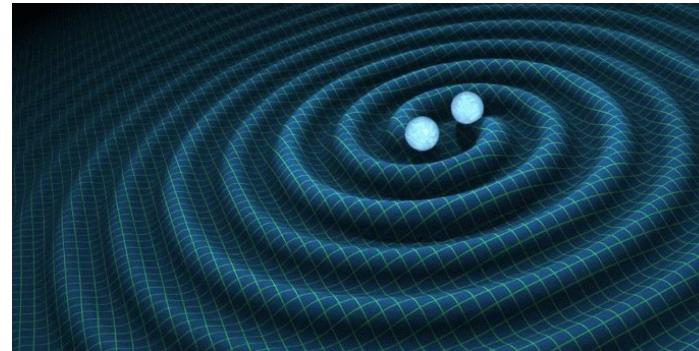




Principe de détection des ondes gravitationnelles



Angélique Lartaux



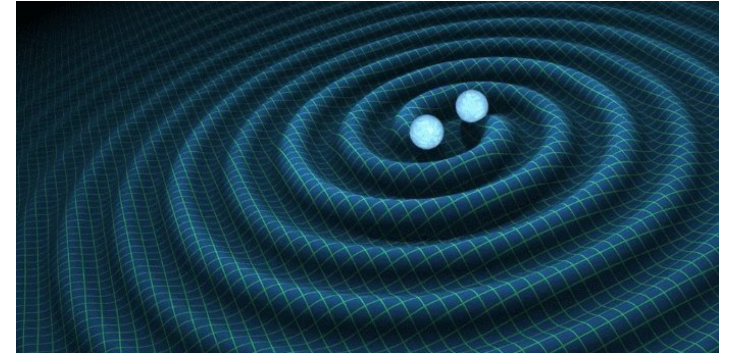


Une onde gravitationnelle

est une déformation de l'espace-temps produite par une/des masses(s) en mouvement accéléré

Propriétés des ondes gravitationnelles

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



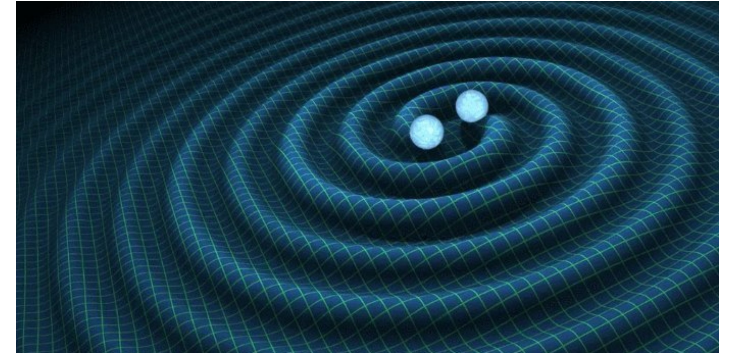


Une onde gravitationnelle

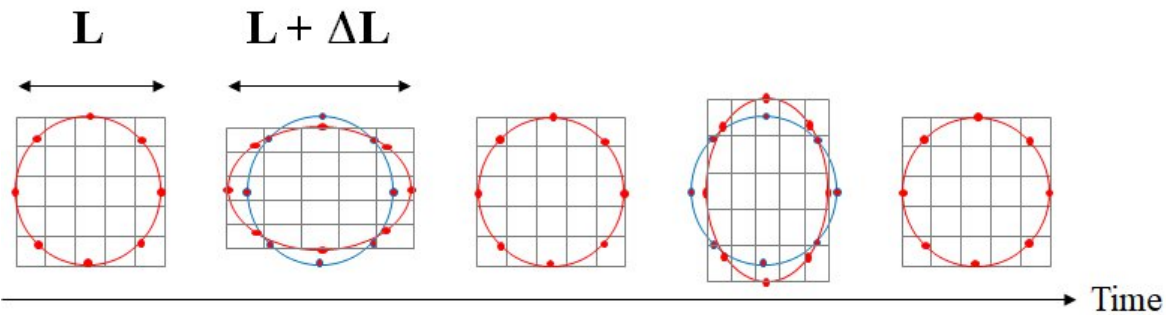
est une déformation de l'espace-temps produite par une/des masses(s) en mouvement accéléré

Propriétés des ondes gravitationnelles

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



Détection des ondes gravitationnelles



La déformation relative de l'espace temps est

proportionnelle à l'amplitude h de l'onde gravitationnelle $\frac{\Delta L}{L} \simeq \frac{h}{2}$



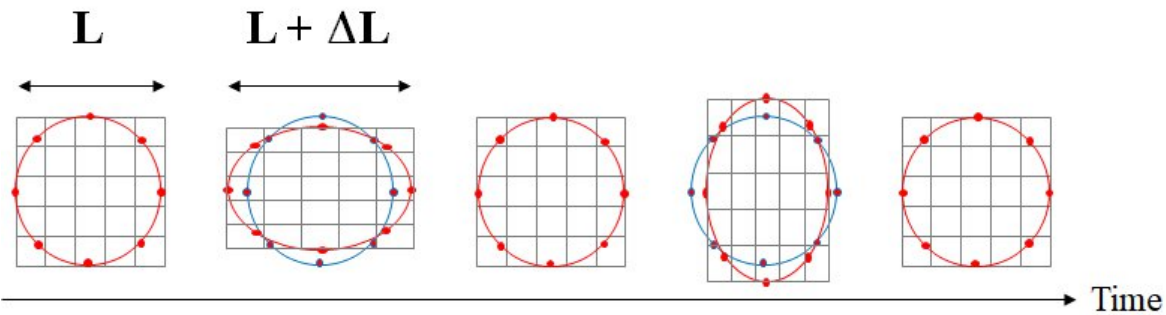
Une onde gravitationnelle

est une déformation de l'espace-temps produite par une/des masses(s) en mouvement accéléré

Propriétés des ondes gravitationnelles

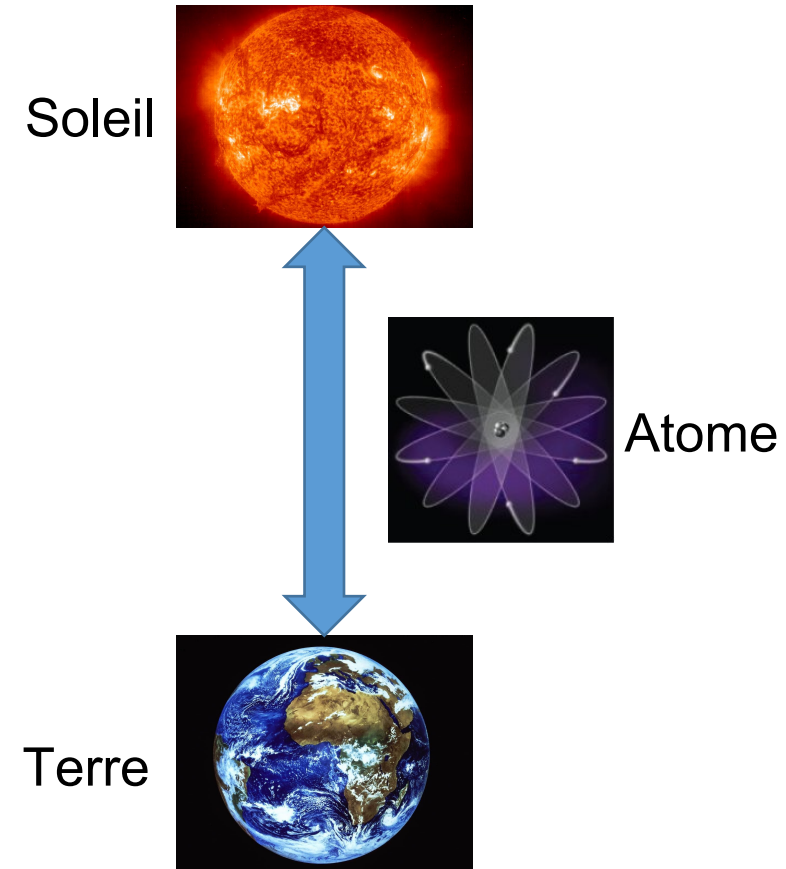
- prédites par Albert Einstein en 1916,
- se propagent à la vitesse de la lumière,
- peuvent traverser des millions d'années-lumière sans être absorbées par la matière

Détection des ondes gravitationnelles



La déformation relative de l'espace temps est proportionnelle à l'amplitude h de l'onde gravitationnelle $\frac{\Delta L}{L} \simeq \frac{h}{2}$

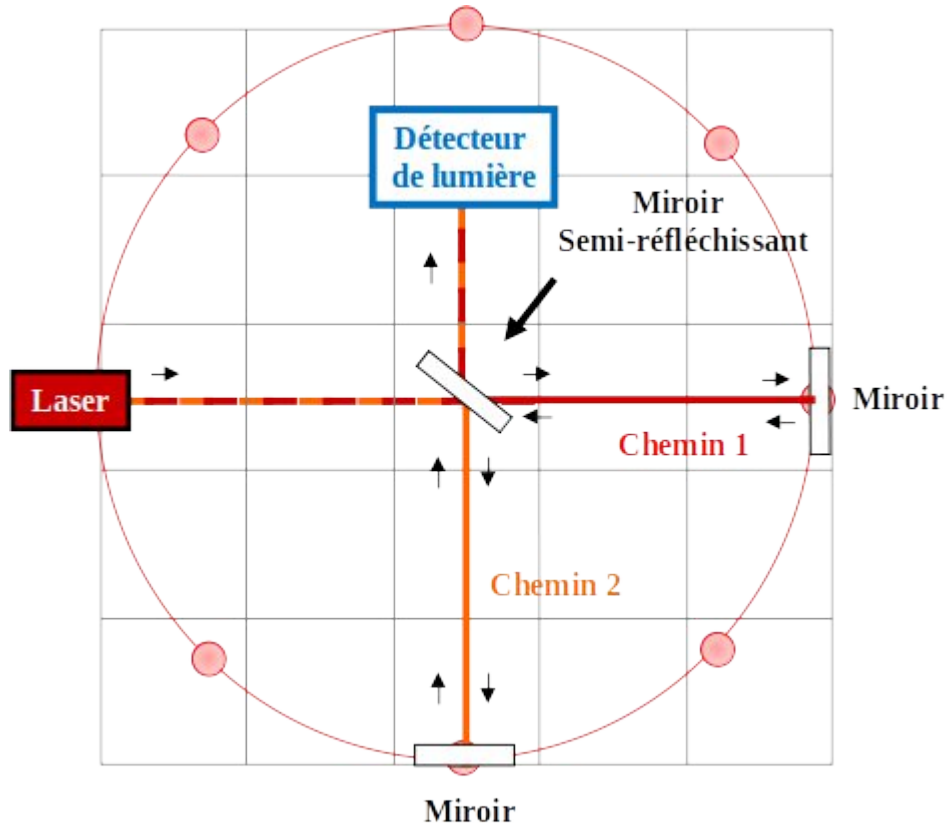
Déformation de 10^{-21}





L'interféromètre de Michelson

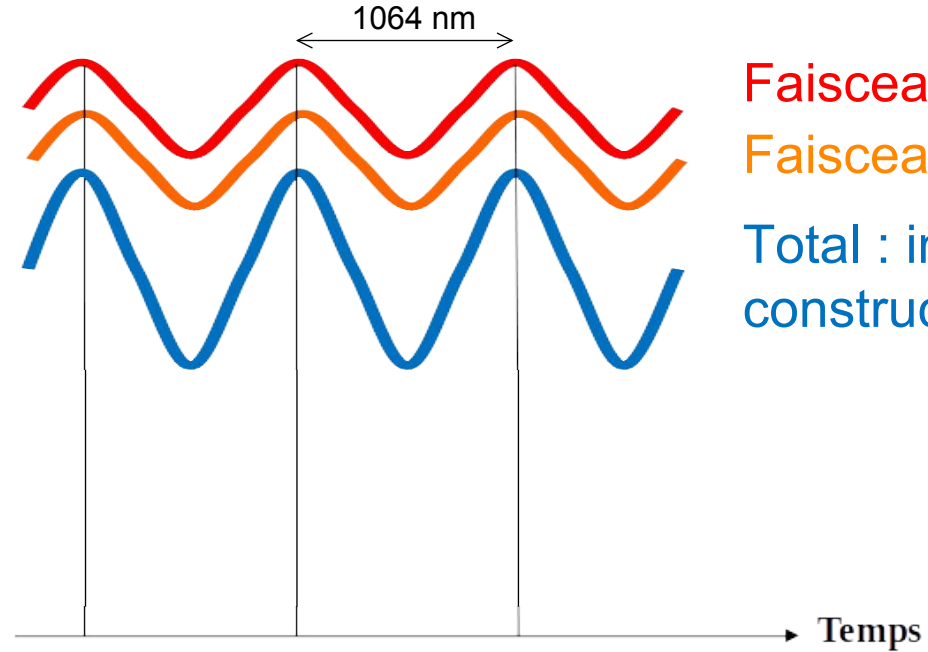
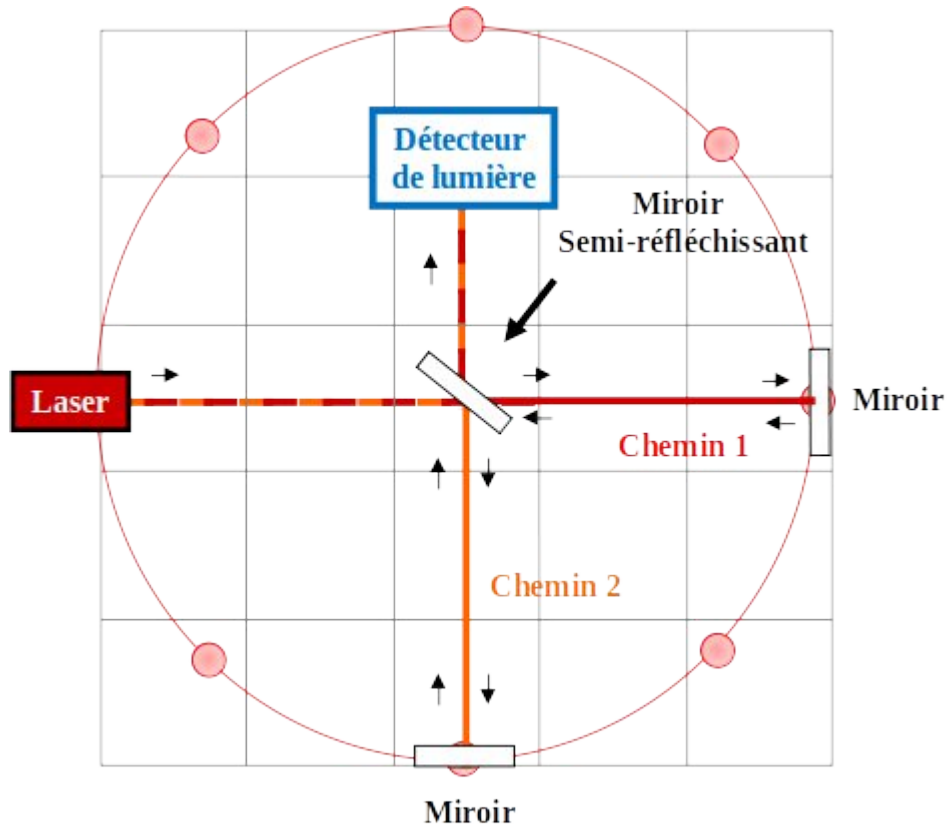
est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles





L'interféromètre de Michelson

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

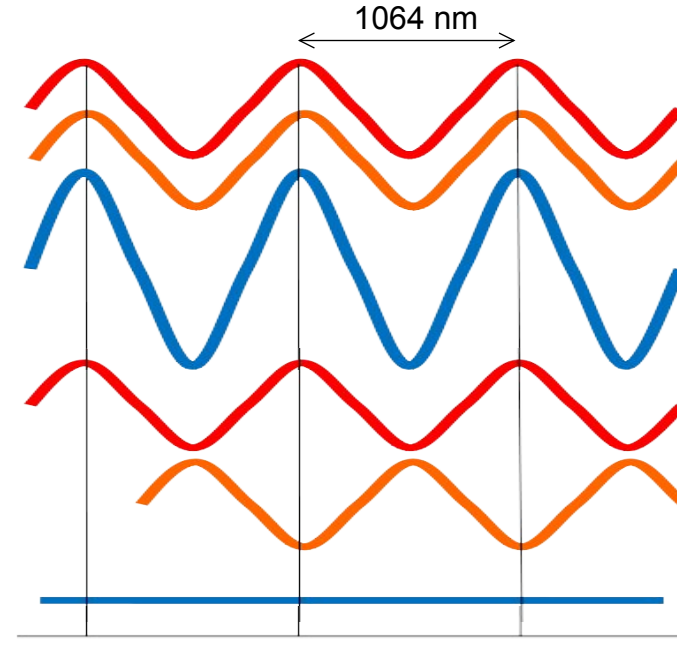
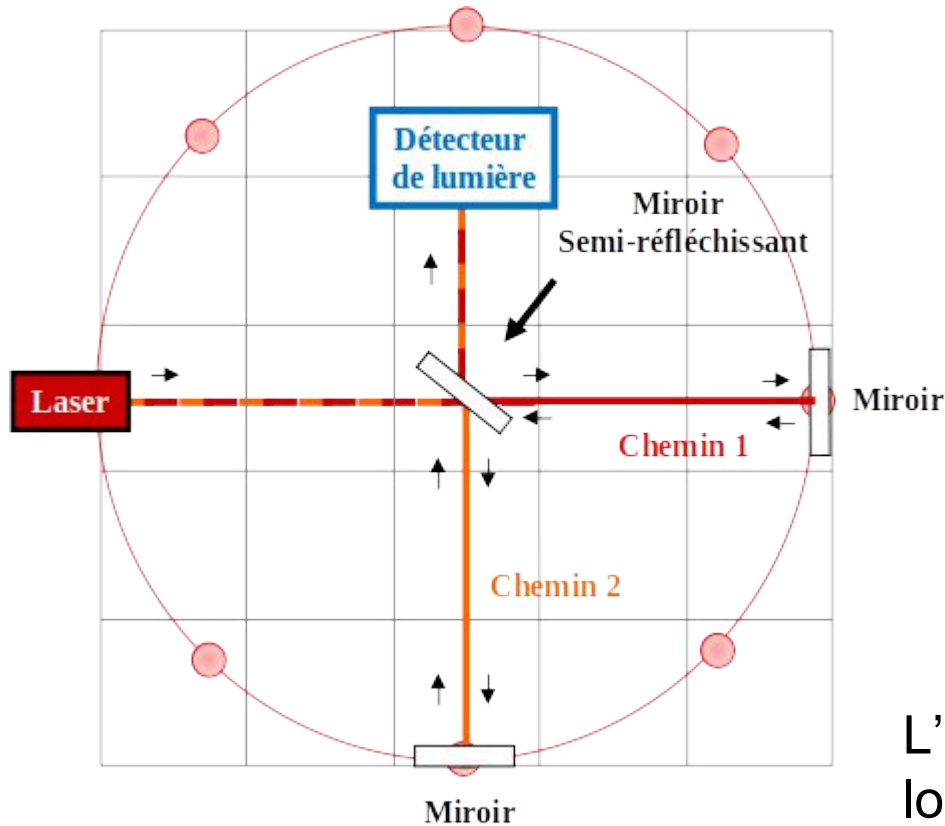


Faisceau Chemin 1
Faisceau Chemin 2
Total : interférence constructive



L'interféromètre de Michelson

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



Faisceau Chemin 1

Faisceau Chemin 2

Total : interférence constructive

Total : interférence destructive appelée frange noire

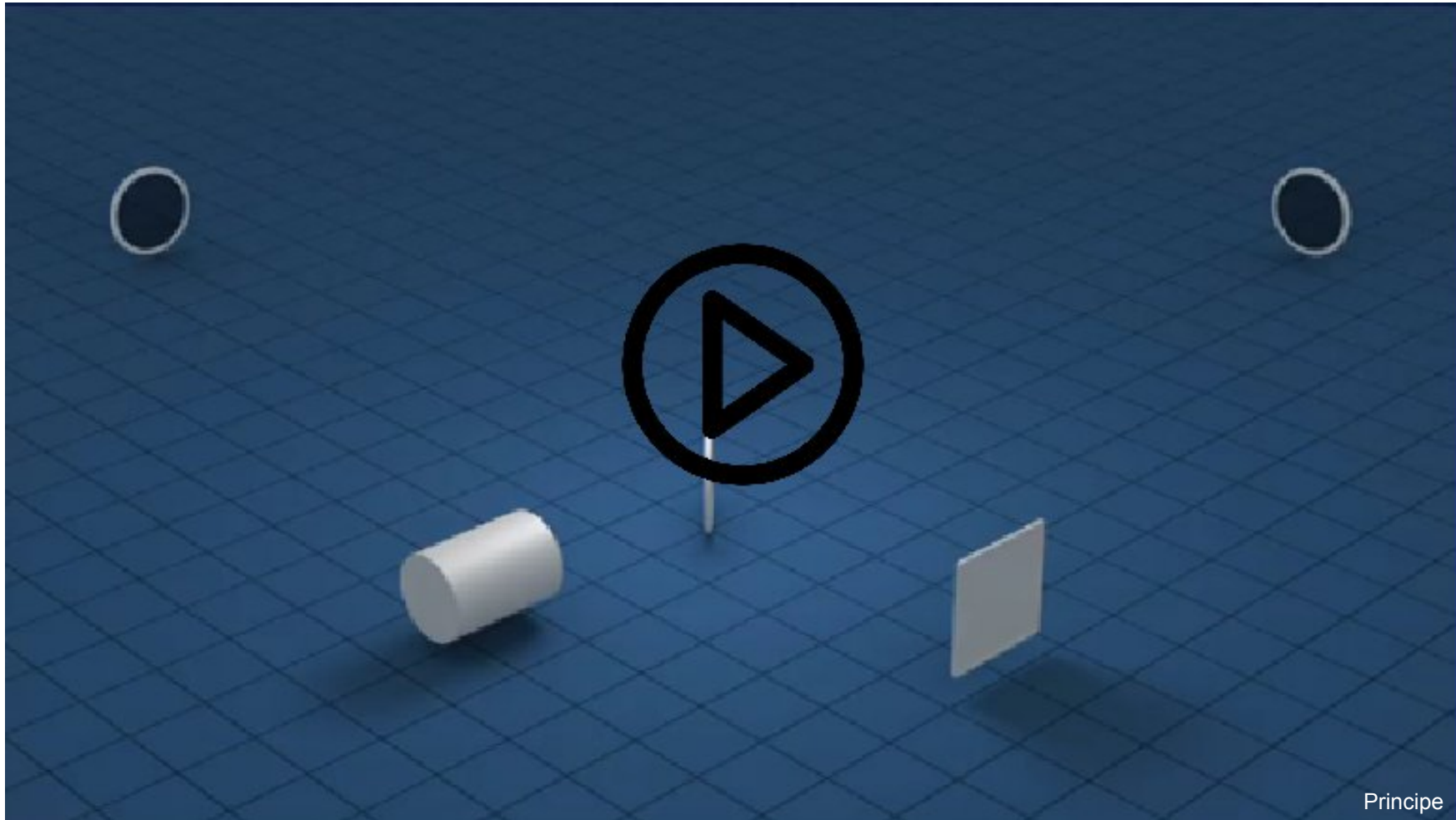
→ Temps

L'état d'interférence dépend de la différence de longueur entre les deux chemins
L'interféromètre est réglé proche de la frange noire



L'interféromètre de Michelson

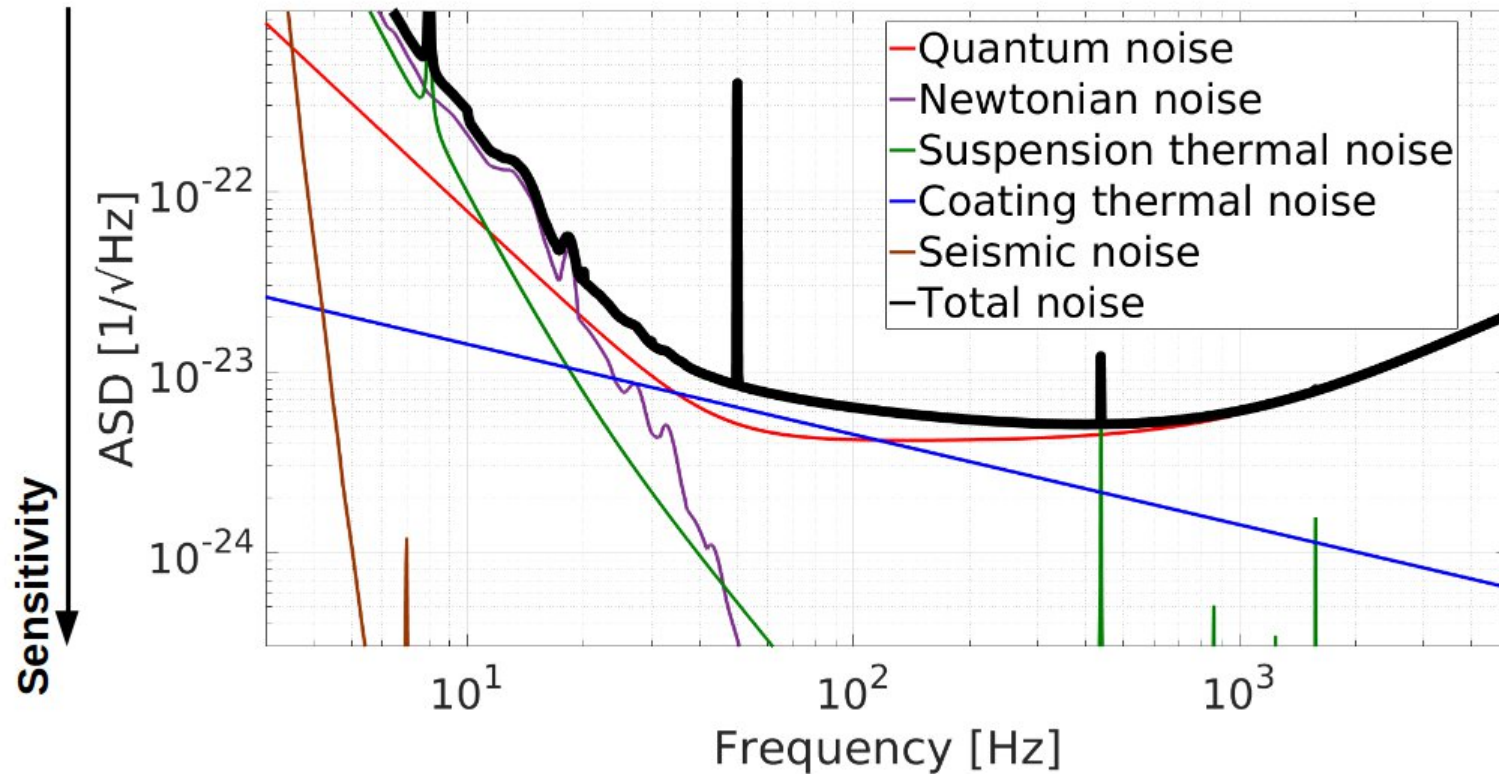
est un instrument bien adapté à l'observation des ondes gravitationnelles





La sensibilité des détecteurs d'ondes gravitationnelles

est la somme de plusieurs bruits ayant un impact dans différentes bandes de fréquences



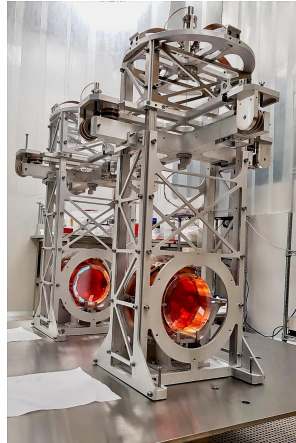


Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

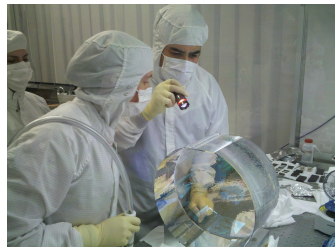
Le vide

~ 10 000 m³ de vide à pression de 10⁻⁹ mbar



Les miroirs

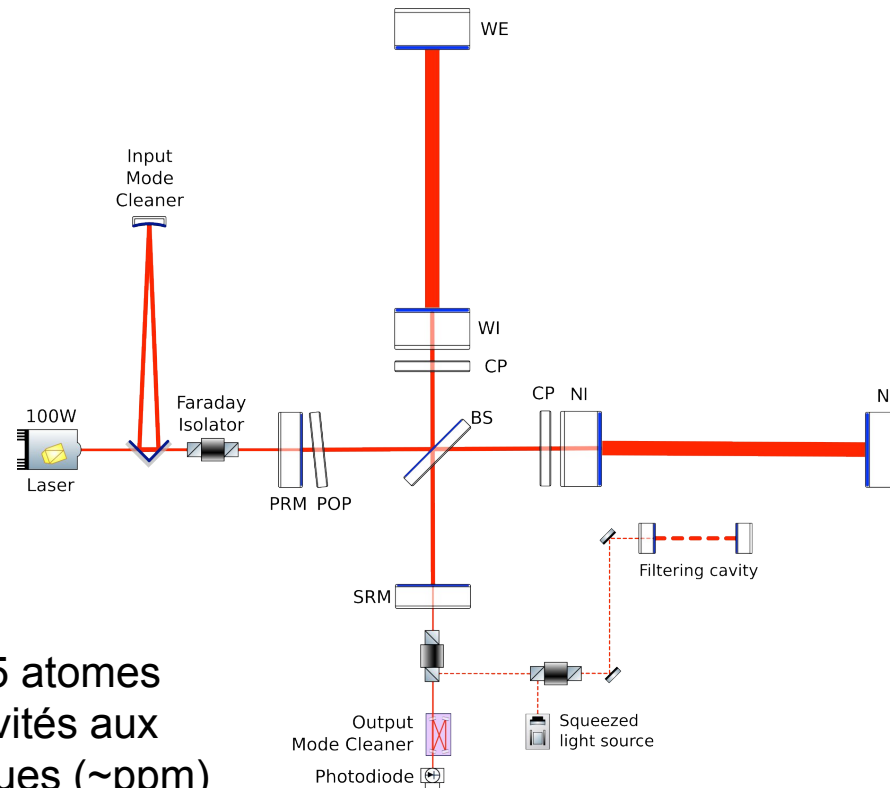
Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

Un interféromètre de Michelson amélioré





Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

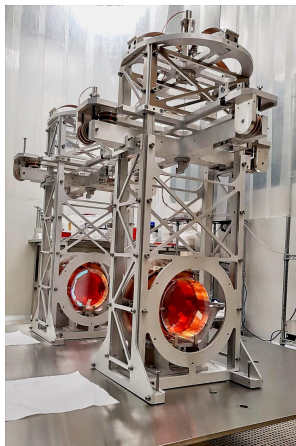
Le vide

~ 10 000 m³ de vide à pression de 10⁻⁹ mbar



L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

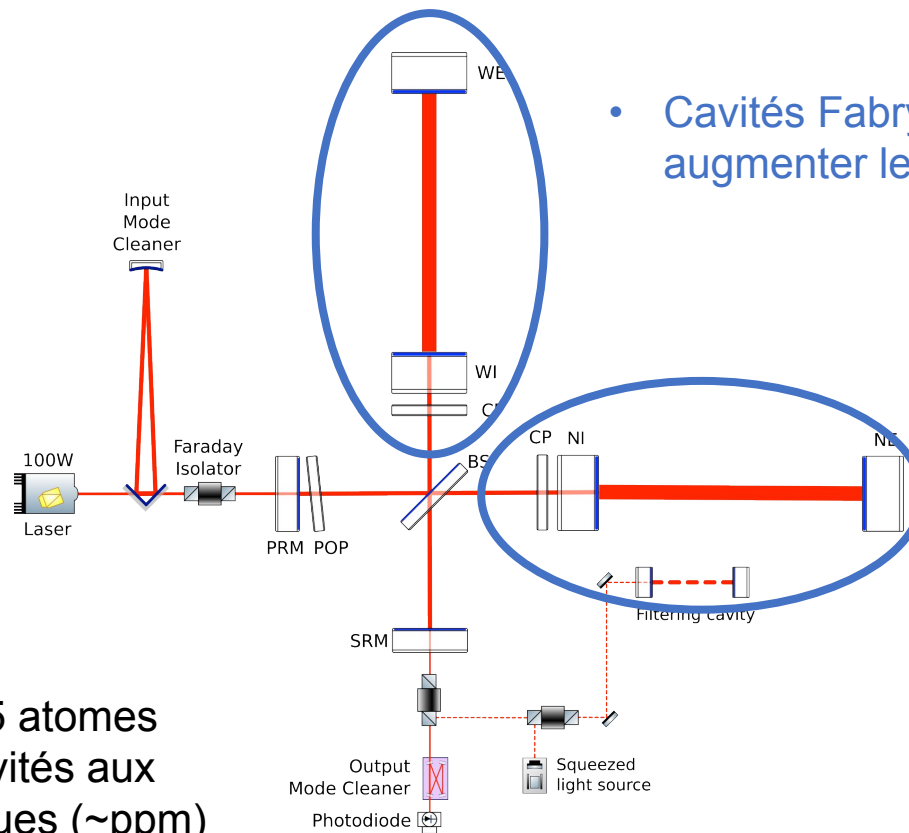


Les miroirs

Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



Un interféromètre de Michelson amélioré





Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

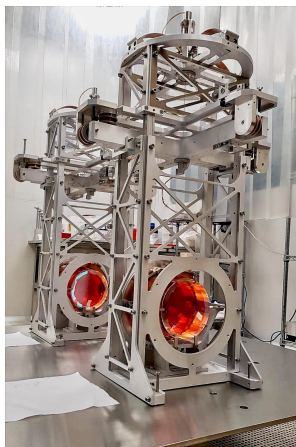
Le vide

~ 10 000 m³ de vide à pression de 10⁻⁹ mbar



L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

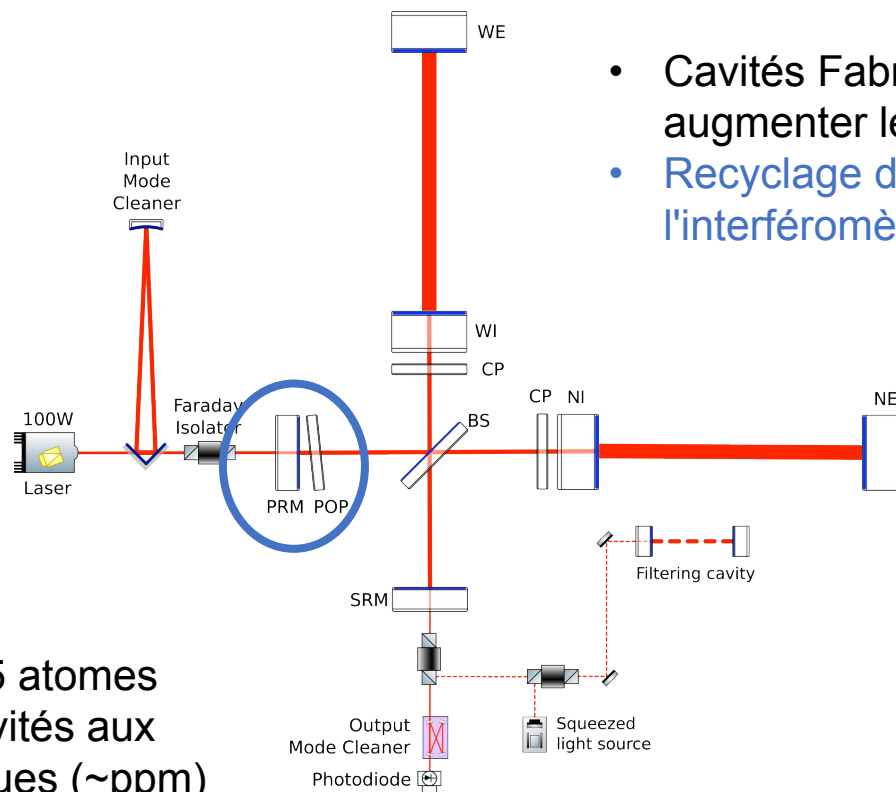


Les miroirs

Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



Un interféromètre de Michelson amélioré



- Cavités Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le chemin optique
- Recyclage de la puissance rejetée par l'interféromètre



Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

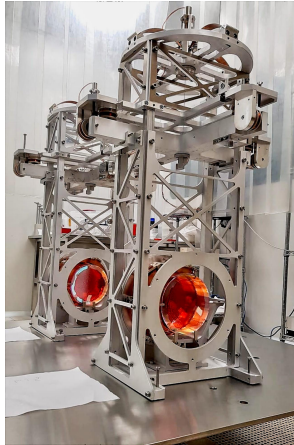
Le vide

~ 10 000 m³ de vide à pression de 10⁻⁹ mbar



L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

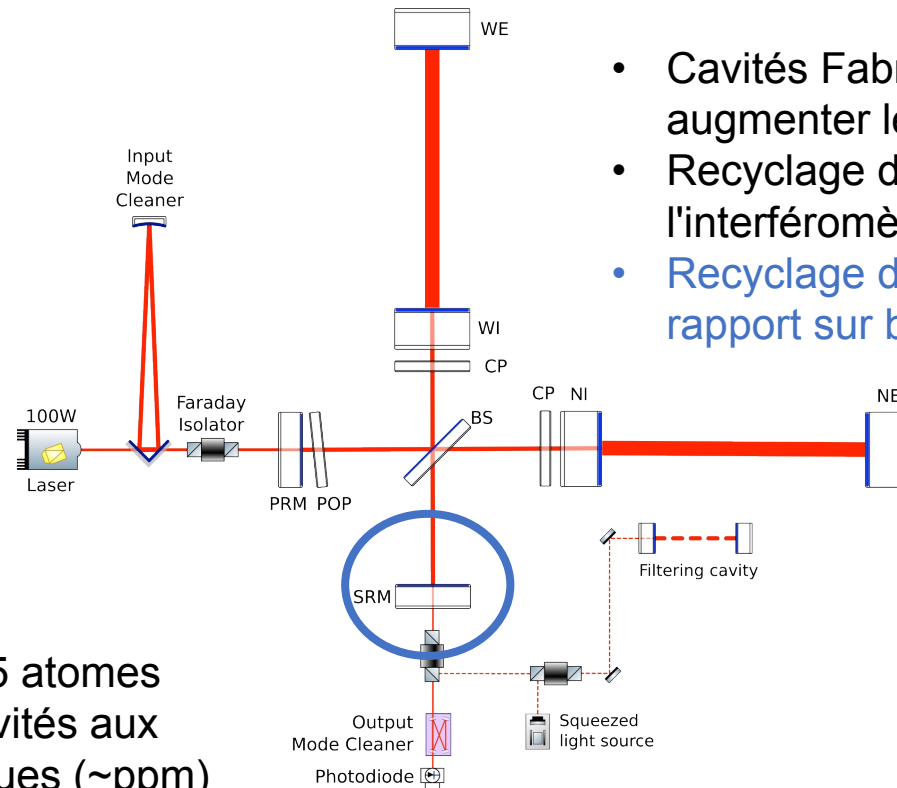


Les miroirs

Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



Un interféromètre de Michelson amélioré

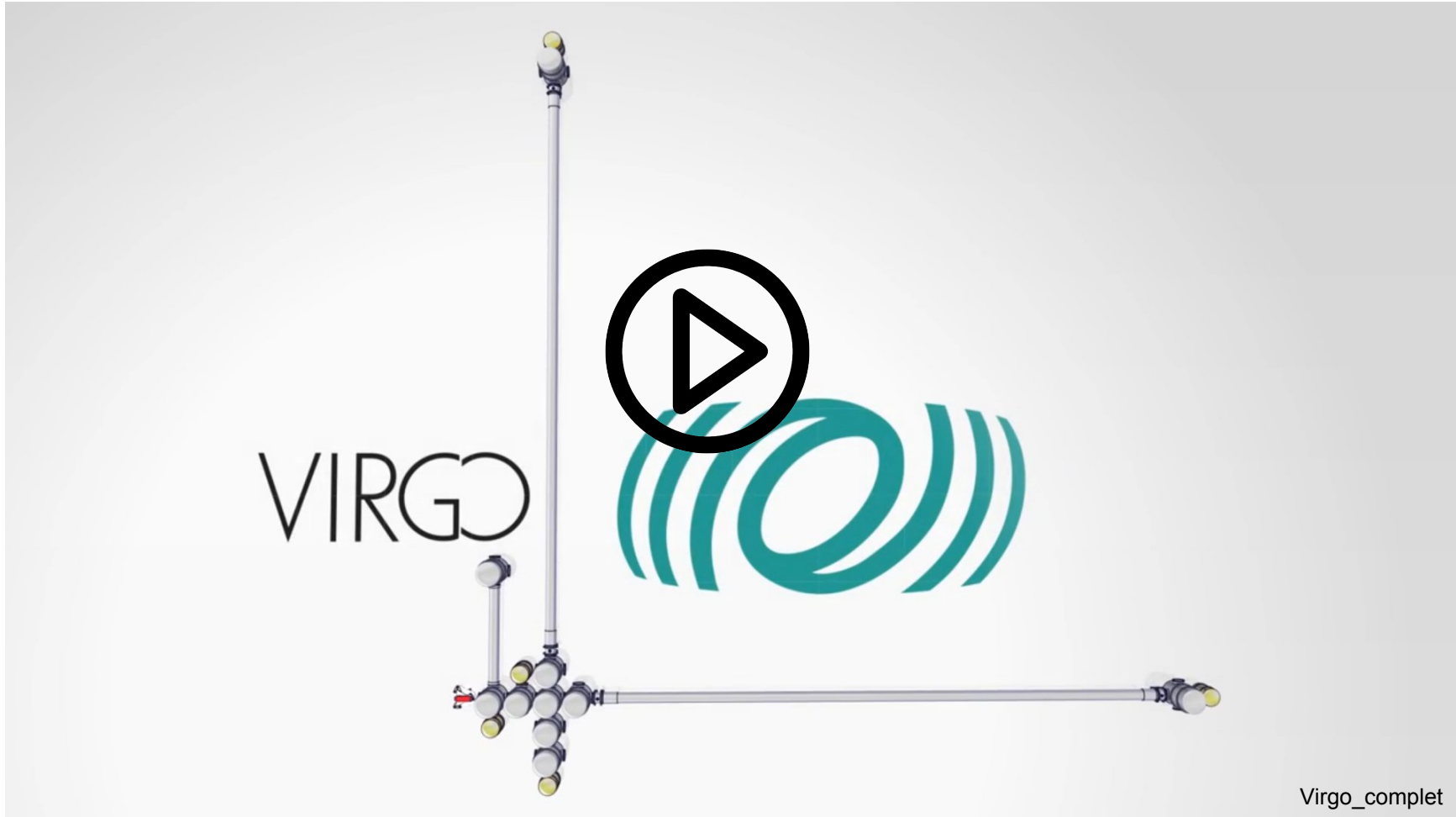


- Cavités Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le chemin optique
- Recyclage de la puissance rejetée par l'interféromètre
- **Recyclage du signal pour améliorer le rapport sur bruit de la détection**



Advanced Virgo

un interféromètre de Michelson doublement recyclé





Les défis à relever

pour atteindre la sensibilité nécessaire sont nombreux

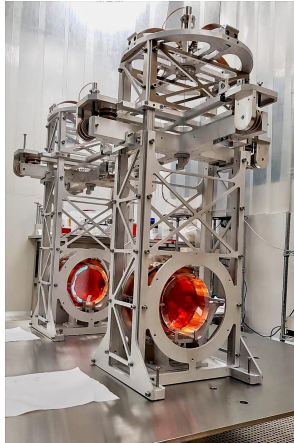
Le vide

~ 10 000 m³ de vide à pression de 10⁻⁹ mbar



L'isolation

Suspension pour s'isoler des vibrations du sol

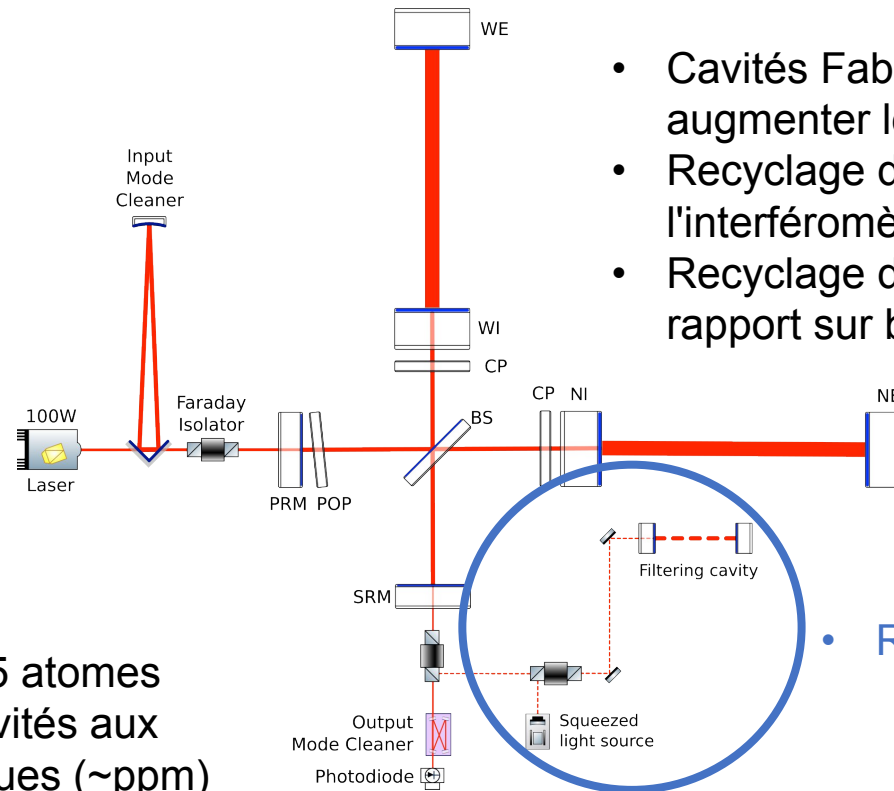


Les miroirs

Surface précise à 5 atomes près et des réflectivités aux limites technologiques (~ppm)



Un interféromètre de Michelson amélioré



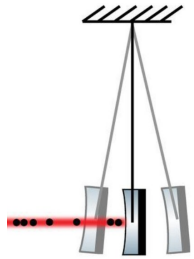
- Cavités Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le chemin optique
- Recyclage de la puissance rejetée par l'interféromètre
- Recyclage du signal pour améliorer le rapport sur bruit de la détection

• Réduction du bruit quantique



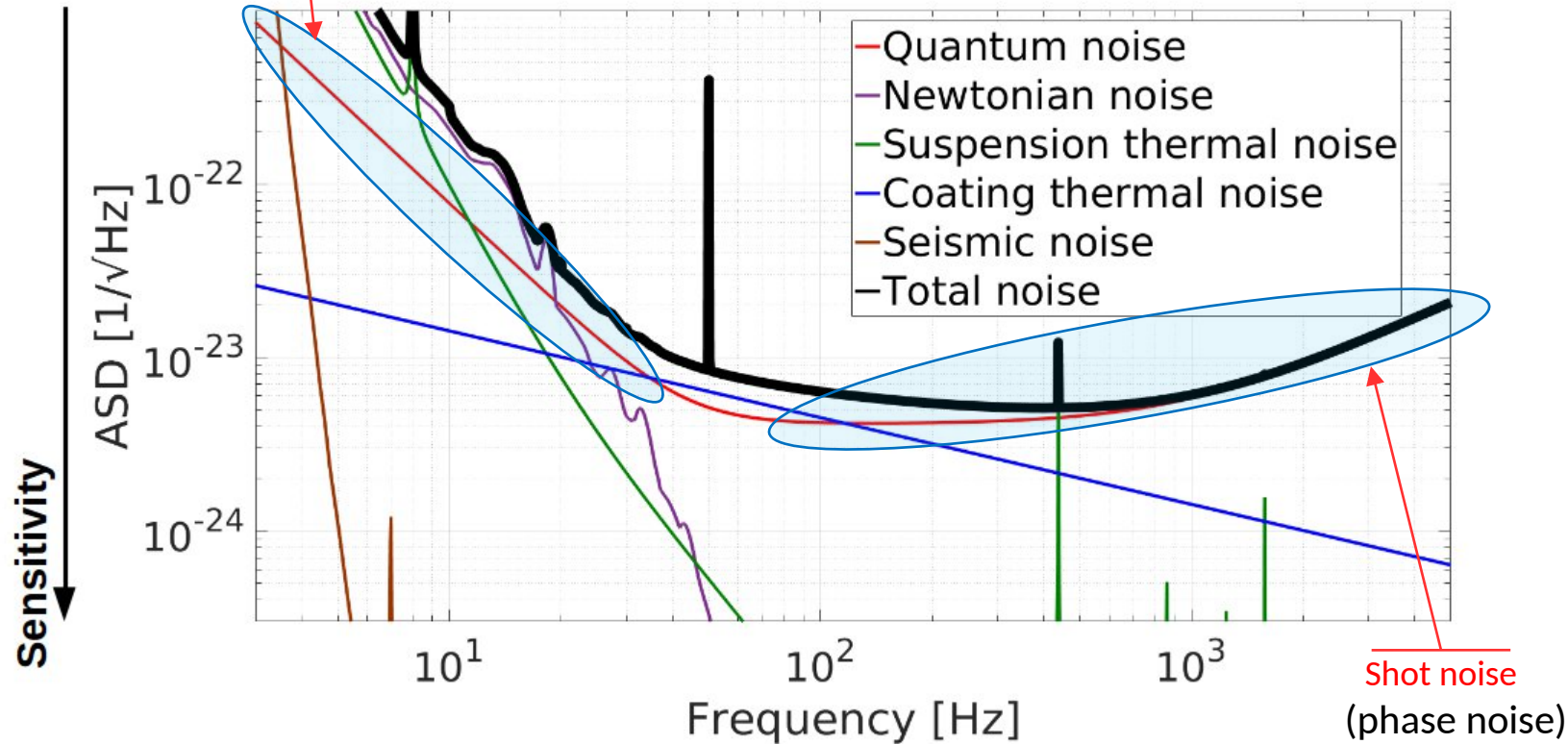
Le bruit quantique

est limitant à hautes fréquence et proche des bruits limitants à basse fréquence et composé de deux sources de bruit



Radiation pressure noise

(amplitude noise)



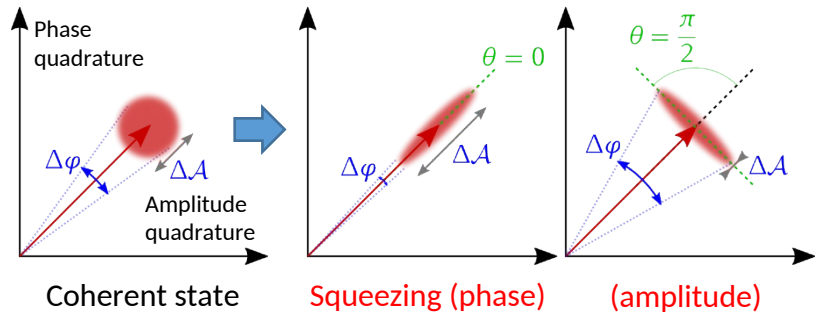


Squeezing, des états comprimés de la lumière

pour réduire le bruit quantique dans toute la bande de fréquences

Propriété quantiques

Relation d'incertitude de Heisenberg : $\Delta A \times \Delta \varphi \geq 1$



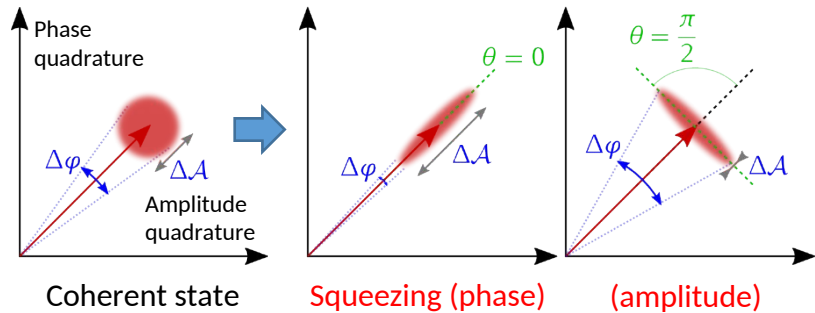


Squeezing, des états comprimés de la lumière

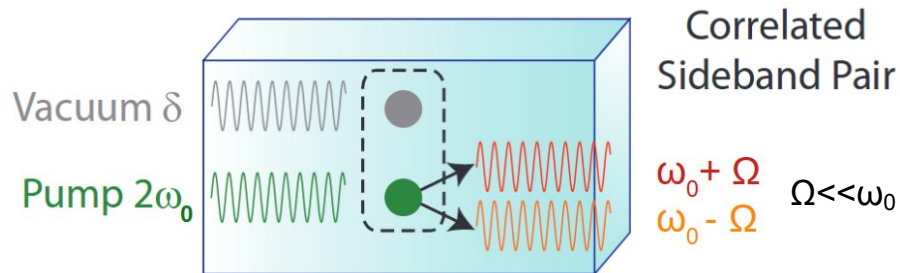
pour réduire le bruit quantique dans toute la bande de fréquences

Propriété quantiques

Relation d'incertitude de Heisenberg : $\Delta A \times \Delta \varphi \geq 1$



Interaction non linéaire



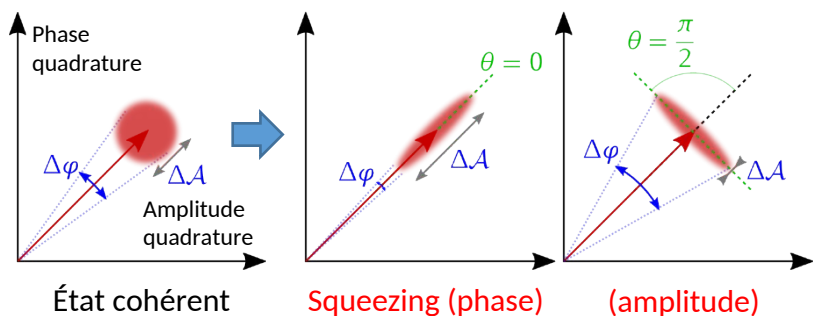


Squeezing, des états comprimés de la lumière

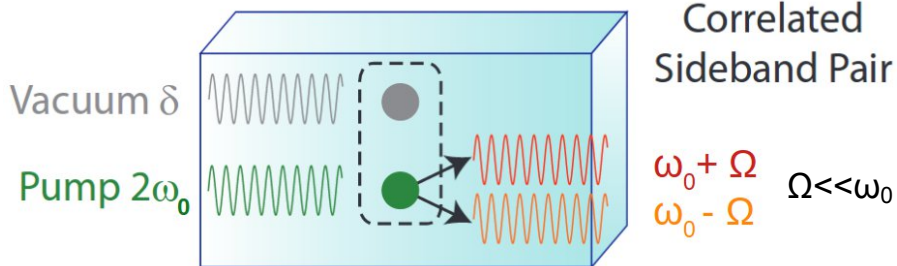
pour réduire le bruit quantique dans toute la bande de fréquences

Propriété quantiques

Relation d'incertitude de Heisenberg : $\Delta A \times \Delta \varphi \geq 1$

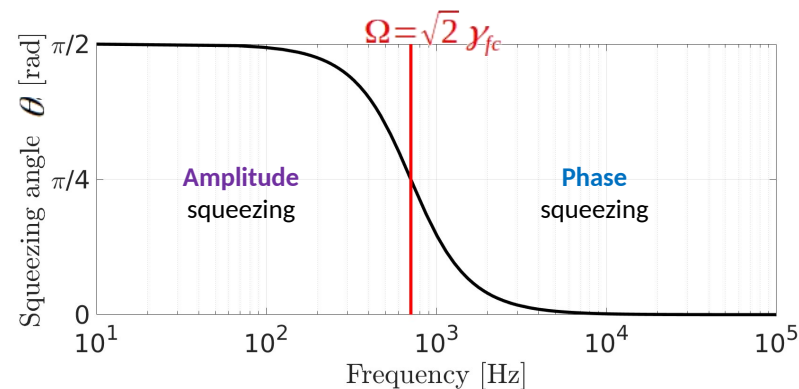
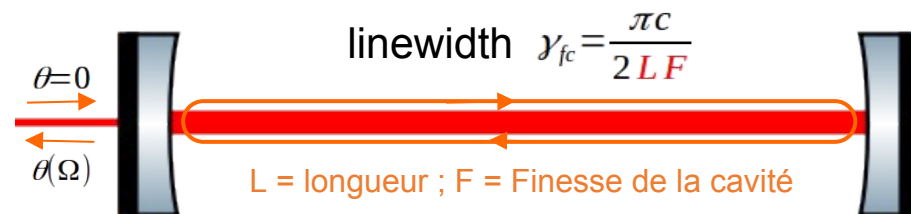


Interaction non linéaire



Dépendance en fréquence

Cavité Fabry-Perot surcouplée et détunée



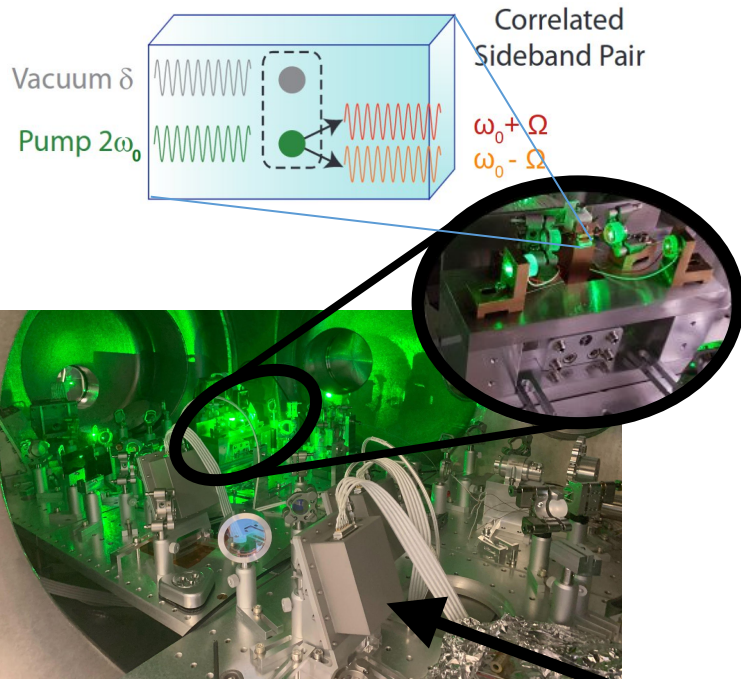
$$\text{Angle de l'ellipse de squeezing : } \theta = \frac{\varphi(\omega_0 + \Omega) + \varphi(\omega_0 - \Omega)}{2} [\pi]$$



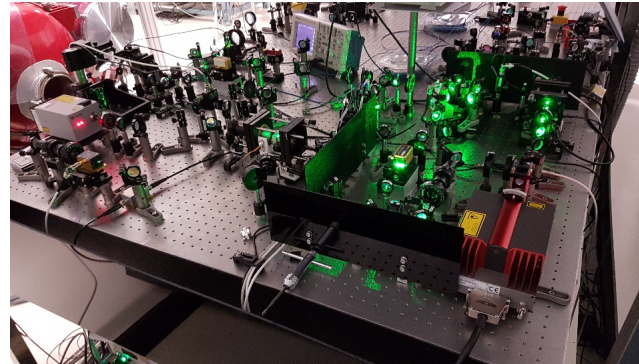
Le plateau technique CALVA à IJCLab

teste la technique de squeezing dépendant de la fréquence

Génération du squeezing dans une enceinte sous vide



Banc de préparation sous air (7 faisceaux générés à partir de 2 têtes laser)



Cavité de 50 m pour obtenir la dépendance en fréquence



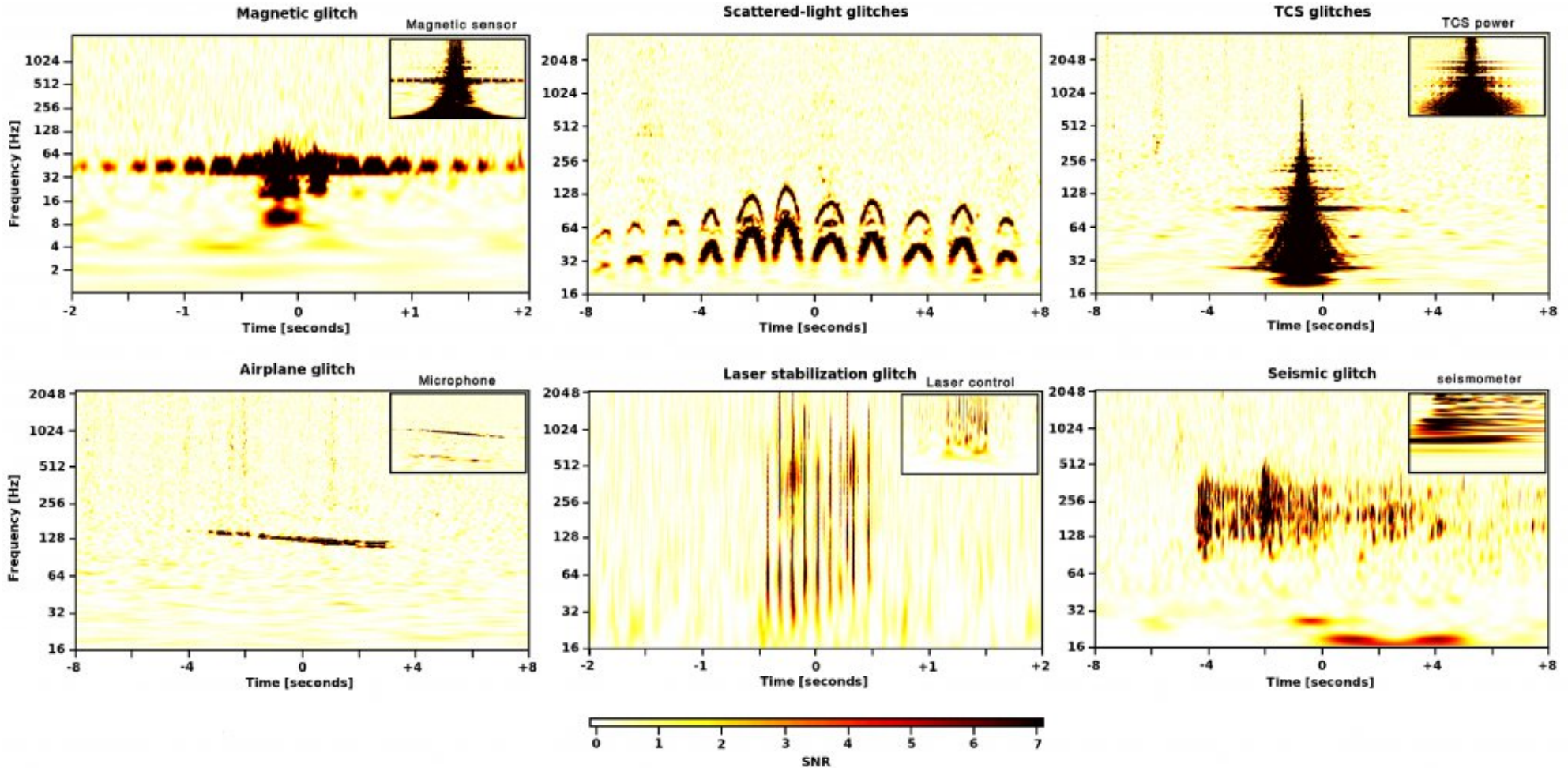
⇒ installation et premières caractérisations réalisées
⇒ la prochaine étape consiste à mesurer une réduction du bruit quantique

+ mesure du squeezing



La caractérisation des bruits du détecteur

est primordiale pour la détection des ondes gravitationnelles





Un réseau international de détecteurs

permet une meilleure reconstruction des paramètres de la source

HL



Par exemple pour GW170817, en utilisant les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs :

- 2 détecteurs => 1 bande circulaire

Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

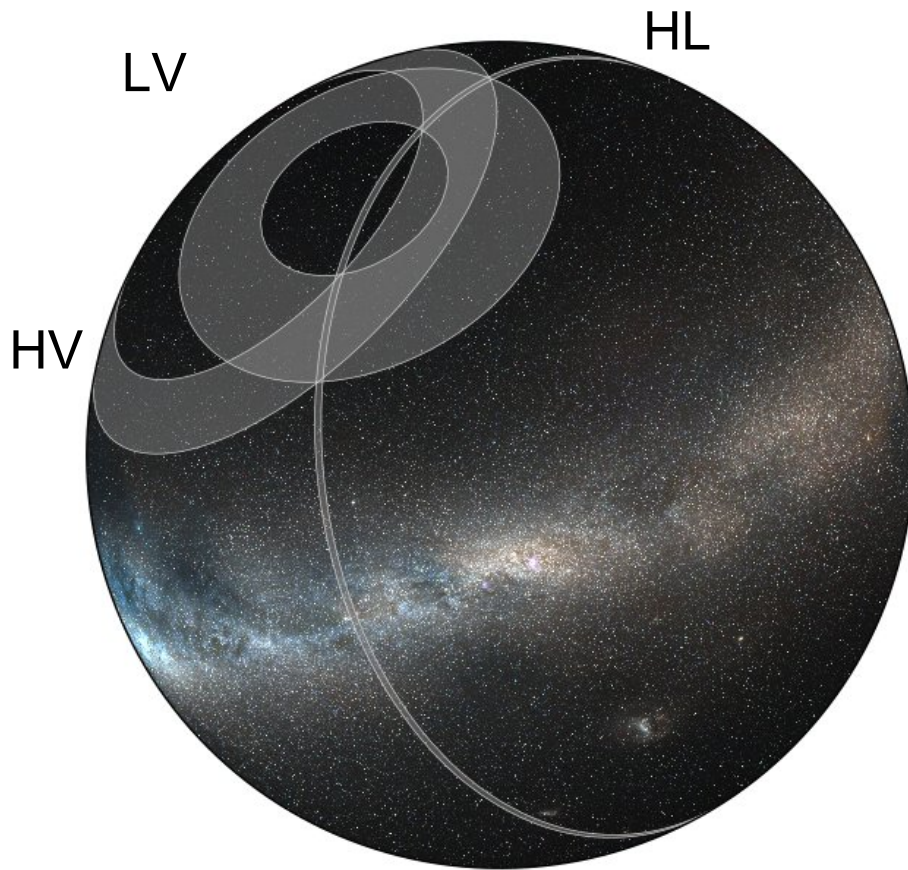


Un réseau international de détecteurs

permet une meilleure reconstruction des paramètres de la source

Par exemple pour GW170817, en utilisant les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs :

- 2 détecteurs => 1 bande circulaire
- 3 détecteurs => 2 zones



Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

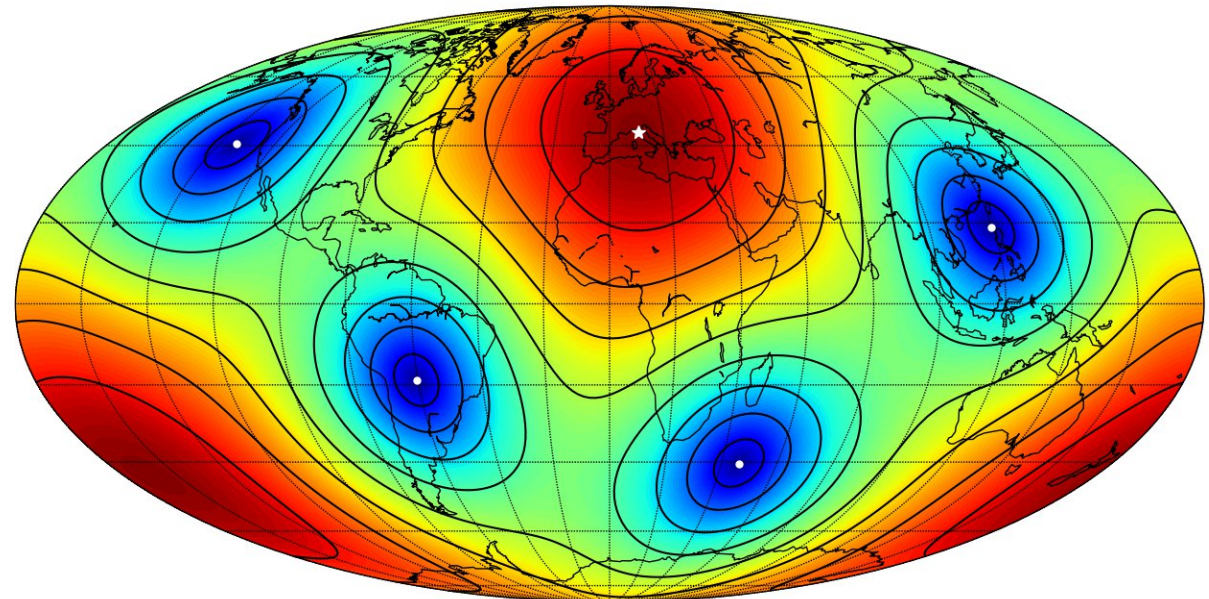
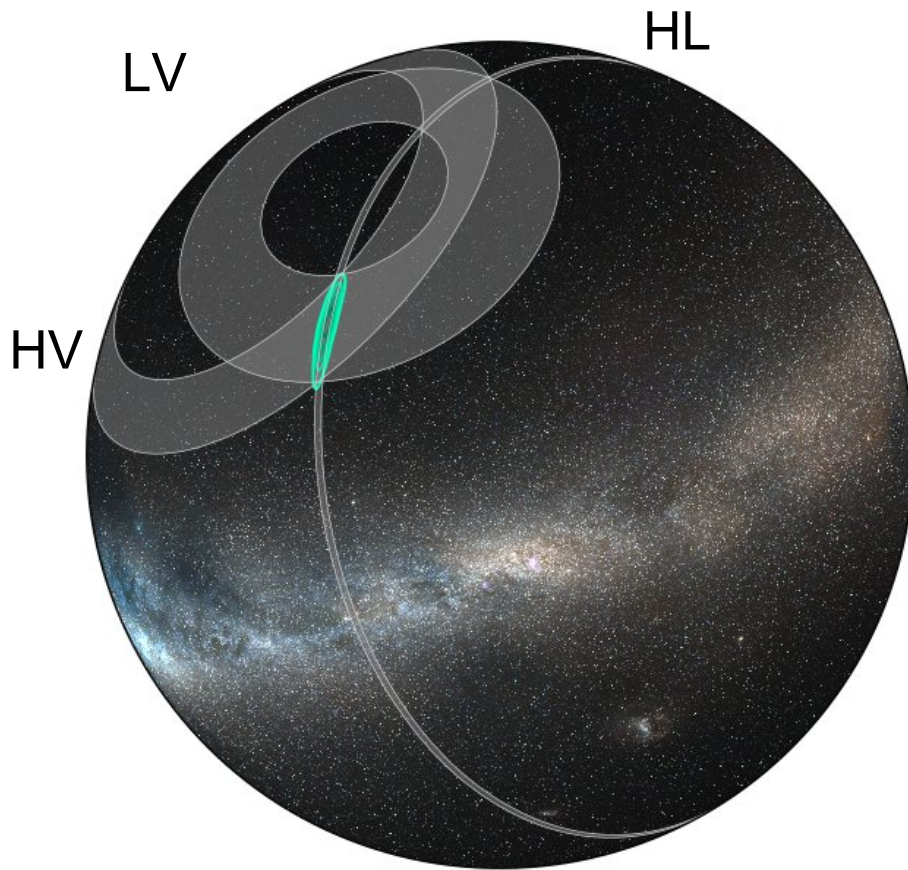


Un réseau international de détecteurs

permet une meilleure reconstruction des paramètres de la source

Par exemple pour GW170817, en utilisant les temps d'arrivée des signaux dans les différents détecteurs :

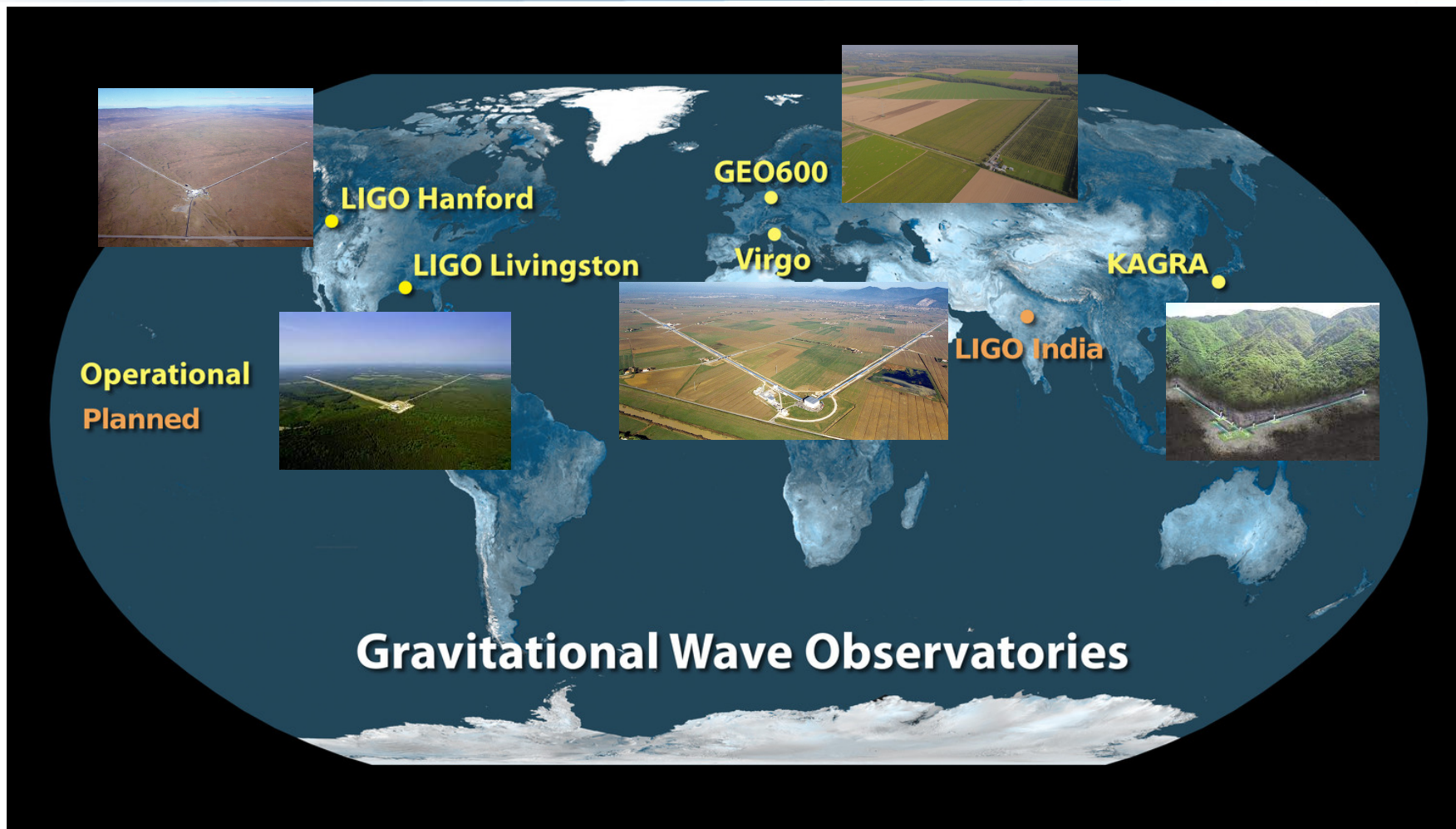
- 2 détecteurs => 1 bande circulaire
- 3 détecteurs => 2 zones
- 3 détecteurs + diagramme d'antenne => 1 zone



Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)



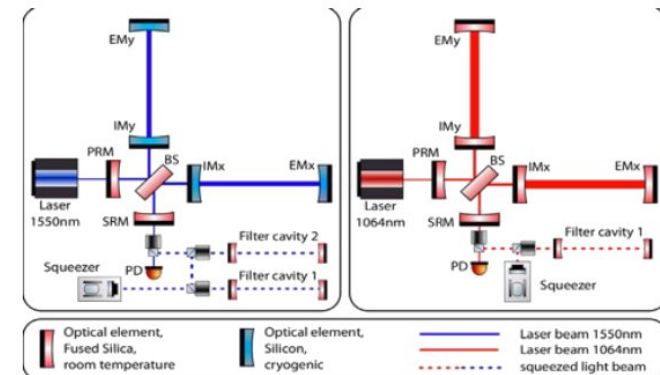
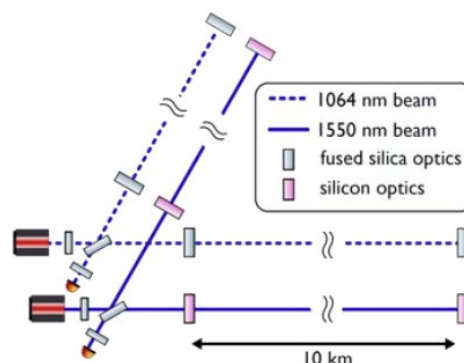
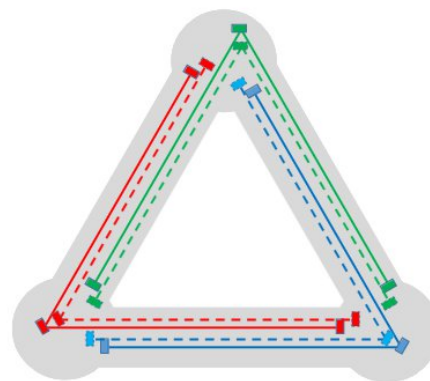
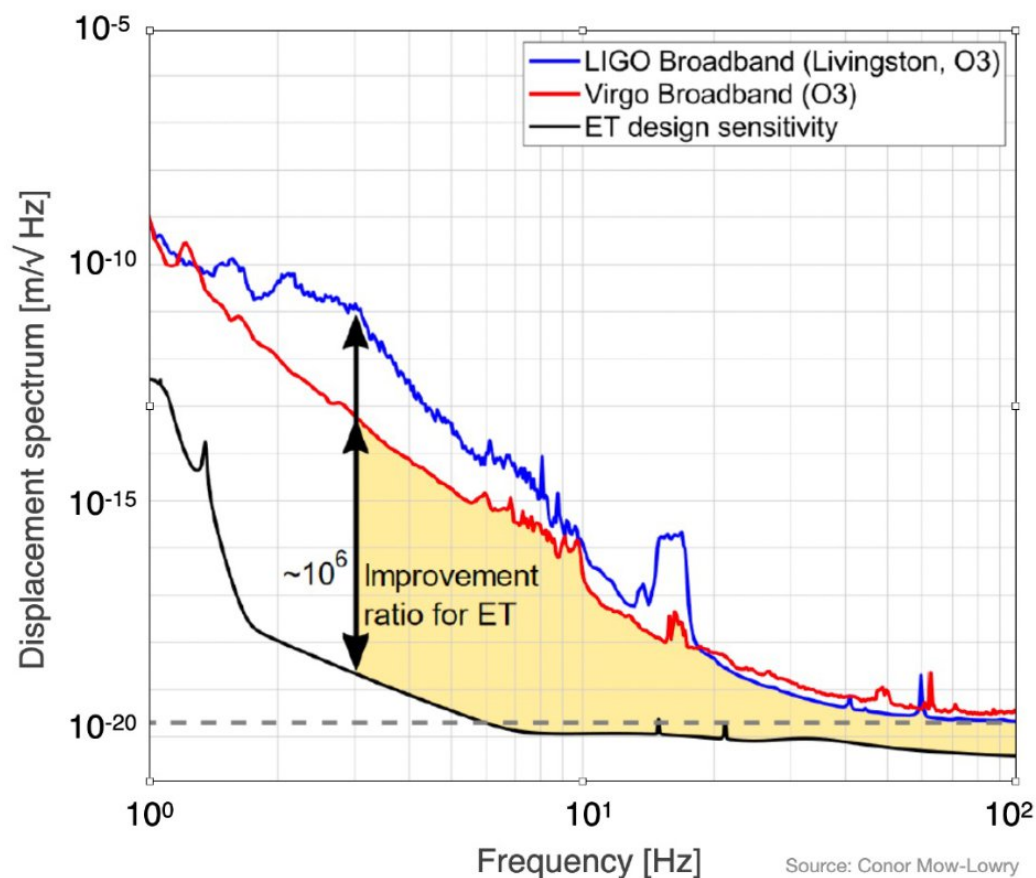
Le réseau de 2ème génération





Le détecteur Einstein Telescope (de 3ème génération)

améliorera encore la sensibilité de plus d'un facteur 10

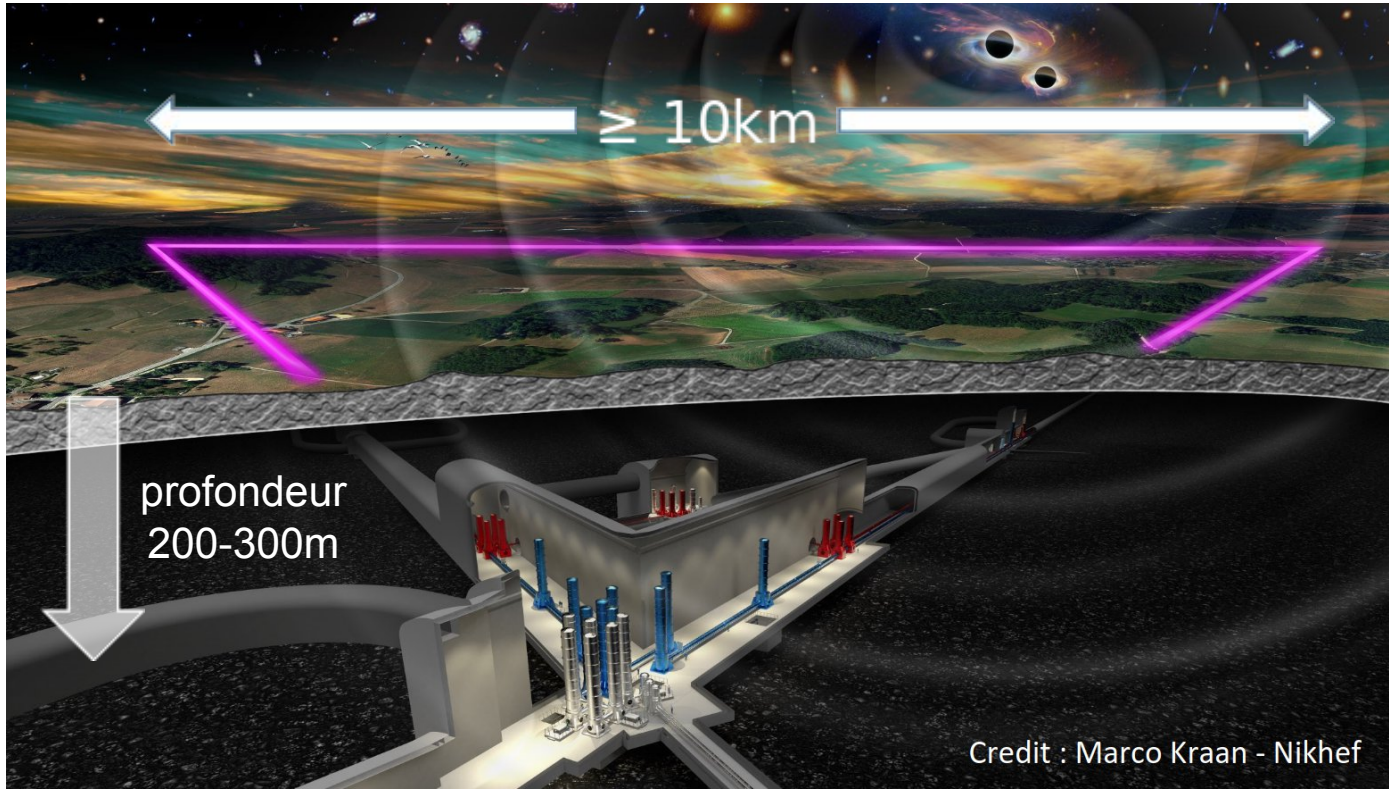


| Parameter | ET-HF | ET-LF |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Arm length | 10 km | 10 km |
| Input power (after IMC) | 500 W | 3 W |
| Arm power | 3 MW | 18 kW |
| Temperature | 290 K | 10-20 K |
| Mirror material | fused silica | silicon |
| Mirror diameter / thickness | 62 cm / 30 cm | 45 cm / 57 cm |
| Mirror masses | 200 kg | 211 kg |
| Laser wavelength | 1064 nm | 1550 nm |
| SR-phase (rad) | tuned (0.0) | detuned (0.6) |
| SR transmittance | 10 % | 20 % |
| Quantum noise suppression | freq. dep. squeez. | freq. dep. squeez. |
| Filter cavities | 1×300 m | 2×1.0 km |
| Squeezing level | 10 dB (effective) | 10 dB (effective) |
| Beam shape | TEM ₀₀ | TEM ₀₀ |
| Beam radius | 12.0 cm | 9 cm |
| Scatter loss per surface | 37 ppm | 37 ppm |
| Seismic isolation | SA, 8 m tall | mod SA, 17 m tall |
| Seismic (for $f > 1$ Hz) | $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$ | $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}/f^2$ |
| Gravity gradient subtraction | none | factor of a few |



Une nouvelle infrastructure

commençant ses observations vers la fin des années 2030 et capable d'accueillir de futures améliorations pendant plusieurs décennies





De nombreuses activités à IJCLab

impliquant plusieurs groupes et services

Squeezing

Objets compacts

Enceintes à vide

Computing

Qualité de surface
sous vide cryo

Tests de la
relativité générale

Cryostat

Développement
durable

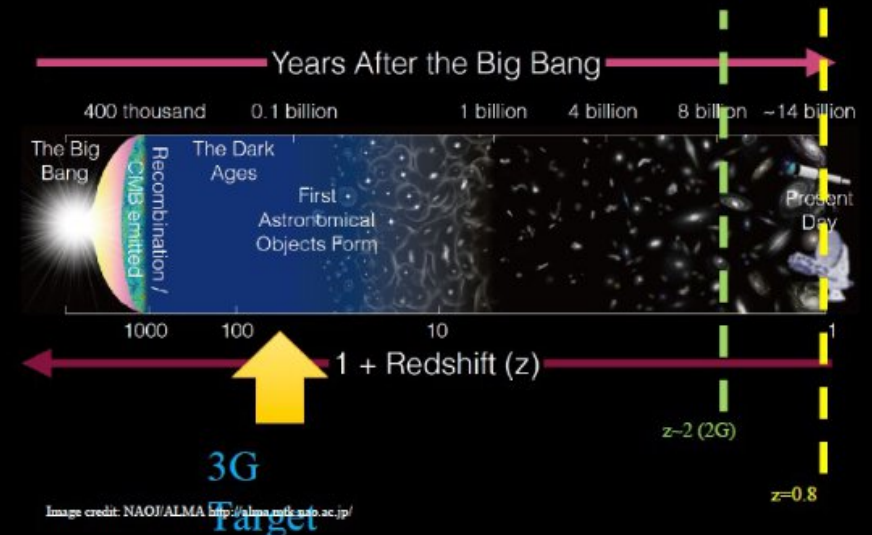
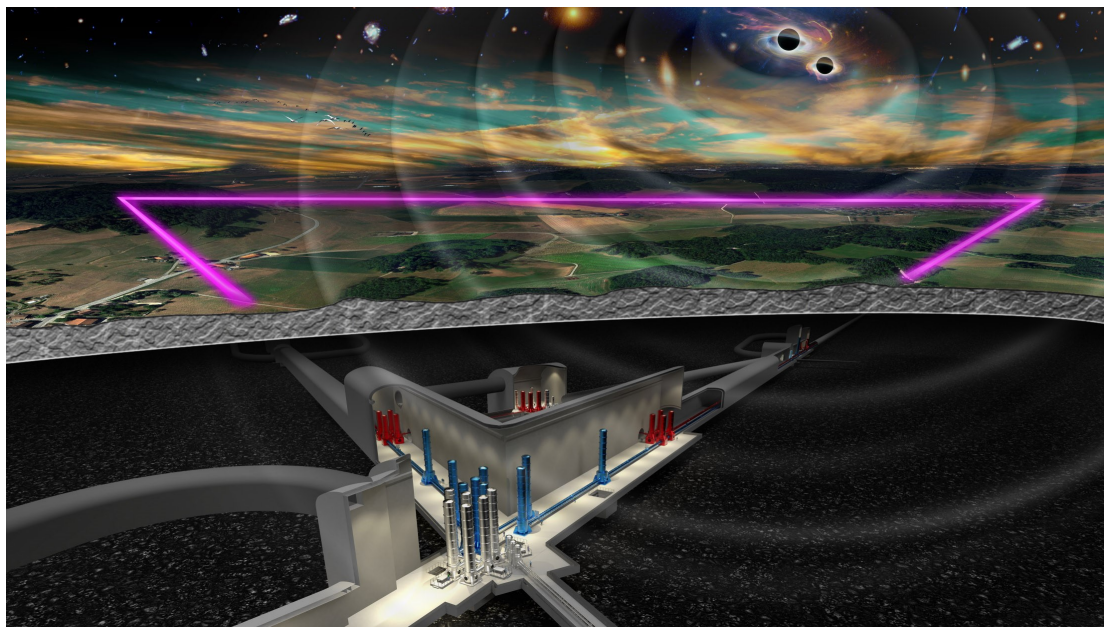
Cryogénie

Étude des
sursauts gamma



Conclusion

- Les détecteurs d'ondes gravitationnelles interférométriques au sol sont des outils optiques extrêmement sensibles qui ont permis les premières détections directes d'ondes gravitationnelles
- À chaque amélioration des détecteurs on augmente l'horizon observable
- Les détecteurs actuels sont la 2^{ème} génération de détecteurs, de par leur infrastructure, ils sont limités à environ 6 milliards d'années lumière d'horizon
- Les détecteurs de 3^{ème} génération auront un horizon leur donnant accès quasiment à toutes les binaires de trous noirs de masses stellaires et d'étoiles à neutrons de l'Univers





Merci !