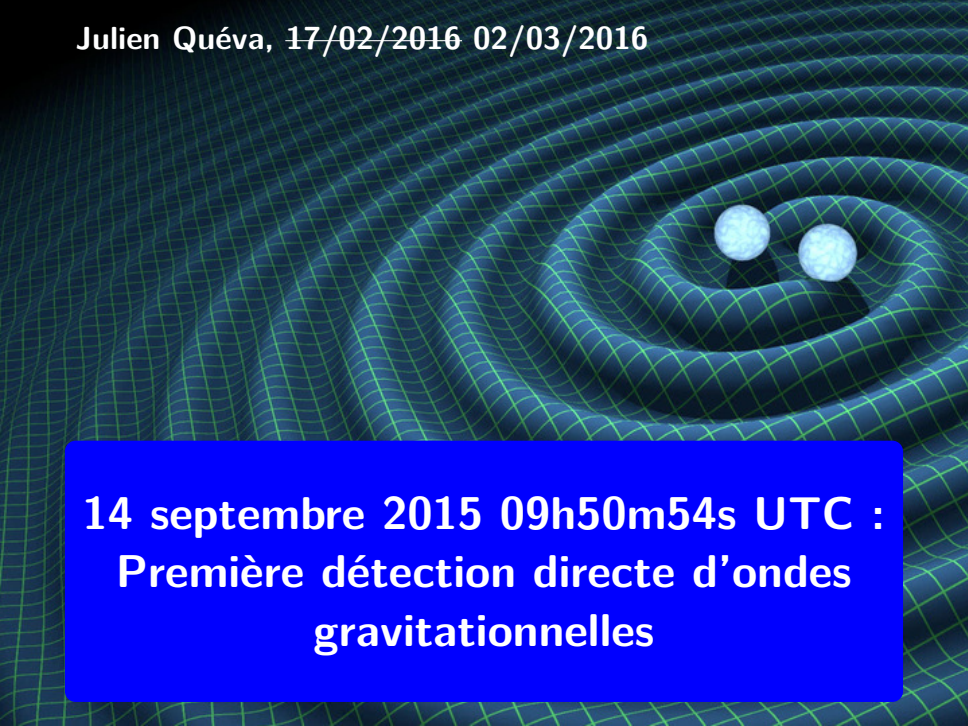


Julien Quéva, 17/02/2016 02/03/2016

A 3D visualization of a gravitational well, represented by a blue grid that curves downwards to form a deep, circular depression. Two white, glowing spheres are positioned at the bottom of the well, representing black holes. The background is a dark blue gradient with a grid pattern.

**14 septembre 2015 09h50m54s UTC :
Première détection directe d'ondes
gravitationnelles**

Un moment historique !

“Ladies and gentlemen,
we have detected gravitational waves.
We did it!”

David Reitze, directeur executif du Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO), conférence de presse NSF/Caltech/MIT/LIGO SC du jeudi 11 février 2016 (à 16h35 heure de Corte) au National Press Club, Washington DC.

Un moment historique !

Le 14 septembre 2015 à 11h51 (Corte), alors que vous sortiez du cours de

L1 : Mathématiques avec M. Cohen,

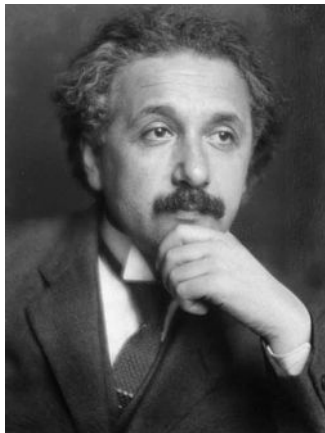
L2 : Analyse 2 avec M. Cagnard,

L3 : Mécanique des milieux continus avec M. Ancey,

l'observatoire LIGO enregistrait (le 14 septembre 2015 à 09h50m54s UTC) un signal qui fera date.

C'est ce signal qui fut révélé lors de la conférence de presse du 11 février 2016 et il est exceptionnel à plus d'un titre.

Albert Einstein, encore



Albert Einstein

1878–1955

ETH Zürich – . . . – IAS Princeton

L'entreprise d'Einstein 1907–1915

Une fois la relativité (restreinte) achevée il est clair que c'est insuffisant : les repères inertiels y sont (trop) privilégiés.

1907 (1908 et 1911) : un mouvement accéléré de la relativité restreinte est indistinguable d'une chute libre.

1911 : Il prédit la déflexion de la lumière par les corps massifs (calcul faux d'un facteur 2). Les astronomes s'emparent du problème.

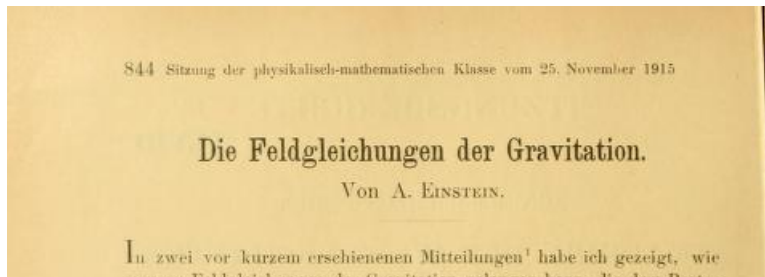
1913 et 1914 : Travaille avec Marcel Grossmann sur les techniques mathématiques nécessaires à (ce qui sera) la relativité générale (géométrie différentielle).

L'entreprise d'Einstein 1907–1915

25 Novembre 1915 : Il soumet l'article fondateur de la relativité général : "Die Feldgleichungen der Gravitation", Preussische Akademie der Wissenschaften, (4p!!!)

Ces équations de la gravitation relient la géométrie de l'espace-temps (G) à son contenu en énergie (T).

Mai 1919 : observation de la déflexion de la lumière par une expédition menée par Sir Arthur Eddington à Sobral (Brésil) et Príncipe (côte ouest de l'Afrique). [Discutable]



1916 : Les ondes gravitationnelles

Einstein publie beaucoup de (petits) papier, se contredisant les uns après les autres.

En **1916** il publie deux articles qui expliquent plus simplement sa *théorie* et qui remportent un franc succès.

Précisément c'est dans son article du 22 juin 1916, dans son *intégration approximative des équations du champ de gravité*, que les ondes gravitationnelles apparaissent, comme apparaissent naturellement les ondes EM des équations de Maxwell.

Il y a une erreur dans l'article de 1916, corrigée en 1918.

Et là s'en suit un vide de 40 ans ...

und die gesuchten allgemeinen Relativitätsgleichungen in geschlossener Form. Ausstelle von (42) ergibt sich daraus rückwärts das System

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_{\mu\nu}^{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} + T_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} &= -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right) \\ \sqrt{-g} &= 1. \end{aligned} \right\} (53).$$

Es muss zugegeben werden, dass diese Form der Energieerhaltung der Materie durch das Relativitätspostulat allein nicht gerechtfertigt wird. Deshalb haben wir in den Vorlesungen ~~aus der~~ ^{abgeleitet} die Forderung ~~hergeleitet~~ ^{abgeleitet}, dass die Energie des Gravitationsfeldes in gleicher Weise gravitierend wirkt, wie jegliche Energie anderer Art. Der stärkste Grund für die Wahl der vorstehenden Gleichungen liegt aber darin

$T_{\sigma}^{\alpha} = T_{\alpha}^{\sigma}$ und $g^{\beta\gamma} T_{\beta}^{\alpha} = T^{\alpha\beta}$ sollen symmetrische Tensoren

40 ans de traversée du désert

L'approximation d'Einstein (champs faibles) suscite le scepticisme.

L'article d'Einstein et Rosen (Nathan) de 1936 ne conclut pas à l'existence des ondes.

On oscille entre :

- les ondes gravitationnelles n'existent pas,
- les ondes gravitationnelles existent, mais sont trop faibles,
- on cherche à remplacer la relativité générale

et de toute façons la physique est tournée vers les particules élémentaires.

La **conférence de Chapel Hill** (Caroline du nord) en **1957** clos le débat.

Renaissance de la relativité générale

Post-WWII se tient la première conférence internationale dédiée à la relativité générale à Bern en 1955.

La seconde conférence à lieu à **Chapel Hill** en 1957.

Hermann Bondi et Richard Feynman y montrent de façons convaincante que 1. les ondes gravitationnelles existent 2. elles transportent de l'énergie au moyen du *sticky beads argument*.



Hermann Bondi

1919–2005

King's College –
Cambridge U



Richard Feynman

1918–1988

Princeton –
Caltech

Les perles collantes



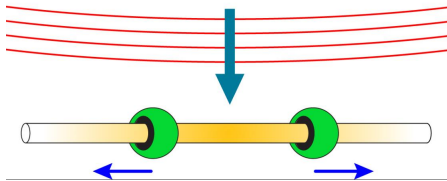
Felix Pirani

1928–2015

Toronto U–Cambridge U
(étudiant de Bondi)

Pirani lie le PFD (Newton) et l'équation de déviation des géodésiques (forces de marées) : les ondes gravitationnelles sont observables.

Bondi et Feynman poussent le raisonnement : le passage d'une onde gravitationnelle, en raison de la friction des perles, élève la température.



→ Les ondes grav. sont mesurables.

Le problème de l'intensité de la gravité

Interaction	Intensité	Portée (en m)
Forte	10^{38}	10^{-15}
E-M	10^{36}	∞
Faible	10^{25}	10^{-18}
Gravité	1	∞

Donc, même si les ondes gravitationnelles sont réelles, leurs effets restent ridiculement faibles.

1969 : Weber, un paquet d'erreurs



Joseph Weber

1919–2000

US Naval Academy–
Maryland U

Barre Weber : cylindre en aluminium, $h = 2$ m, $D = 1$ m résonnant à 1660 Hz

“Isolé” : des vibrations, des vibrations sismiques, des perturbations EM. Uniquement le bruit thermique $\rightarrow \delta \propto 10^{-16}$ m.

1969 & 1970 détection de centaines d'ondes gravit. ...jamais observées par d'autres physiciens (**Garching**, Meudon, CERN, ...)

La raison des résultats erronés de Weber :

mauvaise analyse du signal

Les leçons de Weber

L'insistance de Weber et celle de ses contradicteurs mène à la même conclusion : on peut mesurer les effets des ondes gravitationnelles.

[Weber reste le “père” de la détection d’ondes gravitationnelles.]

En **1974** on en est encore plus sûr : on mesure indirectement les effets de ces ondes gravitationnelles.

THE Binary Pulsar

En 1974 Joseph Taylor et Russel Hulse découvrent un pulsar¹ dans la constellation de l'aigle.

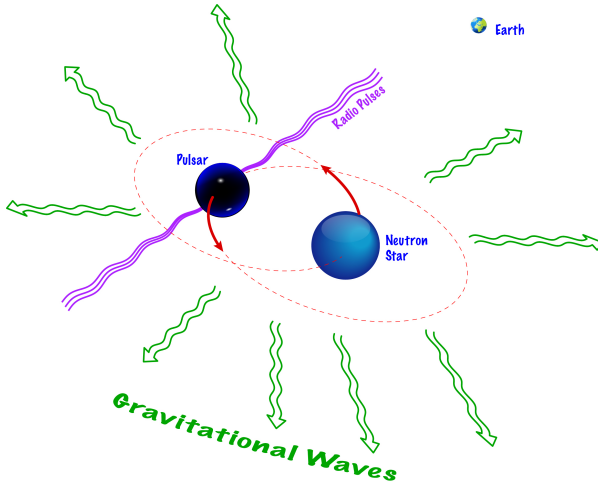
L'observation du pulsar est précise (très!), sa période de pulsation est de 59 ms. Cette période varie régulièrement toutes les 7,75 heures.

Ils déduisent que cette variation est due à la présence d'un second corps, invisible aux instruments, le pulsar orbite autour d'une autre étoile à neutrons [lois de Kepler].

Ces deux corps célestes forment un système binaire PSR B1913 + 16, ou le pulsar binaire d'Hulse-Taylor, ou THE Binary Pulsar.

1. étoile à neutron hautement magnétisée → faisceau EM périodique

Rayonnement gravitationnel



La période orbitale du système **décroit** exactement tel qu'il le faut si il y a émission d'ondes gravitationnelles dues à l'accélération de corps massifs.

Un Nobel pour les pulsars



Russel A. Hulse
1950–

UMass Amherst – Dallas U



Joseph H. Taylor Jr.
1941–

Harvard U – Princeton U

Se partagent le prix Nobel 1993 pour « la découverte d'un nouveau type de pulsar, une découverte qui a ouverte de nouvelles possibilités pour l'étude de la gravitation ».

Un exercice du cours au MIT

En 1967 Rainer Weiss est chargé du cours de relativité générale au MIT.

Il ne comprend rien aux expériences de Weber et il ne peut les expliquer à ses étudiants.

S'appuyant sur une idée de Pirani (utiliser la lumière!) il conçoit une expérience de pensée : des masses libres dont on mesure le temps de parcours de la lumière entre ces différentes masses.

Les calculs sont suffisamment simples pour les étudiants.

Le résultat de ces séminaires fait l'objet d'un rapport d'activités où est décrit le principe du montage.

Le rapport de 1972

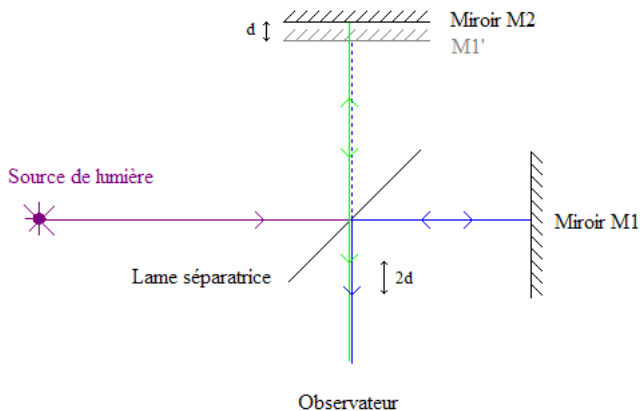
The prediction of gravitational radiation that travels at the speed of light has been an essential part of every gravitational theory since the discovery of special relativity. In 1918, Einstein,¹ using a weak-field approximation in his very successful geometrical theory of gravity (the general theory of relativity), indicated the form that gravitational waves would take in this theory and demonstrated that systems with time-variant mass quadrupole moments would lose energy by gravitational radiation. It was evident to Einstein that since gravitational radiation is extremely weak, the most likely measurable radiation would come from astronomical sources. For many years the subject of gravitational radiation remained the province of a few dedicated theorists; however, the recent discovery of the pulsars and the pioneering and controversial experiments of Weber^{2,3} at the University of Maryland have engendered a new interest in the field.

Le rapport de 1972 : le principe

The principal idea of the antenna is to place free masses at several locations and measure their separations interferometrically. The notion is not new; it has appeared as a gedanken experiment in F. A. E. Pirani's⁹ studies of the measurable properties of the Riemann tensor. However, the realization that with the advent of lasers it is feasible to detect gravitational waves by using this technique grew out of an undergraduate seminar that I ran at M. I. T. several years ago, and has been independently discovered by Dr. Philip Chapman of the National Aeronautics and Space Administration, Houston.

A schematic diagram of an electromagnetically coupled gravitational antenna is shown in Fig. V-20. It is fundamentally a Michelson interferometer operating in vacuum with the mirrors and beam splitter mounted on horizontal seismometer suspensions. The

L'interféromètre de Michelson : un grand classique



On faisant varier la distance d d'un miroir on introduit une **différence de marche** $d \rightarrow$ observe des figures d'interférences.

Un proto-LIGO

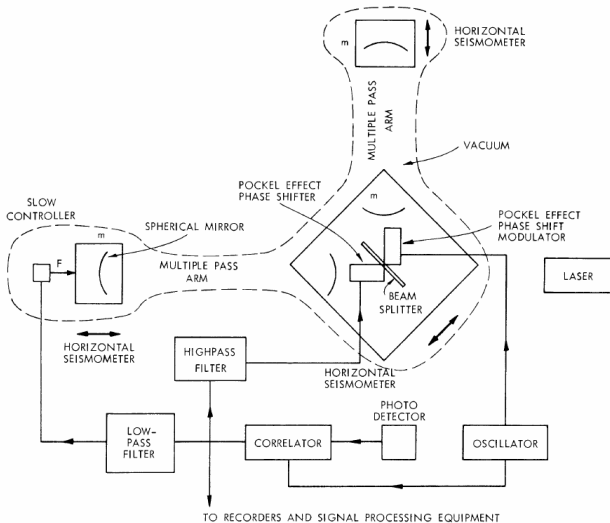


Fig. V-20. Proposed antenna.

Much ado about nothing

Dès la conception du projet ils distinguent les bruits interférant avec le signal :

- bruit dans l'amplitude du laser
- bruit dans la phase et instabilité de la fréquence du signal
- bruit mécanique (thermique)
- bruit de pression de radiation de la lumière laser
- bruit sismique
- bruit dû à un gradient de température
- bruit dû aux faisceaux de particules cosmiques (muons, ...)
- bruit dû au gradient de gravité (détecteur étendu)
- bruit électromagnétique

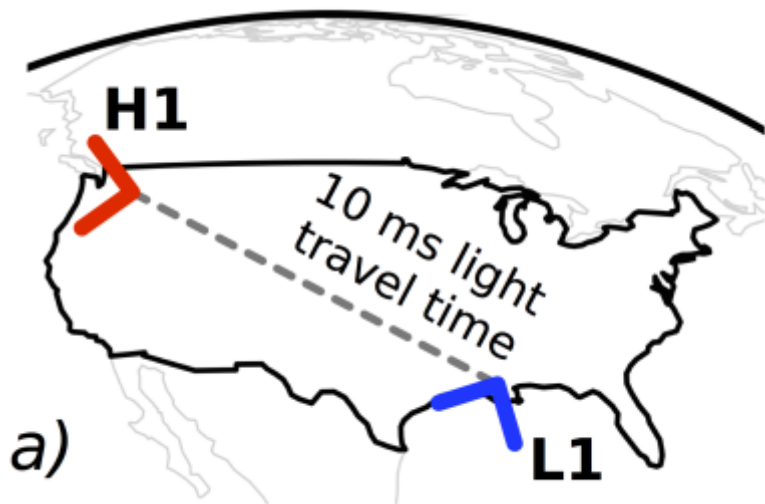
Le projet LIGO

- 1975** Rencontre de Kip Thorne et Rainer Weiss à Washington. Thorne (théoricien reconnu) souhaite voir des confirmations de la relativité générale.
- 1977** Kip Thorne recrute Ronald Drever (expérimentateur) pour monter un projet “ondes gravitationnelles” à Caltech.
- 1984** La National Science Foundation (NSF) fusionne l'équipe de Caltech et du MIT.
- 1990** Acceptation de la construction du projet LIGO par la NSB [L'EXPÉRIENCE LIGO]
- 1992** Les sites d'Hanford (Wash.) et Livingston (Louis.) sont sélectionnés pour accueillir les détecteurs
- 1994–95** Construction ...

Le projet LIGO

- 2002** Début du fonctionnement des deux sites de LIGO avec GEO600 (Hanovre)
- 2004** Acceptation du projet Advanced LIGO (aLIGO)
- 2006** Fonctionnement nominal de LIGO
- 2007** Accord de coopération avec Virgo (Cascina \approx Pise \approx Livourne) [INFN/CNRS/NIKHEF/POGRAW/RMKI]
- 2010** Fin de LIGO début d'installation d'aLIGO
- 2011–14** Installation, tests
- 2015** Dépassement de la sensibilité de LIGO par aLIGO

Deux sites : Hanford et Livingston



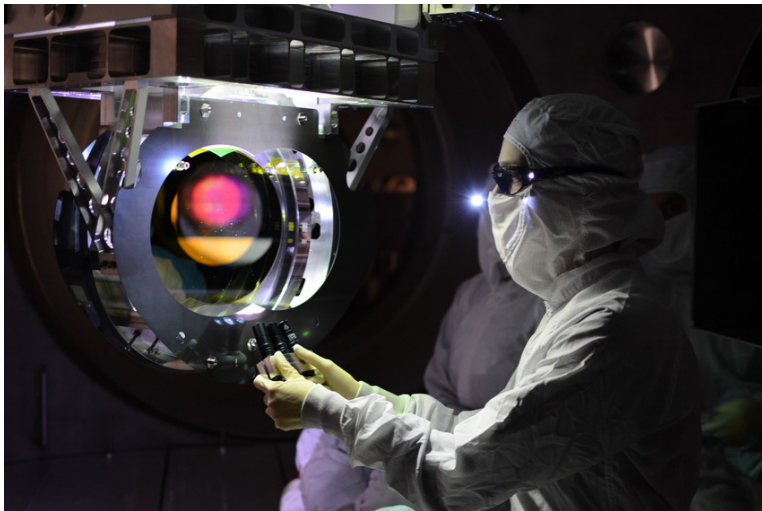
Hanford



Livingston



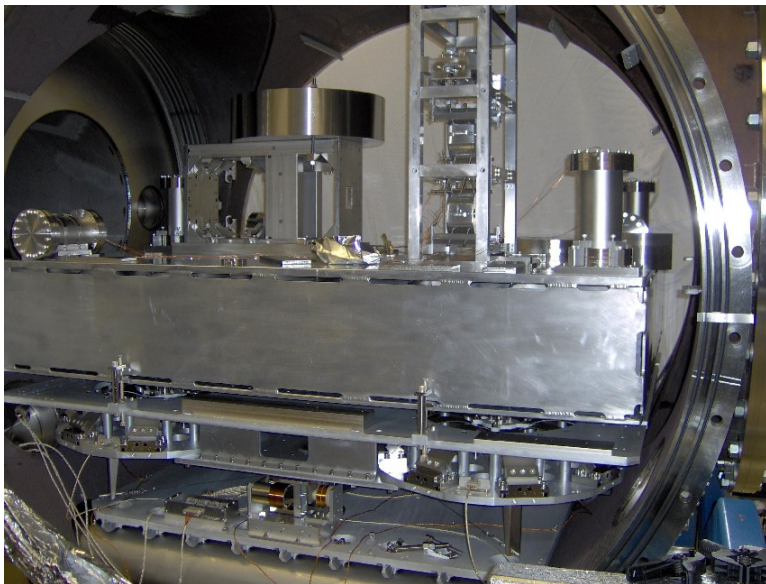
Des miroirs pour masses test



Des miroirs pour masses test



Atténuateur sismique



LIGO en détail

- Deux bras perpendiculaires de longueur $L = 4$ km, on mesure la déformation $h(t) = (\Delta L_x - \Delta L_y)/L$
- Chaque bras contient une cavité optique résonante formée par deux miroirs (masse test) multipliant le déphasage d'un facteur 300
- Le montage passe d'un signal optique de 20 W à 100 kW dans chaque bras, $\lambda = 1064$ nm.
- Les tubes ont un diamètre de 1,2 m et sont maintenus à une pression de 1 μ Pa (!)
- sismomètres, accéléromètres, microphones, magnétomètres, météo, détecteurs de particules cosmiques, synchronisations des alimentations électriques, *phase-lock*, horloge atomique, ...
- Les deux sites sont synchronisés *via* GPS à 10 μ s

Principe de LIGO

Cliquer !

Le 14 septembre 2015, jour de l'observation



Marco Drago
Padua U –
Max Planck Institute
for Gravitational
Physics (Hanovre)

Le 14/09/15 il reçoit un mail automatisé d'un *flux* dont il a la charge indiquant un *évènement* observé par les deux sites.

Le signal est tellement fort ($\text{SNR} \approx 24$, vs. ≈ 10) et propre qu'il croit observer une **injection**, un signal factice pour vérifier que le système réagit bien ou que les opérateurs sont attentifs.

Sauf que le système d'injection *aveugle* d'avanced LIGO n'est pas encore opérationnel et personne n'a fait d'injection *ouverte* : le signal est réel.

Entre l'observation et la révélation

Entre le 18 septembre et le 05 octobre : prise de données pour estimer le *bruit de fond* du détecteur.

Analyse poussée du fait qu'il ne s'agit d'une injection in-intentionnelle.

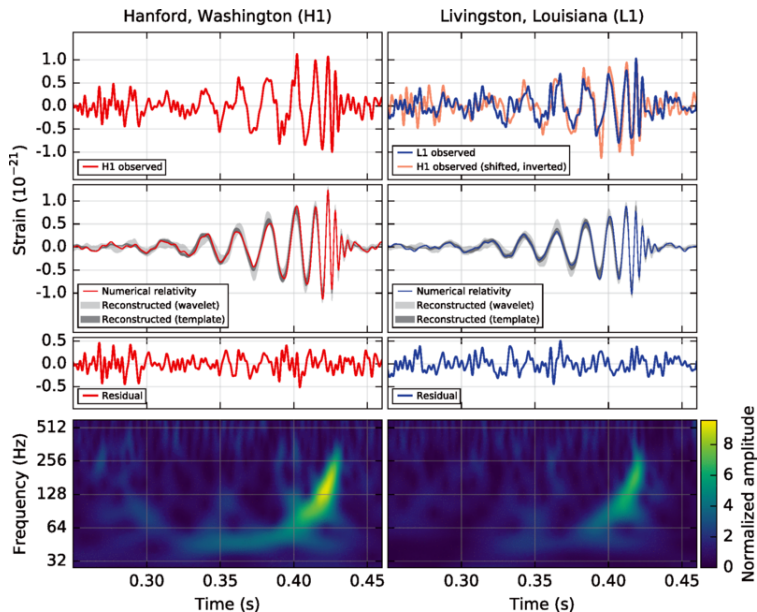
Écriture du résultat tout en gardant le silence sur celui-ci (encore que ...).

Ce fameux jeudi 11 février 2016



Kip Thorne (Caltech), France A. Córdova (NSF), Rainer Weiss (MIT), David Reitze (Caltech), Gabriela González (LSU)

Le signal observé



Noter l'ordre de grandeur : 10^{-21} !

Événement susceptibles d'être observés

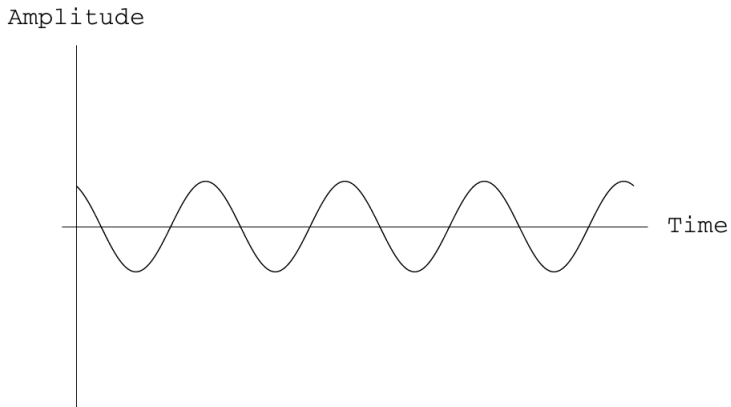
L'intensité de la gravitation étant tellement faible les seules sources possibles doivent être fortement chargées, c'est-à-dire extrêmement massives.

Trois cas sont envisageables :

- Un système binaire compact (naines blanches, étoiles à neutrons).
- La coalescence d'un système binaire.
- Système binaire à ratio extrême, e.g. étoile à neutrons orbitant autour d'un trou noir supermassif ($\approx 10^{10} M_{\odot}$).

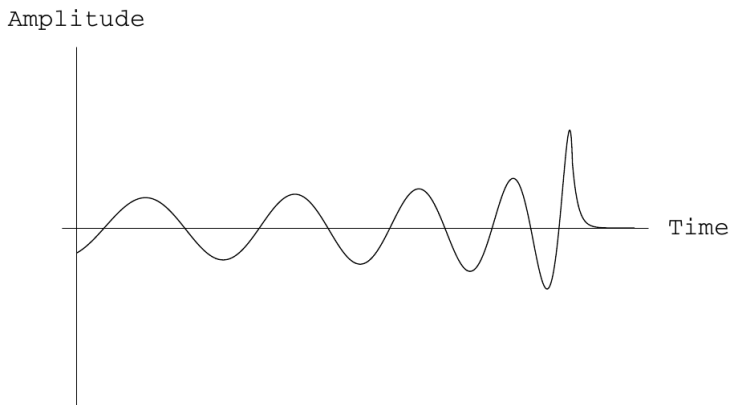
Les équations de la relativité générale sont compliquées (non-linéaires, couplées, pas nécessairement numériquement stables) mais on sait simuler le signal qu'on doit observer pour chaque cas.

Système binaire compact



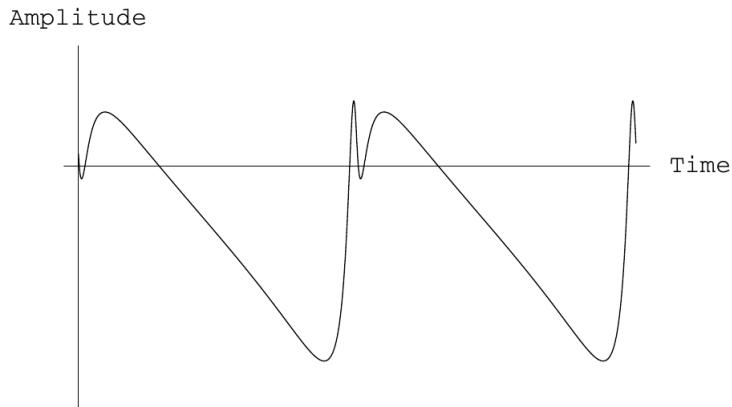
Un signal monochromatique : une sinusoïde

Coalescence d'un système binaire



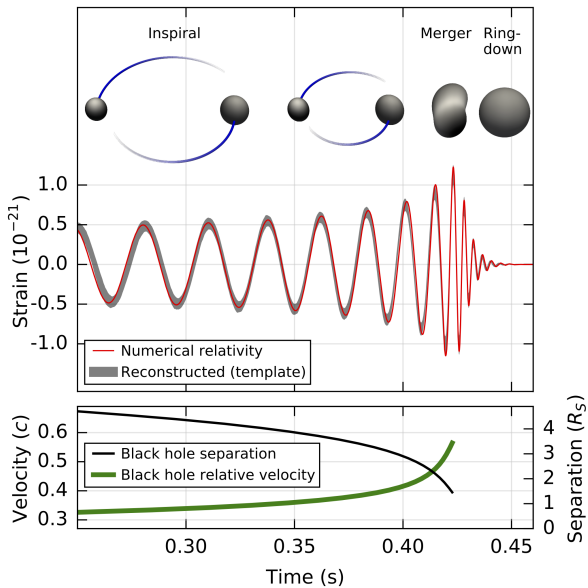
Une accélération (augmentation de la fréquence) jusqu'à la fusion.

Ratio extrême



No comment !

Le signal combiné



Du signal les sources

Du signal (motif) on remonte aux sources.

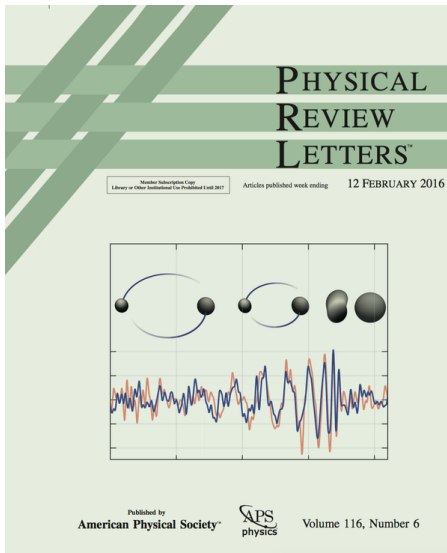
Celui-ci correspond à la fusion de deux trous noirs stellaires de masses respectives $36_{-4}^{+5}M_{\odot}$ et $29_{-4}^{+4}M_{\odot}$.

Il en résulte un trou noir de masse $62_{-4}^{+4}M_{\odot}$ avec l'émission de $3,0_{-0,5}^{+0,5}M_{\odot}c^2 \approx 2 \times 10^{47}$ J sous forme d'ondes gravitationnelles.

Converti en luminosité solaire il s'agit de la puissance (en Watt) de 10^{21} soleils !

Le signal a été nommé **GW150914**.

Publication immédiate dans les PRL



“Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, B.P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (11/02/2016)

L'aube d'une nouvelle ère

- aLIGO n'est même pas au maximum de sensibilité (2021)
 - D'autres sites vont s'ouvrir (advanced Virgo en marche en 2016, INDIGO, KAPRA)
 - L'évènement observé n'est pas le plus violent imaginable
 - eLISA (bras 10^6 km, bande passante très (très) large), LISA Pathfinder envoyé au point de Lagrange L1 le 03 décembre 2015, début projeté 2034
-
- Nouveaux observatoires
 - Fond diffus gravitationnel
 - Les ondes gravitationnelles sont *inécrantables*
 - **Observation directe de trous noirs**

Le spectre des ondes gravitationnelles

