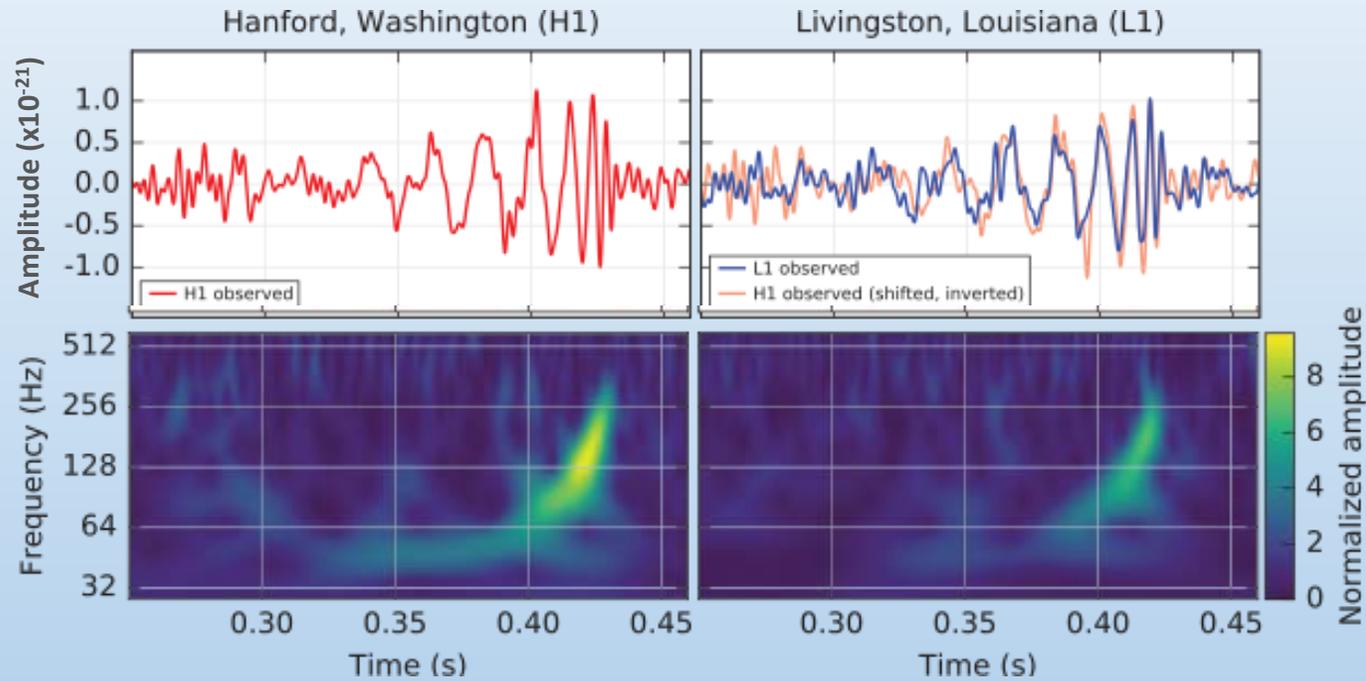


GW170814: source localisée
dans un volume de 10^{-3} Gpc³
 $\sim 10^4$ galaxies

Premiers résultats

La première détection

14 septembre 2015 : Un signal est détecté !



Un signal fort (SNR~24)
visible dans les deux détecteurs LIGO
avec un décalage temporel de 7 ms

Une évolution en temps et en fréquence
caractéristique d'un signal d'onde gravitationnelle
issu d'une coalescence de deux trous noirs.

- Amplitude de 10^{-22} à 10^{-21}
- Fréquence de 30 Hz à 250 Hz
- Sur une durée de 0.2 seconde

La première détection



La source détectée

Deux trous noirs ont fusionné après avoir spiralé l'un autour de l'autre

$$D_L = 410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$$

$$M_1 = 36^{+5}_{-4} M_\odot$$

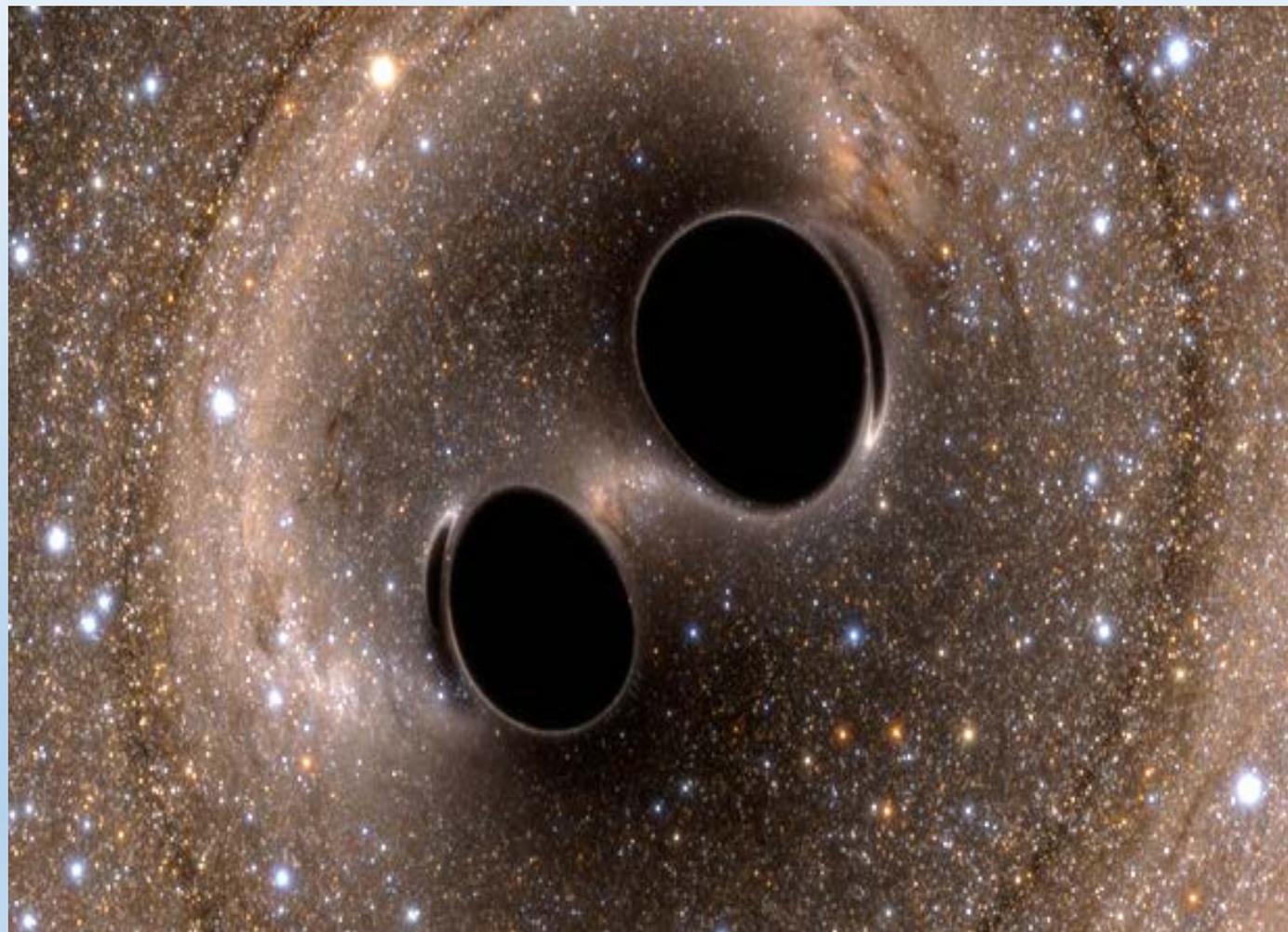
$$M_2 = 29^{+4}_{-4} M_\odot$$

$$M_{\text{finale}} = 62^{+4}_{-4} M_\odot$$

$$\text{Energie emportée} = 3.0^{+0.5}_{-0.5} M_\odot c^2$$

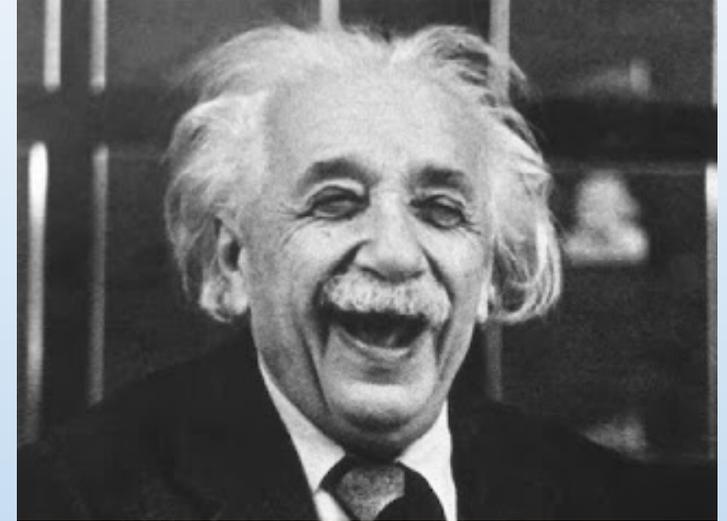
Distance entre les trous noirs: $\sim 500 \text{ km}$

Vitesse orbitale: $\sim 100000 \text{ km/s}$



La première détection

Le 11 février 2016: publication par LIGO et Virgo d'un article scientifique décrivant la première détection directe d'ondes gravitationnelles



PRL 116, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

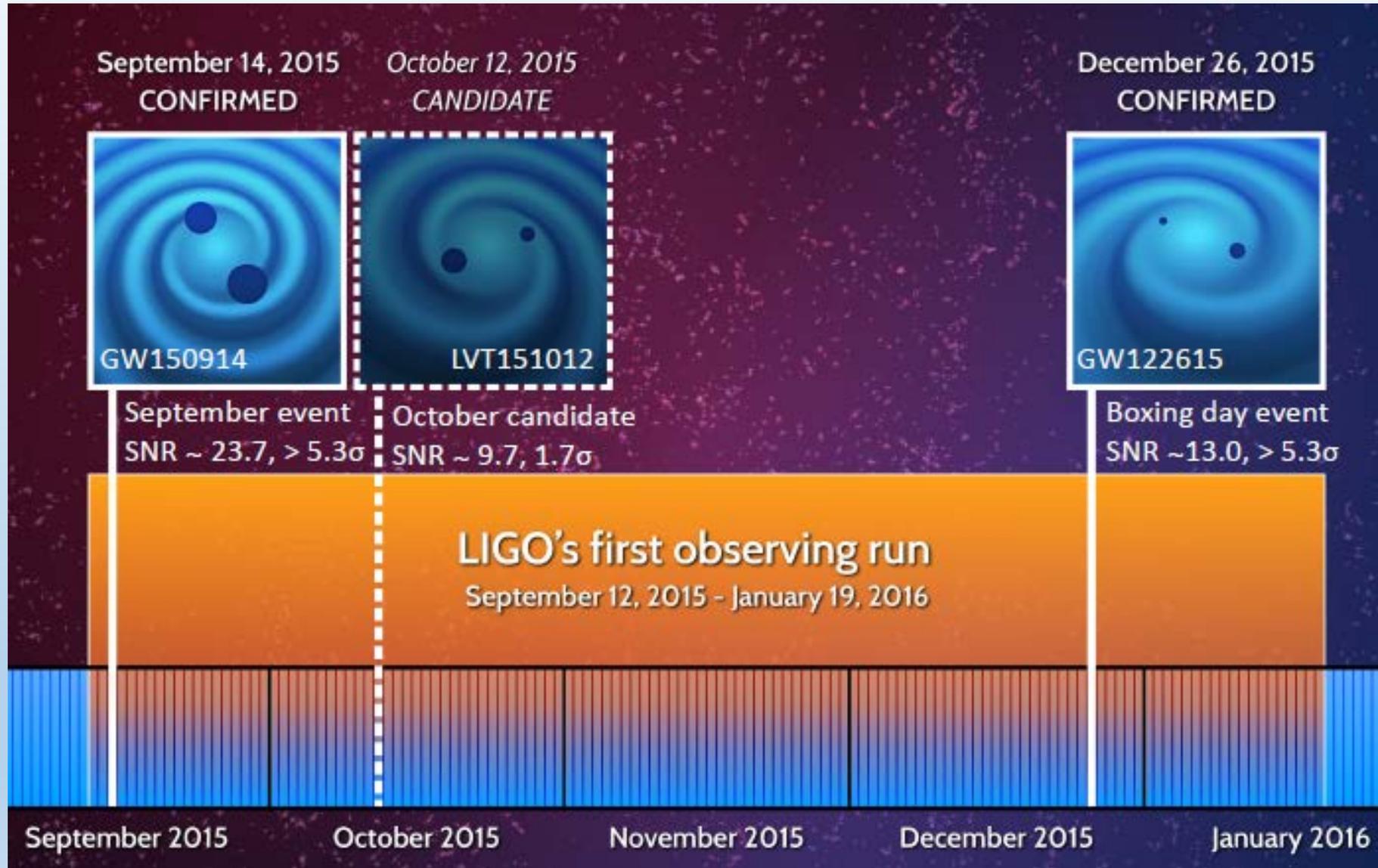
I. INTRODUCTION

In 1916, the year after the final formulation of the field equations of general relativity, Albert Einstein predicted the existence of gravitational waves. He found that

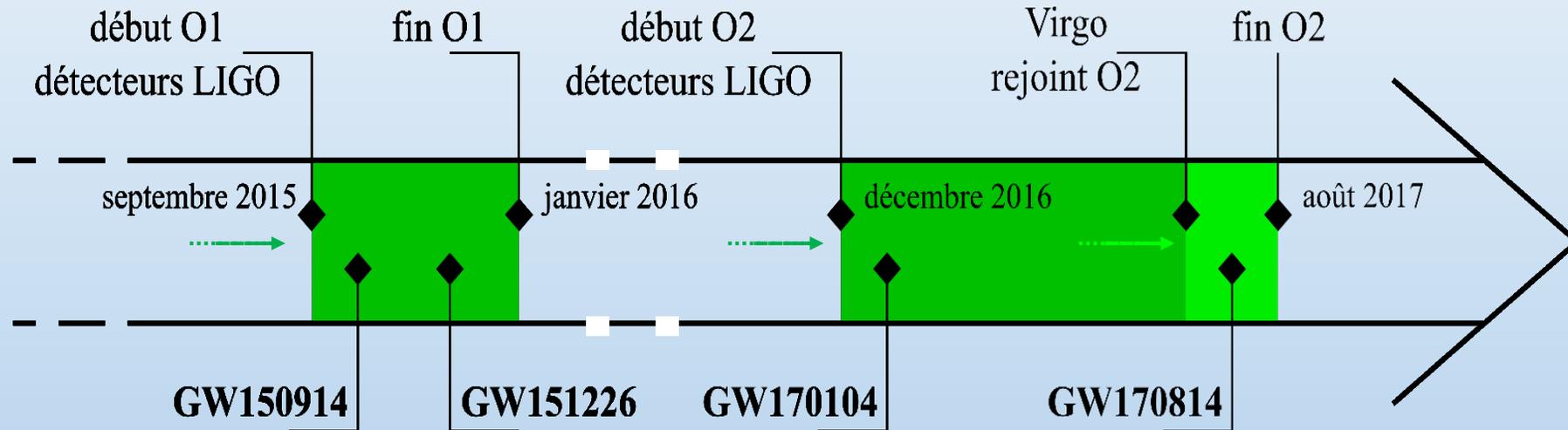
The discovery of the binary pulsar system PSR B1913+16 by Hulse and Taylor [20] and subsequent observations of its energy loss by Taylor and Weisberg [21] demonstrated the existence of gravitational waves. This discovery,



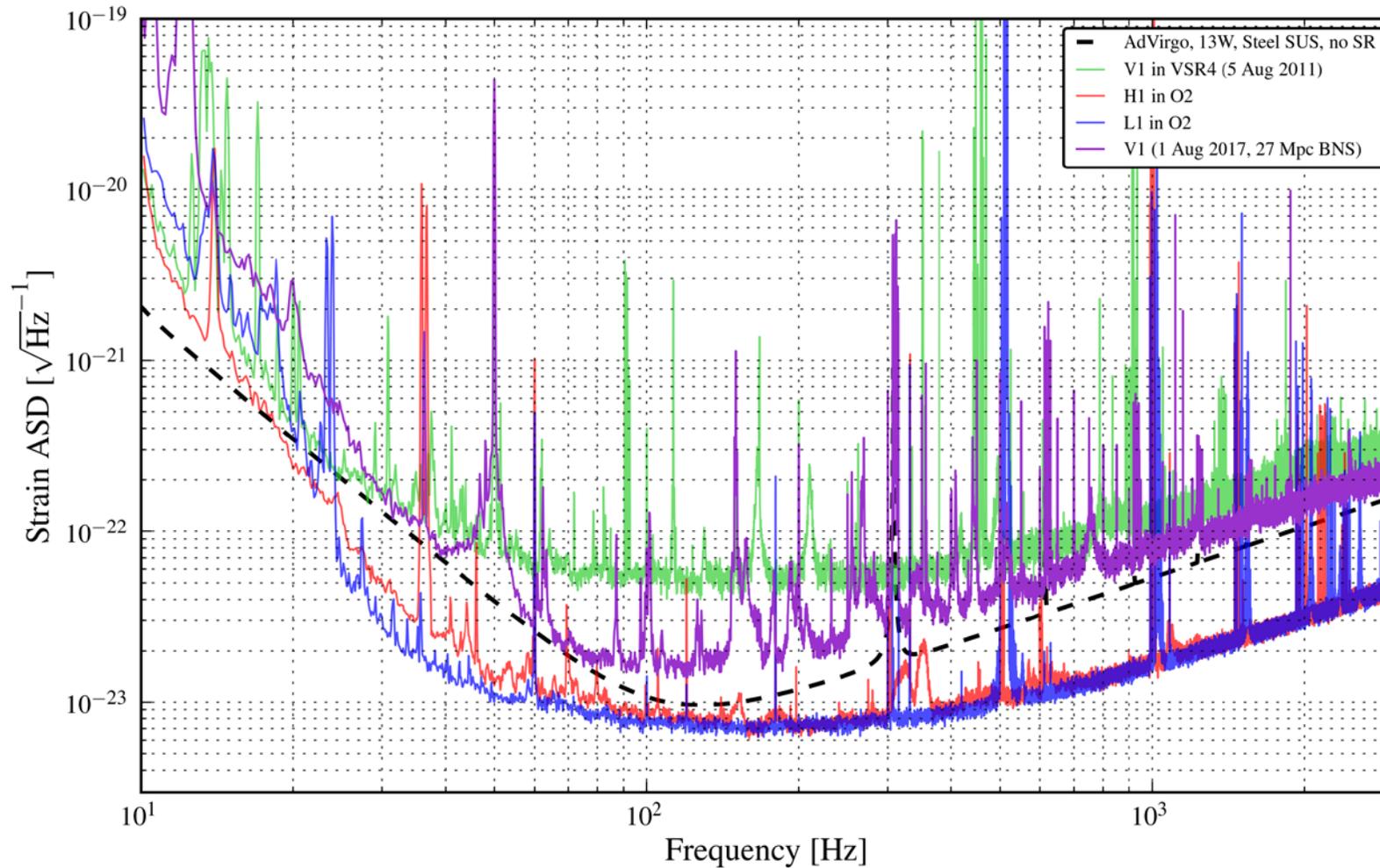
Les premières détections



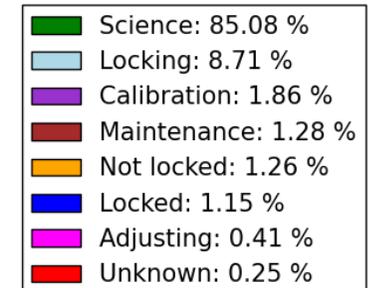
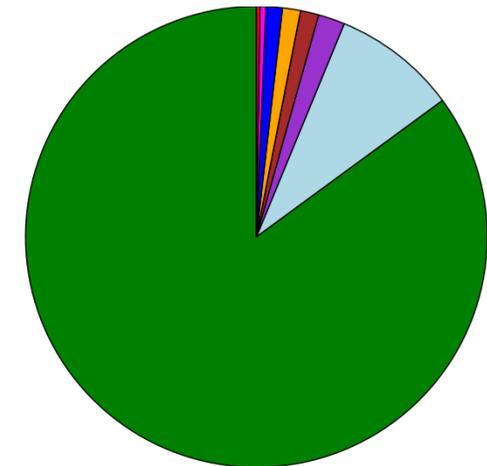
Les détections en 2017



1^{er} Aout 2017 : Virgo entre dans la danse

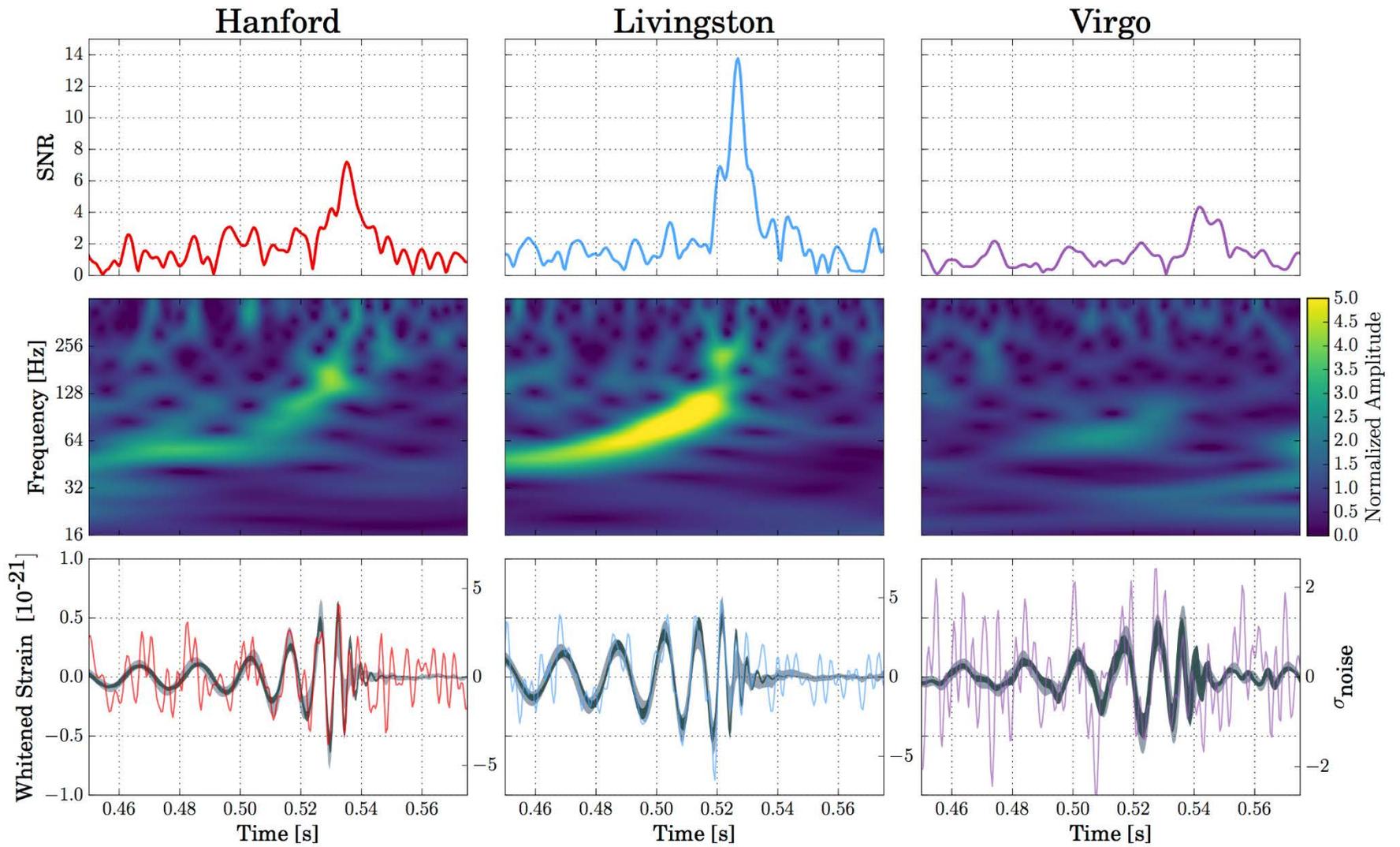


Virgo in run O2
01/08/2017 – 25/08/2017



La détection LIGO-Virgo : GW170814

14 Août 2017 10:30:43 UTC

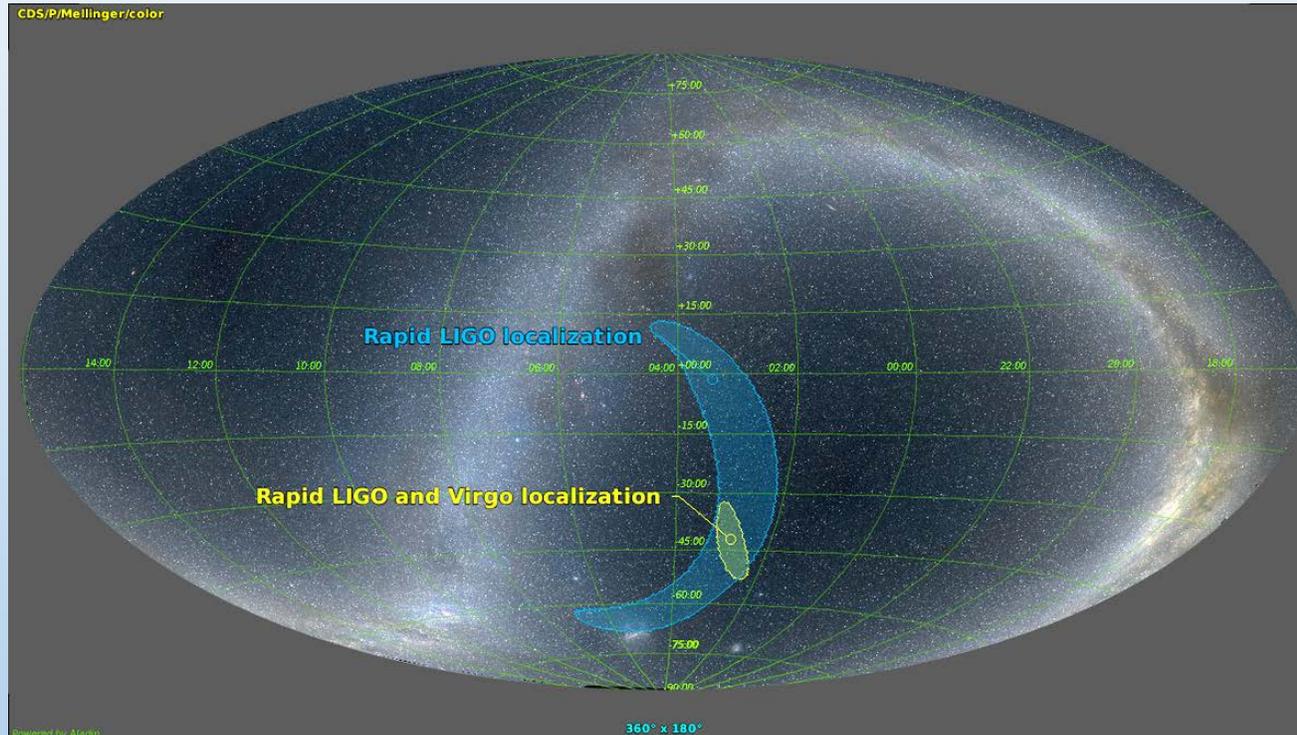


SNR = 18

FAR < 1 / 27000 ans

Deux trous noirs de
30 et 25 masses
solaires fusionnent à
540 Mpc de la Terre

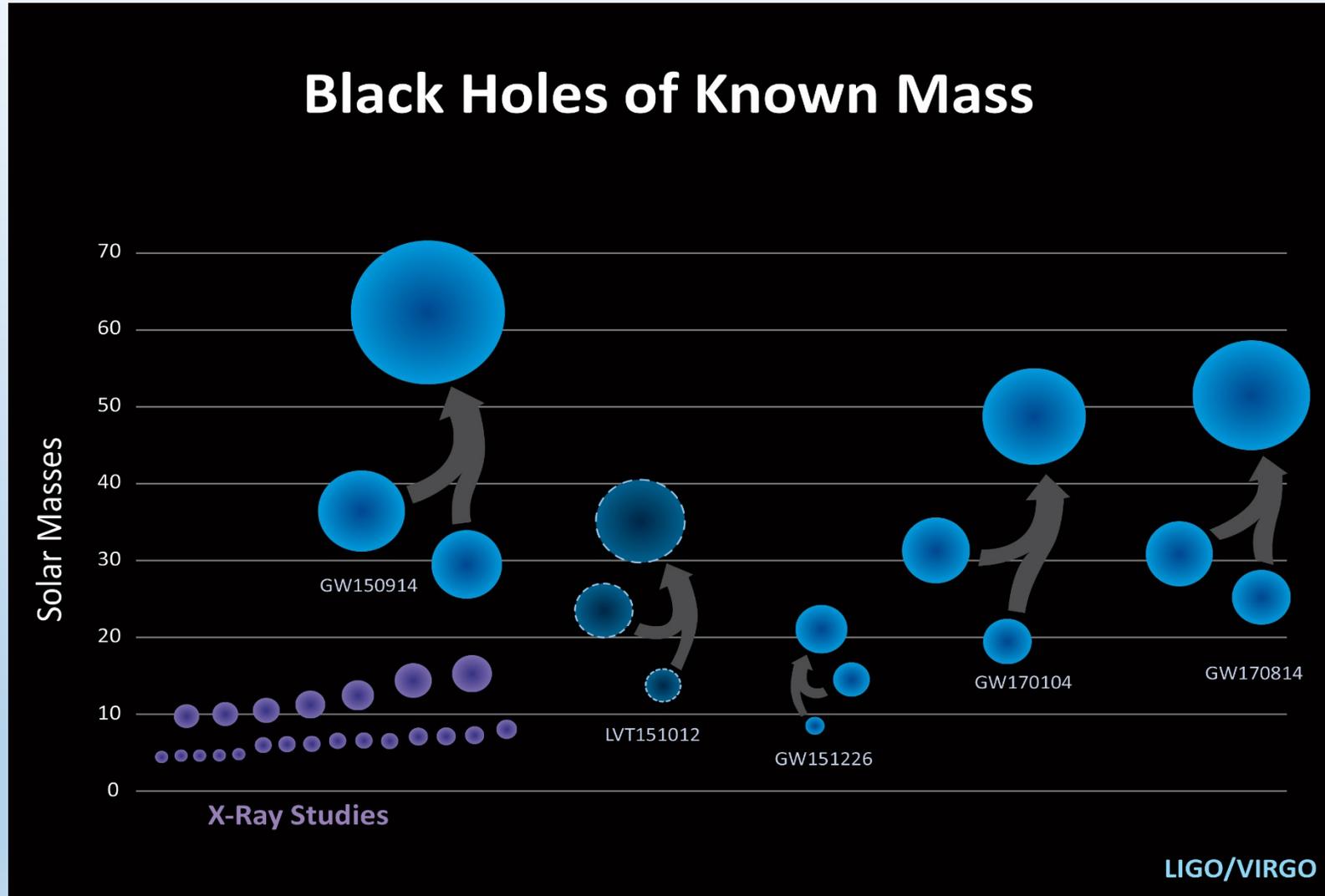
La détection LIGO-Virgo : GW170814



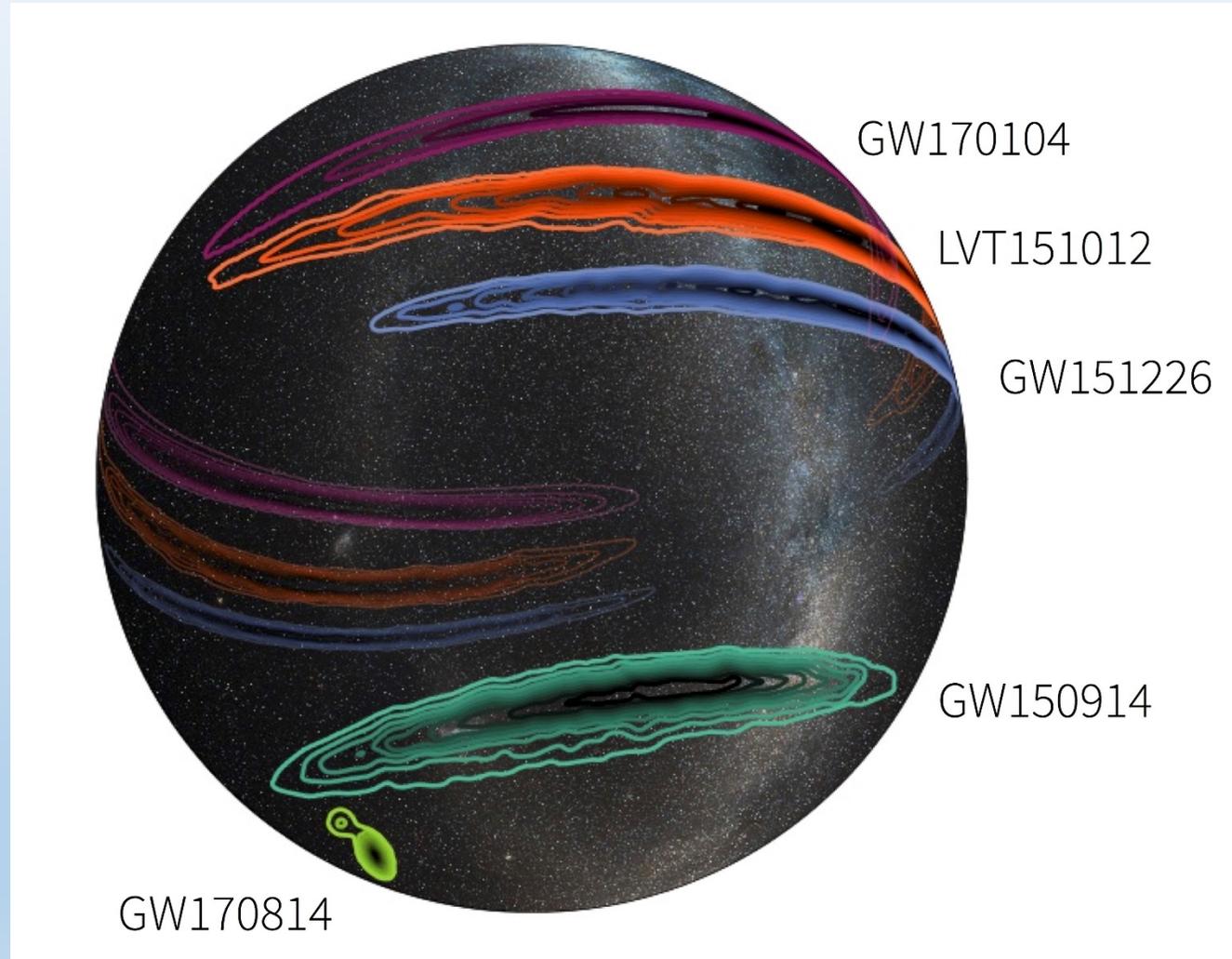
Grâce à Virgo

- La source est mieux localisée
- Les paramètres de la source sont plus précisément déterminés
- On peut pour la première fois estimer la polarisation de l'onde gravitationnelle

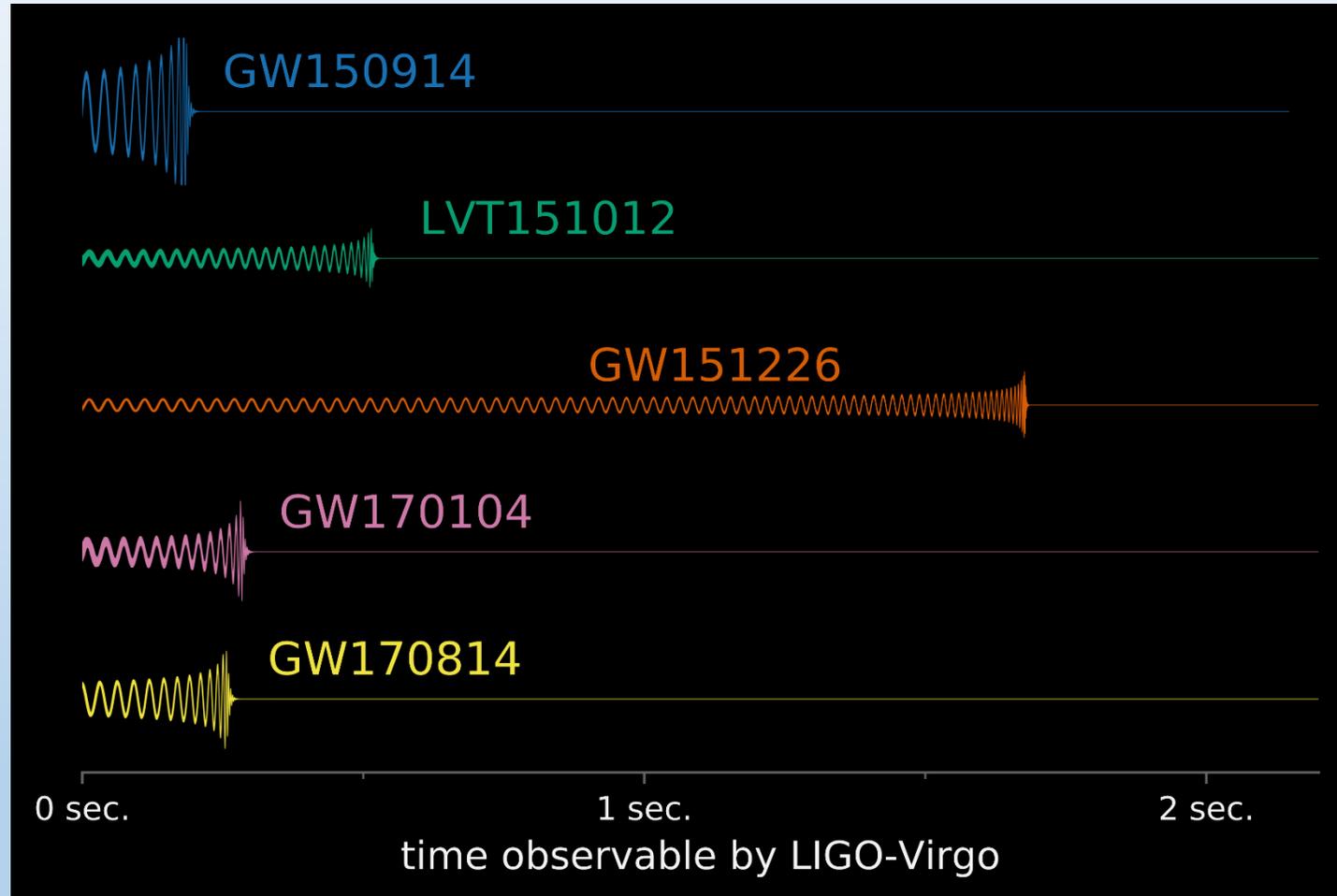
Les détections en 2017



Les détections en 2017



Les détections en 2017

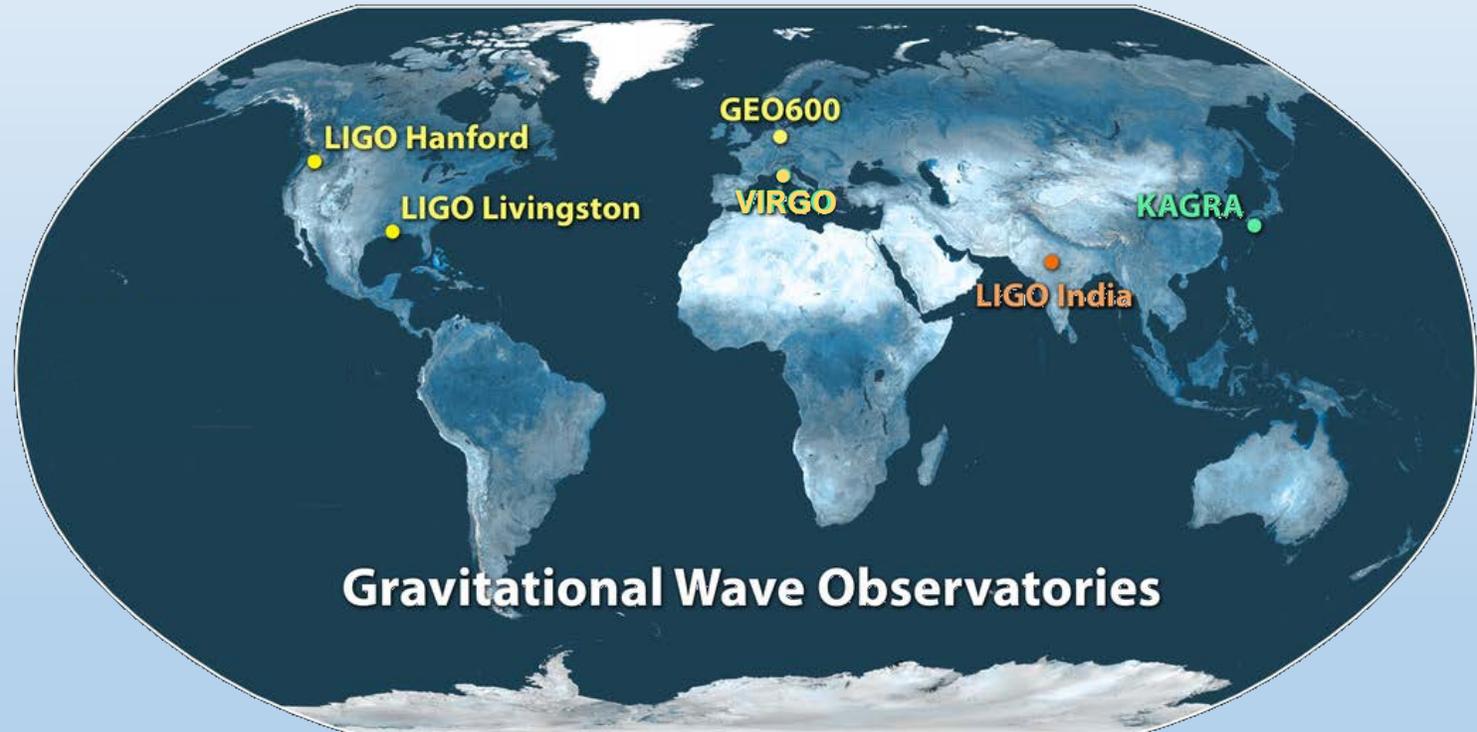
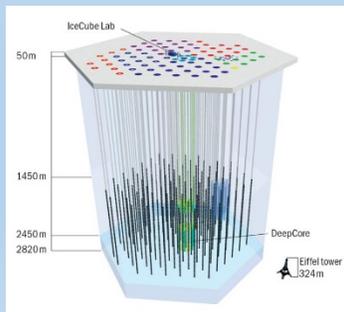
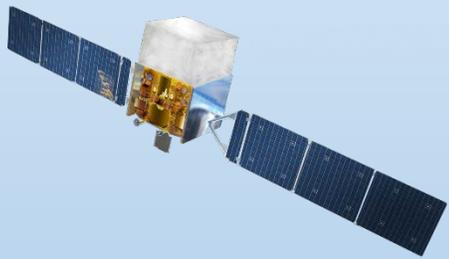


Un réseau mondial

Advanced LIGO – Advanced Virgo – GEO600

D'autres détecteurs interférométriques vont rejoindre LIGO et Virgo dans le réseau international des détecteurs d'onde gravitationnelle: KAGRA au Japon (2019?) , LIGO India (2022?)

+ Suivi Electromagnétique et Neutrinos
avec des télescopes + radiotélescopes +
satellites + IceCube



Une nouvelle astronomie

*Se développe désormais une nouvelle astronomie
qui regarde l'espace-temps au lieu de regarder la lumière.*

*... avec sans doute de nombreuses
autres détections à venir*

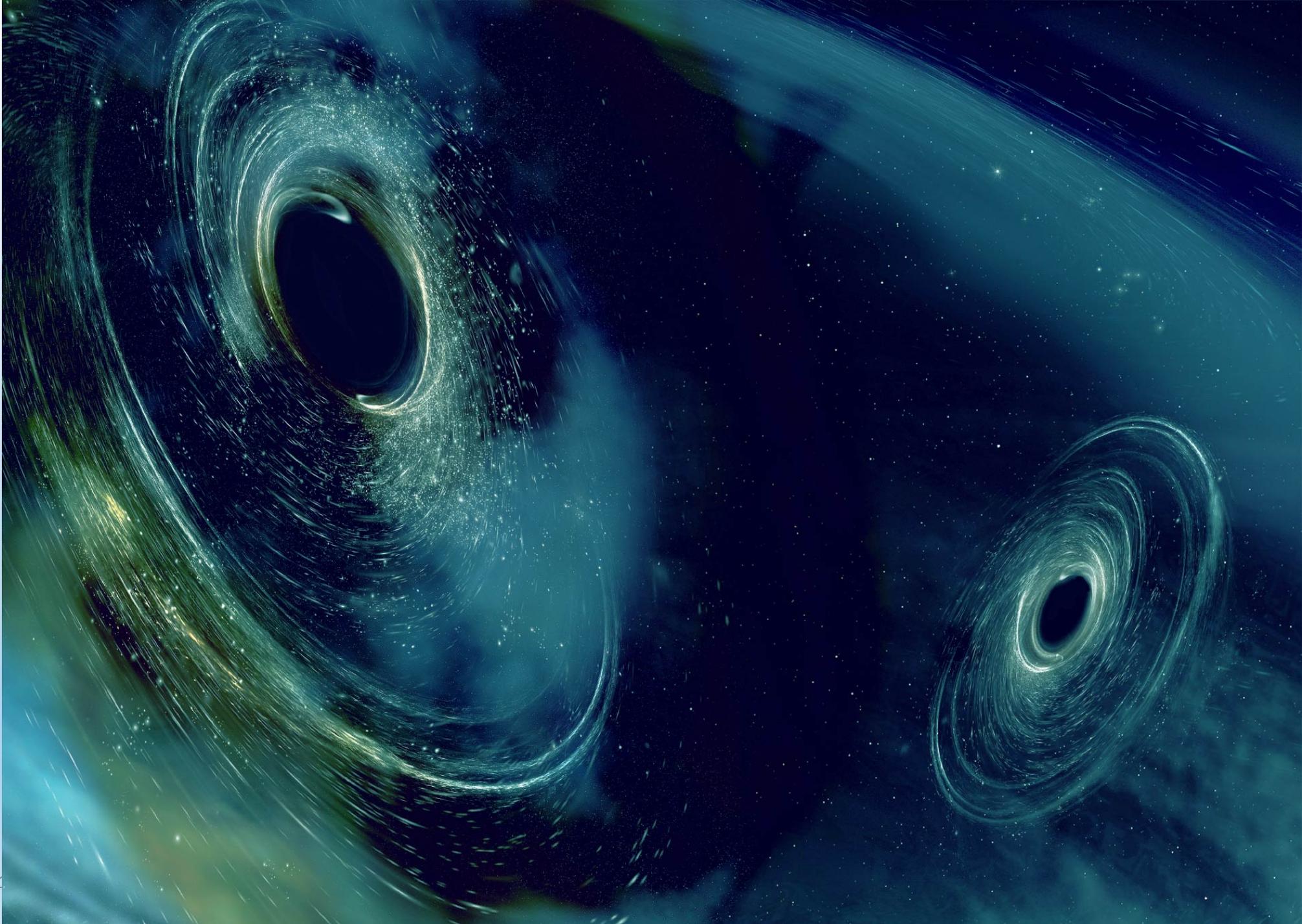


REGARDE CES ÉTOILES !
L'UNIVERS VA JUSQU'À
L'INFINI ET AU-DELÀ !

L'aventure continue!...



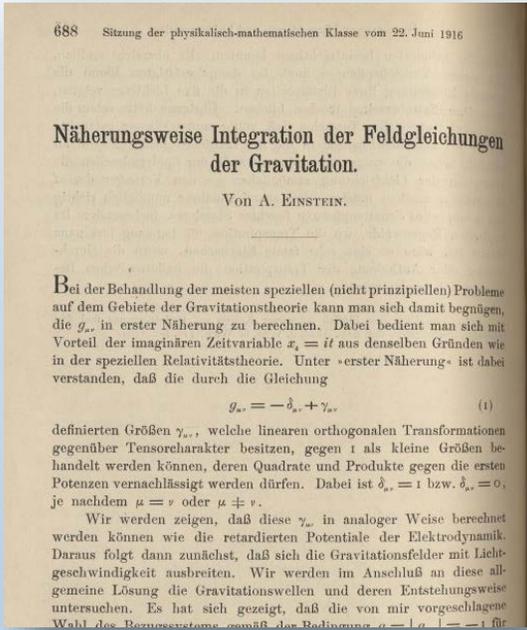
***Backup slides
ou
Petits trucs en plus***



Petit historique

Les ondes gravitationnelles sont nées de la relativité générale...

Les trous noirs aussi...



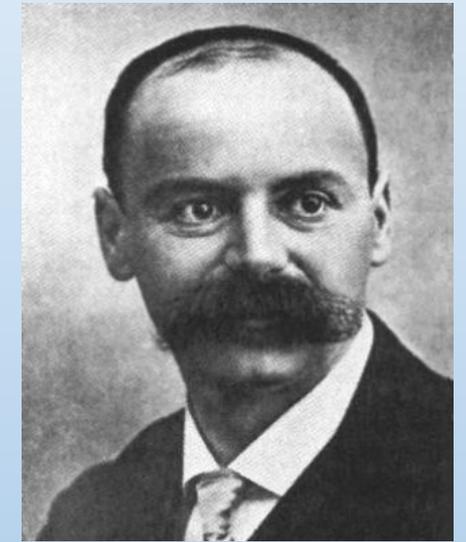
M. Grossmann



A. Einstein



M. Besso



K. Schwarzschild

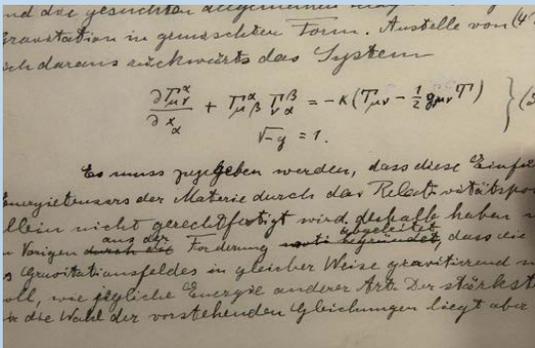
A. Einstein, Preuss. Akad. Wiss. Berlin p. 688 (1916).

A. Einstein, Preuss. Akad. Wiss. Berlin p. 154 (1918).

K. Schwarzschild, Sitzungsber.

Preuss. Akad. Wiss. Berlin

(Math. Phys.) 1916, 189 (1916).



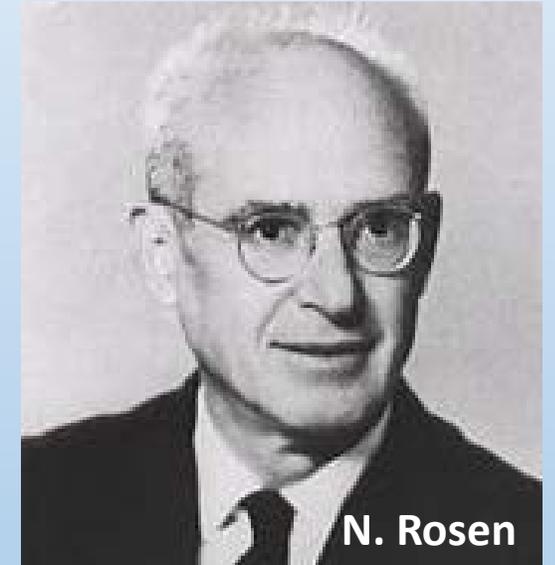
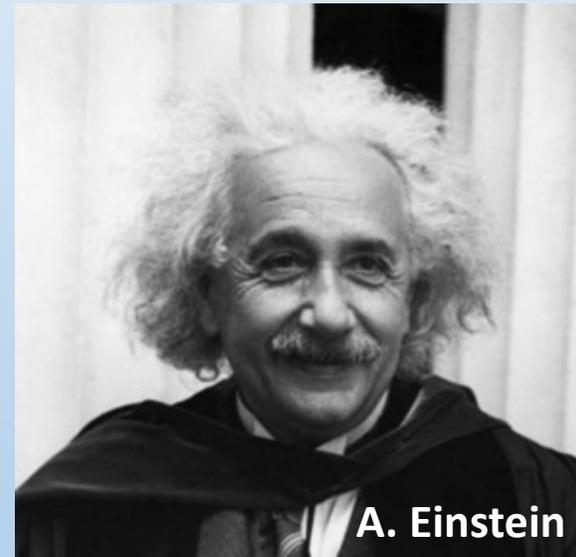
Les ondes gravitationnelles existent-elles vraiment?

Au mois de juillet 1936, Albert Einstein et Nathan Rosen soumettent un article à la « Physical Review » de l'American Physical Society, intitulé « Does the gravitational waves exist? ».

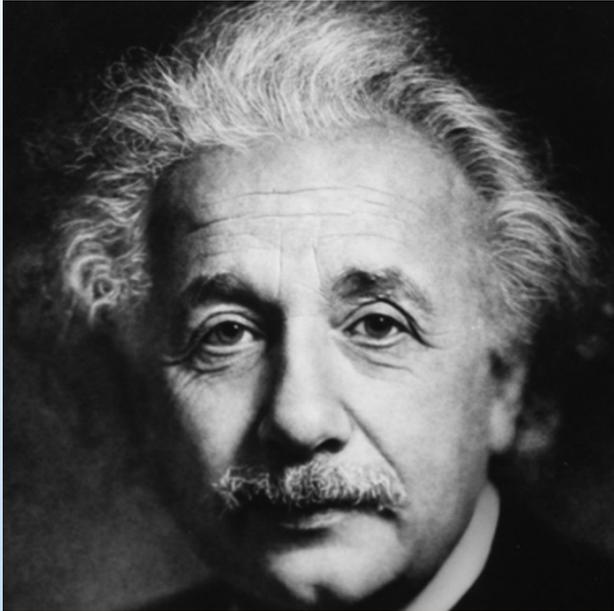
Leur conclusion est que les ondes gravitationnelles n'existent pas!

En 1936 Albert Einstein écrit à son ami Max Born:

« Avec un jeune collaborateur, je suis arrivé au résultat intéressant que les ondes gravitationnelles n'existent pas, bien qu'en première approximation elles aient été considérées comme une certitude. Cela montre que les équations non-linéaires de la relativité générale peuvent nous en dire plus ou au contraire nous limiter plus que nous ne l'avions pensé jusqu'à présent. »



Les ondes gravitationnelles existent-elles vraiment?



ON GRAVITATIONAL WAVES.

BY
A. EINSTEIN and N. ROSEN.

ABSTRACT.

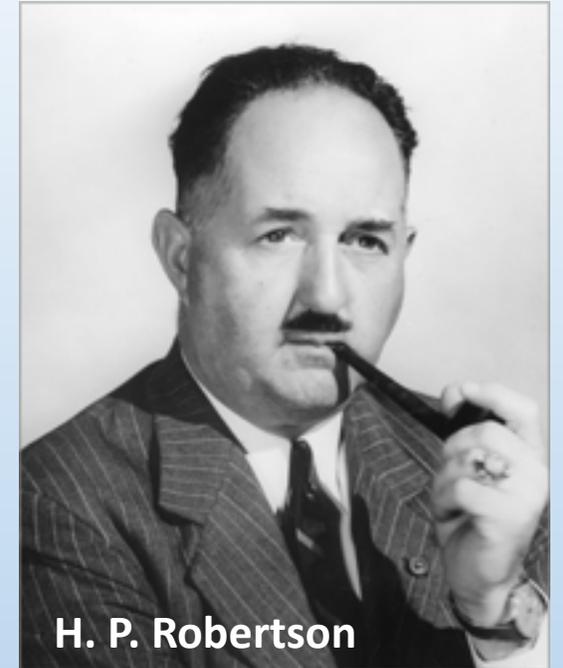
The rigorous solution for cylindrical gravitational waves is given. For the convenience of the reader the theory of gravitational waves and their production, already known in principle, is given in the first part of this paper. After encountering relationships which cast doubt on the existence of *rigorous* solutions for undulatory gravitational fields, we investigate rigorously the case of cylindrical gravitational waves. It turns out that rigorous solutions exist and that the problem reduces to the usual cylindrical waves in euclidean space.

I. APPROXIMATE SOLUTION OF THE PROBLEM OF PLANE WAVES
AND THE PRODUCTION OF GRAVITATIONAL WAVES.

It is well known that the approximate method of integration of the gravitational equations of the general relativity theory leads to the existence of gravitational waves. The method used is as follows: We start with the equations

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -T_{\mu\nu}. \quad (1)$$

We consider that the $g_{\mu\nu}$ are replaced by the expressions

$$g_{\mu\nu} = \delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu}. \quad (2)$$


H. P. Robertson

Einstein soumet finalement l'article en 1937 au Journal of Franklin Institute, non sans l'avoir corrigé et avoir changé la conclusion : les ondes gravitationnelles peuvent exister.

Les ondes gravitationnelles existent-elles vraiment?

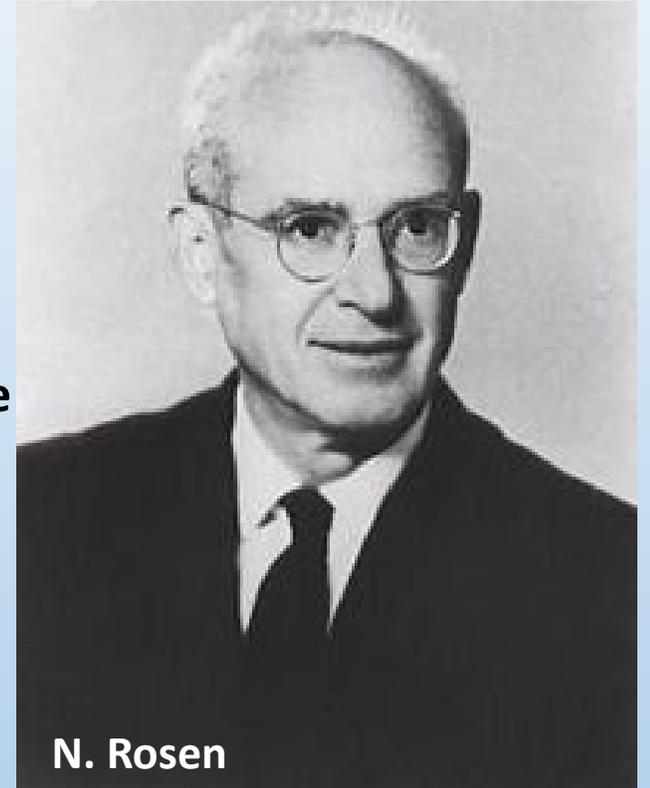
Nathan Rosen, qui est parti pour un séjour de deux ans en Union Soviétique avant qu'Albert Einstein ne soumette l'article corrigé, n'est pas d'accord avec cette correction.

En 1955 se déroule à Berne la première conférence GR, qui fête le cinquantenaire de la relativité restreinte.

A cette occasion, Nathan Rosen présente un argument qui selon lui démontre que les ondes gravitationnelles ne peuvent exister (la densité d'énergie gravitationnelle des ondes cylindriques de Einstein-Rosen est nulle partout).

Jusque dans les années 1970, alors que la plupart des physiciens sont désormais convaincus du contraire, il soutiendra que les ondes gravitationnelles ne peuvent exister.

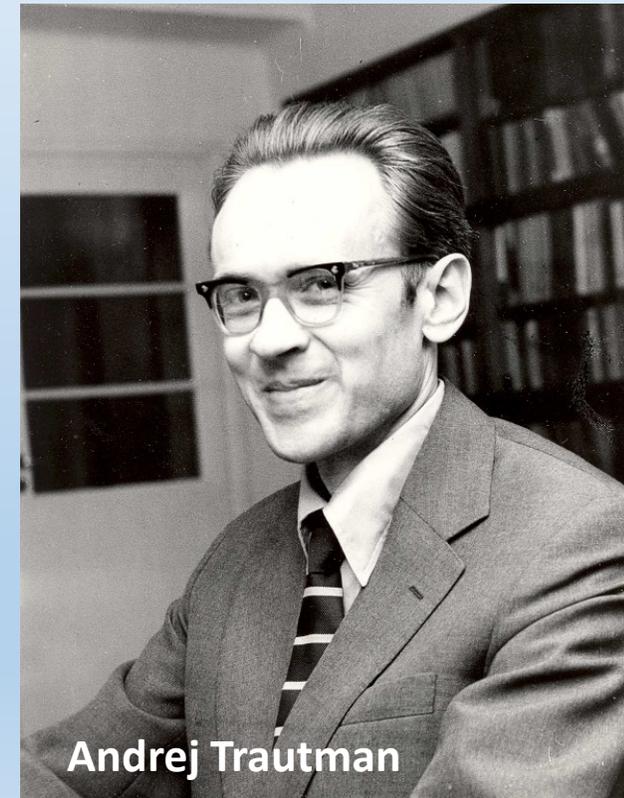
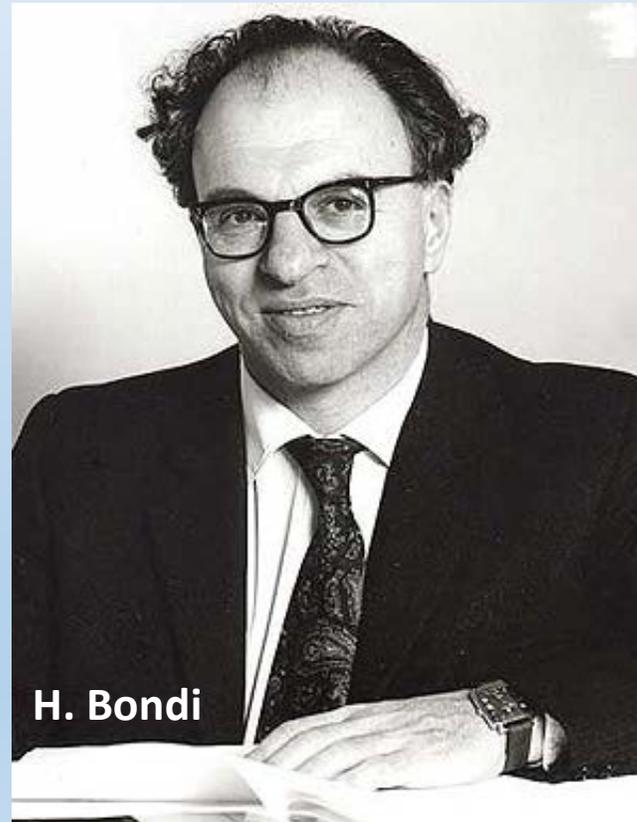
Il publiera même un article en 1973: « Does Gravitational Waves exist ? »



N. Rosen

Les ondes gravitationnelles existent-elles vraiment?

Au début des années 1950, d'autres physiciens ou mathématiciens sont sceptiques sur l'existence des ondes gravitationnelles, ou sur le fait qu'elles transportent de l'énergie ou sur le fait qu'un système binaire émet des ondes gravitationnelles.



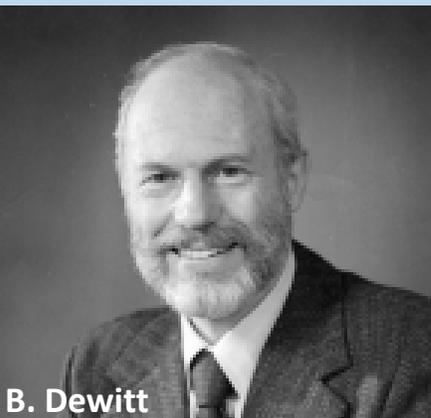
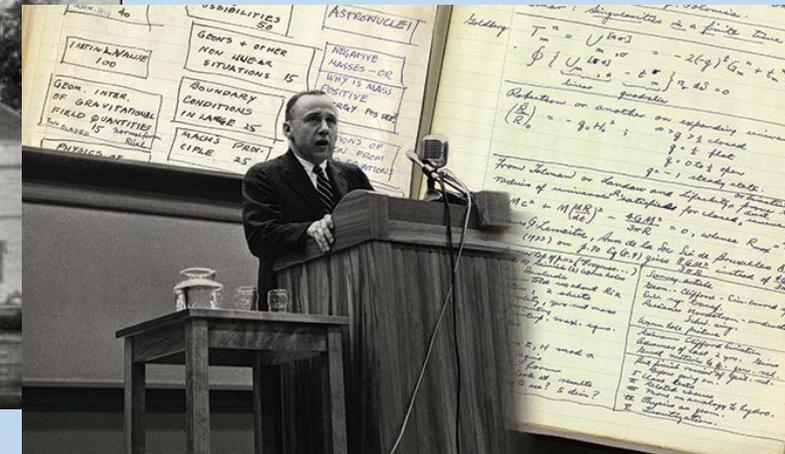
La conférence de Chapel Hill

En janvier 1957, a lieu à Chapel Hill, à l'Université de la Caroline du Nord, la deuxième conférence GR, dont le titre est "*The Role of Gravitation in Physics.*"

Cette conférence est considérée comme un tournant majeur de l'histoire des ondes gravitationnelles.



C. Dewitt Morette

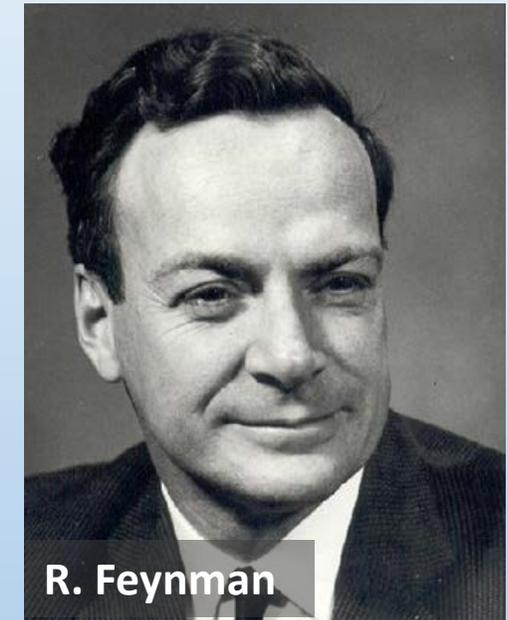
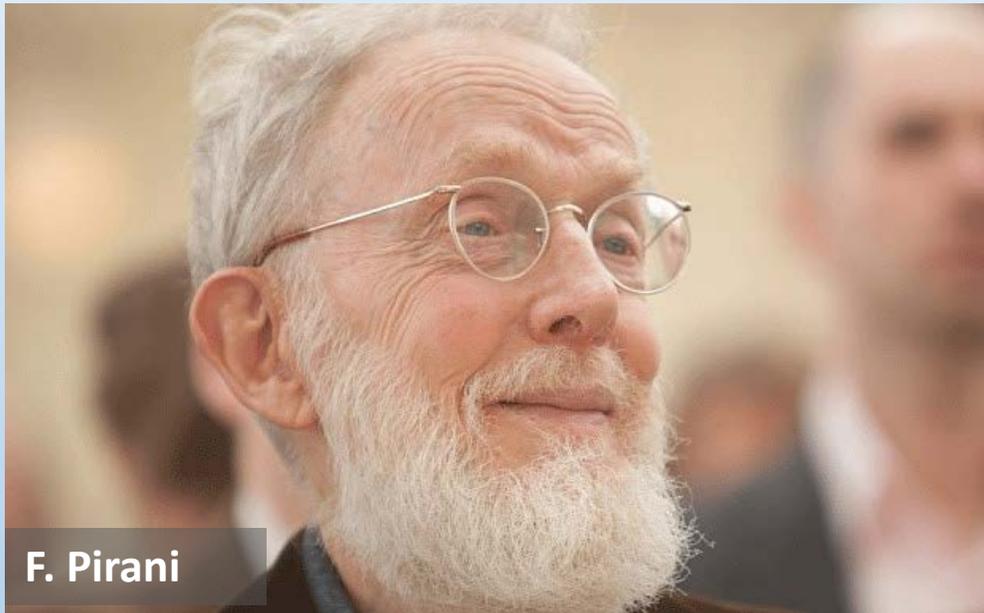


B. Dewitt

La conférence de Chapel Hill

Lors de cette conférence Felix Pirani montre qu'un effet observable lors du passage d'un onde gravitationnelle est la variation de la distance entre deux masses (effet de marée).

Puis Hermann Bondi et Richard Feynman montrent que les ondes gravitationnelles emportent de l'énergie et sont donc détectables (sticky bead argument)



Toutefois, le discours de clôture que donne Peter Bergmann, se termine ainsi:

« Il existe un troisième type d'expérience qui apparemment n'est pas réalisable, et ne le sera sans doute pas avant longtemps. Ce type d'expérience correspond à la détection des ondes gravitationnelles »

Le premier détecteur

Un des participant à cette conférence de Chapel Hill est Joseph Weber, professeur de génie électrique à l'université du Maryland, passionné par la relativité générale et travaillant depuis 1955 avec J. A. Wheeler.

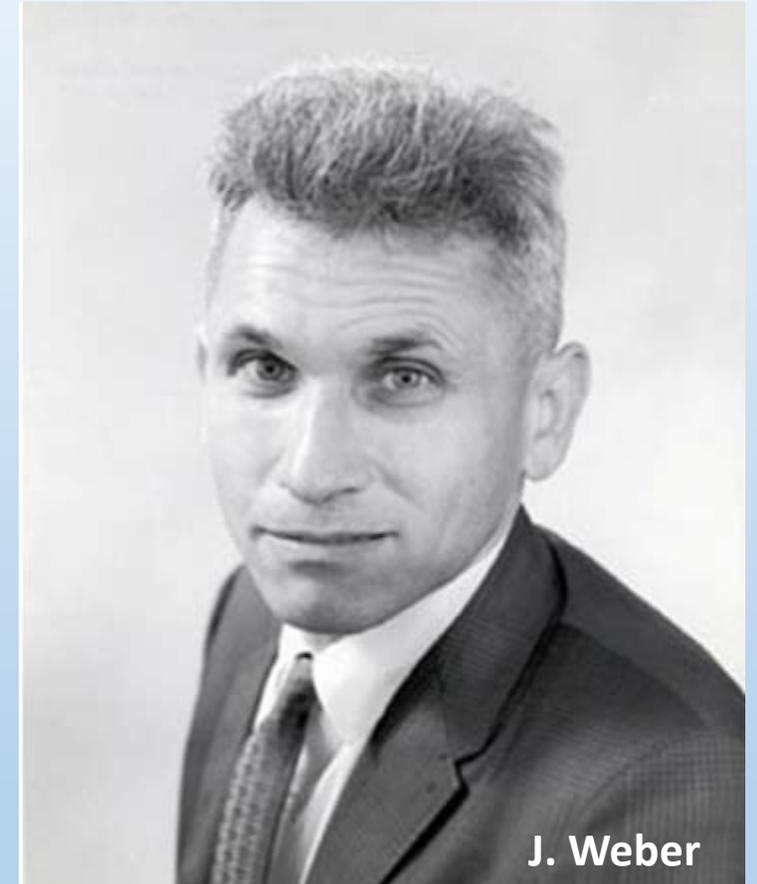
1957: « Reality of the Cylindrical Gravitational Waves of Einstein-Rosen »

Cette conférence lui donne l'élan pour tenter de réaliser la détection les ondes gravitationnelles

... malgré la conclusion de Bergmann

”Quand j'ai décidé de rechercher les ondes gravitationnelles il y a environ 14 ans, la plupart des physiciens ont applaudi notre courage mais pensaient que le succès – la détection d'une onde gravitationnelle – demanderait encore un siècle de travail expérimental. »

(J. Weber, in Popular Science May 1972)



J. Weber

Petit historique

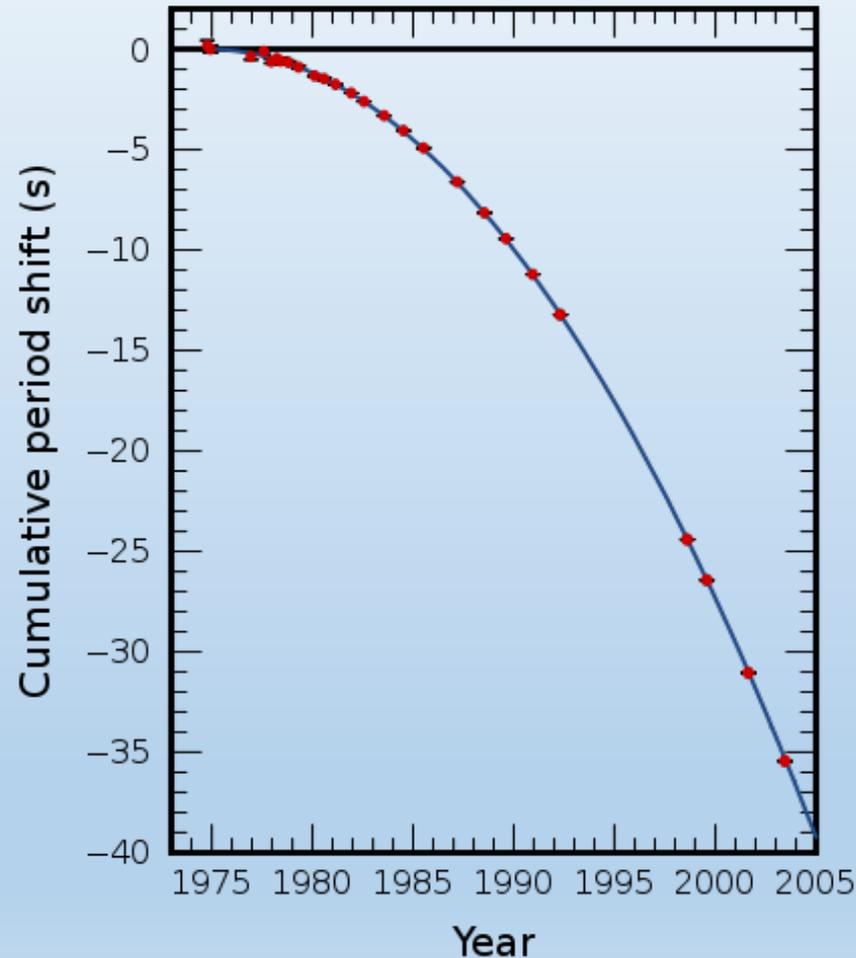
Théorie

- 1905** H. Poincaré parle d'onde gravitique comme nécessaire pour concilier gravitation et transformations de Lorentz
- 1916 et 1918** Articles d'Albert Einstein sur les ondes gravitationnelles comme conséquence de la relativité générale
- 1916** Karl Schwarzschild trouve une solution de l'équation de la relativité générale: la singularité de Schwarzschild
- 1936** Einstein doute de l'existence des ondes gravitationnelles
- 1939** Oppenheimer montre qu'une étoile suffisamment massive s'effondre jusqu'à former une singularité de Schwarzschild
- 1957** Feynman, Bondi, Pirani montrent qu'une onde gravitationnelle emporte de l'énergie
- 1967** J.A. Wheeler baptise « trou noir » la solution de Schwarzschild
- 1993** Le signal d'onde gravitationnelle d'une coalescence binaire est de mieux en mieux connu théoriquement
- 2005** Les progrès dans la simulation numérique permettent de prédire la forme du signal de coalescence binaire même en champ gravitationnel intense

Expérience

- 1918 Eddington vérifie la courbure de la lumière par un champ de gravitation
- 1918-1950** Personne ne pense que les ondes gravitationnelles puissent être détectables. Controverse même sur leur existence.
- 1959** J. Weber construit le premier détecteur d'onde gravitationnelle
- 1962** Gersenstein et Pustovoit proposent de détecter les ondes gravitationnelles avec un interféromètre
- 1969** J. Weber annonce avoir détecté des ondes gravitationnelles avec deux détecteurs à barre en coïncidence
- 1973** R. Weiss et R. Forward étudient la fabrication d'un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles
- 1989** Les détecteurs kilométriques comme LIGO et Virgo sont envisagés. Mais besoin de développements technologiques et de puissance de calcul
- 2007** Collaboration LSC-Virgo et première prise de données commune LIGO-Virgo
- 2015** Détection des ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs massifs

La première détection des ondes gravitationnelles



Découverte du système binaire PSR1913+16

R.A. Hulse et J.H. Taylor (1974)

R. A. Hulse and J. H. Taylor, *Astrophys. J. Lett.* 195, L51 (1975).

Mesures sur PSR1913+16:

J.H. Taylor et J.M. Weinberg (1975 à 1982)

J. H. Taylor and J. M. Weisberg, *Astrophys. J.* 253, 908 (1982).

Prédictions théoriques:

T. Damour (1992)

T. Damour and G. Esposito-Farese, *Class. Quant. Grav.* 9, 2093 (1992).

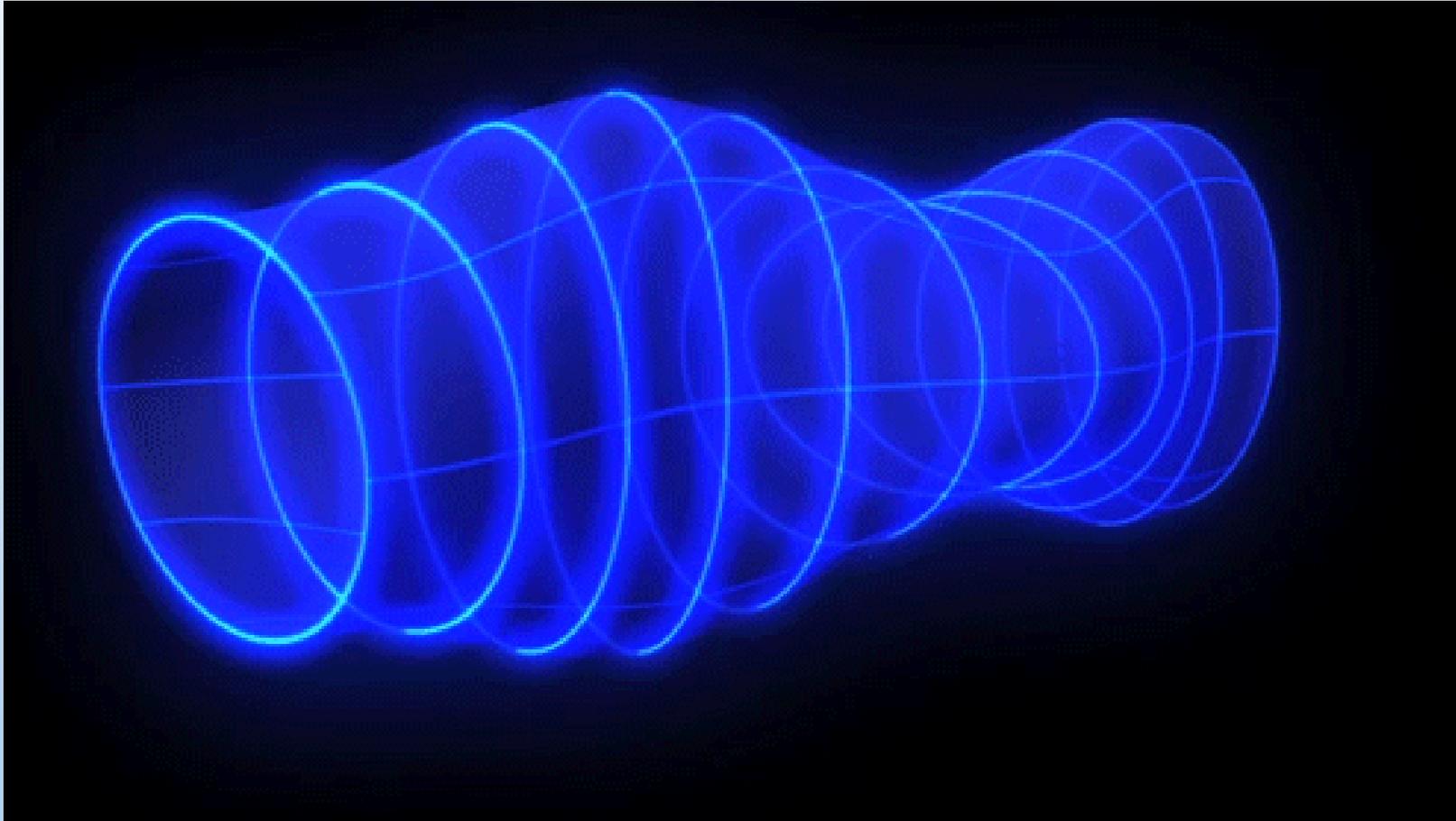
Plusieurs pulsars binaires découverts depuis...

Par exemple: J0737-3039

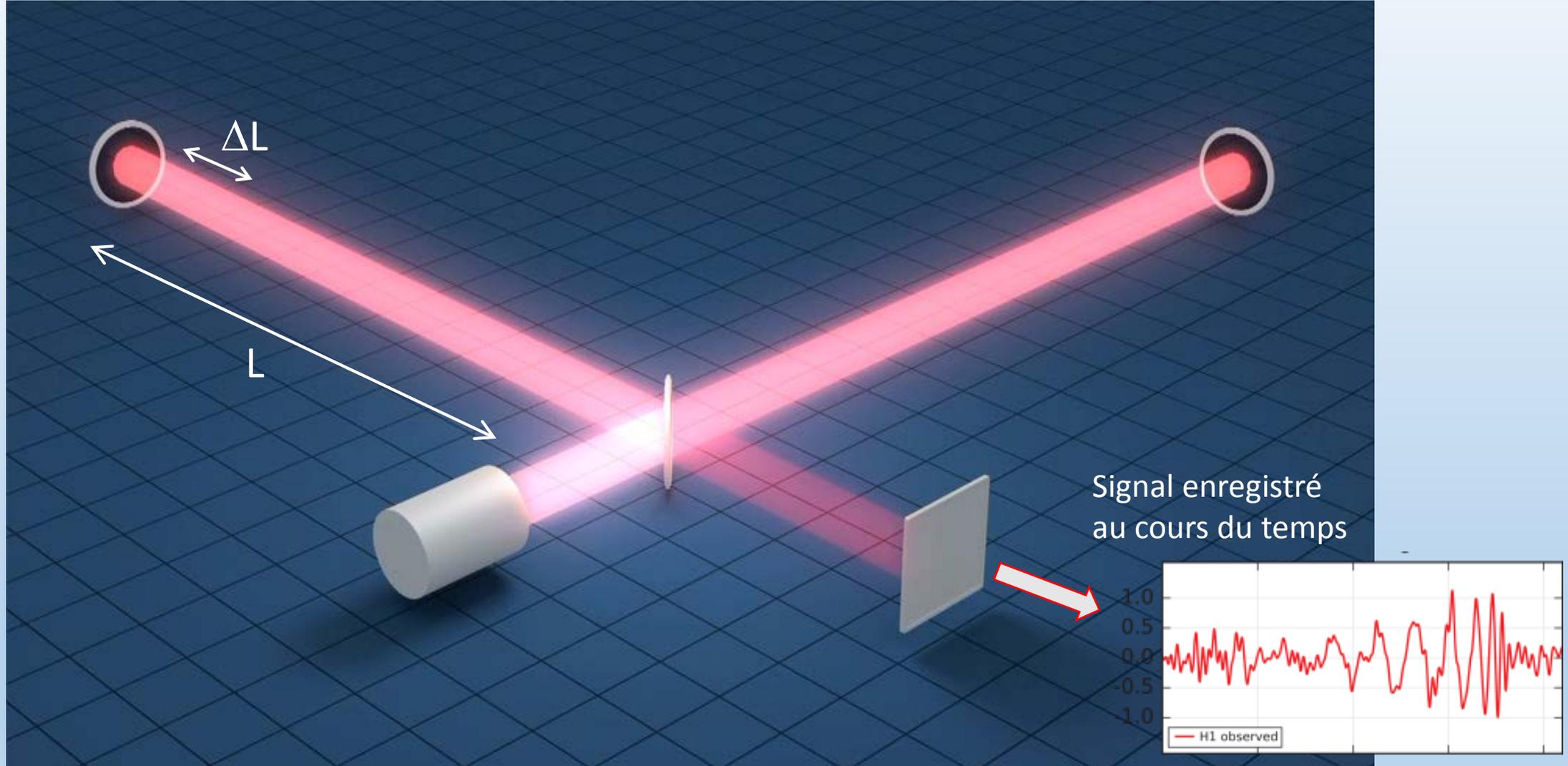
M. Burgay et al., *Nature* 426, 531 (2003).

Effet d'une onde gravitationnelle

$$h \sim \Delta L / L$$



La détection interférométrique



Les premiers détecteurs interférométriques

1978 R. Forward: premier prototype de détecteur interférométrique

Un projet initié au Hughes Research Labs en 1966

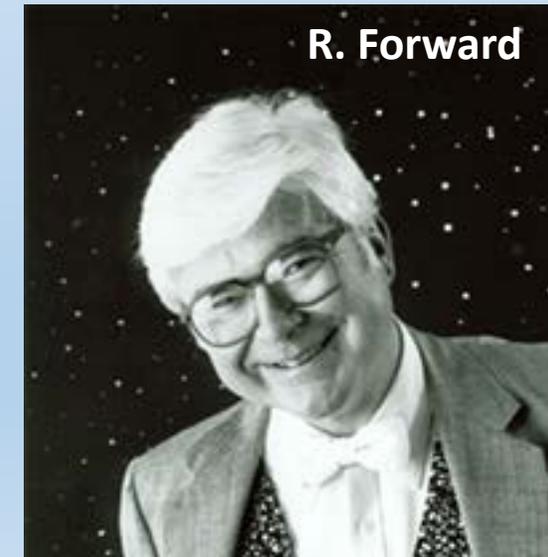
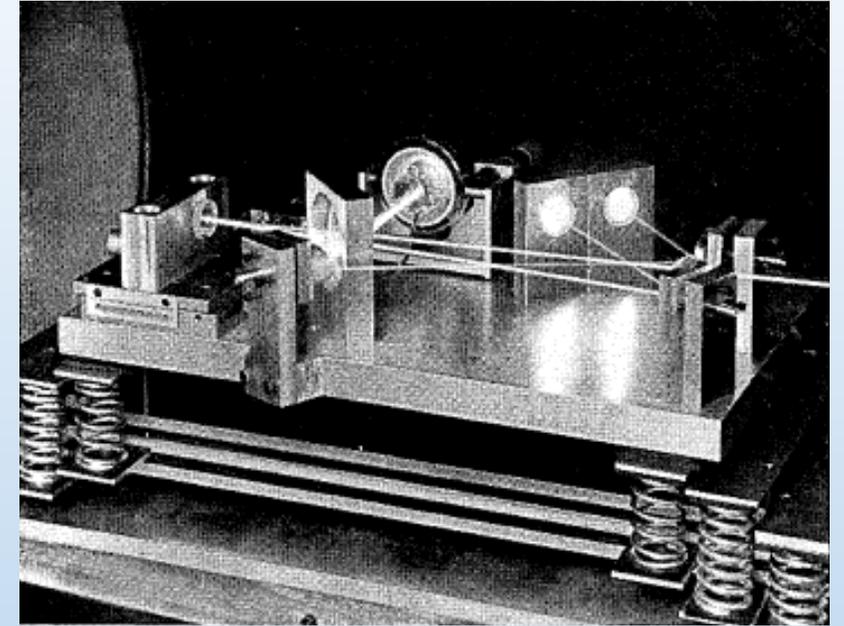
« Generation and Detection of Dynamic Gravitational-Gradient fields »,
R.L. Forward, L.R. Miller - Journal of Applied Physics, 1967

« Photon-noise-limited laser transducer for gravitational antenna »,
Moss GE, Miller LR, Forward RL, Appl Opt. 1971 Nov 1;10(11):2495-8

“Wideband laser-interferometer gravitational-radiation experiment,”
R.L. Forward, Phys Rev D, 17, 270 (1978)

3.10 « Notre travail a bénéficié des nombreuses discussions avec **P. Chapman** ainsi que **R. Weiss**, qui est impliqué dans la conception et la construction de son propre détecteur au MIT. »

« L'idée de détecter les ondes gravitationnelles en utilisant un laser pour mesurer le mouvement différentiel de deux masses libres a été suggéré souvent par le passé (à notre connaissance, la première suggestion a été faite par **J. Weber** lors d'une conversation téléphonique avec l'un d'entre nous (RLF) le 14 septembre 1964). »

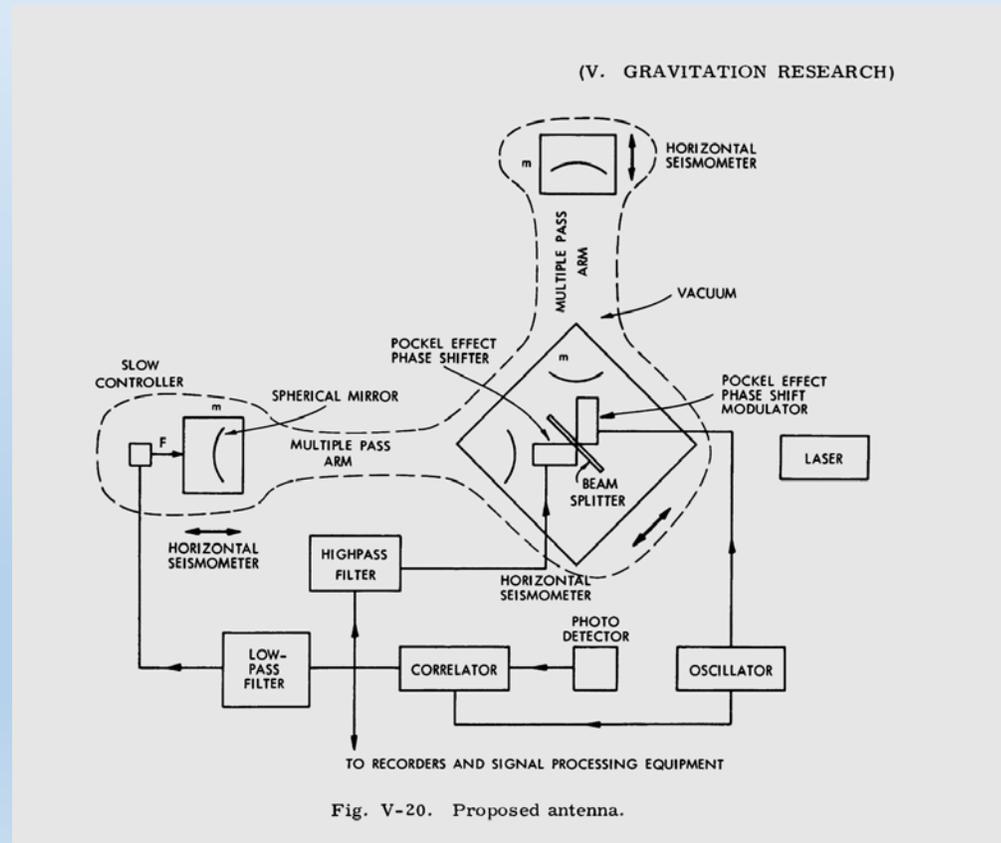
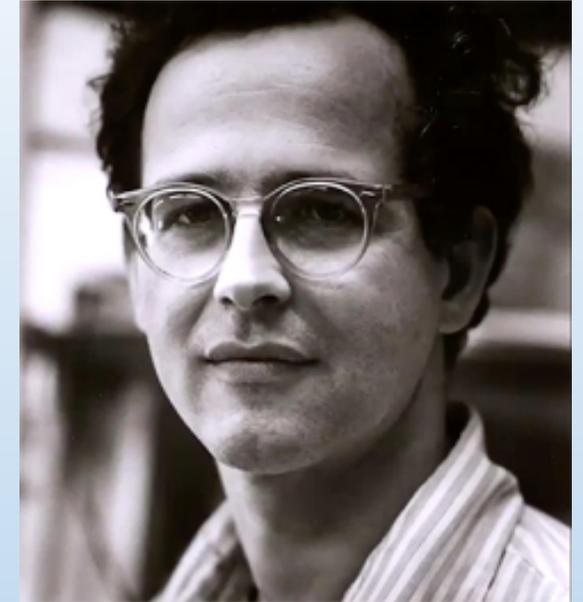


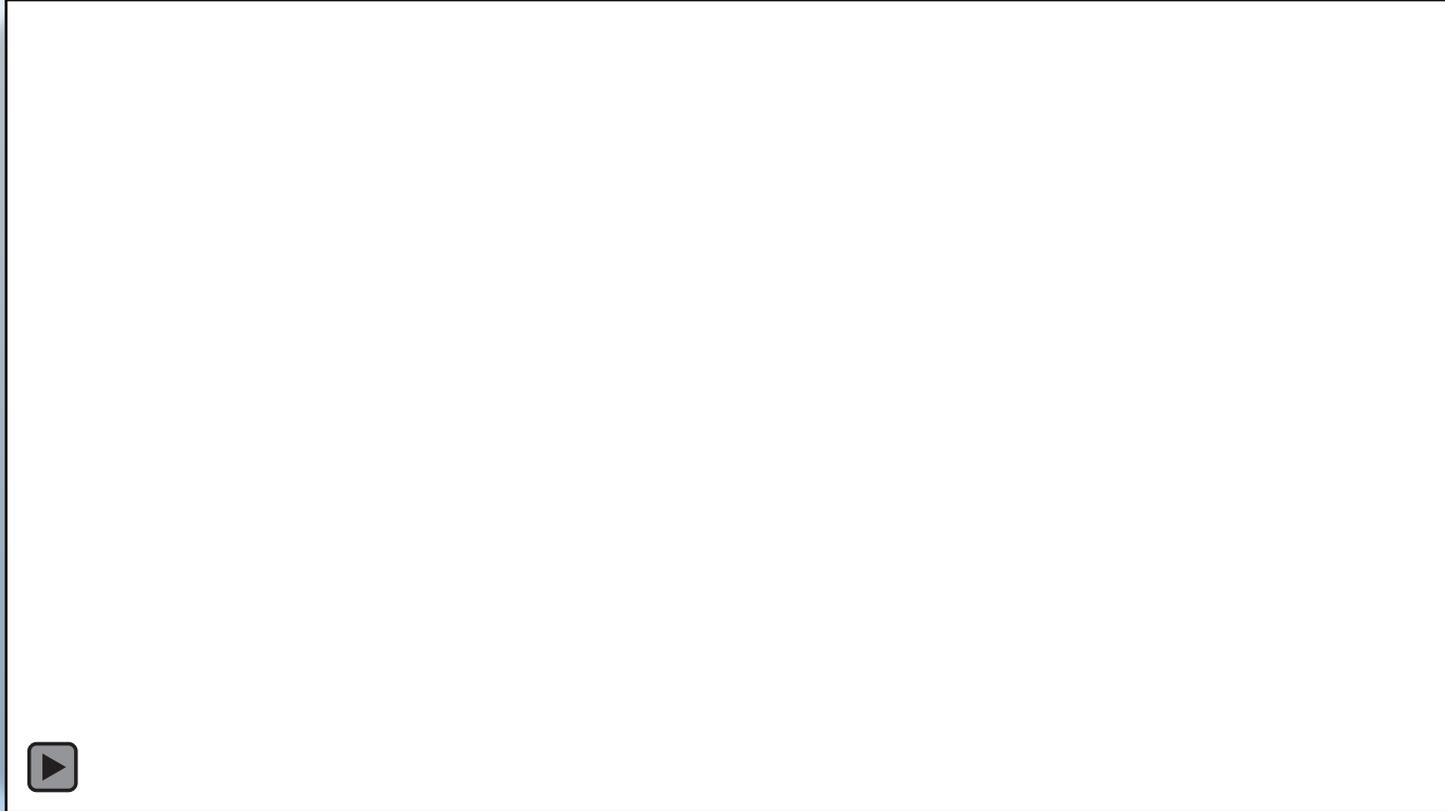
Les premiers détecteurs interférométriques

1972: Première analyse détaillée des bruits et de la sensibilité d'un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles

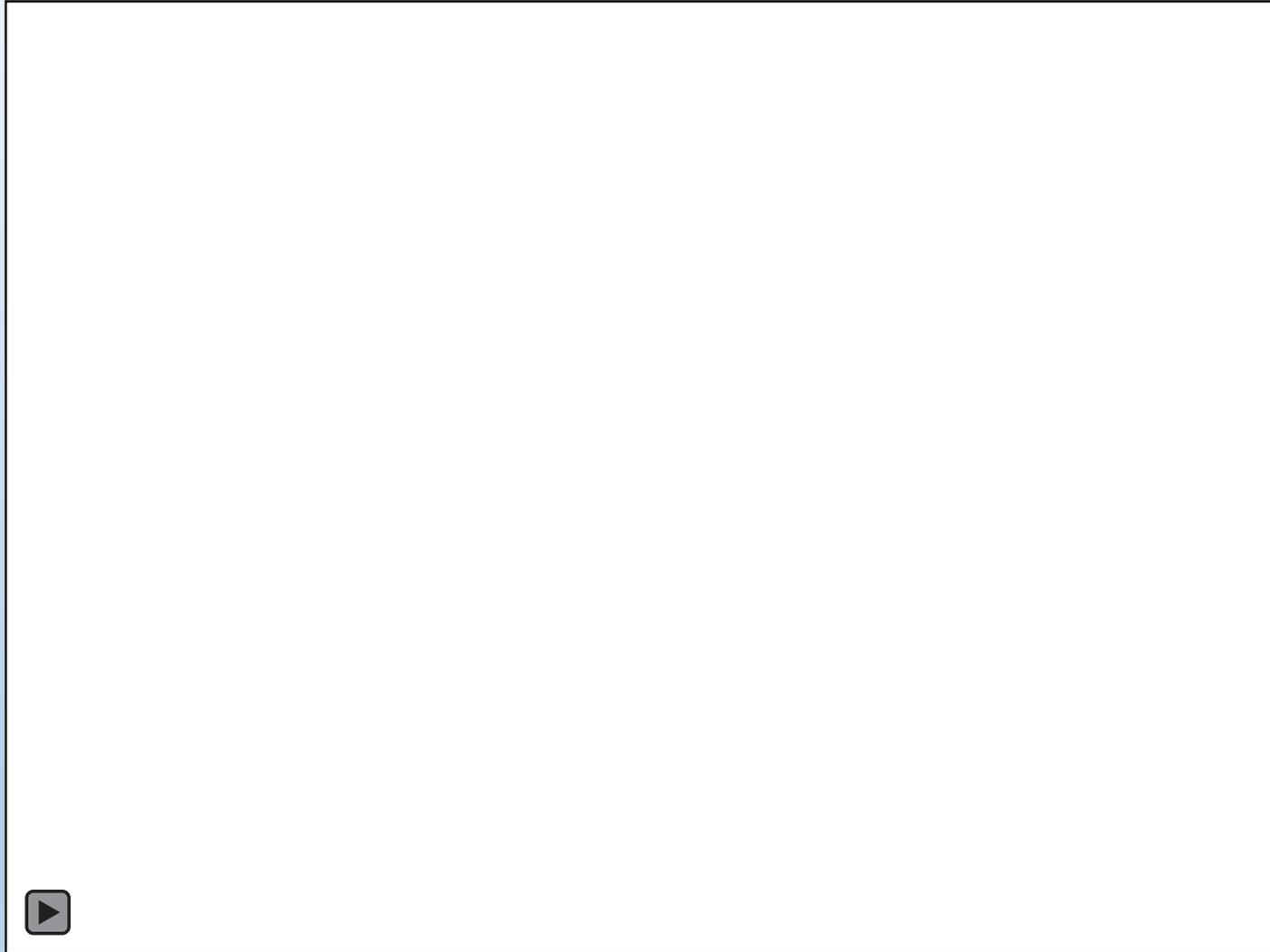
“Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna”,
R. Weiss, Quarterly Reports of the Research Laboratory of Electronics MIT
105, p. 54 (1973).

- **Bruit de photon**
- **Pression de radiation**
- **Bruit thermique**
- **Bruit sismique**
- **Rayons cosmiques**
- **Bruits magnetiques**
- **Etc...**





Confirmation de l'existence des trous noirs



Premiers interféromètres géants

12 Maggio 1987
INFN PI/AE 87/1

Proposta di

Antenna interferometrica a grande base per la
ricerca di Onde Gravitazionali

Laboratori INFN Pisa e Università' di Pisa:

Carlo BRADASCHIA
Raffaele DEL FABBRO
Angela DI VIRGILIO
Adalberto GIAZZOTTO
Hans KAUTZKY
Vinicio MONTELATI
Diego PASSUELLO

Università' di Napoli

Fabrizio BARONE
Riccardo BRUZZESE
Antonello CUTOLO
Luciano DI FIORE (INFN)
Massimo LANDINI
Maurizio LONGO
Leopoldo MILANO
Salvatore SOLIMENO

CNR Frascati

Franco BORDONI
Franco FULIGNI
Valerio IAFOLLA

Università' di Salerno

Innocenzo PINTO

Gravitation et cosmologie Relativiste (Orsay-Paris)
CNRS-Univ. Pierre et Marie Curie

J.L. BOULANGER
Alain BRILLET
Oliver CREGUT
C. Nary MAN
Alain MARRAUD
David SHOEMAKER
Philippe TOURRENC
Jean-Yves VINET



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA
DIPARTIMENTO DI FISICA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Pisa

la construction de détecteurs kilométriques
proposent la construction de détecteurs kilométriques
A. Giazotto lors du Marcel Grossmann Meeting à Rome
gravitational wave antenna in Germany (Garching group)

ech

GRP-341

The LIGO/VIRGO Gravitational-Wave Detection System

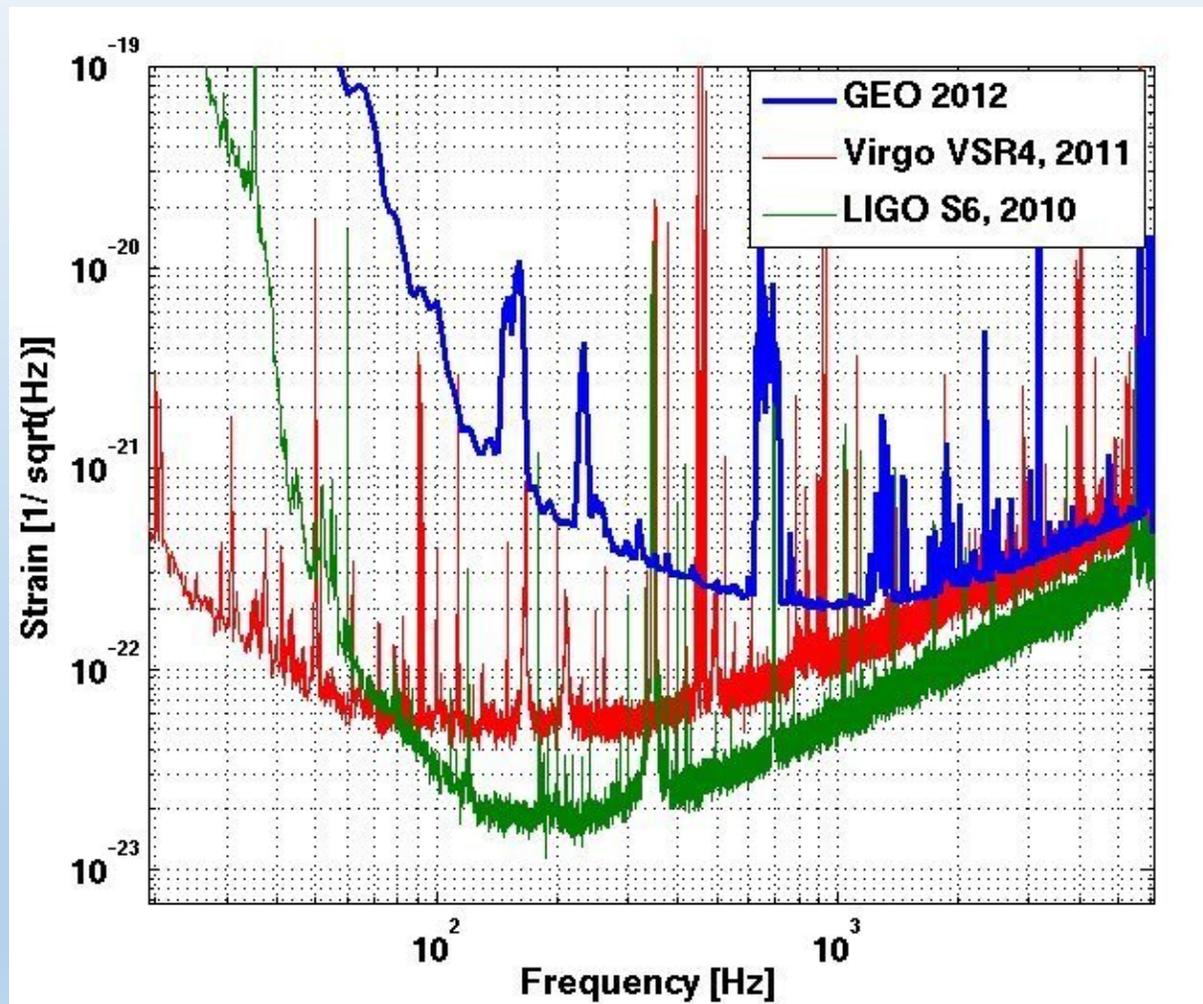
Kip S. Thorne

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology Pasadena, CA 91125; and
Institute for Theoretical Physics, University of California Santa Barbara, CA 93106

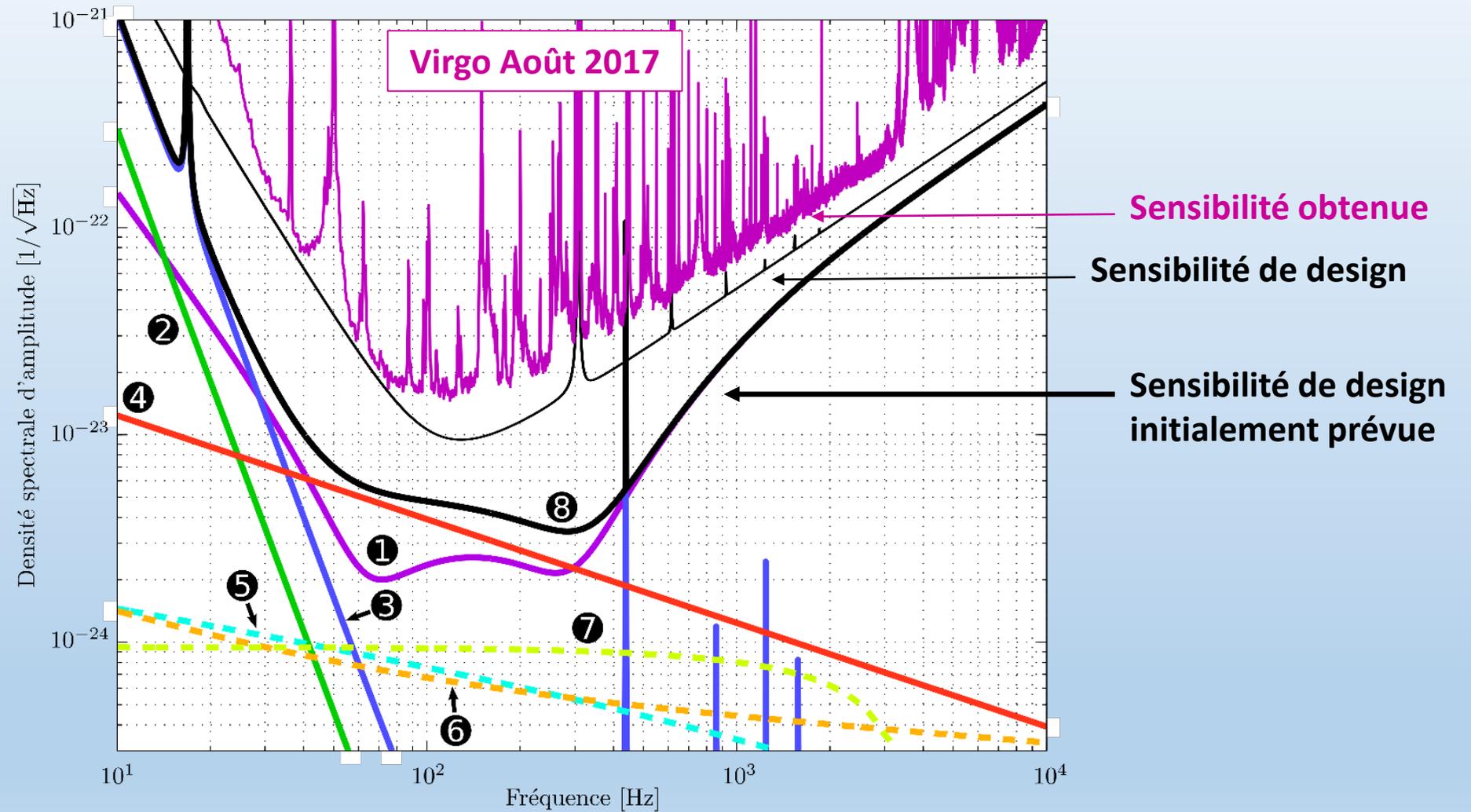
Submitted to *Proceedings of Fourth Rencontres on Particle Astrophysics*,
France, July 1992, ed. J. Tran Thanh Van (Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette, France)

Research supported in part by National Science Foundation Grants PHY-9213508
and PHY-8904035.

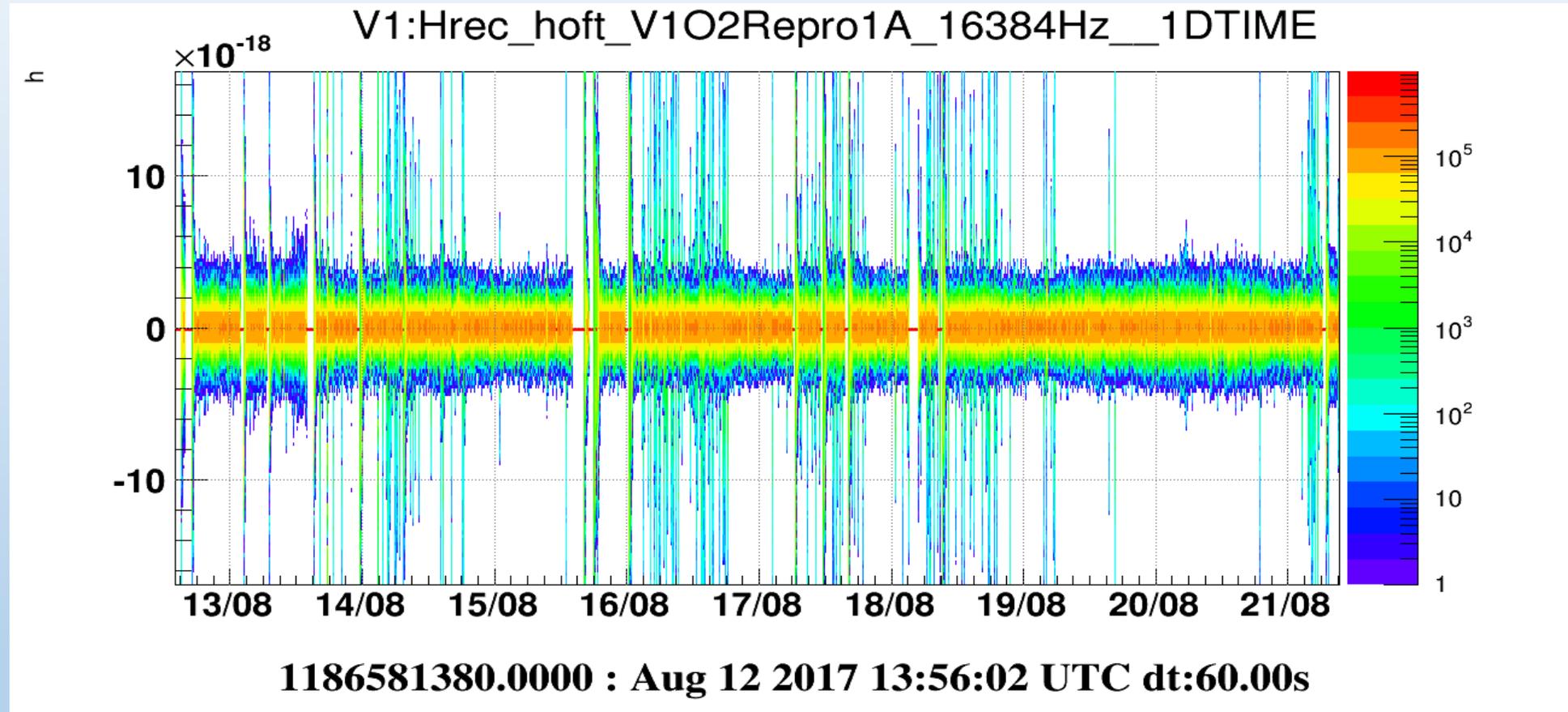
Comparaison LIGO-Virgo-GEO600



Avant la prise de données et l'analyse: le commissioning

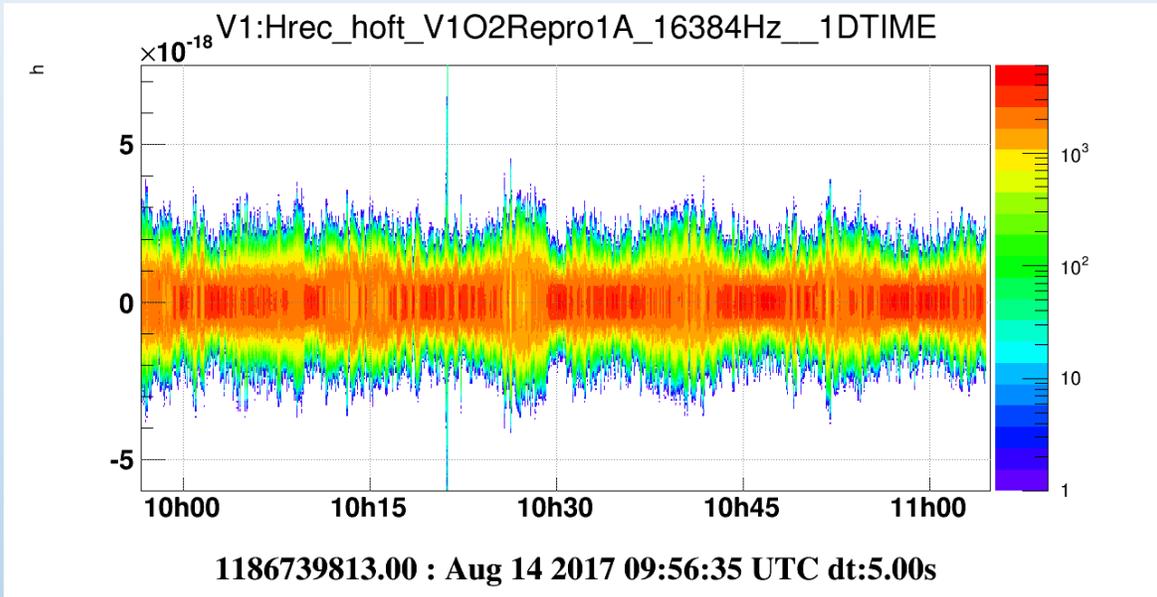


Bruit et détections en 2017

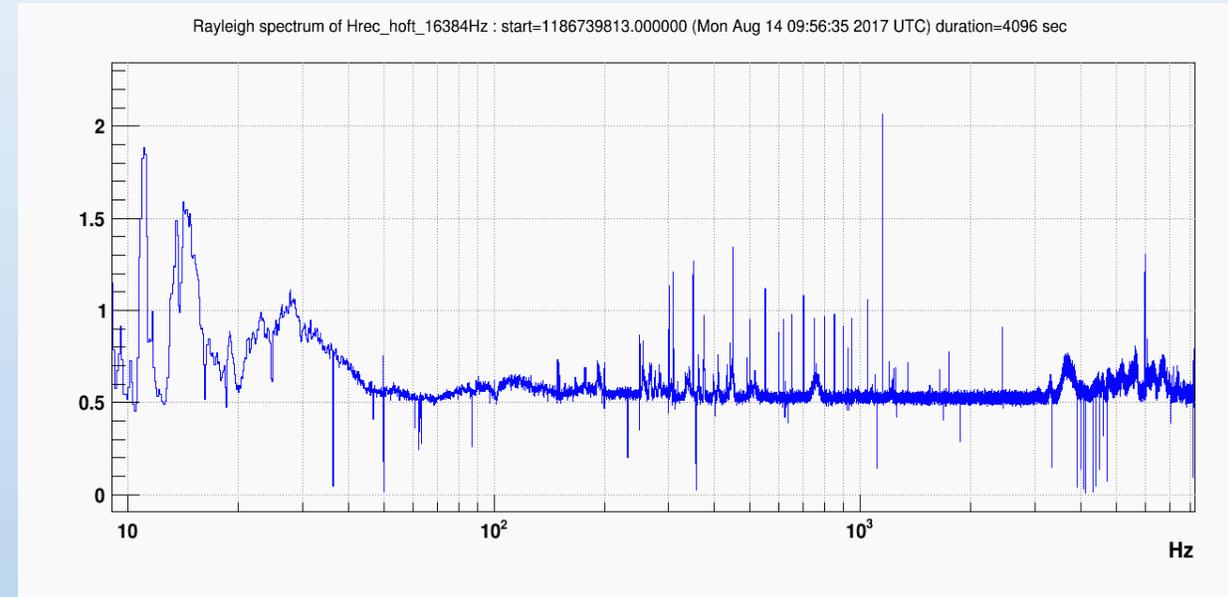


Bruit et détections en 2017

Time evolution of distribution



Rayleigh Spectrum



Qualité des données et statistique

Réduire l'impact des bruits transitoires

- Statistique “robuste”
- Caractérisation de l'instrument et de son environnement
 - ◆ 200 000 mesures auxiliaires (sismomètres, accéléromètres, magnétomètres, microphones, ...)
 - ◆ On écarte les événements quand on sait que les données sont mauvaises

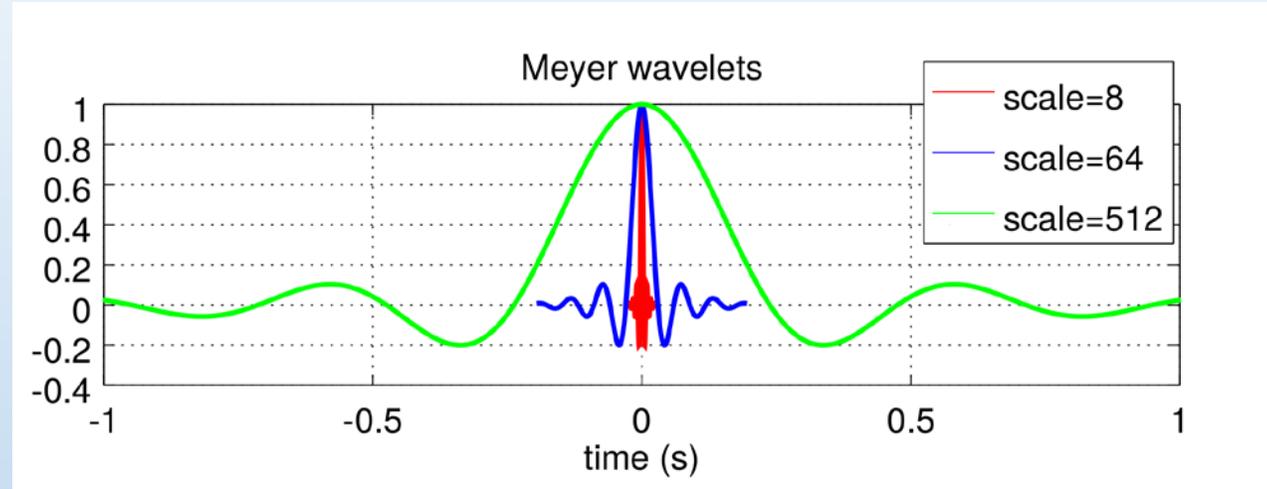
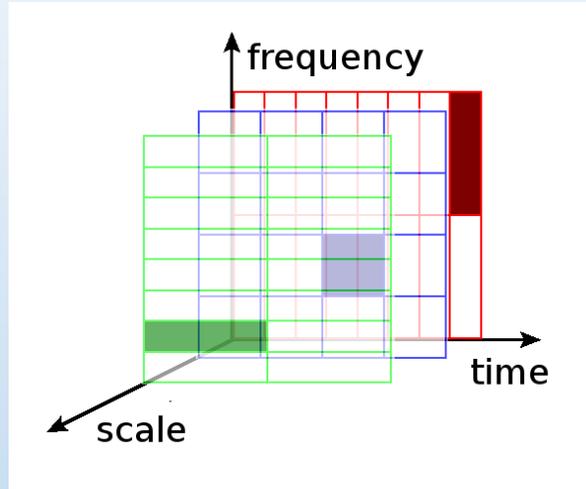
Bruits transitoires inexplicables

- Population impossible à modéliser
- Estimation empirique via des **données de substitution** par des décalages temporels non-physiques entre détecteurs
 - ◆ Monte Carlo – 200 000 années de données “fictives” analysées
 - ◆ Partie dominante du calcul

- Fréquence d'occurrence des bruits transitoires en coïncidence
- ◆ Signification statistique – Règle des **5 écarts types** (1/1.7 million)

Coherent WaveBurst

S. Klimenko et al., arXiv:1511.05999



Transformées de Wilson à plusieurs échelles

- Union de bases temps-fréquence (à la Gabor) orthonormales

Agrégats de pixels temps-fréquence cohérents en phase

- Addition après compensation du délai de propagation et décalage de phase entre détecteurs

Méthode rapide et robuste

- A réalisé la première détection de GW150914, 3 mins après observation
- **La relativité générale n'est pas requise**

Résultat de l'analyse « burst search »

Trois classes d'évènements selon leur morphologie temps-fréquence

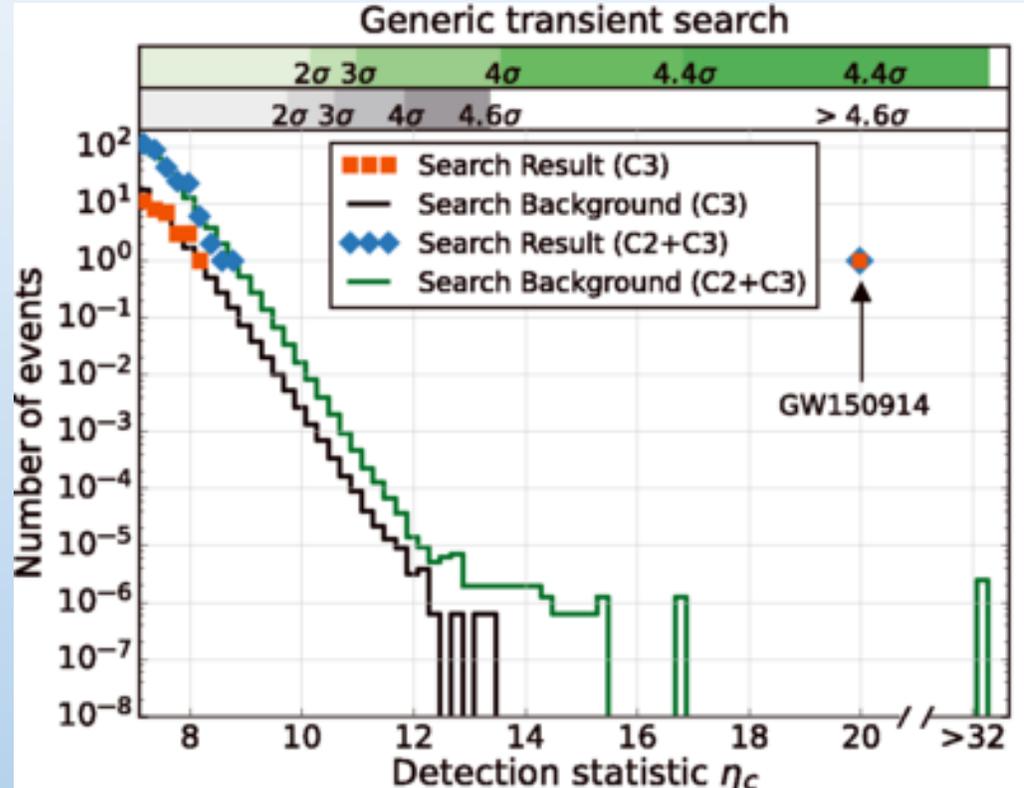
C3 : évènements dont la fréquence croît au cours du temps – comme CBC

GW150914 est l'évènement le plus fort de la classe C3: $\eta_c = 20$

Avec $T_{\text{bckd}} = 67400$ ans on obtient

FAR < 1 / 22500 ans

FAP < $2 \cdot 10^{-6}$ → $> 4.6 \sigma$



Ne cherche pas de modèle théorique spécifique.

Seulement de excès de puissance, sur une courte durée, dans une représentation temps-fréquence du signal.

Reconstruit des formes de signaux pour chaque détecteur à partir d'une méthode de maximum de likelihood

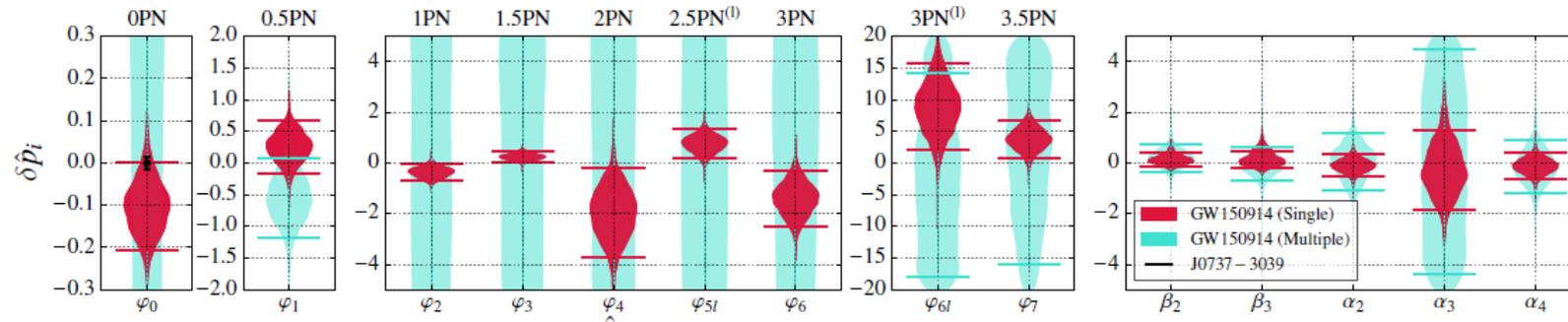
$$\eta_c = \sqrt{\frac{2E_c}{(1 + E_n/E_c)}}$$

E_c : dimensionless **coherent signal energy** obtained by cross-correlating the two reconstructed waveforms

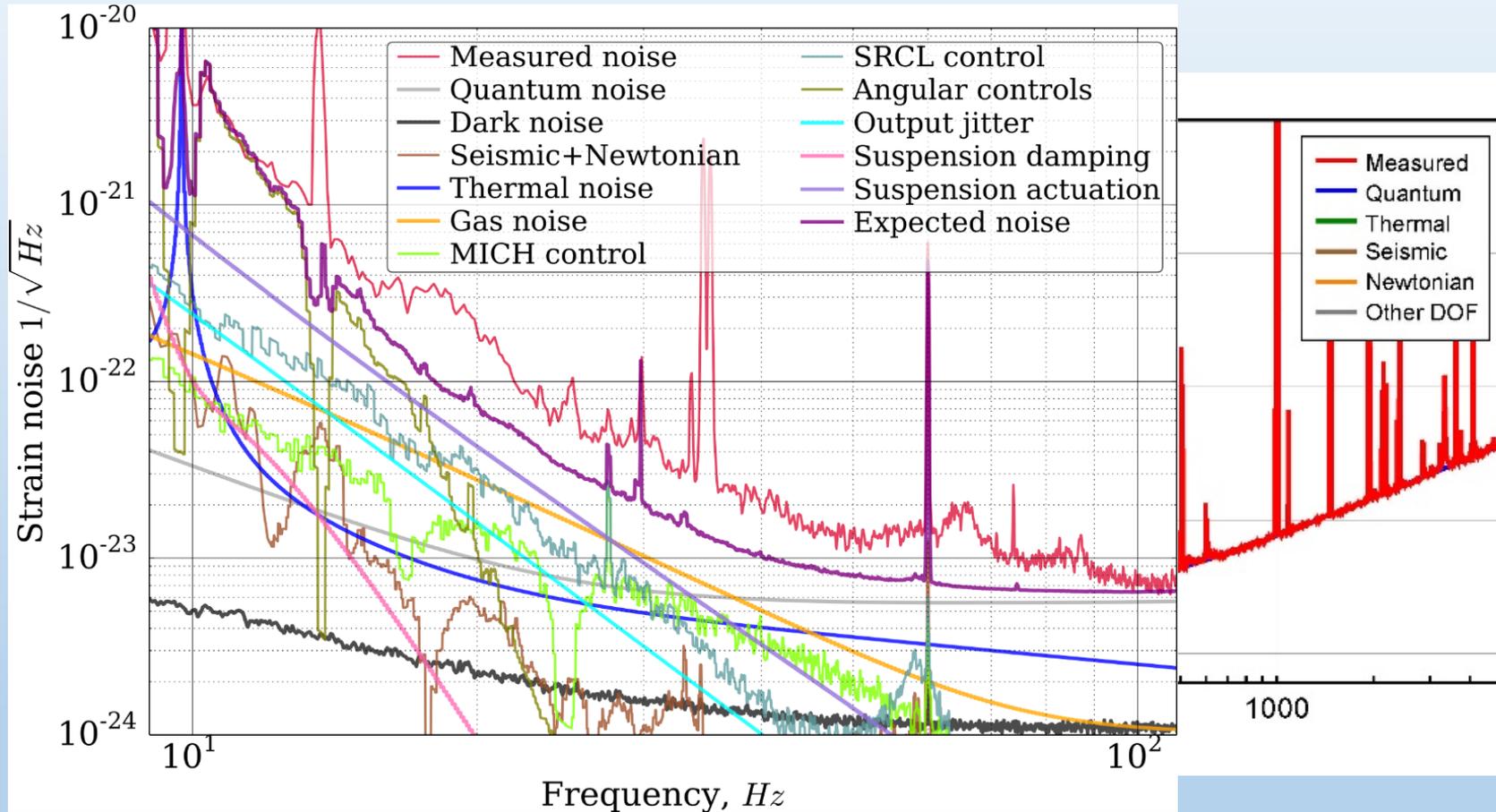
E_n : dimensionless **residual noise energy** after reconstructed signal is subtracted from data

Test de la Relativité Générale avec GW150914

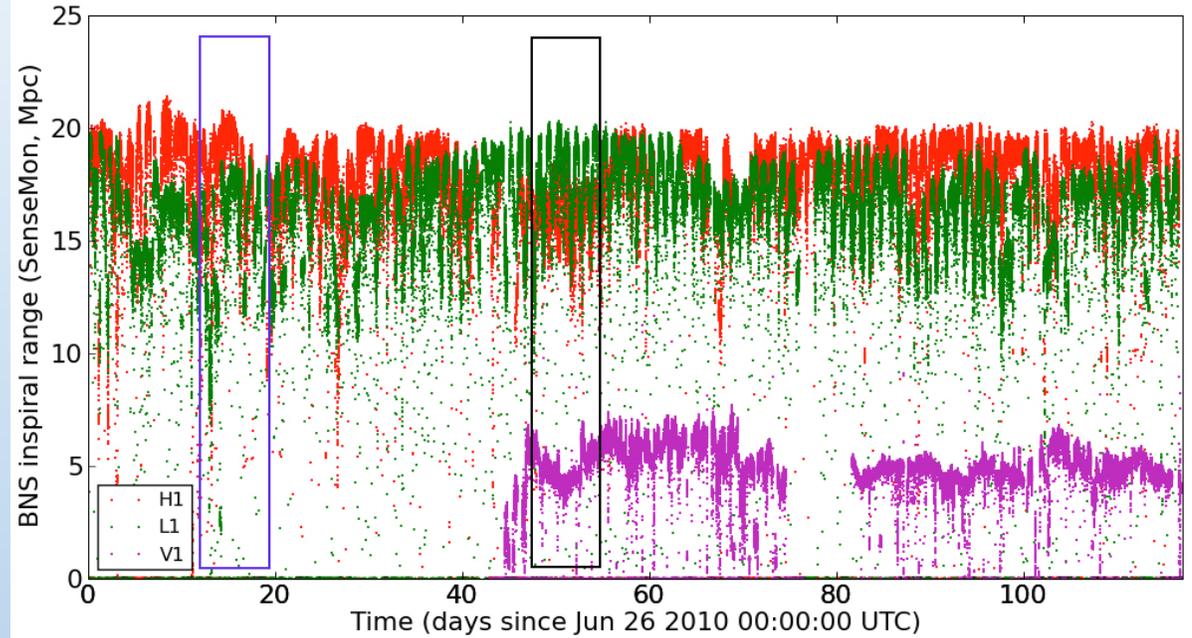
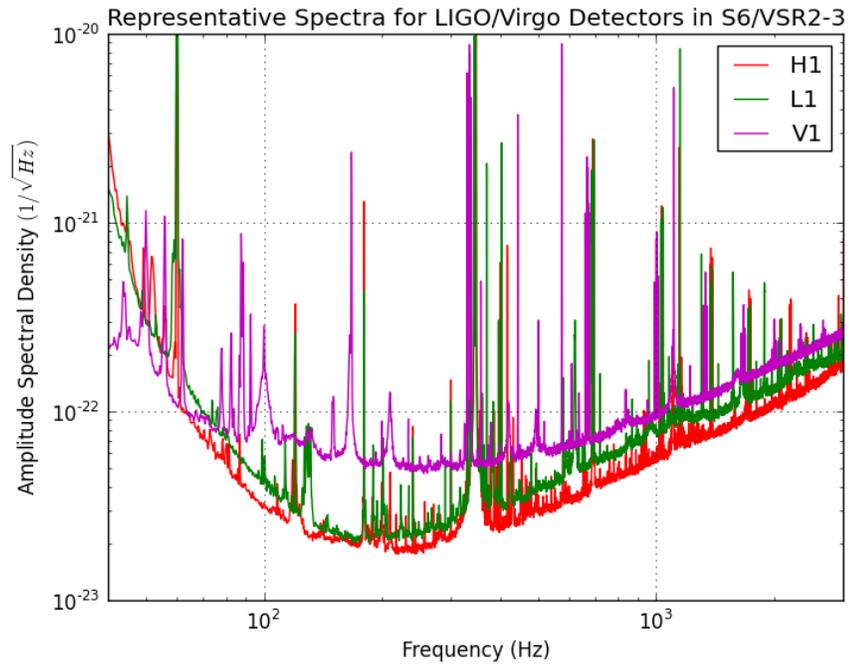
waveform regime	parameter	f -dependence	median		GR quantile		$\log_{10} B_{\text{model}}^{\text{GR}}$	
			single	multiple	single	multiple	single	multiple
early-inspiral regime	$\delta\hat{\varphi}_0$	$f^{-5/3}$	$-0.1^{+0.1}_{-0.1}$	$1.3^{+3.0}_{-3.2}$	0.94	0.30	1.9 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_1$	$f^{-4/3}$	$0.3^{+0.4}_{-0.4}$	$-0.5^{+0.6}_{-0.6}$	0.16	0.93	1.6 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_2$	f^{-1}	$-0.4^{+0.3}_{-0.4}$	$-1.6^{+18.8}_{-16.6}$	0.96	0.56	1.2 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_3$	$f^{-2/3}$	$0.2^{+0.2}_{-0.2}$	$2.0^{+13.4}_{-13.9}$	0.02	0.42	1.2 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_4$	$f^{-1/3}$	$-1.9^{+1.6}_{-1.7}$	$-1.9^{+19.3}_{-16.4}$	0.98	0.56	0.3 ± 0.2	3.7 ± 0.6
	$\delta\hat{\varphi}_{5l}$	$\log(f)$	$0.8^{+0.5}_{-0.6}$	$-1.4^{+18.6}_{-16.9}$	0.01	0.55	0.7 ± 0.4	
	$\delta\hat{\varphi}_6$	$f^{1/3}$	$-1.4^{+1.1}_{-1.1}$	$1.2^{+16.8}_{-18.9}$	0.99	0.47	0.4 ± 0.2	
	$\delta\hat{\varphi}_{6l}$	$f^{1/3} \log(f)$	$8.9^{+6.8}_{-6.8}$	$-1.9^{+19.1}_{-16.1}$	0.02	0.57	-0.3 ± 0.2	
intermediate regime	$\delta\hat{\beta}_2$	$\log f$	$0.1^{+0.4}_{-0.3}$	$0.2^{+0.6}_{-0.5}$	0.24	0.28	1.4 ± 0.2	2.3 ± 0.2
	$\delta\hat{\beta}_3$	f^{-3}	$0.1^{+0.6}_{-0.3}$	$-0.0^{+0.8}_{-0.7}$	0.31	0.56	1.2 ± 0.4	
merger-ringdown regime	$\delta\hat{\alpha}_2$	f^{-1}	$-0.1^{+0.4}_{-0.4}$	$0.0^{+1.0}_{-1.2}$	0.68	0.50	1.2 ± 0.2	
	$\delta\hat{\alpha}_3$	$f^{3/4}$	$-0.3^{+1.9}_{-1.5}$	$0.0^{+4.4}_{-4.4}$	0.60	0.51	0.7 ± 0.2	2.1 ± 0.4
	$\delta\hat{\alpha}_4$	$\tan^{-1}(af + b)$	$-0.1^{+0.5}_{-0.5}$	$-0.1^{+1.1}_{-1.0}$	0.68	0.62	1.1 ± 0.2	



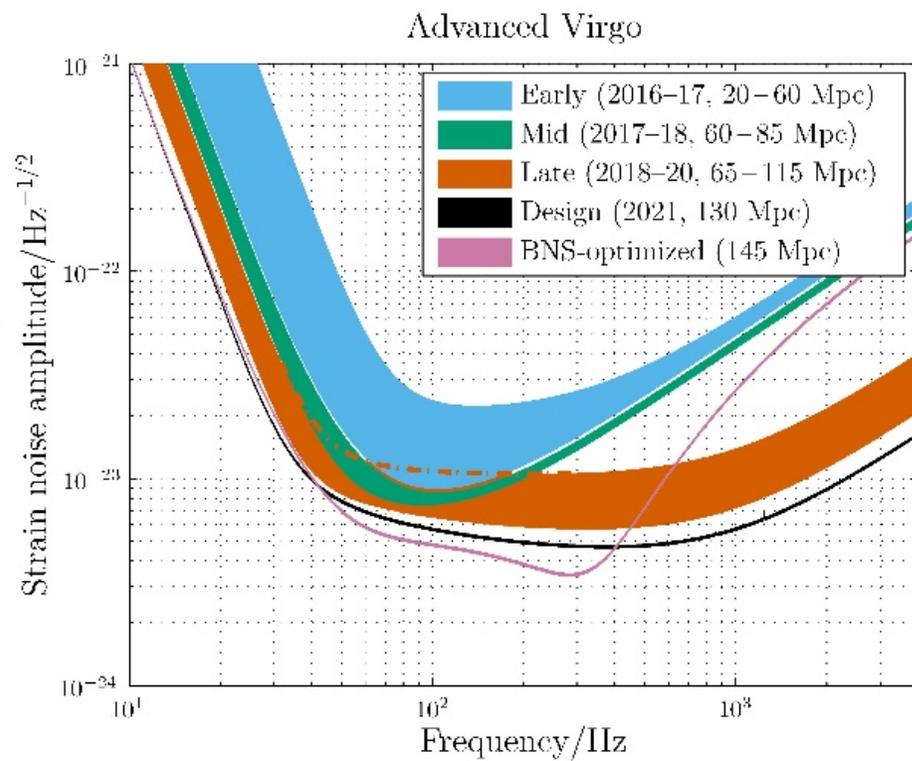
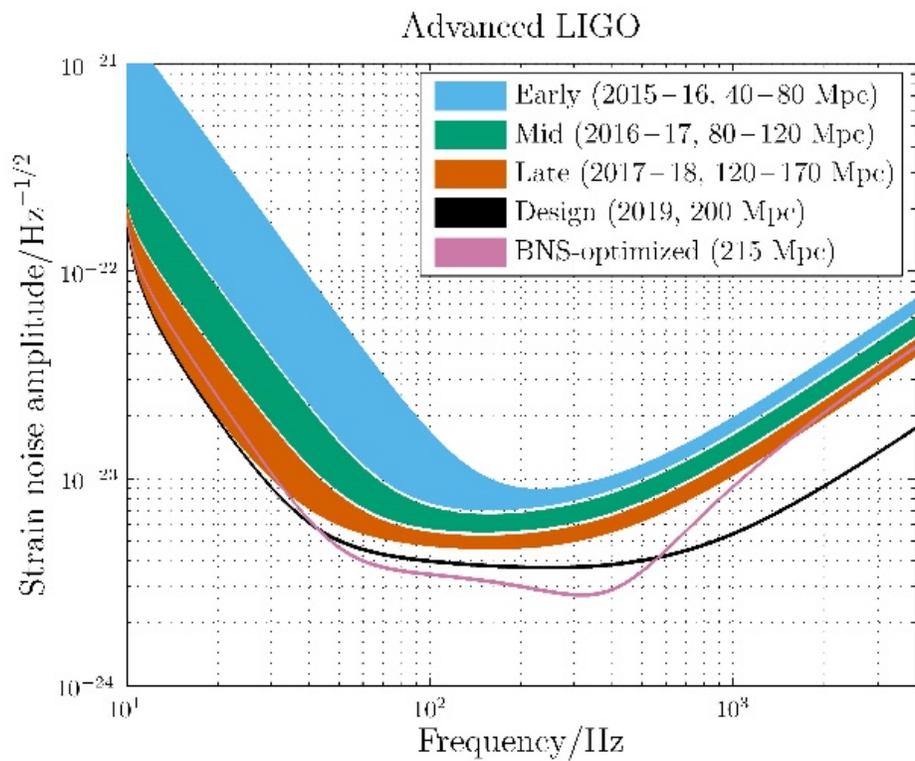
Comprendre les bruits qui limitent la sensibilité



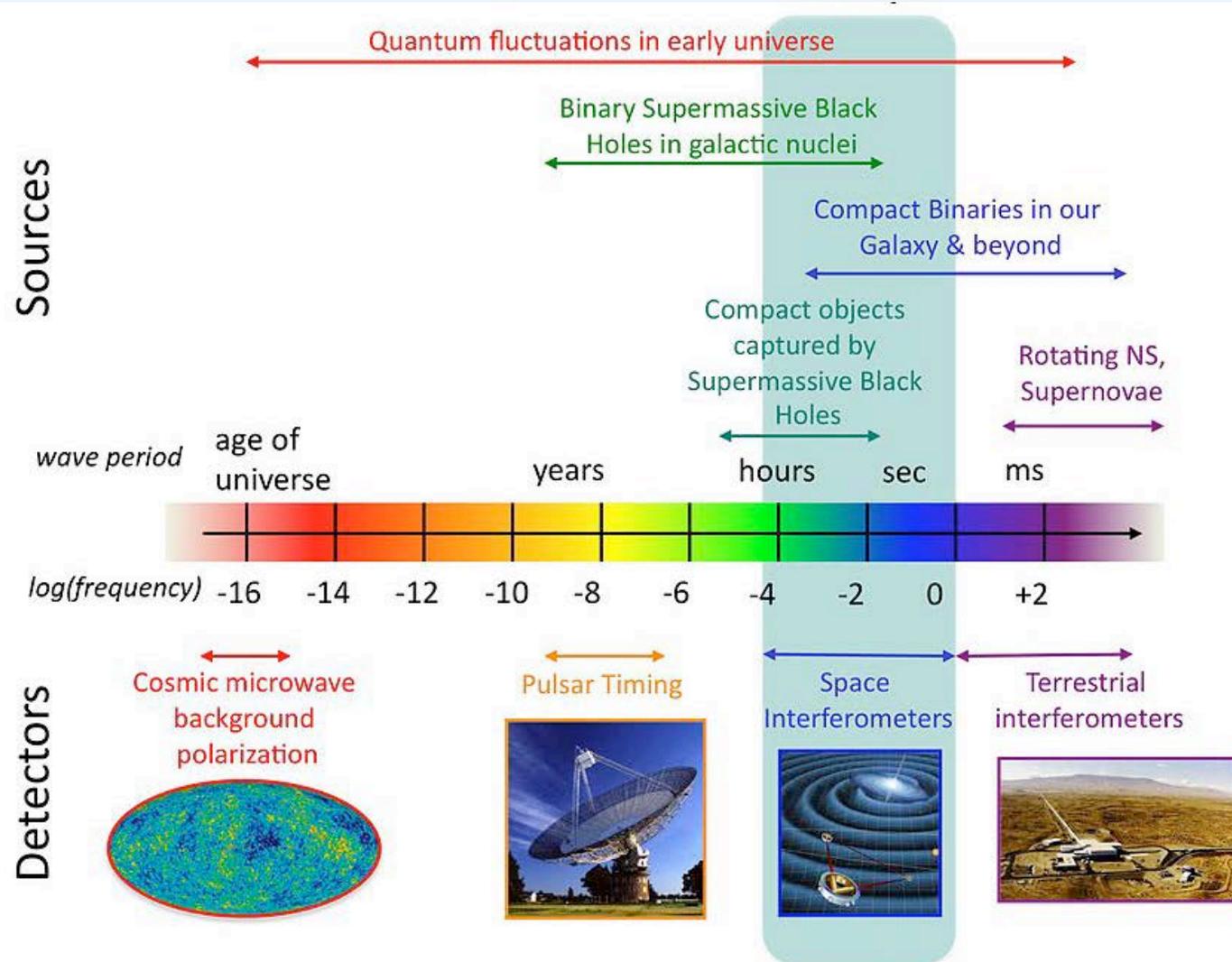
Les performances il y a 5 ans



Les performances futures



L'astronomie des ondes gravitationnelles



Fond stochastique d'ondes gravitationnelles de BBH

- GW150914 suggère une population de systèmes binaires de trous noirs avec des masses élevées
- Le bruit de fond stochastique qui en résulte pourrait être plus élevé que prévu
- Estimation de la densité d'énergie correspondante:

$$\Omega_{\text{GW}}(f = 25 \text{ Hz}) = 1.1_{-0.9}^{+2.7} \times 10^{-9}$$

- Incertitude statistique domine (1 seul évènement observé pour l'instant)
- Fond stochastique potentiellement détectable par Advanced LIGO / Advanced Virgo à leurs sensibilités nominales

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{f}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{df}$$

