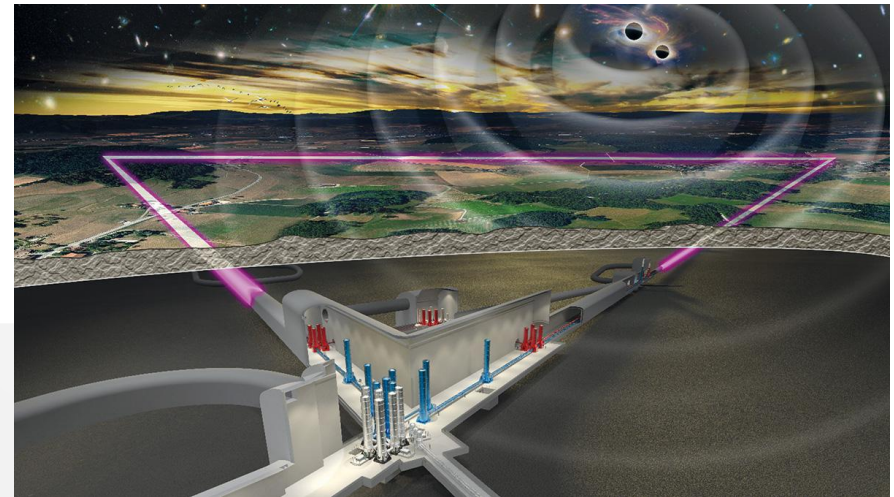


Détecteurs d'ondes gravitationnelles

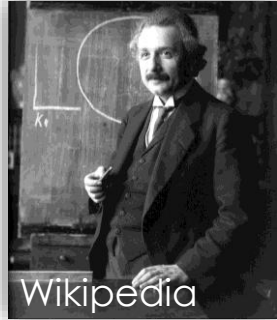


Virgo en Italie

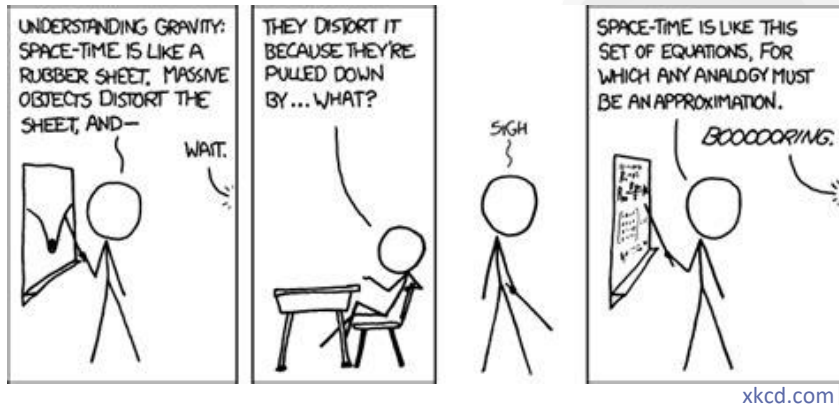


Einstein telescope

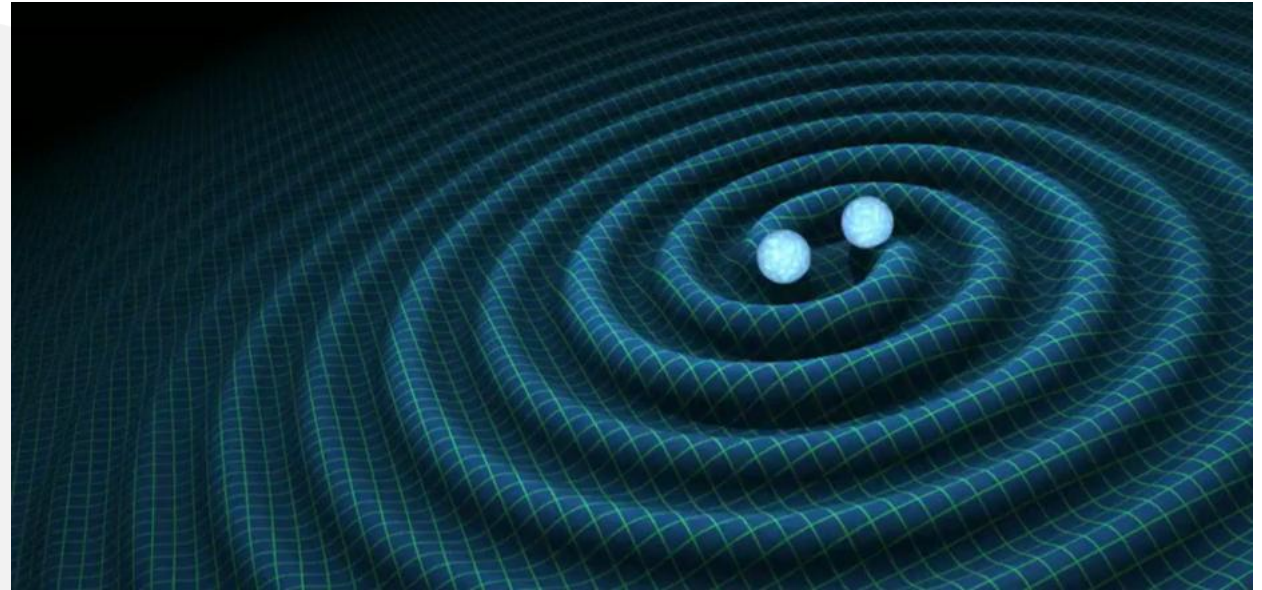
- Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?
- Comment détecter les ondes gravitationnelles ?
- Quelles sont les limites des détecteurs ?
 - Focus sur une source de bruit



“ Des oscillations de la courbure de l'espace-temps produite par des masses accélérées, et se propageant à la vitesse de la lumière dans le vide. ”
A. Einstein, 1916



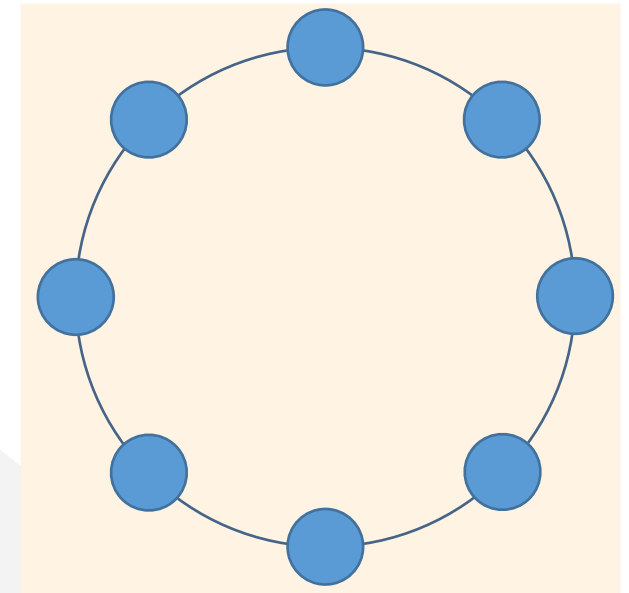
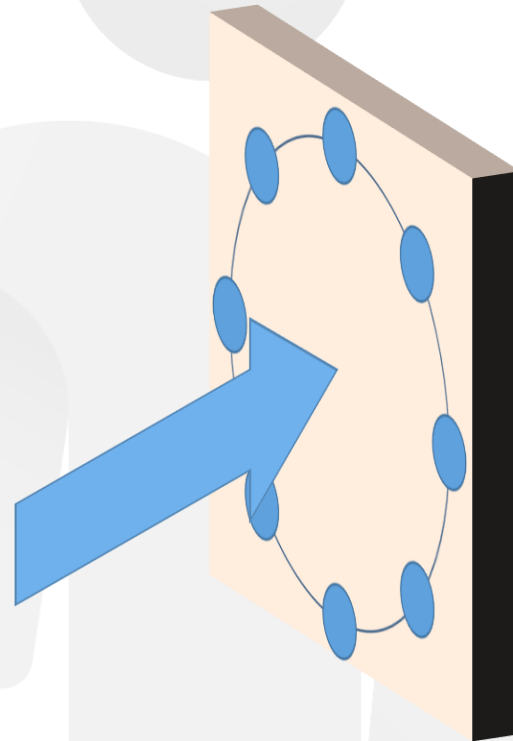
xkcd.com



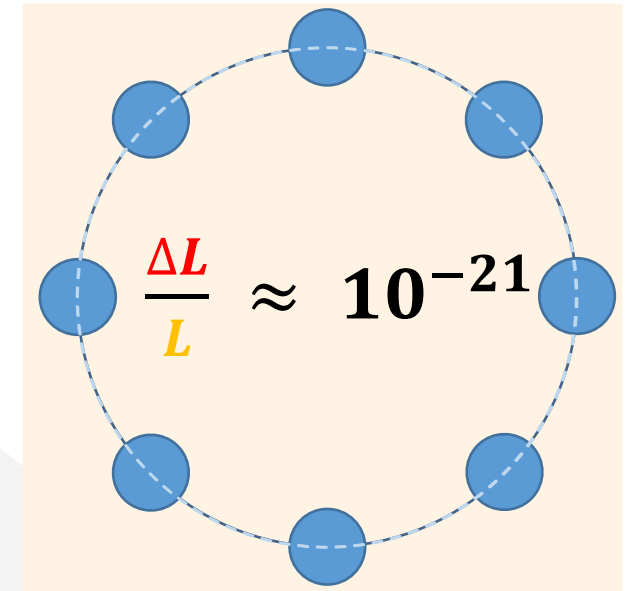
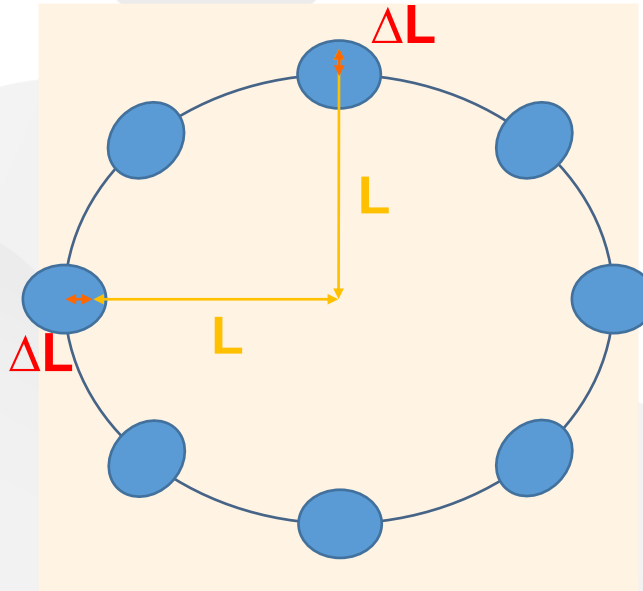
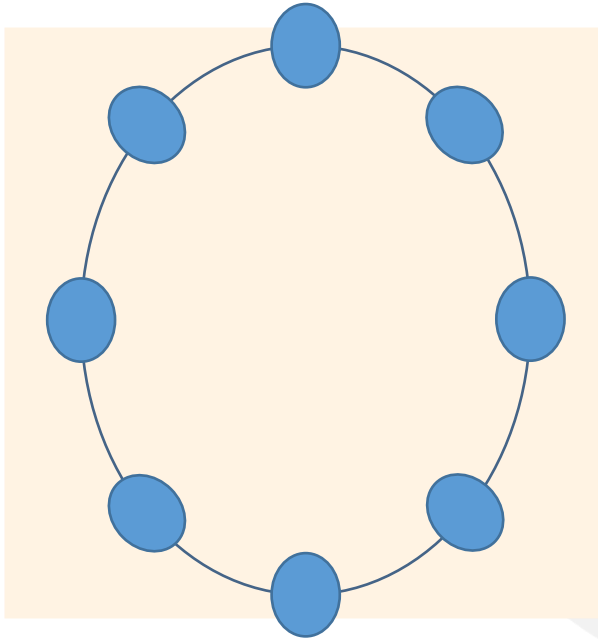
©R. Hurt/Caltech-JPL



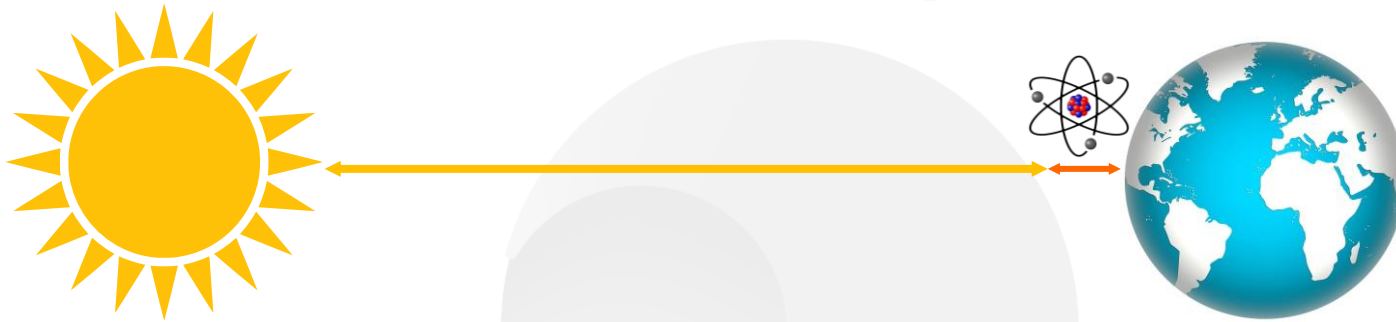
- Qu'est ce que se passe quand on est traversé par une onde gravitationnelle ?



- Une déformation de l'espace-temps



- Une déformation de l'espace-temps, oui mais c'est pas grand-chose ...



Distance terre-soleil : 150 millions de kilomètres, soit $\sim 1.5 \cdot 10^{11}$ m
Taille d'un atome : 100 picomètres, soit 10^{-10} m

$$\frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-21}$$

- Un outils pour mesurer des déformations de l'espace-temps

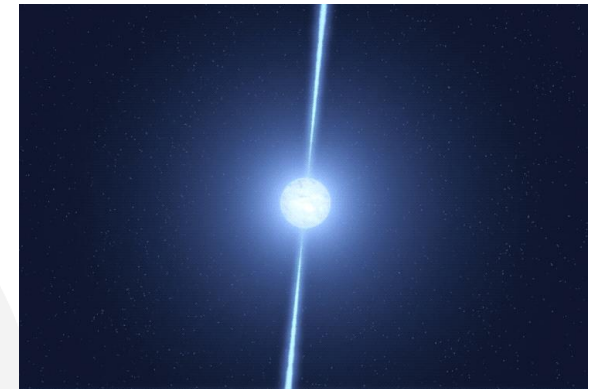


Joseph Weber avec sa Barre de Weber. 1968 © AIP, Emilio Segrè Visual Archives

Une preuve de leur existence (Prix Nobel de physique 1993)

L'observation d'un pulsar binaire

- ⇒ Diminution de la période observé
- ⇒ Explicable par la théorie des ondes gravitationnelles



- Un outils pour mesurer des distances : La lumière

Application numérique :

$c = 299\,792\,458\text{ m/s}$

Précision horloges à réseau optique : 10^{-18} s

=> Précision de mesure $\sim 3 \cdot 10^{-10}\text{ m}$, soit 0,3 nm

Avec un déformation relative de 10^{-21}

=> Mesure sur 300 000 000 km

Laser

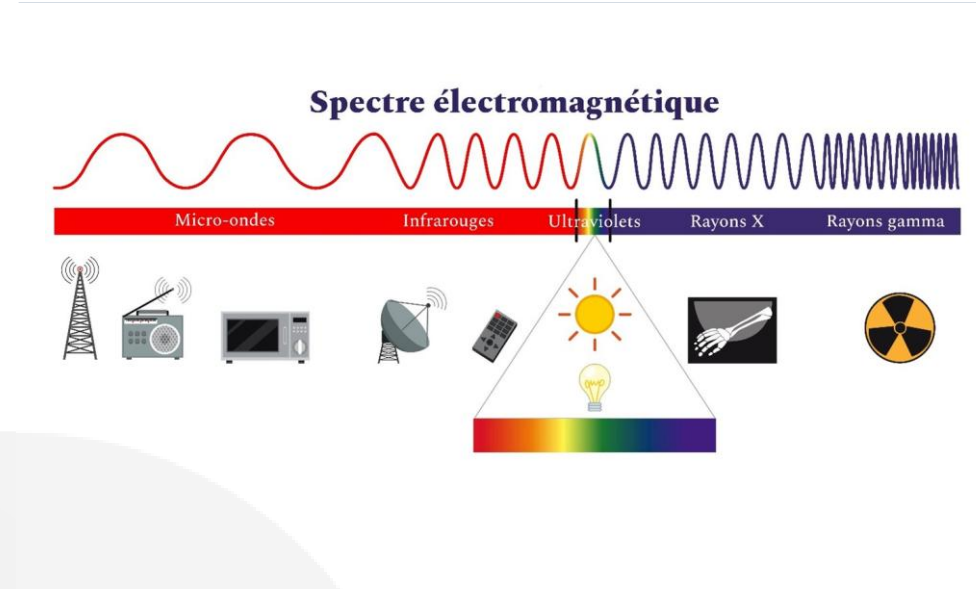
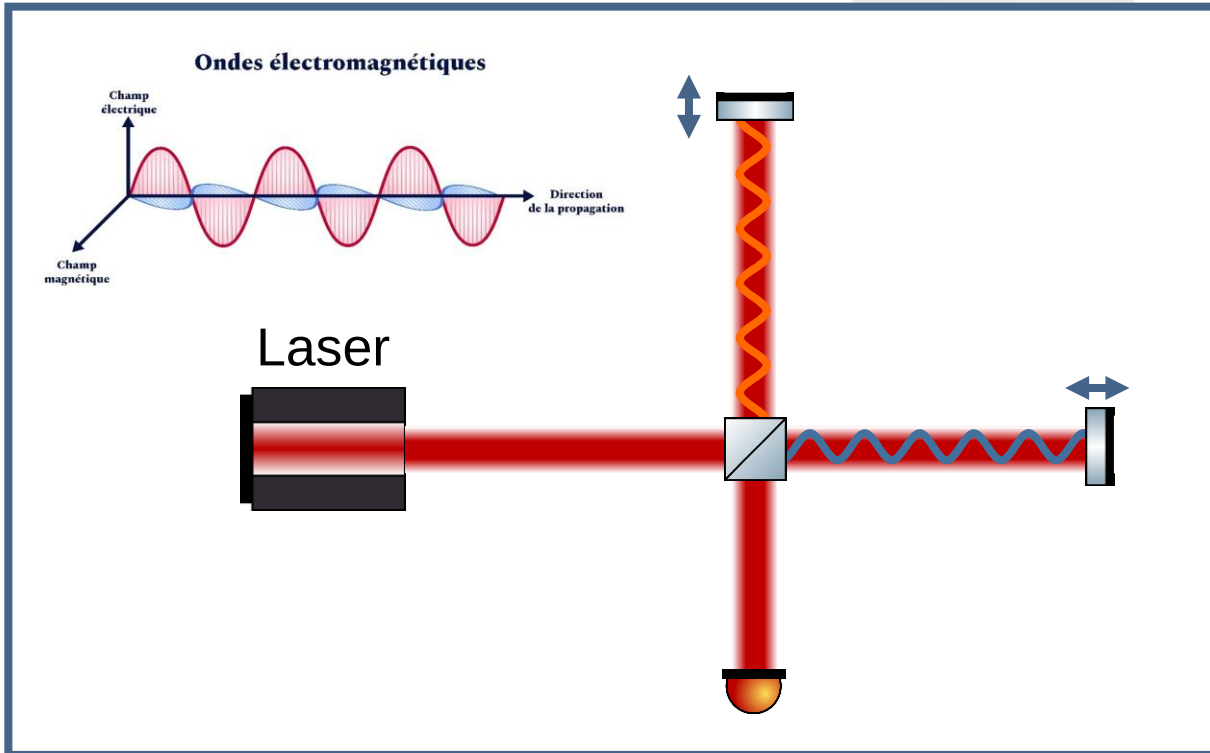


Mesure par temps de vol

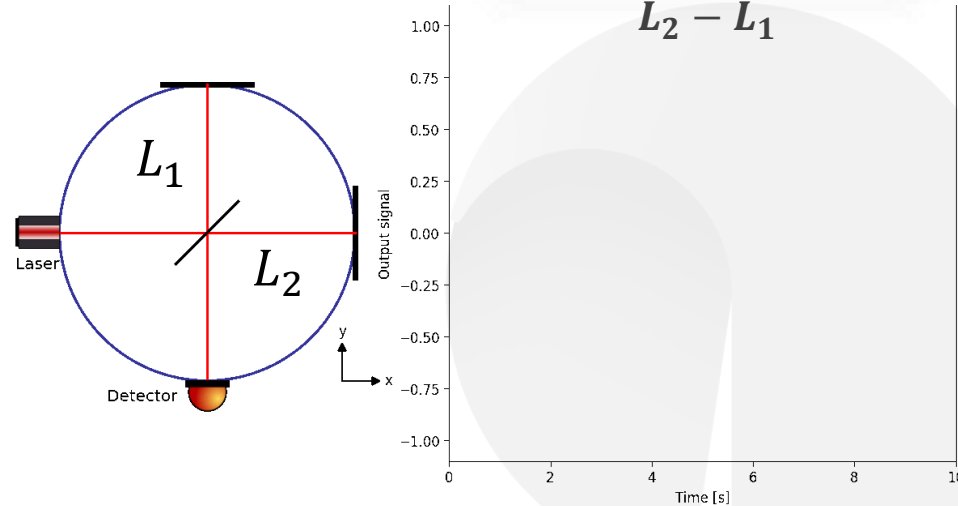


Réflecteur sur la surface de la Lune
Distance à la terre : $\sim 384\,400\text{ km}$

- Un outils pour comparer des distances : L'interféromètre de Michelson

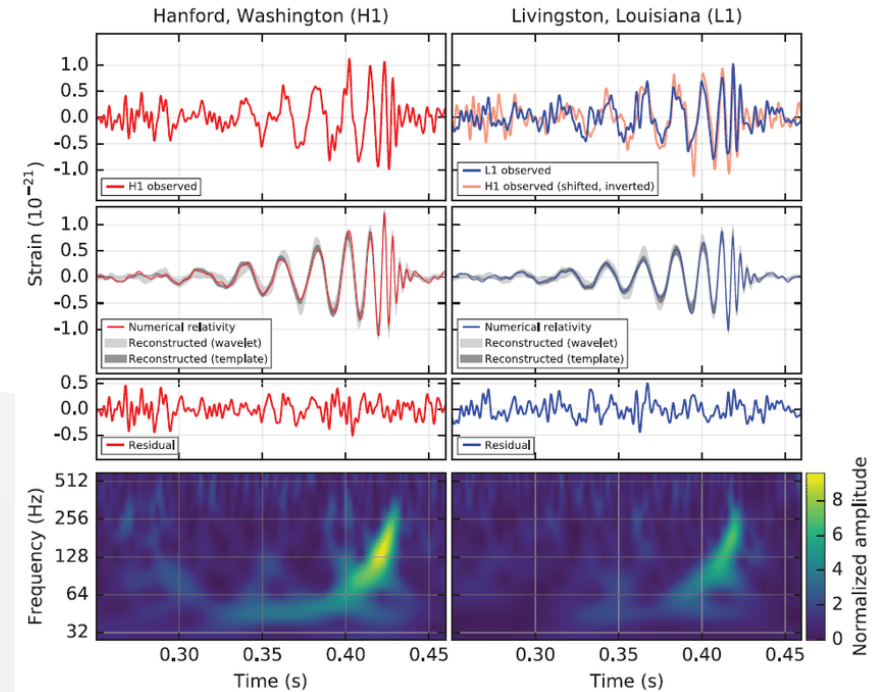


- Un outils pour comparer des distances : L'interféromètre de Michelson



Output signal $\propto$
 $L_2 - L_1$

GW150914



La génération actuelle :



GEO600 en Allemagne



LIGO aux Etats-Unis
Hanford



Livingston

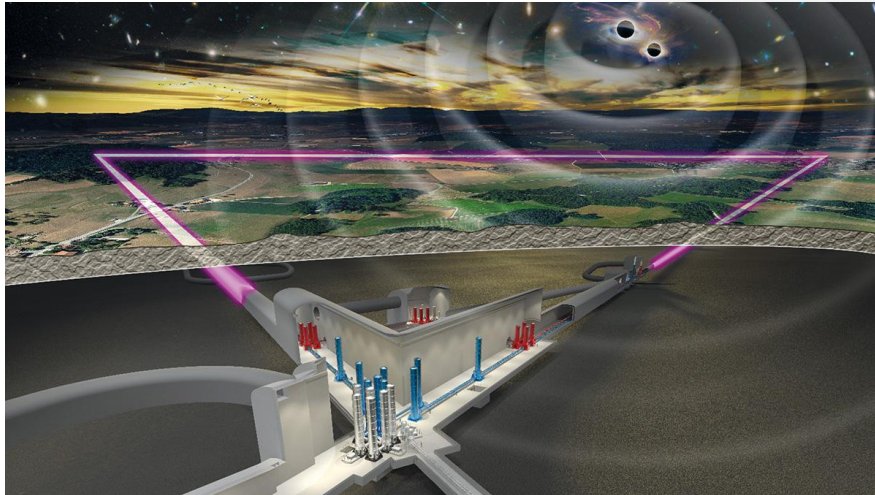


Virgo en Italie près de Pise

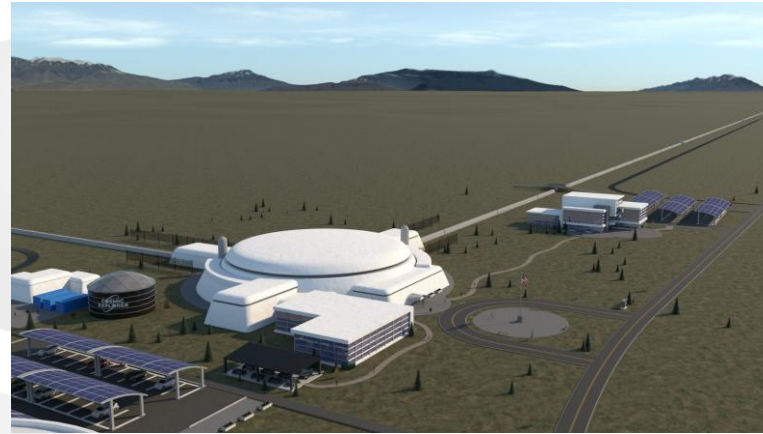


KAGRA au Japon

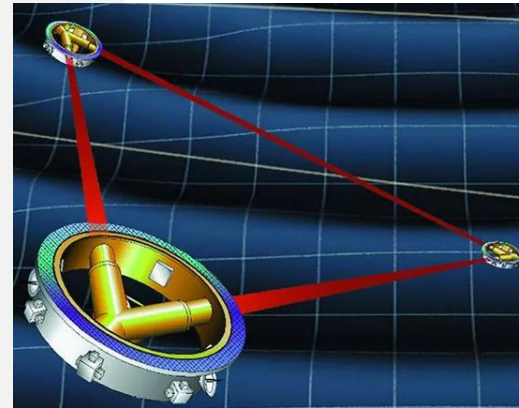
La nouvelle génération (horizon 2040) :



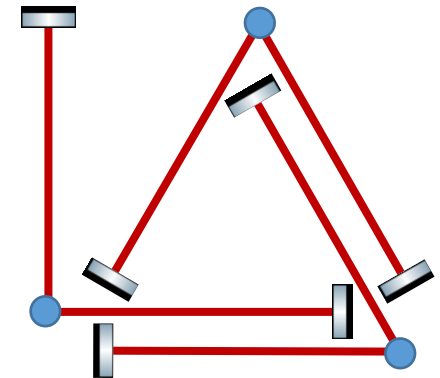
Einstein Telescope



Cosmic Explorer

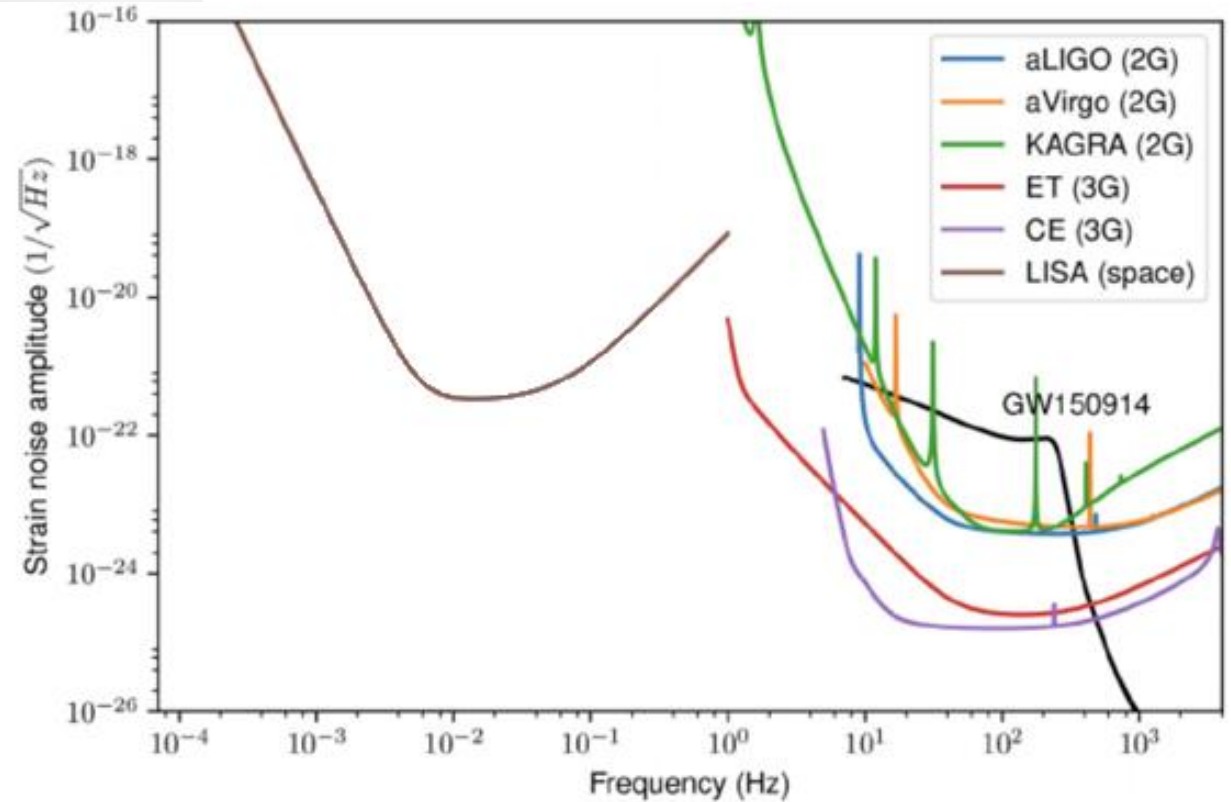


LISA



Pourquoi plusieurs détecteurs ?

=> La gamme de détection



Pourquoi plusieurs détecteurs ?

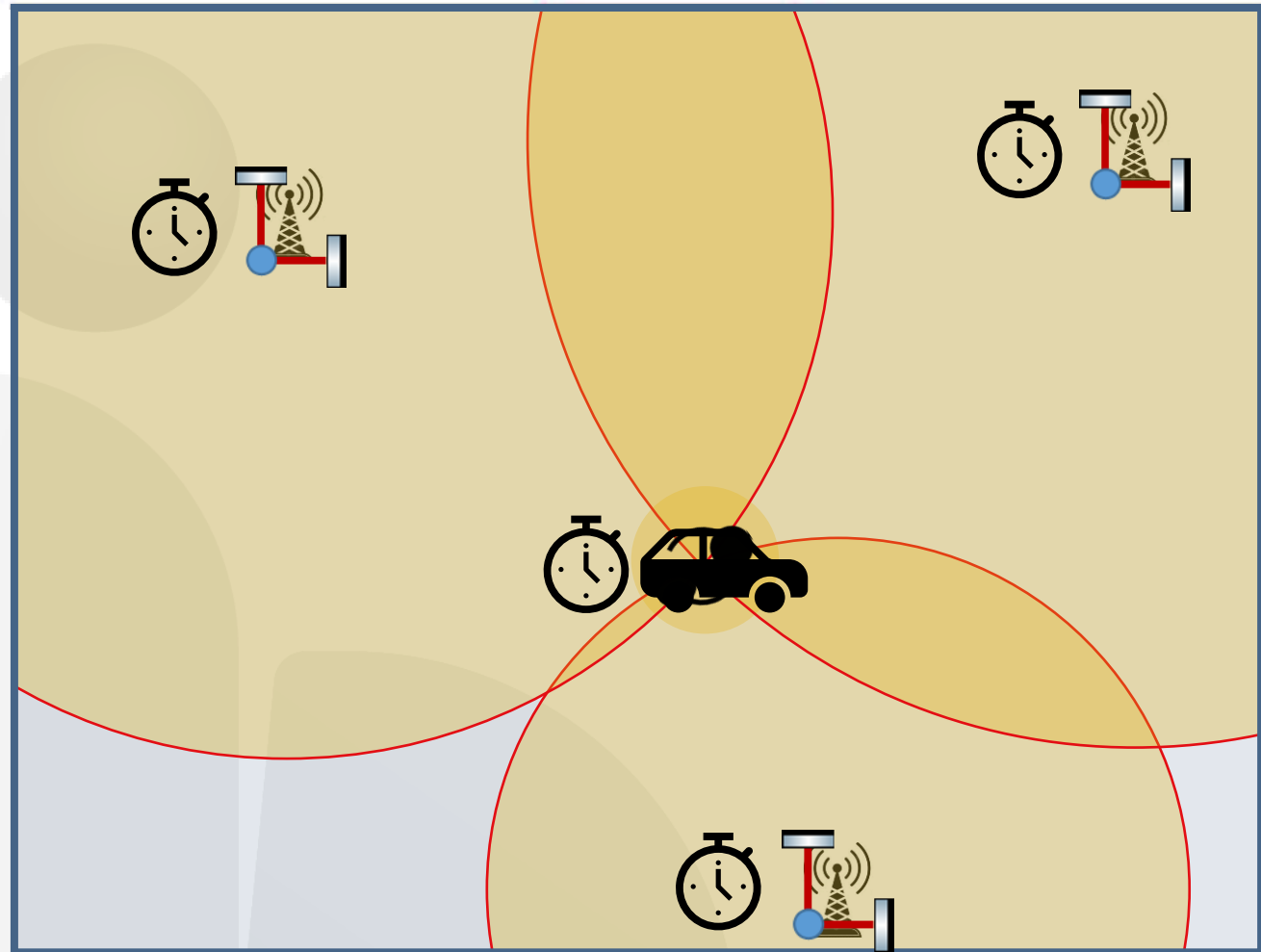
=> La localisation dans le ciel



Le principe ?

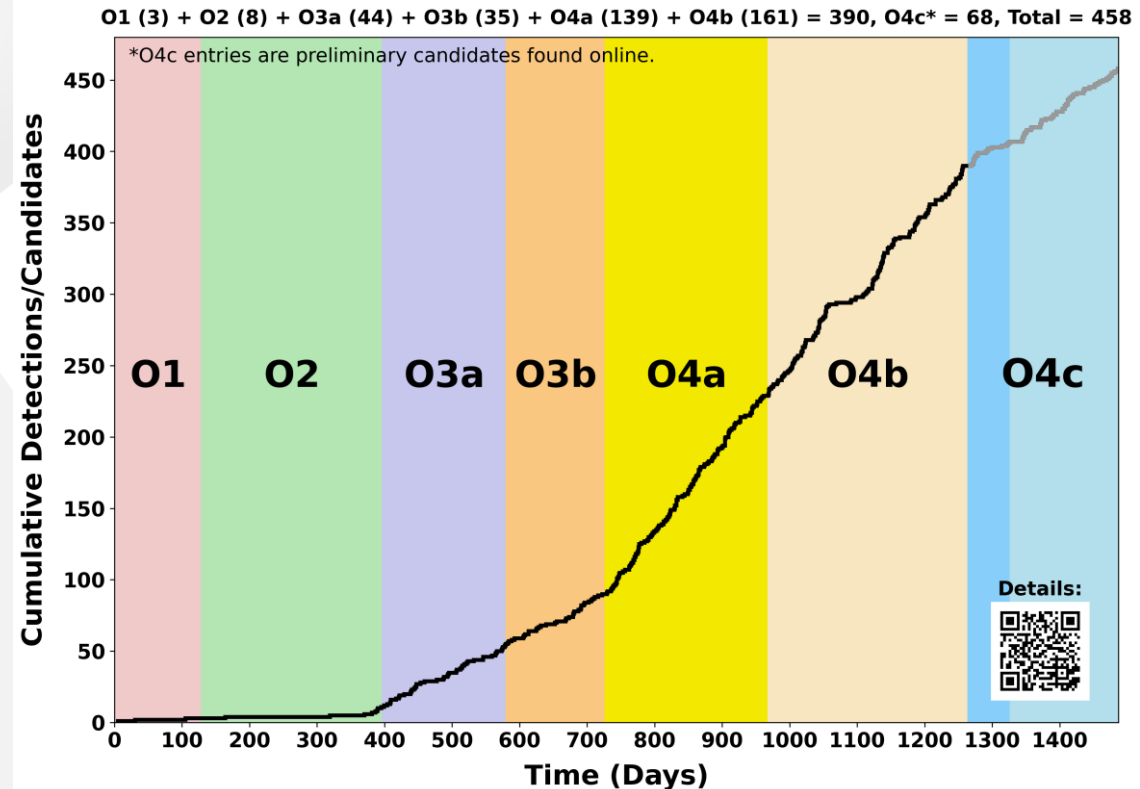
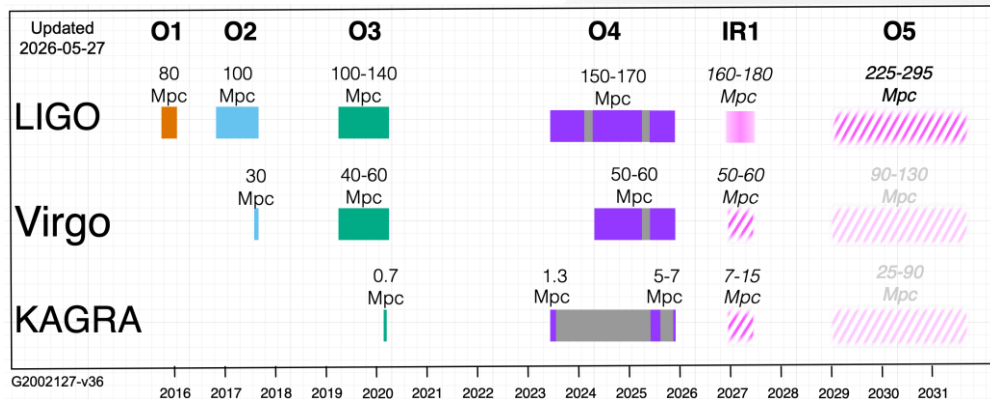
=> La triangulation comme le GPS

L'astronomie multimessager



- **Physique fondamentale**
 - Test de la gravitation
 - Meilleure connaissance de la nature des trous noirs et des étoiles à neutrons
 - Recherche de la matière noire
- **Cosmologie**
 - Etude de la population des objets compacts
 - Etude de la formation de l'univers
- **Astronomie multimessager**

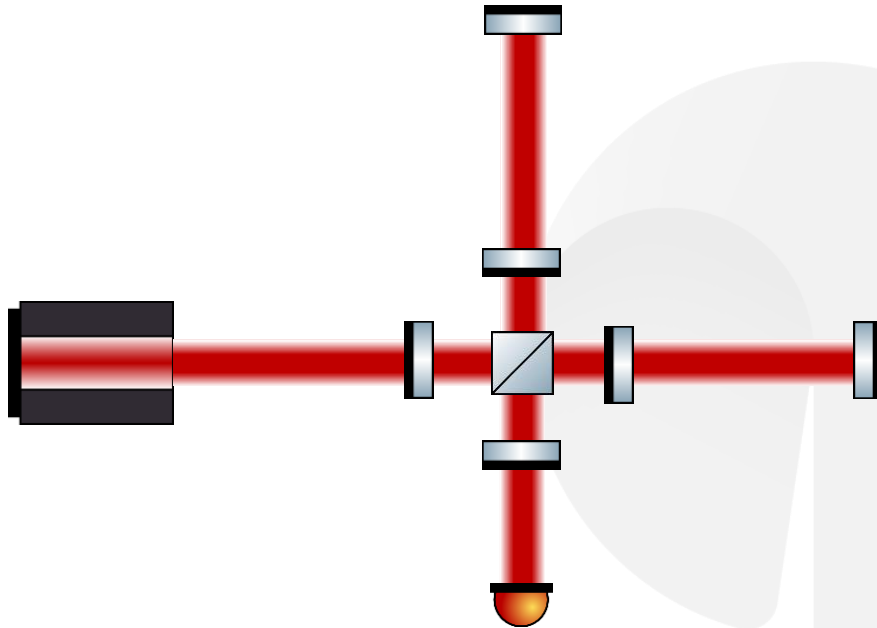
- Prise de mesure sous forme de « Run d'observation »
- Période d'amélioration de l'instrument entre chaque « run ».



LIGO-G2302098 (f244d4f6), updated on 25 May, 2026

Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration

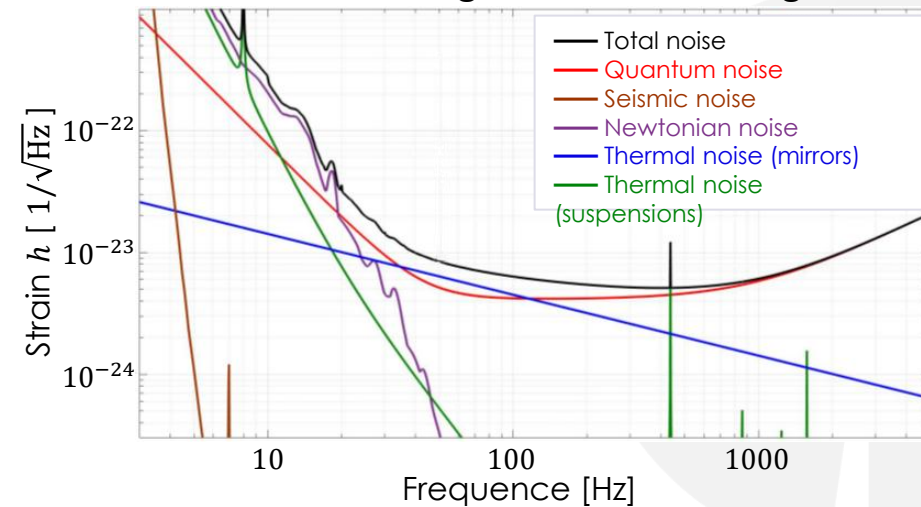
- Un paramètre important pour tout détecteur : Le rapport signal sur bruit



© LIGO / J. Tissino (GSSI) / R. Hurt (Caltech-IPAC)

- Un paramètre important pour tout détecteur : Le rapport signal sur bruit

Simulation of the sensitivity curve of the Advanced virgo detector at design.



Quantum noise



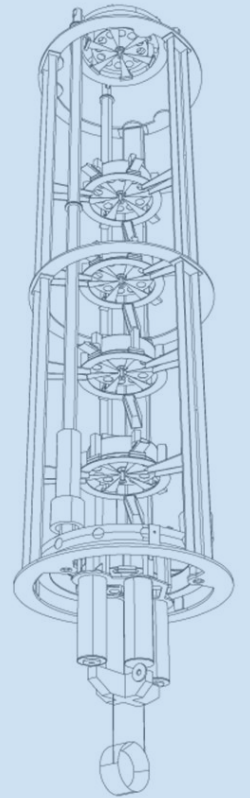
Système sous vide 10^{-9} mbar



Surface des miroirs précis à 5 atomes et réflectivité à la limite technologique

Contrôle de la température

Contrôle de la circulation de l'air environnant

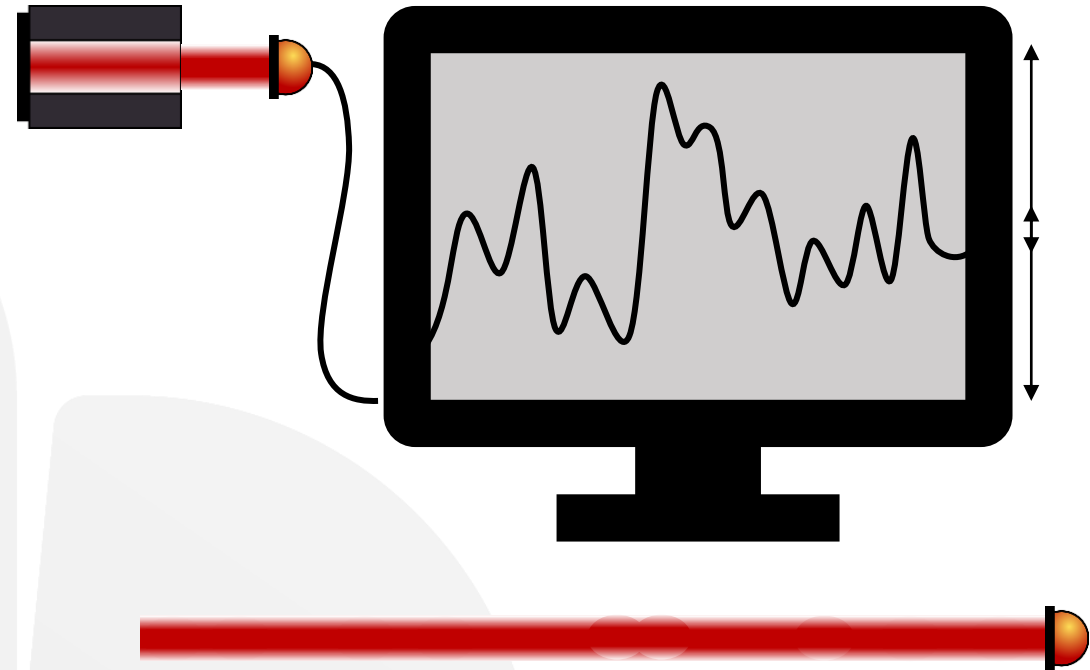
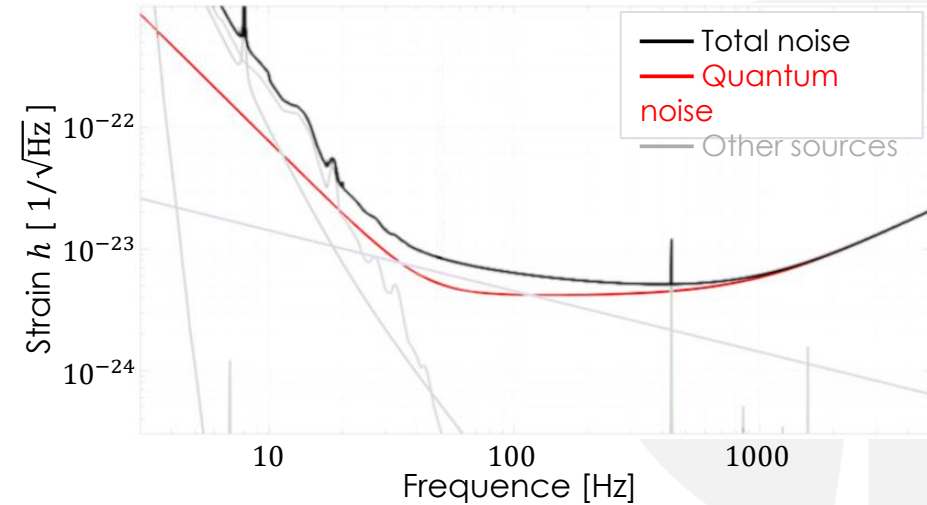


Miroir suspendu pour isoler du sol

Source: ADV+ TDR

Le bruit quantique : La lumière est composée de photons soumis aux lois de la physique quantique.

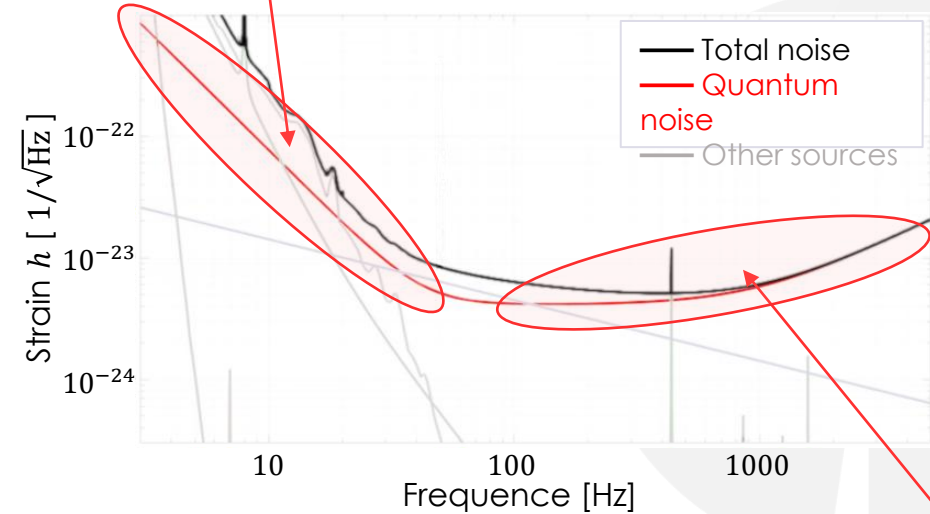
Simulation of the sensitivity curve of the Advanced virgo detector at design.



Source: ADV+ TDI

Le bruit quantique : La lumière est composée de photons soumis aux lois de la physique quantique.

Bruit de pression de radiation

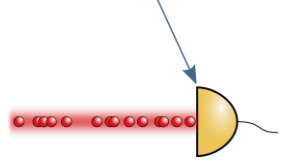


Bruit de grenaille

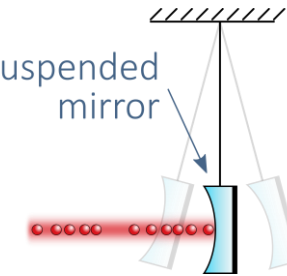
SOURCES DU BRUIT QUANTIQUE

- Bruit de grenaille
 - Dominant à haute fréquence
 - Liée à l'incertitude en phase
- Bruit de pression de radiation
 - Dominant à basse fréquence
 - Liée à l'incertitude en amplitude

Photodetector



Suspended mirror



Source: ADV+ TDI

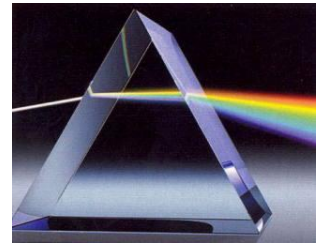
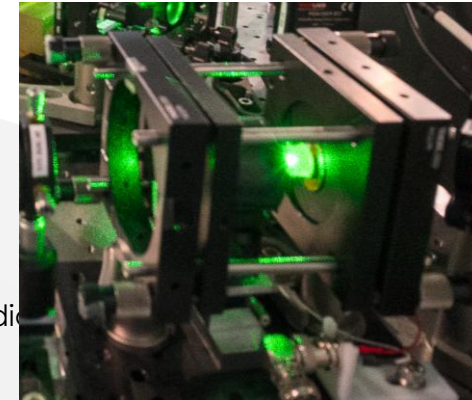
La réduction du bruit quantique : Combattre la quantique avec la quantique !

Étape 1 : Optique non linéaire, la génération de seconde harmonique

Combinaison de 2 photons en 1 nouveau photon 2 fois plus énergétique



Wikipedi

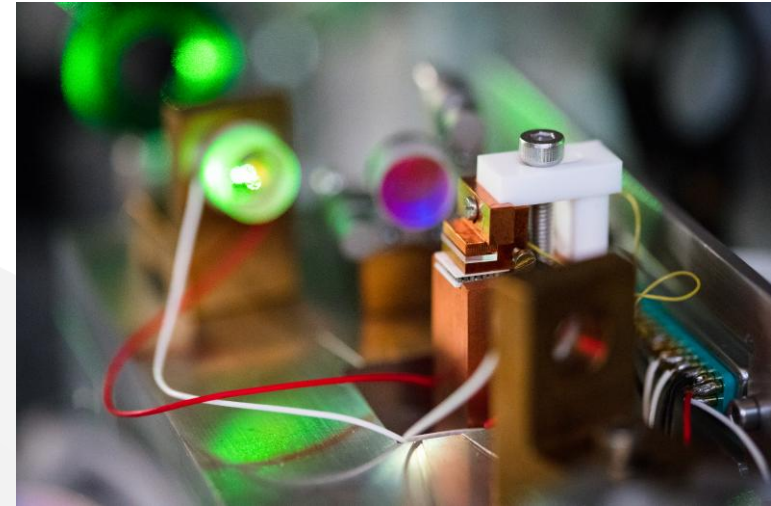


Wikipedi

La réduction du bruit quantique : Combattre la quantique avec la quantique !

Étape 2 : Optique non linéaire, génération paramétrique optique (OPG)

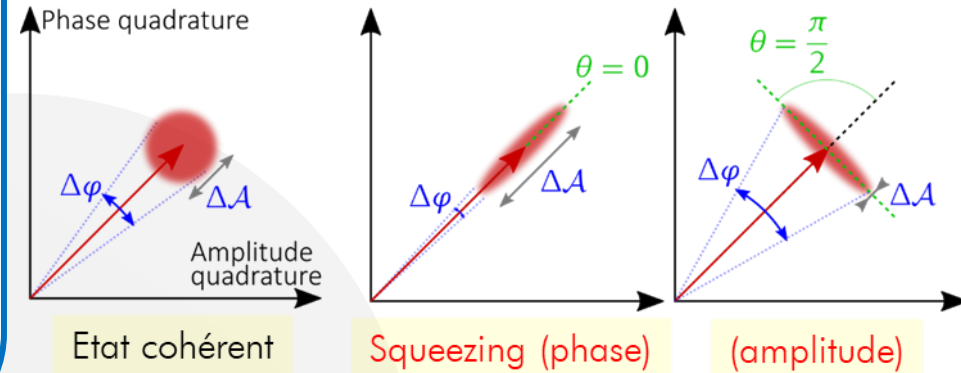
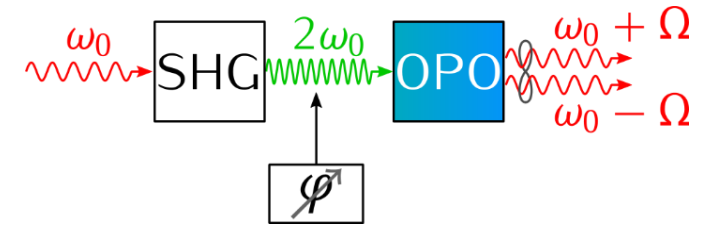
Séparation de 1 photon en 2 nouveaux photons



La réduction du bruit quantique : Combattre la quantique avec la quantique !

Étape 3 : Optique quantique, paire de photons intriqués

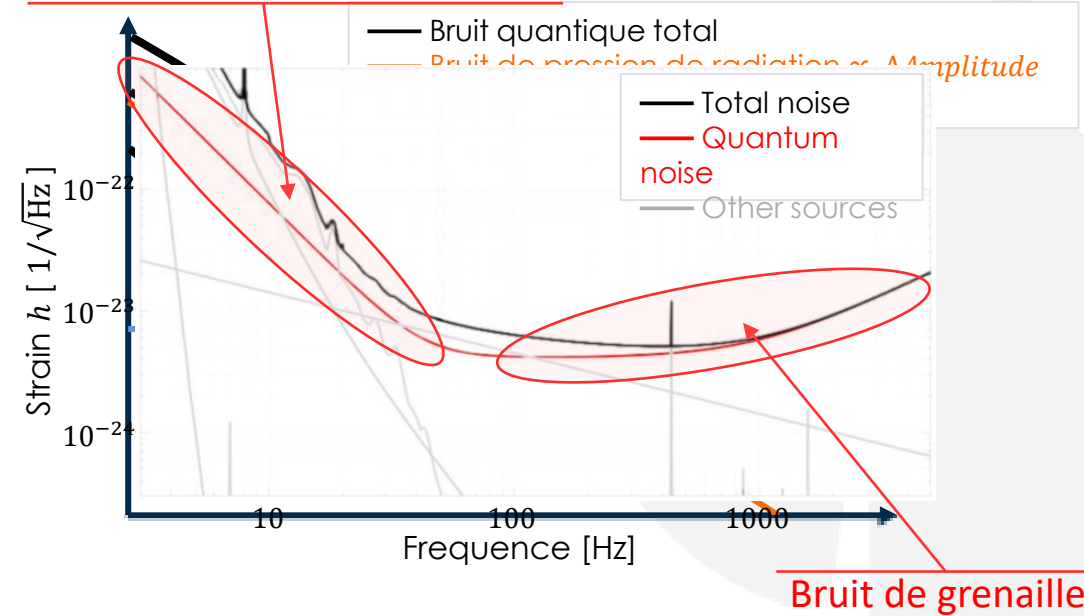
Principe d'incertitude d'Heisenberg



La réduction du bruit quantique : Combattre la quantique avec la quantique !

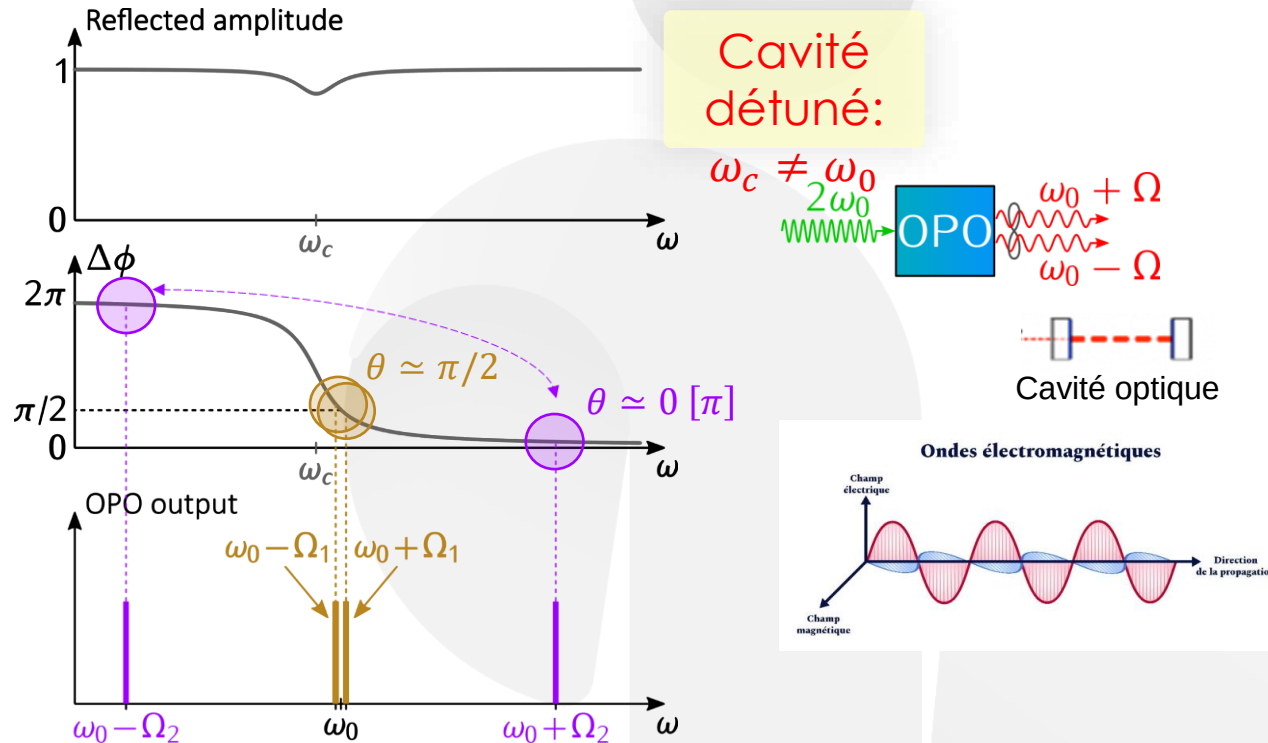
Mais elle se défend !

Bruit de pression de radiation



— Bruit quantique total
 — Bruit de pression de radiation $\propto \Delta Amplitude$
 — Bruit de grenaille $\propto \Delta Phase$

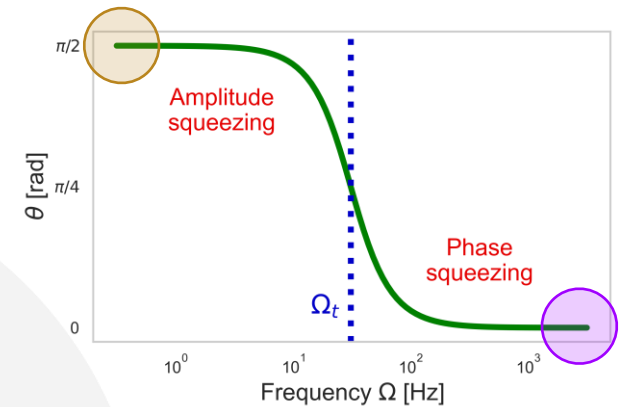
La réduction du bruit quantique : Combattre la quantique avec la quantique !



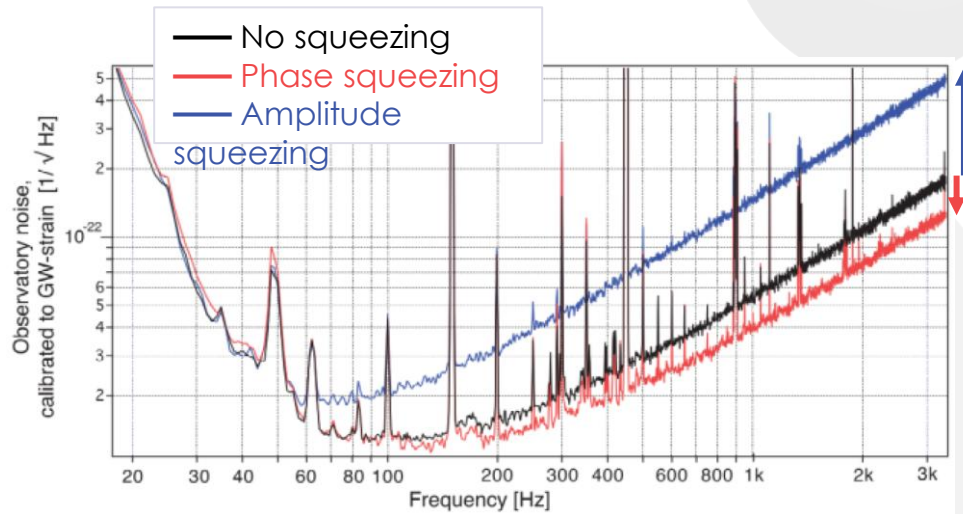
Angle de l'ellipse de squeezing

$$\theta = \frac{\Delta\phi(\omega_0 + \Omega) + \Delta\phi(\omega_0 - \Omega)}{2}$$

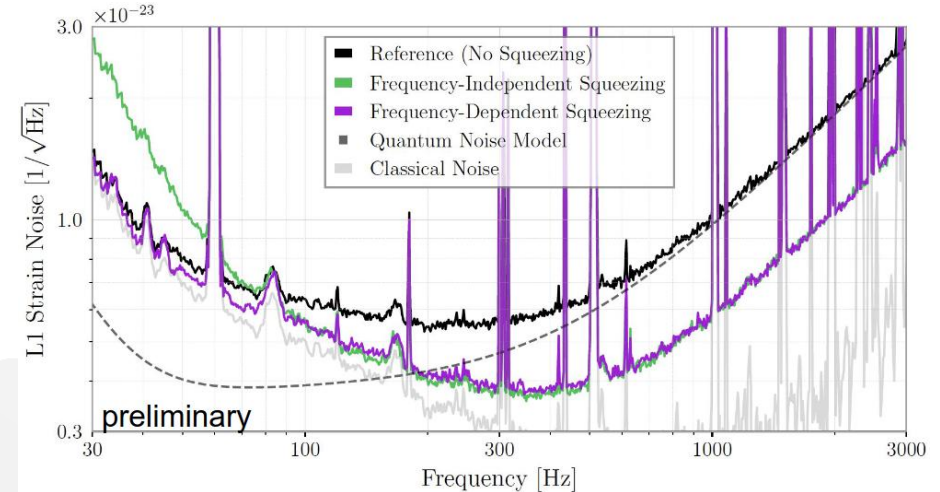
$\Delta\phi$: variation de la phase due à la cavité



La réduction du bruit quantique : Combattre la quantique avec la quantique !



Source: Virgo

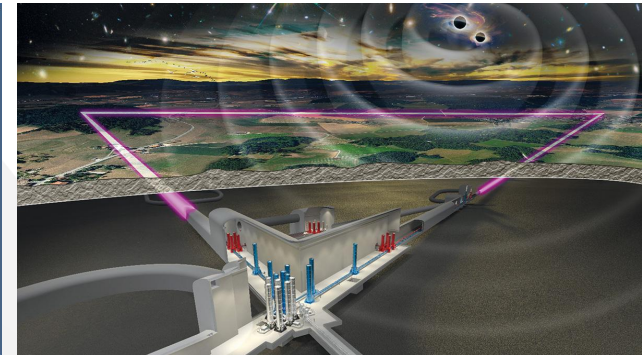
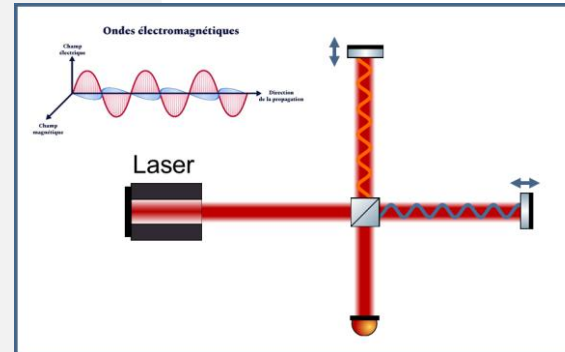


Source: LIGO

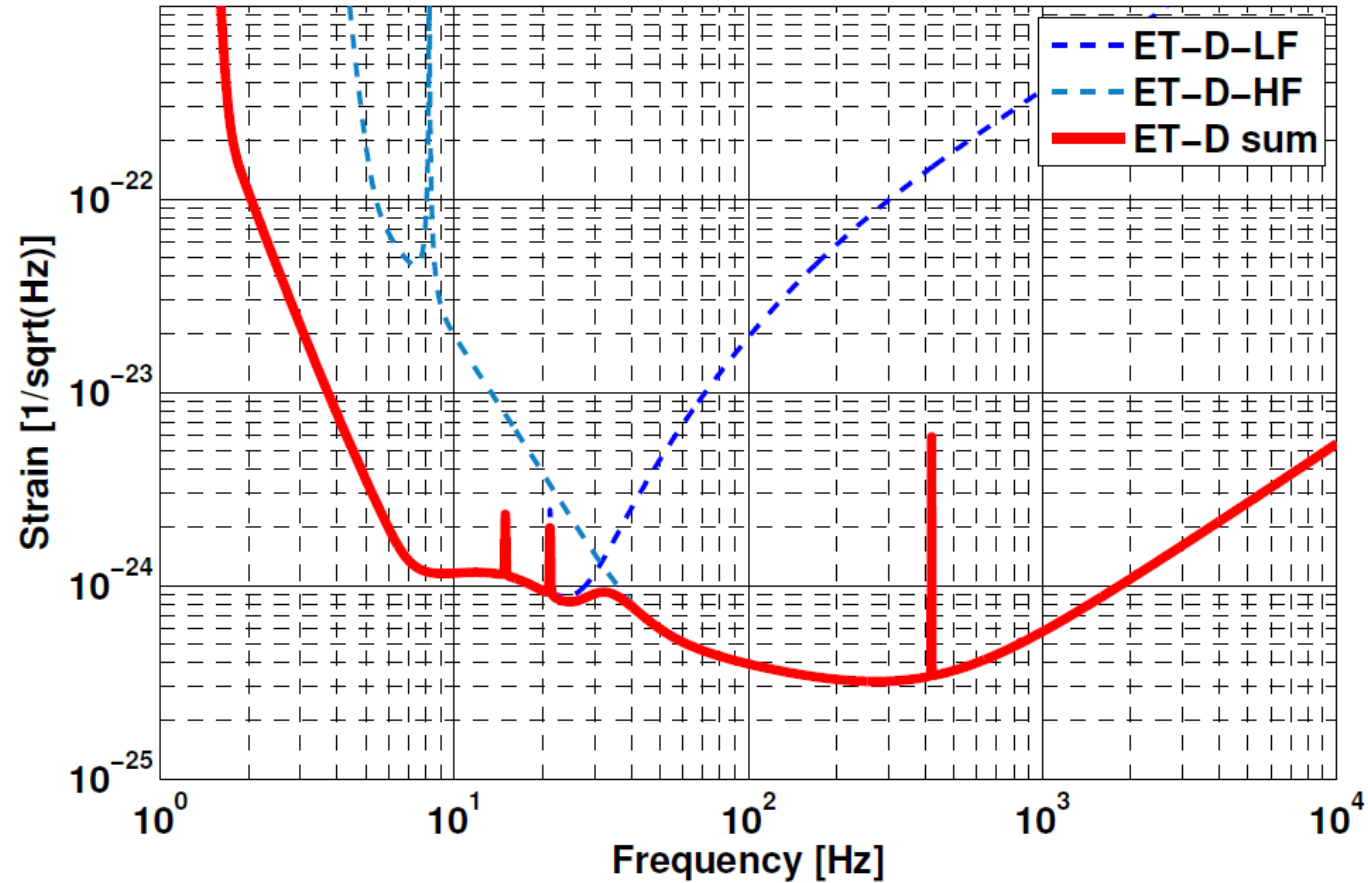
Tout ça pour gagner un facteur 2 ... sur la distance donc un facteur 8 sur le volume de détection !

- Les ondes gravitationnelles provoquent des déformations relative de l'ordre de 10^{-21}
- Les détecteurs sont des interféromètres de Michelson géant
- La réduction des bruits est le combat majeur pour améliorer les détecteurs
- Une des facettes de cette réduction passe par la réduction du bruit quantique, le bruit de lumière elle-même

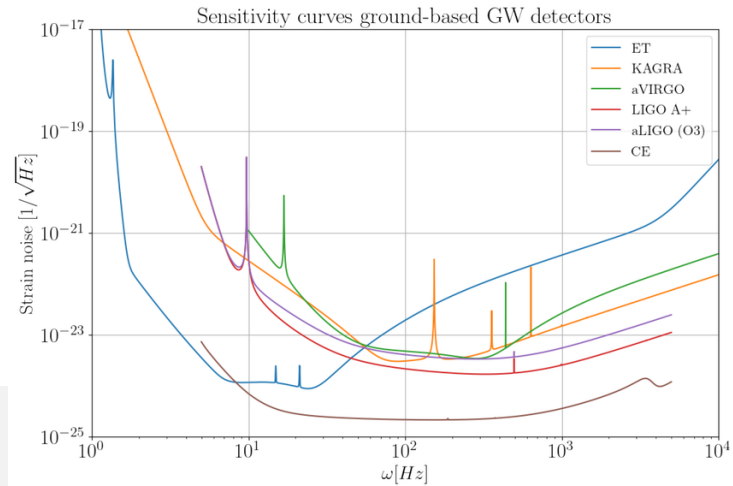
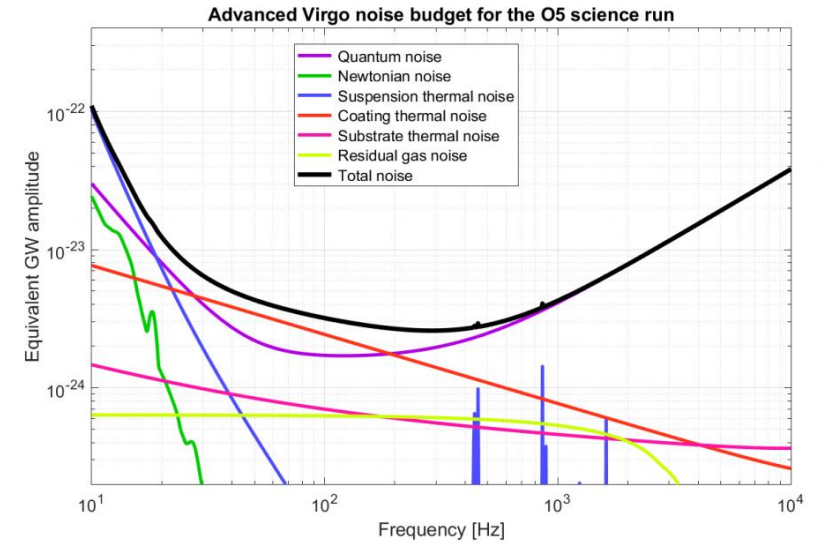
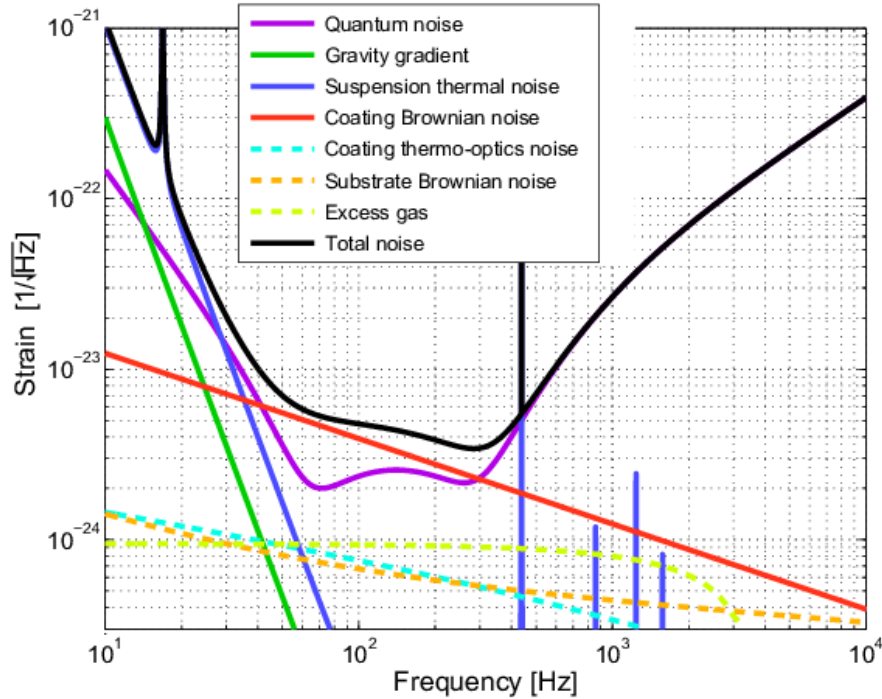
Merci de votre attention



Backup slides

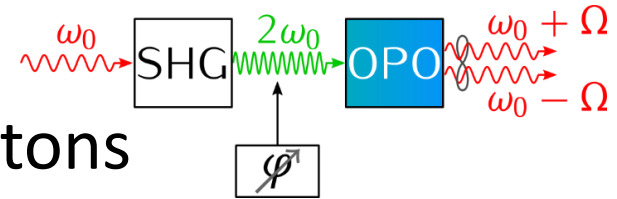


Maggiore et al., arXiv:1912.02622v4 (2020)

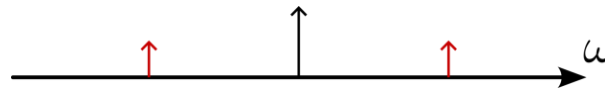


HARNESSING QUANTUM PROPERTIES OF LIGHT TO REDUCE NOISE

- Optical Parametric Oscillator (OPO):
quantum entanglement between 2 photons
→ squeezed mode at ω_0



GW sidebands



Entangled sidebands

