

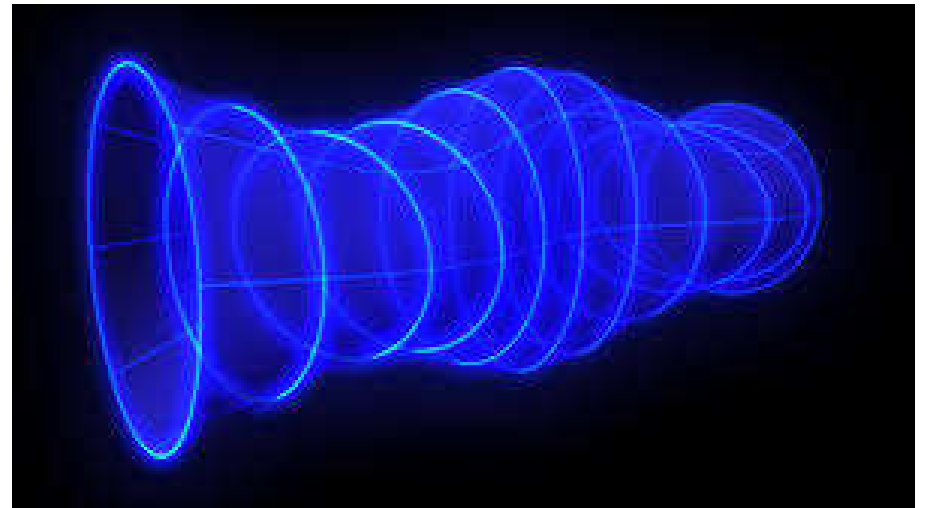
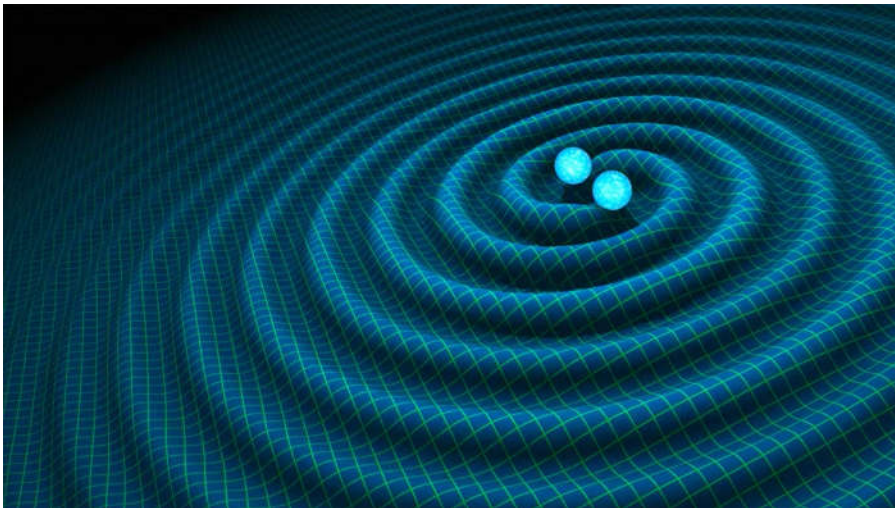


# Ondes gravitationnelles et trous noirs binaires

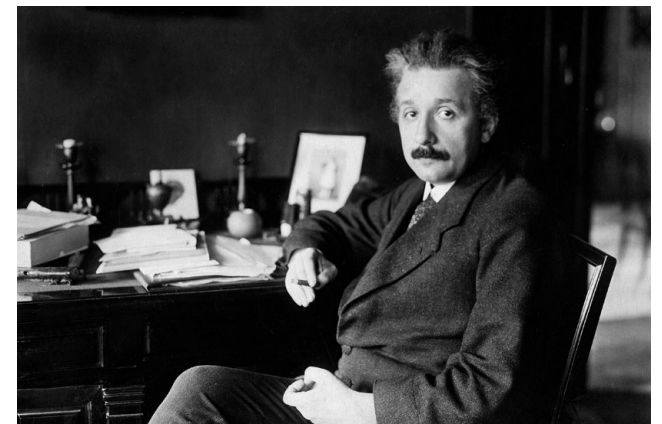
Olivier LAURENT

## Historique

Définition : une onde gravitationnelle est une oscillation de la courbure de l'espace-temps qui se propage à la vitesse de la lumière. Il ne s'agit pas d'une onde se déplaçant dans l'espace-temps mais d'une onde d'espace-temps se déplaçant dans l'espace-temps.



Albert Einstein a prédit l'existence des ondes gravitationnelles en 1916.



# Historique

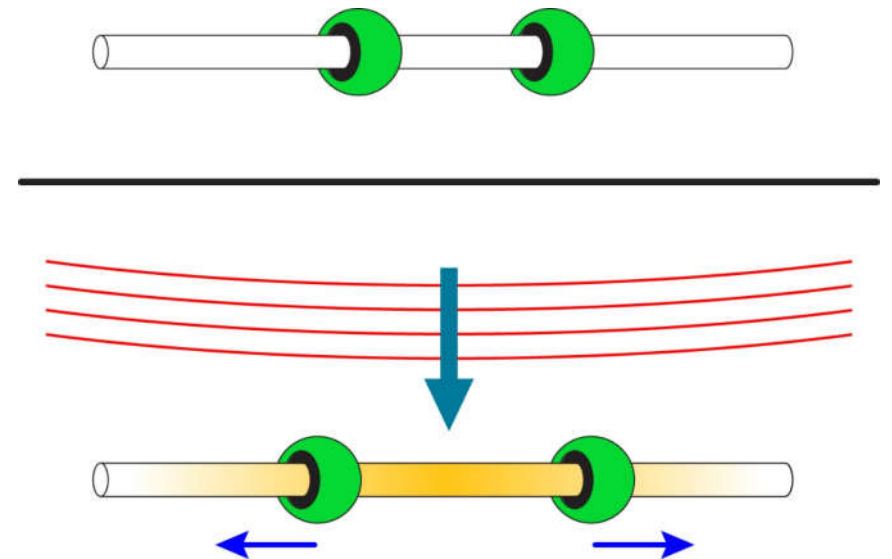
La réalité des ondes gravitationnelles a été longuement débattue, Einstein changeant lui-même plusieurs fois d'avis à ce sujet.

La question était de savoir si ces ondes avaient effectivement une existence physique ou bien résultaient d'un « pur effet de jauge », autrement dit d'un choix de système de coordonnées.

En 1957 lors de la conférence de Chapel Hill, une expérience de pensée (Sticky bead argument – l'argument des perles collantes) proposée par Richard Feynman (et repris par Hermann Bondi) a permis de lever les doutes sur la prédiction théorique des ondes gravitationnelles en utilisant la relativité générale.

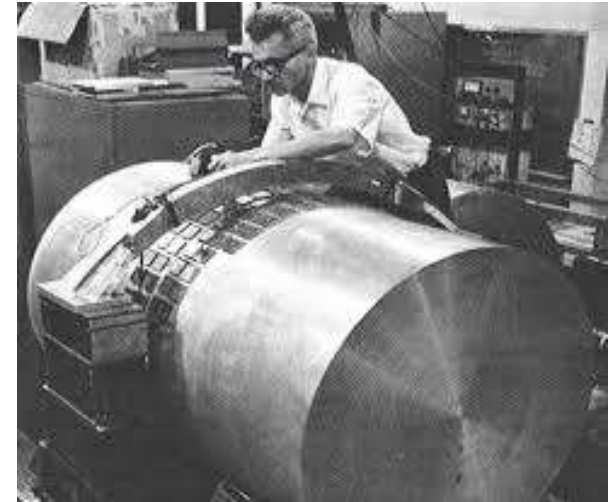
Détecteur d'ondes gravitationnelles de Feynman: Il est constitué de deux perles coulissantes librement (mais avec une petite quantité de frottement) sur une tige rigide.

Quand l'onde passe au travers la tige, les forces atomiques tiennent la longueur de la tige fixe, mais la distance entre les deux perles oscille. Ainsi, les perles frottent contre la tige dissipant de la chaleur et l'onde doit bien transporter de l'énergie mesurable.

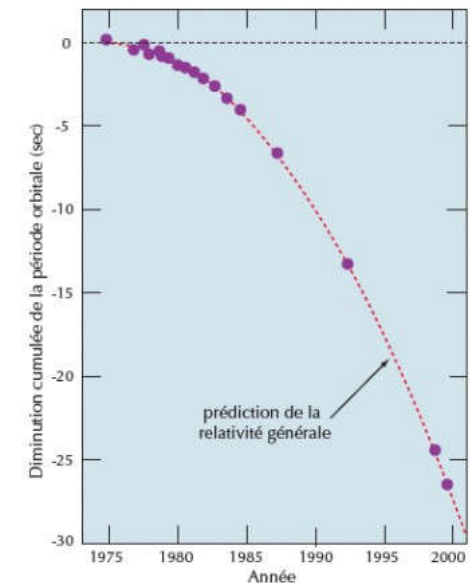


## Historique

La recherche expérimentale pour détecter les ondes gravitationnelles a commencé dans les **années 1960**, avec la réalisation du premier détecteur nommé « **barre de Weber** » par Joseph Weber. Aucune détection n'a pu être confirmée.



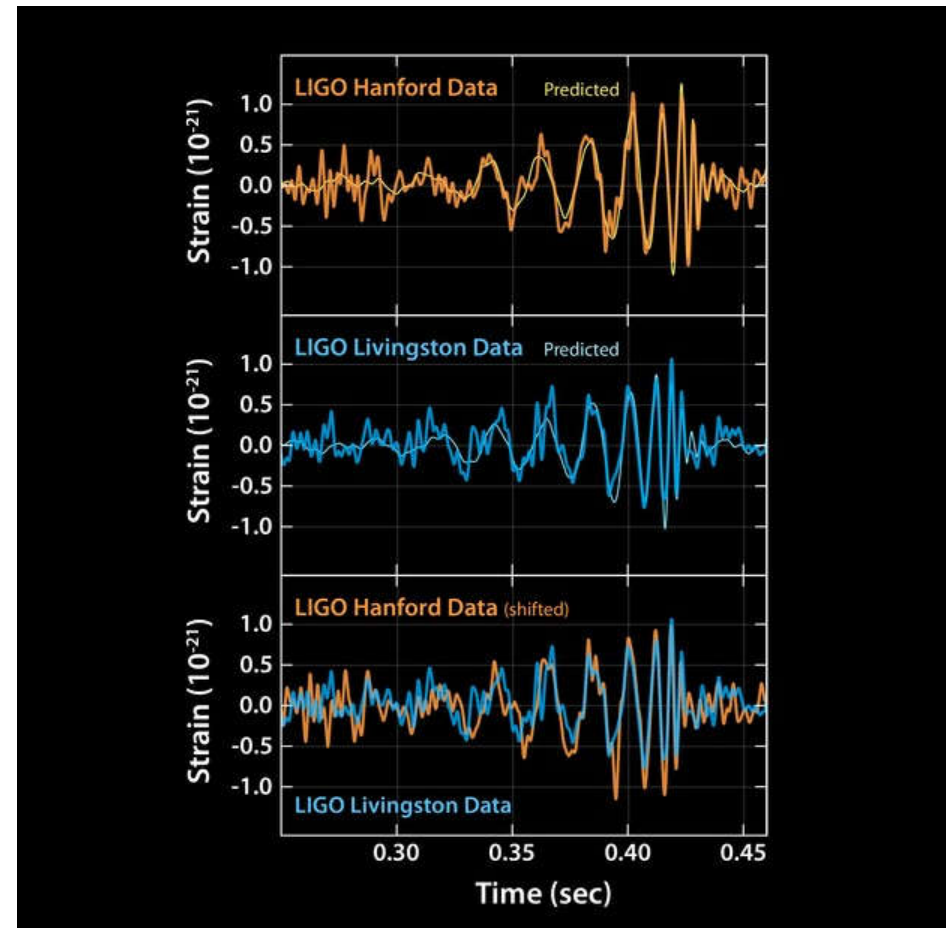
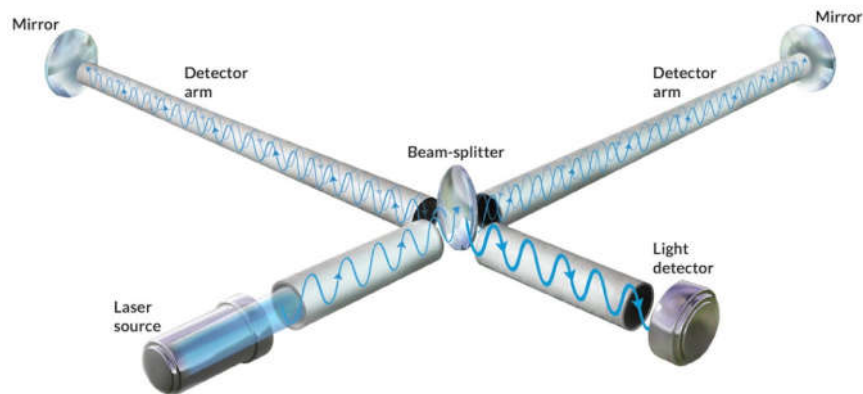
La **première détection indirecte** via la diminution de la période orbitale du **pulsar binaire PSR1913+16** a été faite par Russel Hulse et Joseph Taylor en **1974**.





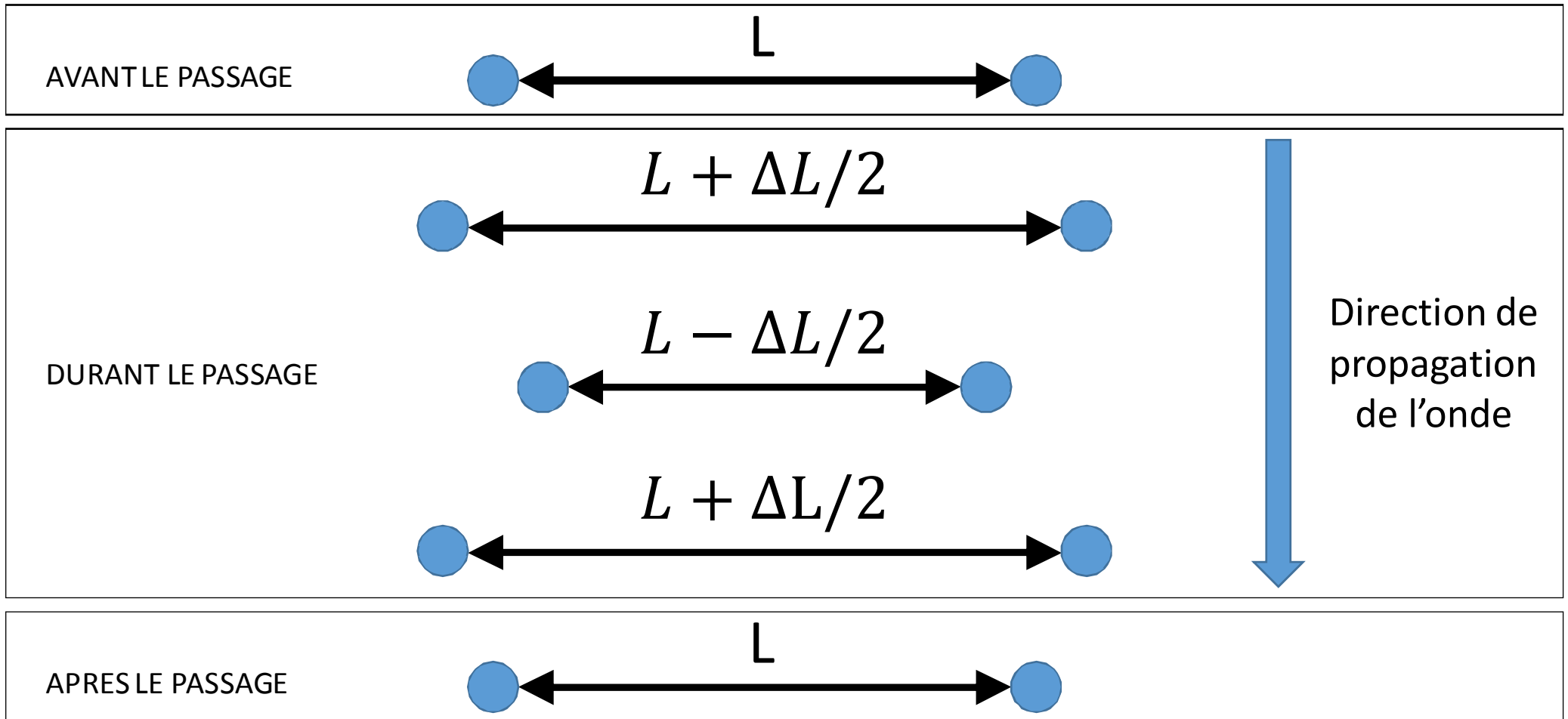
# Historique

La **première détection directe** en utilisant deux interféromètres indépendants américains (LIGO) a été faite le **14 septembre 2015**.



# Description d'une onde gravitationnelle

Lors du passage d'une onde gravitationnelle, l'espace entre 2 particules libres (seules dans l'espace ou en chute libre dans un champ de gravitation uniforme) se dilate et se contracte alternativement.



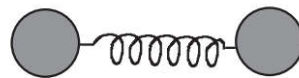
## Comment mesurer cette variation de distance ?

En utilisant une règle rigide: Pas tout à fait, car tous les objets s'étirent en même temps que les 2 particules libres y compris notre mètre étalon.

Mais une règle rigide ne subira pas exactement la même déformation que 2 masses libres aux extrémités de la barre car les atomes liés entre eux dans le mètre étalon contrarient la distorsion imposée par l'onde.

On peut même avoir un mouvement de vibration en résonance (principe de la barre de Weber).

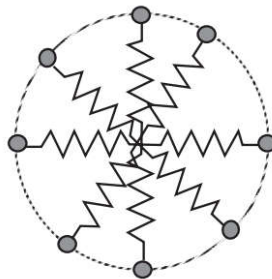
Les distorsions sont donc difficilement mesurables avec des objets rigides et aucune détection n'a été faite avec ce principe.



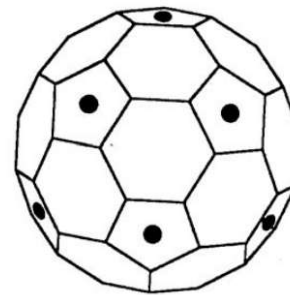
(a)



(b)



(c)



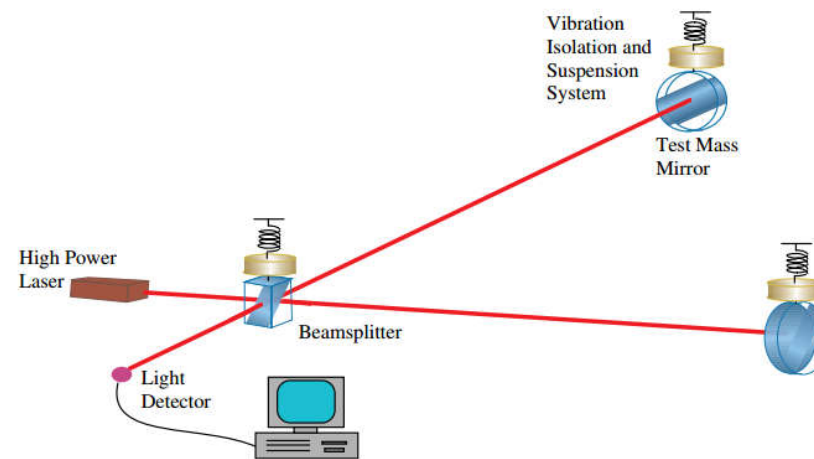
(d)

## Comment mesurer cette variation de distance ?

En utilisant la lumière: Heureusement, la lumière a un statut à part : la vitesse de la lumière est constante localement dans tous les référentiels.

Son trajet le long de sa géodésique est bien perturbé par le passage de l'onde mais sa vitesse reste insensible à la perturbation.

Cette déformation des distances peut donc être détectable en mesurant le temps de parcours de la lumière entre les 2 particules (interféromètres LIGO-VIRGO).



**Figure 10.** Schematic diagram of a Michelson interferometer for use as a gravitational wave detector.

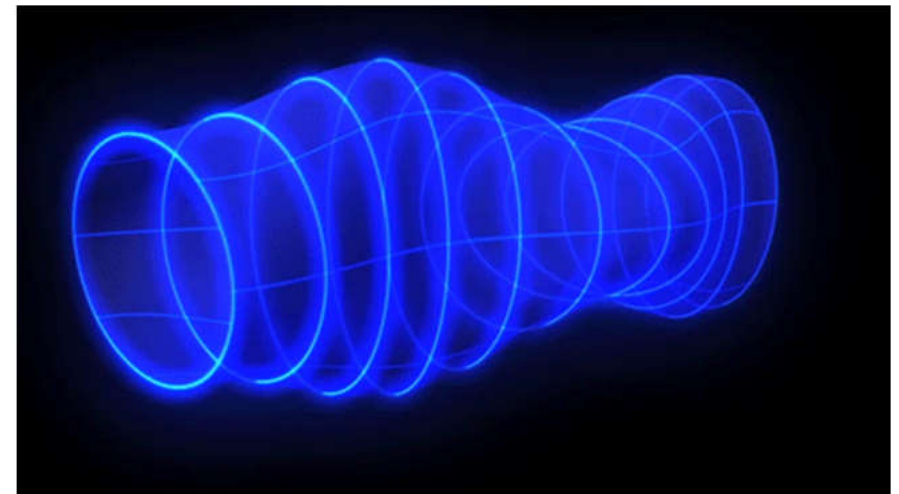
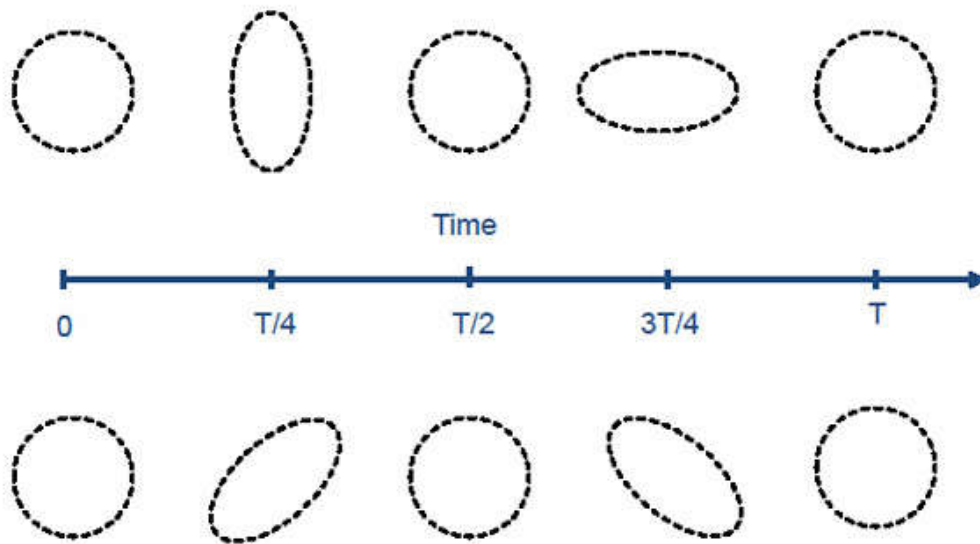


# Description d'une onde gravitationnelle

Pour mieux comprendre l'effet d'un passage d'une onde gravitationnelle, il faut imaginer des particules libres (dans l'espace vide ou dans un champs gravitationnel constant) disposées le long d'un anneau.

Lors du passage de l'onde, la distance entre les particules se déforme selon une ellipse pour vibrer selon le grand axe et demi-grand axe.

Il y a 2 modes de vibrations appelés polarisation « plus » et « croix ».



# Description d'une onde gravitationnelle

Dans le référentiel utilisé pour décrire simplement l'onde gravitationnelle, la déformation des distances provient d'une augmentation ou diminution de l'espace entre **les particules qui gardent les mêmes coordonnées durant toute la déformation**.

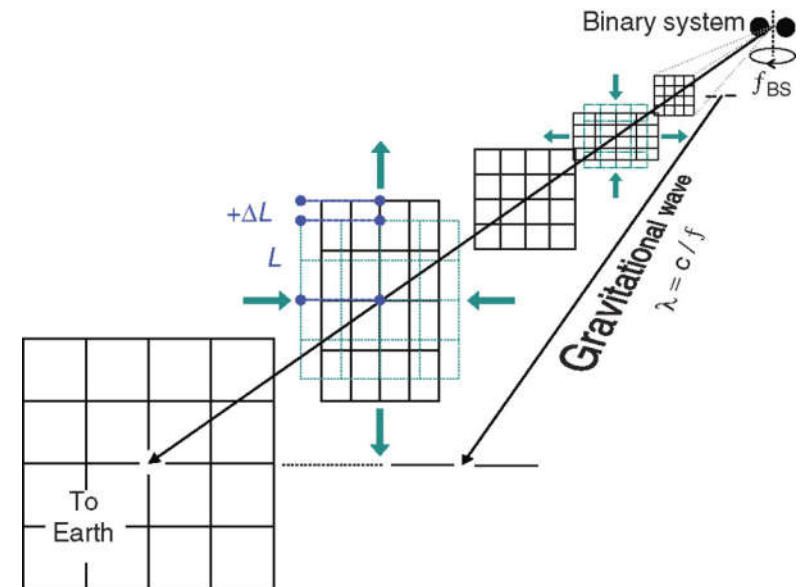
Dans le schéma ci-dessous, c'est la grille de coordonnées qui se dilate et contracte (donc l'espace) sans que les particules se déplacent par rapport à cette grille (donc cet espace). La particule ne bouge donc pas dans le référentiel utilisé (dans par rapport à la grille) pour décrire l'onde gravitationnelle. Le référentiel est **comobile** avec les particules.

Le principe est similaire pour décrire l'expansion de l'Univers où les galaxies sont figées dans un espace en expansion. Les galaxies ne bougent pas, c'est l'espace qui se dilate entre elles.

De même, il est impossible de détecter une onde gravitationnelle avec une seule particule libre (comme il est impossible de détecter un champ gravitationnel avec une seule particule libre => principe d'équivalence).

Attention, la distance mesurée entre les particules change réellement.

**C'est la métrique qui change dans un système de coordonnées comobile.**



# Description d'une onde gravitationnelle

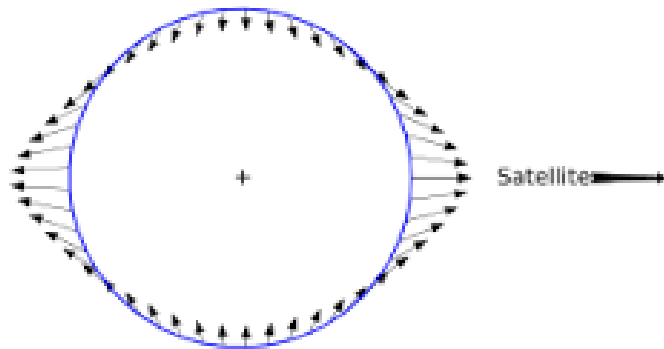
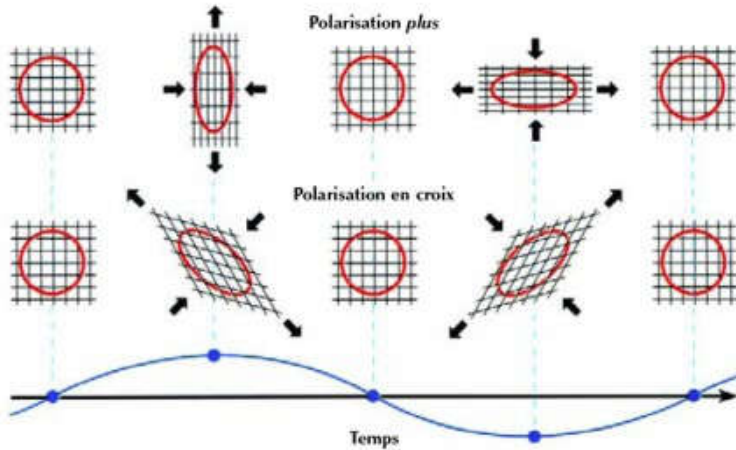
## Différentes propriétés :

La surface de l'ellipse reste constante durant toute la période de vibration.

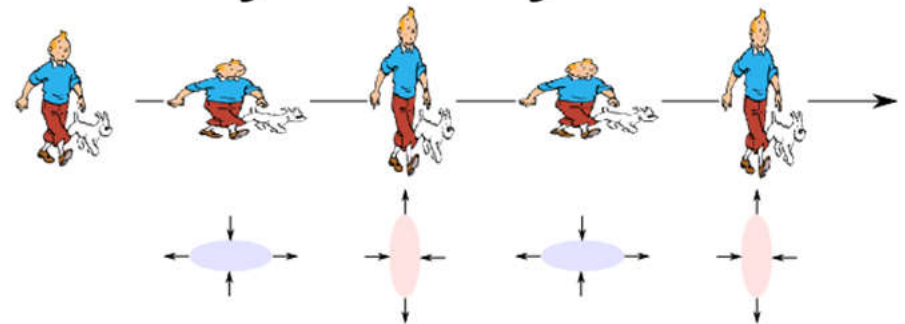
- le volume ne varie pas lors du passage de l'onde.
- une courbure positive compense une courbure négative.
- la courbure moyenne est nulle (Tenseur de Ricci = 0 dans le vide).
- propriété des forces de marée.

Une onde gravitationnelle réelle est une combinaison linéaire des 2 modes de polarisation.

Les effets d'une onde gravitationnelle sur un corps peuvent être comparés aux effets d'une force de marée. Attention, les déformations d'un corps solide seront moindres par rapport aux particules libres qui ne sont pas reliées entre elles par des forces électromagnétiques ou gravitationnelles.



## Passage d'une onde gravitationnelle



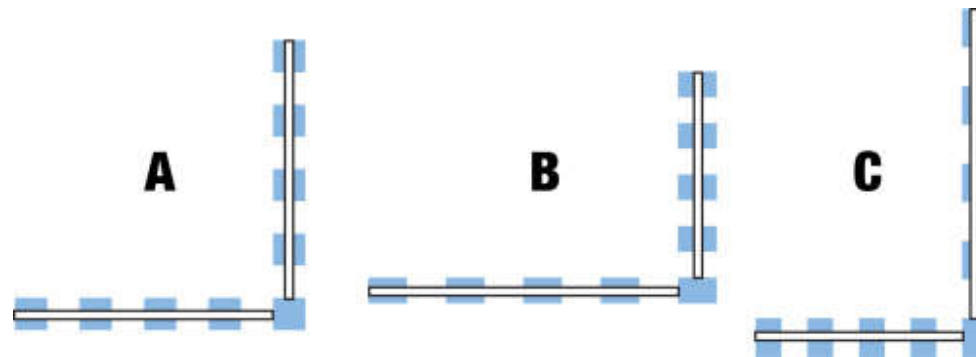
# Description d'une onde gravitationnelle

## Problème théorique de détection :

Si tout est distordu, alors nos mètres étalons devraient aussi être distordus, ce qui rendrait impossible la mesure de l'effet. La longueur d'onde du laser devrait être également distordue normalement. Comment fait-on ?

Les systèmes qui sont gravitationnellement ou électro-magnétiquement liés ne sont pas déformés par une valeur égale à la variation de la métrique. C'est très semblable à l'effet de l'expansion de l'Univers qui n'intervient pas sur des systèmes liés gravitationnellement ou électro-magnétiquement.

Les photons ne sont pas liés gravitationnellement ou électro-magnétiquement, leurs longueurs d'ondes sont bien affectées par la distorsion de l'espace, mais leurs vitesses restent bien égales à  $c$  et le temps que met un photon dans un bras varie bien en fonction du passage de l'onde.

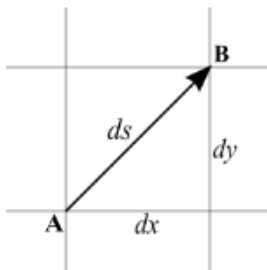


# La métrique

De façon plus précise, les ondes gravitationnelles sont définies comme des **perturbations de la métrique** (techniquement du tenseur métrique).

La perturbation de la métrique modifie la distance entre 2 points (A et B) sans que leurs coordonnées changent.

## Espace plat (Euclidien) à 2 dimensions

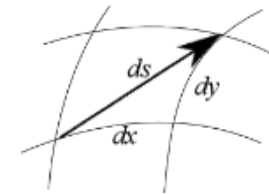


$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

Tenseur métrique

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

## Espace courbe à 2 dimensions



$$ds^2 = g_{xx}dx^2 + 2g_{xy}dxdy + g_{yy}dy^2$$

Tenseur métrique

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ g_{yx} & g_{yy} \end{pmatrix}$$



# La métrique

## Espace-temps plat (Minkowski) à 4 dimensions Relativité restreinte (absence de gravité)

Tenseur métrique

$$g_{\mu\nu} = \begin{matrix} \boxed{t \quad x \quad y \quad z} \\ \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} \boxed{t} \\ \boxed{x} \\ \boxed{y} \\ \boxed{z} \end{matrix} \end{matrix}$$

- Le temps n'est pas affecté par l'onde gravitationnelle. On ne peut pas détecter le passage d'une onde gravitationnelle avec des horloges atomiques.
- L'onde gravitationnelle a un effet spatial uniquement.
- L'onde gravitationnelle a 2 modes de polarisation ( $h_+$  et  $h_\times$ ).
- La vibration de l'espace est perpendiculaire à la direction de propagation. L'onde gravitationnelle est transversale.

## Espace-temps courbé à 4 dimensions Relativité générale (onde de gravité se déplaçant selon z)

Tenseur métrique : Espace temps plat + onde gravitationnelle

$$g'_{\mu\nu} = \begin{matrix} \boxed{t \quad x \quad y \quad z} & \boxed{t \quad x \quad y \quad z} \\ \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} \boxed{t} \\ \boxed{x} \\ \boxed{y} \\ \boxed{z} \end{matrix} \end{matrix}$$

$$t' = t$$

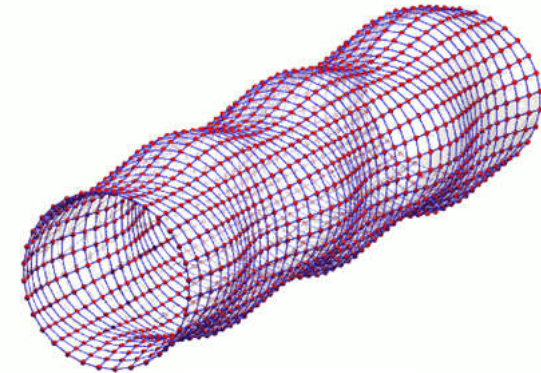
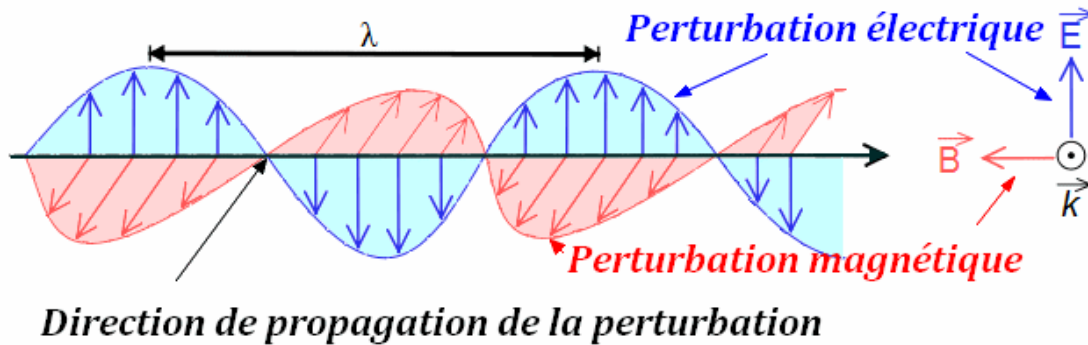
$$x' = x + \frac{1}{2}(h_+x + h_\times y)$$

$$y' = y + \frac{1}{2}(h_\times x - h_+y)$$

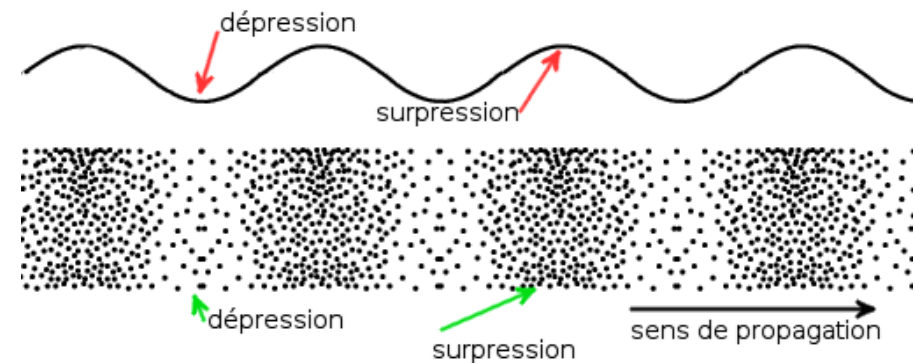
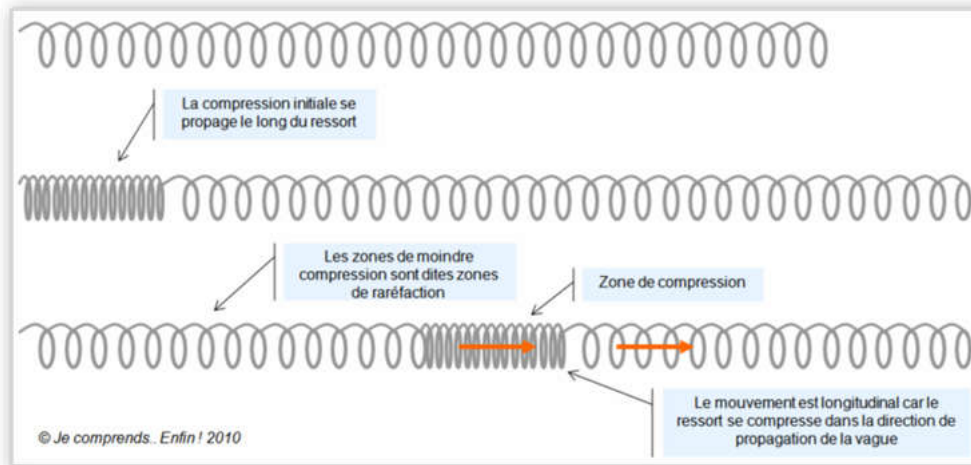
$$z' = z$$

# Comparaison entre onde gravitationnelle et électromagnétique

Onde transversale – onde électromagnétique (rayon X, lumière, onde radio, ...) ou gravitationnelle

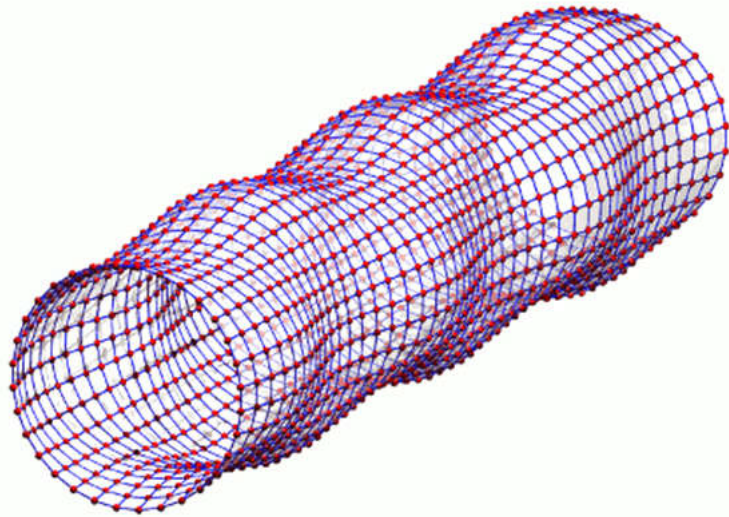


Onde longitudinale – ressort ou onde sonore



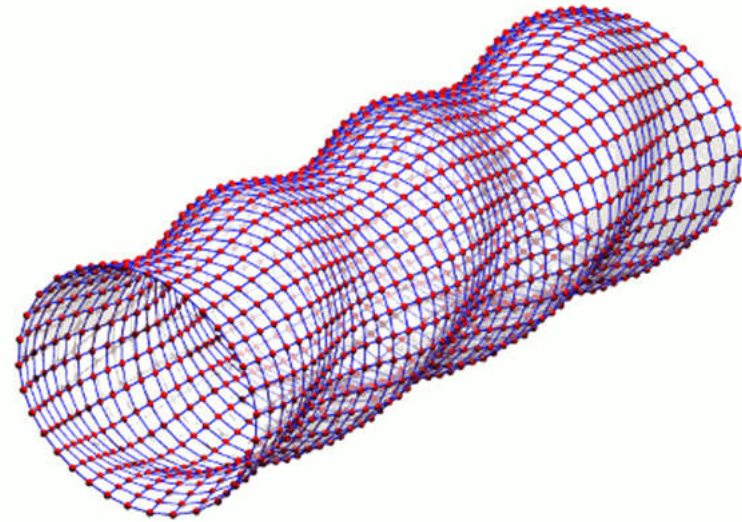
# Polarisation linéaire et circulaire

## Polarisation linéaire



[www.einstein-online.info](http://www.einstein-online.info)

## Polarisation circulaire



[www.einstein-online.info](http://www.einstein-online.info)

# Différence entre onde gravitationnelle et électromagnétique ? (1)

## 1ère différence : graviton / photon

Le **graviton**, l'hypothétique particule médiatrice de l'onde gravitationnelle, **transporte une charge gravitationnelle associée à son énergie**, tandis que le **photon**, particule médiatrice de l'interaction électromagnétique, **ne transporte pas de charge électrique**.

Par conséquent, l'onde de gravitation produite par une masse accélérée est elle-même source de gravitation : **la gravitation gravite**. En termes techniques, on dit qu'elle est **non linéaire**.

Le **graviton** et le **photon** sont des particules **sans masse**. Si le graviton avait une masse, il aurait une vitesse inférieure à celle de la lumière et le temps de parcours de l'onde gravitationnelle aurait été plus long entre les 2 détecteurs.

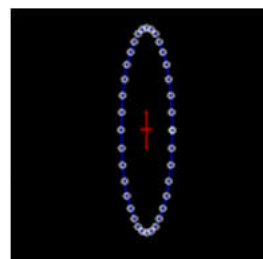
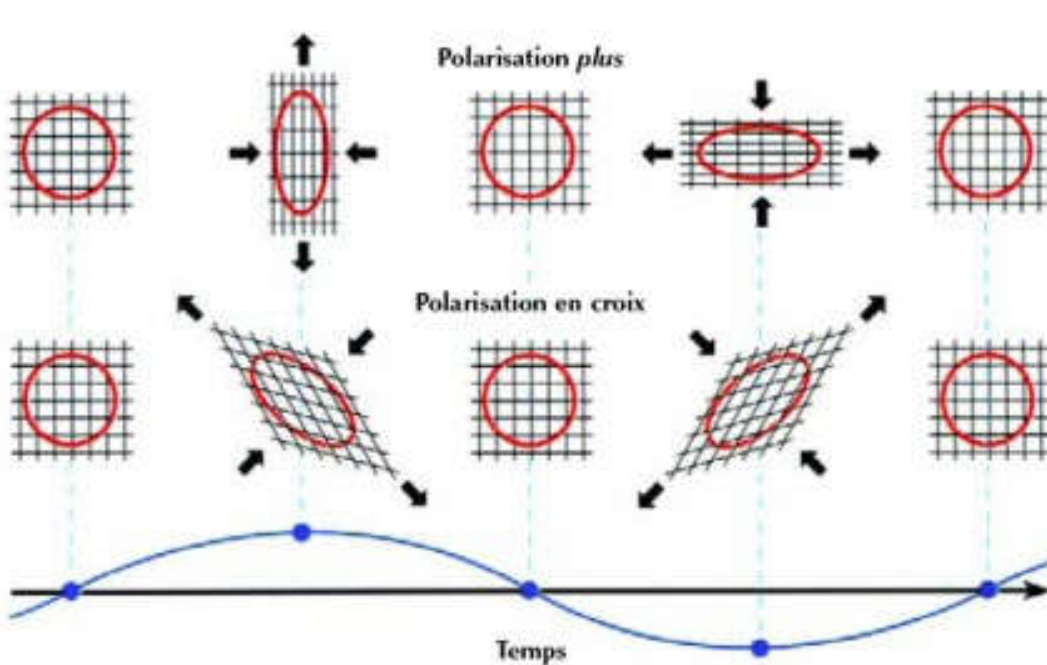
## Différence entre onde gravitationnelle et électromagnétique ? (2)

### 2ème différence : polarisation quadripolaire – spin 2 (graviton) / dipolaire – spin 1 (photon)

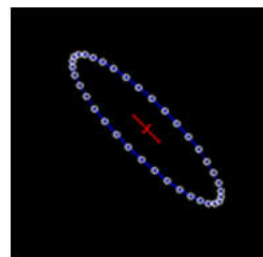
La gravitation est purement attractive ; la masse, c'est-à-dire la « charge gravitationnelle », a toujours le même signe contrairement à l'interaction électromagnétique qui a des charges positives et négatives.

Il en résulte qu'un oscillateur gravitationnel élémentaire, constitué de deux masses vibrant aux extrémités d'un ressort, ne rayonne pas le même type d'ondes que deux charges électriques de signes opposés.

Dans le cas électromagnétique, le rayonnement (particule : **photon de spin 1**) est du type dipolaire, dans le cas gravitationnel (particule : **graviton de spin 2**), il est du type quadripolaire.



La polarisation du haut, dite « **plus** », dilate et contracte alternativement l'anneau sans changer la direction de ses axes principaux.



La polarisation du bas, dite « **en croix** », tourne de 45° les directions de compression et d'étirement.

<http://blogs.futura-sciences.com/luminet>



## Différence entre onde gravitationnelle et électromagnétique ? (2)

Les systèmes dont la dynamique est à **symétrie sphérique (sphère en expansion ou en contraction)** ou à **symétrie cylindrique (disque en rotation sur son axe)** n'émettent pas d'ondes gravitationnelles puisque leur moment quadripolaire reste constant (conséquence du théorème de Birkhoff : toute solution à symétrie sphérique de l'équation d'Einstein doit être statique et asymptotiquement plate).

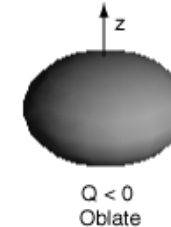
Une étoile en effondrement parfaitement sphérique ou le trou noir résultant (statique ou en rotation) n'émettent pas d'ondes gravitationnelles. Un degré d'asymétrie est nécessaire pour que les ondes gravitationnelles soient produites.

Amplitude de l'onde

$$h = \frac{2G}{c^4} \ddot{Q}(t - r/c)$$

Moment quadripolaire

$$Q_{ij} = \int \rho(3r_i r_j - \|\vec{r}\|^2 \delta_{ij}) d^3 \mathbf{r}$$



Classical definition

$$Q_0 = \int \rho(3z^2 - r^2) dV$$

$$Q = \frac{3K^2 - I(I+1)}{(I+1)(2I+3)} Q_0$$

Quantum measurement

La petitesse du facteur  $2G/c^4 \approx 1,65 \times 10^{-44} \text{ m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^2$  traduit la grande rigidité de l'espace-temps.

$$h = \frac{\Delta L}{L} \sim 10^{-21} \sim \frac{\text{Diameter of H atom}}{1 \text{ AU}}$$

Nos détecteurs d'ondes gravitationnelles sont sensibles à l'amplitude de l'onde qui varie en  $1/r$  alors que la détection d'une onde électromagnétique varie en  $1/r^2$ .

# Différence entre onde gravitationnelle et électromagnétique ? (3)

## 3ème différence : force gravitationnelle très faible par rapport à force électromagnétique

La troisième différence fondamentale avec l'électromagnétisme réside dans leurs intensités relatives.

Si l'on place à 1 centimètre l'un de l'autre deux protons – qui, ayant une masse et une charge électrique, sont à la fois soumis à une interaction gravitationnelle et à une interaction électromagnétique –, la force gravitationnelle qui les attire est **10<sup>37</sup> fois plus faible** que la force électrostatique qui les fait se repousser. De là vient l'obstacle majeur à la détection des ondes gravitationnelles.

### Interactions

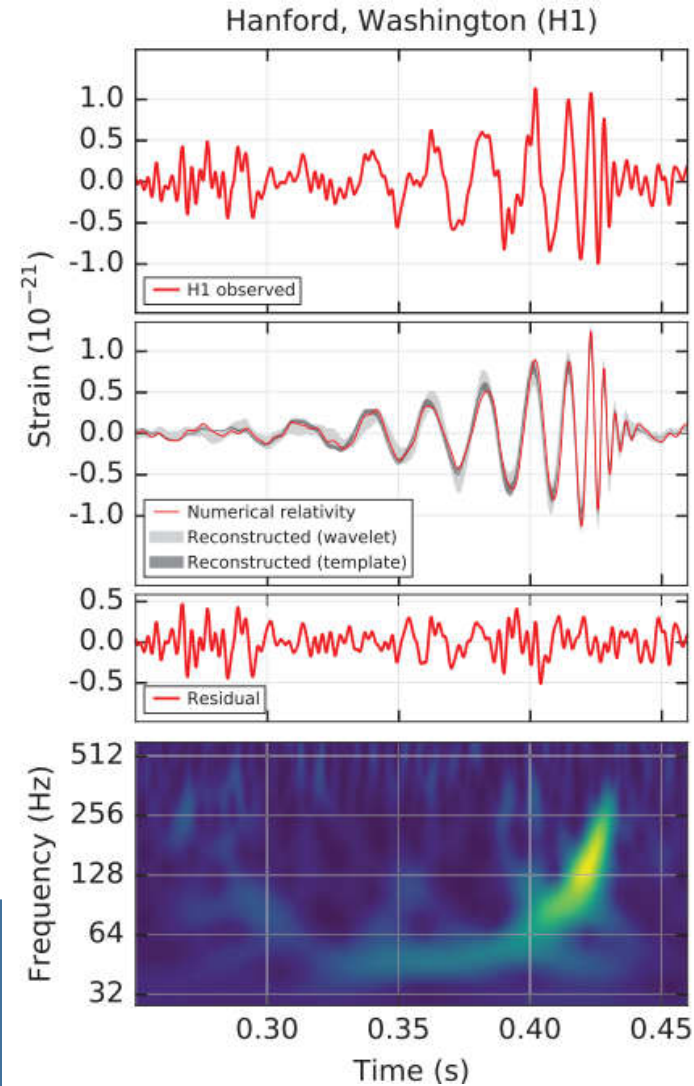
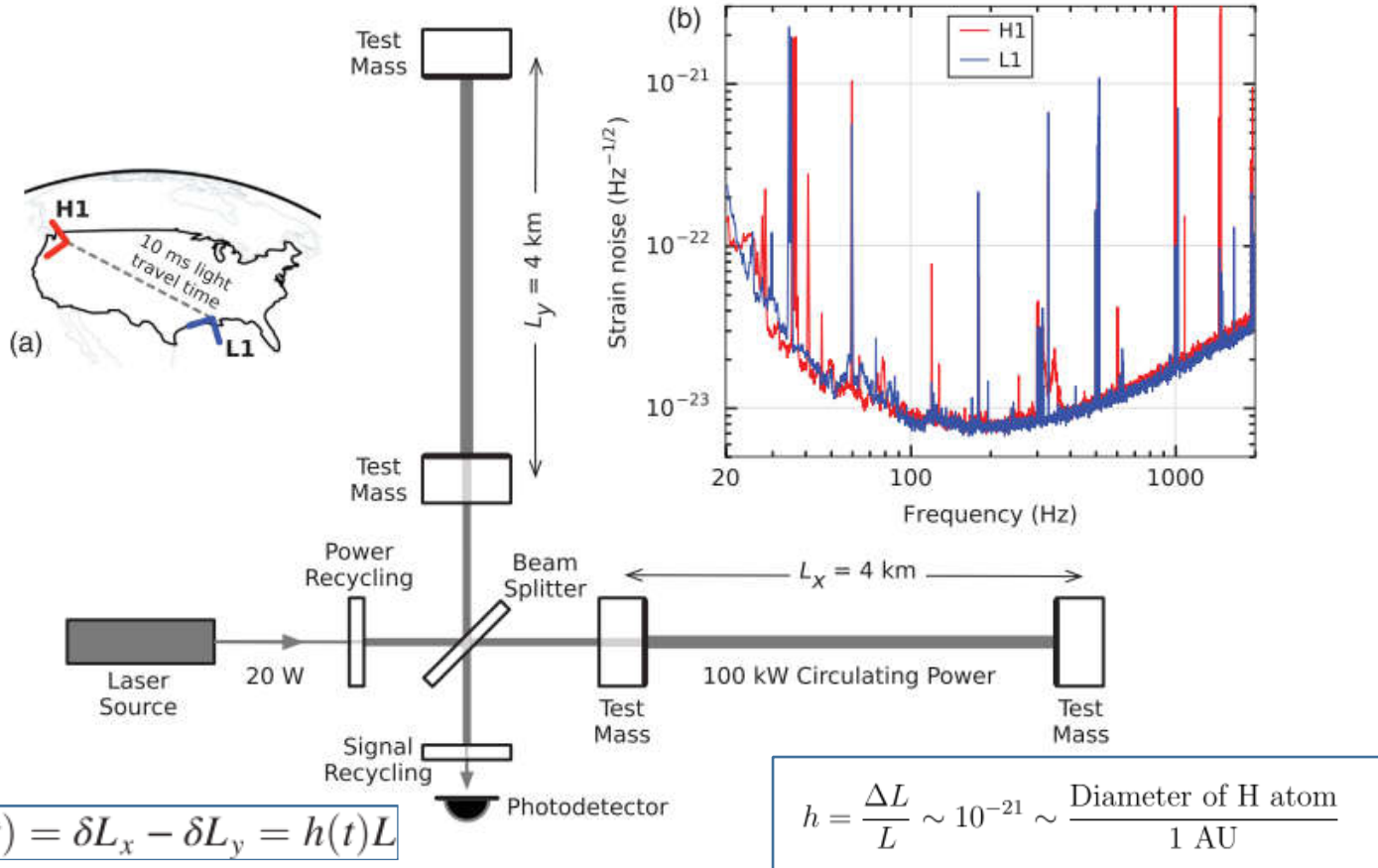
Nom	Intensité relative	Particules subissant	Portée (m)	Quanta du Champ	Domaine d'action	Charge
Forte	1	Quarks Hadrons	10 <sup>-15</sup>	8 Gluons	Baryons, Mésons Nucléons Etoiles à Neutrons	Couleur
Electromagnétique	10 <sup>-2</sup>	Particules électriquement chargées	Infinie	Photon	Atomes Optique Electricité	Charge électrique
Faible	10 <sup>-5</sup>	Electrons Neutrinos Quarks	10 <sup>-18</sup>	W <sup>+</sup> Z <sup>0</sup> W <sup>-</sup>	Bêta Mésons π Muons	Charge faible
Gravitationnelle	10 <sup>-39</sup>	Tout	Infinie	Graviton ???	Orbites Trous Noirs	Masse

# Trous noirs binaires



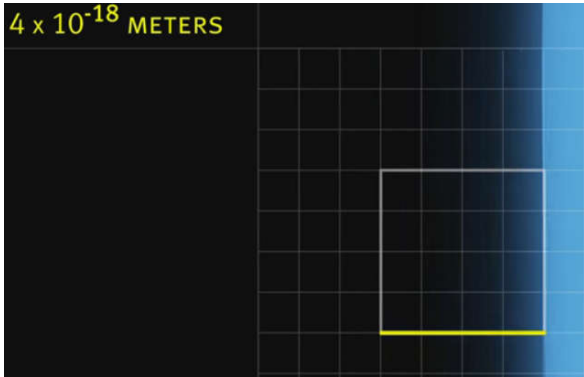
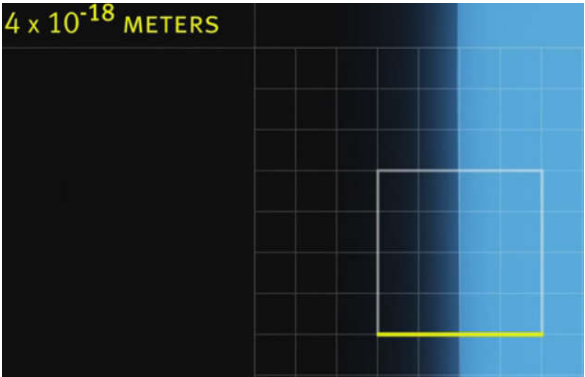
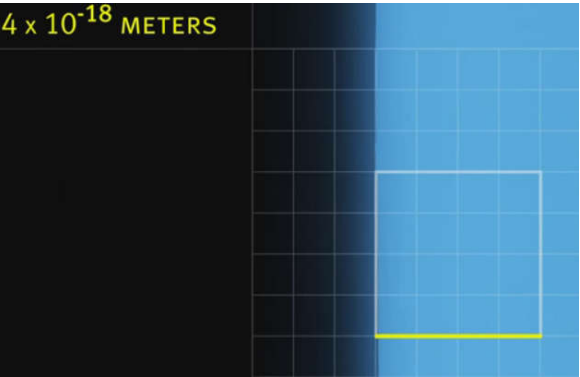
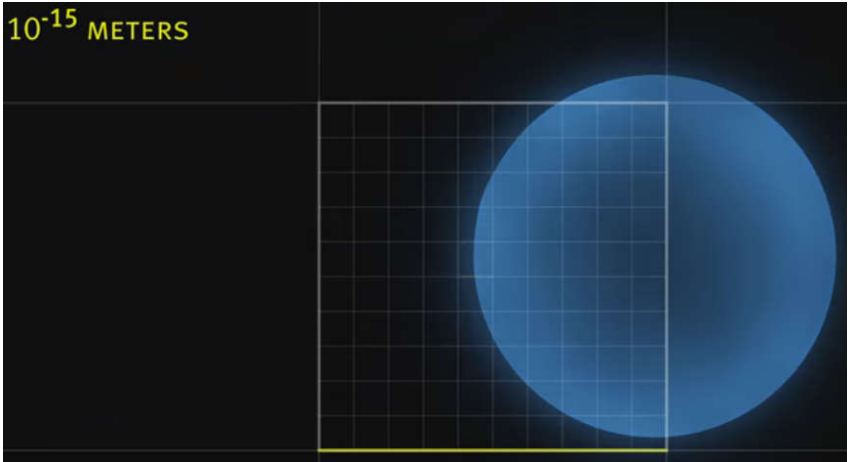
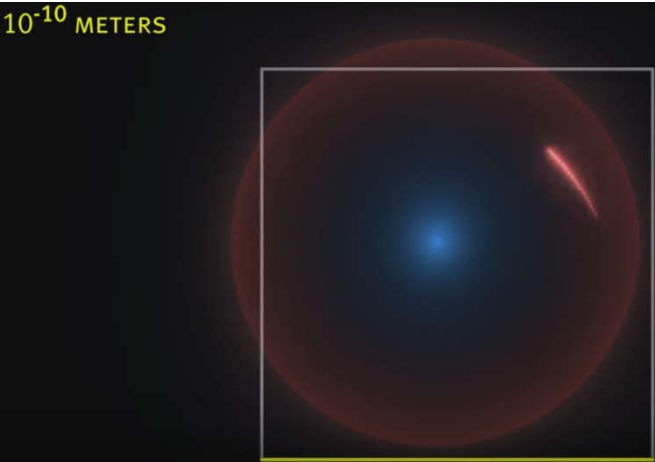


# Schéma et bruit du détecteur



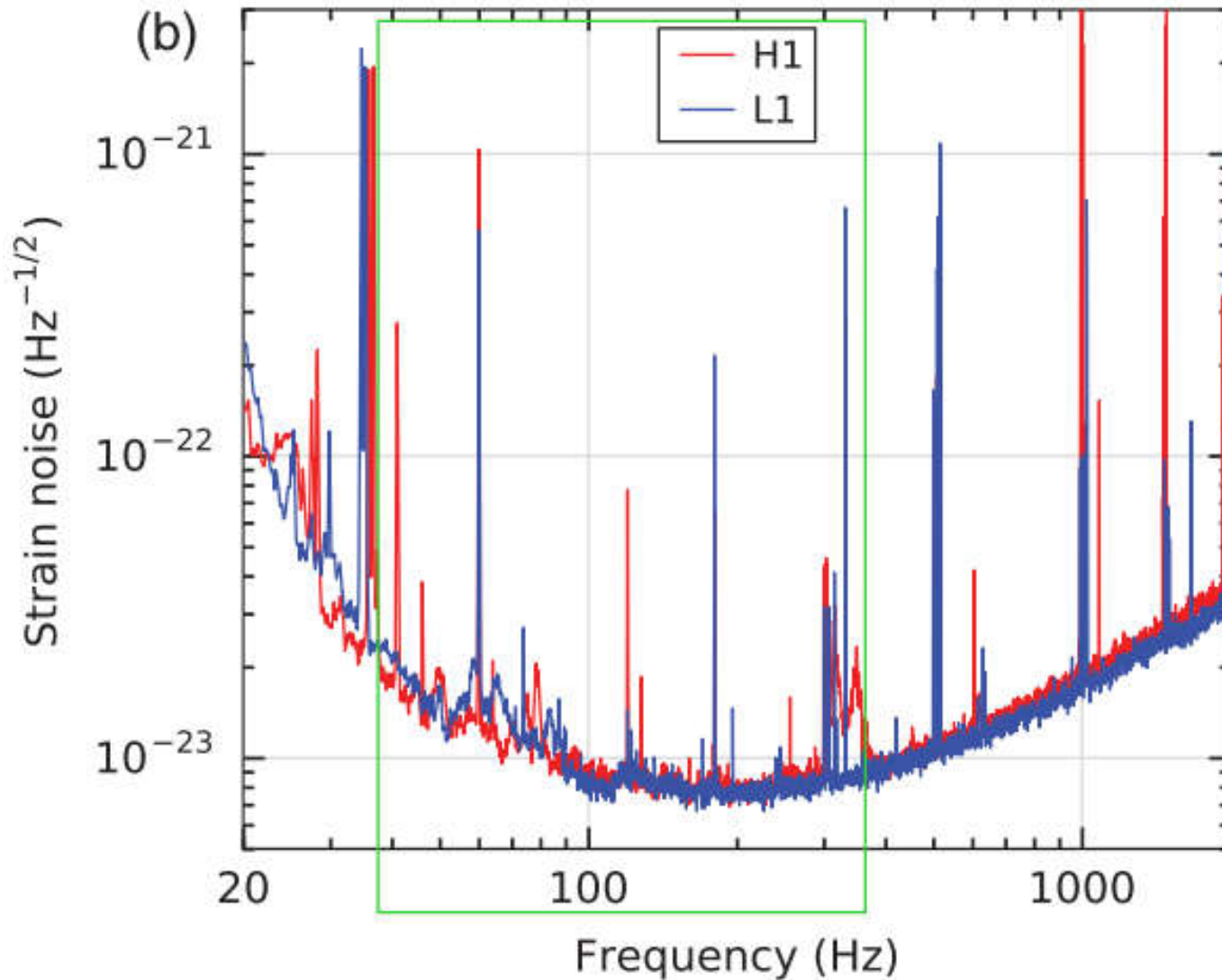
Pour  $L = 4$  km et 280 allers-retours entre les miroirs des cavités Fabry-Perot, l'interféromètre simule des bras de 1120 km de long. Les interféromètres de LIGO détectent un déplacement de  $\pm 2.10^{-18}$  m, un millier de fois inférieur à la taille du proton ou 100 millions de fois inférieur à la taille d'un atome.

# Distance de déplacement des miroirs





## Filtrage du signal

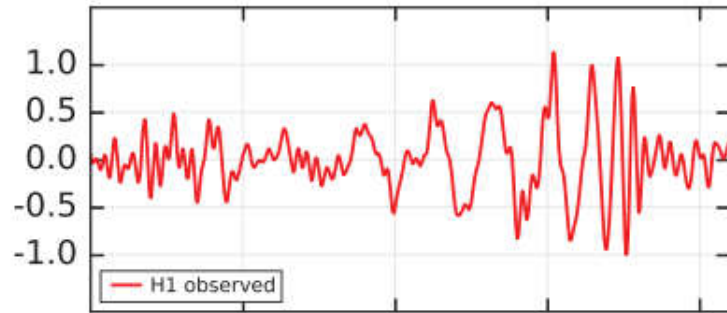


Pour la visualisation:

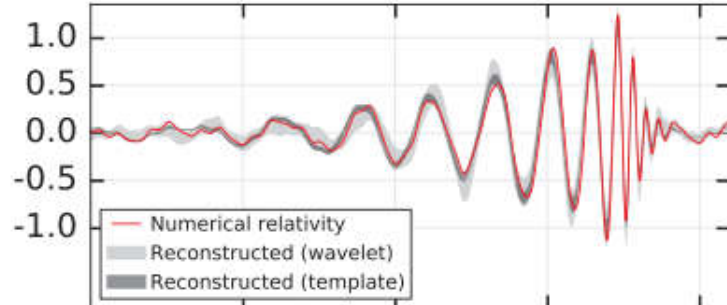
- Le signal est filtré avec un **filtre passe-bande 35-350 Hz** pour supprimer des fluctuations importantes à l'extérieur de la zone de sensibilité des détecteurs.

- Un **filtre de rejet de bandes** est utilisé pour éliminer les raies spectrales instrumentales fortes observées.

## Hanford, Washington (H1)



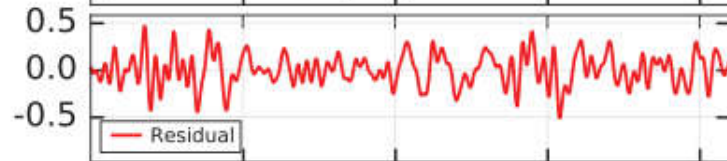
Signal H1 observé (après filtrage)



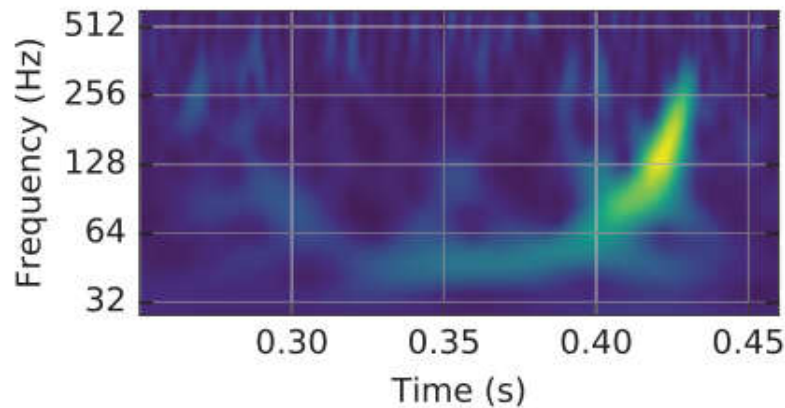
Rouge : Signal théorique calculé numériquement avec la relativité générale (après filtrage)

Gris clair : reconstruction basée sur une composition linéaire d'ondelettes (pas de modèle astrophysique)

Gris foncé : reconstruction basée sur des modèles d'ondes de trous noirs binaires



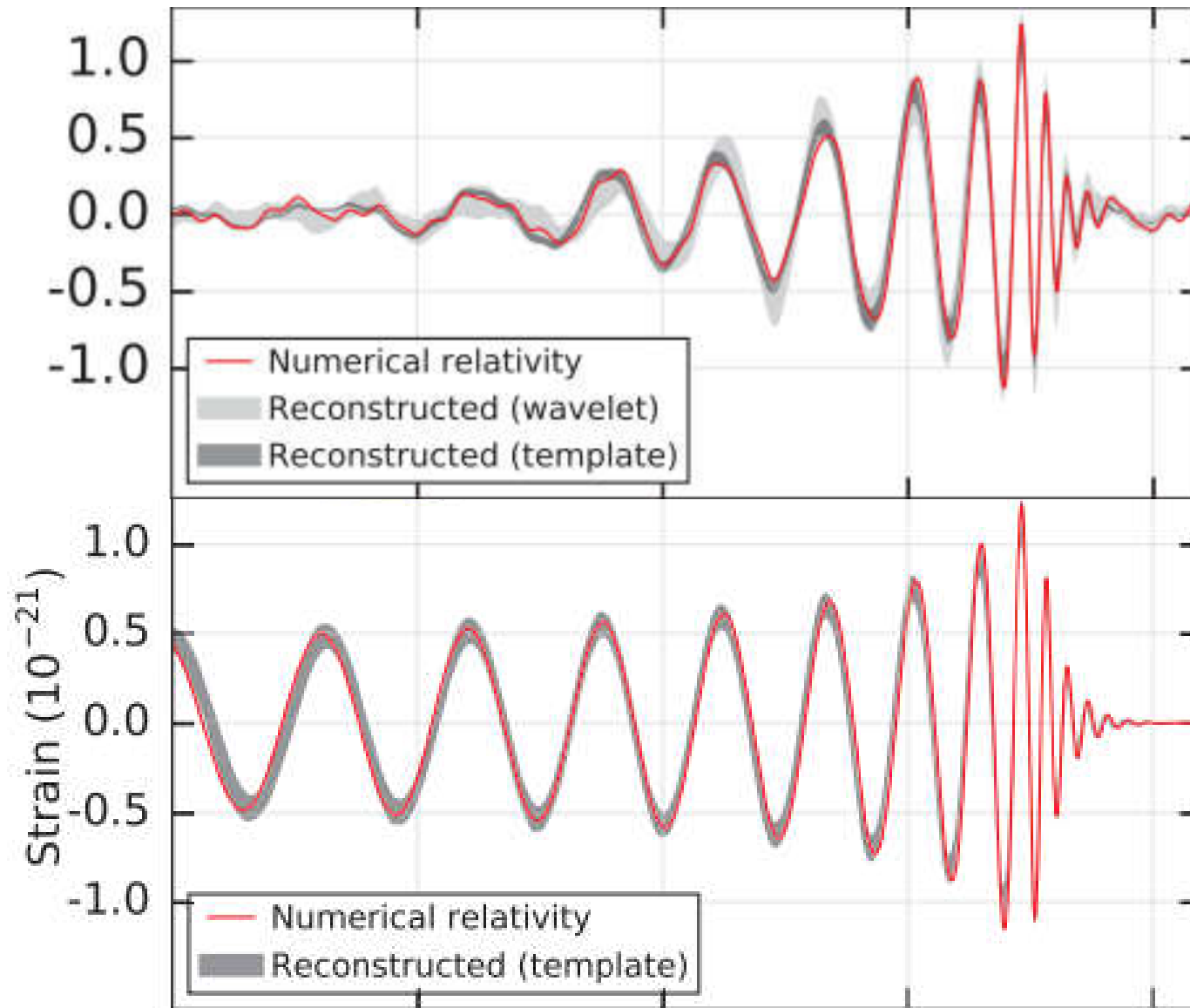
Résidu: Signal H1 – Signal théorique calculé numériquement avec la relativité générale (après filtrage)

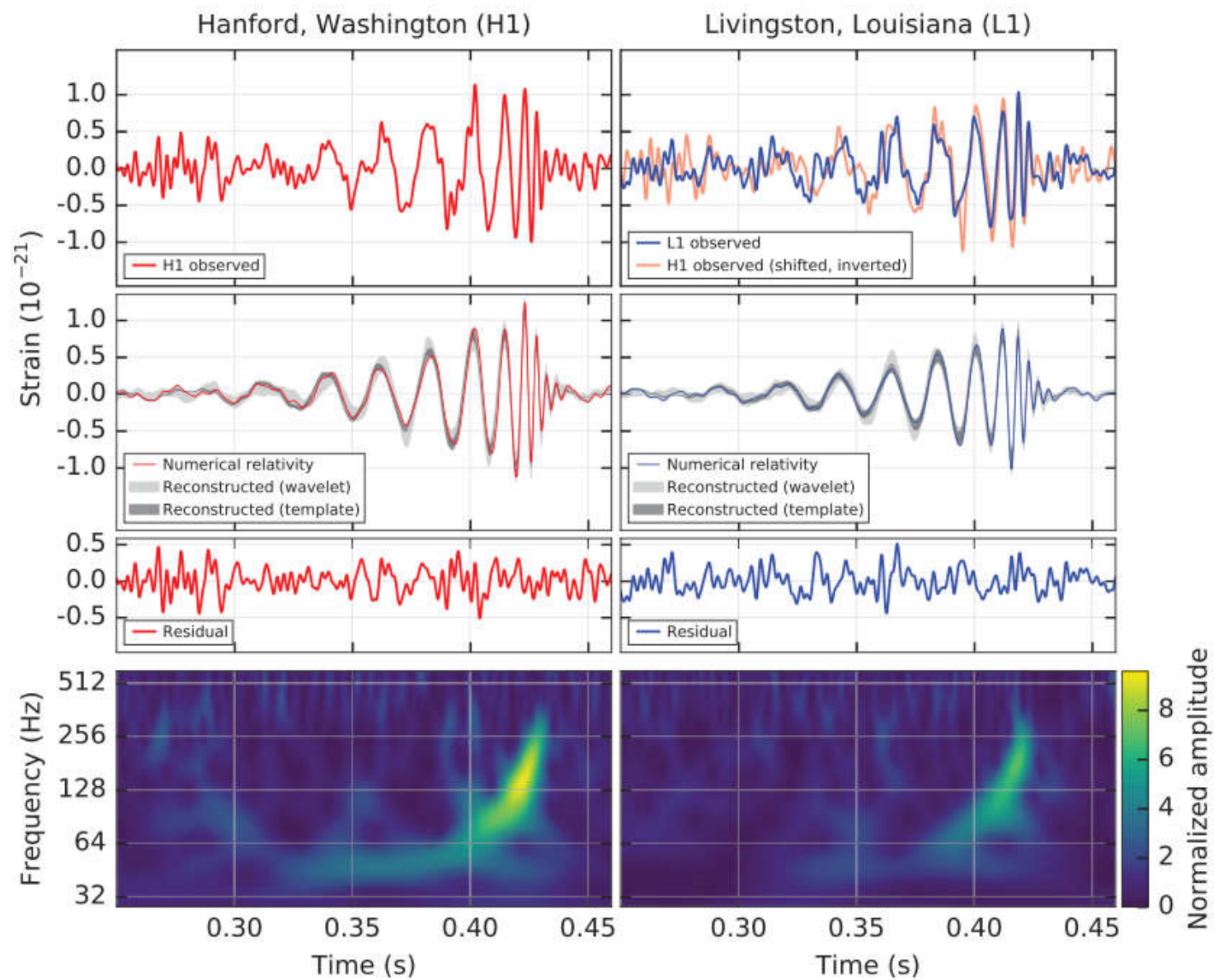


Représentation temps-fréquence du signal H1 observé (après filtrage) montrant que la fréquence augmente avec le temps

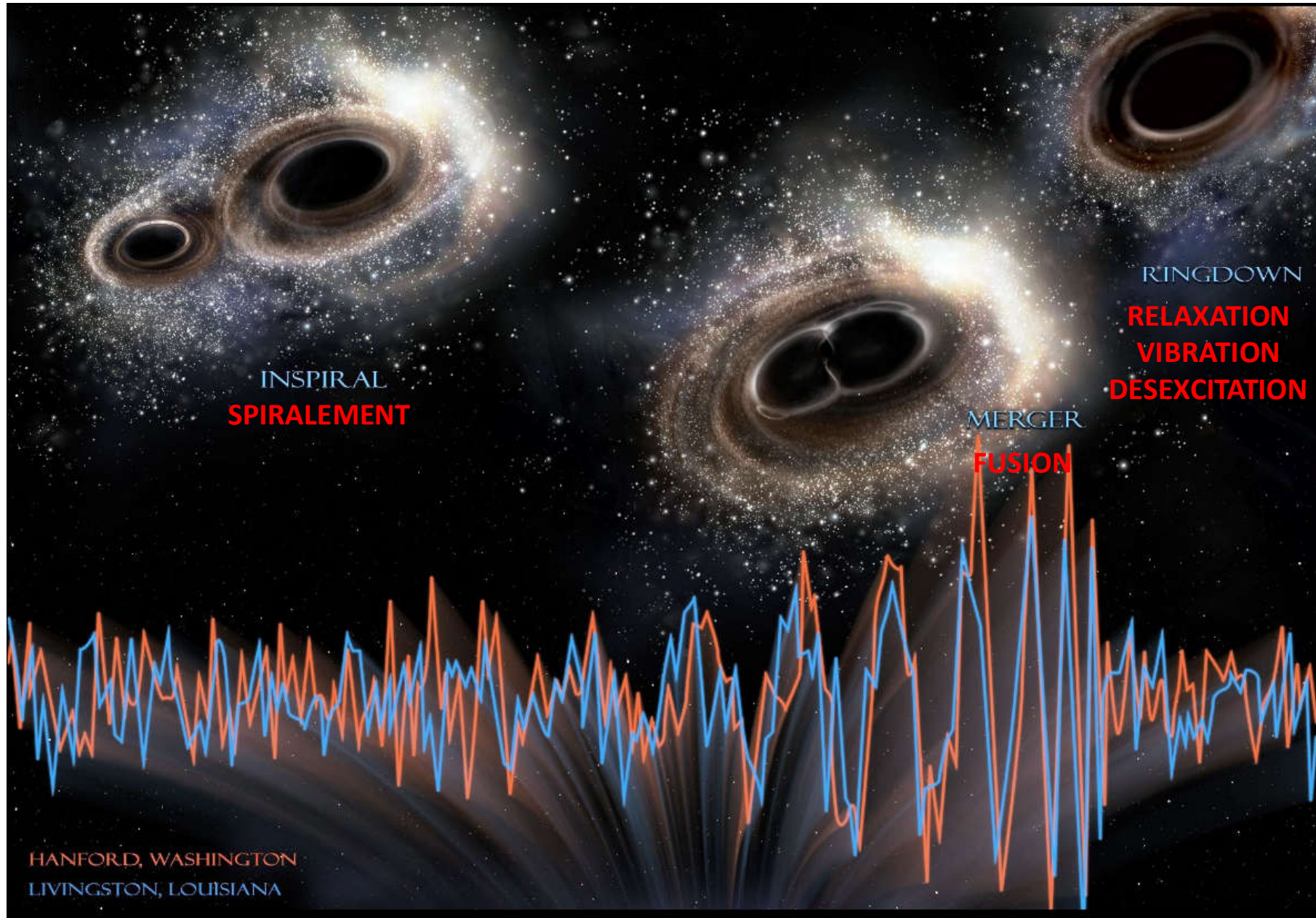
La montée en fréquence du signal est caractéristique d'une coalescence de deux objets compacts

## Signal théorique avec filtrage instrumental (haut) et sans filtrage (bas)









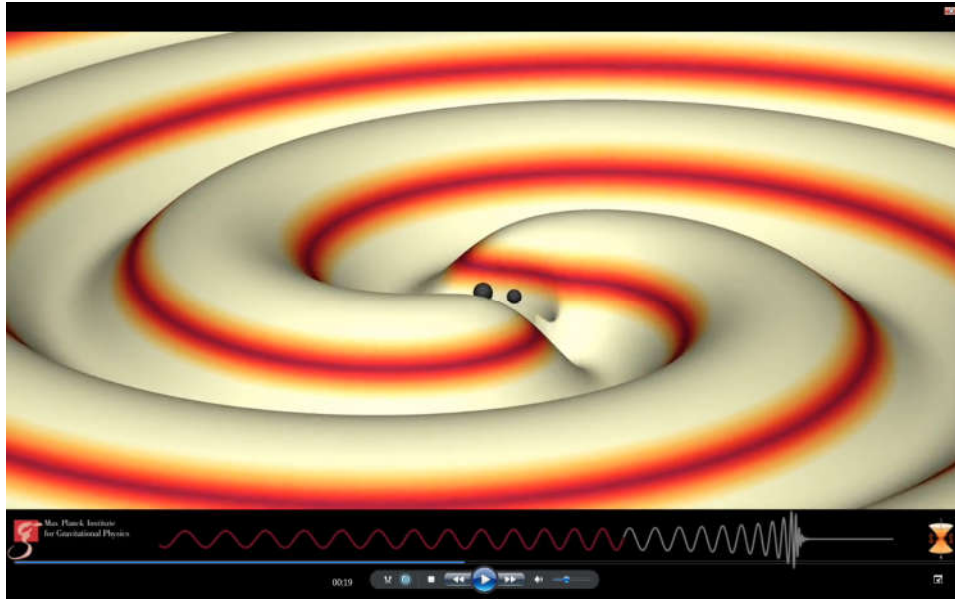
INSPIRAL  
SPIRALEMENT

MERGER  
FUSION

RINGDOWN  
RELAXATION  
VIBRATION  
DESEXCITATION

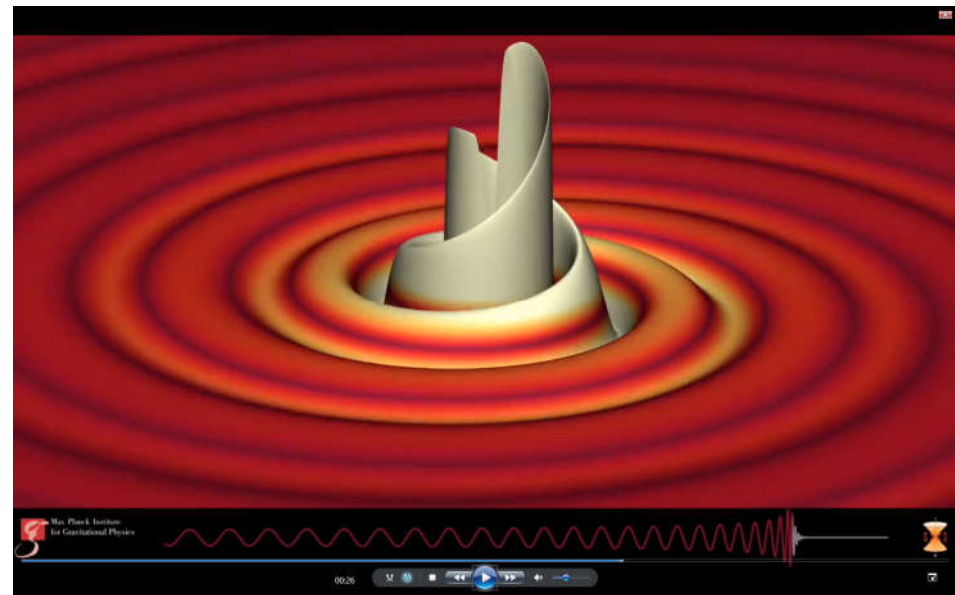
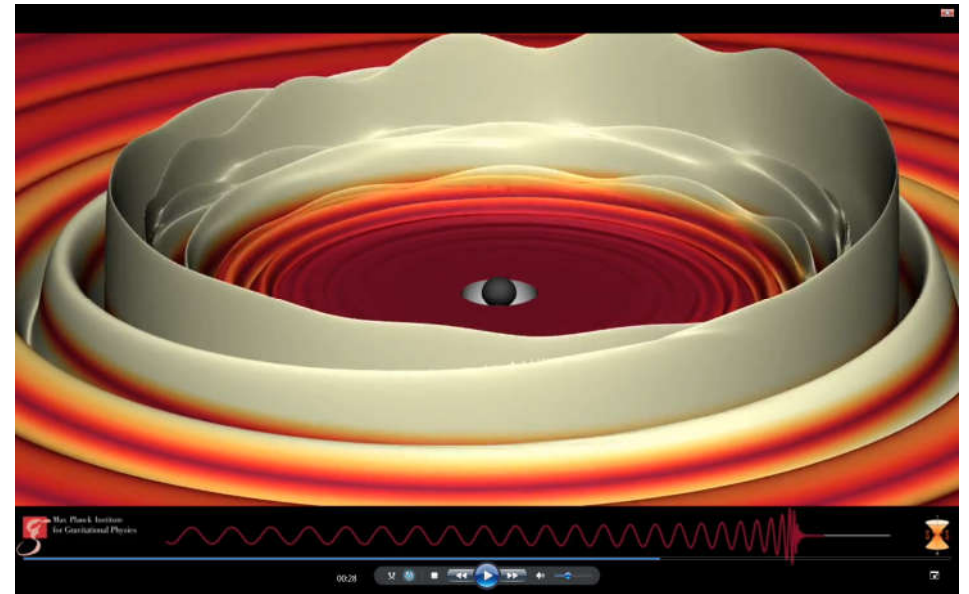
HANFORD, WASHINGTON  
LIVINGSTON, LOUISIANA





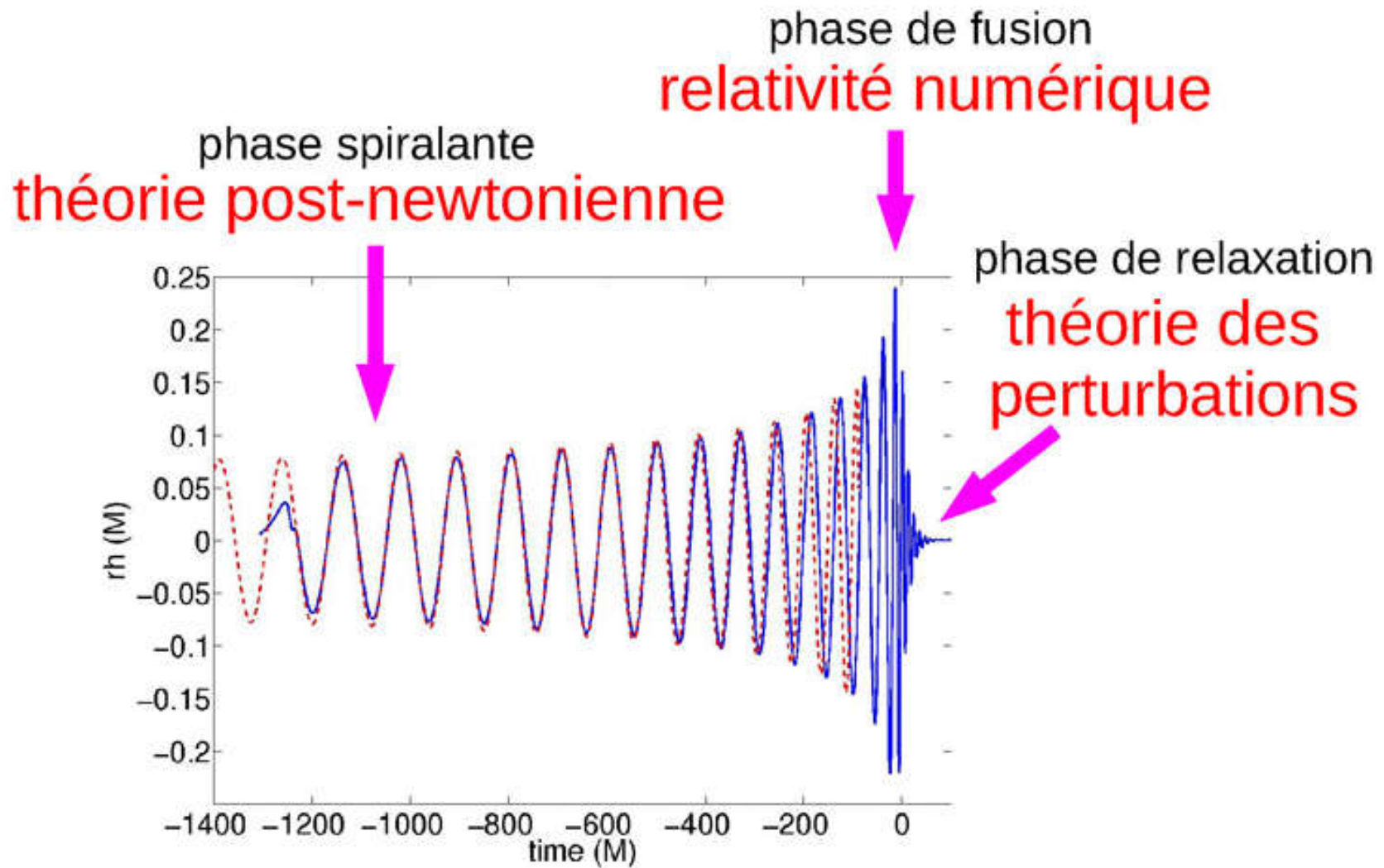
**SPIRALEMENT**

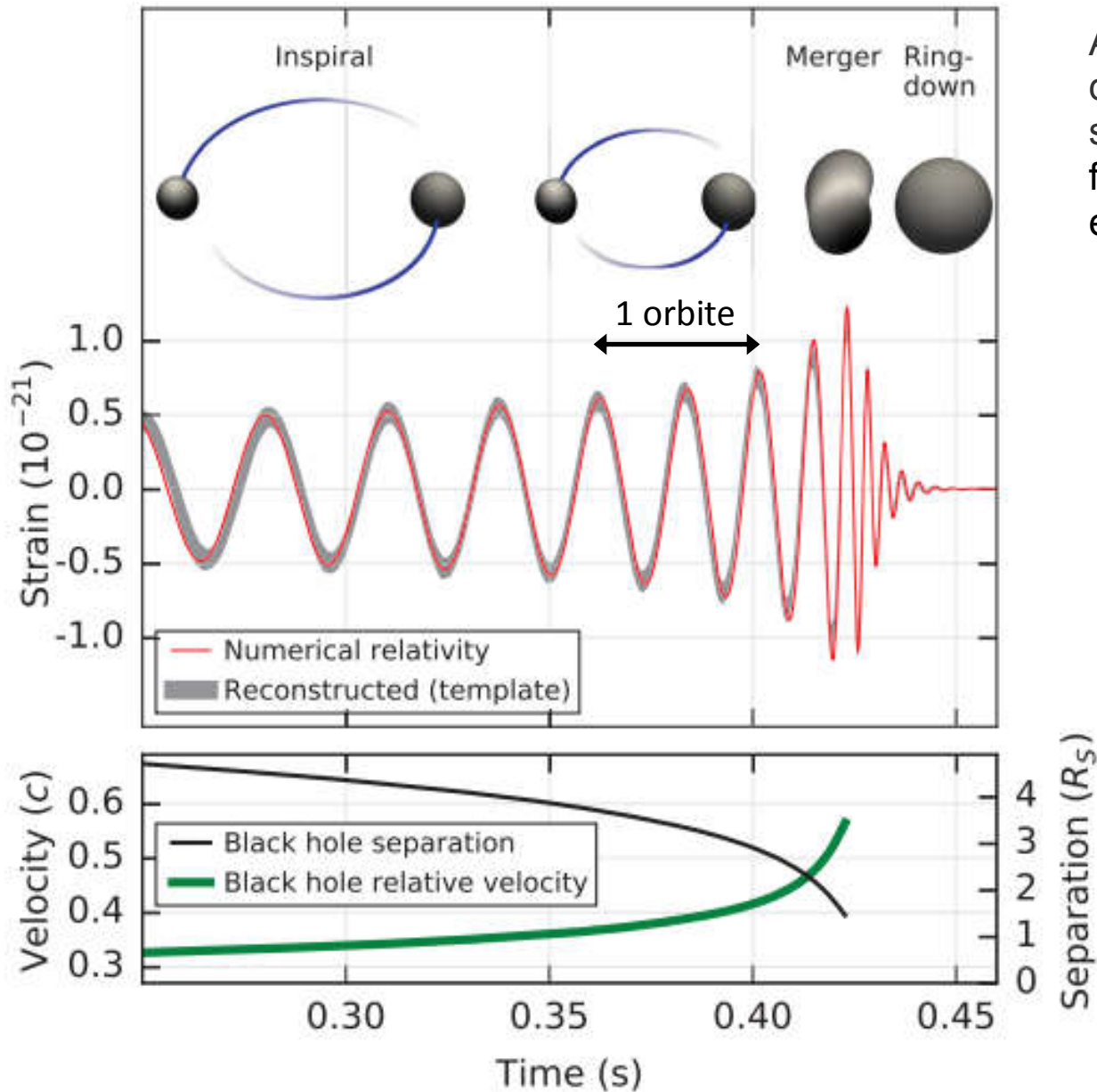
**RELAXATION  
VIBRATION  
DESEXCITATION**



**FUSION**

## Les 3 étapes de la fusion





Au moment où les deux trous noirs ont été détectés, c'est-à-dire lorsque la fréquence du signal gravitationnel est entrée dans la bande de fréquence des détecteurs à environ **35 Hz**, ils étaient distants l'un de l'autre d'environ **1000 km**.

$$R_S = 2GM/c^2$$

$$R_S \approx 100 \text{ km}$$

$$f_{onde} = 2f_{orbite}$$

Juste avant la fusion

$f_{orbite \text{ max}} = 75 \text{ orbites par seconde}$

$$v/c = (GM\pi f/c^3)^{1/3}$$

# La « chirp mass » (la masse qui gazouille) : théorie post-newtonienne

La fréquence  $f$  et la variation de fréquence  $\dot{f}$  qui sont mesurés à partir du signal permet de calculer la « chirp » mass  $M_c$ .

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[ \frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

$$m_1 + m_2 \geq 4^{3/5} M_c \approx 2.3 M_c$$

Plus la fréquence détectée est importante, plus les masses sont faibles. Des petits trous noirs binaires tournent plus vite autour de leur centre de masse que de gros trous noirs binaires.

Pour détecter des trous noirs supermassifs, il faut un détecteur sensible aux basses fréquences (détection dans l'espace avec eLISA).

A partir de  $f$ ,  $\dot{f}$  et  $h_0$  (amplitude de l'onde détectée), on en déduit la distance de luminosité.

$$D = \frac{5}{96\pi^2} \frac{c}{h_0} \frac{\dot{f}}{f^3}$$

Cette méthode est extrêmement utile comme indicateur de distance indépendant en astronomie.

Il faut également tenir compte des **paramètres cosmologiques et du redshift** de la source gravitationnelle.

L'Univers est en expansion et la longueur d'onde se dilate entre l'émission et la réception.

$$m = (1 + z) m^{\text{source}}$$

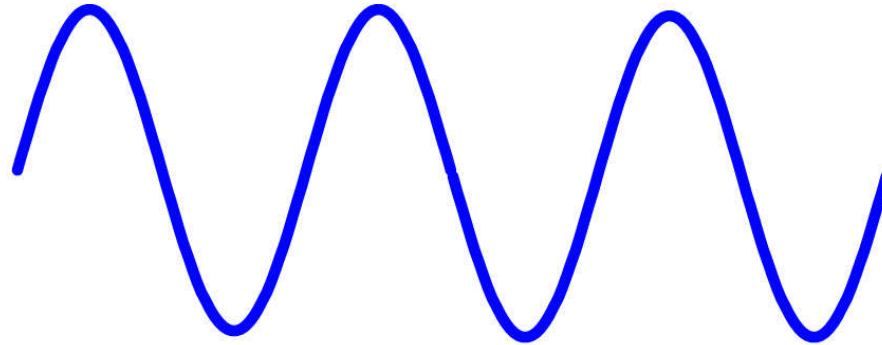
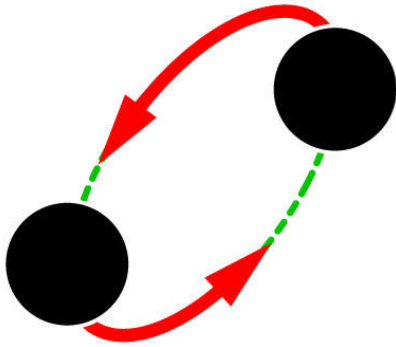
L'onde observée est à plus basse fréquence que l'onde émise ce qui donne une « masse observée » plus grande que l'on doit corriger pour avoir la masse réelle.



**Big Black Holes**



**Bigger (stronger) Gravitational Waves**



**Bigger Orbits**



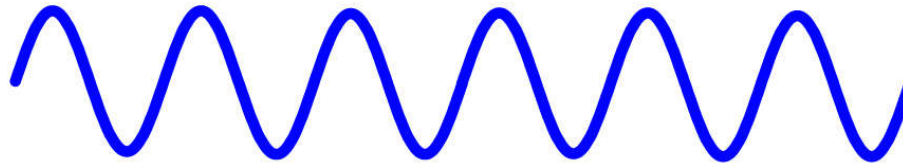
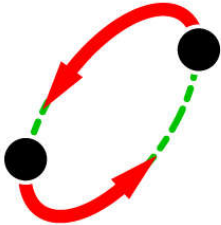
**Longer Wavelengths (few waves per time)**

---

**Small Black Holes**



**Smaller (weaker) Gravitational Waves**



**Smaller Orbits**



**Shorter Wavelengths (more waves per time)**

## Amplitude et polarisation lors de la fusion de trous noirs binaires

Pour un système binaire, l'amplitude de l'onde lorsqu'elle est perçue perpendiculairement au plan orbital (« face-on ») est deux fois l'amplitude de l'onde vue par la tranche (« edge-on »).

Le rayonnement « face-on » consiste en des quantités égales des deux polarisations d'onde gravitationnelle  $h_+$  et  $h_\times$ , mais déphasées, pour produire une onde polarisée circulairement.

L'onde "edge-on" contient uniquement l'état de polarisation  $h_+$  (donc polarisée linéairement) et donc la moitié de l'amplitude.

$$h_+ = A_{GW} (1 + \cos^2 i) \cos \phi_{GW}(t)$$

$$h_\times = -2A_{GW} \cos i \sin \phi_{GW}(t),$$

where  $i$  is the binary inclination ( $i = 0$  face-on,  $i = \pi/2$  edge-on) and  $A_{GW}$  is a leading amplitude. For an equal mass binary of separation  $R$  and with two components of mass  $M$  and orbital angular velocity  $\Omega$ , then  $A_{GW} \simeq 4M\Omega^2 R^2/r$  and  $\phi_{GW} = 2\Omega t$ .



# 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  $1.0 \times 10^{-21}$ . 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  $5.1\sigma$ . 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.

---



---

Primary black hole mass	$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67_{-0.07}^{+0.05}$
Luminosity distance	$410_{-180}^{+160} \text{ Mpc}$
Source redshift $z$	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$

---



---

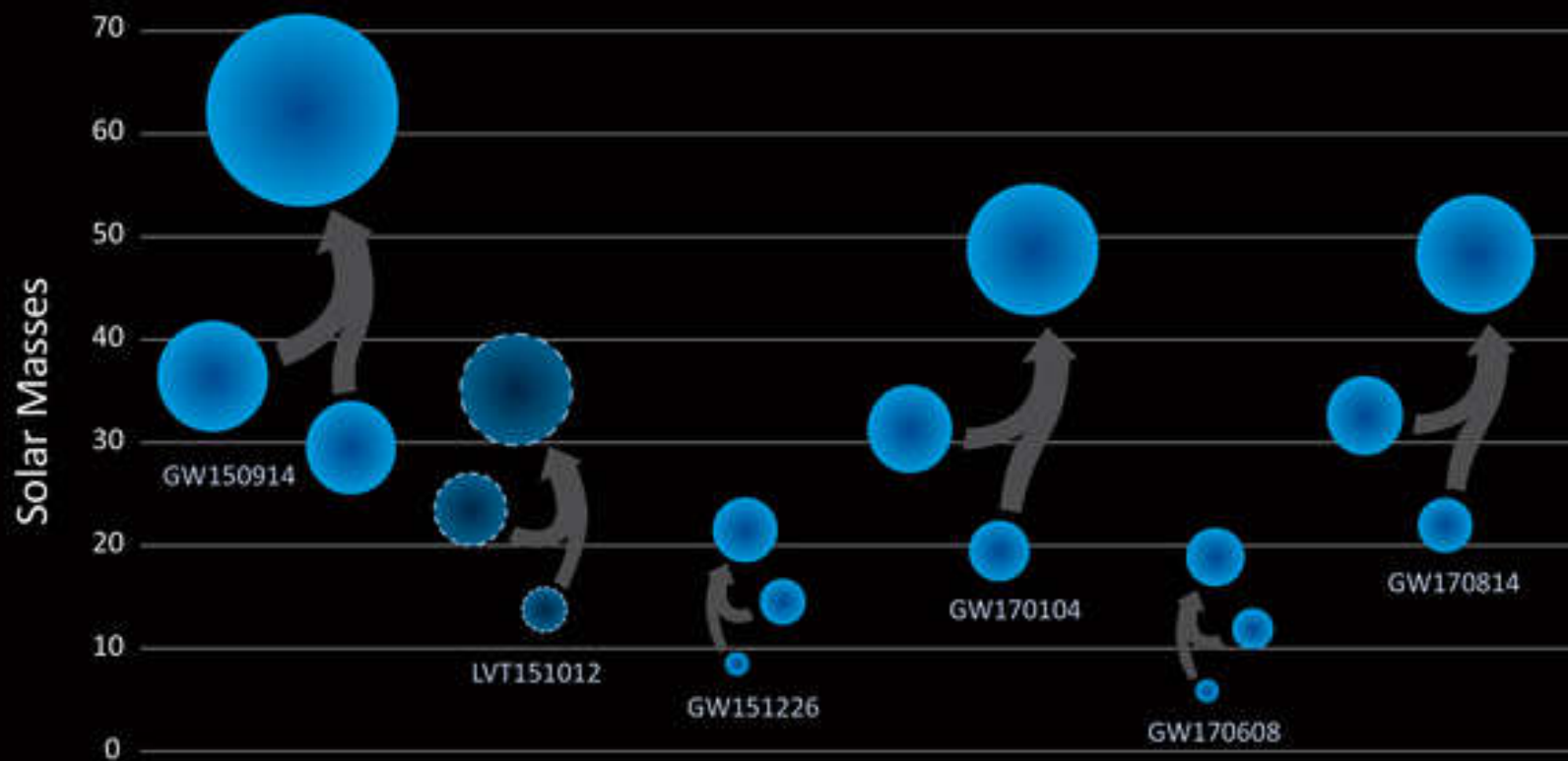
Energie émise :  $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2 = 5,4 \cdot 10^{54} \text{ erg} = 5,4 \cdot 10^{47} \text{ J} \approx 1000 \text{ explosions de supernovae}$

Pic de la puissance émise :  $200_{-20}^{+30} M_{\odot} c^2 / \text{s} = 3,6_{-0.4}^{+0.5} \times 10^{56} \text{ erg/s} = 3,6 \cdot 10^{49} \text{ W}$

50 fois la puissance émise sous forme lumineuse par toutes les étoiles de l'Univers observable

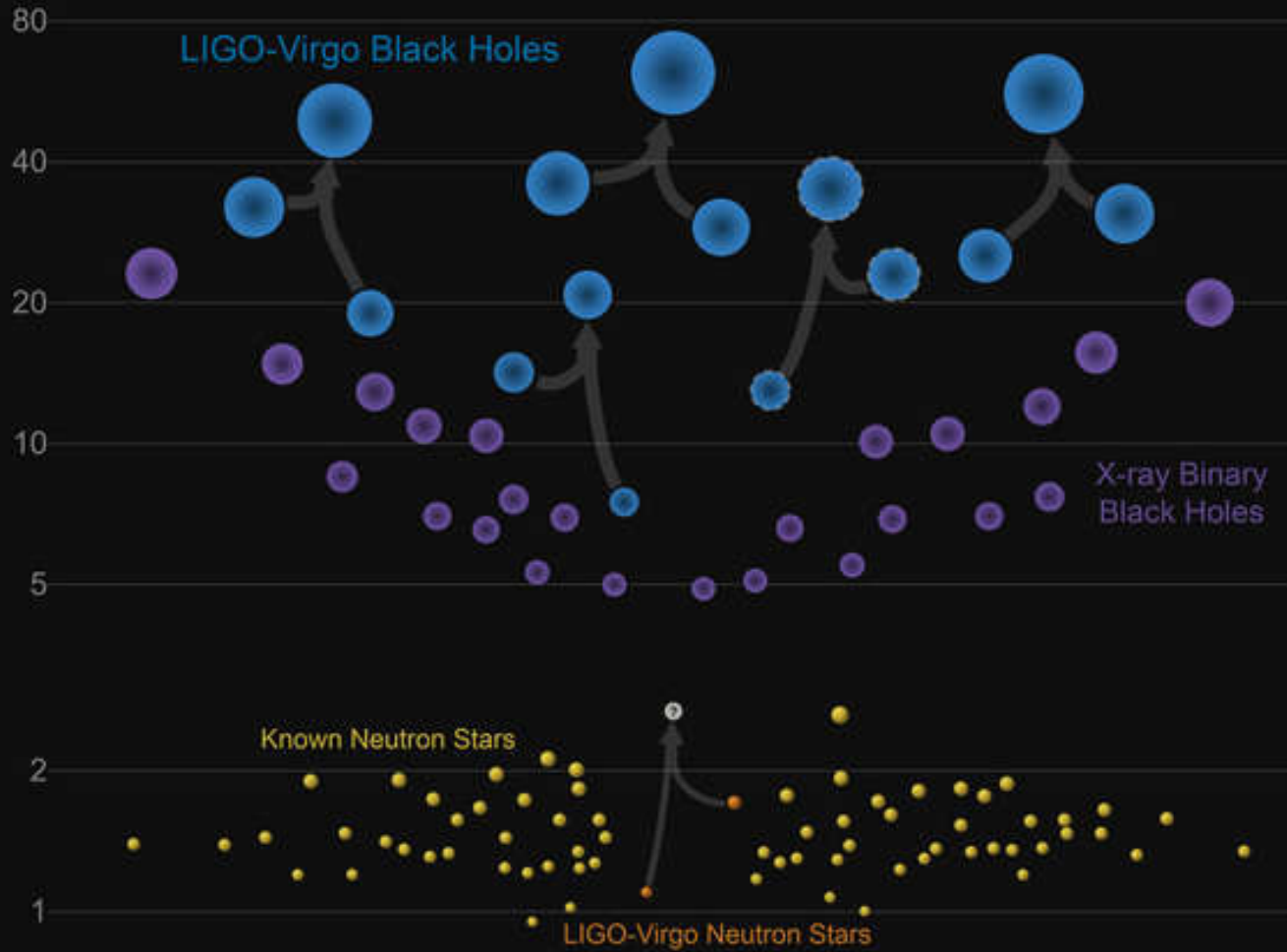
Phénomène le plus énergétique détecté par l'homme (après le big-bang bien sûr)

# Black Holes of Known Mass



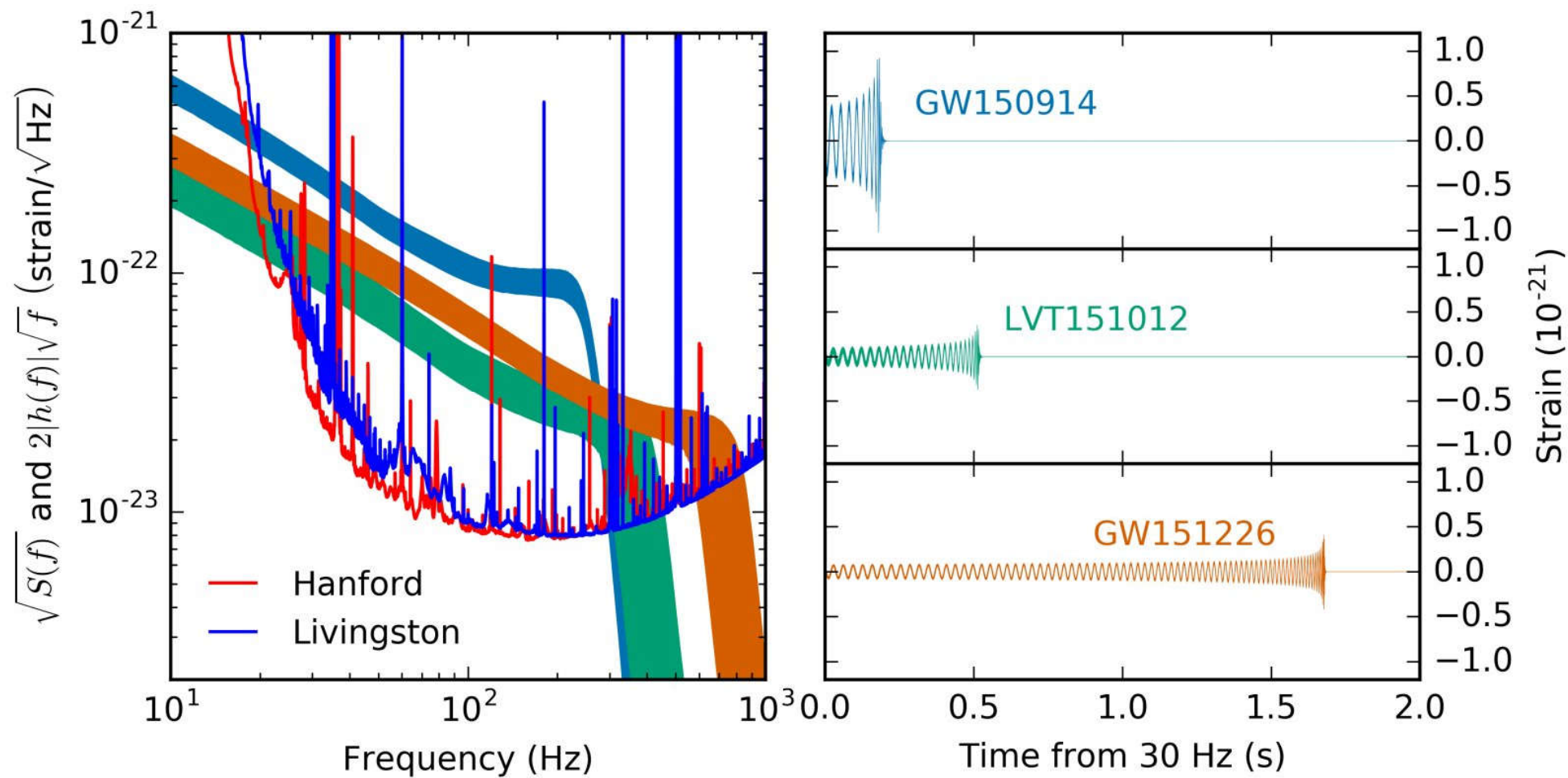
# Masses in the Stellar Graveyard

*in Solar Masses*



# Binary Black Hole Mergers in the first Advanced LIGO Observing Run

The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration<sup>a</sup>  
(15 JUNE 2016)





GW150914



LVT151012



GW151226



GW170104



GW170814

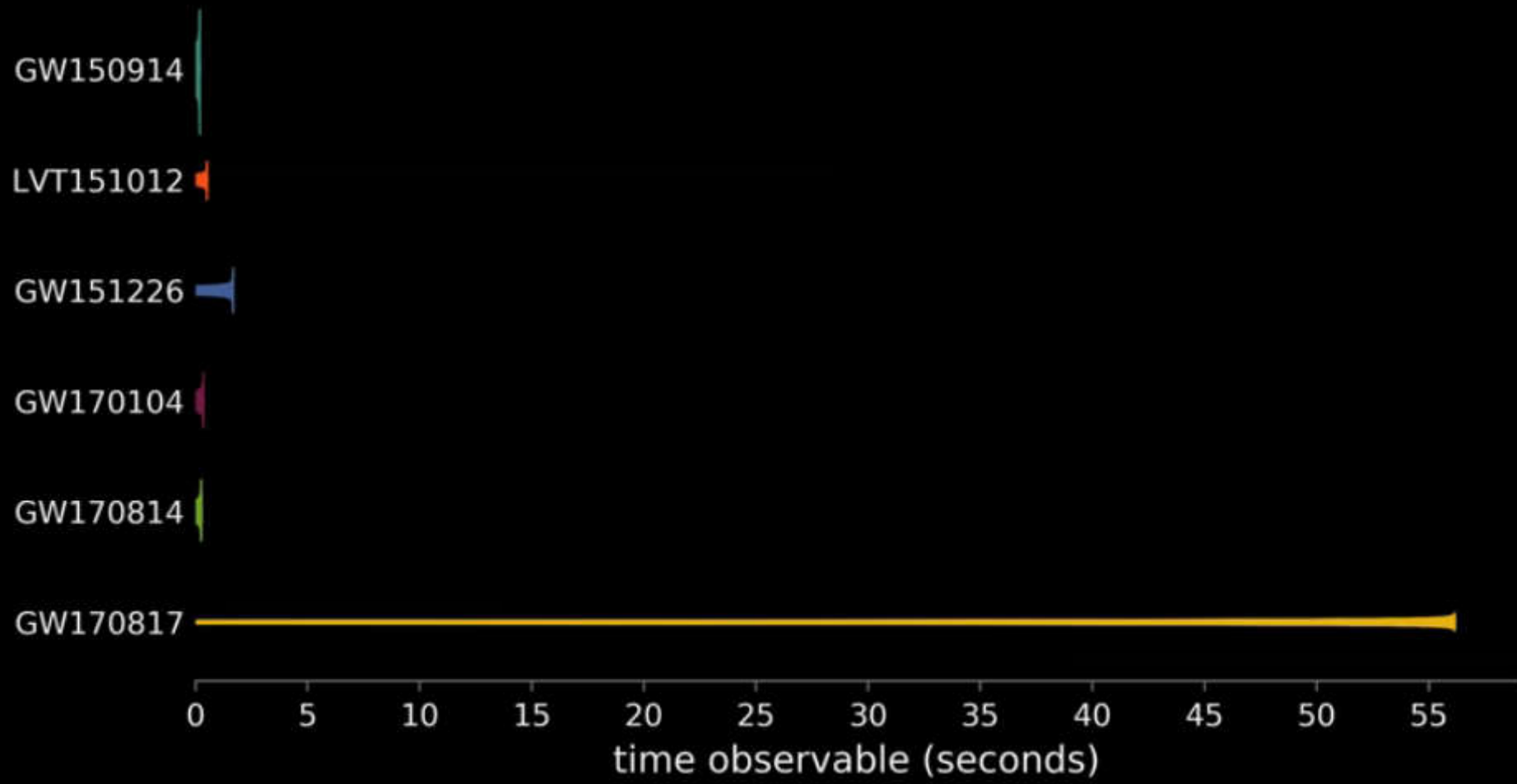
0 sec.

1 sec.

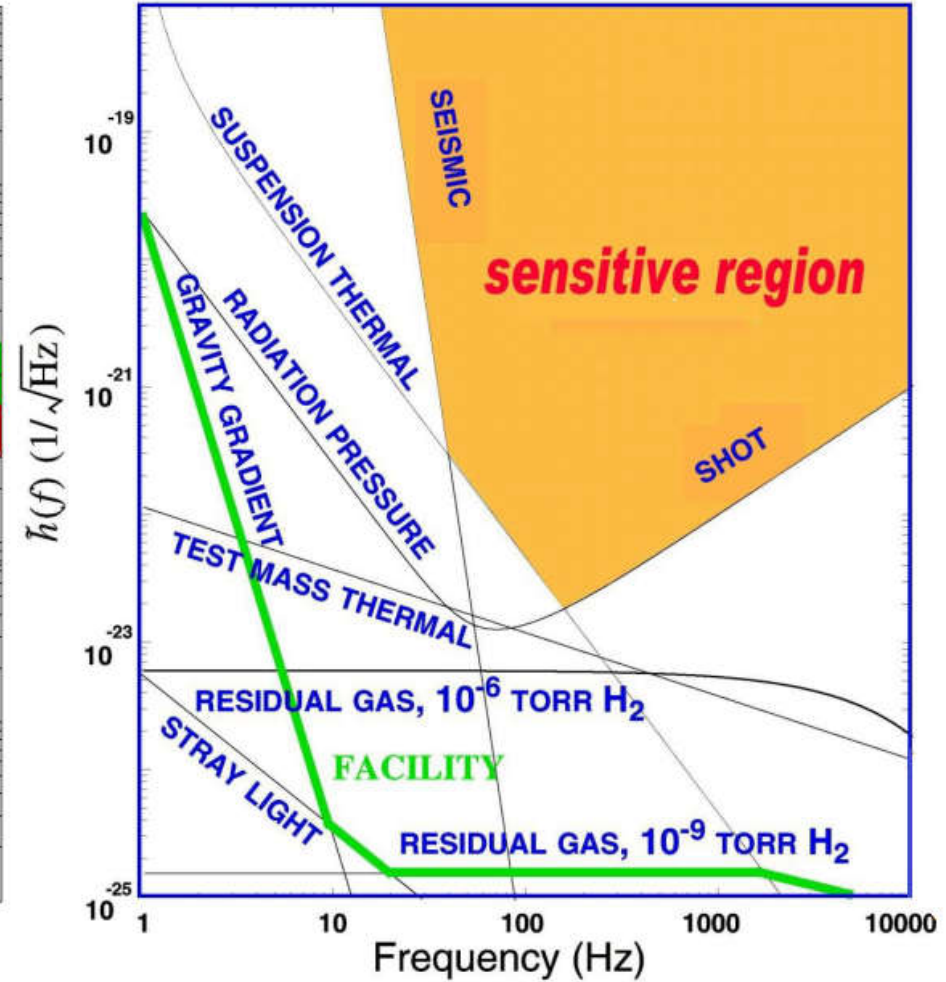
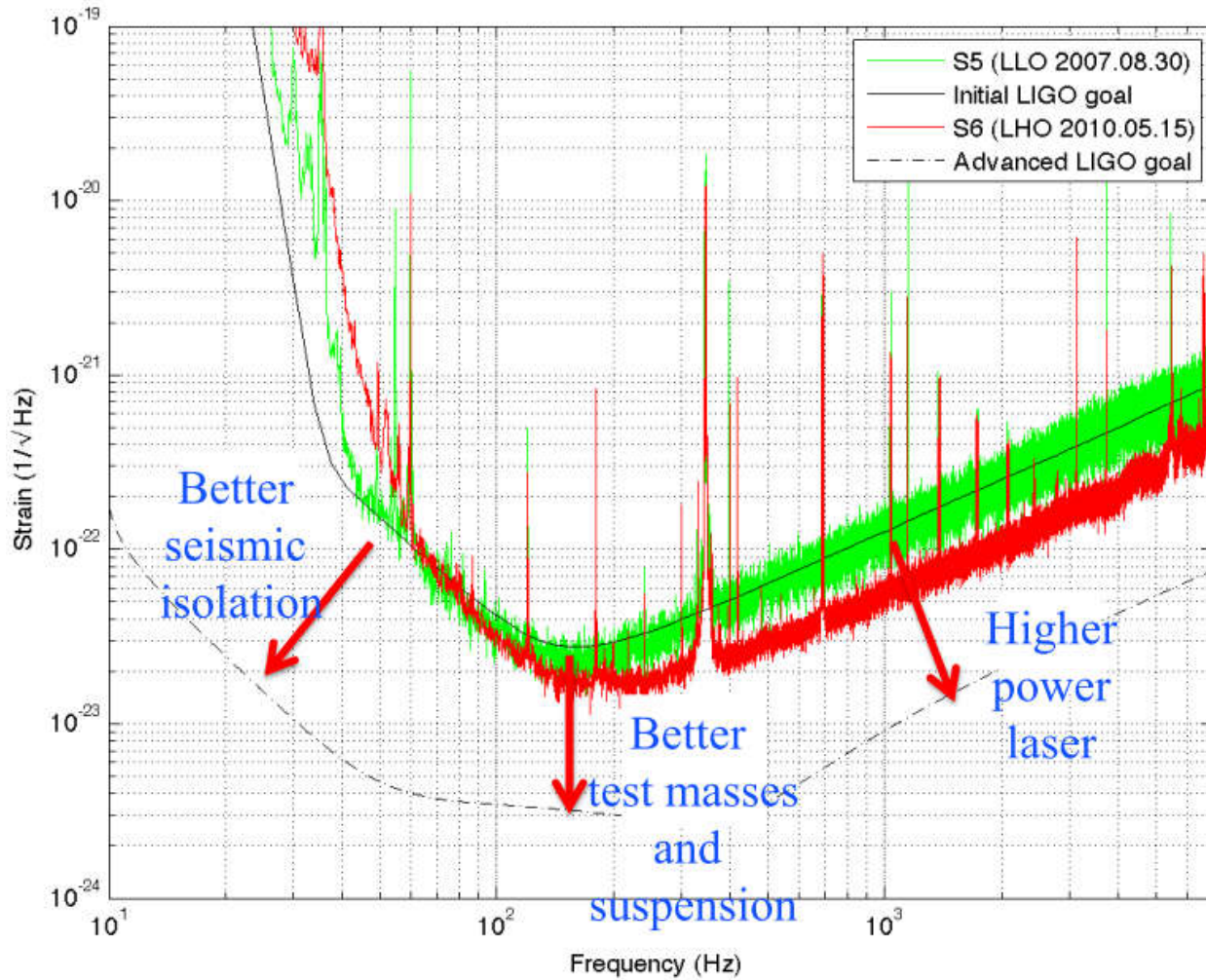
2 sec.

time observable by LIGO-Virgo

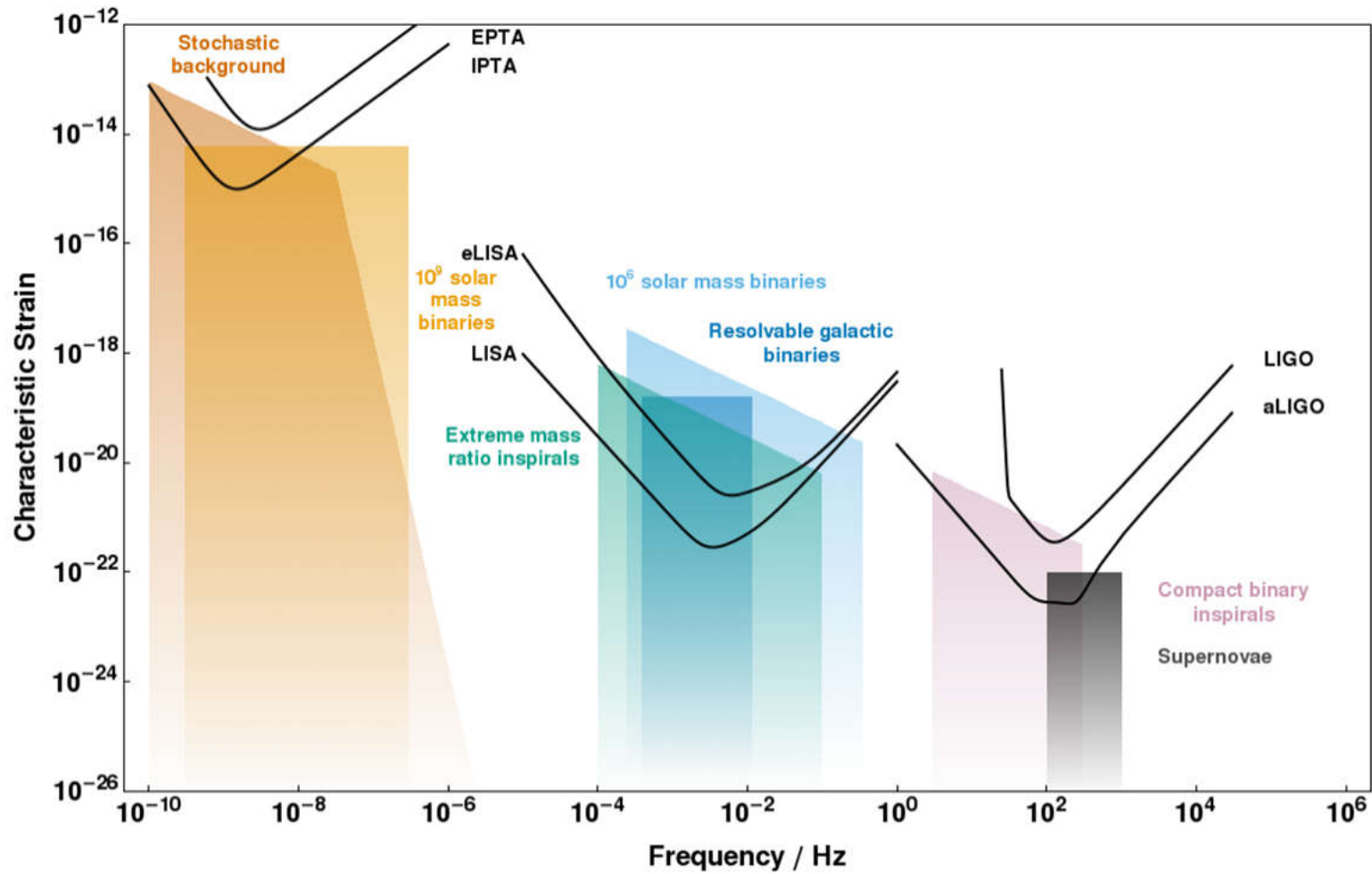




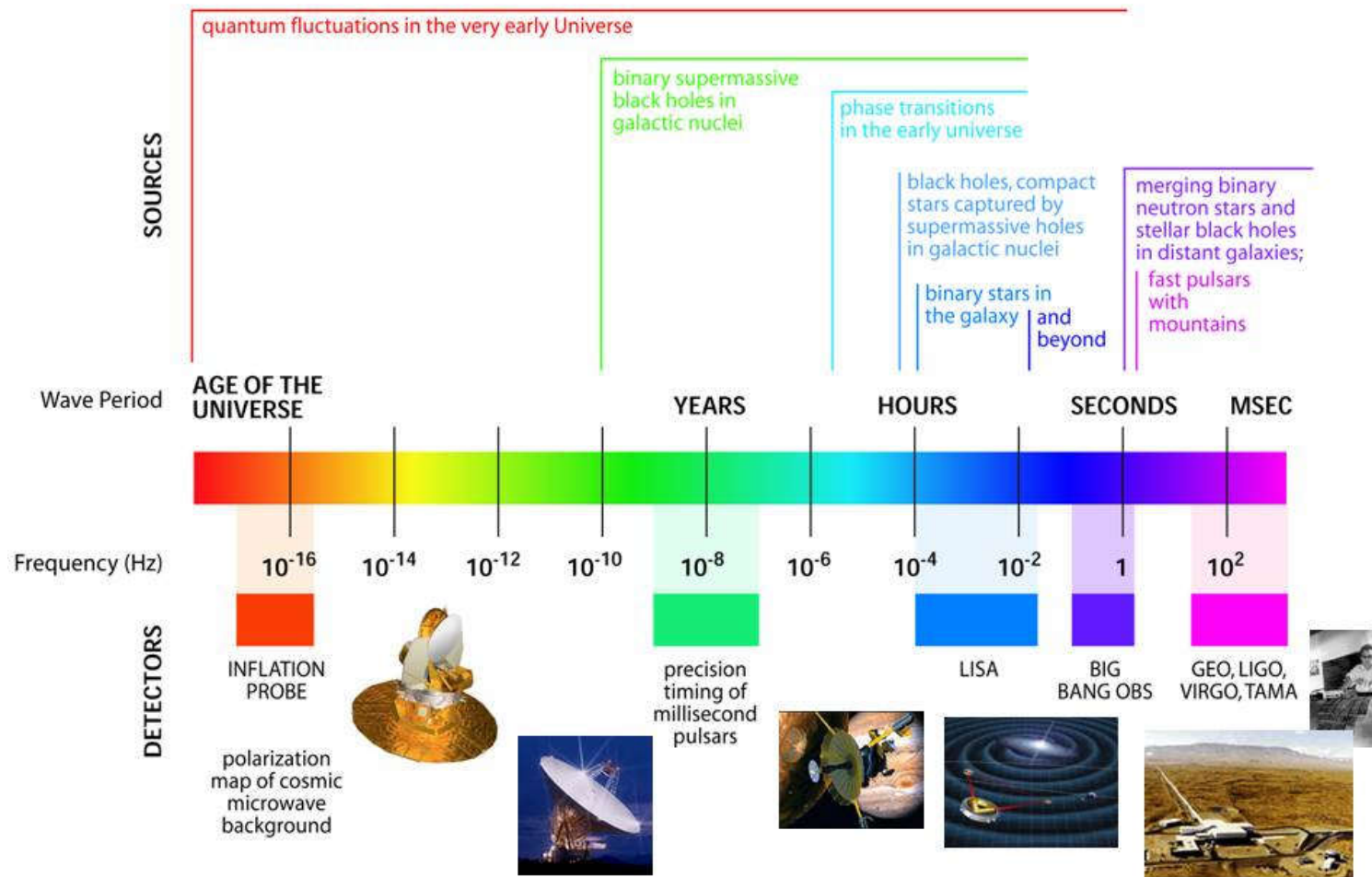
# Améliorations à venir pour LIGO-Virgo



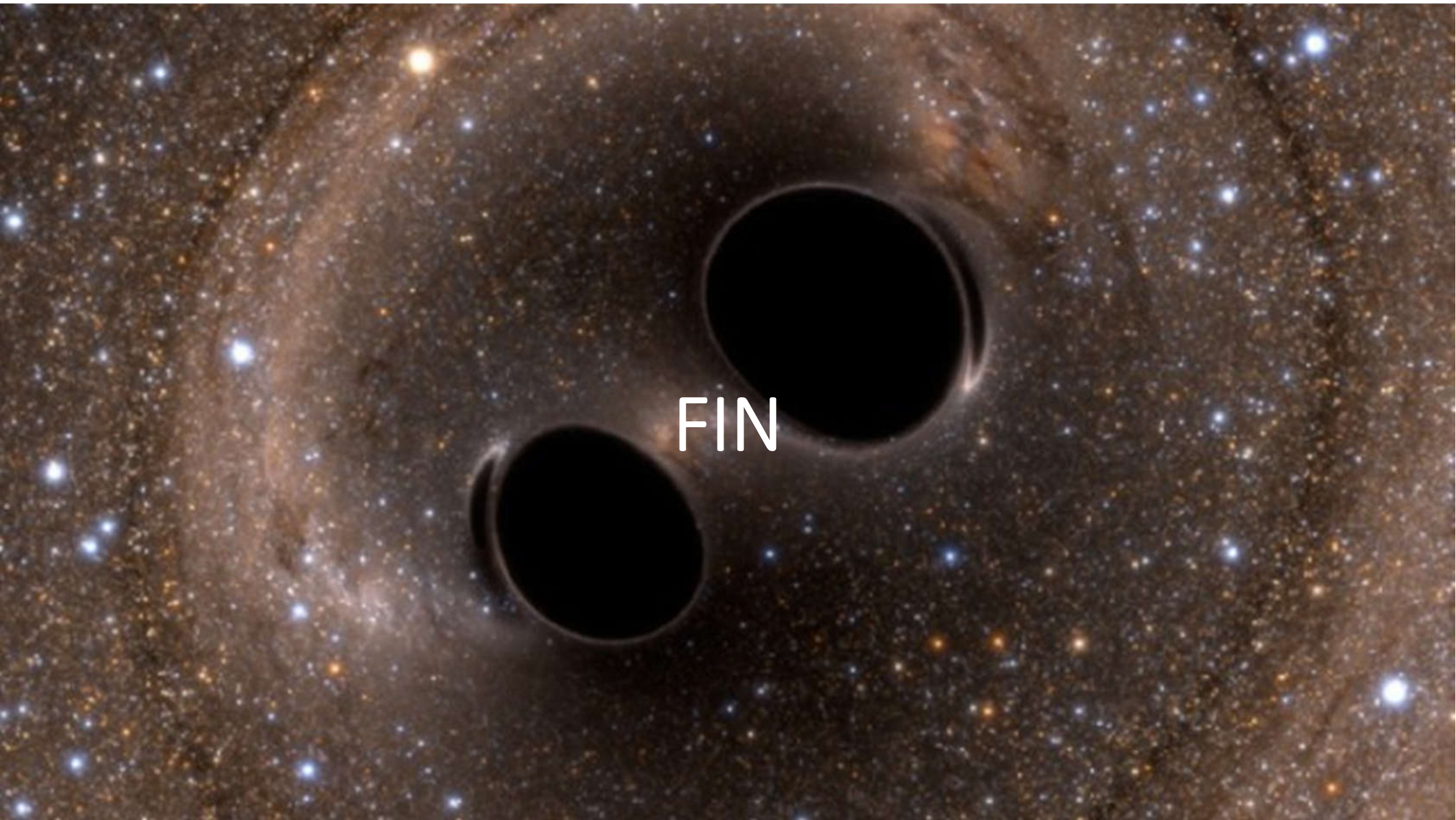
# Le projet spatial européen eLISA : Evolved Laser Interferometer Space Antenna et terrestre international IPTA : International Pulsar Timing Array



# THE GRAVITATIONAL WAVE SPECTRUM







FIN