

**LIGO**

**COSMIC  
EXPLORER**



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

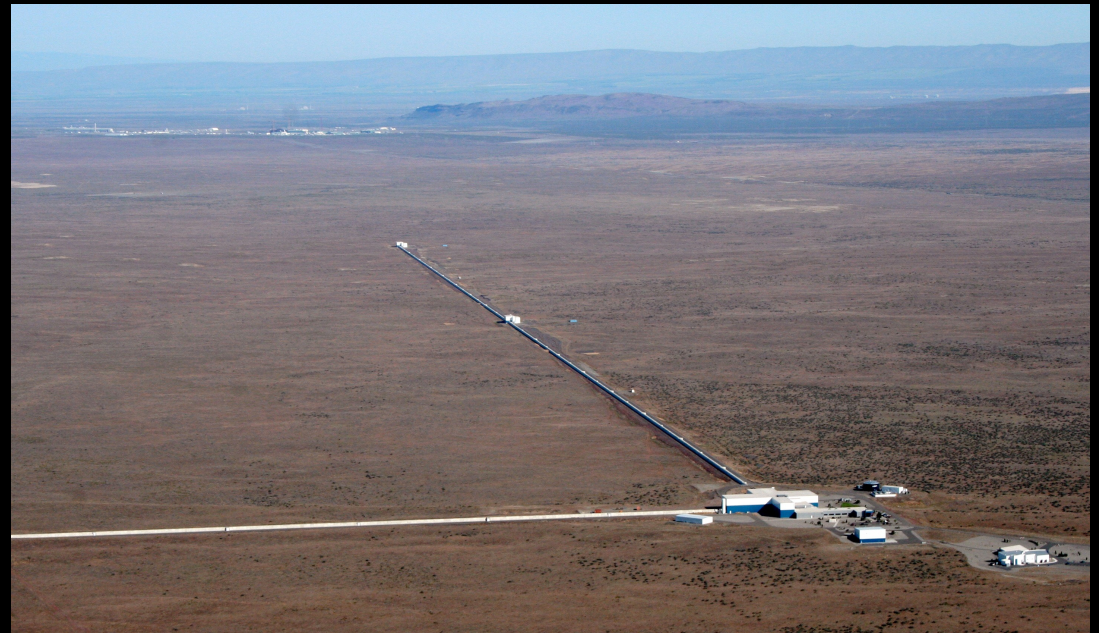
David Shoemaker

MIT Kavli Institute – LIGO Laboratory

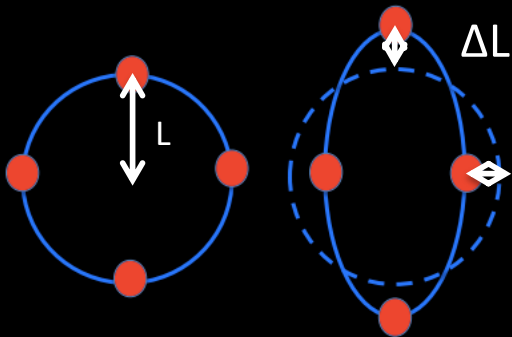
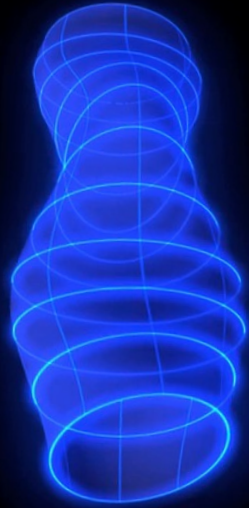
Merci aux collègues de LSC, ET et CE pour les images

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  $h = \Delta L/L$

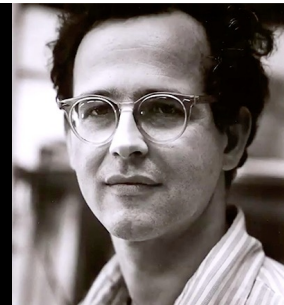
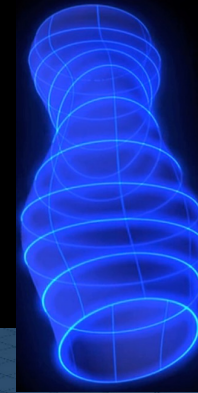
$$\Delta L = h L$$

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

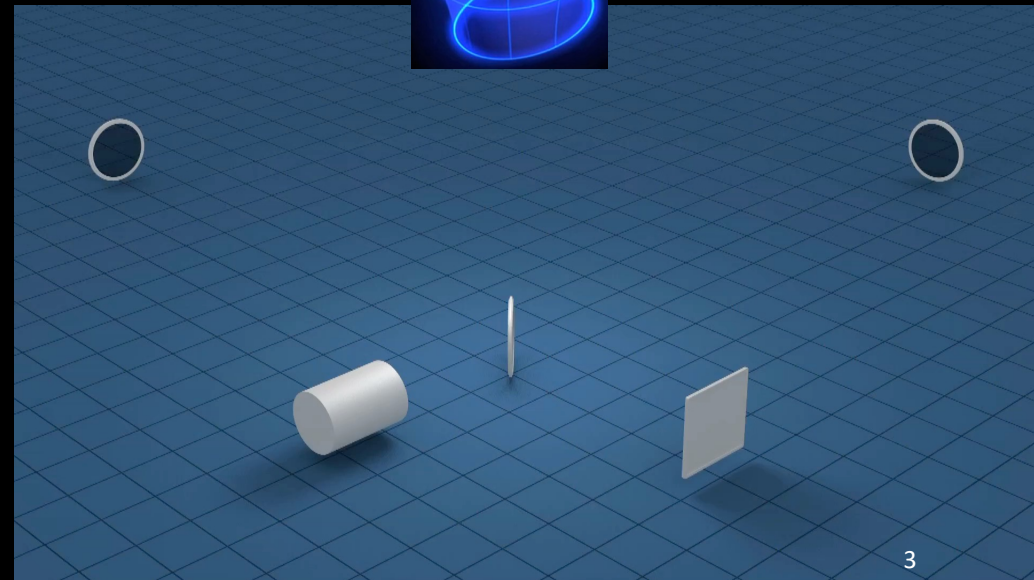
$$\sim 10^{-21} \times \sim 10^3 = \sim 10^{-18} \text{ m}$$

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

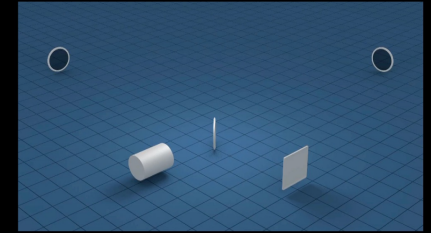
- Un transducteur de 'strain' en 'Intensité lumineuse'  
→ signal électrique
- Qu'est-ce qui détermine la sensibilité de ce détecteur ?
- Distance  $L$  sur laquelle le strain est détecté
- Résolution de la détection optique
- Forces stochastiques qui font bouger les miroirs, masquant les GW



Rai Weiss,  
'70s



# L'infrastructure pour une mise en œuvre réaliste

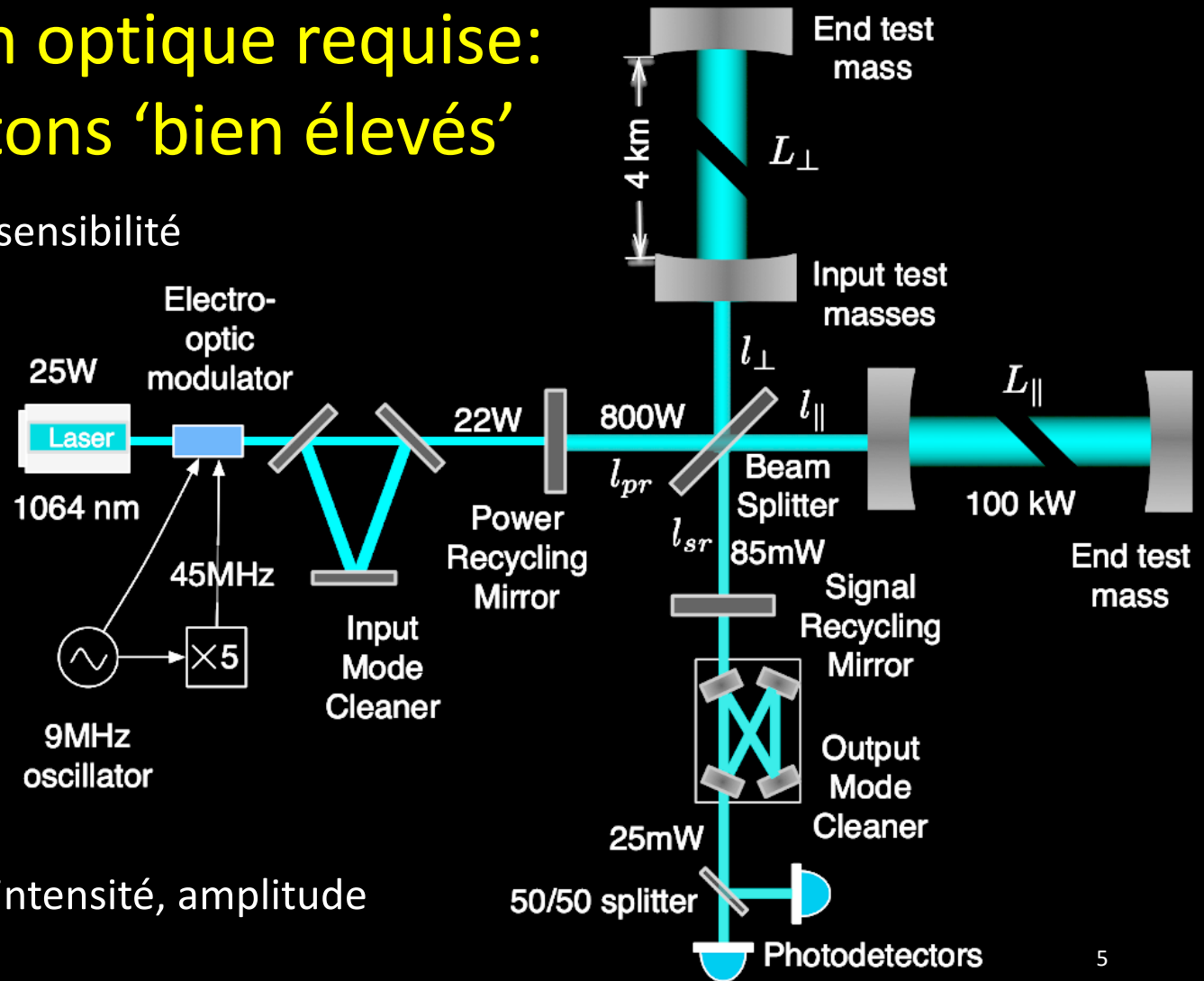


- Une longueur suffisante des bras pour amener le strain induit par GW à un niveau mesurable (actuellement 3-4 km)
- La lumière laser de détection doit voyager dans un vide excellent ( $\sim 10^{-9}$  Torr)
- Le diamètre du système de vide doit accueillir un faisceau de diffraction limitée sur 4 km ( $\sim 1$  m de diamètre;  $\sim 10\,000$  m<sup>3</sup>)
- 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 ( $\sim 10\,000$  m<sup>2</sup>)



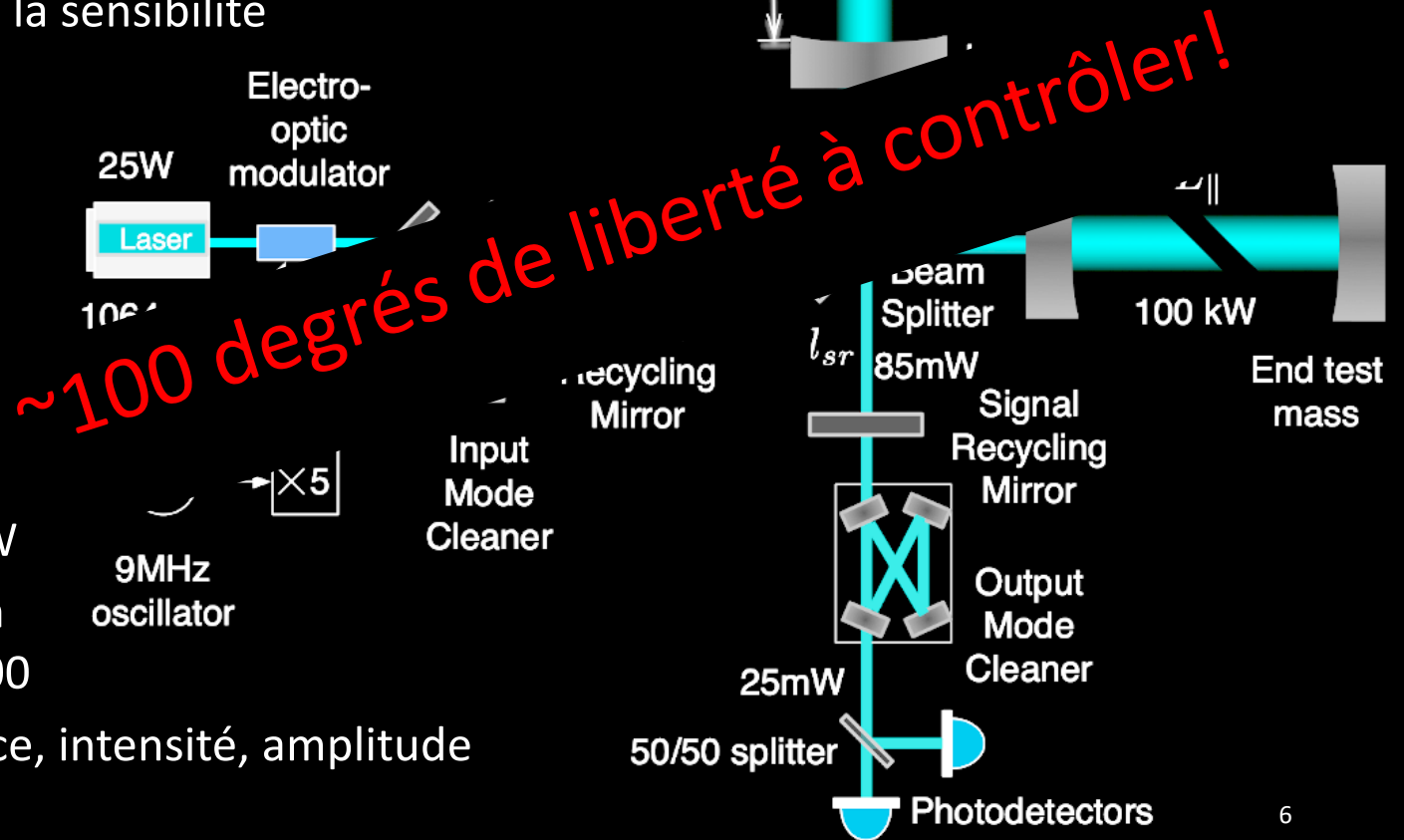
# Obtenir la précision optique requise: beaucoup de photons 'bien élevés'

- 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



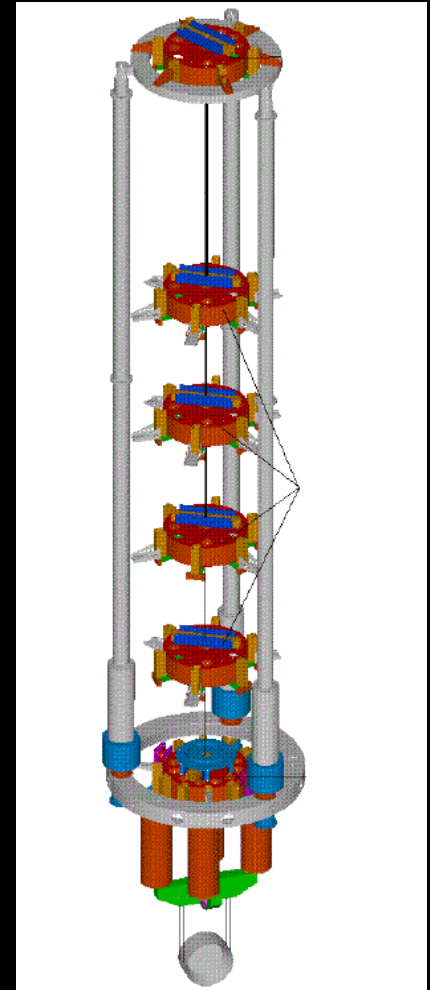
# Obtenir la précision optique requise: beaucoup de photons 'bien élevés'

- 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*)

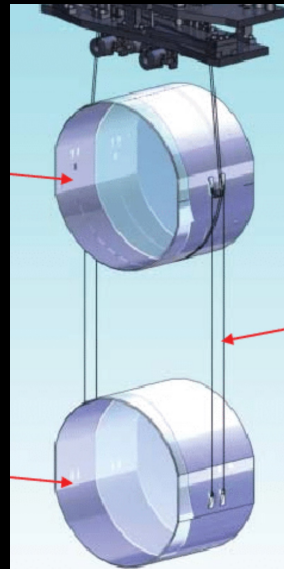
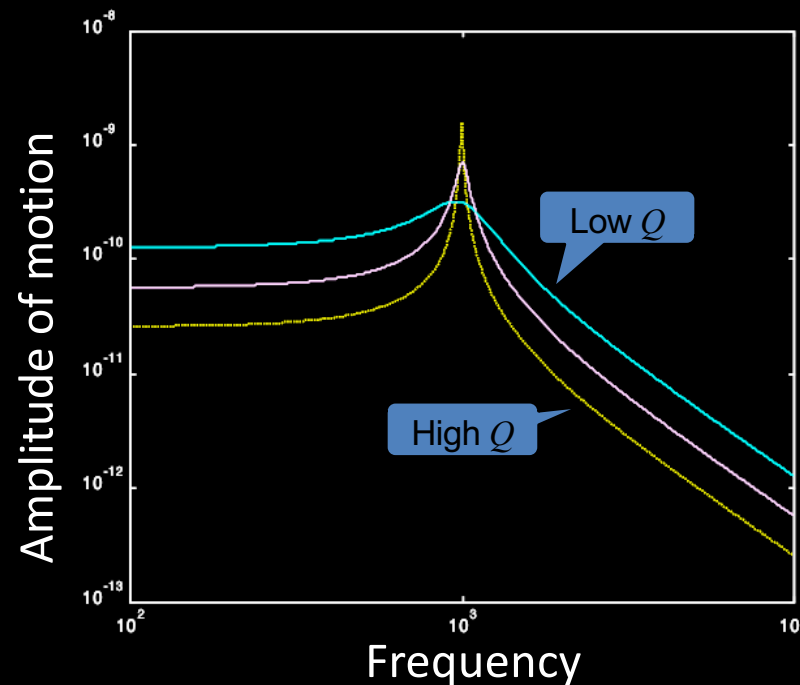
- Simple Harmonic Oscillator:

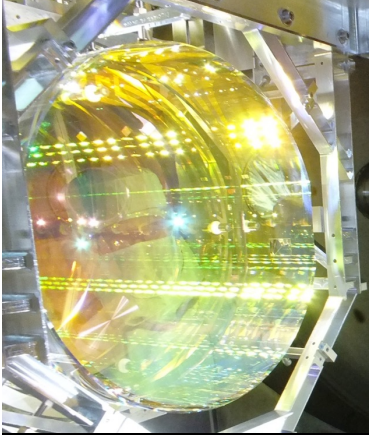
$$x_{rms} = \sqrt{\langle (\delta x)^2 \rangle} = \sqrt{k_B T / k_{spring}}$$

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

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

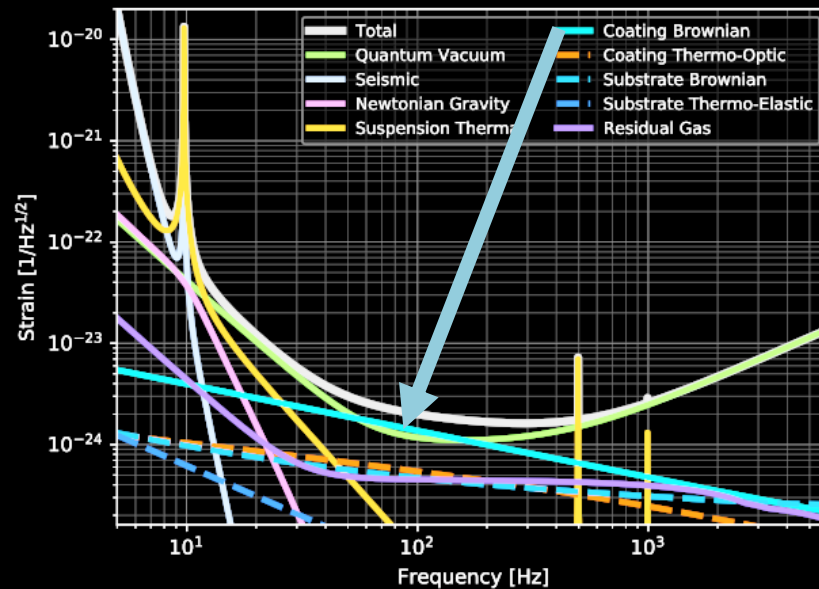
- Matériaux de basse pertes
- Construction monolithique





# 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  $\rightarrow$   $\phi \equiv \text{Im}Y / \text{Re}Y$

coating elastic loss

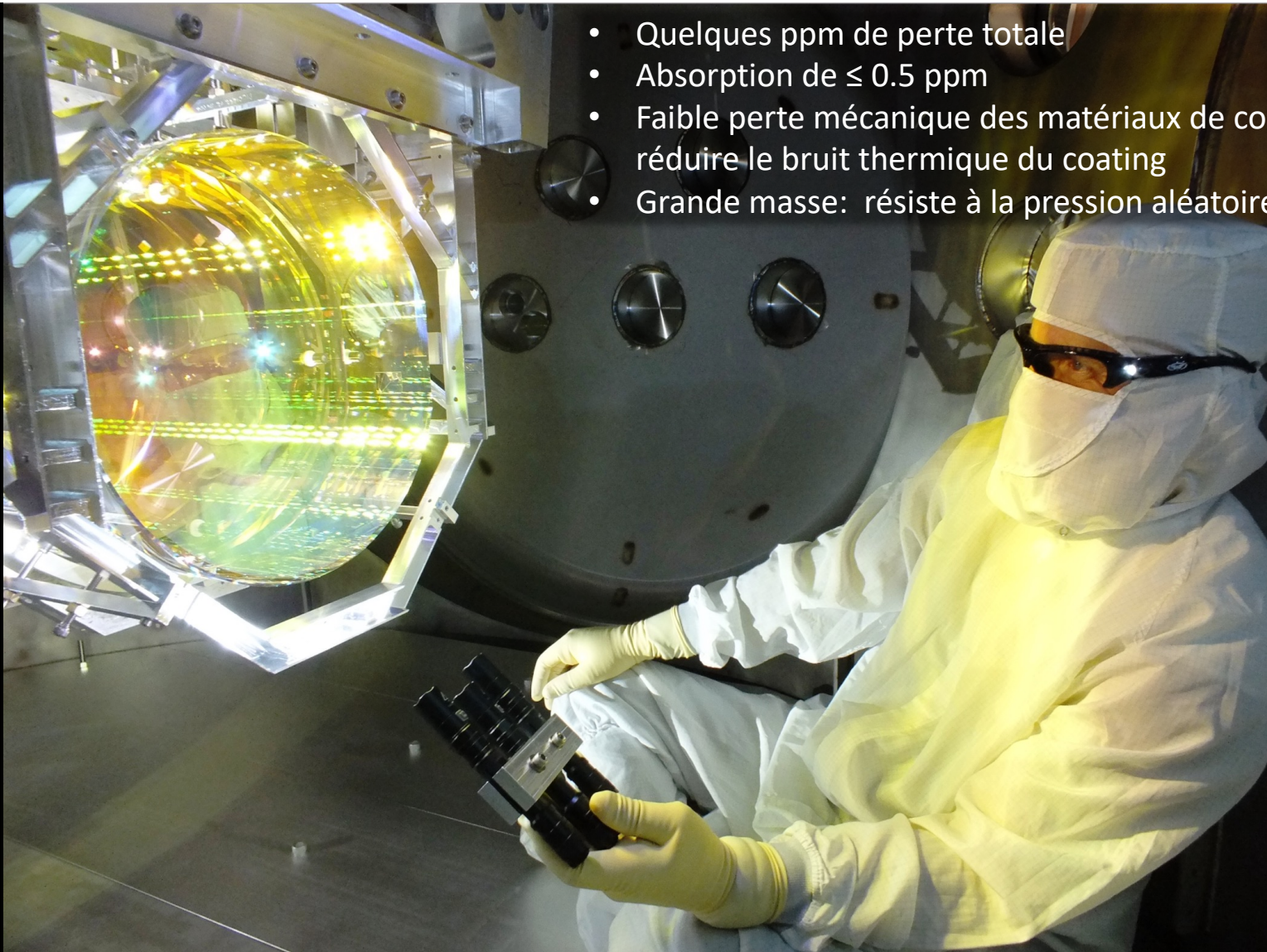
beam radius  $\rightarrow$

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

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



# High Quality Optics



- Quelques ppm de perte totale
- Absorption de  $\leq 0.5$  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*

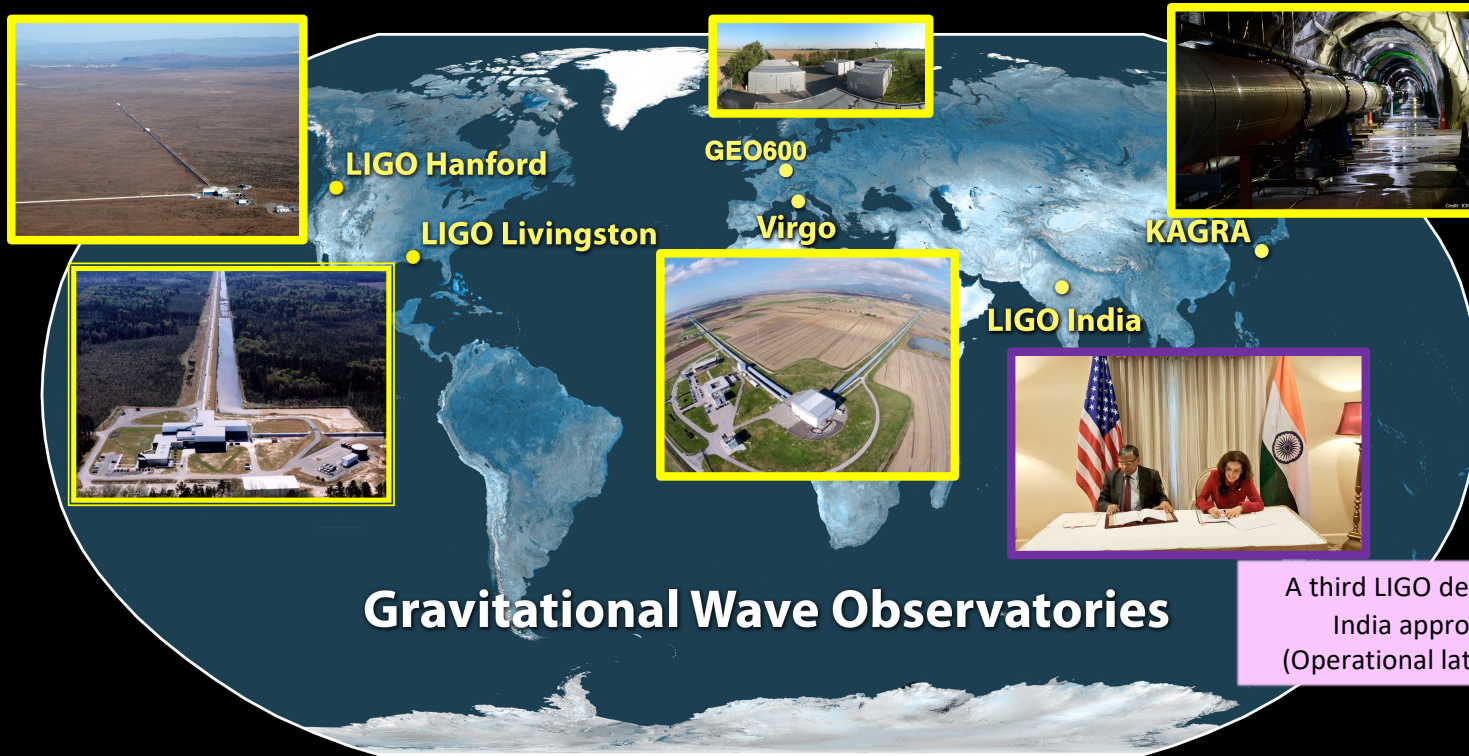


*LIGO Livingston  
Observatory*



**Sites actuels des observatoires**  
**Virgo – LIGO**  
**L = 3 – 4 km**

# Le réseau mondial des détecteurs d'ondes gravitationnelles en 2022



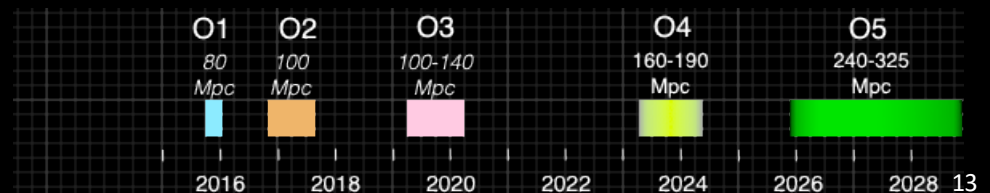
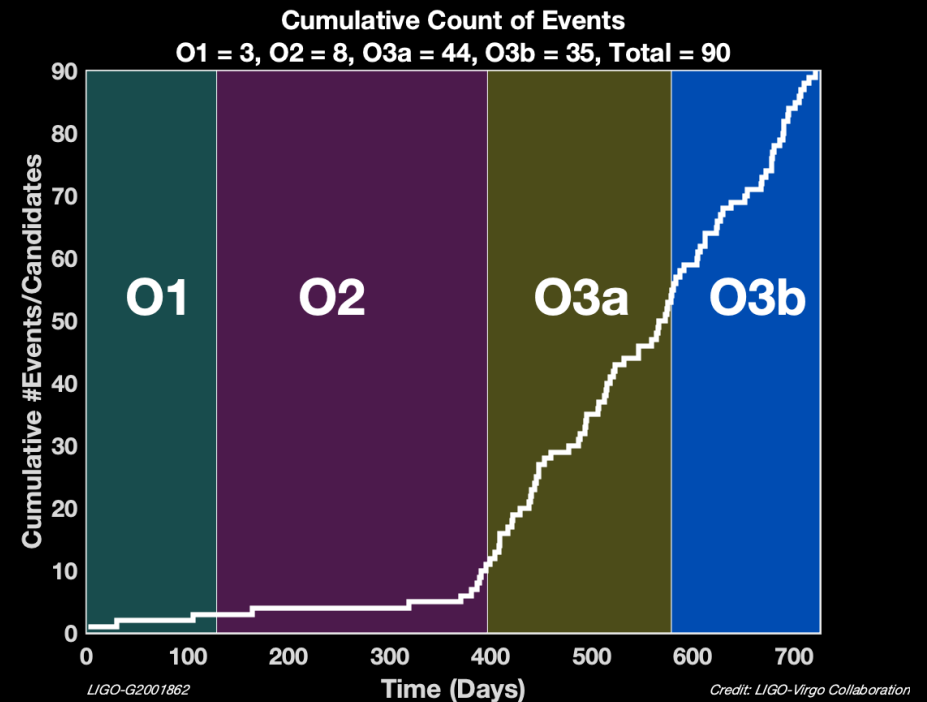
**Gravitational Wave Observatories**

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



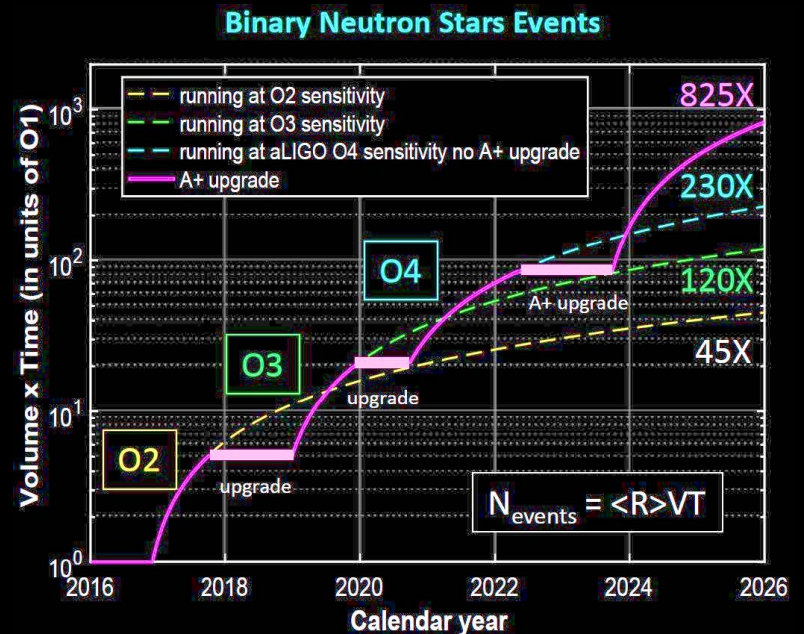
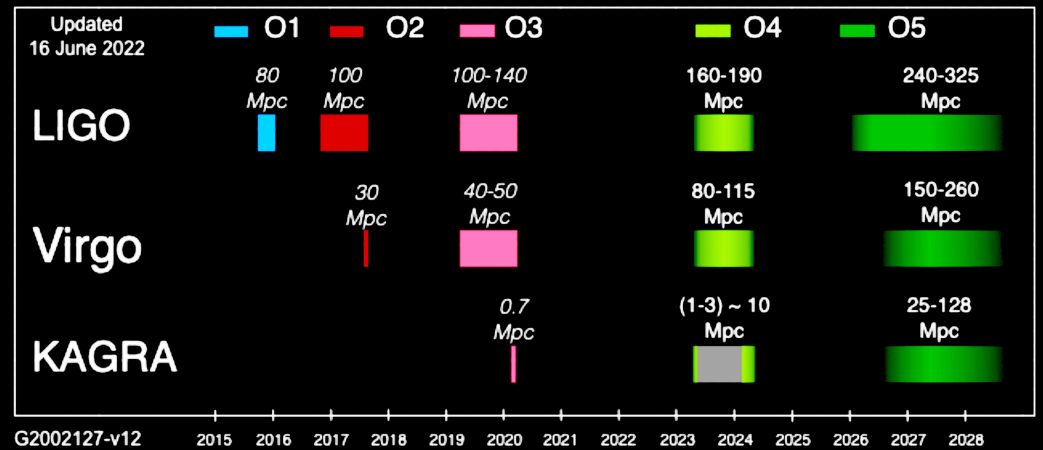
# Les améliorations de sensibilité augmentent le taux des événements détectables

- On capte l'amplitude des GW →
- Le volume d'espace – et donc les sources accessibles – croît avec  $\sim(\text{sensibilité})^3$ 
  - Sensibilité O3/O2  $\sim 1.6$
  - 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

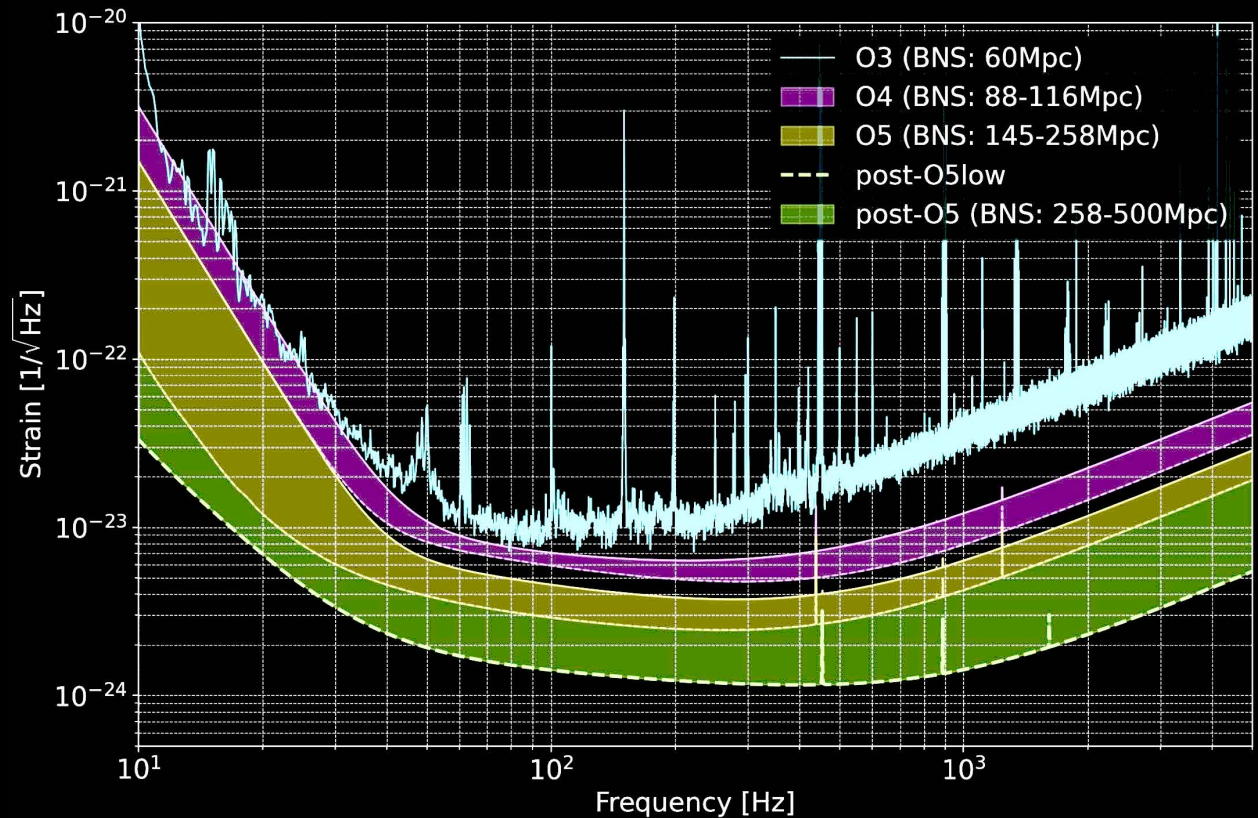




# La limite des possibilités de LIGO-Virgo

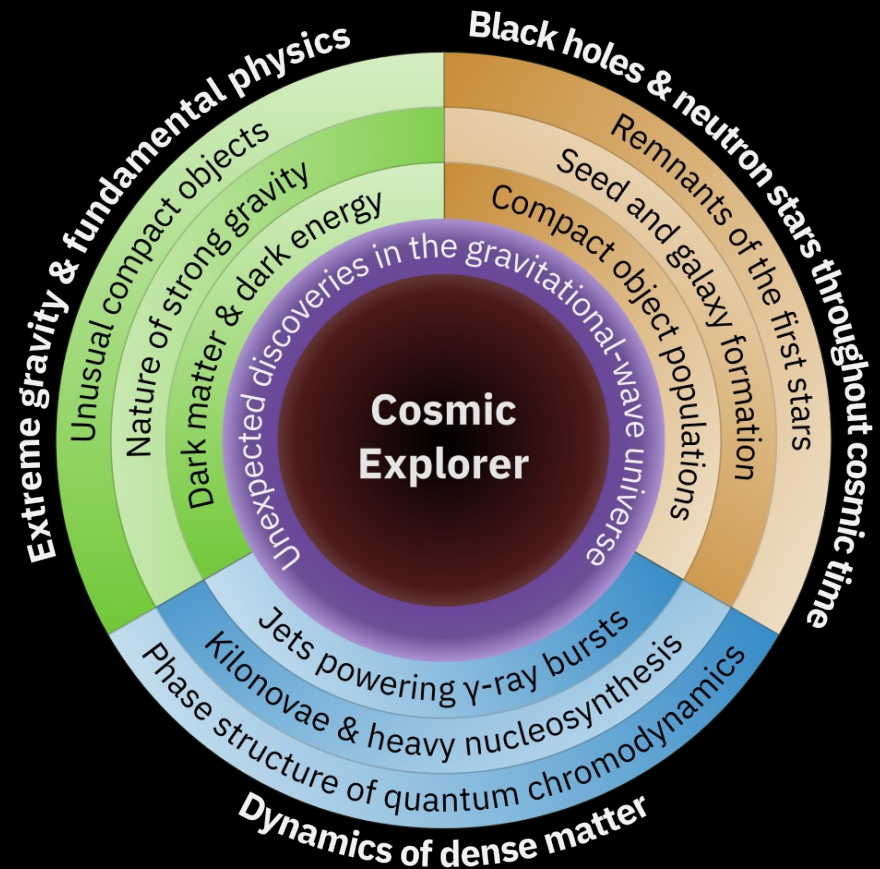
- Etudes sont bien avancées pour extraire le maximum possible sur 3-4 km
- 'Post-O5' détecteurs pourraient livrer encore un facteur 2 en portée
- Servent aussi de prototype pour les détecteurs de la prochaine génération

AdV sensitivity evolution from O3 to post-O5



# 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

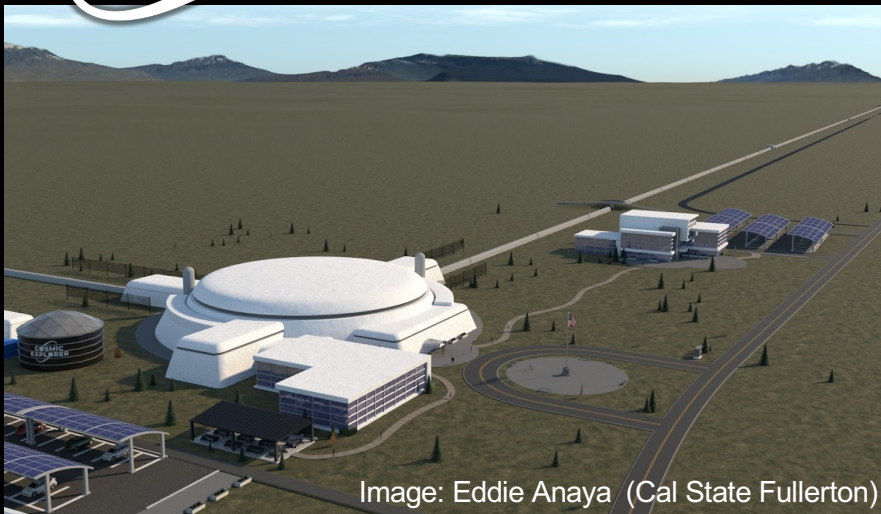
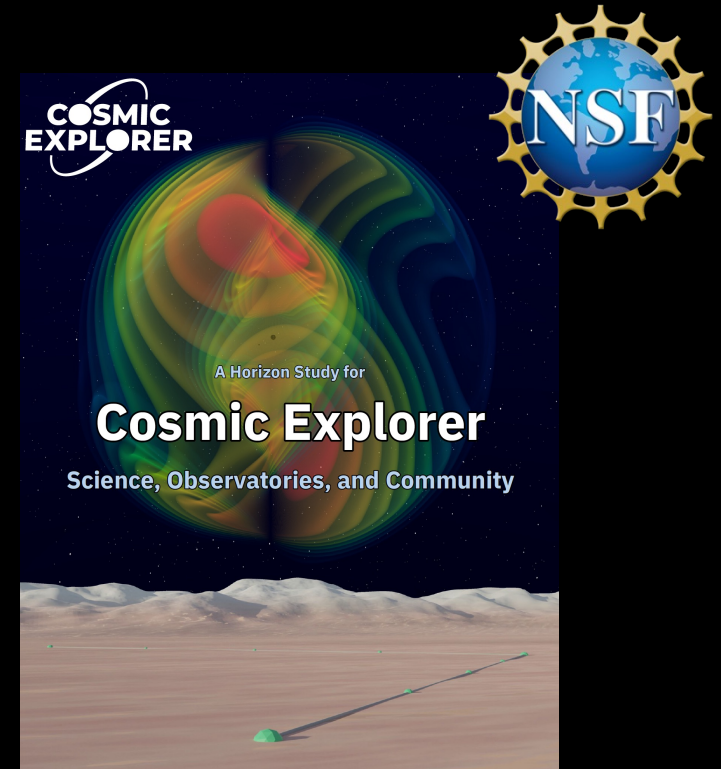


Image: Eddie Anaya (Cal State Fullerton)

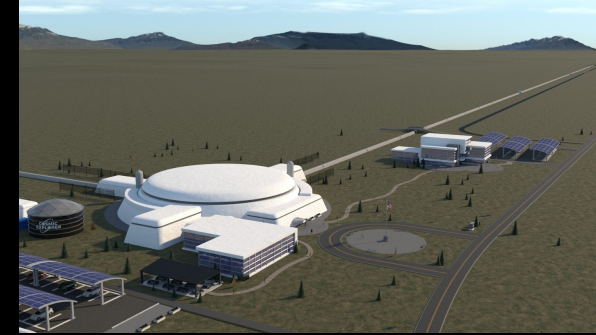


[cosmicexplorer.org](http://cosmicexplorer.org)

- 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  $\sim 2$  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

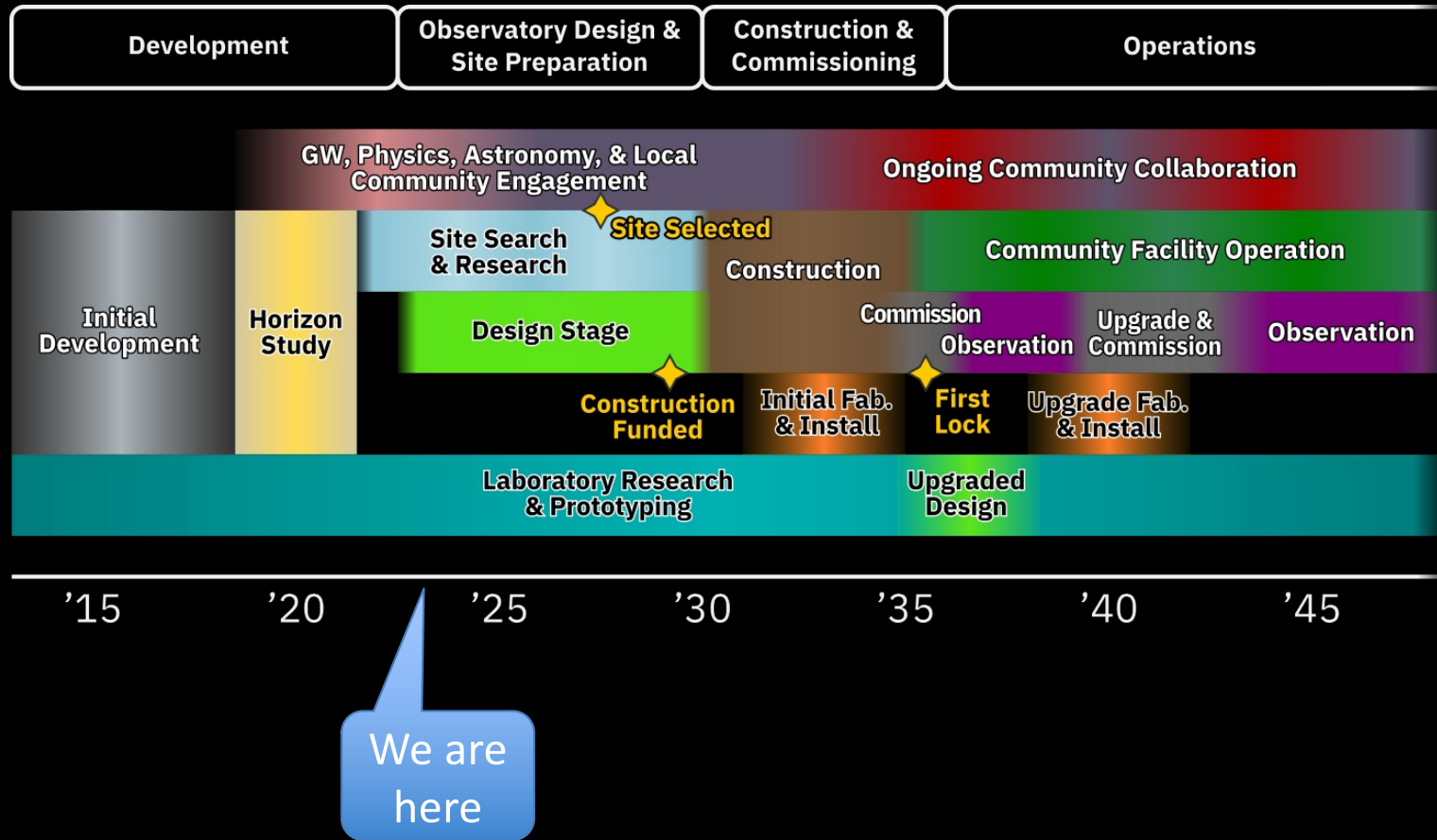
- Les détecteurs CE initiaux utiliseront toutes les techniques de « LIGO Post-O5 »
  - Température ambiante, lumière de 1 micron, optiques en silice, frequency dependent squeezing
  - Coatings optiques amorphes ou bien cristallins – grande question!
- On essaie de minimiser les développements techniques 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:  $2 \times 10^9$  \$ 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

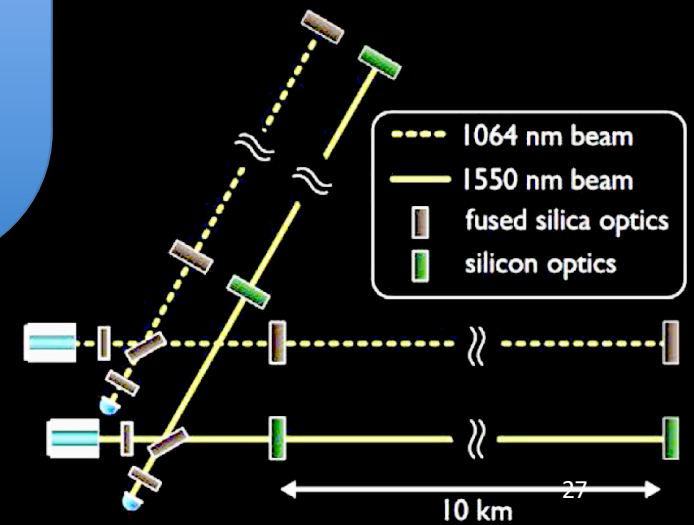
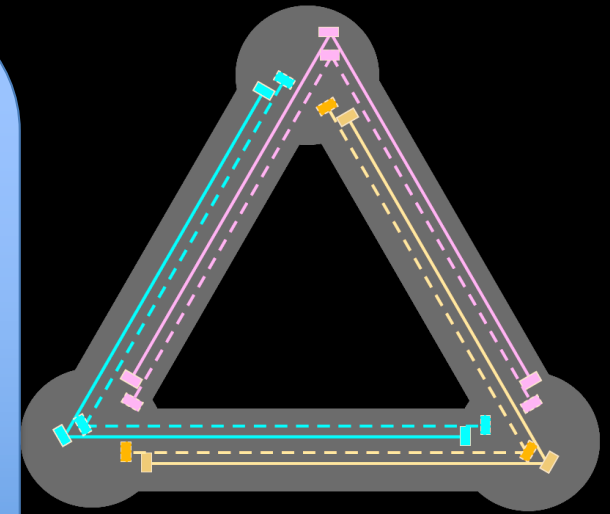
# Éléments clés d'Einstein Telescope

## Exigences

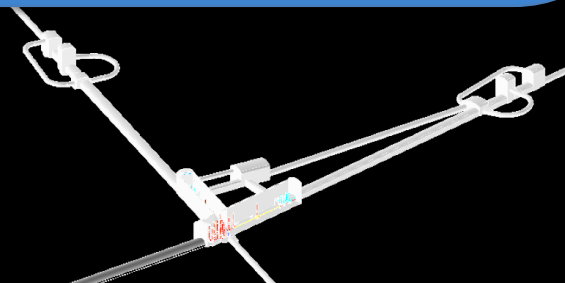
- Large gamme de fréquences
- Trous noirs massifs → sensibilité basses fréquences
- Capacité de localisation
- Couverture uniforme du ciel
- Détermination de polarisation
- Haute fiabilité, disponibilité
- Rapport signal/bruit élevé

## 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



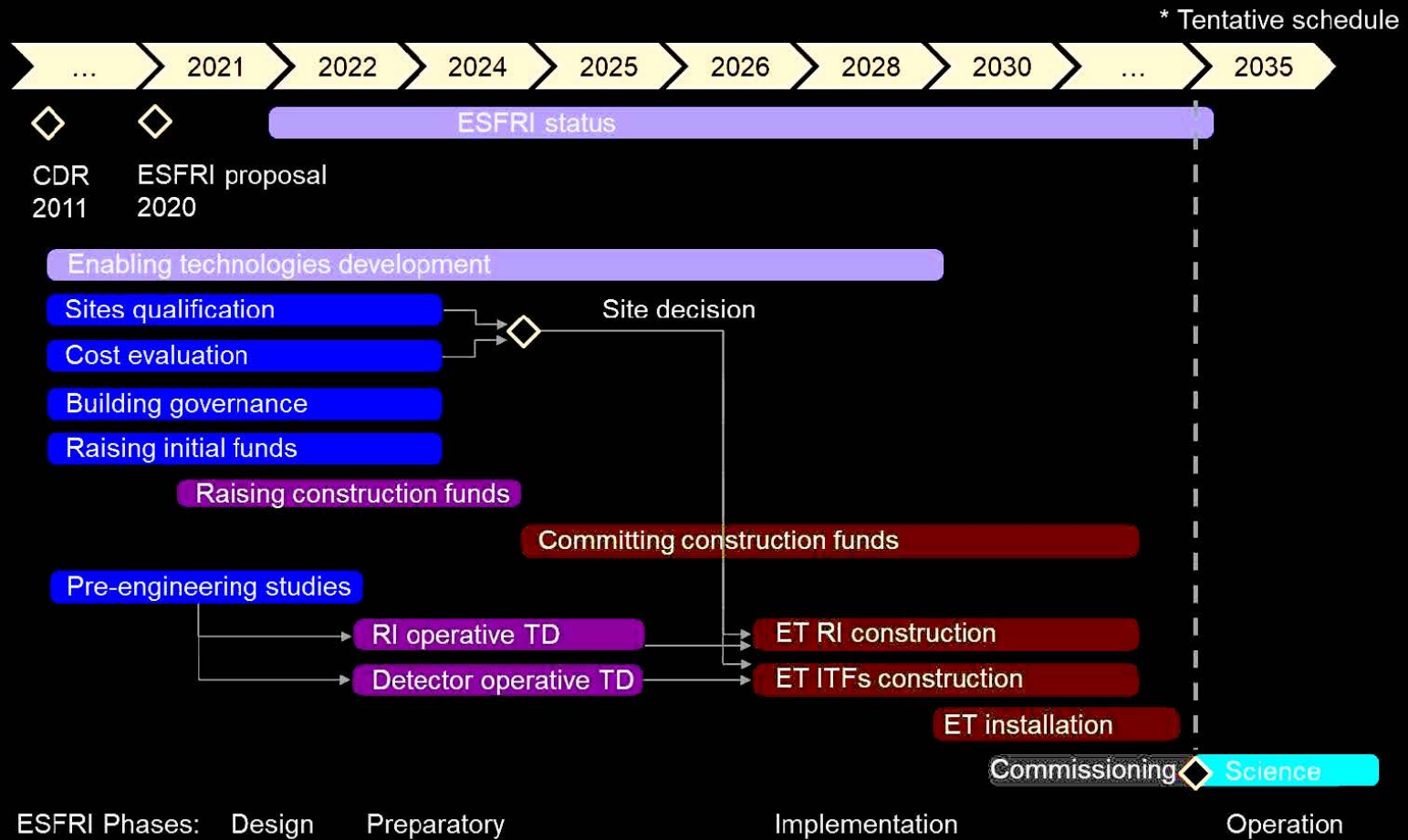
# ET Status

- 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

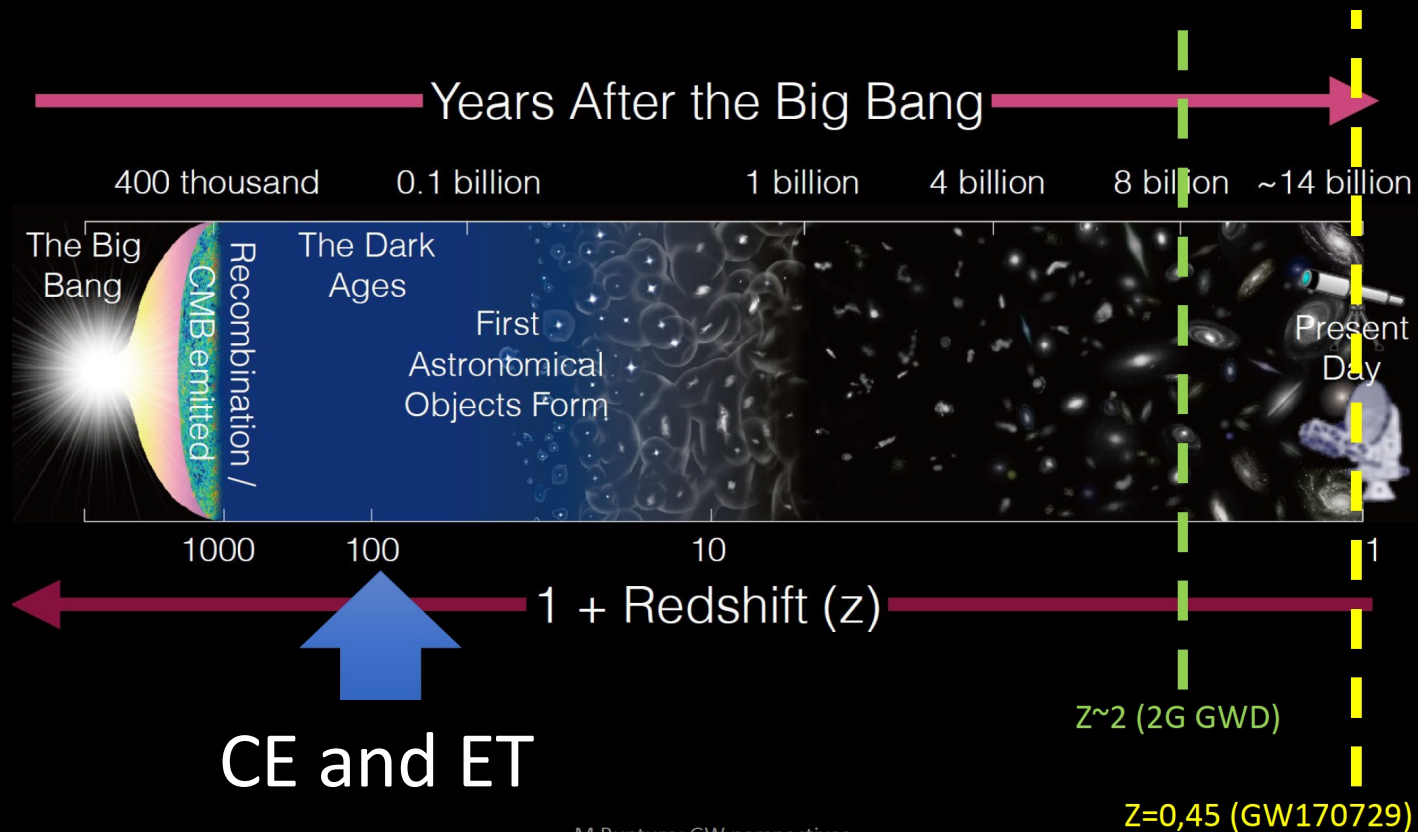
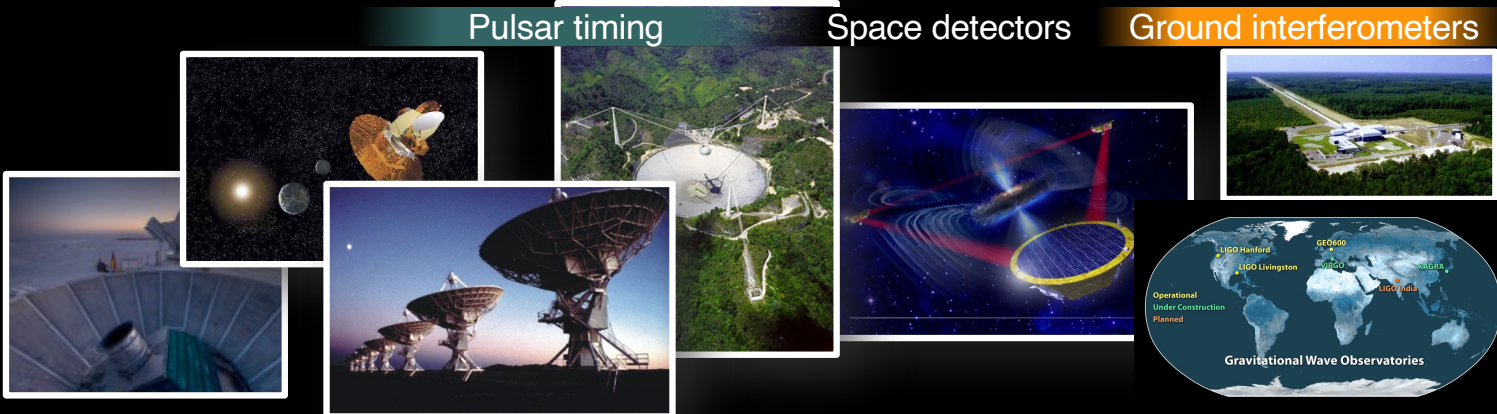
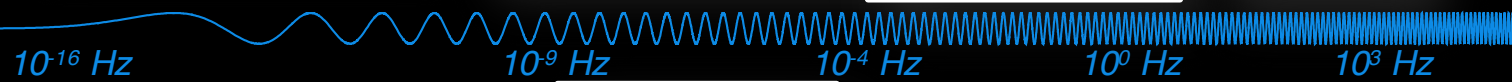
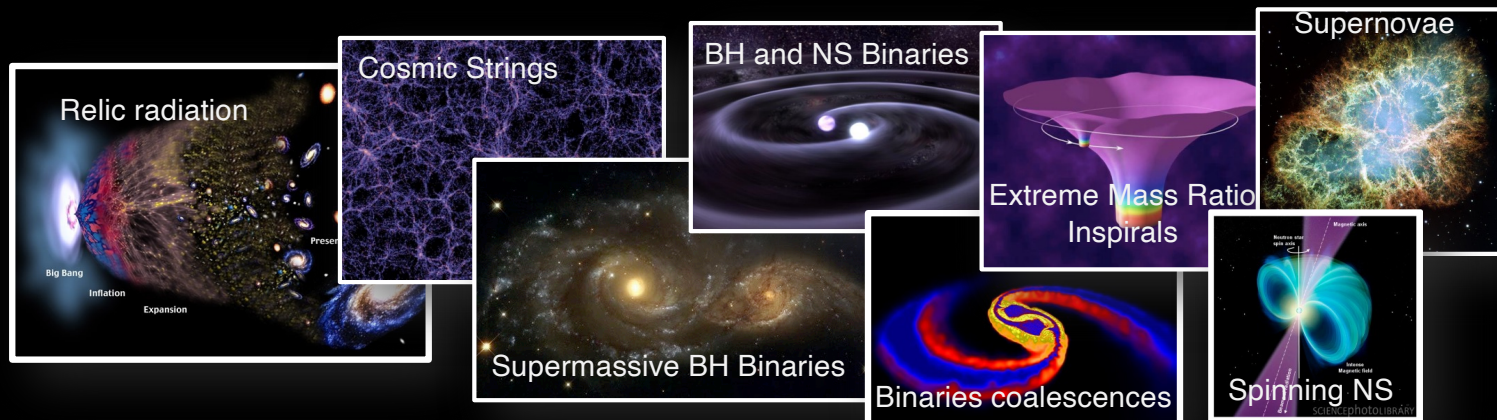


Image credit: NAOJ/ALMA <http://alma.mtk.nao.ac.jp/>

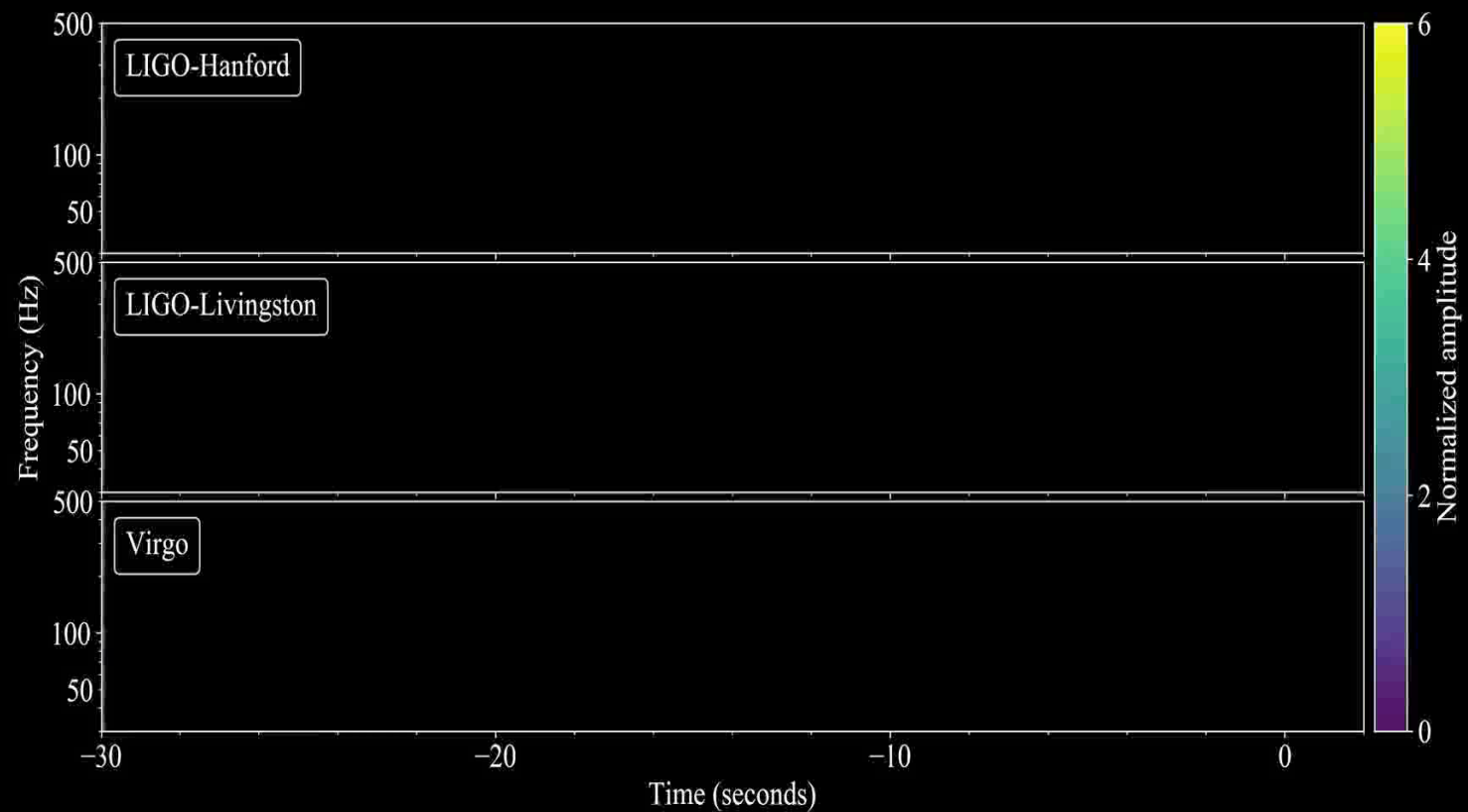
M.Punturo: GW perspectives

# The Gravitational Wave Spectrum

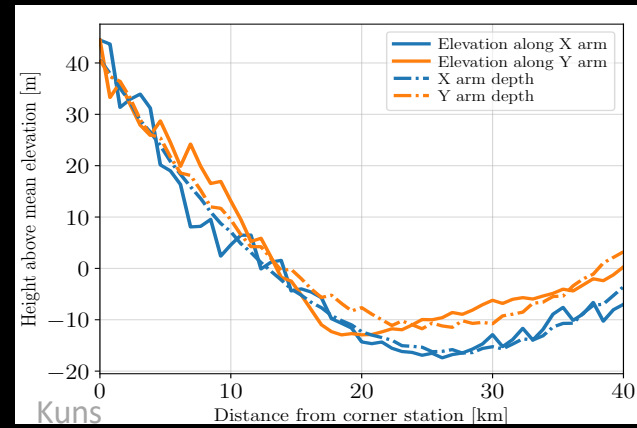
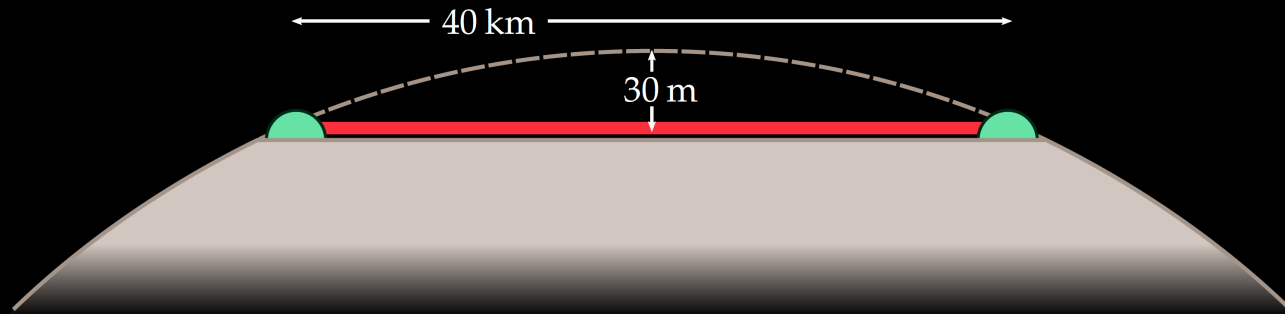




# The binary neutron star signal, with and without the interferometer noise



# 40km CE



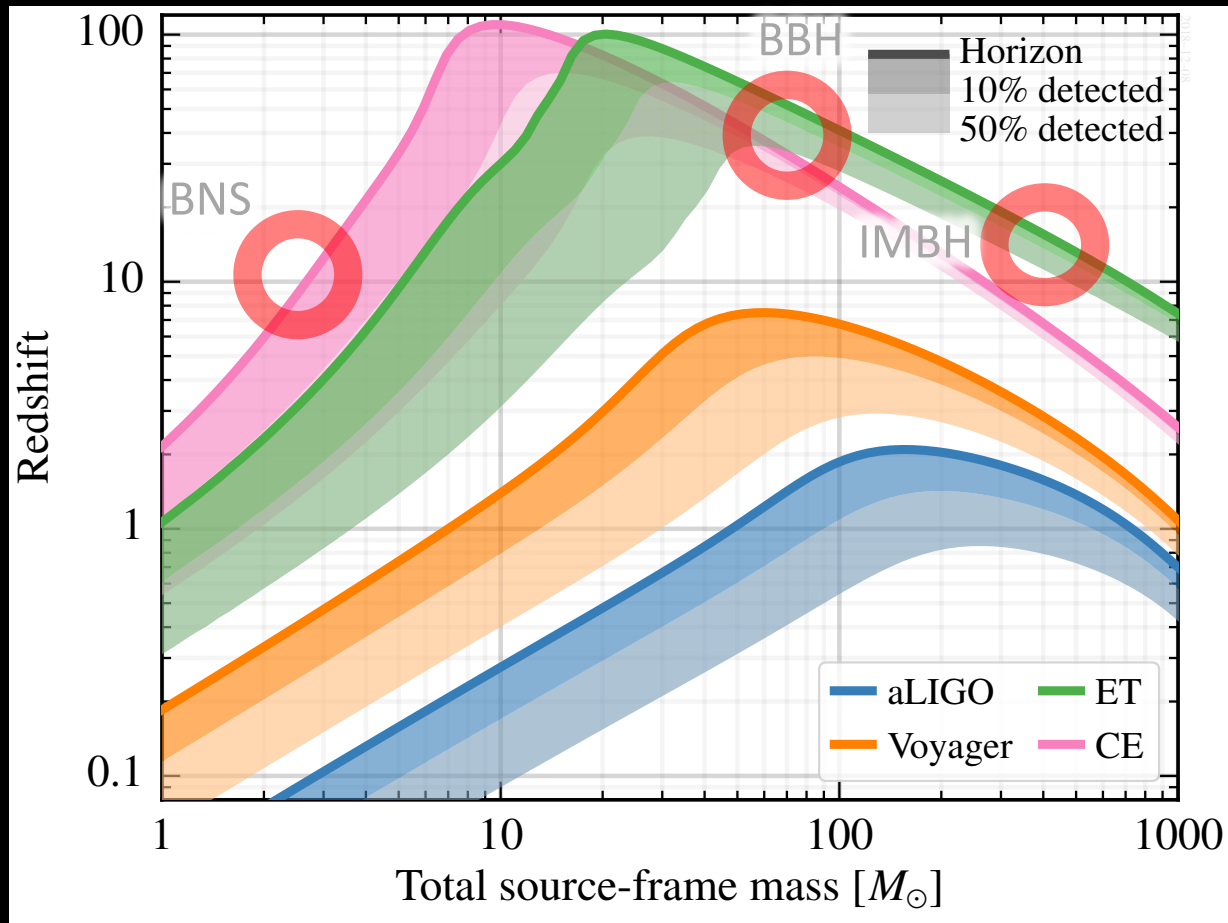
## Why 40km?

- 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?

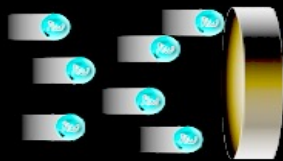


## Resolution of the optical sensing

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

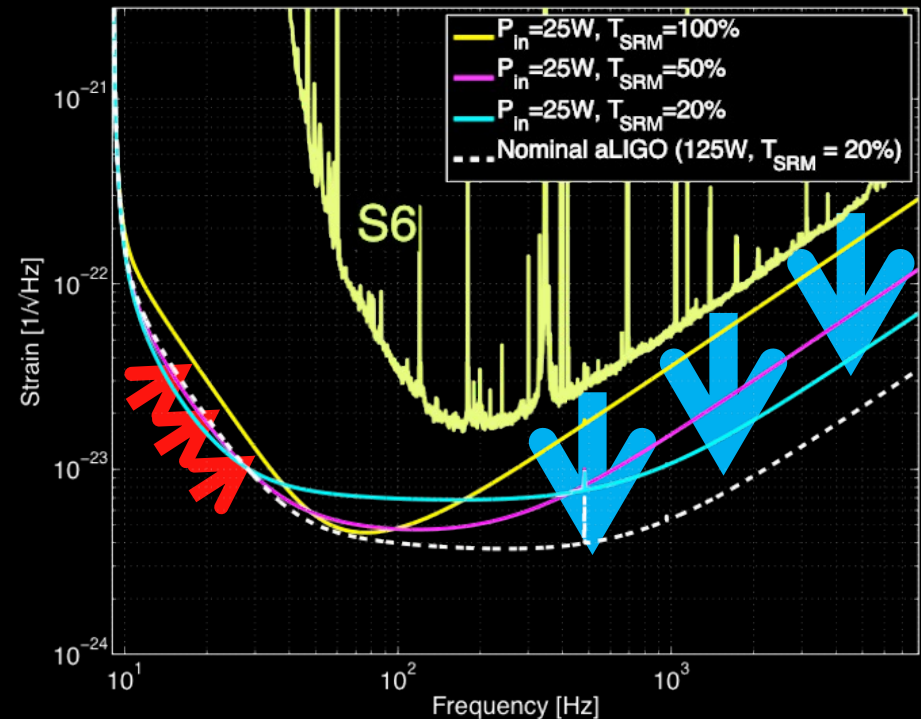
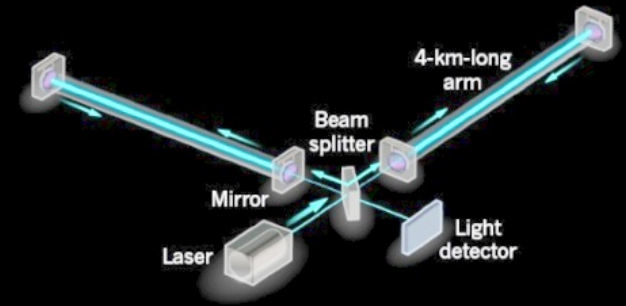
$$h_{\text{sn}}(f) = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{2\pi P}}$$

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



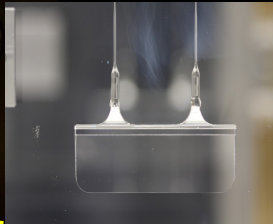
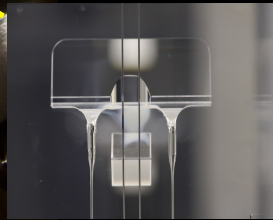
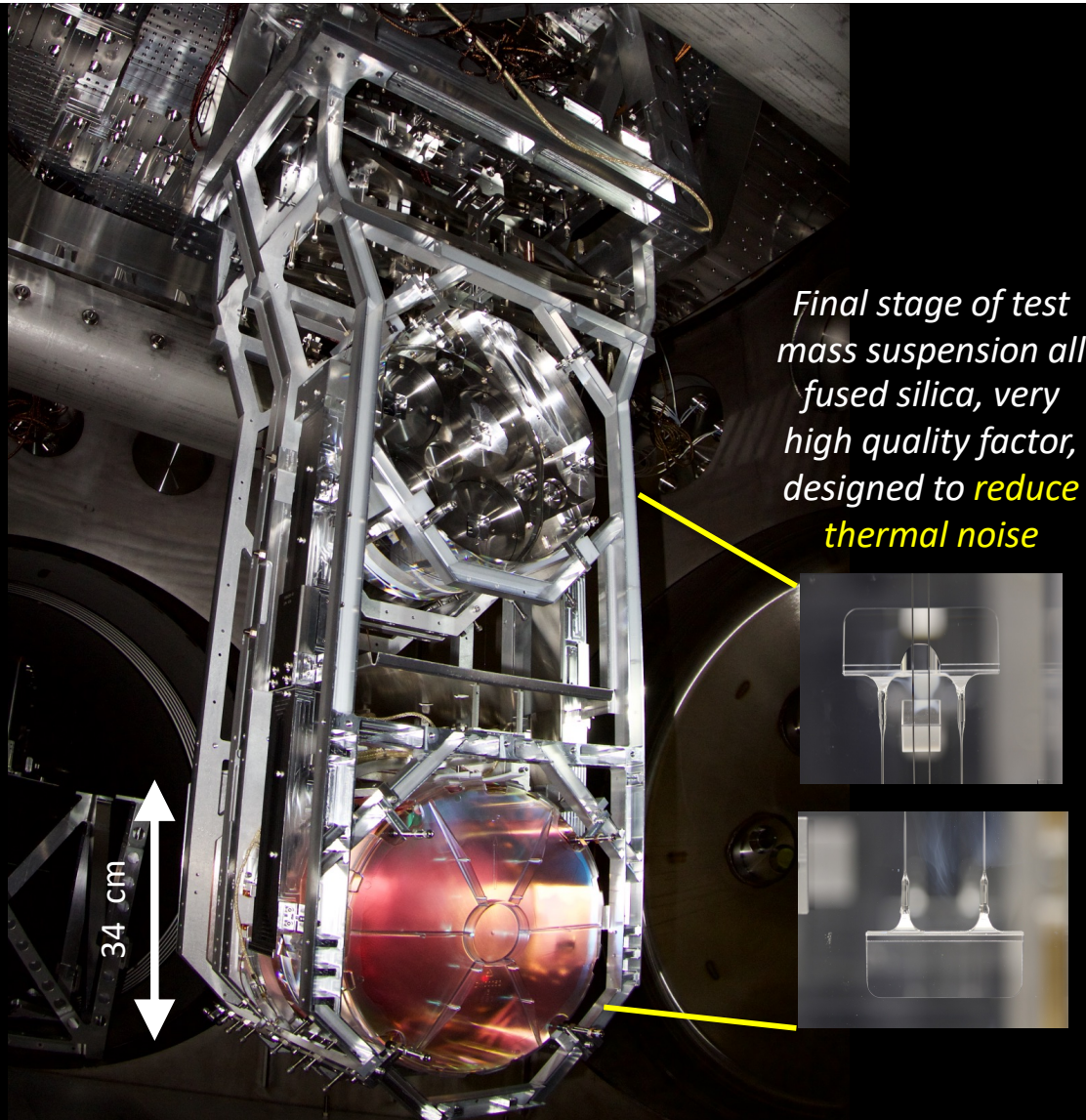
$$h_{\text{rp}}(f) = \frac{1}{m f^2 L} \sqrt{\frac{\hbar P}{2\pi^3 c \lambda}}$$

- **'Standard Quantum Limit'**



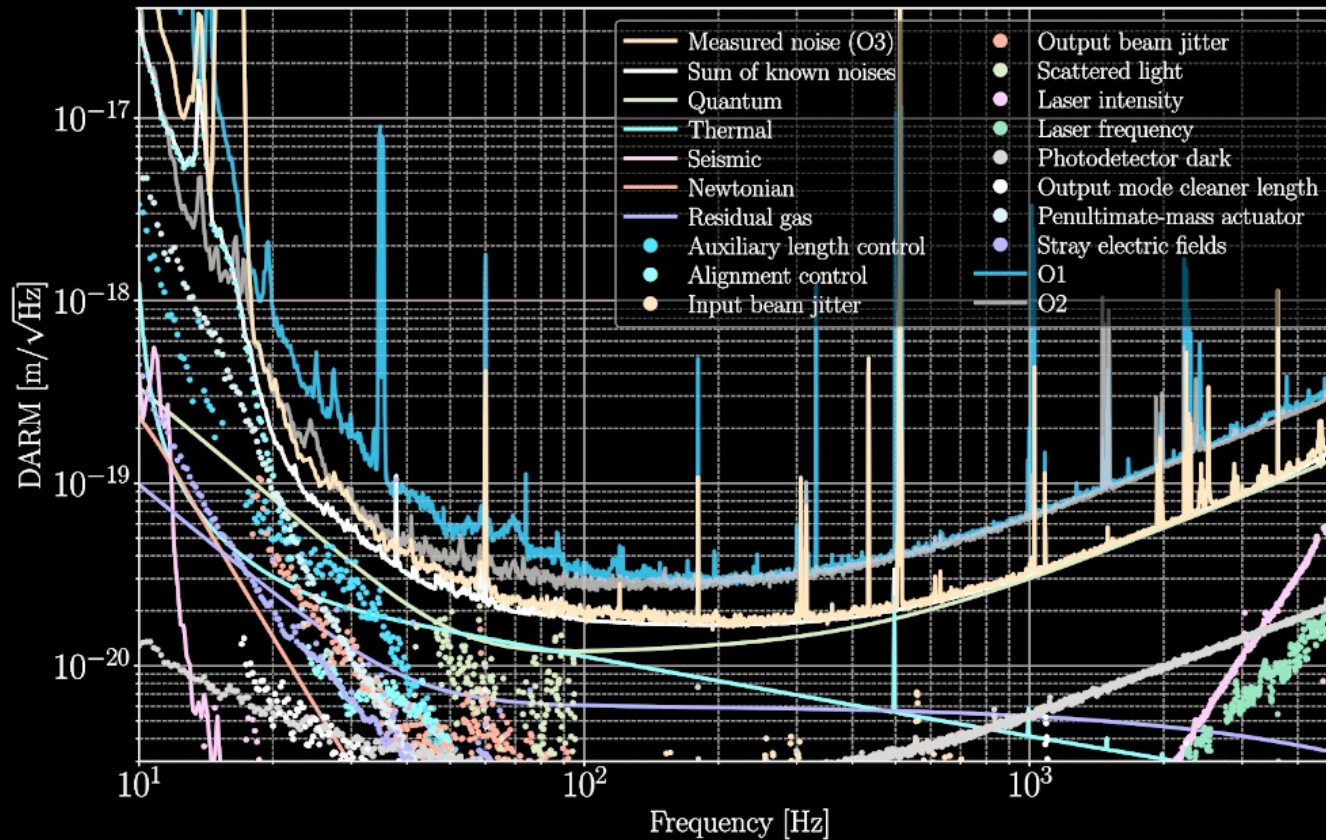


# Test Mass Suspension





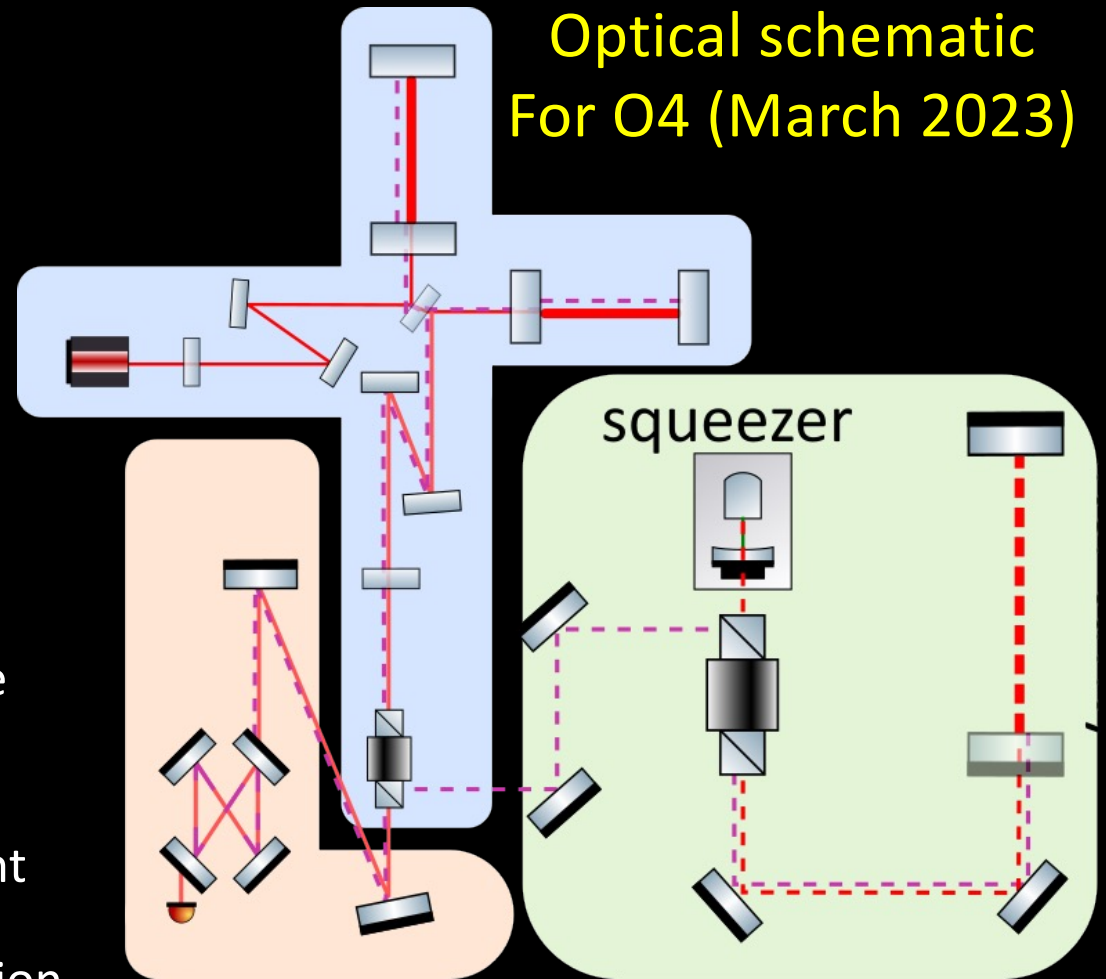
# Lowest displacement noise to date (LIGO detector, O3, 2019–2020)



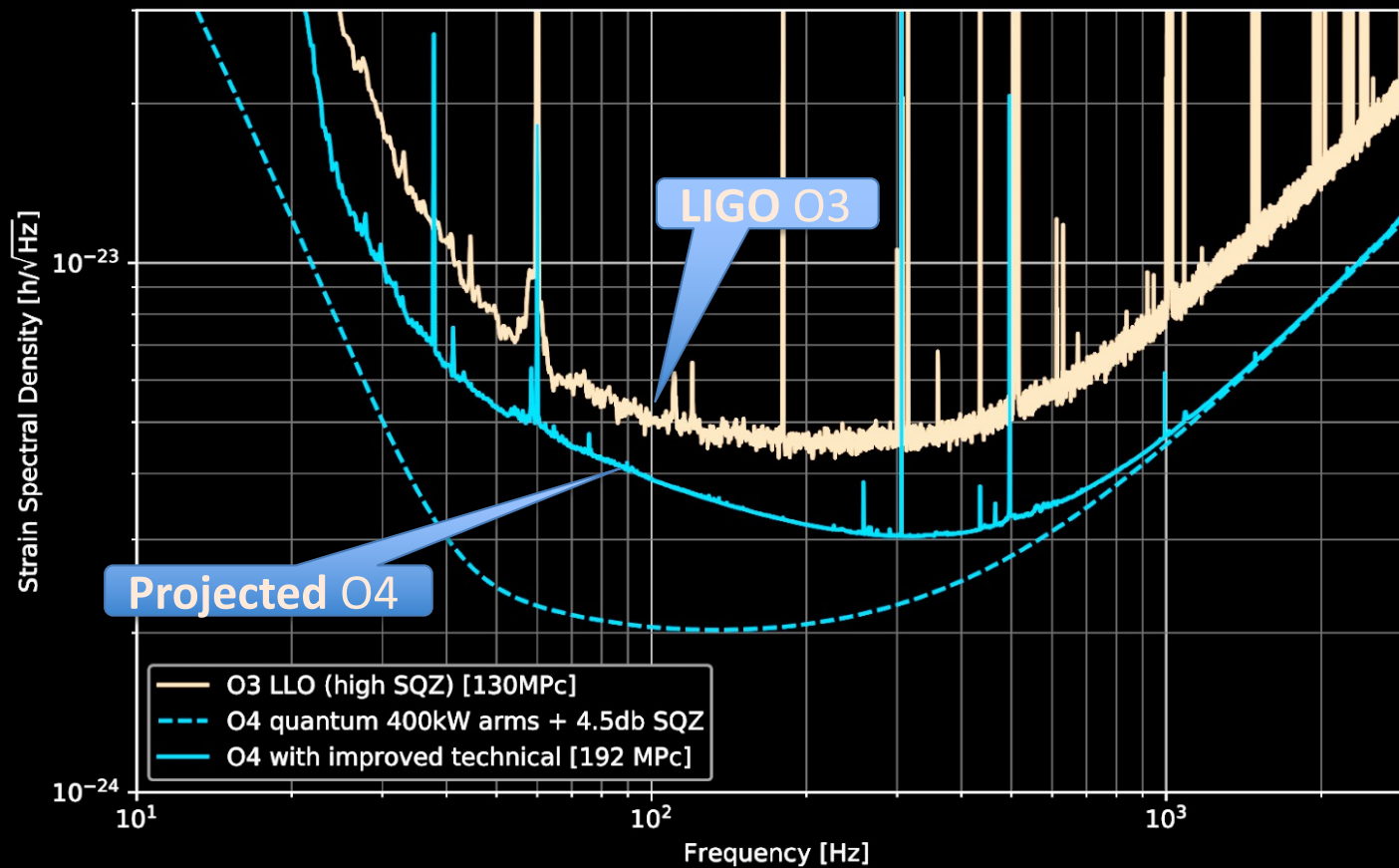
Sensitivity and performance of the Advanced LIGO detectors in the third observing run  
A. Buikema *et al.* Phys. Rev. D 102, 062003

# 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

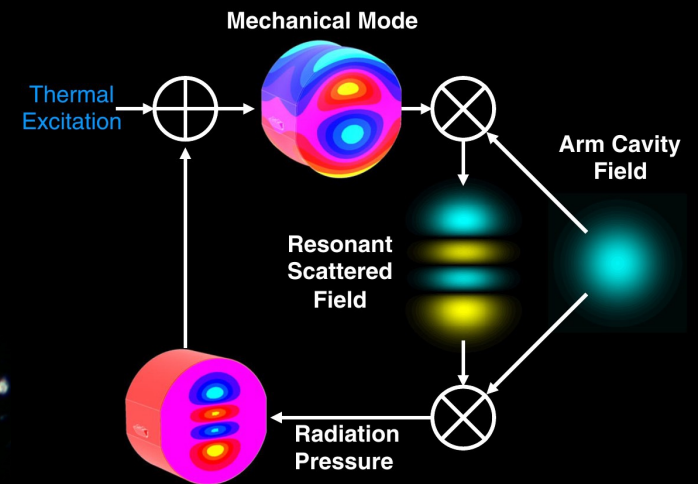
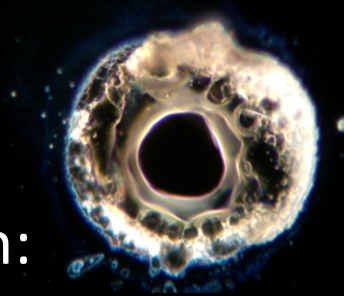


# O4 projected sensitivity (mid-2023)



## 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**

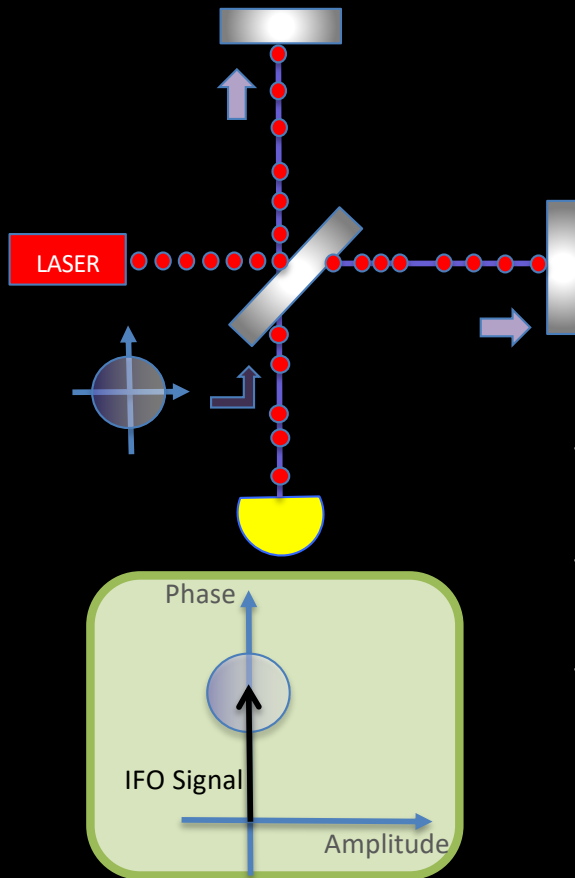


### Quantum-mechanical noise in an interferometer

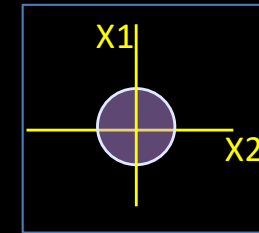
Carlton M. Caves

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

(Received 15 August 1980)



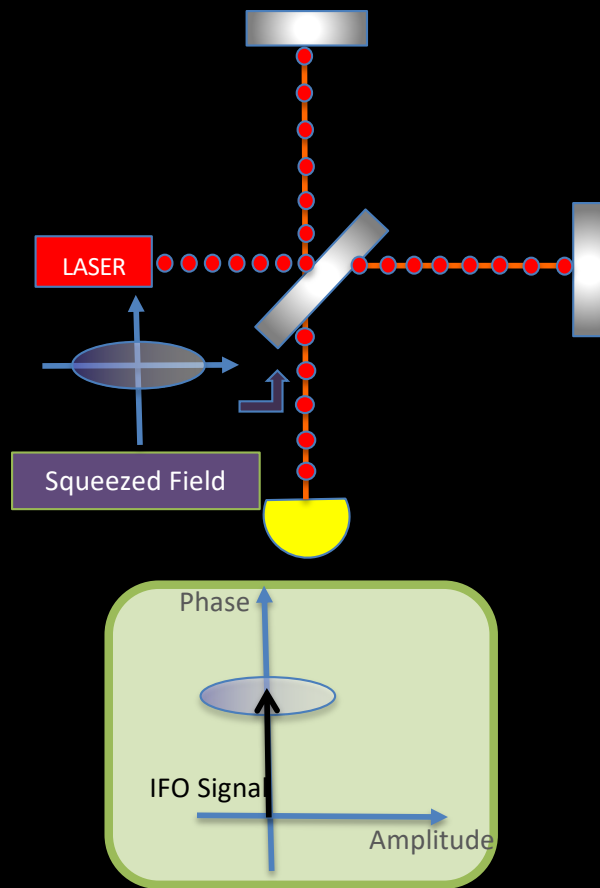
Zero-point energy  
(vacuum) fluctuations



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

- ✧ 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

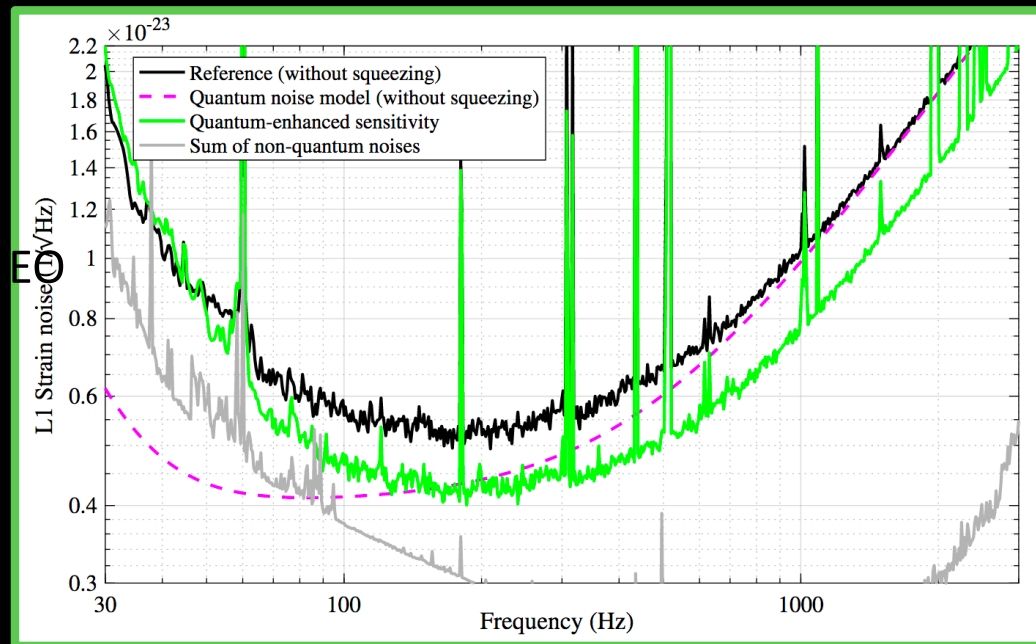


- ✧ Reduce quantum noise by injecting squeezed vacuum: less uncertainty in one of the two quadratures
- ✧ Heisenberg uncertainty principle: if the noise gets smaller in one quadrature, it gets bigger in the other one
- ✧ One can choose the relative orientation between the squeezed vacuum and the interferometer 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

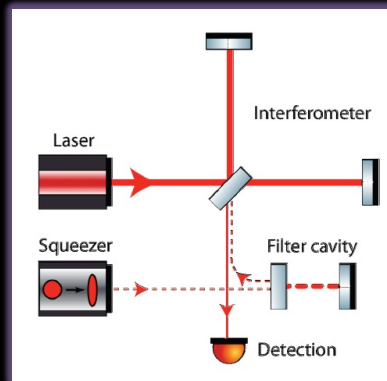
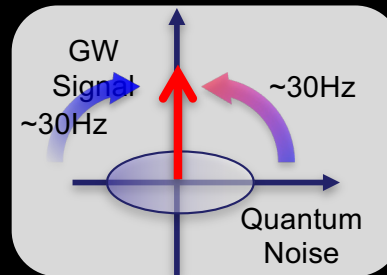
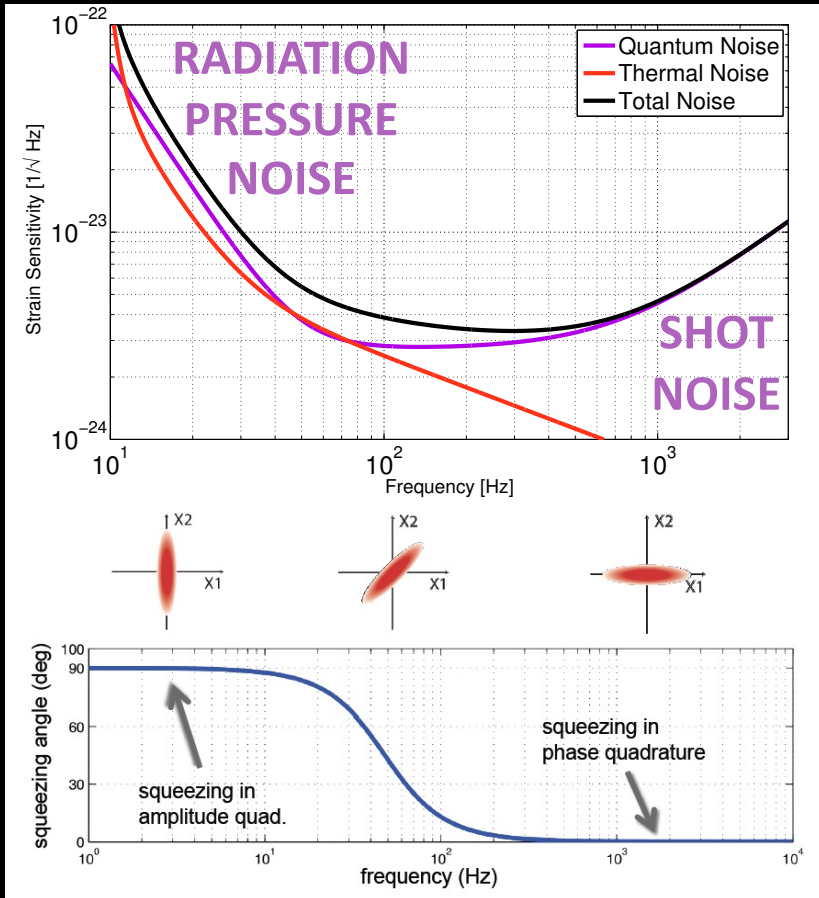
# Squeezing performance in O3

[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