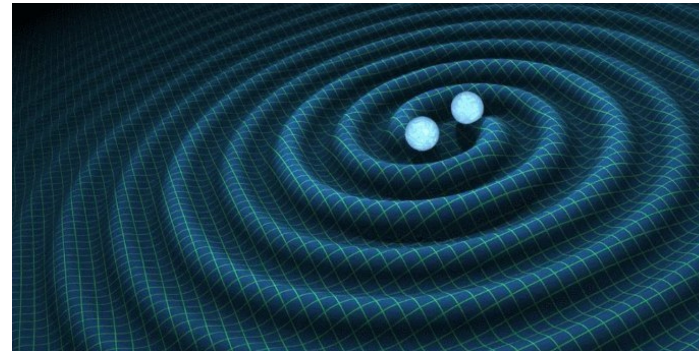


# Les ondes gravitationnelles : Un nouveau messenger pour explorer l'Univers



Angélique Lartaux

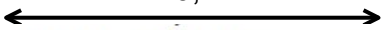




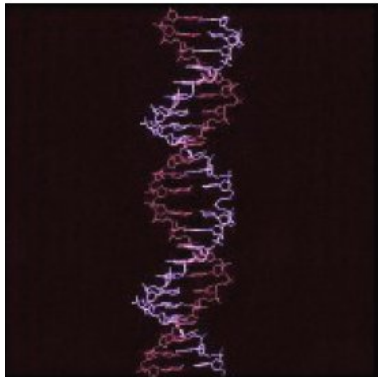
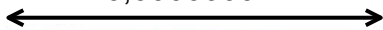
# Quelques notions d'échelles

vers l'infiniment petit

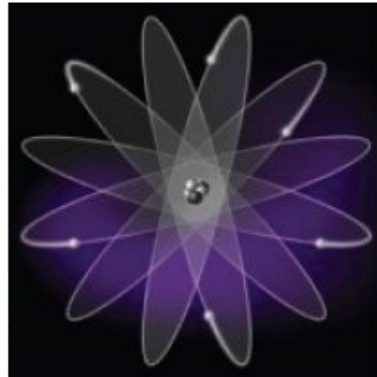
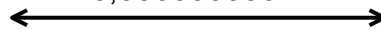
$10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$   
 $= 0,1 \text{ m}$



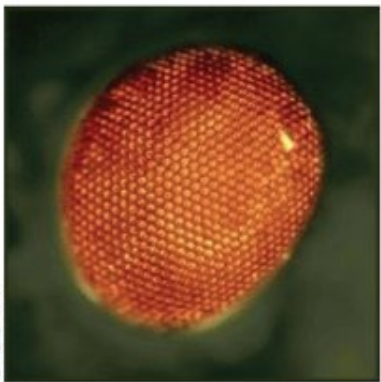
$10 \text{ nm} = 10^{-8} \text{ m}$   
 $= 0,00000001 \text{ m}$



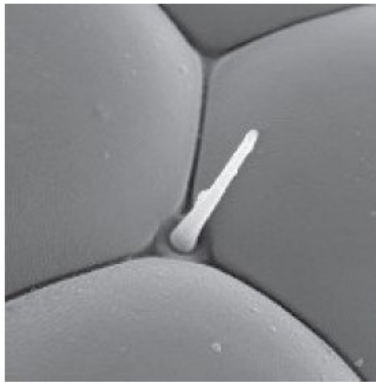
$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$   
 $= 0,0000000001 \text{ m}$



$1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$   
 $= 0,001 \text{ m}$



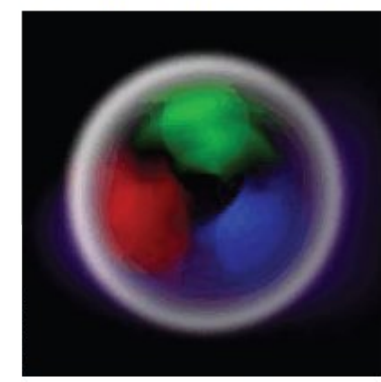
$10 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-5} \text{ m}$   
 $= 0,00001 \text{ m}$



$10 \text{ fm} = 10^{-14} \text{ m}$   
 $= 0,000000000000001 \text{ m}$



$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$   
 $= 0,000000000000001 \text{ m}$



# ÉLÉMENTAIRE

De l'infiniment petit à l'infiniment grand

## Protons et neutrons



# Quelques notions d'échelles

vers l'infiniment grand

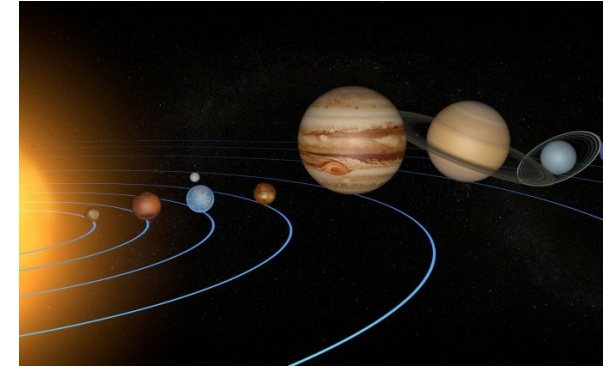
UA = Unité Astronomique



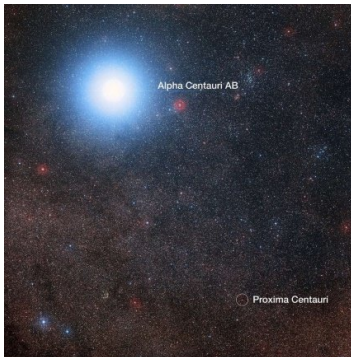
La Terre ( $10^6$  m)  
Rayon = 6371 km



Distance Terre-Soleil ( $10^{11}$  m)  
1UA = 150 millions de km = 8 minutes-lumière



Frontière du Système Solaire ( $10^{13}$  m)  
Héliopause = 120 UA = 16 heures-lumière



Proxima Centauri ( $10^{16}$  m)  
Distance = 4 années-lumière  
= 1,2 parsecs



Voie Lactée ( $10^{21}$  m)  
Diamètre ~ 100 000 années-lumière  
~ 30 000 parsecs (30 kpc)



Galaxie d'Andromède ( $10^{23}$  m)  
Distance ~ 2.5 millions d'années-lumière  
~ 0,8 millions de parsecs (Mpc)



# La gravitation

régit les mouvement de la matière à l'échelle astronomique

## Isaac Newton (1687)



L'espace est absolu,  
rigide et immuable  
⇒ utilisée pour le  
lancement des satellites

## Albert Einstein (1915)



« *La matière indique à l'espace-temps comment se courber, l'espace-temps indique à la matière comment se déplacer* » J. A. Wheeler  
⇒ nécessaire pour les GPS



# Une onde gravitationnelle

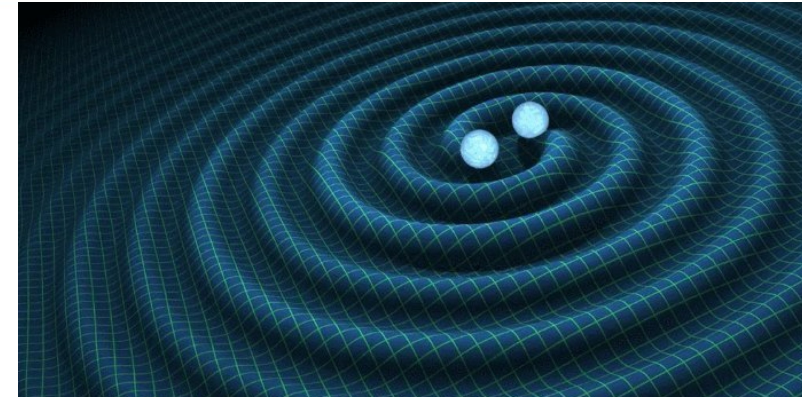
est une déformation de l'espace-temps

## Propriétés des ondes gravitationnelles

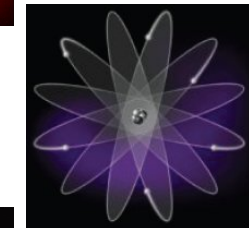
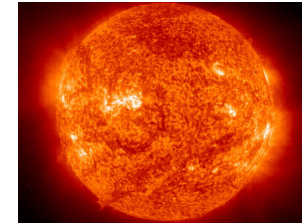
- prédites par Albert Einstein en 1916,
- émises par des masses en mouvement,
- se propagent à la vitesse de la lumière,
- peuvent traverser des millions d'années-lumière sans être absorbées par la matière

## Ordre de grandeur = $10^{-21}$

- modification de la distance Terre-Soleil ( $10^{11}$  m) d'un atome ( $10^{-10}$  m) ou de la distance Soleil-Proxima ( $10^{16}$  m) d'un cheveu ( $10^{-5}$  m)
- modification d'une longueur de 1km d'un millièbre de proton => ce que l'on mesure sur Terre



Soleil



Atome



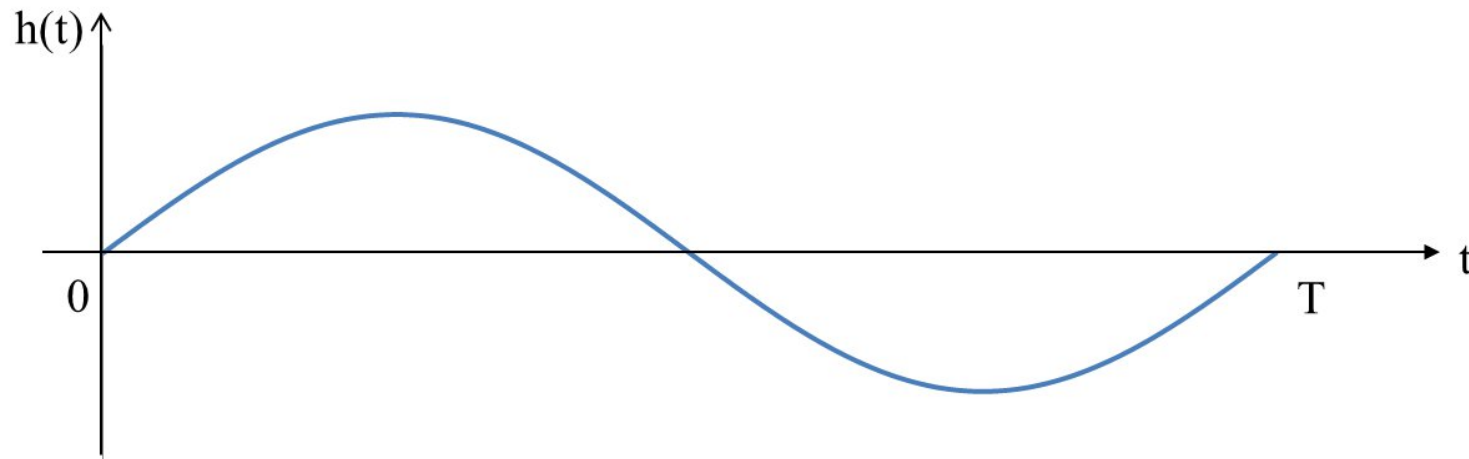
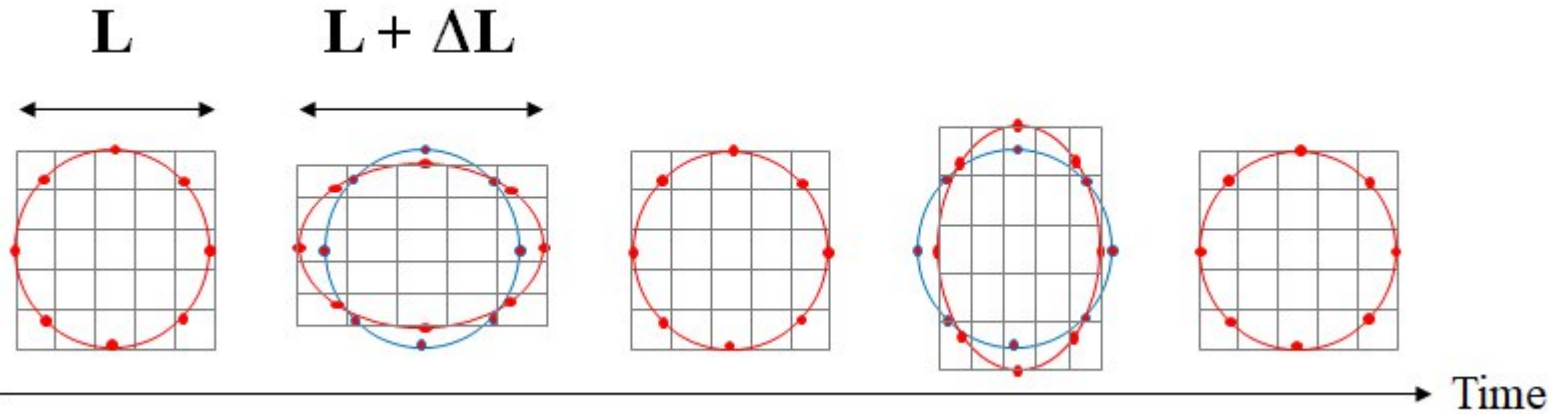
Terre





# Détecter une onde gravitationnelle

revient à mesurer une variation de longueur au cours du temps



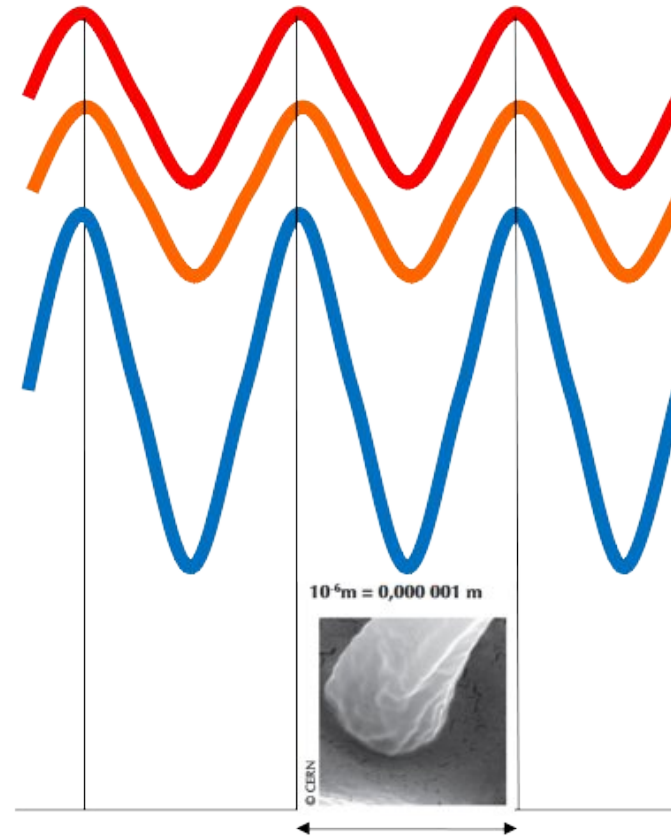
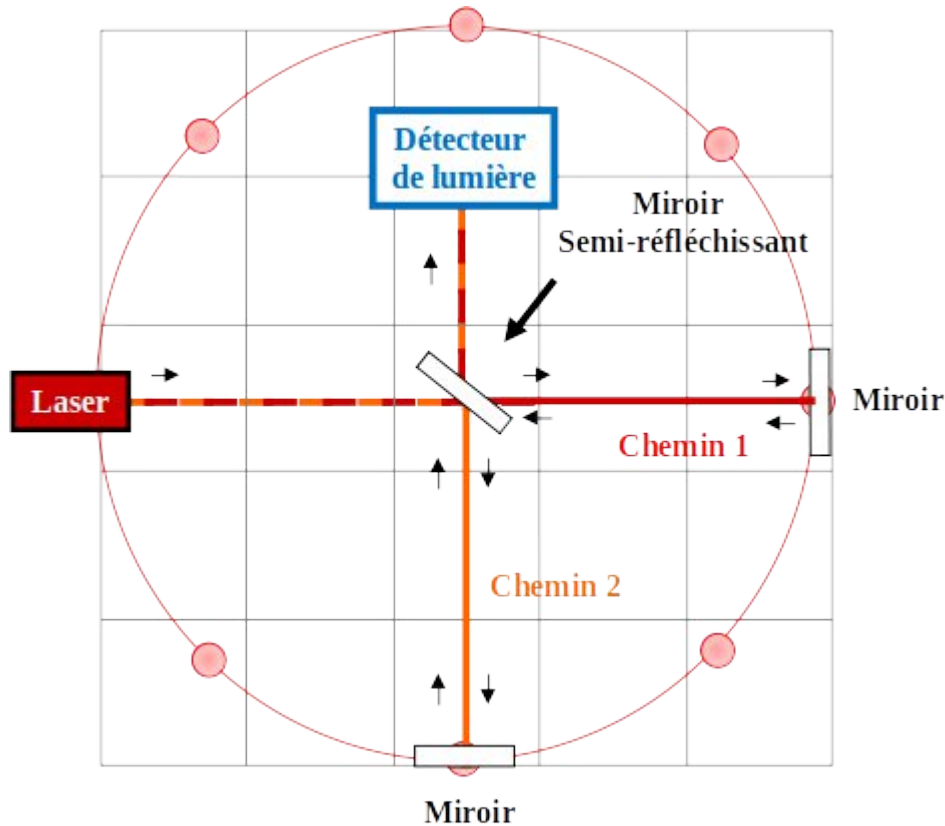
La déformation relative  $\Delta L/L$  due au passage de l'onde gravitationnelle est proportionnelle à l'amplitude de l'onde gravitationnelle :

$$h \simeq 2 \frac{\Delta L}{L}$$



# L'interféromètre de Michelson

est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles



Faisceau Chemin 1

Faisceau Chemin 2

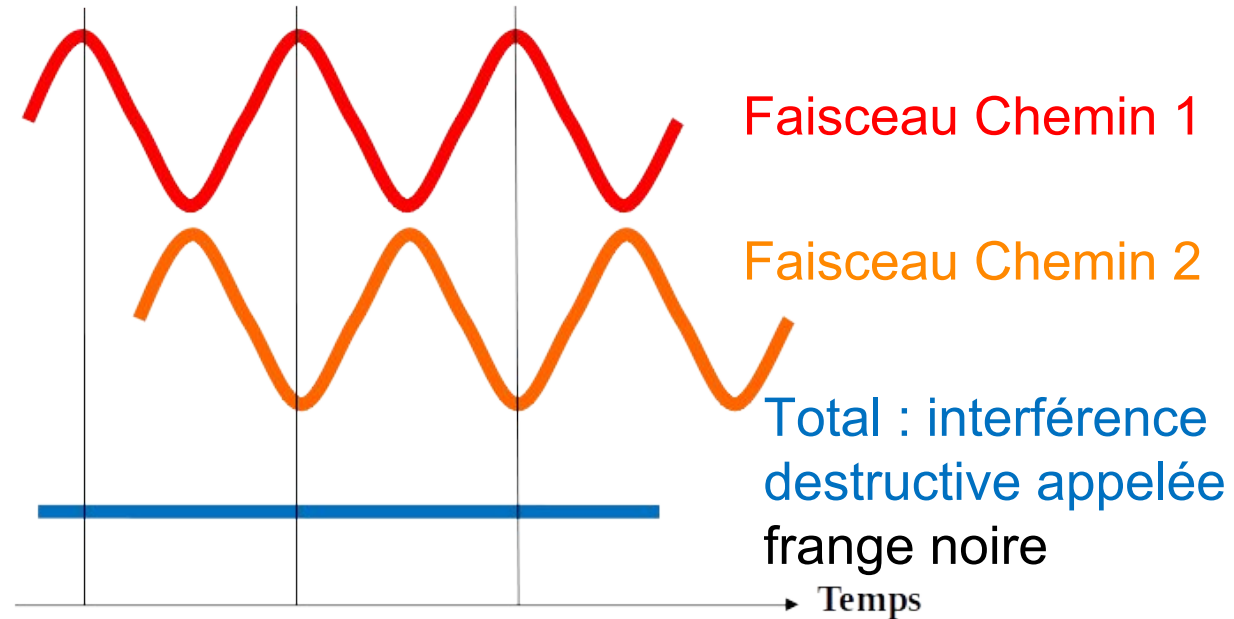
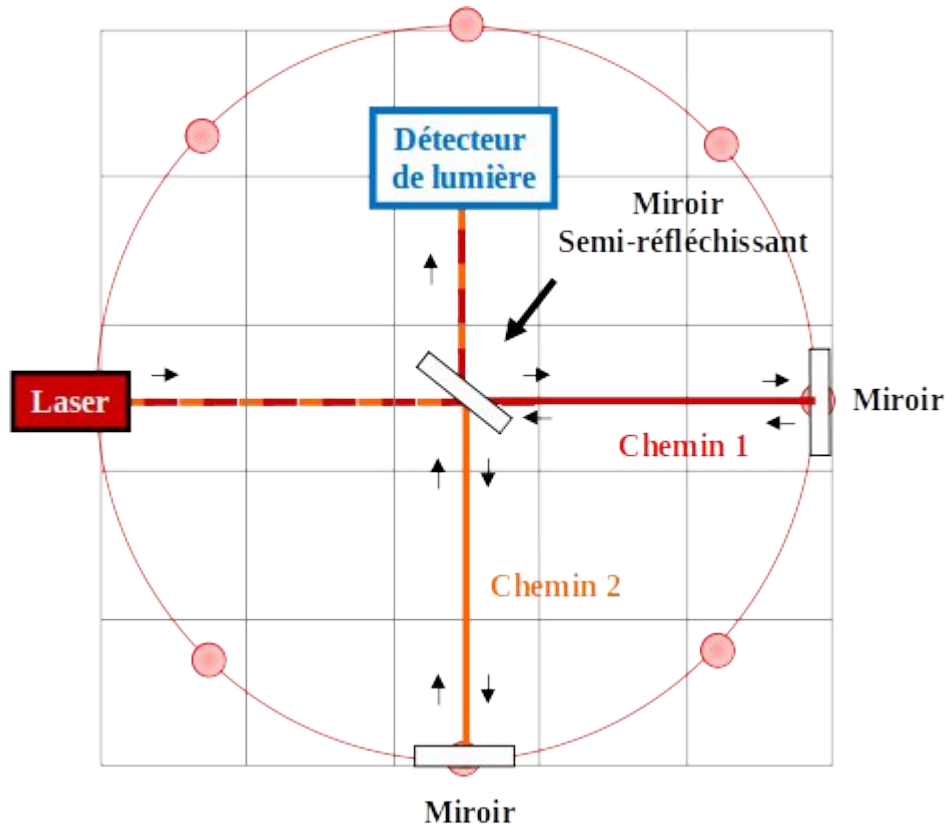
Total : interférence constructive

Le détecteur de lumière « voit » la somme des deux faisceaux



# L'interféromètre de Michelson

est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles



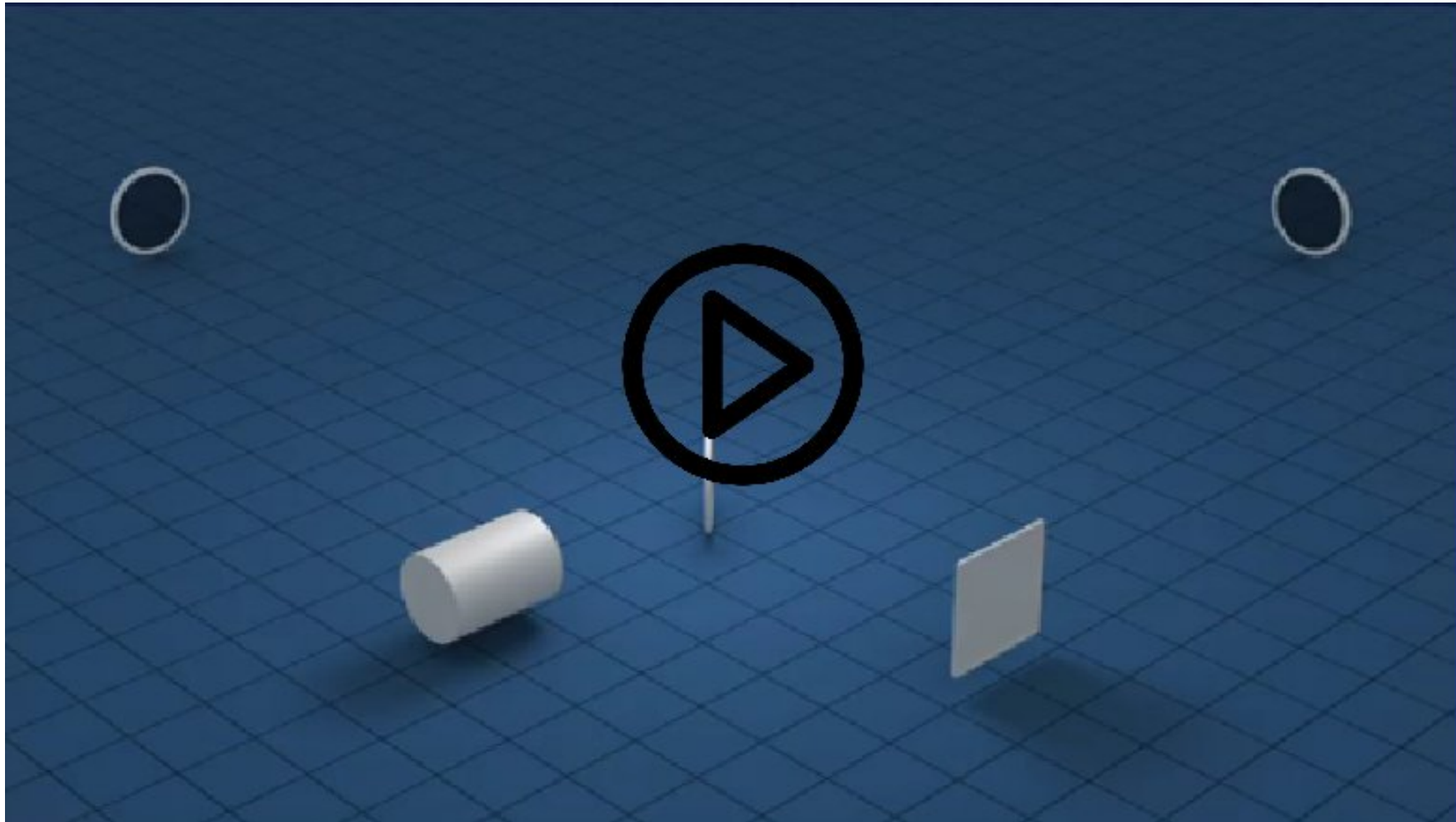
L'état d'interférence dépend de la différence de longueur entre les deux chemins





# L'interféromètre de Michelson

est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles





## Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

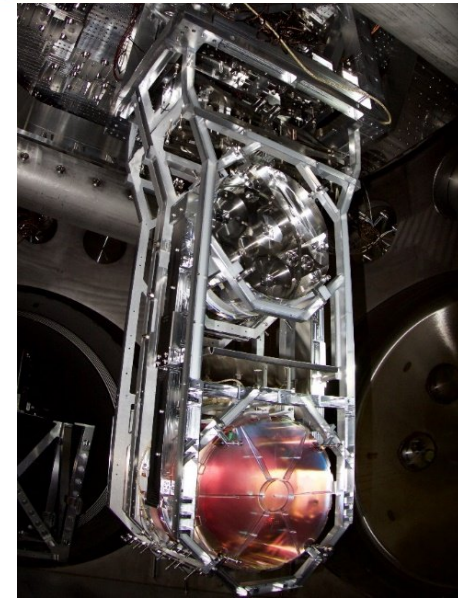
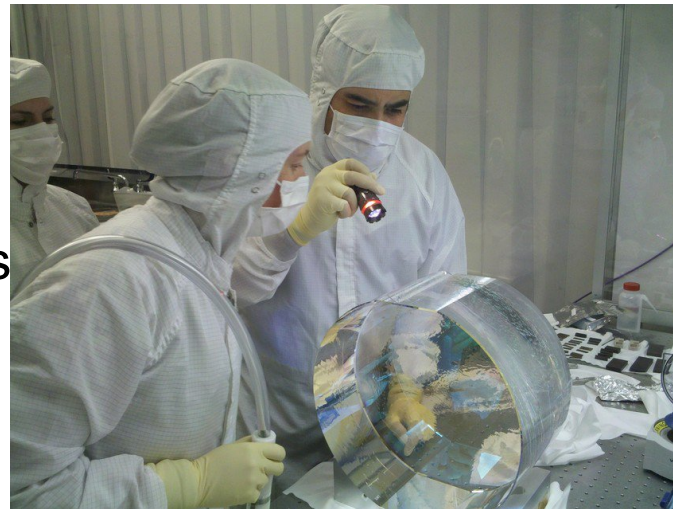


### Les miroirs

- Verre le plus pur du monde
- Surface précise à 5 atomes près
- Réflectivité aux limites technologiques (perte d'1 photon sur 1 million)

### Le vide

~ 10 000 m<sup>3</sup> de vide (soit environ 4 piscines olympiques) à pression de 10<sup>-9</sup> mbar (soit 2 cuillères à café d'eau)

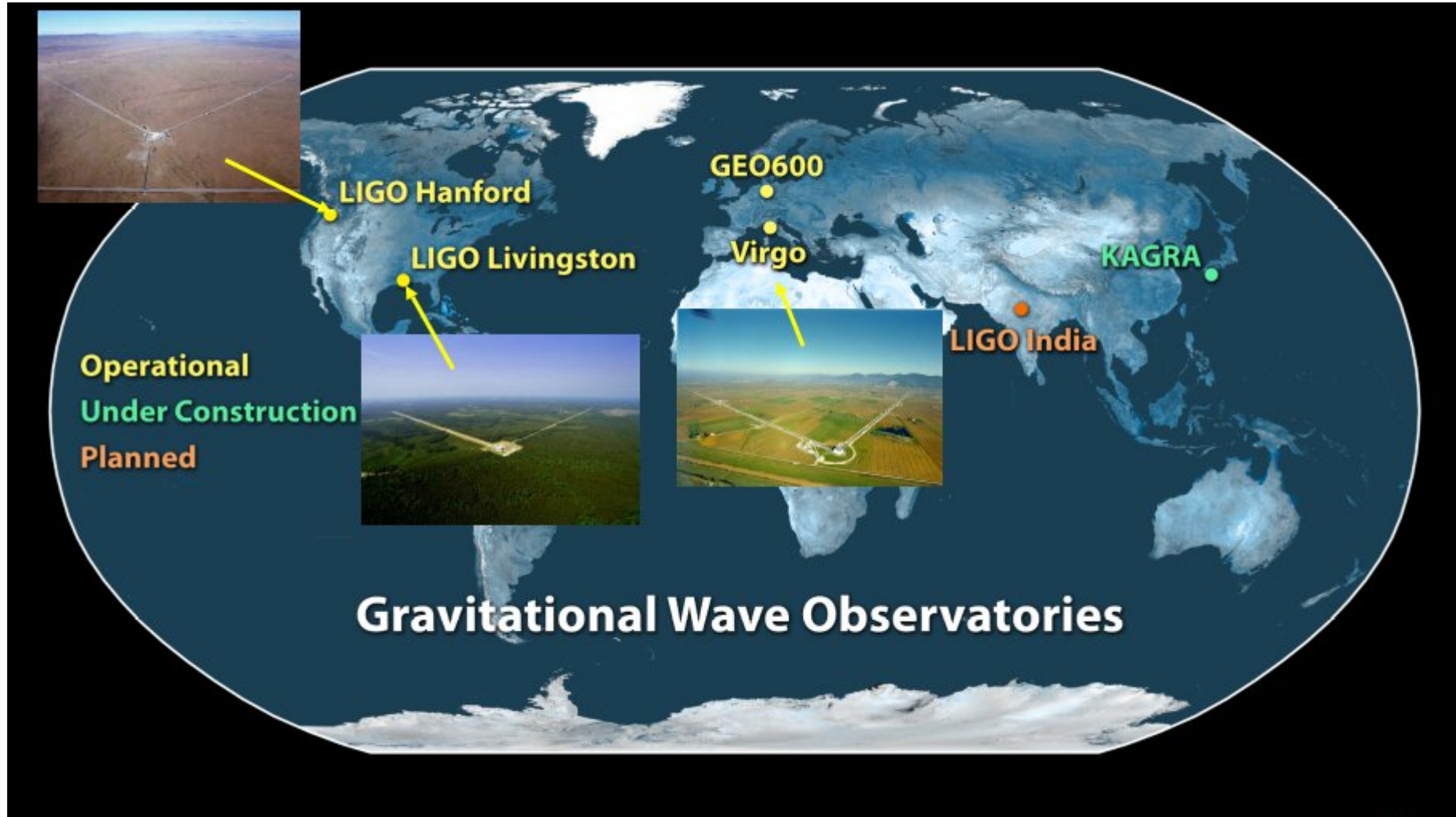


### L'isolation

- Suspension pour s'isoler des vibrations du sol
- Contrôle de la position à moins d'1/100 d'atome près



# Un réseau international de détecteurs

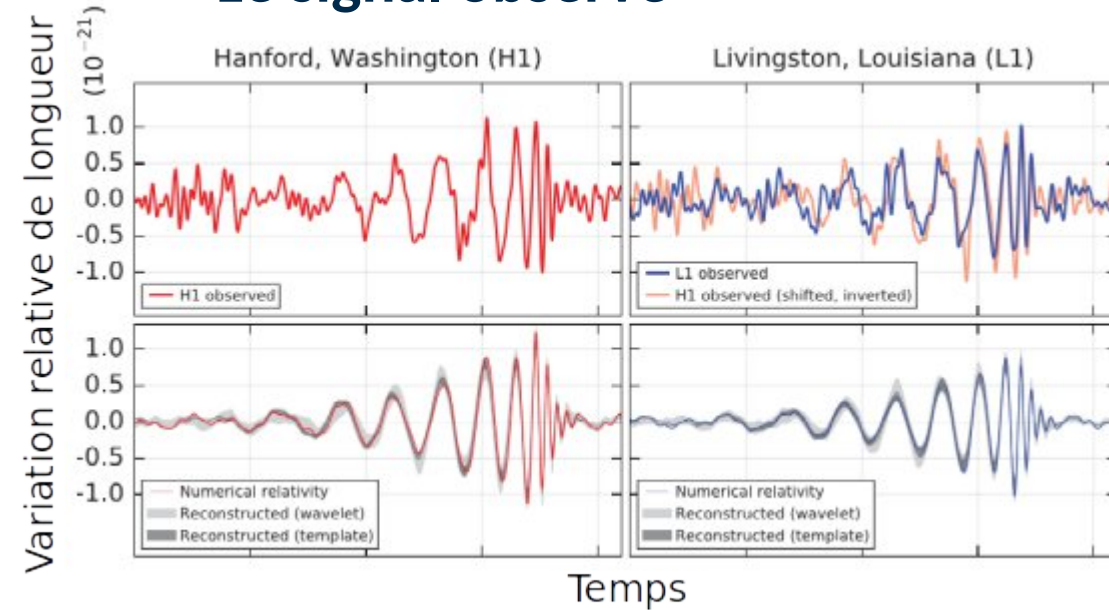




# La première détection directe

d'une onde gravitationnelle a eu lieu le 14 septembre 2015

## Le signal observé



$$h \simeq 2 \frac{\Delta L}{L}$$

$$h \sim 10^{-21}$$

$$L \sim 4 \text{ km} = 4 \cdot 10^3 \text{ m}$$

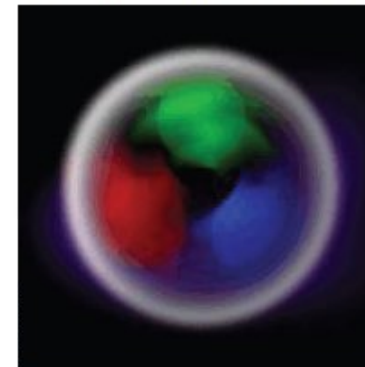
$$\Delta L \sim h L / 2$$

$$\Delta L \sim 4 \cdot 10^3 \times 10^{-21} / 2 \text{ m} = 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$$

$$\Delta L \sim 10^{-15} / 500$$

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$= 0,000000000000001 \text{ m}$$



Protons et neutrons

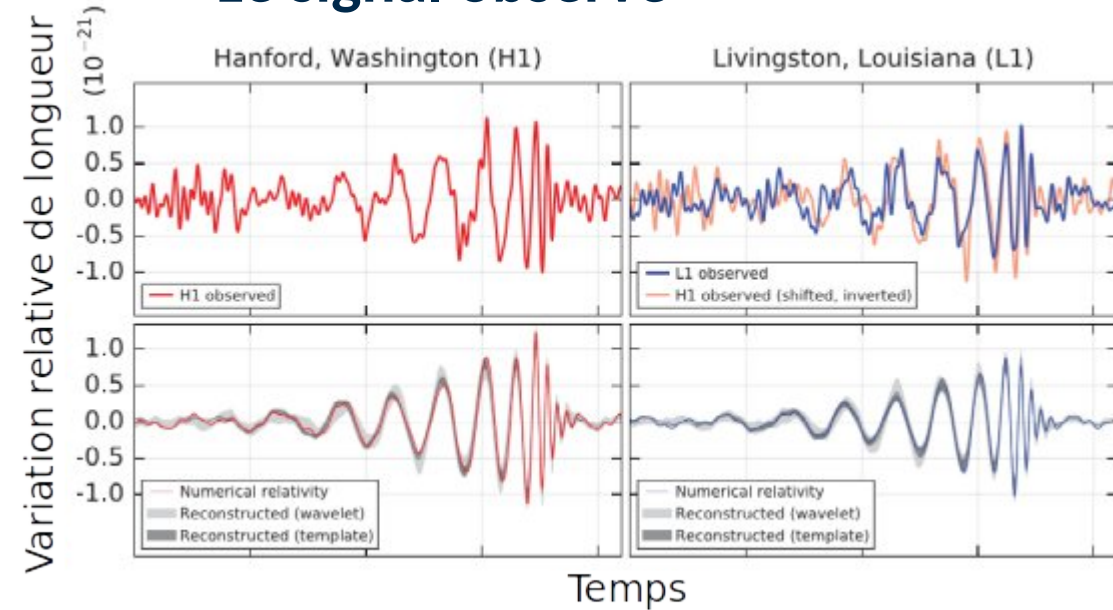
- Signal de 200 ms, visible dans les 2 détecteurs
- Forme en accord avec les prédictions théoriques de la relativité générale
- Étirement de moins d'1 proton sur 4 km



# La première détection directe

d'une onde gravitationnelle a eu lieu le 14 septembre 2015

## Le signal observé



- Signal de 200 ms, visible dans les 2 détecteurs
- Forme en accord avec les prédictions théoriques de la relativité générale
- Étirement de moins d'1 proton sur 4 km

## Les détecteurs LIGO

- 2 détecteurs de 4 km de long chacun
- 3030 km entre les deux détecteurs
- ⇒ décalage de temps d'observation entre les deux détecteurs au maximum de 10 ms
- ⇒ décalage observé de 7 ms



## La source

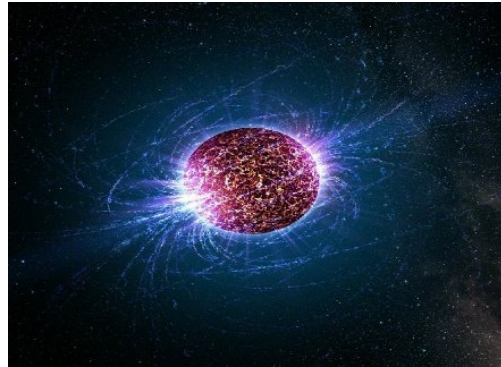
- 2 trous noirs d'une trentaine de fois la masse du Soleil ( $M_s$ ) ont fusionné en un trou noir d'environ  $60 M_s$
- À 410 Mpc de la Terre
- L'énergie émise est  $\sim 50\,000$  milliards de fois celle émise par le Soleil en 1 an !



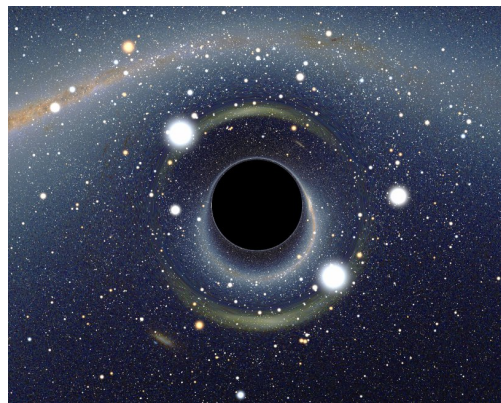
# Les sources d'ondes gravitationnelles

sont classées en plusieurs types

## Les fusions de systèmes binaires d'objets compacts



Étoile à neutrons :  
La masse de la Terre dans une boule de rayon 260 m (la longueur de ce bâtiment)



Trou noir :  
La masse de la Terre dans une boule de rayon 1 cm (la taille d'un calot)

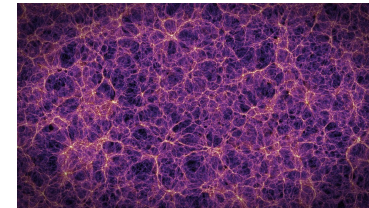


## Les supernovae



Explosion d'une étoile massive en fin de vie

## D'autres sources ?



Cordes cosmiques ?

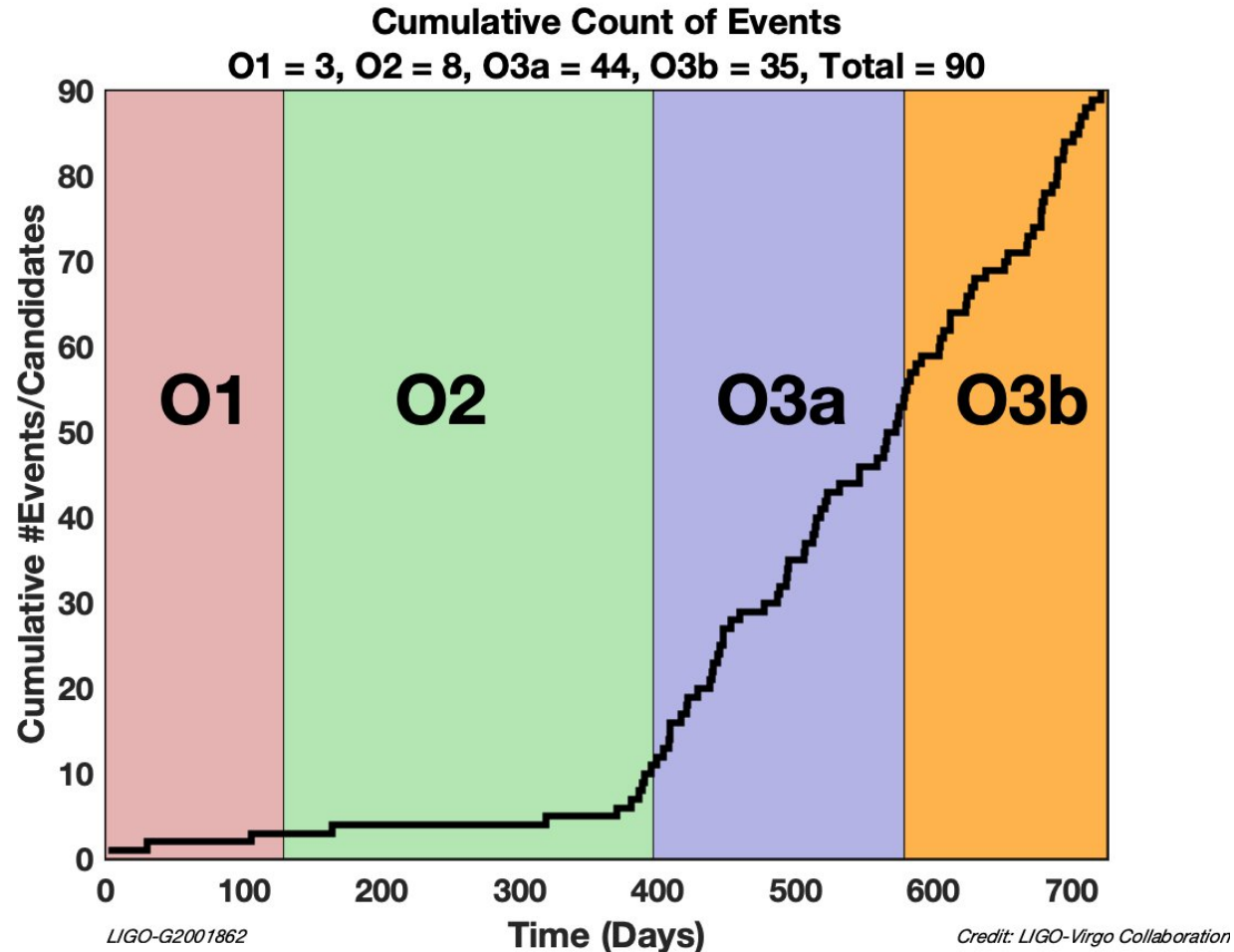


Autres sources inconnues ?



# Près de 100 ondes gravitationnelles

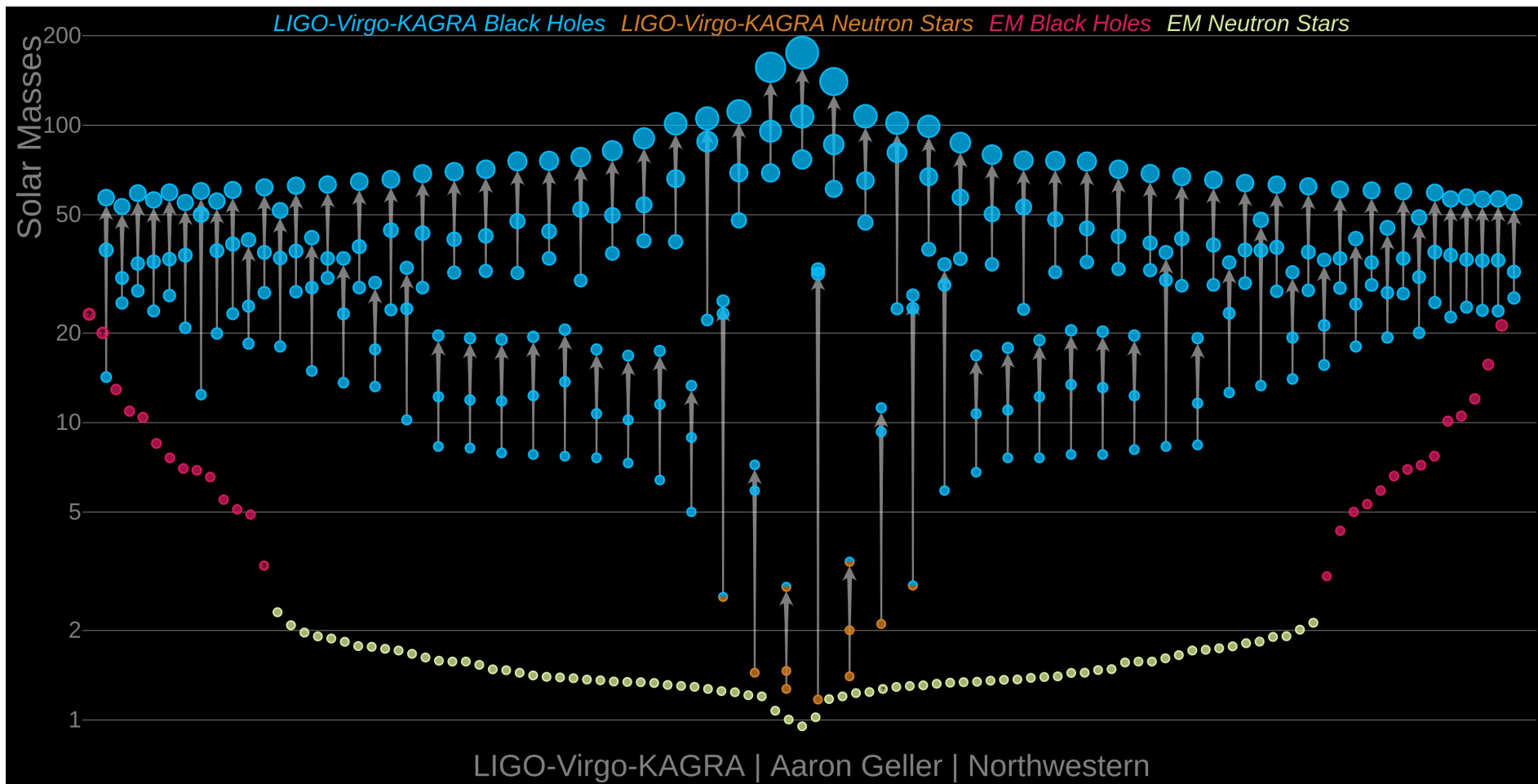
ont été observées depuis 2015





# Près de 100 ondes gravitationnelles

ont été observées depuis 2015



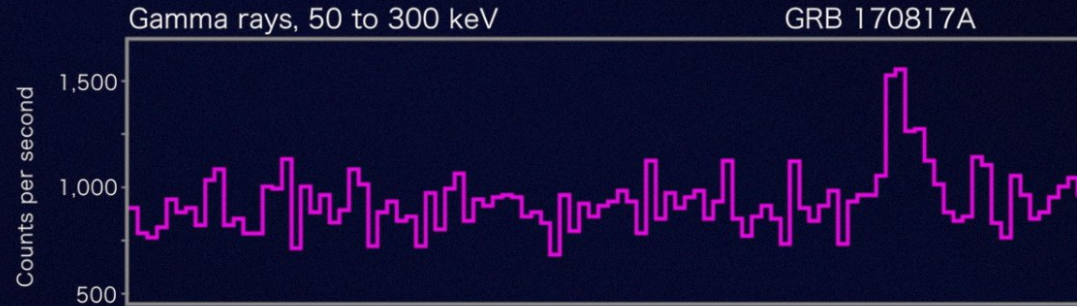




# Un événement particulier

a marqué l'astronomie multi-messagers

Fermi



## Fusion de 2 étoiles à neutrons

17 août 2017

Vision complète de la source

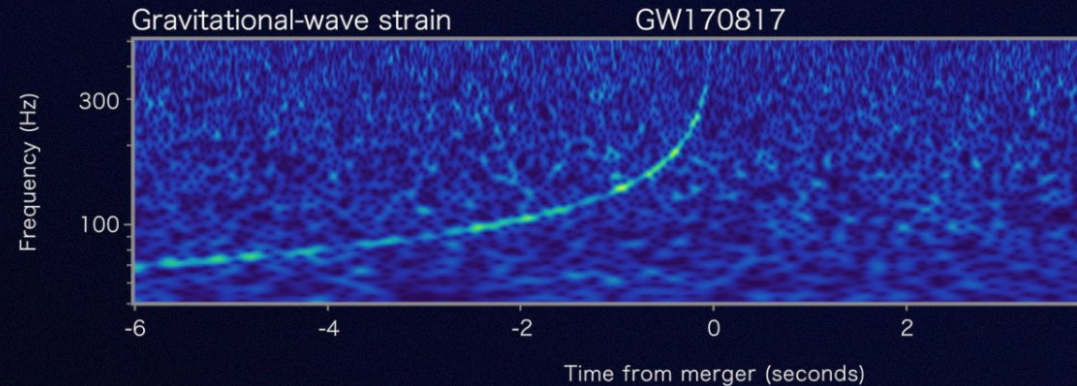
⇒ compréhension des sursauts gamma

⇒ origine des éléments chimiques les plus lourds

(plomb, or, platine)

⇒ propriétés des étoiles à neutrons

LIGO





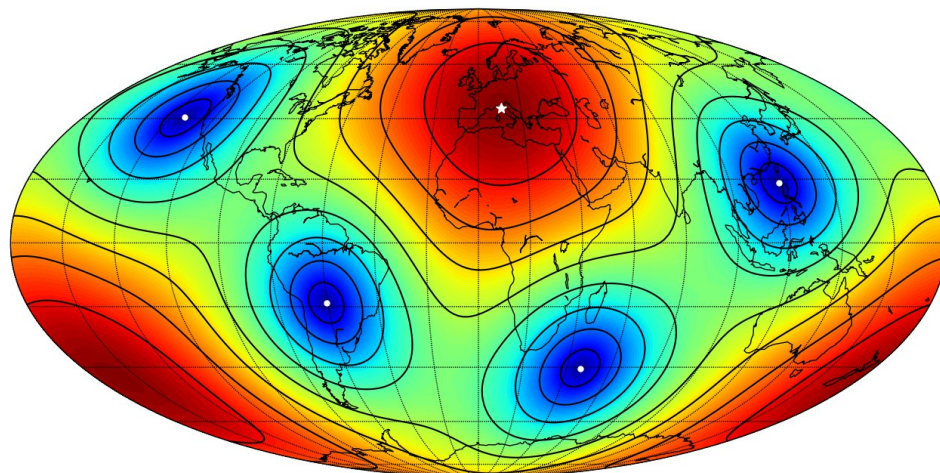
# Un signal très faible dans Virgo

mais primordial pour sa localisation

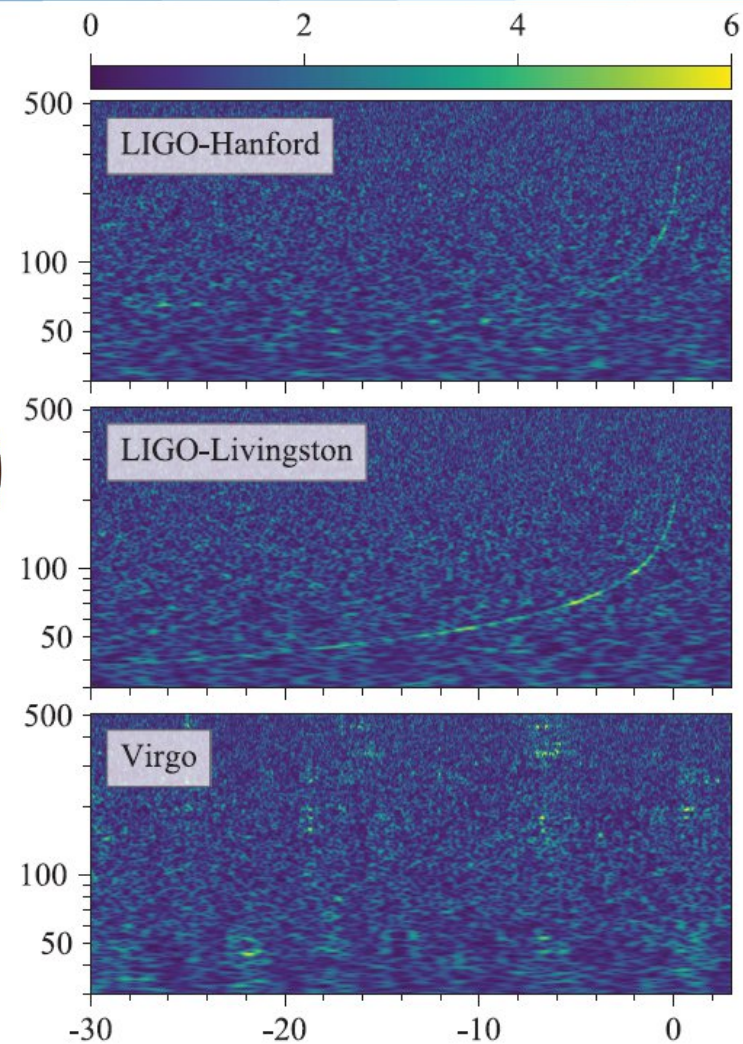
Localisation en coordonnées terrestres



Diagramme d'antenne de Virgo



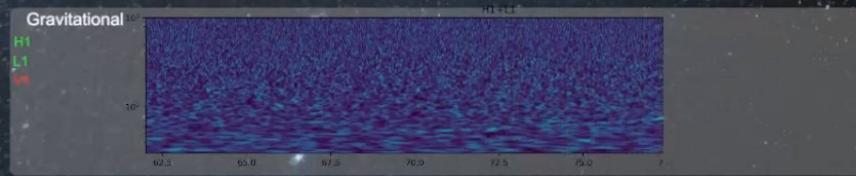
Le signal aurait dû être observé par Virgo s'il n'avait pas été émis dans une zone du ciel où Virgo est aveugle  
⇒ cela a permis de réduire la zone de recherche d'une contrepartie optique d'un facteur 20  
⇒ source optique détectée à "seulement" 40 Mpc de la Terre





# GW170817

Advanced LIGO registered the gravitational waves.





**Merci !**