

LIGO

**COSMIC
EXPLORER**



Les futurs détecteurs d'Ondes Gravitationnelles : objectifs scientifiques et défis techniques

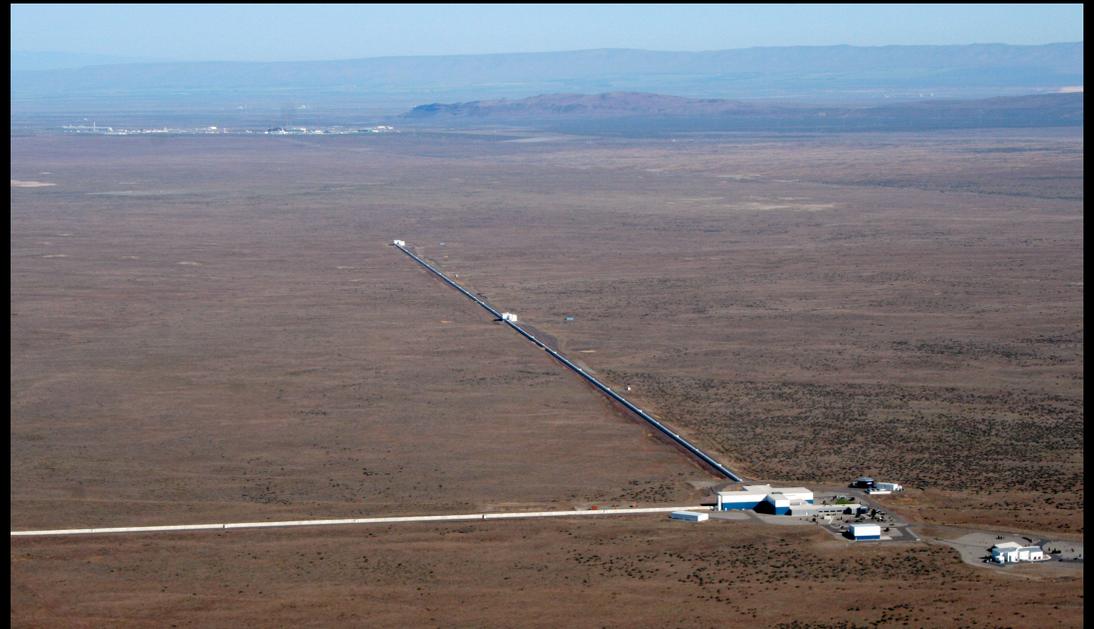
David Shoemaker

MIT Kavli Institute – LIGO Laboratory

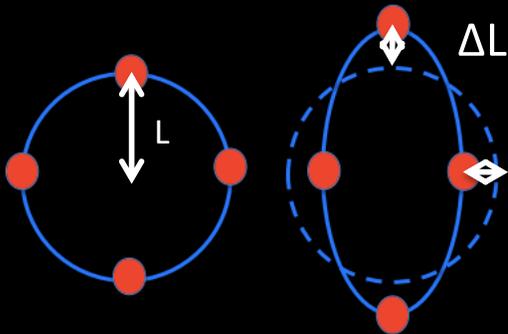
Merci aux collègues de LSC, ET et CE pour les images

30 ans de GW à LMA

2022-11-24
G2202004



Étirement et compression de l'espace-temps = 'strain'



L'amplitude de la déformation des ondes gravitationnelles est $h = \Delta L/L$

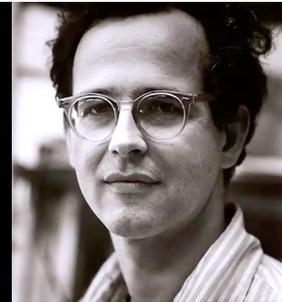
$$\Delta L = h L$$

Grand L facilite la mesure de ΔL ; pour les détecteurs actuels $L = 3$ à 4 km, donc il faut détecter

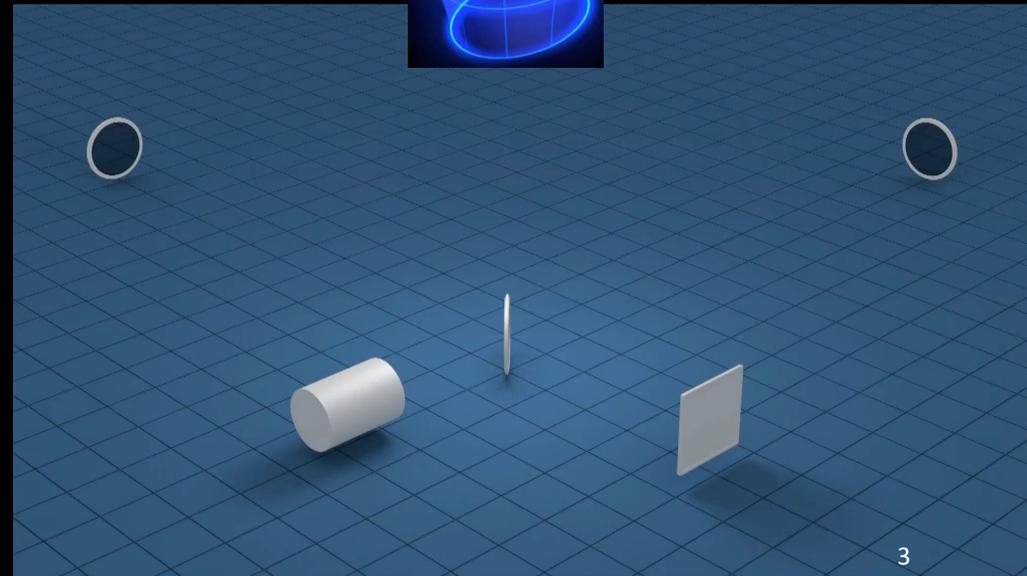
$$\sim 10^{-21} \times \sim 10^3 = \sim 10^{-18} \text{ m}$$

Principe de base pour détecter les ondes gravitationnelles: un interféromètre de Michelson

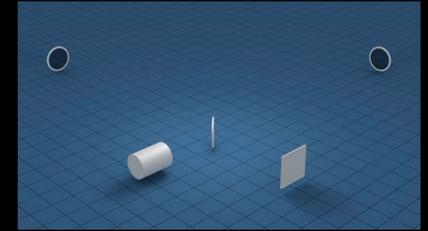
- Un transducteur de 'strain' en 'Intensité lumineuse'
→ signal électrique
- Qu'est-ce qui détermine la sensibilité de ce détecteur ?
- Distance L sur laquelle le strain est détecté
- Résolution de la détection optique
- Forces stochastiques qui font bouger les miroirs, masquant les GW



Rai Weiss,
'70s



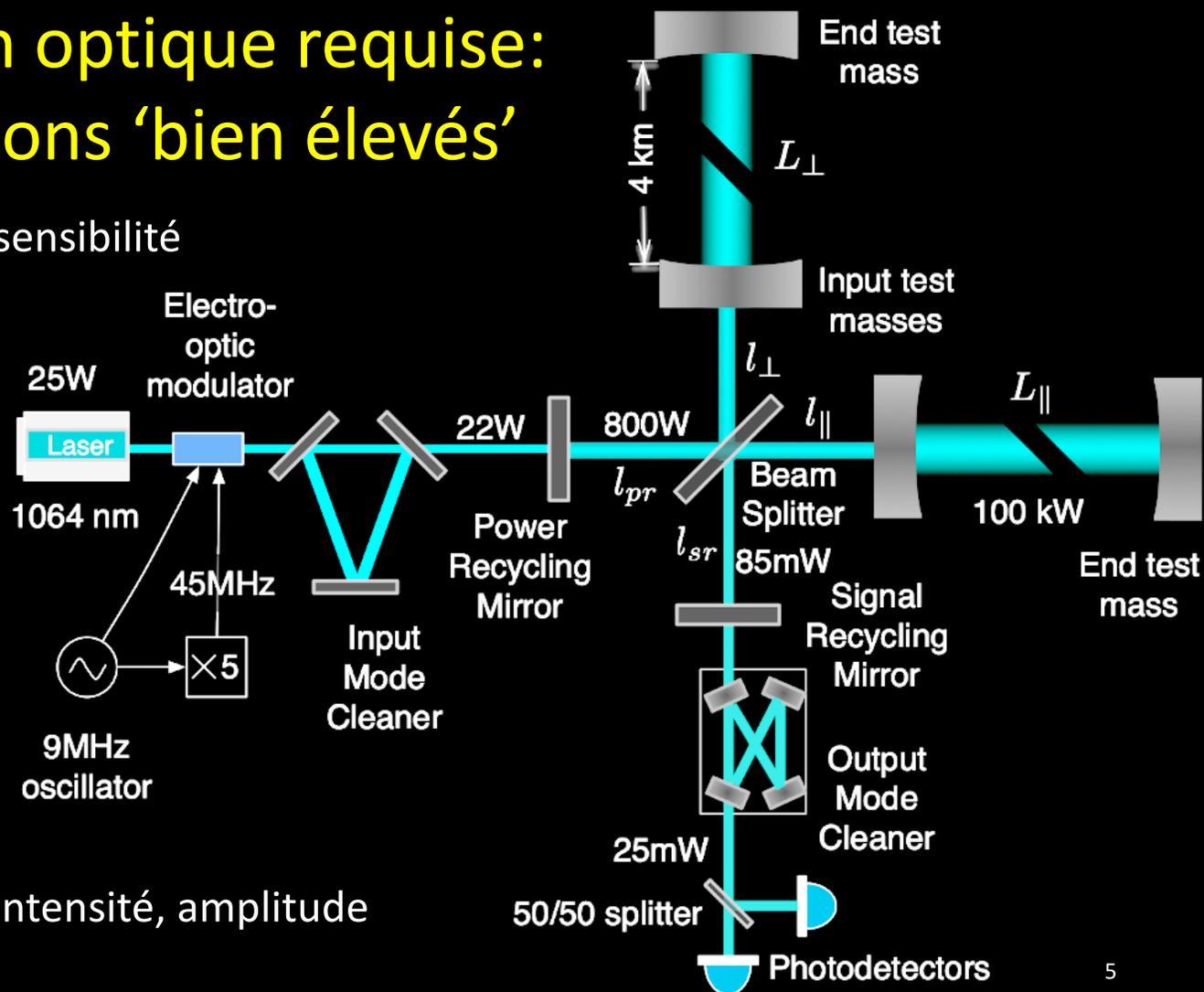
L'infrastructure pour une mise en œuvre réaliste



- Une longueur suffisante des bras pour amener le strain induit par GW à un niveau mesurable (actuellement 3-4 km)
- La lumière laser de détection doit voyager dans un vide excellent ($\sim 10^{-9}$ Torr)
- Le diamètre du système de vide doit accueillir un faisceau de diffraction limitée sur 4 km (~ 1 m de diamètre; $\sim 10\,000$ m³)
- Le système à vide doit être *droit*, à niveau et protégé de l'environnement humain et naturel (Excavation, plancher en béton, aligné à une précision de plusieurs mm sur 3-4km, et couvert)
- Salles expérimentales avec contrôle de poussière et de température; bâtiments pour le personnel; bâtiment pour la science publique ($\sim 10\,000$ m²)

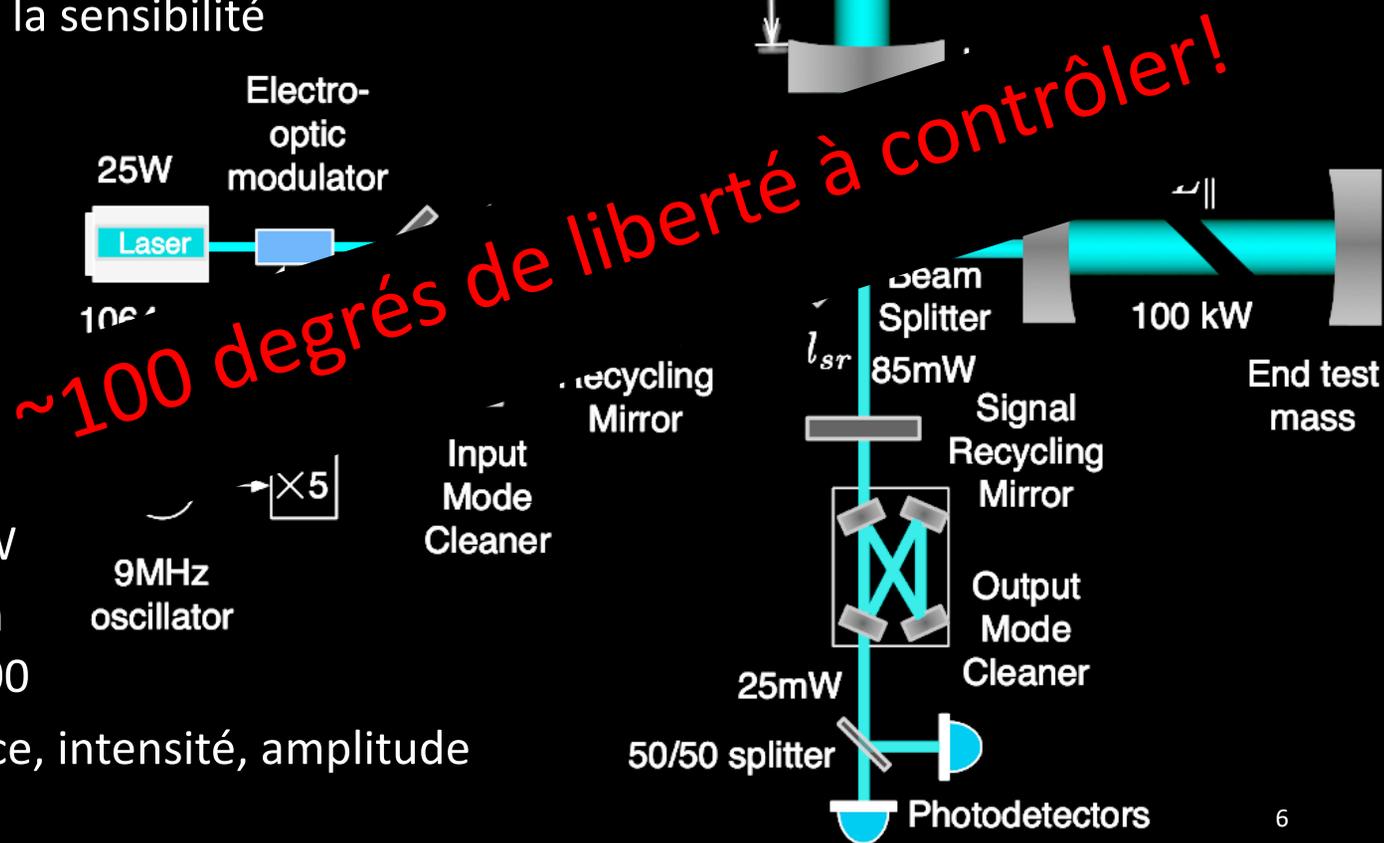
Obtenir la précision optique requise: beaucoup de photons 'bien élevés'

- Le bruit de grenaille limite la sensibilité
 - $h_{\text{shot}} \sim 1/\sqrt{P_{\text{laser}}}$
- Cavités de Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le temps d'interaction photon-GW
- Cavités couplées pour augmenter la puissance, extraire les fréquences GW
- Cavités FP en transmission pour exiger le mode TEM00
- Laser stabilisé en fréquence, intensité, amplitude



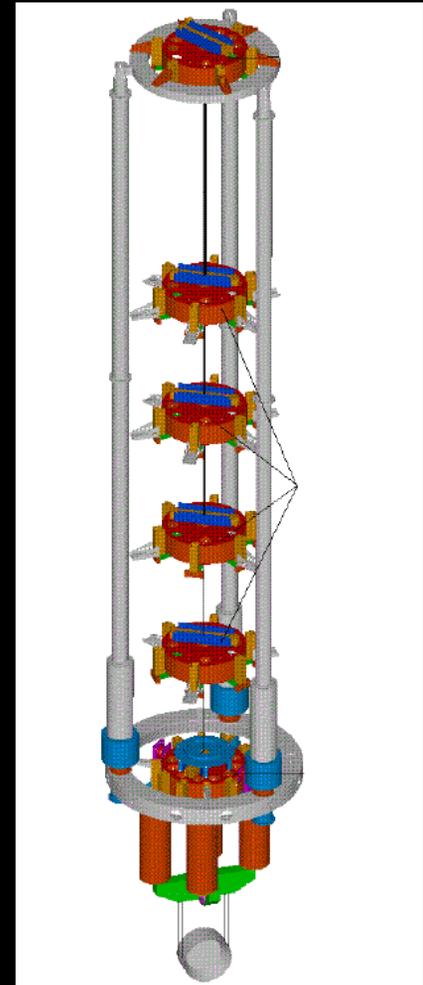
Obtenir la précision optique requise: beaucoup de photons 'bien élevés'

- Le bruit de grenaille limite la sensibilité
 - $h_{\text{shot}} \sim 1/\sqrt{P_{\text{laser}}}$
- Cavités de Fabry-Perot dans les bras pour augmenter le temps d'interaction photon-GW
- Cavités couplées pour augmenter la puissance, extraire les fréquences GW
- Cavités FP en transmission pour exiger le mode TEM00
- Laser stabilisé en fréquence, intensité, amplitude



Les forces stochastiques sur les miroirs masquent les GW

- Supprimer la transmission physique des mouvements (sismiques, etc.) depuis l'extérieur via:
 - Virgo: 6 pendules en série, donnant $((f_0/f)^2)^6$ isolation; à ressorts verticaux à basse fréquence; inverted pendulum legs
 - LIGO: 3 plates-formes asservies à 6 degrés de liberté, 4 pendules
- Gradients gravitationnels newtoniens dus à l'activité sismique
 - Peut aller sous terre (KAGRA, Einstein Telescope)
 - Limites sur la fréquence la plus basse pour les détecteurs au sol... il faut aller dans l'espace (LISA) pour cibler <1 Hz
- Concentrer le bruit thermique dans des bandes de fréquence étroites pour limiter l'impact sur la gamme des GW



Minimiser les forces stochastiques: Bruit Thermique

- $k_B T$ d'énergie per mode
(*A. Einstein, 1905*)

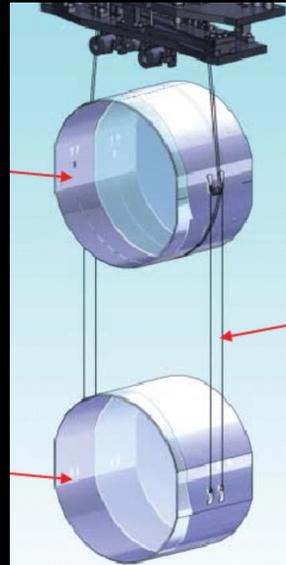
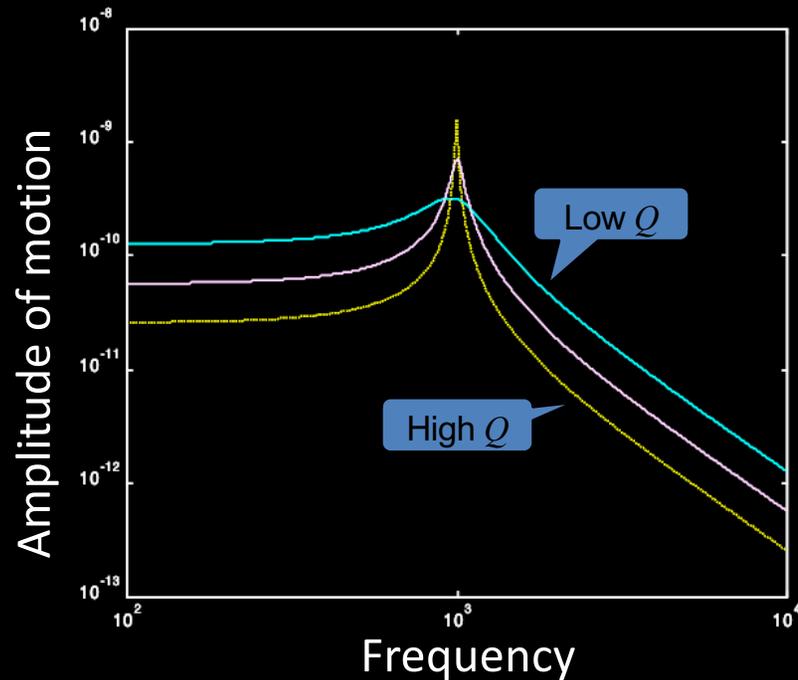
- Simple Harmonic Oscillator:

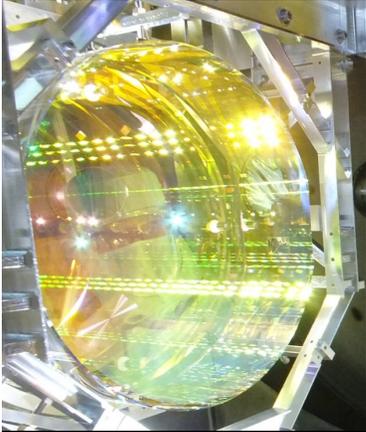
$$x_{rms} = \sqrt{\langle (\delta x)^2 \rangle} = \sqrt{k_B T / k_{spring}}$$

- Réparti en fréquence selon la partie réelle de l'impédance

$$\tilde{x}(f) = \frac{1}{\pi f} \sqrt{\frac{k_B T}{\Re(Z(f))}}$$

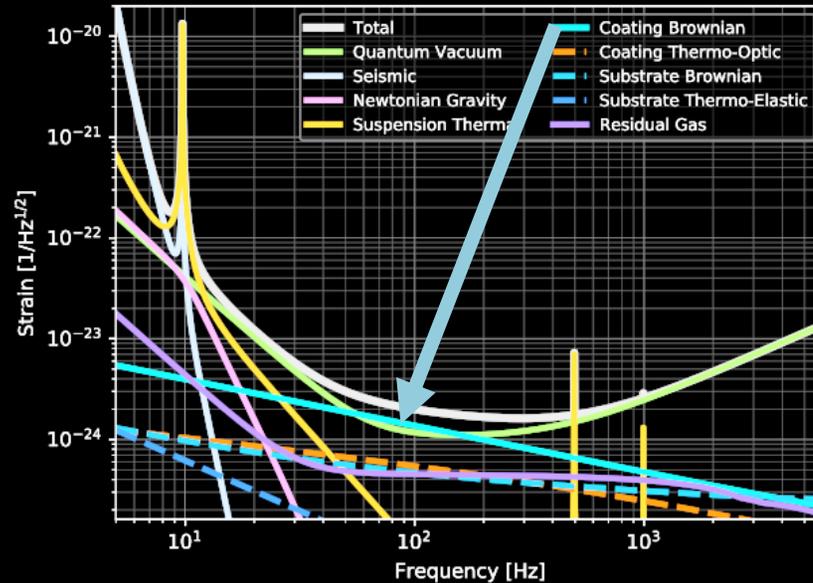
- Matériaux de basse pertes
- Construction monolithique





Bruit thermique du coating

- Dans les meilleurs coating amorphes, le coating optique diélectrique a une perte *mécanique* assez grande
 - Quelques 10^{-4} , contre 10^{-8} pour la substrat en silice
- Le théorème de fluctuation-dissipation dit que c'est là que se trouve la plus grande excitation thermique
- **Le coating est la surface vue par le laser**
- **C'est la limite dominante des détecteurs dans la bande critique 50-200 Hz**



coating thickness \rightarrow

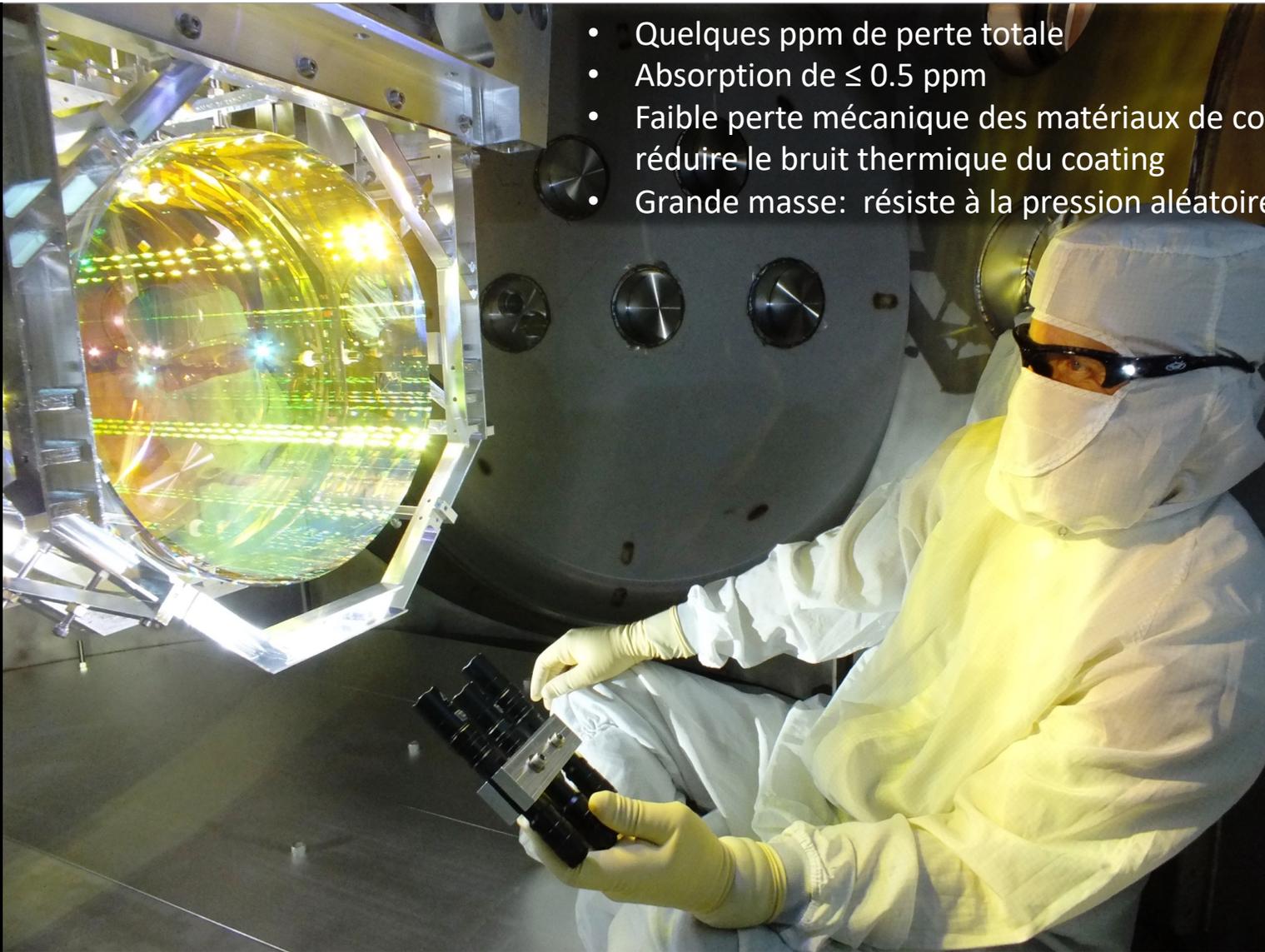
coating elastic loss $\phi \equiv \text{Im}Y / \text{Re}Y$

$$\langle \Delta x(f, T)^2 \rangle \approx \frac{2k_B T}{\pi^2 f} \frac{d}{w^2 Y} \phi(f)$$

beam radius \rightarrow

Y Levin *Phys. Rev. D* **57** 659 (1998)

High Quality Optics



- Quelques ppm de perte totale
- Absorption de ≤ 0.5 ppm
- Faible perte mécanique des matériaux de coating pour réduire le bruit thermique du coating
- Grande masse: résiste à la pression aléatoire des photons

Virgo Detector, EGO Cascina

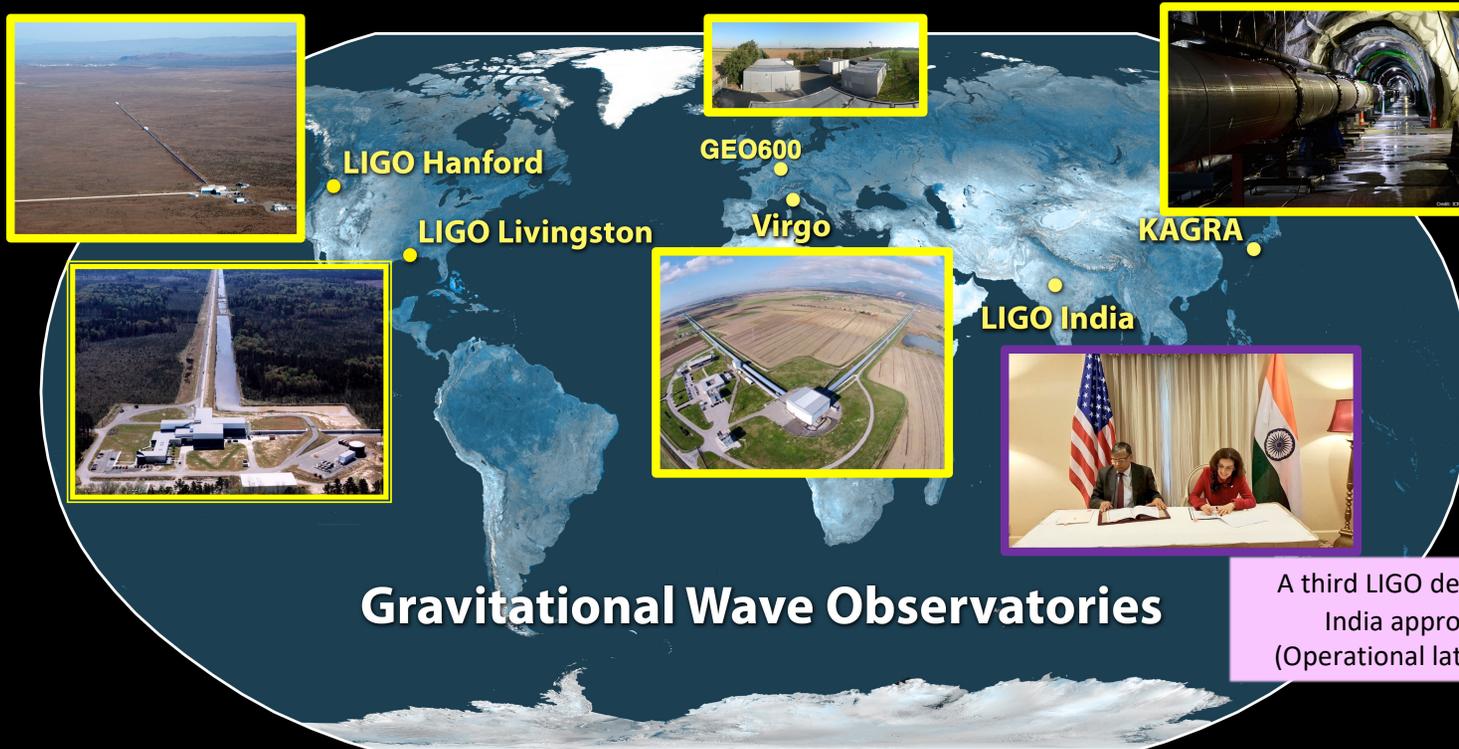


*LIGO Livingston
Observatory*



Sites actuels des observatoires
Virgo – LIGO
 $L = 3 - 4 \text{ km}$

Le réseau mondial des détecteurs d'ondes gravitationnelles en 2022

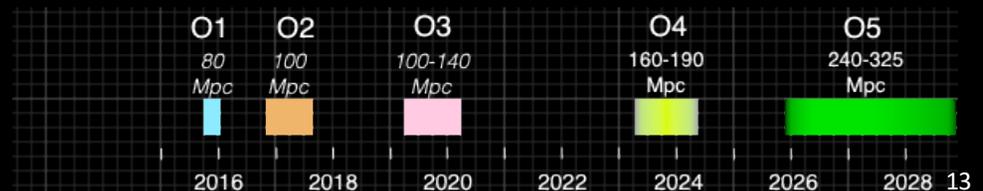
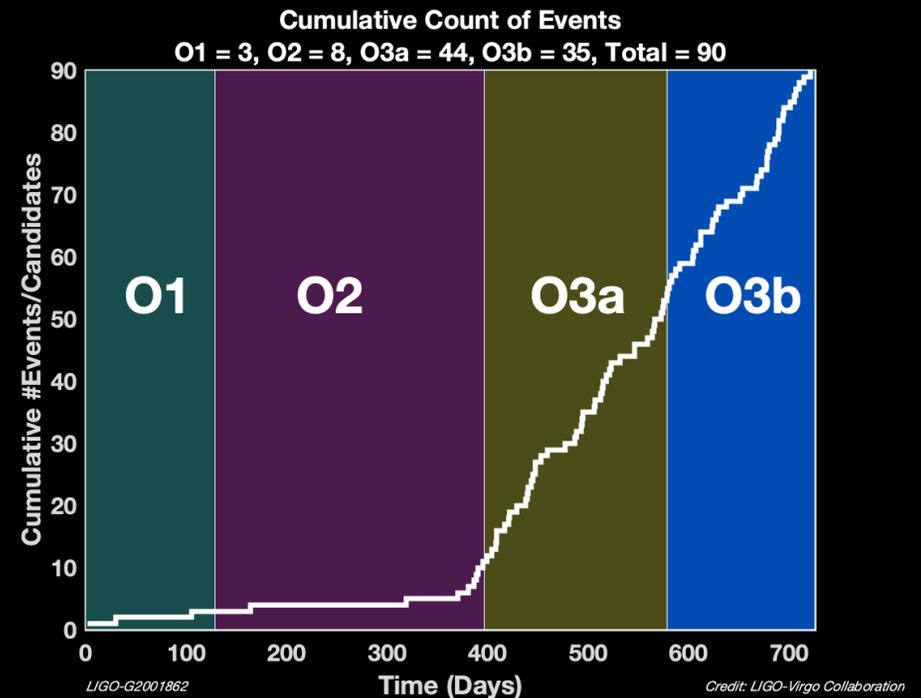


Gravitational Wave Observatories

A third LIGO detector in India approved!
(Operational late 2020s)

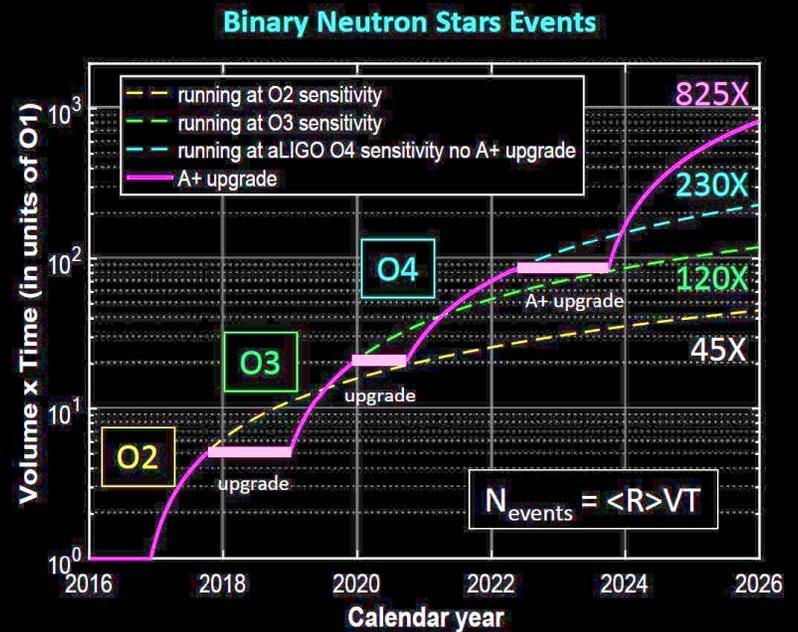
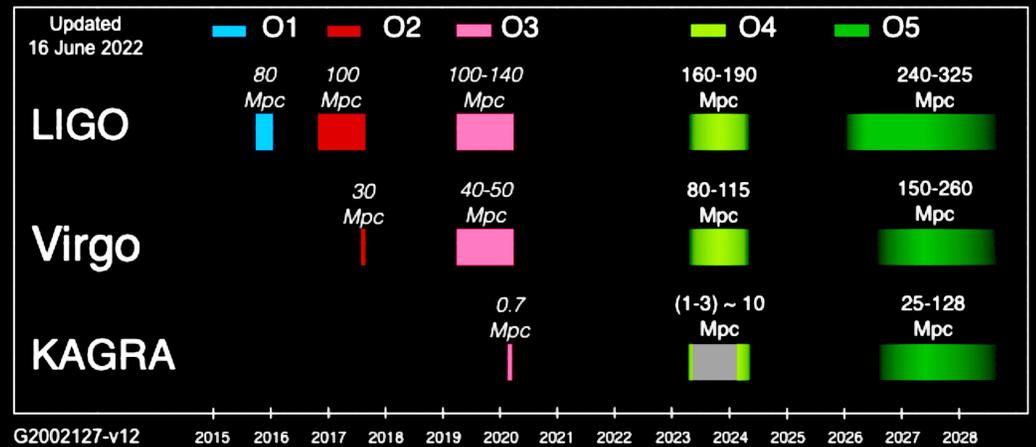
Les améliorations de sensibilité augmentent le taux des événements détectables

- On capte l'amplitude des GW →
- Le volume d'espace – et donc les sources accessibles – croît avec $\sim(\text{sensibilité})^3$
 - Sensibilité O3/O2 ~ 1.6
 - Taux d'événements $\sim (1.6)^3 = 4$
- Arrêts périodiques pour l'amélioration des instruments...
- mais jusqu'à présent, nous rattrapons



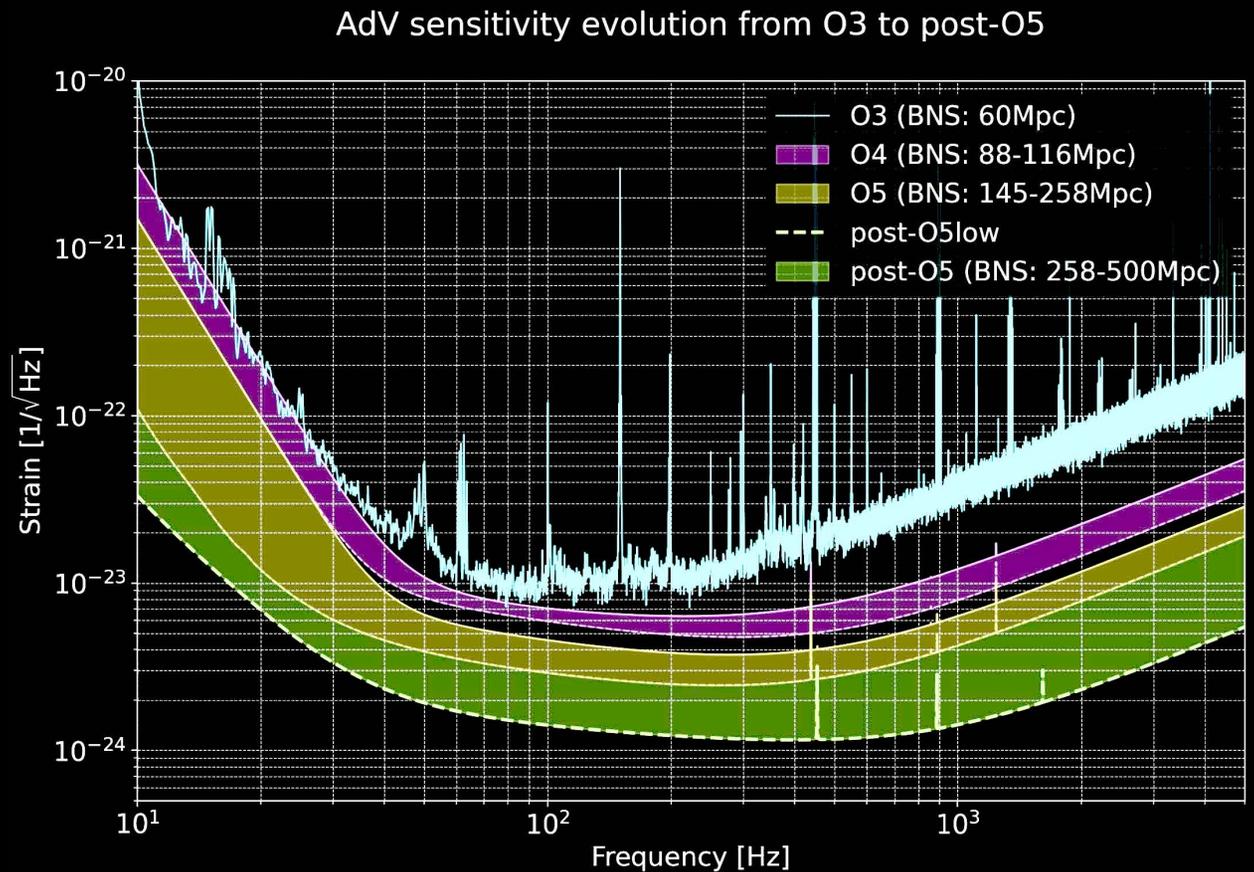
Futur proche

- Nous avons un plan bien défini de 'upgrades' et d'observations
- O4: Les détecteurs Advanced LIGO, Advanced Virgo et KAGRA, devraient observer au printemps 2023, avec une portée de 100-150 Mpc pour Binary Neutron Star coalescences
- O5 est projeté pour ~2027, portée de 200-300 Mpc



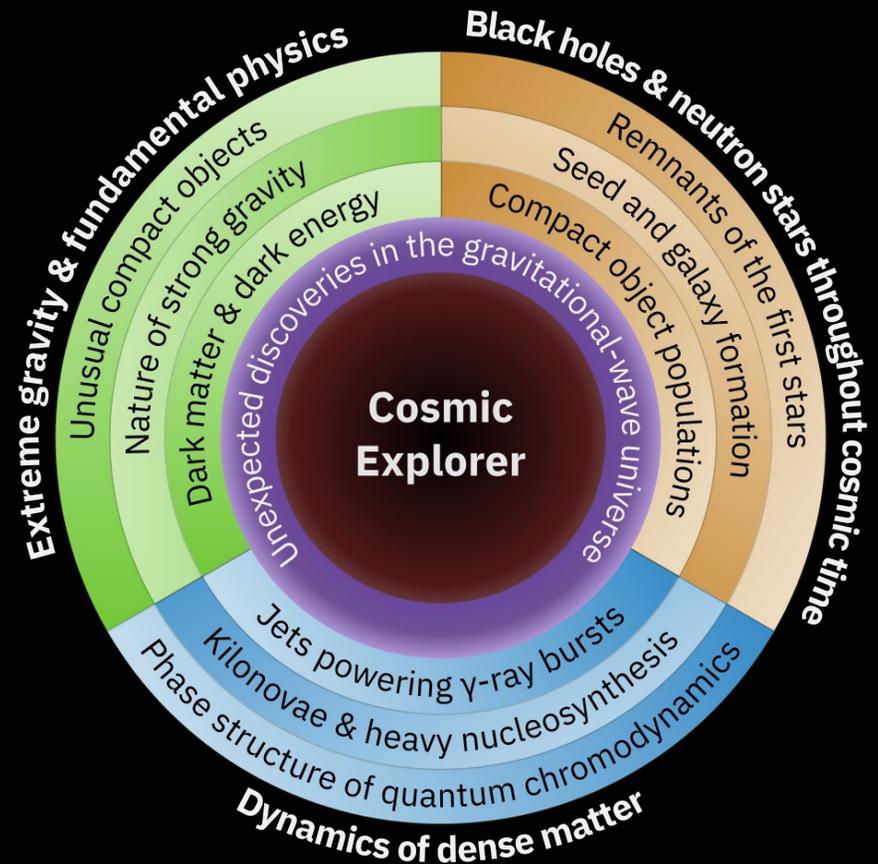
La limite des possibilités de LIGO-Virgo

- Etudes sont bien avancées pour extraire le maximum possible sur 3-4 km
- 'Post-O5' détecteurs pourraient livrer encore un facteur 2 en portée
- Servent aussi de prototype pour les détecteurs de la prochaine génération



Futur plus lointain: que pourrions-nous faire avec des détecteurs GW 10 fois plus sensibles?

- Une plus grande sensibilité permettra une croissance énorme du nombre de sources observées (10x sensibilité: 90 sources connues → quelques 10^5 par an)
- La sensibilité augmente également la résolution des formes d'ondes, permettant des tests plus rigoureux de GR et des modèles plus détaillés des coalescences
- La localisation des sources s'améliore, pour aider l'astrophysique multi-messenger
- Une meilleure sensibilité autour de 1-3 kHz peut dévoiler la coalescence des étoiles à neutrons et donc la dynamique de la matière dense



Comment construire un tel détecteur 10 fois meilleur?

- Le rendre plus long –
3 fois plus long → signal 3 fois plus grand
- Le mettre dans un endroit plus calme
- Améliorer la résolution optique

Tous les bruits optiques s'améliorent avec des bras d'interféromètres plus longs

Shot Noise
while maintaining bandwidth

$$\frac{h_{\text{shot}}}{h_{0\text{shot}}} = \sqrt{\frac{2 \text{ MW}}{P_{\text{arm}}}} \sqrt{\frac{\lambda}{1.5 \mu\text{m}}} \left(\frac{3}{r_{\text{sqz}}}\right) \sqrt{\frac{40 \text{ km}}{L_{\text{arm}}}}$$

Radiation Pressure Noise
while maintaining bandwidth

$$\frac{h_{\text{RPN}}}{h_{0\text{RPN}}} = \sqrt{\frac{P_{\text{arm}}}{2 \text{ MW}}} \sqrt{\frac{1.5 \mu\text{m}}{\lambda}} \left(\frac{3}{r_{\text{sqz}}}\right) \left(\frac{320 \text{ kg}}{m_{\text{TM}}}\right) \left(\frac{40 \text{ km}}{L_{\text{arm}}}\right)^{3/2},$$

Coating Thermal Noise
loss angle dependence

$$\frac{h_{\text{CTN}}}{h_{0\text{CTN}}} = \sqrt{\frac{T}{123 \text{ K}}} \sqrt{\frac{\phi_{\text{eff}}(T)}{5 \times 10^{-5}}} \left(\frac{40 \text{ km}}{L_{\text{arm}}}\right)^{3/2}$$

Residual Gas Noise
facility limit

$$\frac{h_{\text{gas}}}{h_{0\text{gas}}} = \sqrt{\frac{p_{\text{gas}}}{4 \times 10^{-7} \text{ Pa}}} \sqrt{\frac{40 \text{ km}}{L_{\text{arm}}^{3/2}}}$$

Le bruit dû aux forces stochastiques est indépendant de la longueur des bras

- Bruit sismique; couplage acoustique
- Fluctuations de gravité newtonienne
- Mouvement dû aux bruits thermiques (pendule, substrat, coating)
- Forces dynamiques magnétiques et électrostatiques
- ...donc, on n'est pas punis pour avoir fait les bras plus longs.

La prochaine génération des détecteurs GW:

Cosmic Explorer
Einstein Telescope

COSMIC EXPLORER

Astro 2020
Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics

The National Academies of SCIENCES ENGINEERING MEDICINE



Image: Eddie Anaya (Cal State Fullerton)

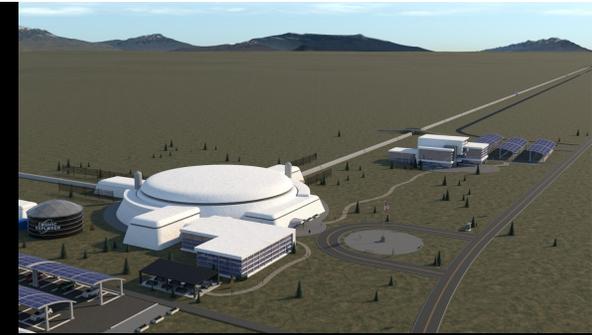


cosmicexplorer.org

- Contribution des États-Unis au réseau des observatoires de la prochaine génération
- Concept de type LIGO pour un seul interféromètre par site, sur la surface de la Terre
- Pour la technologie du détecteur, CE est à la base une version plus grande de LIGO

CE Infrastructure

- On 'achète' de la sensibilité avec les bras très longs et une large bande de sensibilité avec deux sites
 - 20 km est idéal pour observer la phase finale de coalescence d'étoiles à neutrons à ~ 2 kHz
 - 40 km est optimisé pour l'observation de tous les trous noirs binaires dans l'univers
- 2 Sites CE séparés par plusieurs milliers de km; observations communes avec ET
- On travaille sur des systèmes à vide moins chers (dominant le coût)
- Un seul détecteur interférométrique par site
- Des sites géographiquement appropriés peuvent être trouvés aux États-Unis (et au Canada, en Australie...)
- Construction sur la surface de la Terre
 - Avantages: moins cher et moins complexe que les travaux souterrains
 - Modifications futures de la disposition de l'interféromètre plus faciles
 - Désavantages: couplage avec bruit "sismique" de surface
 - Bruit de fond newtonien limite la sensibilité aux basses fréquences



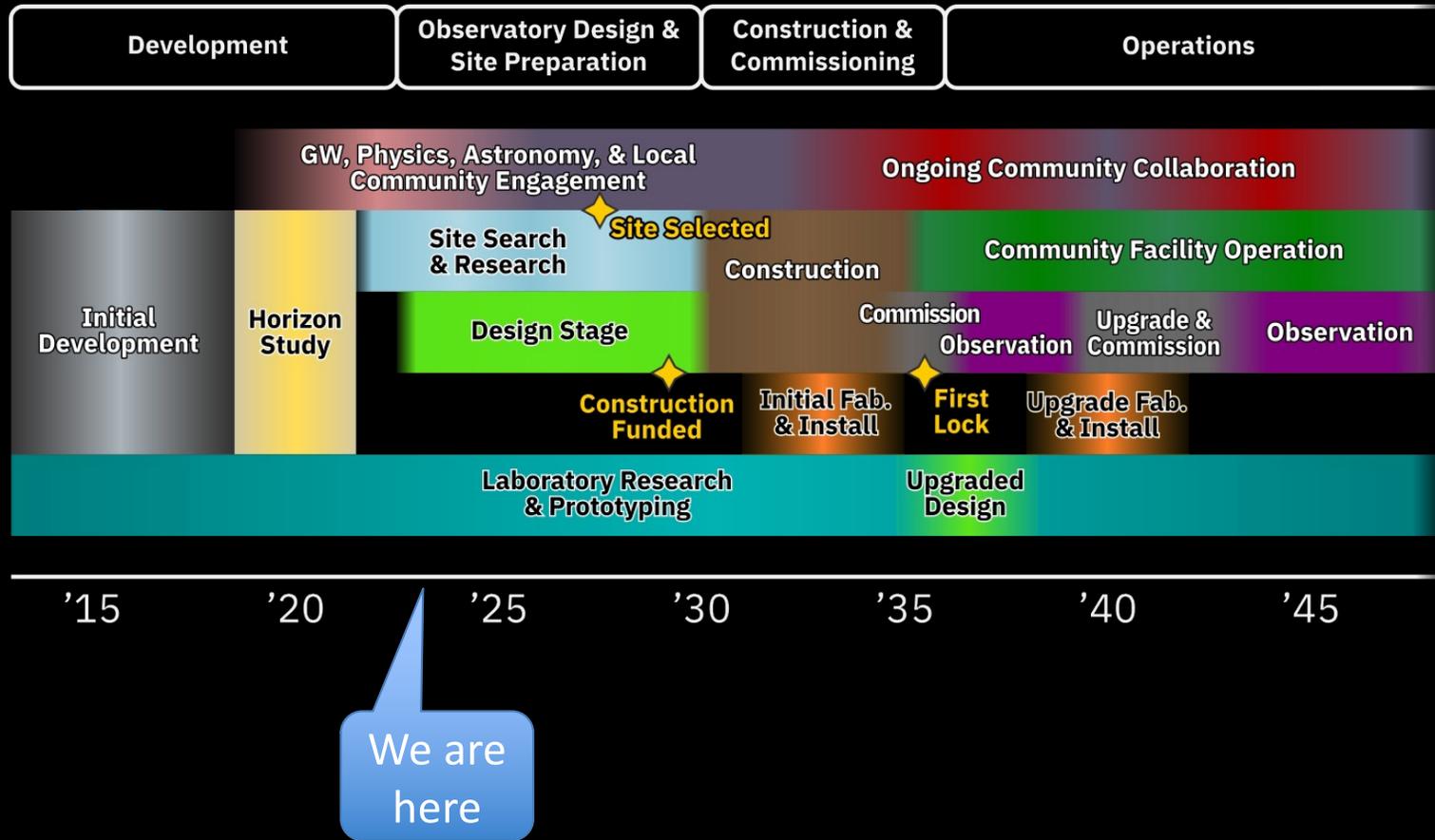
CE Detector Design

- Les détecteurs CE initiaux utiliseront toutes les techniques de « LIGO Post-O5 »
 - Température ambiante, lumière de 1 micron, optiques en silice, frequency dependent squeezing
 - Coatings optiques amorphes ou bien cristallins – grande question!
- On essaie de minimiser les développements techniques exigés
 - Exceptions: R&D sur des optiques plus grandes (~50cm plutôt que 34cm), des optiques à faible perte, des suspensions pour des miroirs de 320 kg plutôt que 40 kg)...

CE Status

- Le « Conceptual Design » est maintenant en cours
 - 7 proposals soumis à National Science Foundation (NSF) en Novembre pour les aspects variés de R&D
 - Contributions internationales (en idées et matériels) –
 - Royaume-Uni, Canada, Allemagne, Australie actuellement
- Financement de la « phase de construction » de CE
 - Estimation: 2×10^9 \$ pour la solution de deux détecteurs, 20km + 40km
 - Prévoit NSF comme source primaire de fonds
 - Autres: Department of Energy (DOE), financement privé, collaboration internationale

Chronologie de Cosmic Explorer



Einstein Telescope (ET)

ET EINSTEIN TELESCOPE

← ≥ 10km →

Salles à une profondeur d'environ 200m

ET a lancé l'idée d'un observatoire GW de troisième génération :

- Une nouvelle infrastructure capable de recevoir des upgrades pendant des décennies
- Une sensibilité au moins 10 fois meilleure que les détecteurs d'aujourd'hui

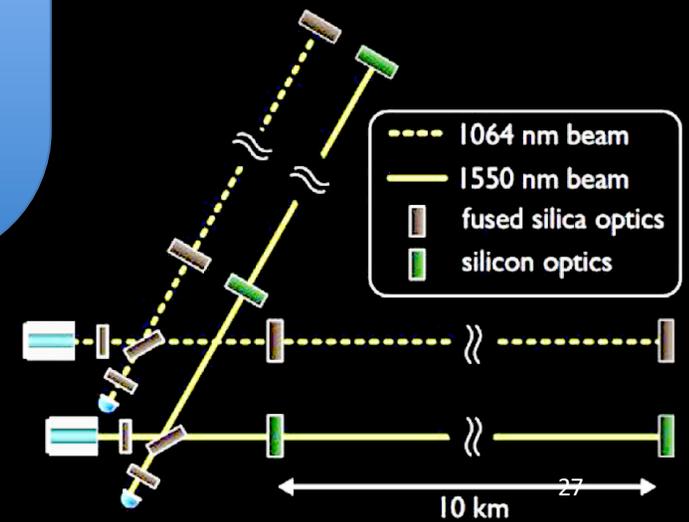
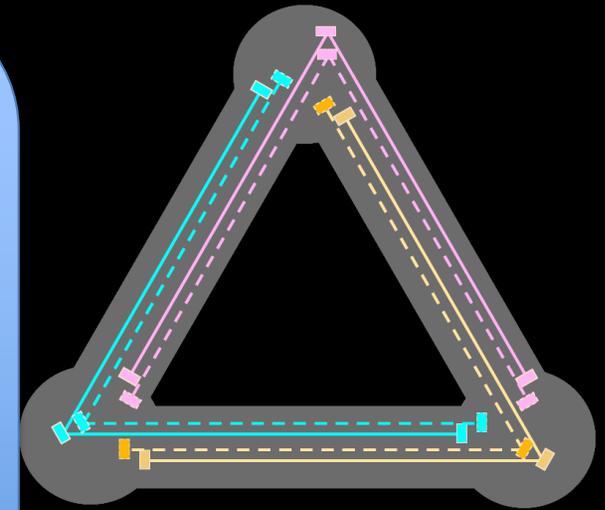
Éléments clés d'Einstein Telescope

Exigences

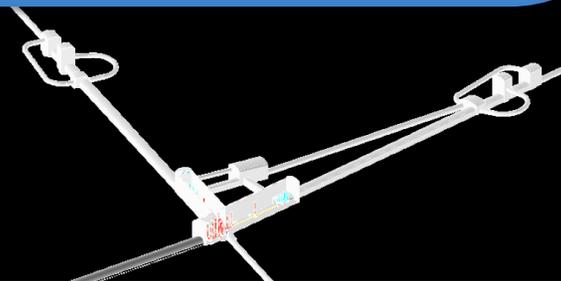
- Large gamme de fréquences
- Trous noirs massifs → sensibilité basses fréquences
- Capacité de localisation
- Couverture uniforme du ciel
- Détermination de polarisation
- Haute fiabilité, disponibilité
- Rapport signal/bruit élevé

Spécifications

- Concept de multi-interféromètre, haute/basse fréquence
- Souterrain (bruit sismique)
- Cryogénique (bruit thermique)
- Forme triangulaire → Concept multi-détecteurs
- Bras 10km de longueur



ET EINSTEIN
TELESCOPE



Sites possibles pour ET

- Il existe actuellement deux sites, en Europe, candidats pour héberger ET:
 - Le site de Sardaigne, à proximité de la mine de Sos Enattos
 - Le site Meuse-Rhine Euroregion, près de la frontière NL-B-D
- Une troisième option en Saxe (Allemagne) se développe rapidement
- Les sites sont étudiés:
 - mesures de bruit sismique en surface, et dans la mine (Sardaigne)
 - Mesures des bruits magnétiques et ambiants
 - Caractérisations géophysiques et géotechniques

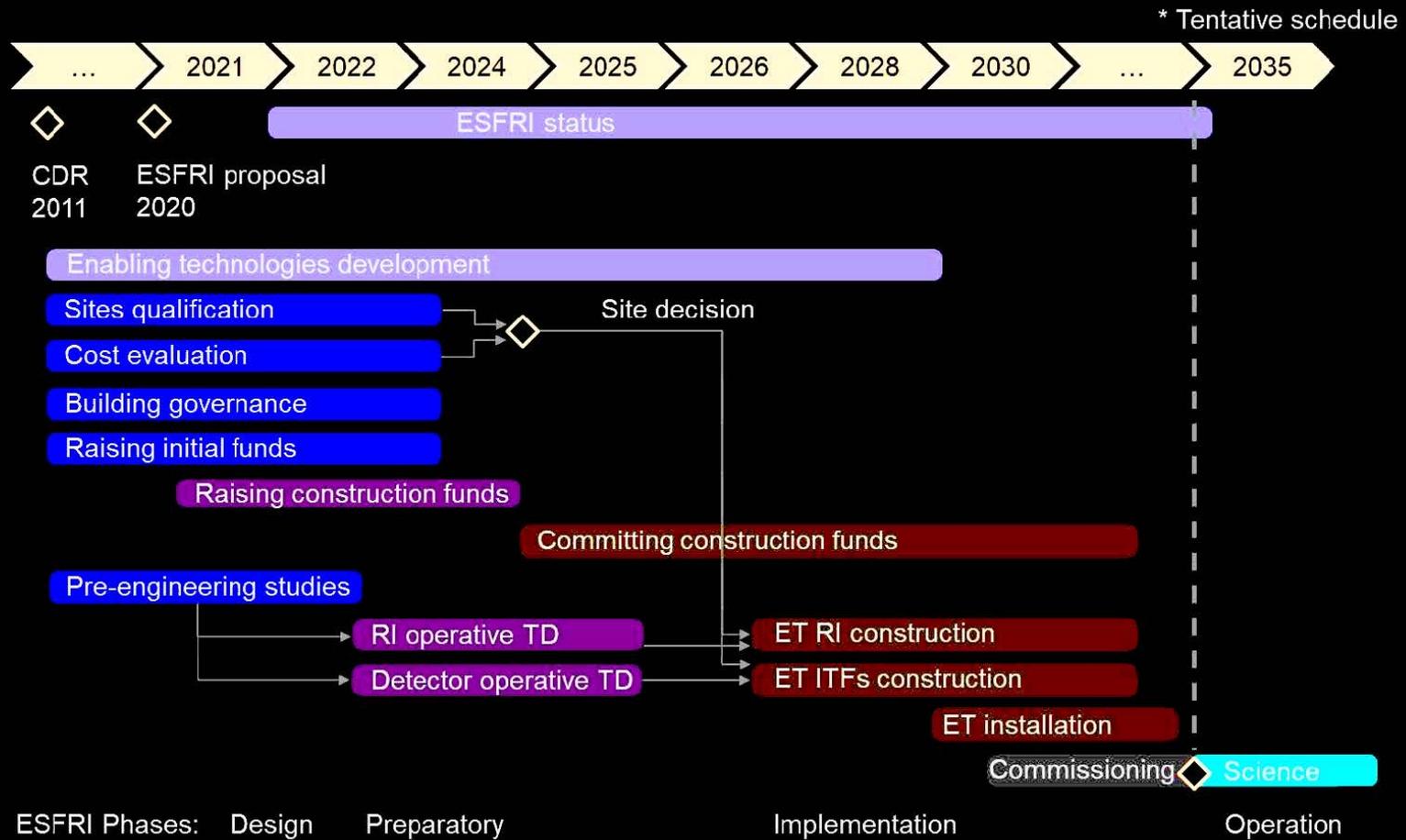


ET Status

- Le « Conceptual Design » est bien développé
- Mis sur le ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) Roadmap en 2021
 - Italie (Lead); Belgique, Pays Bas, Pologne, Espagne participants
- Très actif R&D partout en Europe et UK
- Soutien financier maintenant pour R&D et caractérisation des sites
- Promesses pour l'avenir, depuis l'Italie et les Pays Bas, pour l'infrastructure
- Budget total $\sim 2 \times 10^9$ €



Chronologie ET



- L'observation GW par interférométrie marche, très bien merci!
- Il y a encore beaucoup de sources à observer
- Les « scaling laws » montrent la faisabilité technique de meilleurs détecteurs
- Le télescope Einstein est fortement et largement soutenu en Europe
 - Programme de R&D très actif, choix de site en cours
- Lancement du « proposal » pour Cosmic Explorer aux États-Unis
 - Démarrage d'une étude de « conceptual design »

**Bonnes perspectives pour un réseau
d'une nouvelle génération d'observatoires en mi-2030**

Thank you!

Portée des détecteurs GW de nouvelle génération

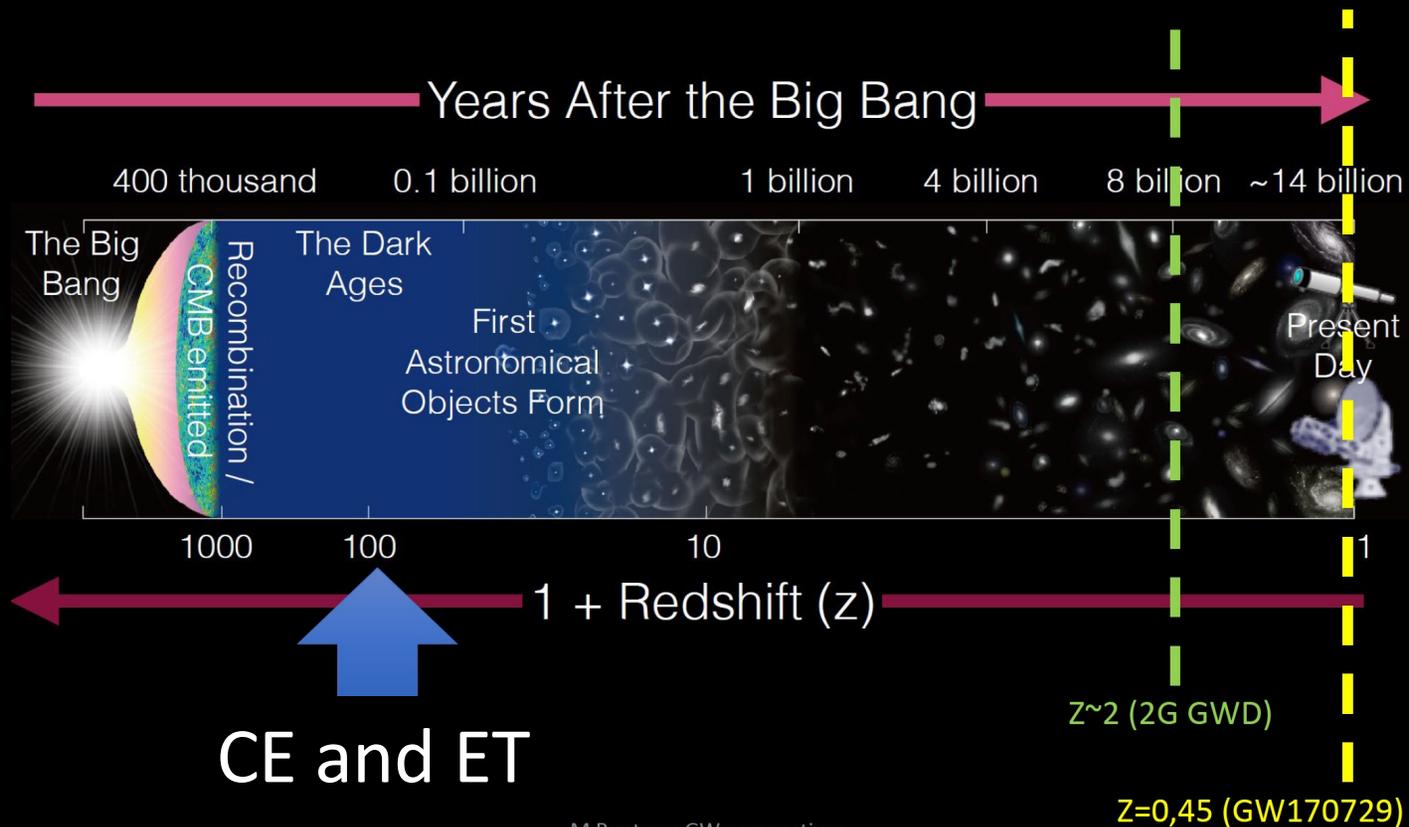
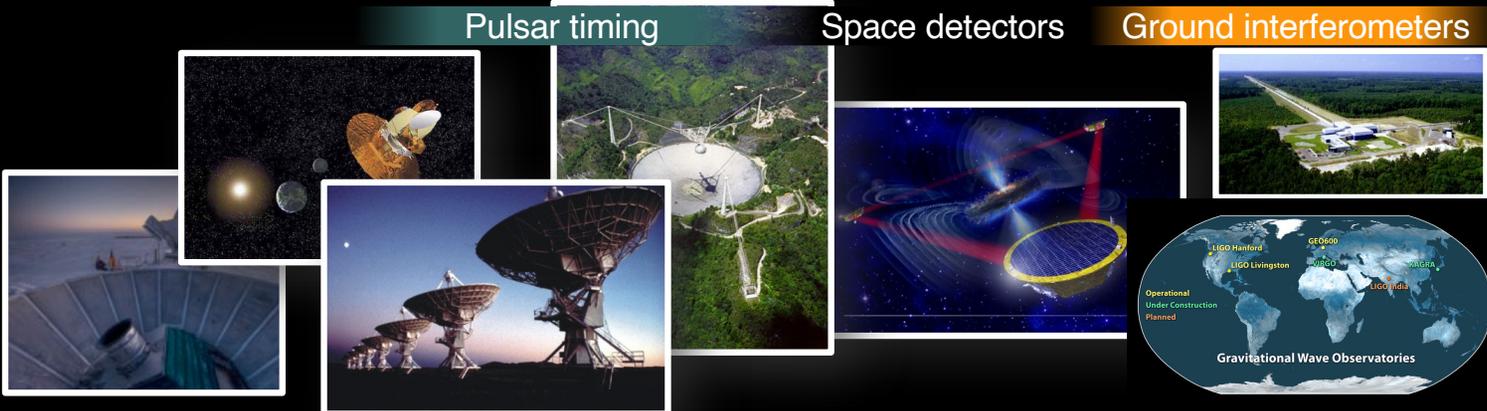
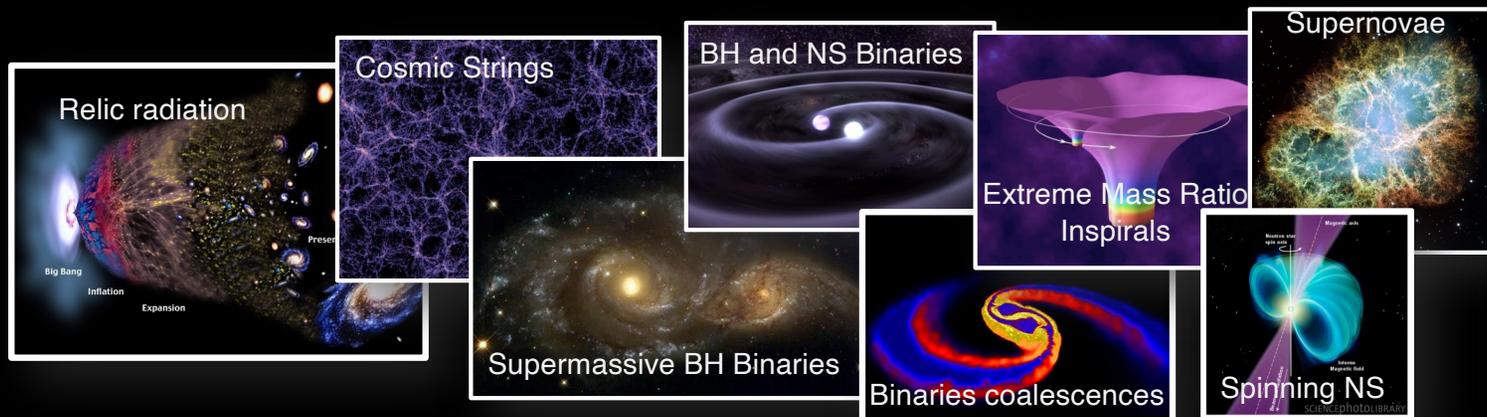


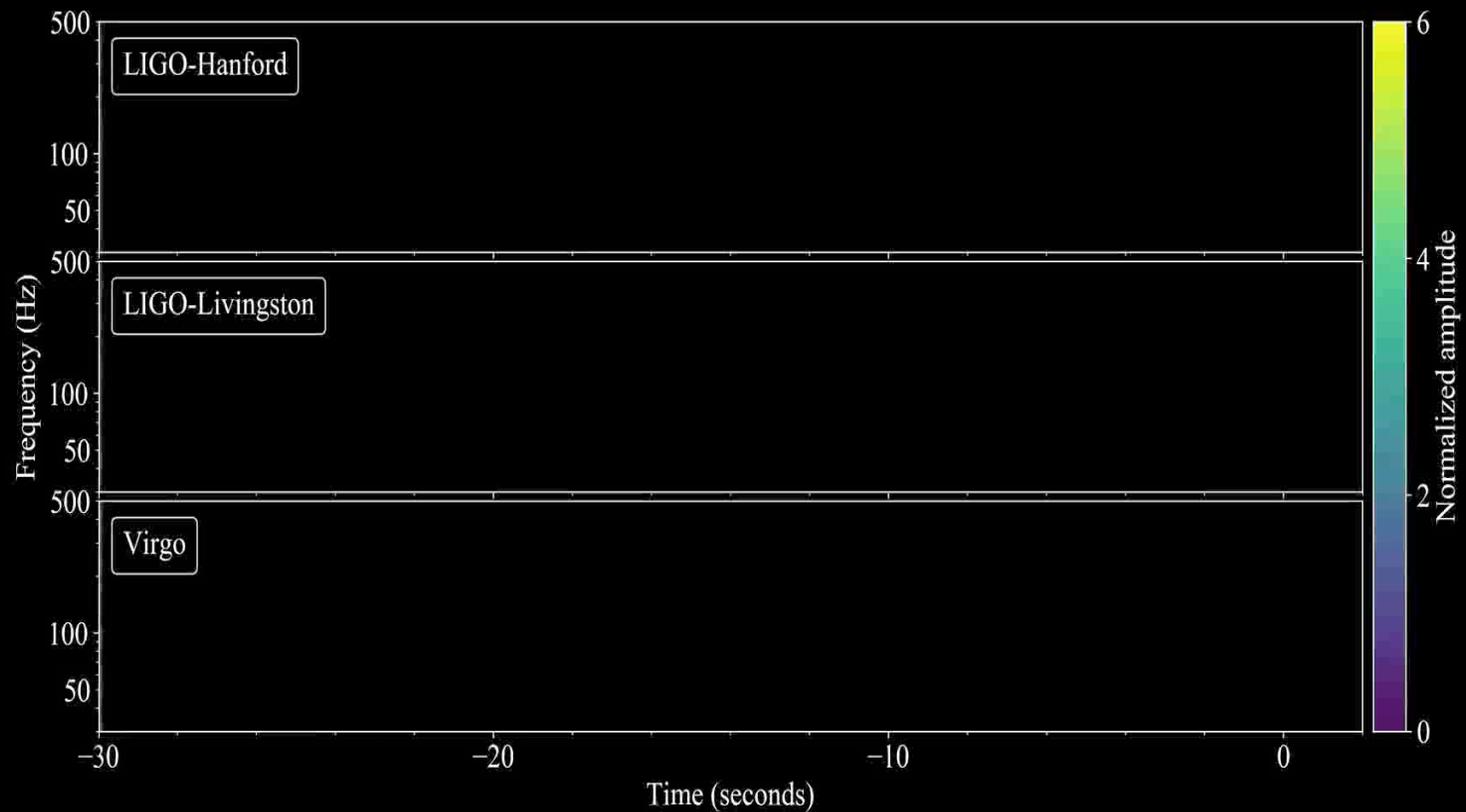
Image credit: NAOJ/ALMA <http://alma.mtk.nao.ac.jp/>

M.Punturo: GW perspectives

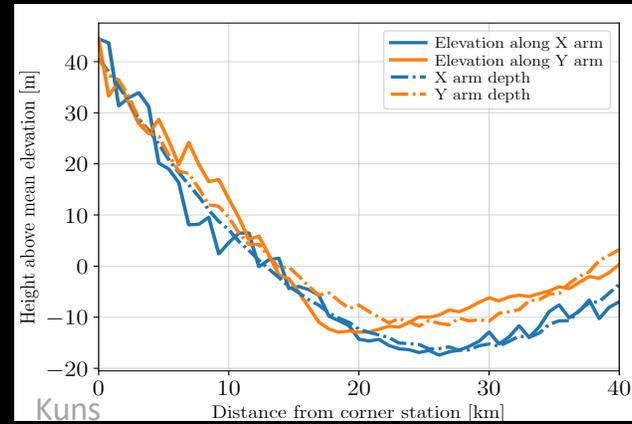
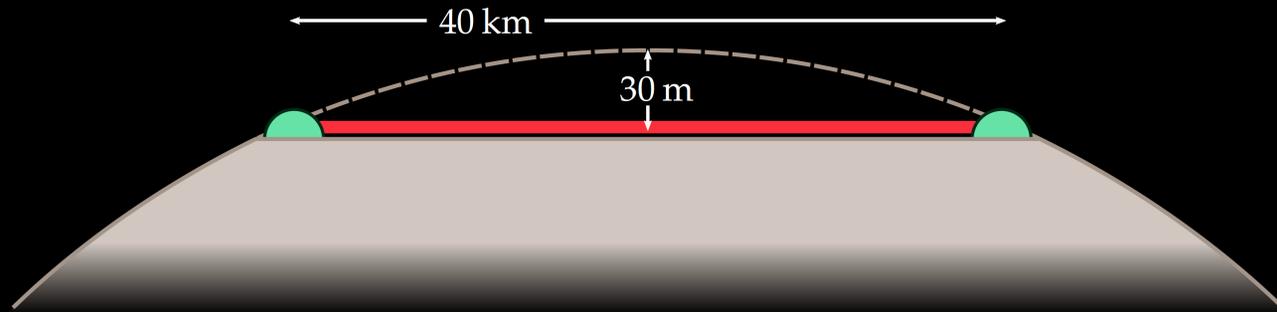
The Gravitational Wave Spectrum



The binary neutron star signal, with and without the interferometer noise



40km CE



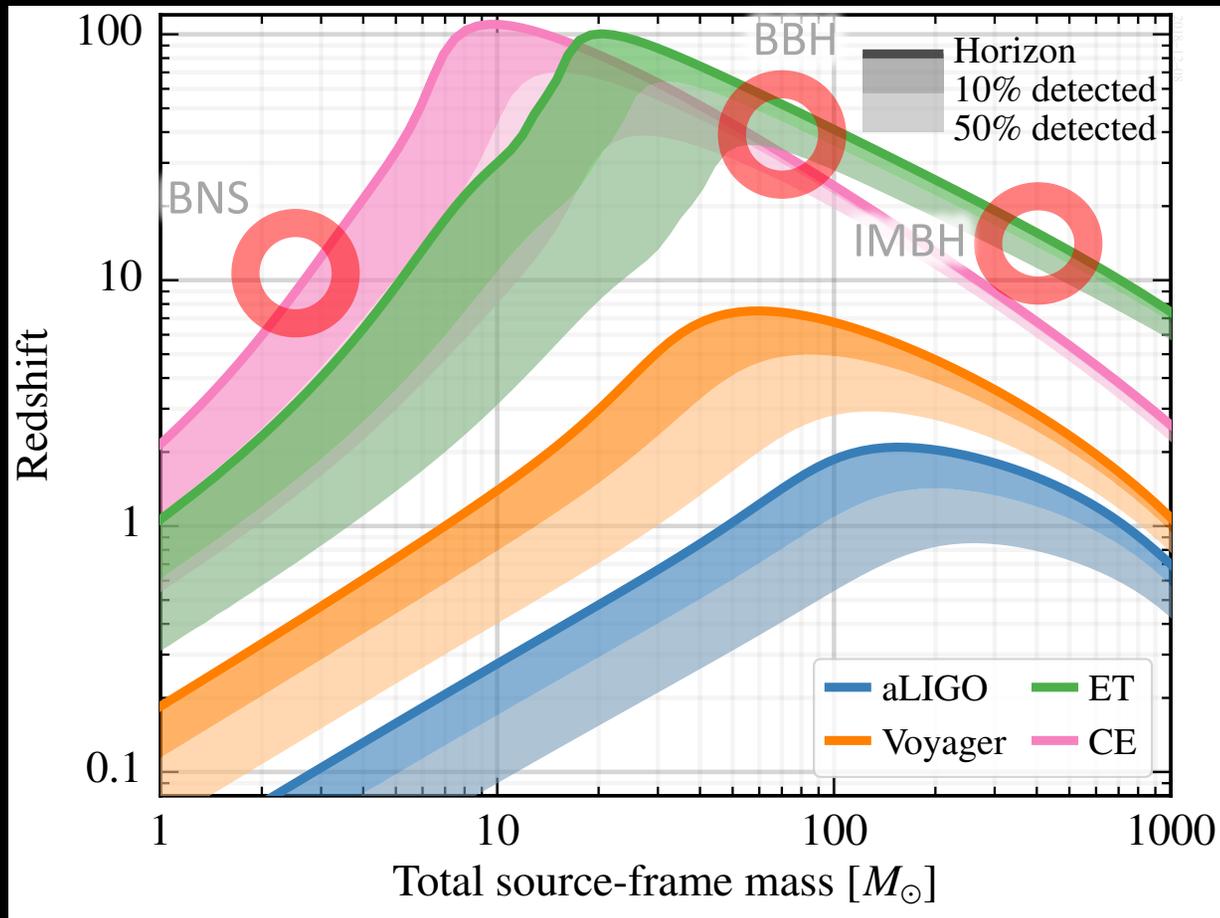
Why 40km?

- Broadly speaking, the sensitivity of these instruments improves with length
- The bandwidth is, however, limited to roughly

$$\frac{c}{2L} = \frac{3 \times 10^5 \frac{km}{s}}{2 \times 40 km} \simeq 4 kHz$$

so making a detector longer than 40km would compromise its access to interesting astrophysics (i.e., post-merger signals and supernovae).

What can CE do?

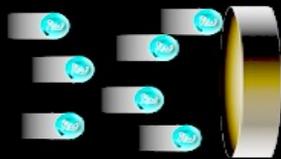


Resolution of the optical sensing

- **Shot noise** – ability to resolve a fringe shift due to a GW (counting statistics; *A. Einstein, 1909*)

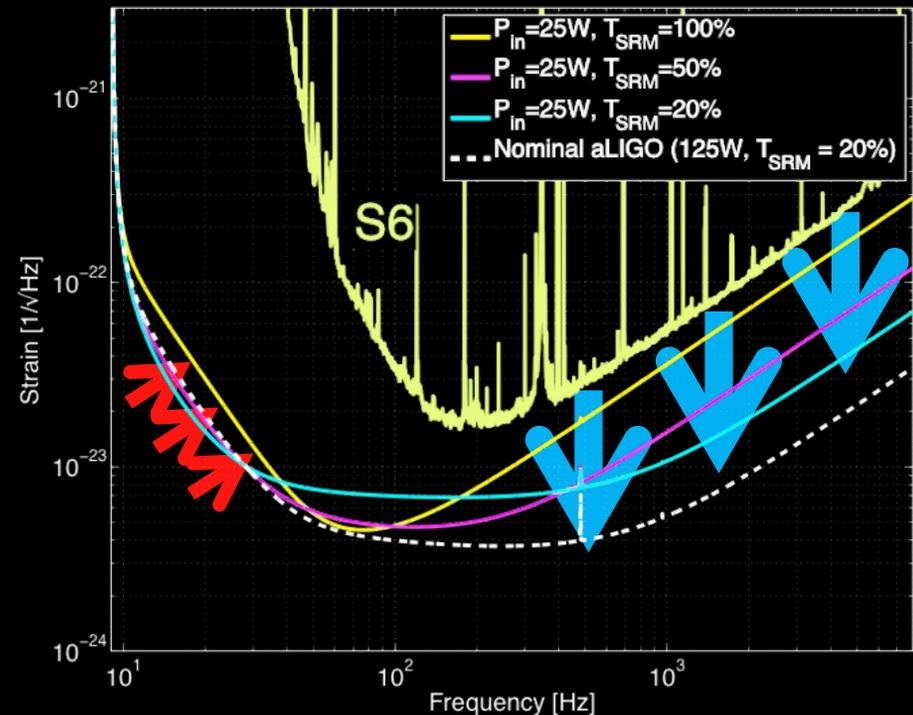
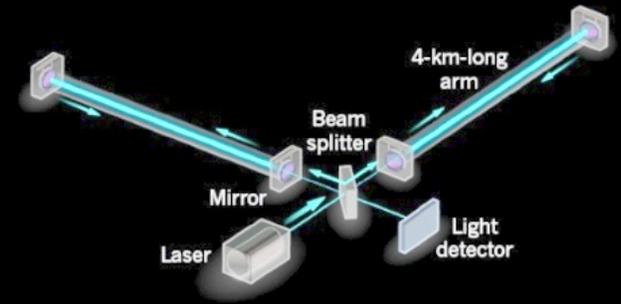
$$h_{\text{sn}}(f) = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{2\pi P}}$$

- **Radiation Pressure noise** – buffeting of test mass by photons increases low-frequency noise – use heavy test masses!

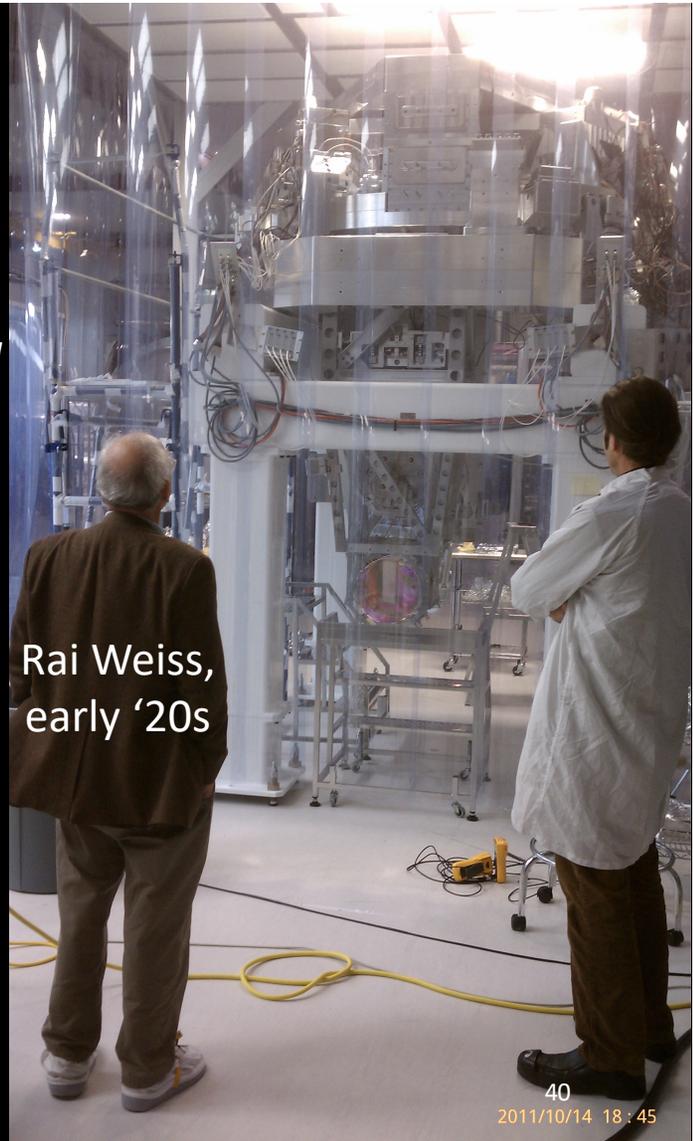
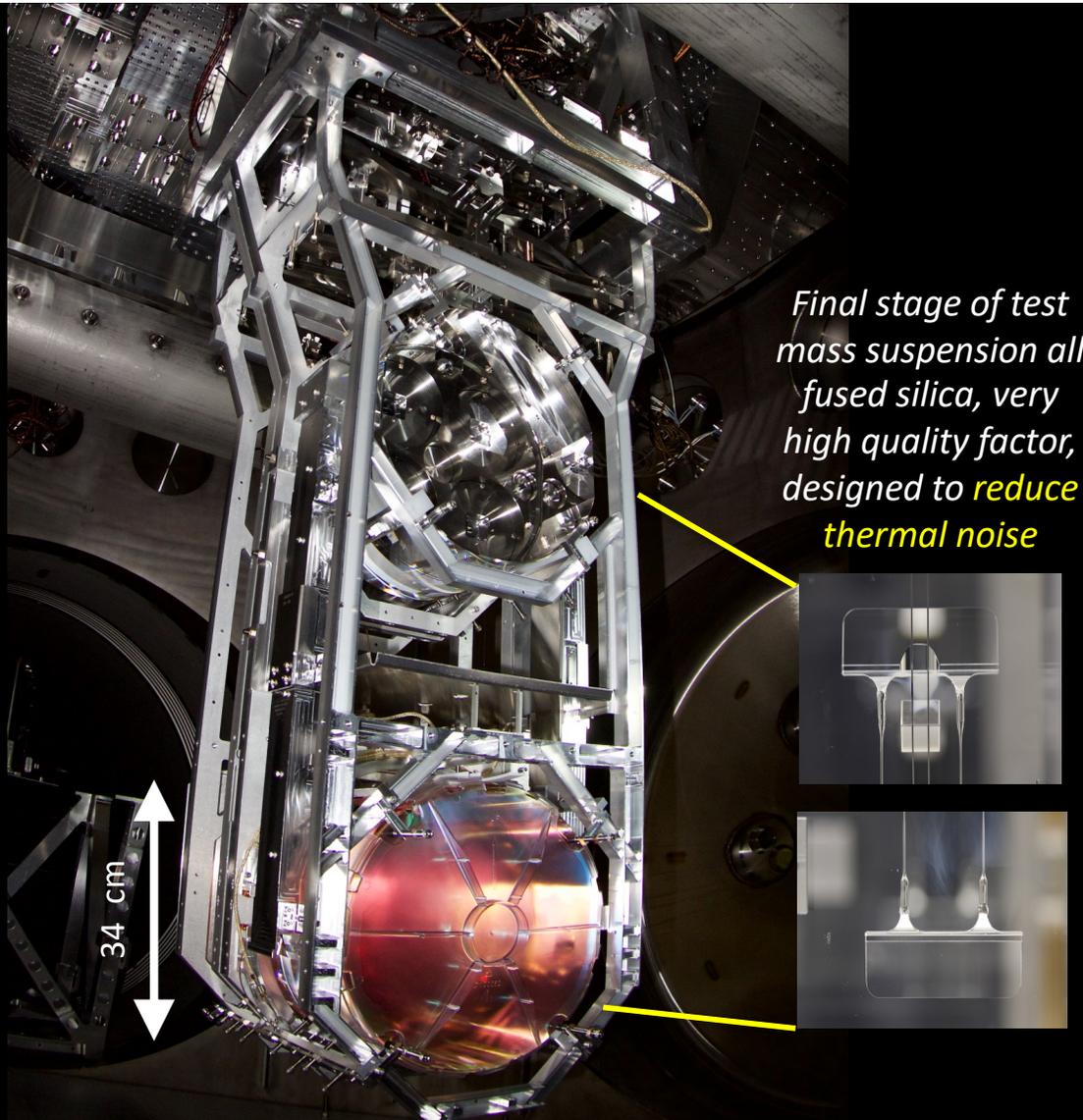


$$h_{\text{rp}}(f) = \frac{1}{m f^2 L} \sqrt{\frac{\hbar P}{2\pi^3 c \lambda}}$$

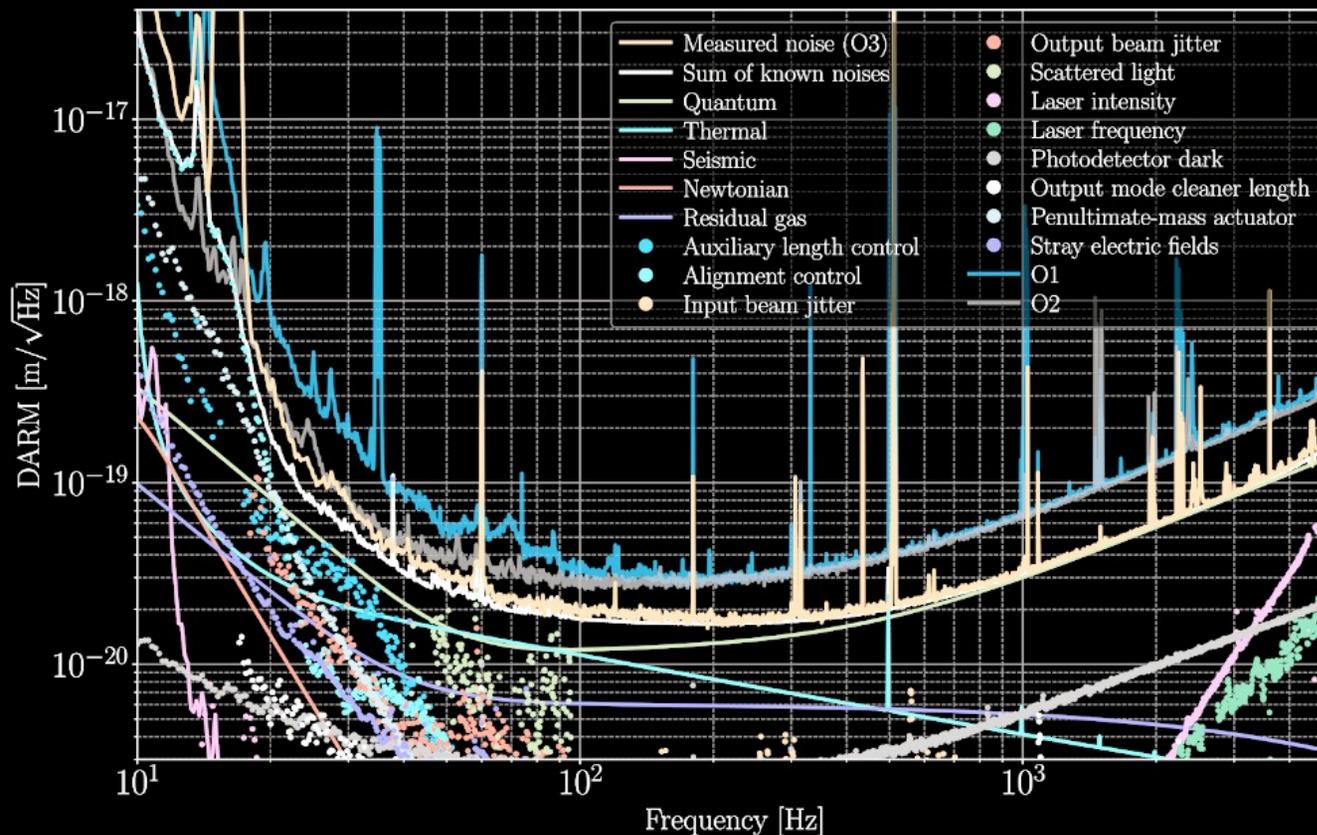
- **'Standard Quantum Limit'**



Test Mass Suspension



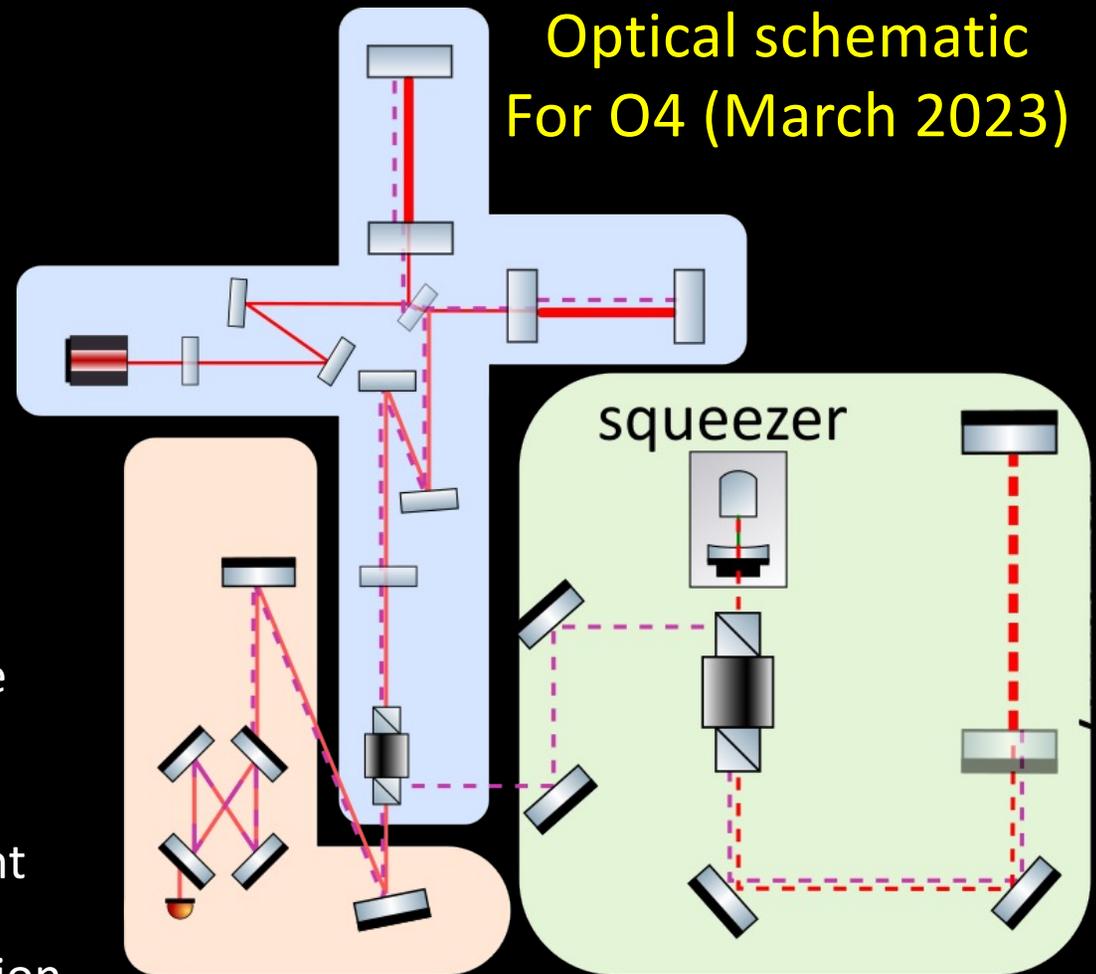
Lowest displacement noise to date (LIGO detector, O3, 2019–2020)



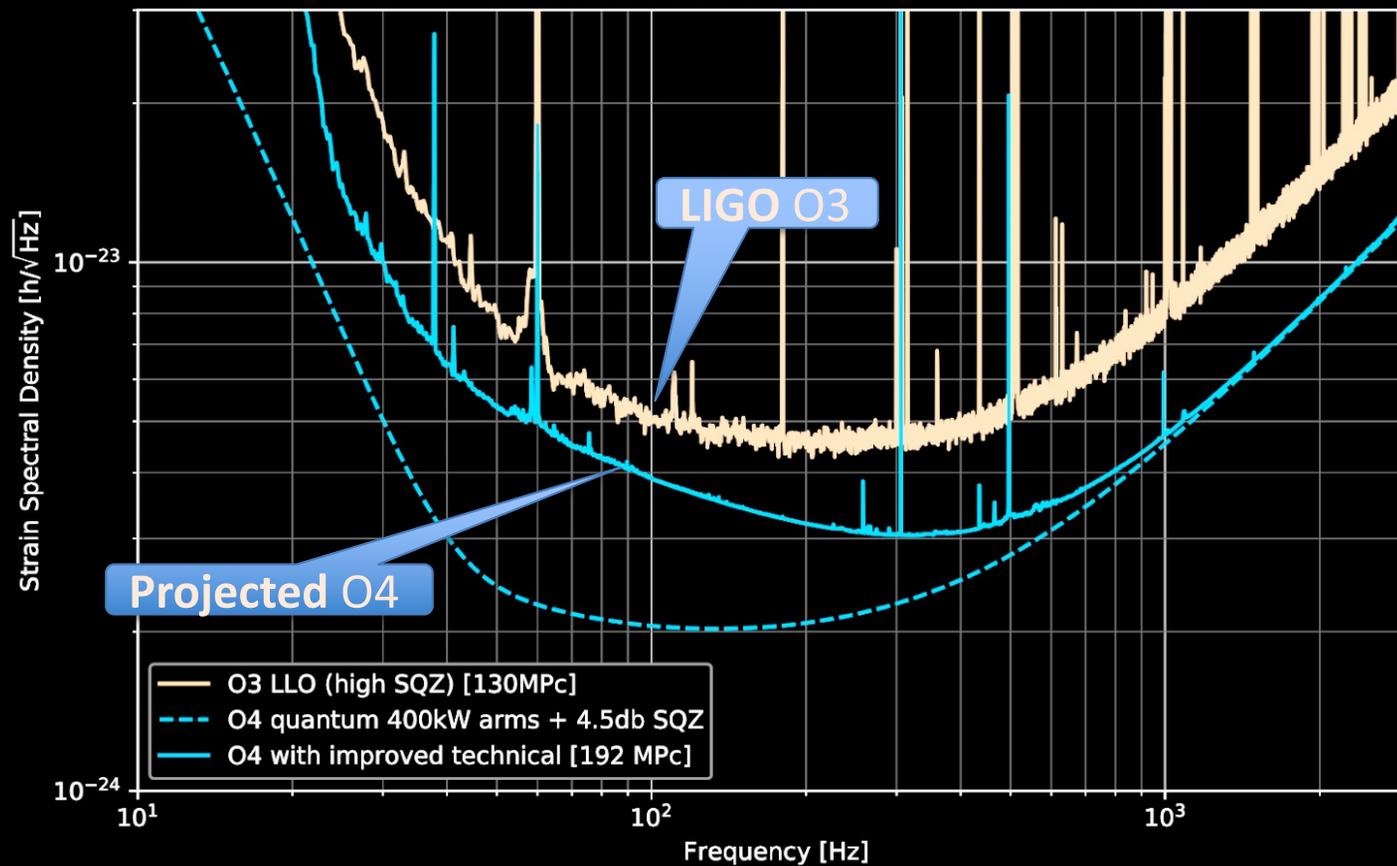
Sensitivity and performance of the Advanced LIGO detectors in the third observing run
A. Buikema *et al.* Phys. Rev. D 102, 062003

Squeezing

- Heisenberg Uncertainty Principle dictates that precise values of phase, and amplitude, of light cannot be known at the same time
- $\Delta X_{\text{phase}} \Delta Y_{\text{amp}} \leq h/2$
- We can choose however to e.g., know the amplitude less well and look more closely at the phase
- 'Squeezed light' used in O3 to reduce shot noise at the expense of more radiation pressure noise
- For O4, adding 'Frequency Dependent Squeezing' to reduce high-frequency shot noise, and low-frequency radiation pressure noise

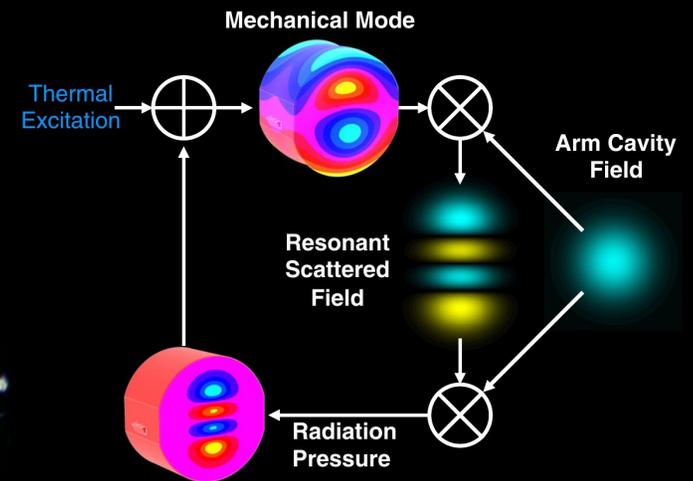
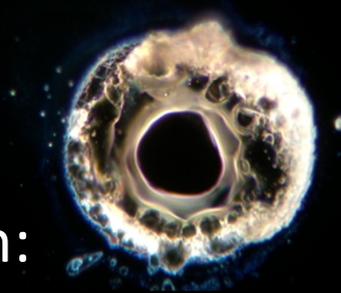


O4 projected sensitivity (mid-2023)



Noise improvements: reducing quantum noise

- Increasing the laser power in the arms
O1,O2 (100kW) → O3 (200kW) → goal is 400 kW for O4
- Not easy!
 - You need a high power laser first..
 - Mirror radii must remain within a few meters of the ~2 kilometer nominal value
 - Control issues: angular control and parametric instabilities
 - “Point absorbers”
[Applied Optics Vol. 60, Issue 13 pp. 4047-4063 \(2021\)](#)



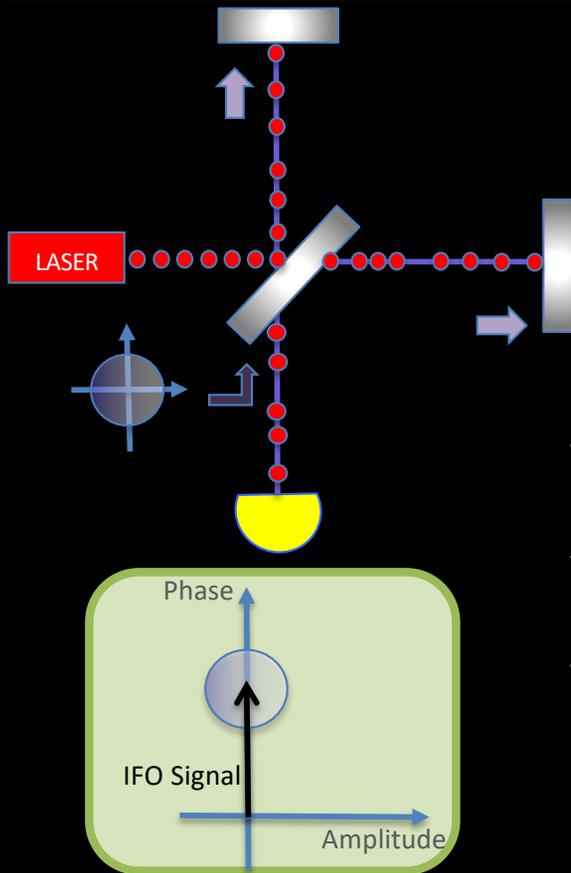
- Complementary approach:
squeezed states of vacuum

Quantum-mechanical noise in an interferometer

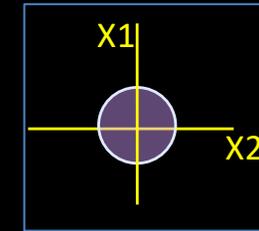
Carlton M. Caves

W. K. Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

(Received 15 August 1980)



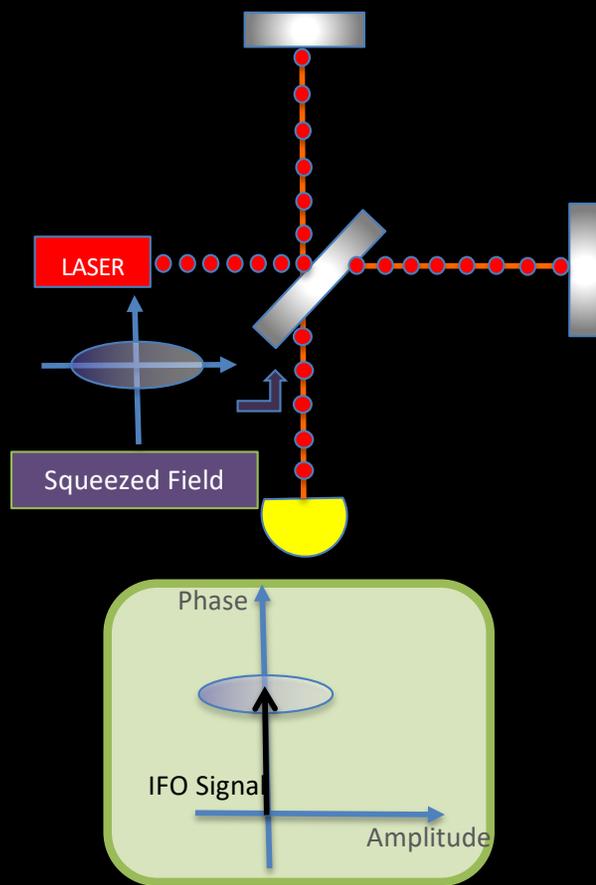
Zero-point energy
(vacuum) fluctuations



$$\Delta X_1 \Delta X_2 \geq 1$$

- ✧ When average amplitude is zero, the variance remains
- ✧ Heisenberg uncertainty principle, quadratures associated with **amplitude** and **phase**
- ✧ They enter the interferometer from all the open ports of the interferometer, but the ones which matter are the one **entering from the anti-symmetric port!**

Replace regular vacuum with squeezed vacuum

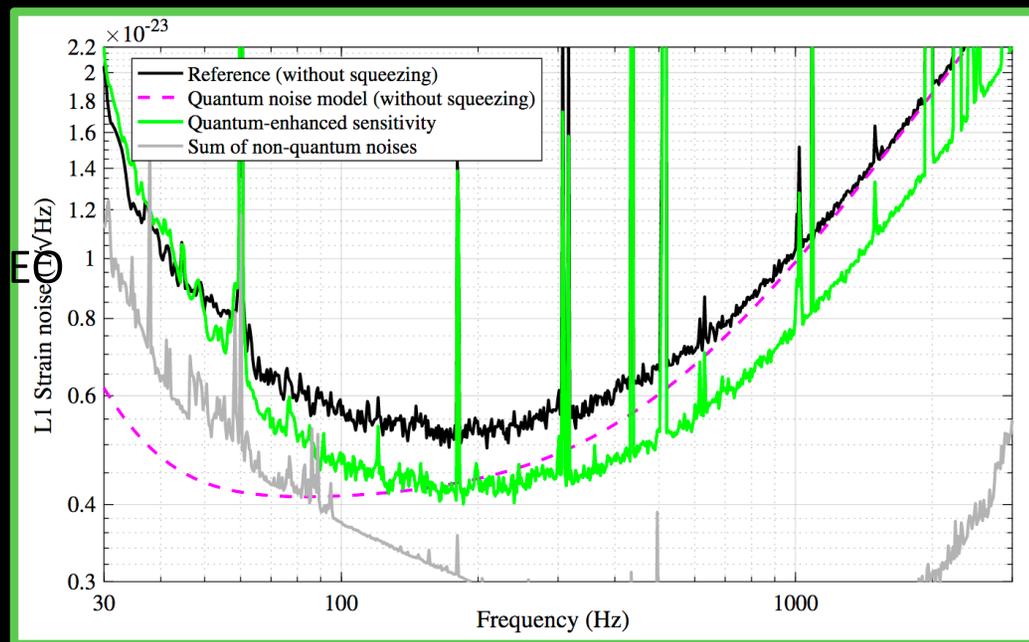


- ✧ Reduce quantum noise by injecting squeezed vacuum: less uncertainty in one of the two quadratures
- ✧ Heisenberg uncertainty principle: if the noise gets smaller in one quadrature, it gets bigger in the other one
- ✧ One can choose the relative orientation between the squeezed vacuum and the interferometer signal (squeeze angle)
- ✧ Squeezing is made by creating pairs of photons using an optical parametric oscillator
- ✧ The pairs are quantum-mechanically entangled and have correlated arrival times at the detector
- ✧ This reduces the randomness of the time distribution

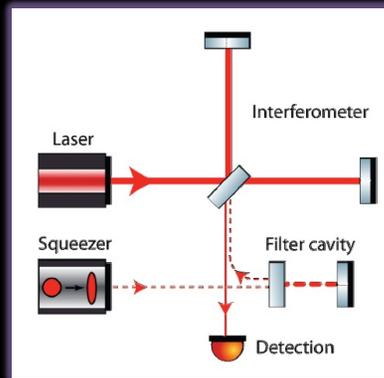
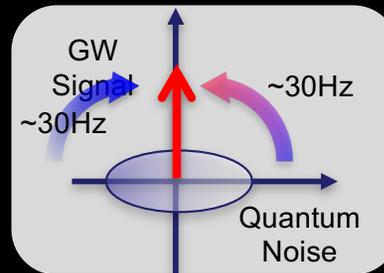
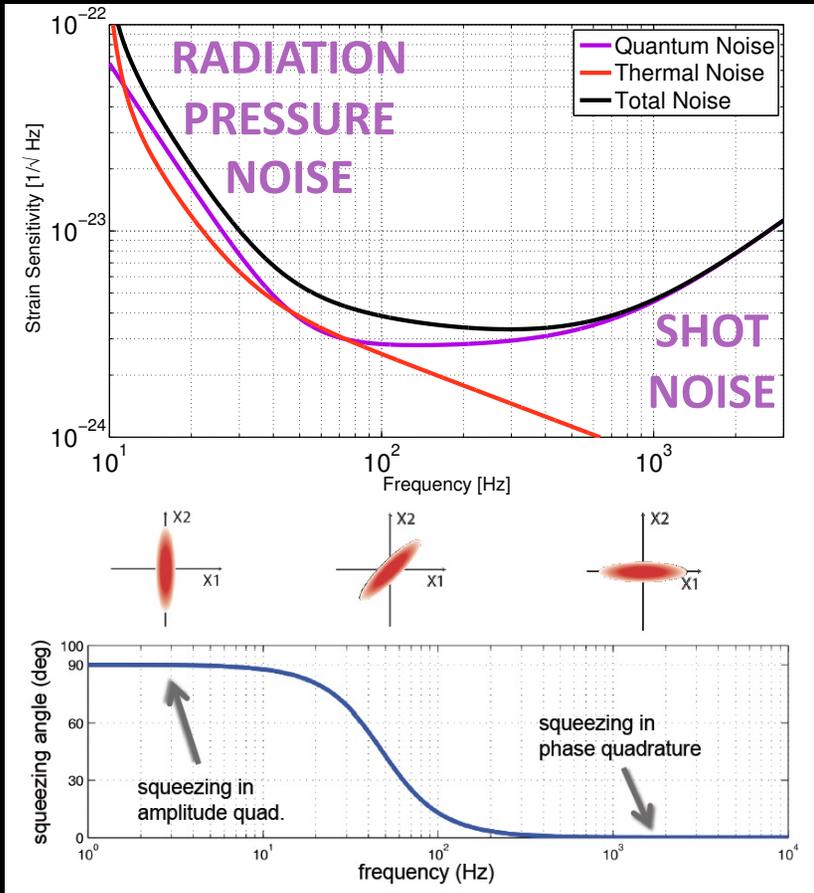
Squeezing performance in O3

[PhysRevLett.123.231107](#) *Nature* 583, pages 43–47 (2020)

3 dB of squeezing observed at high frequency = 40% quantum noise reduction (in amplitude); observation of quantum radiation pressure noise in both detectors



Frequency Dependent Squeezing for O4



High finesse detuned “filter cavity” which rotates the squeezing angle as function of frequency



Credit: Antonio Pasqualetti

Highlight from Virgo:
300 m filter cavity already built and locked and characterized, commissioning in progress 48