



Enseigner les ondes gravitationnelles

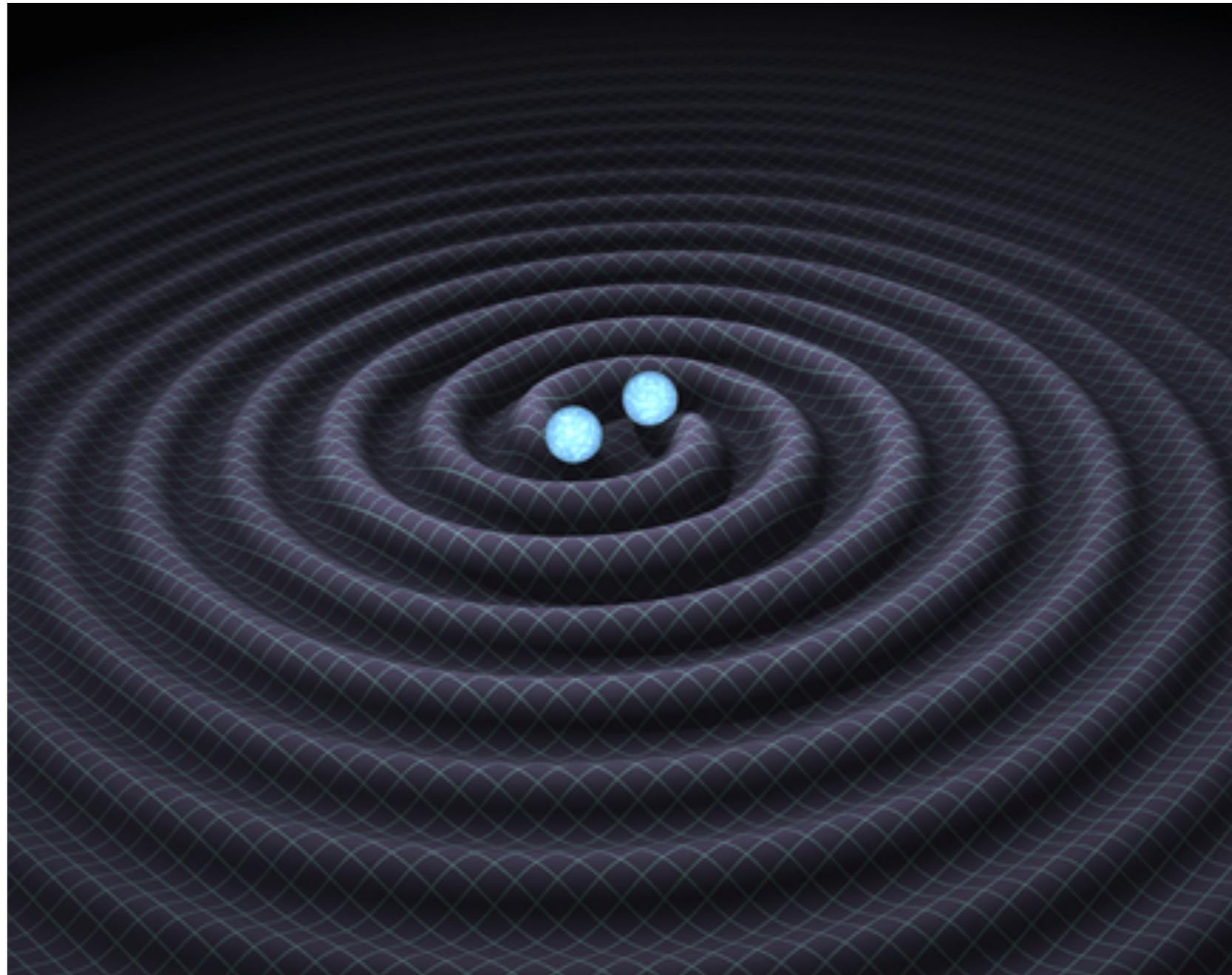
Eleonora Capocasa

Outline

- Que sont les ondes gravitationnelles ?
- Pourquoi est-il très intéressant de les détecter ?
- Comment sont-elles détectées ?

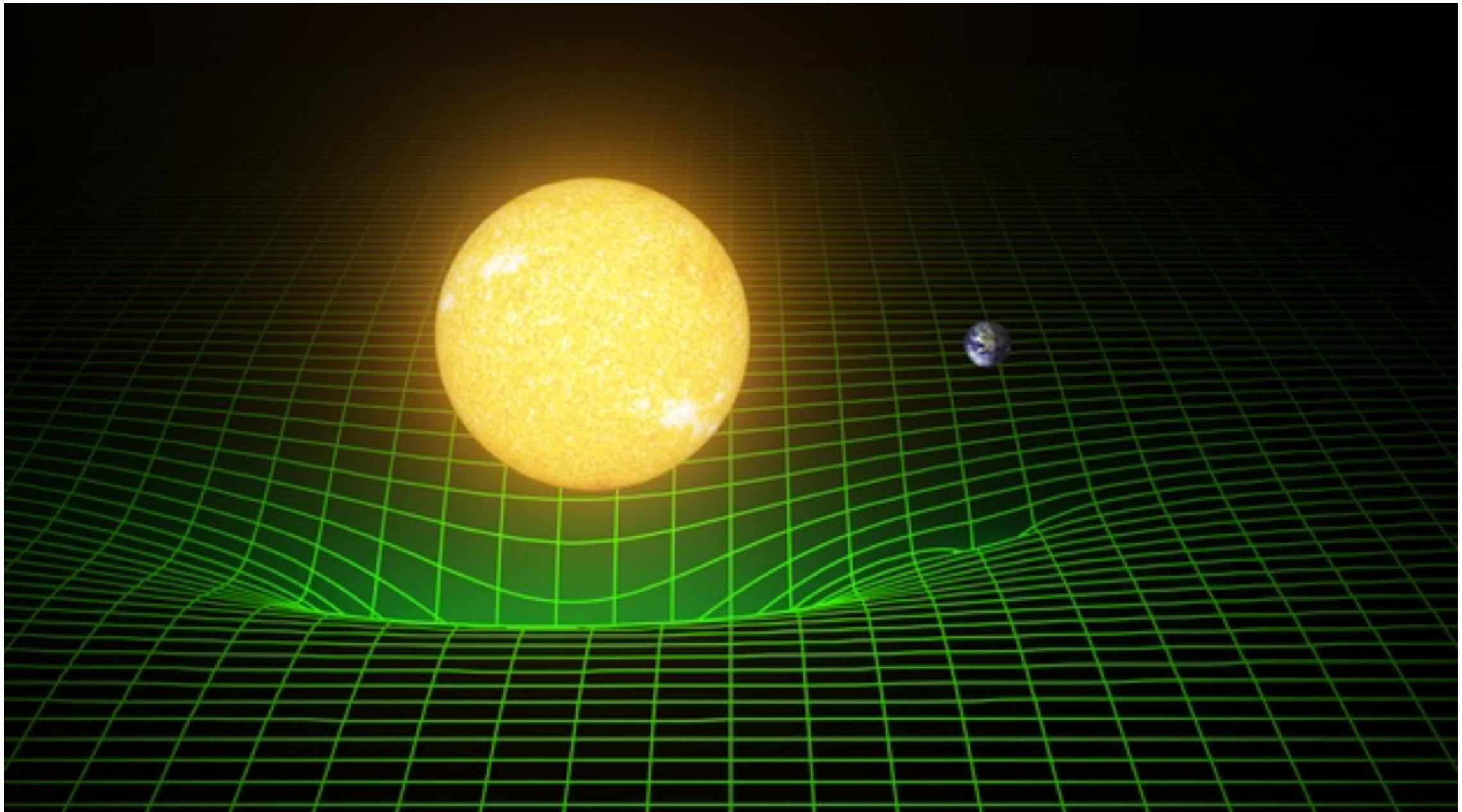
Ondes Gravitationnelles

Perturbations de la courbure de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière.



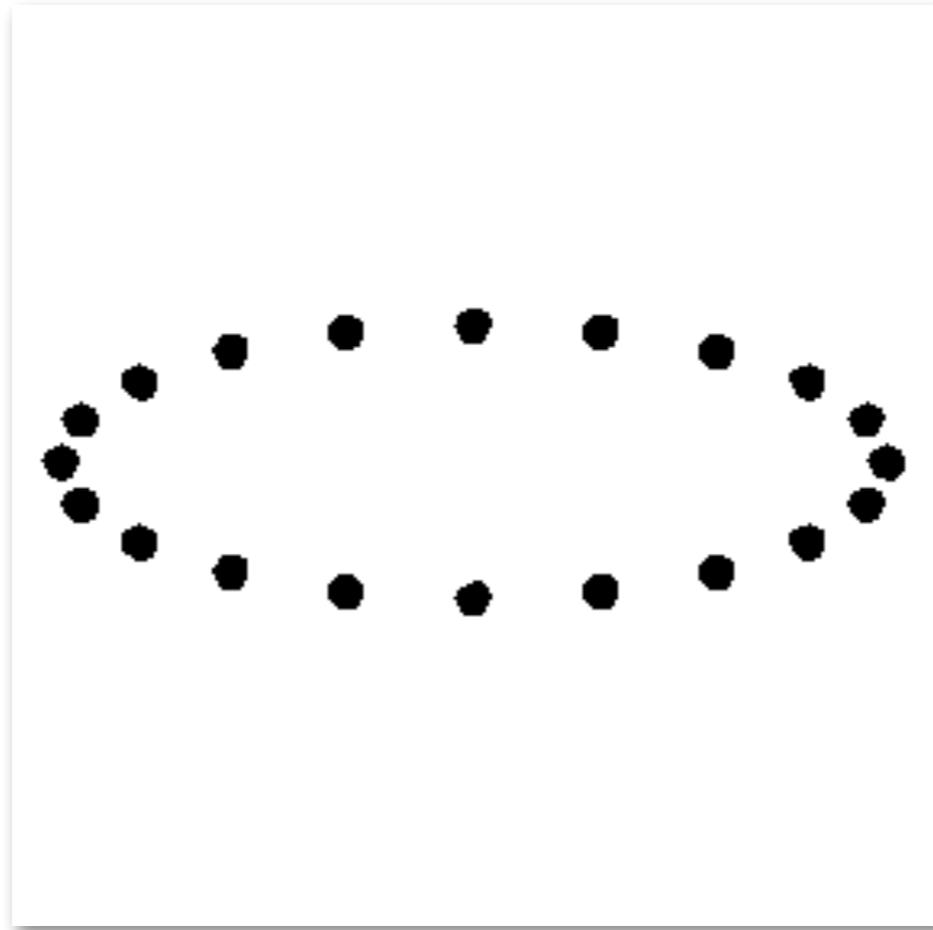
Influence de masses sur l'espace-temps

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



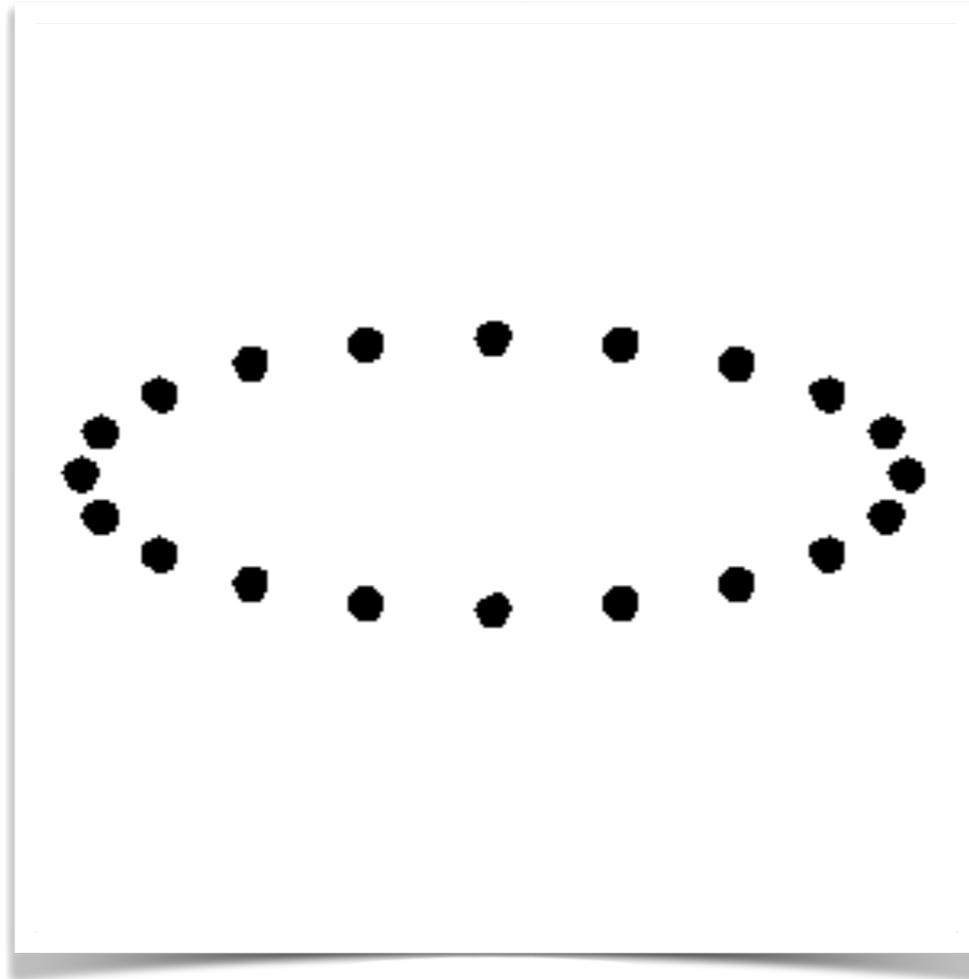
Effet d'une onde gravitationnelle

- Déformation périodique de l'espace-temps -> changement de la distance entre des masses libres



Effet d'une onde gravitationnelle

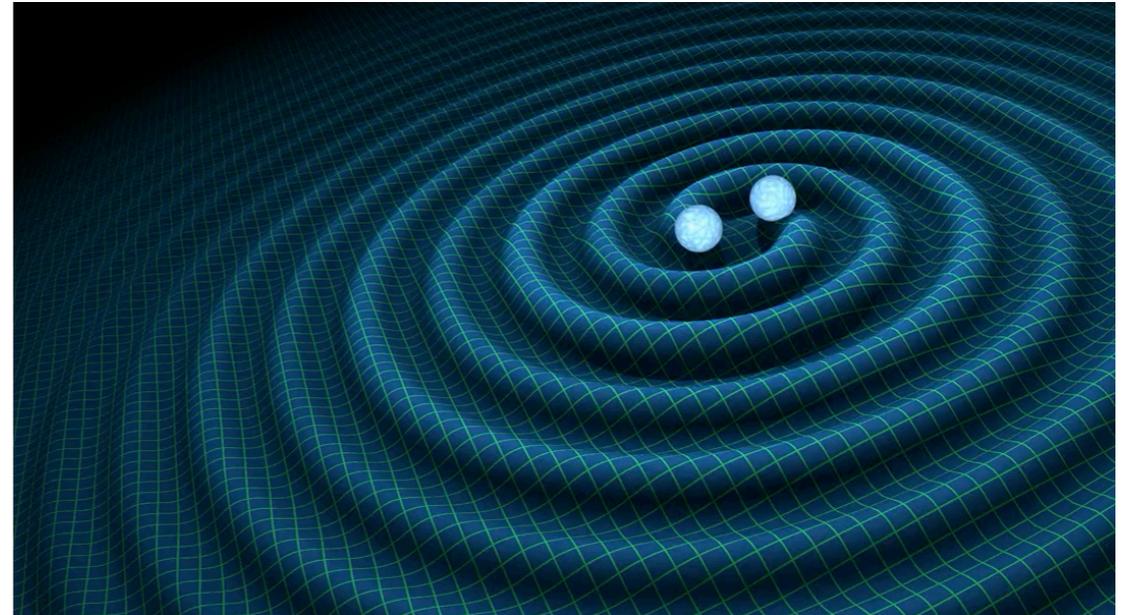
- Déformation périodique de l'espace-temps -> changement de la distance entre des masses libres



- “h” étirement (strain) : $\Delta L/L$ Dans cette figure: $h \sim 0.5$

Comment les ondes gravitationnelles sont-elles produites ?

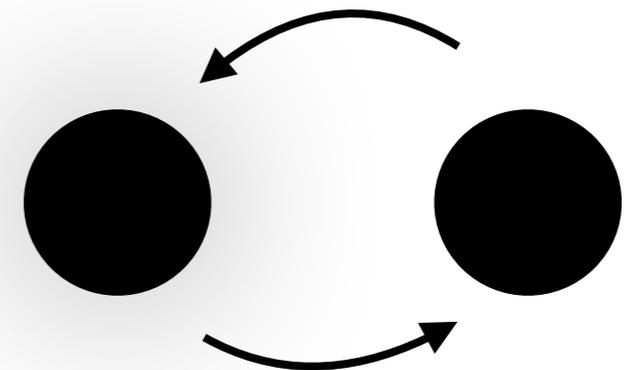
- Distributions asymétriques de masses l'accéléérés (avec un moment quadrupolaire non nul)
 - coalescence d'objets compacts
 - Supernovae
 - Pulsar



Exemple

10M_⊙ Binary Black Hole System

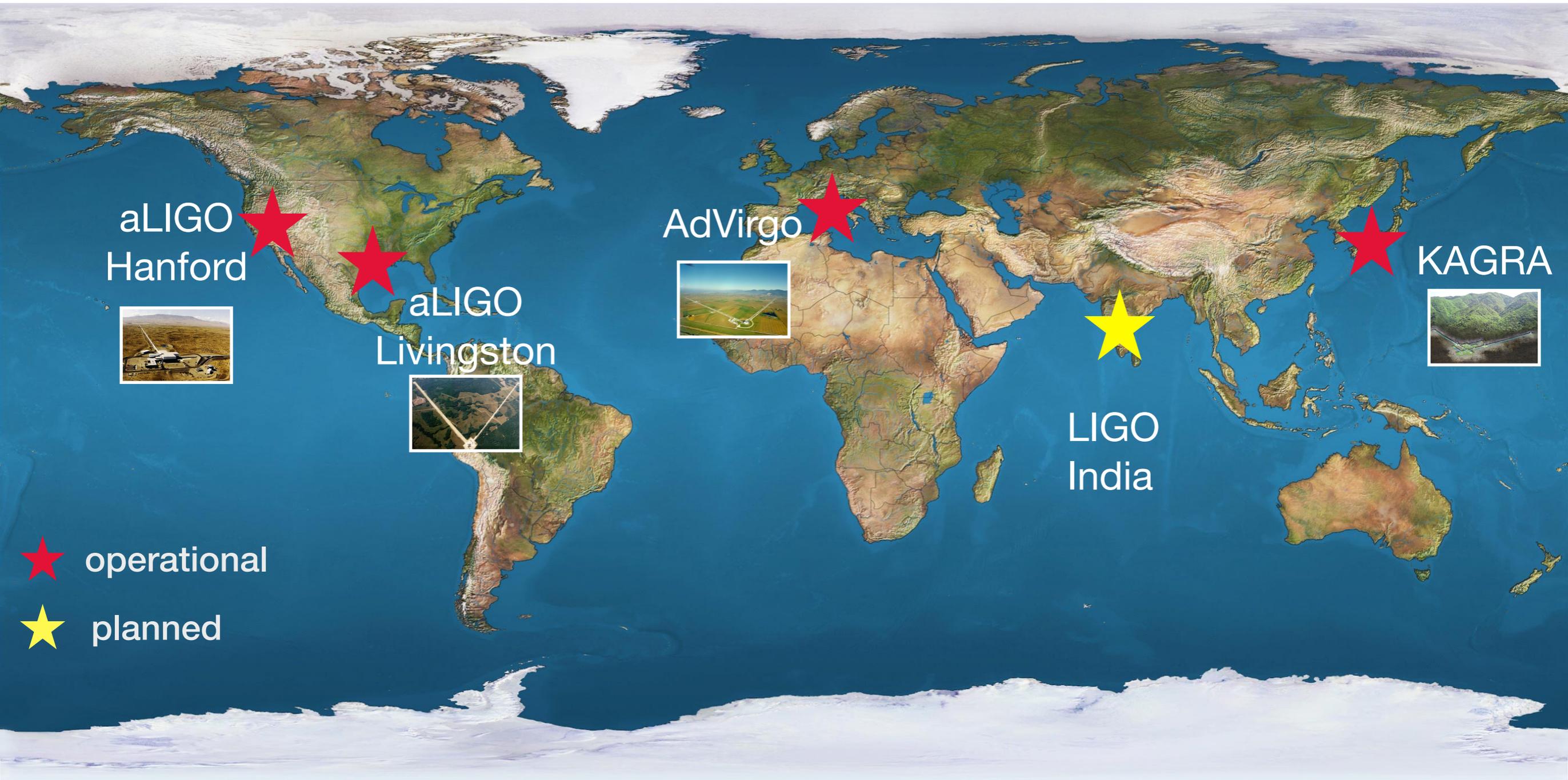
$$h = \simeq 10^{-21}$$



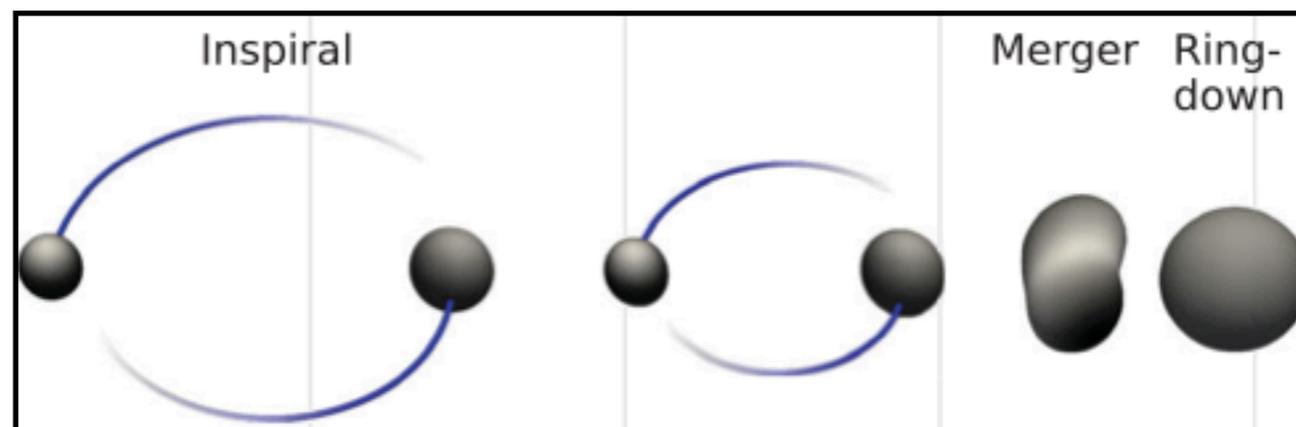
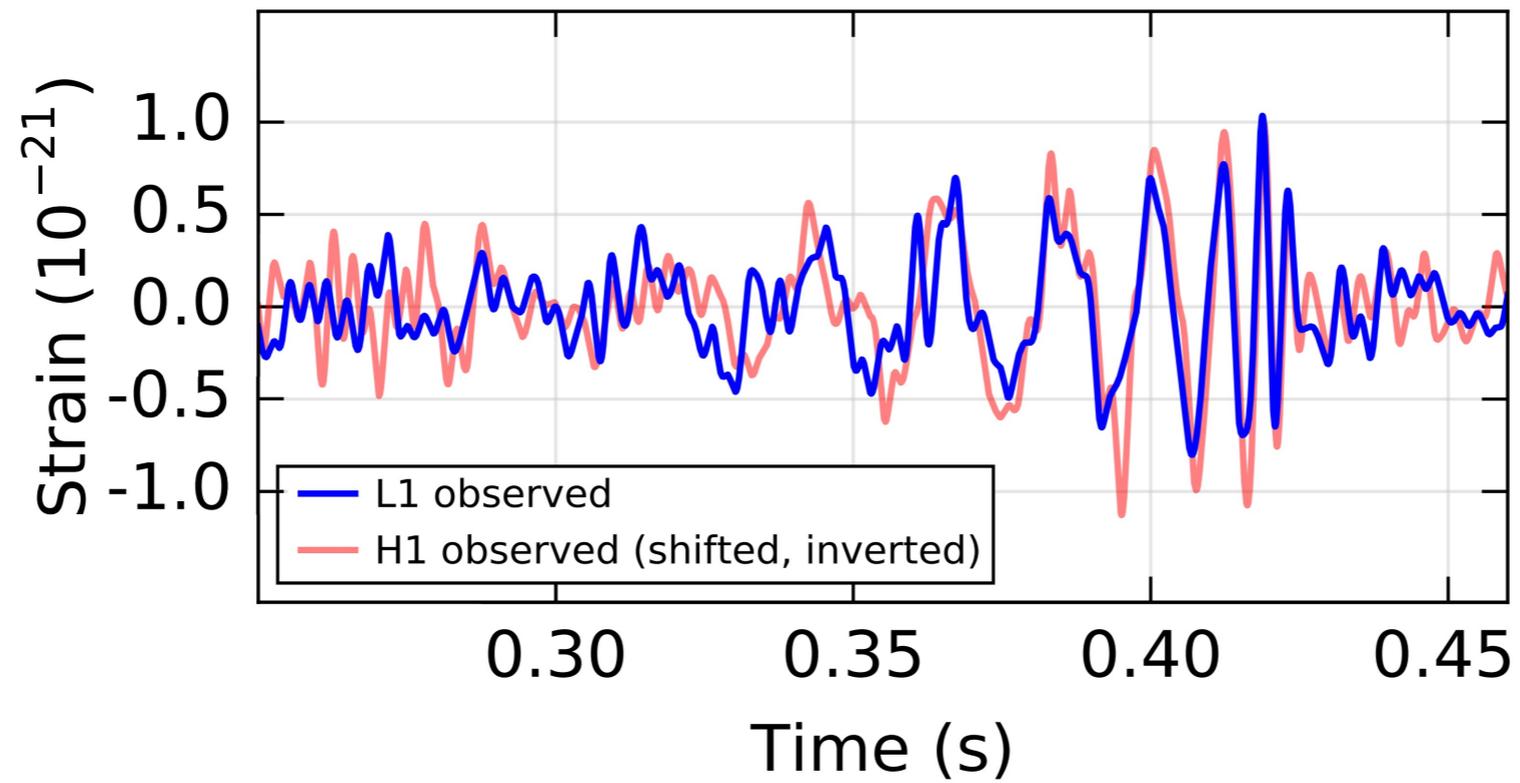
Détecteur Virgo



Réseau de détecteurs d'OG de deuxième génération



Première détection : fusion de deux trous noirs (2015)





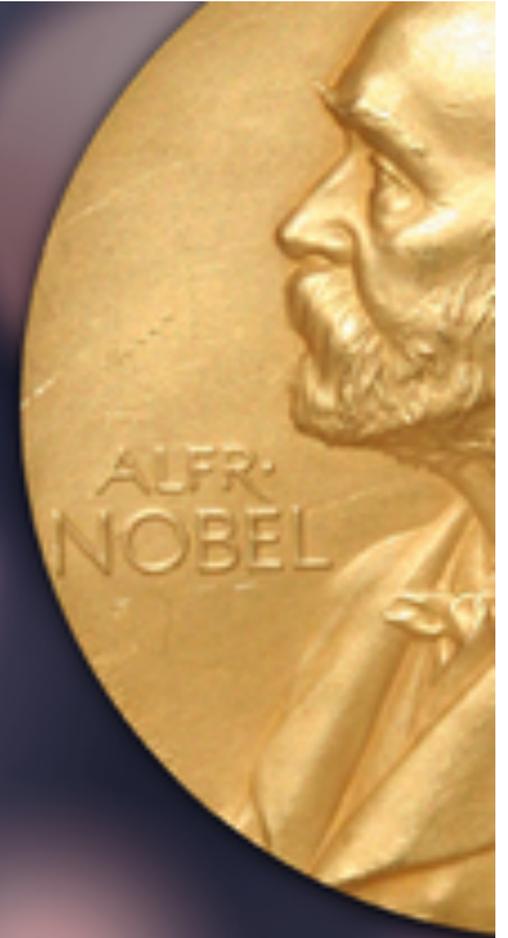
Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)

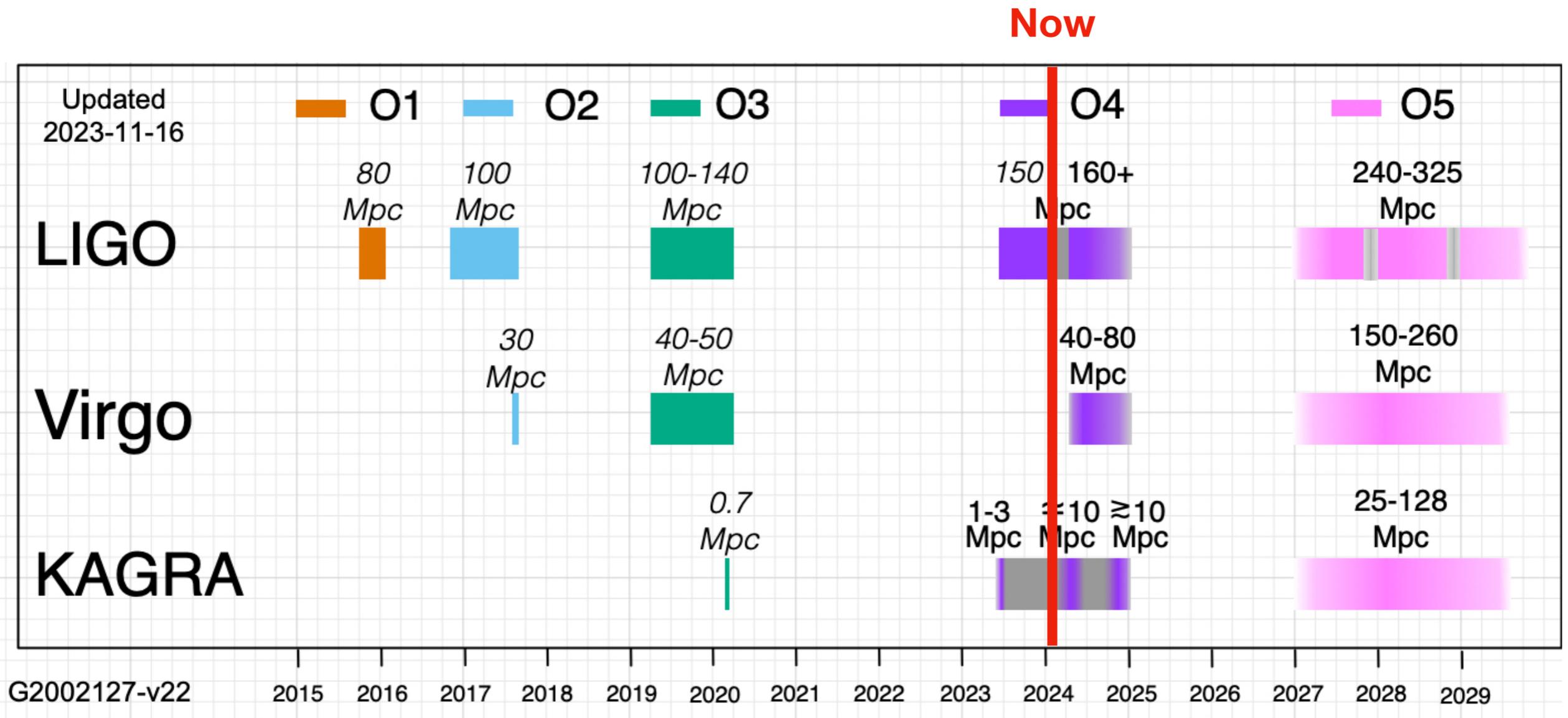


Rainer Weiss (MIT)

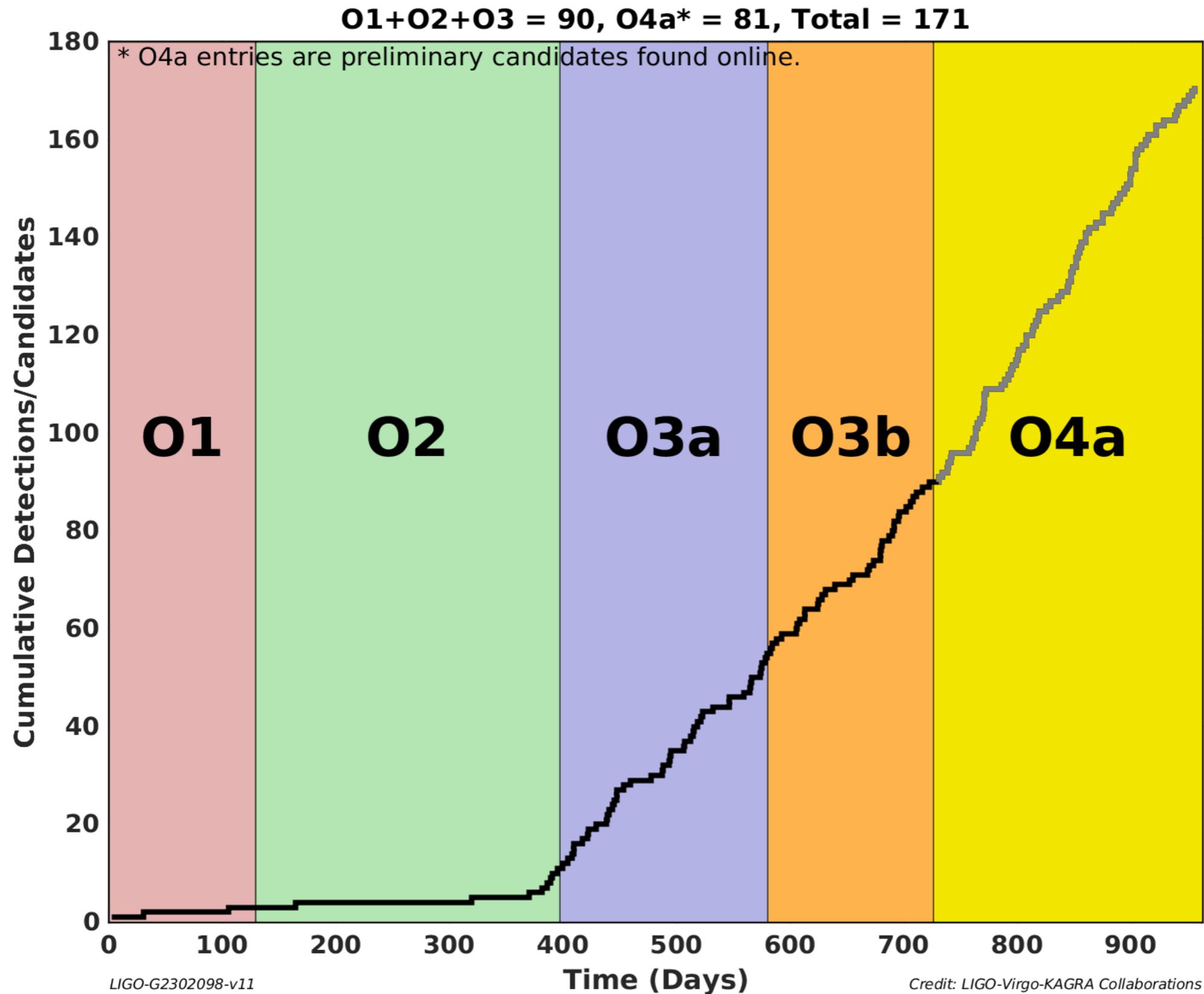


2017 Nobel Prize in Physics

Résumé des observations ?



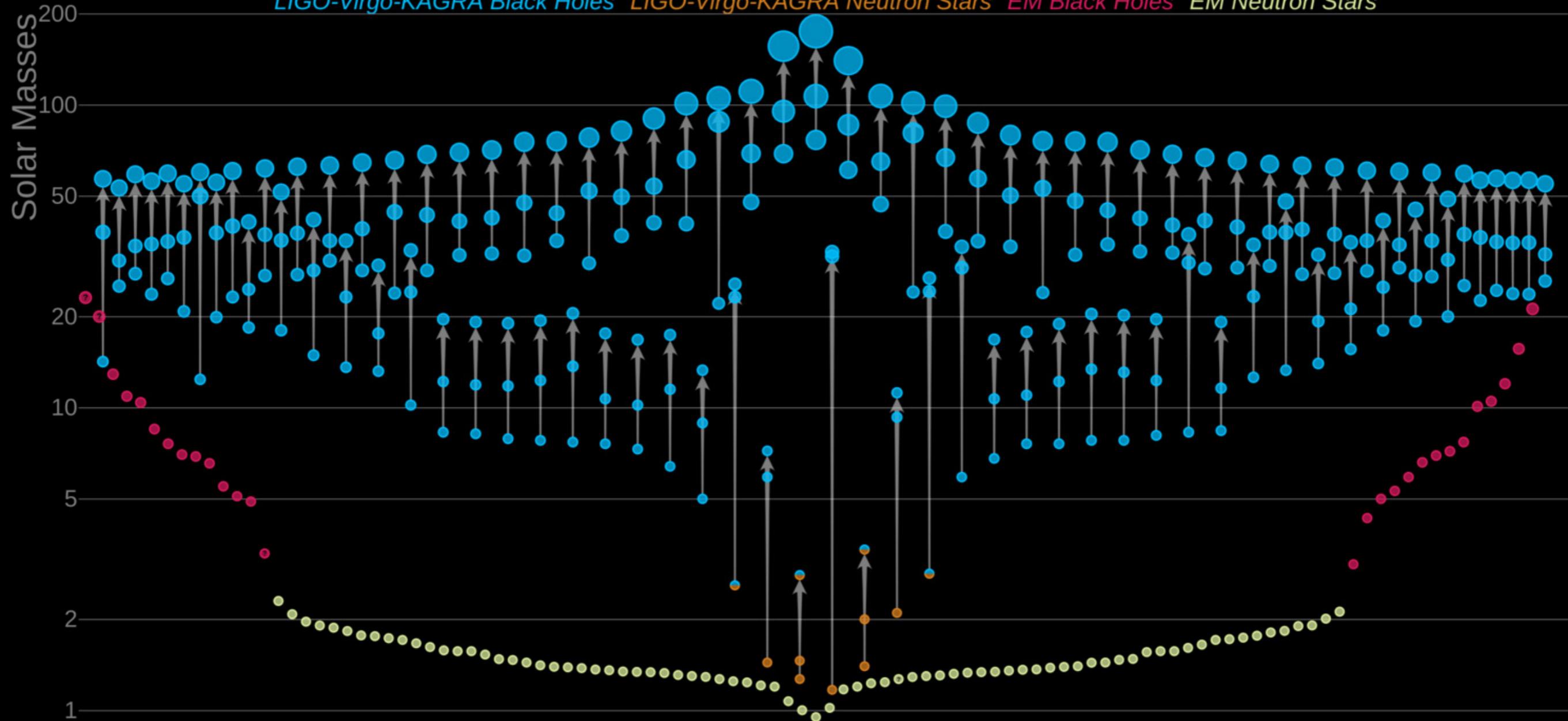
Résumé des observations



Résumé des observations jusqu'au 2022

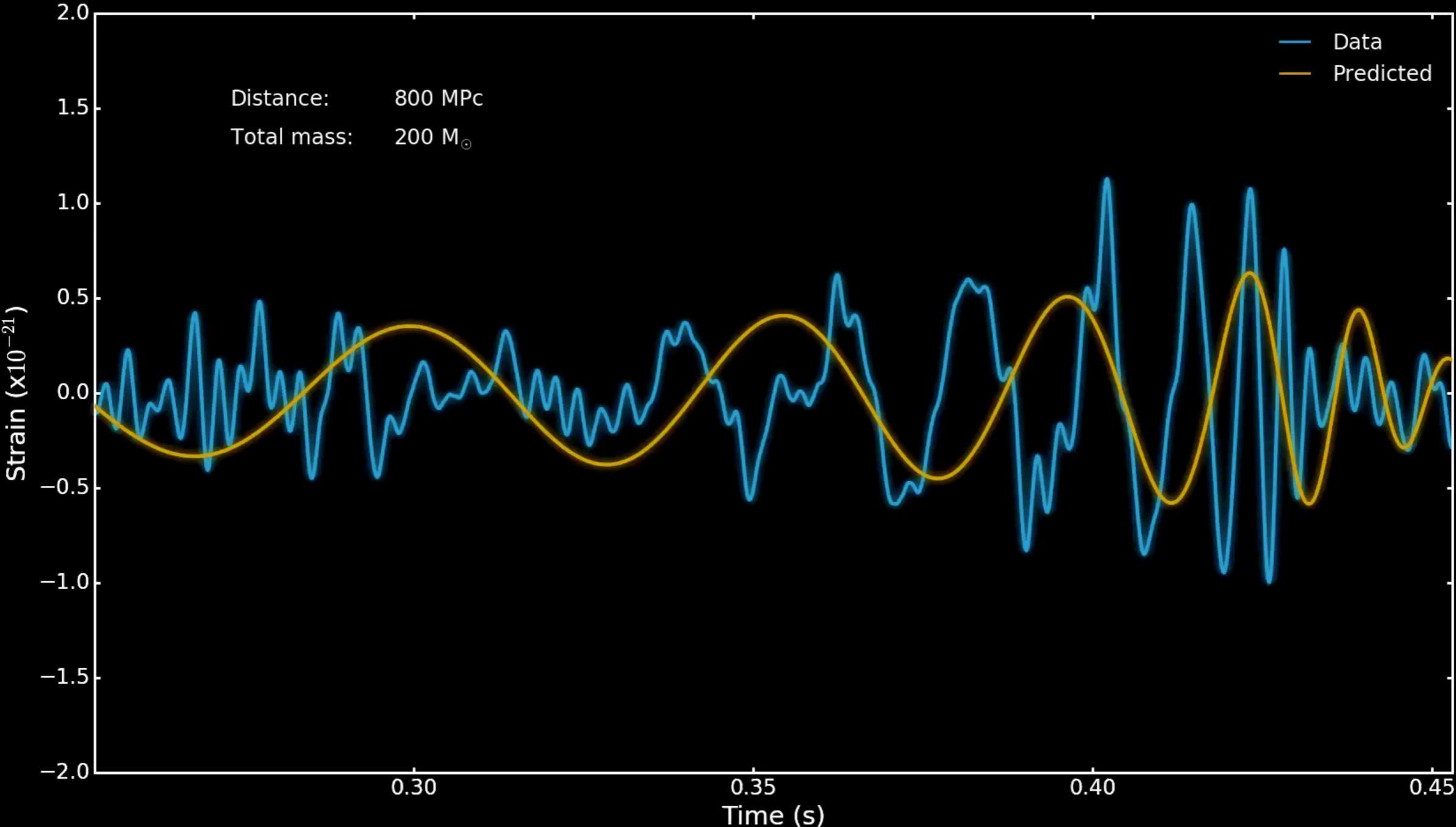
Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes *LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars* *EM Black Holes* *EM Neutron Stars*



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

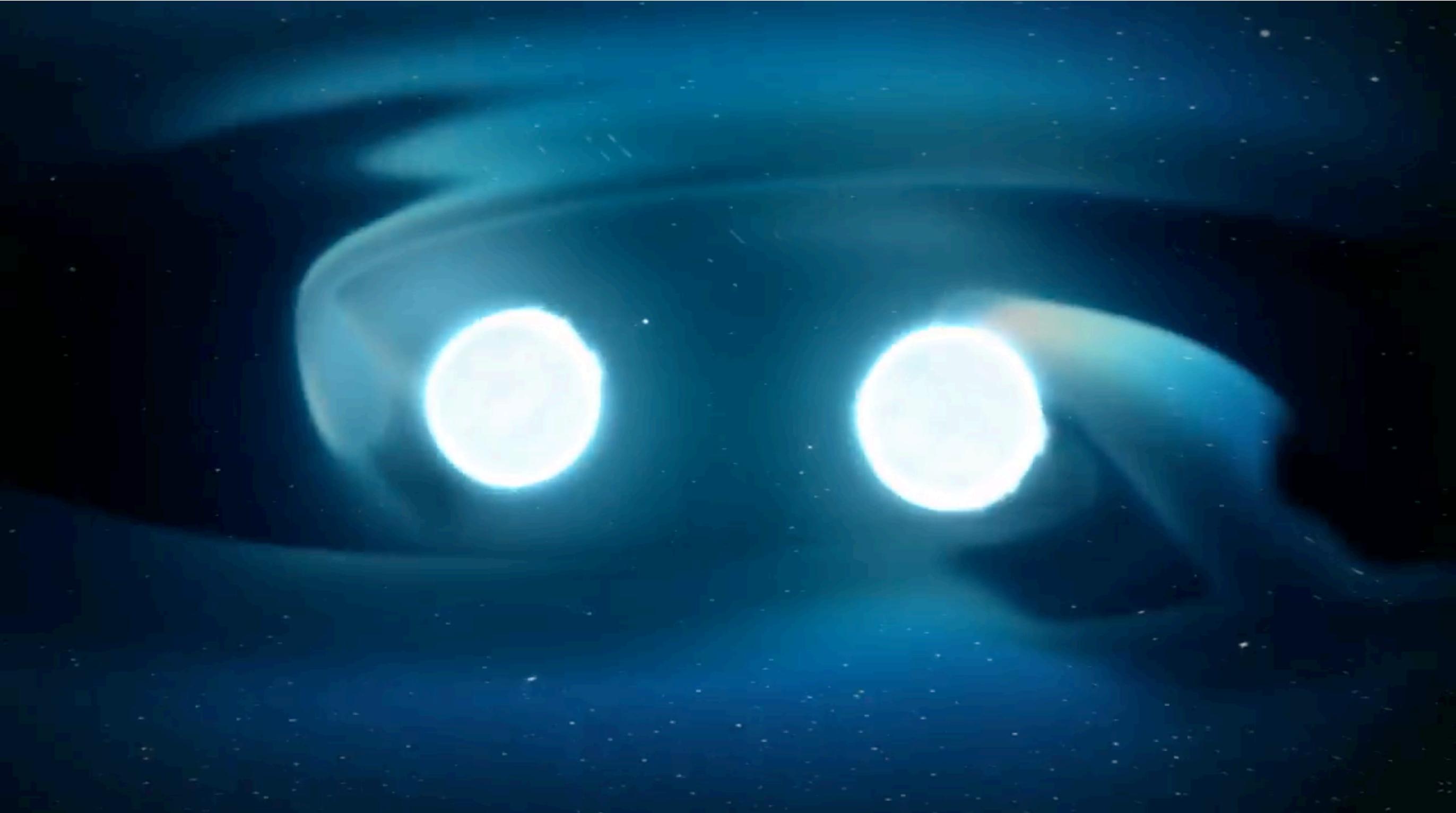
Extraction d'informations sur la source à partir de la forme d'onde



Data & Best-fit Waveform: LIGO Open Science Center (losc.ligo.org); Prediction & Animation: C.North/M.Hannam (Cardiff University)

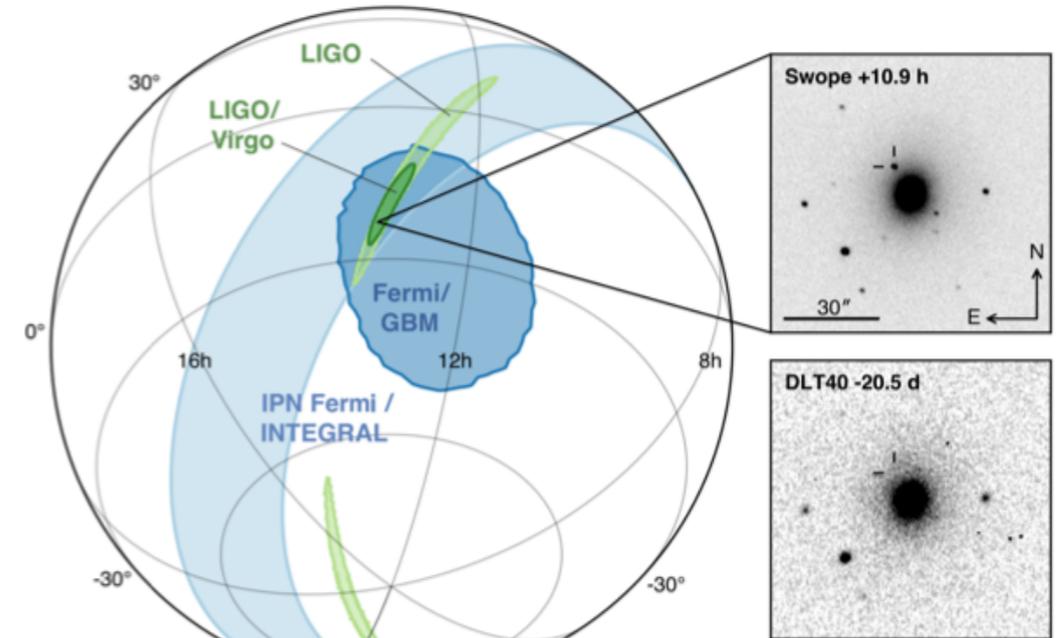
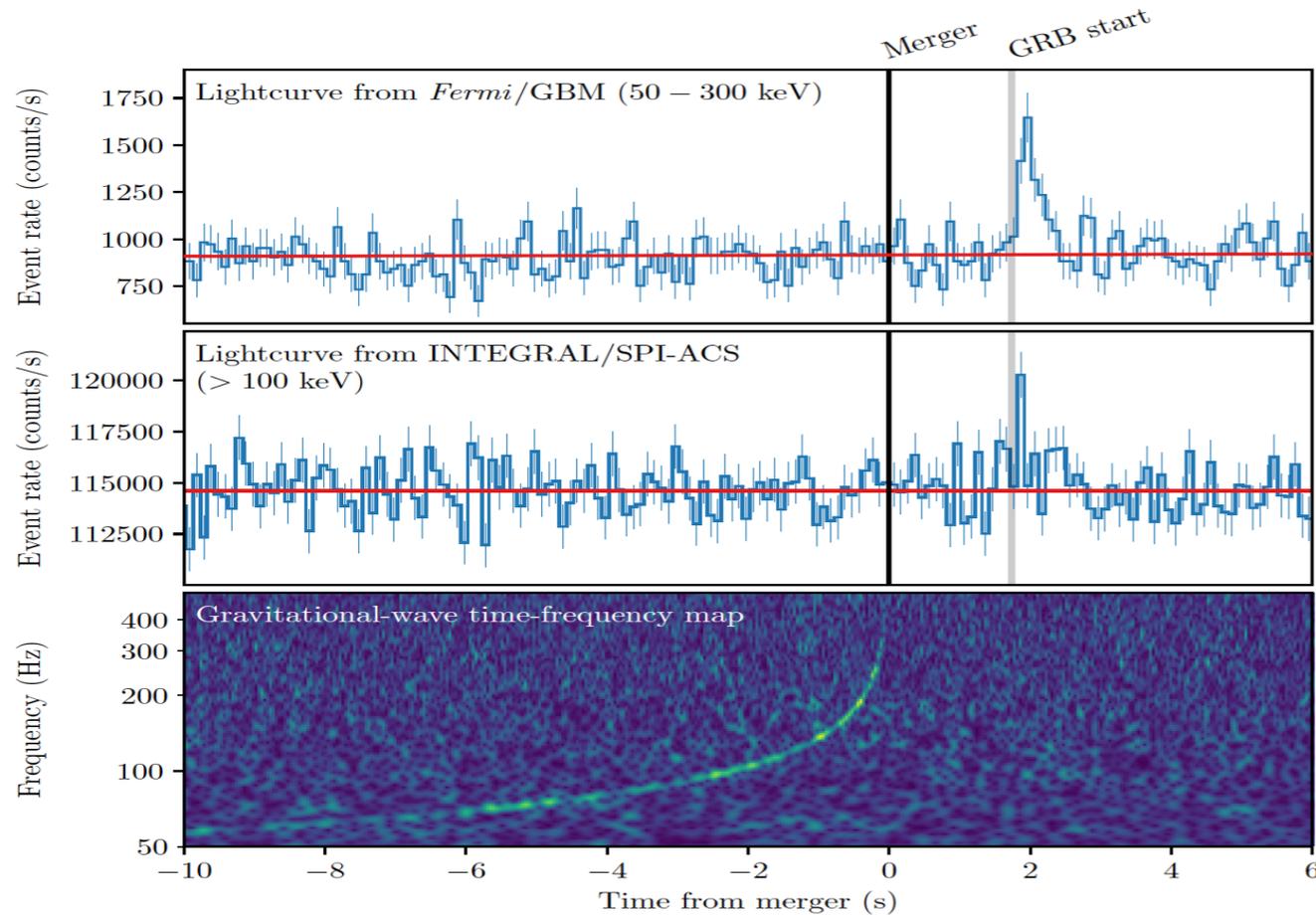
Première détection d'une fusion d'étoiles à neutrons

17 aout 2017



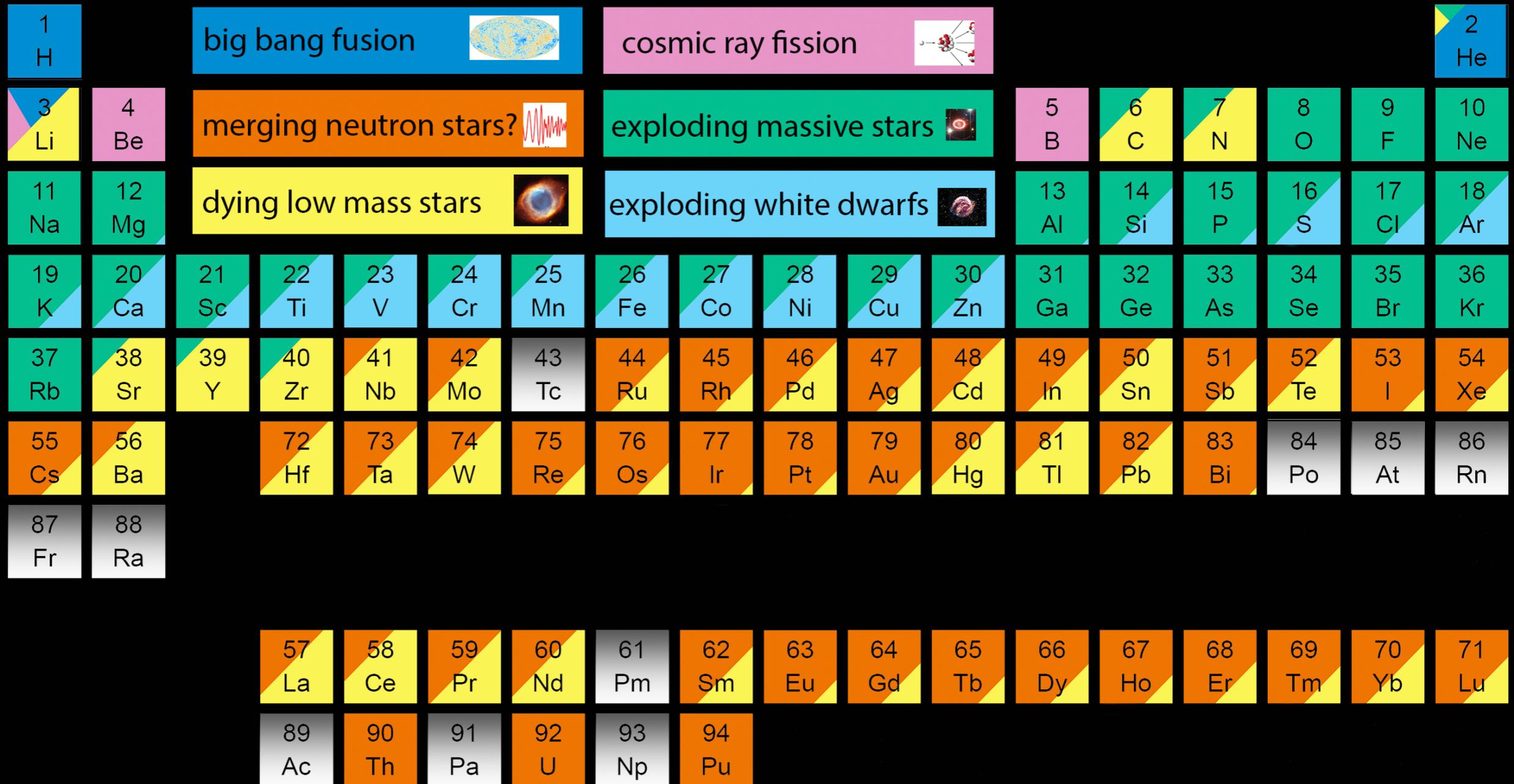
Link to the video: <https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20171016v2>

..avec une contrepartie électromagnétique



- Coïncidence avec du sursaut gamma court
- Localisation précise grâce à la présence de 3 détecteurs
- Observation de la kilonova

The Origin of the Solar System Elements



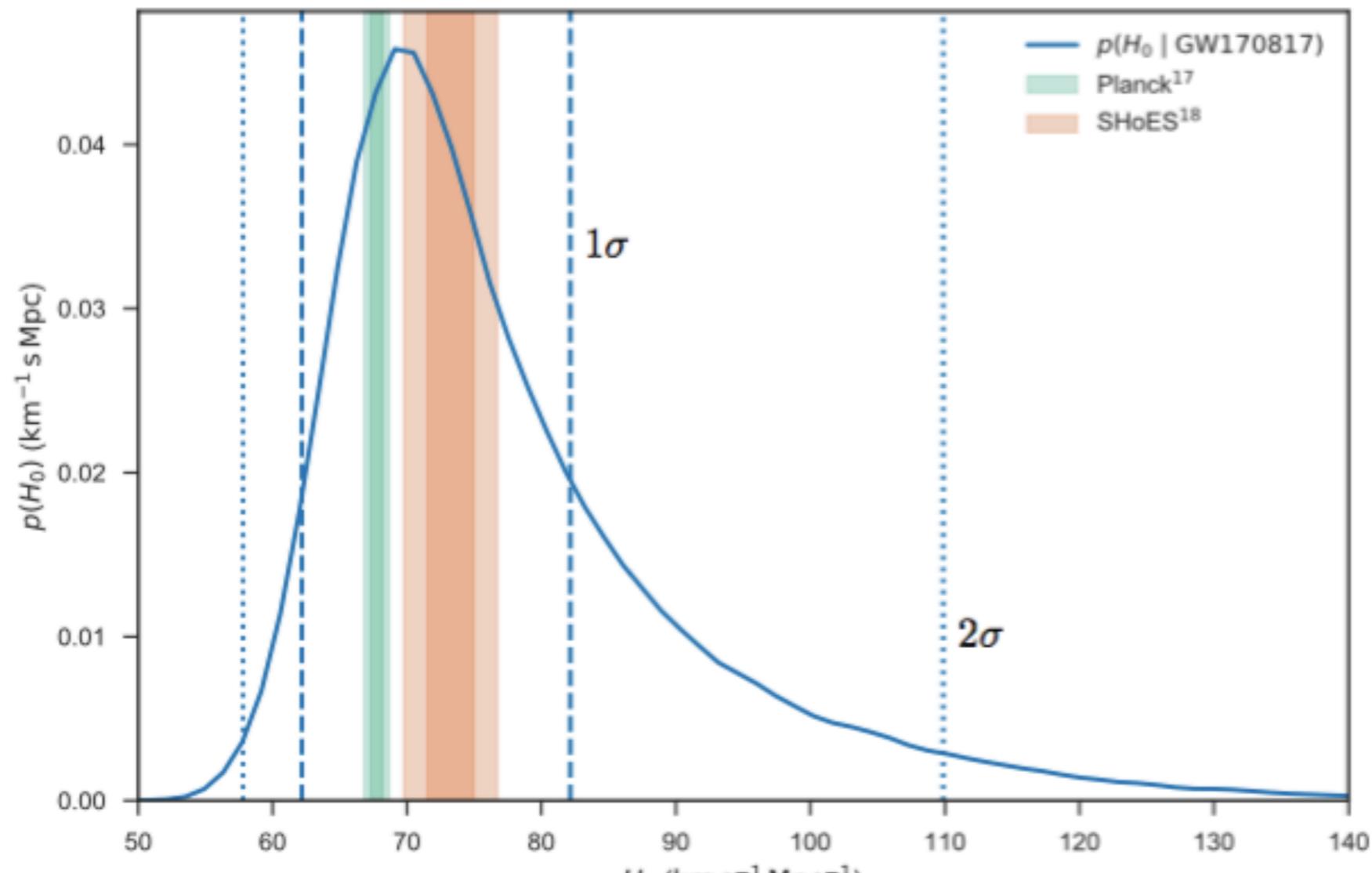
Graphic created by Jennifer Johnson
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/nucleo/>

Astronomical Image Credits:
 ESA/NASA/AASNova

Une mesure indépendante de la constante de Hubble

« *A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant* »,
Nature **551**, 85–88 (02 November 2017)

$$v = H_0 D$$



$$H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

Ondes gravitationnelle: résultats scientifiques

- Un nouveau messenger profondément différent de ceux utilisés jusqu'à présent pour observer l'univers
- Possibilité d'observer des phénomènes qui étaient cachés

Résultats scientifiques

- **Relativité générale**

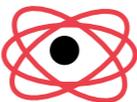
- Test de la relativité générale en régime de champ fort
- Propriétés des OG en accord avec la relativité générale

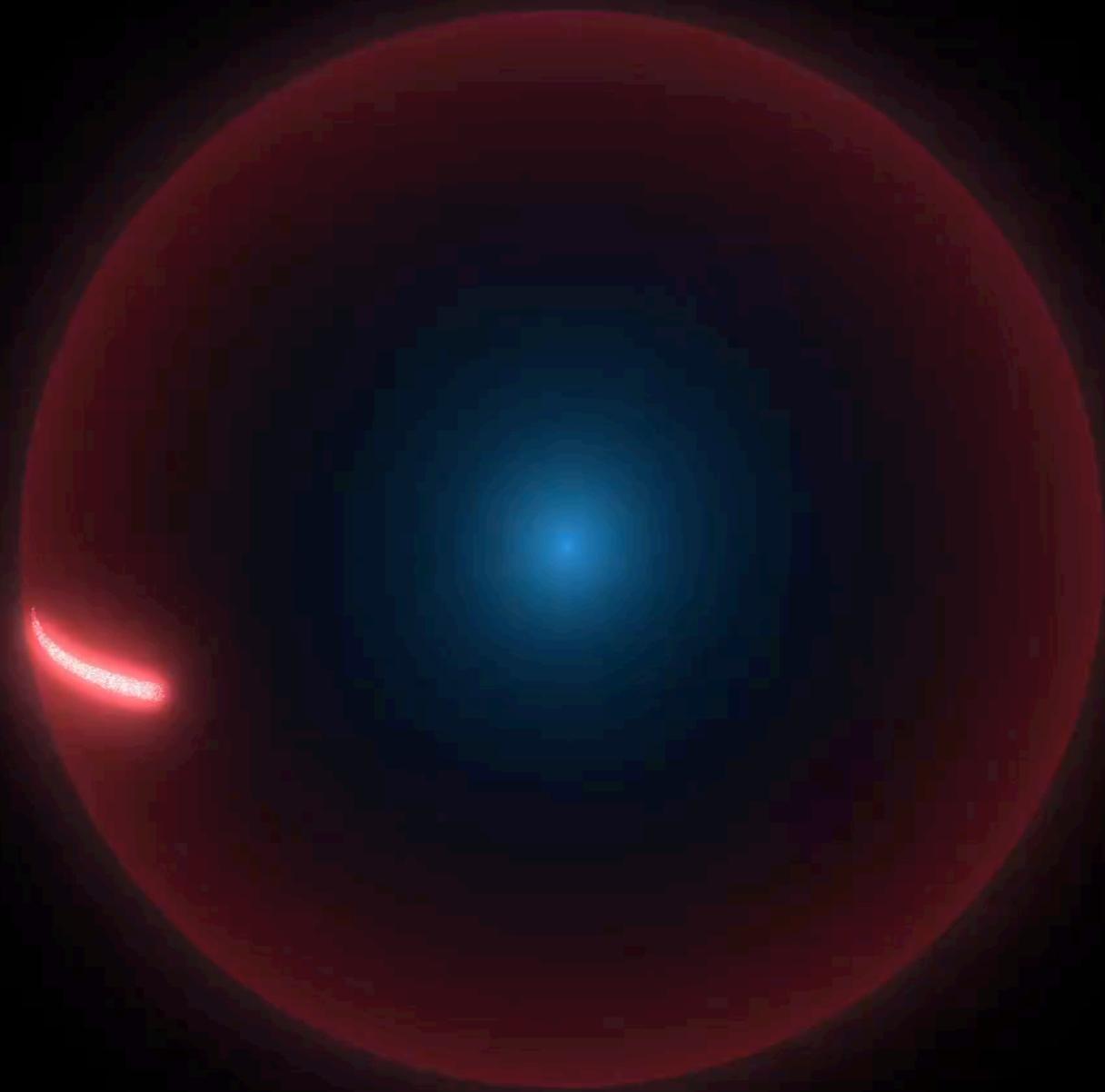
- **Astrophysique et cosmologie**

- Observation des fusions des trous noirs
- Observation des fusions des étoile a neutron noirs + de la contrepartie EM (et des phénomènes associés)
- Origine du sursaut gamma court et des éléments lourds
- Mesure indépendante de la constante de Hubble
- Nature de la matière à l'intérieur des étoiles à neutrons
- Etude des propriétés de l'ensemble de la population des trous noirs

Comment on détecte les ondes gravitationnelles ?

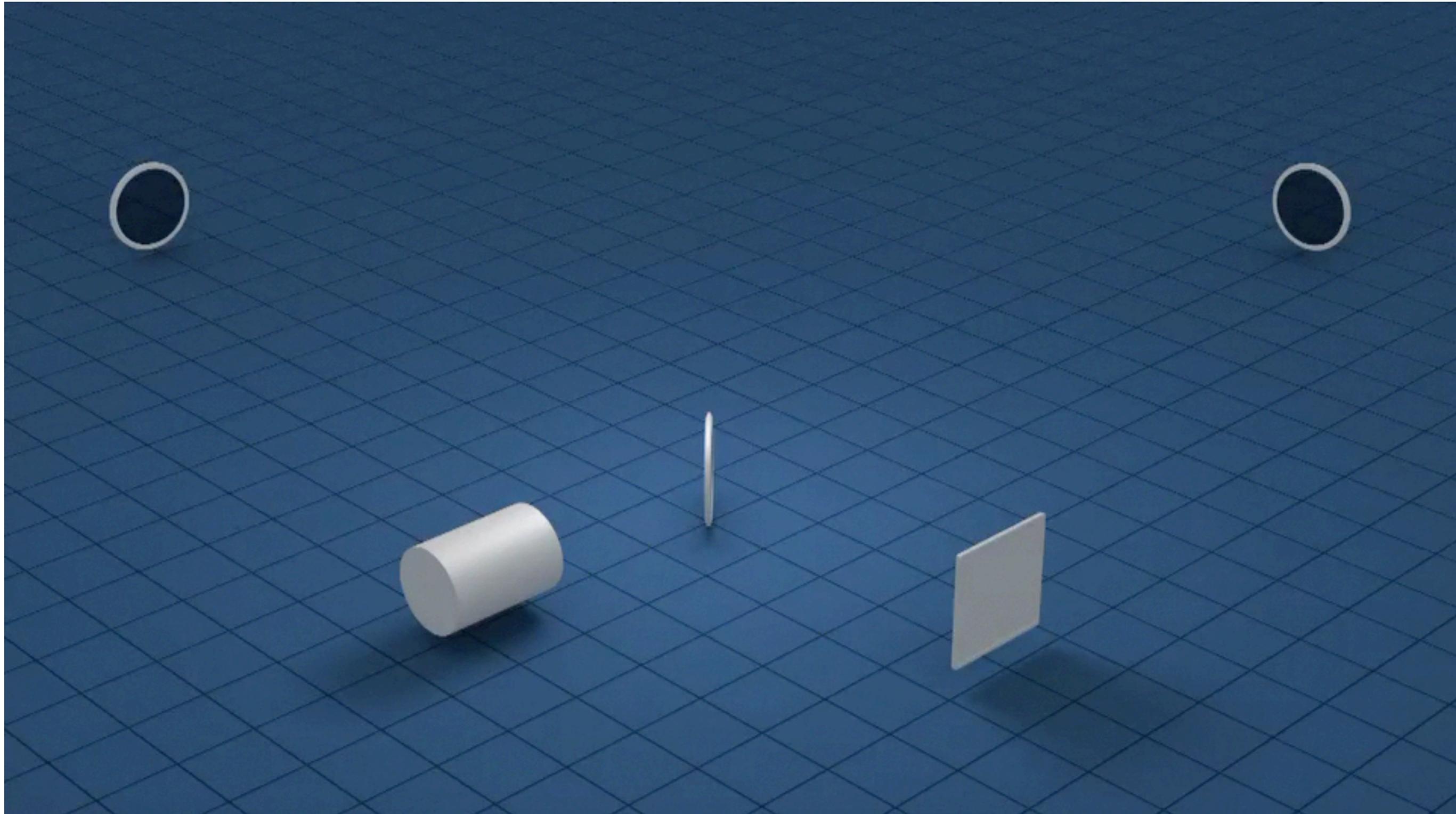
10^{-18} m ?

		1 m
÷10,000		cheveux $\sim 10^{-4}$ m (0.1 mm)
÷100		Longueur d'onde de la lumière $\sim 10^{-6}$ m
÷10,000		Atome 10^{-10} m
÷100,000		Noyau 10^{-15} m
÷1,000		Onde gravitationnelle 10^{-18} m



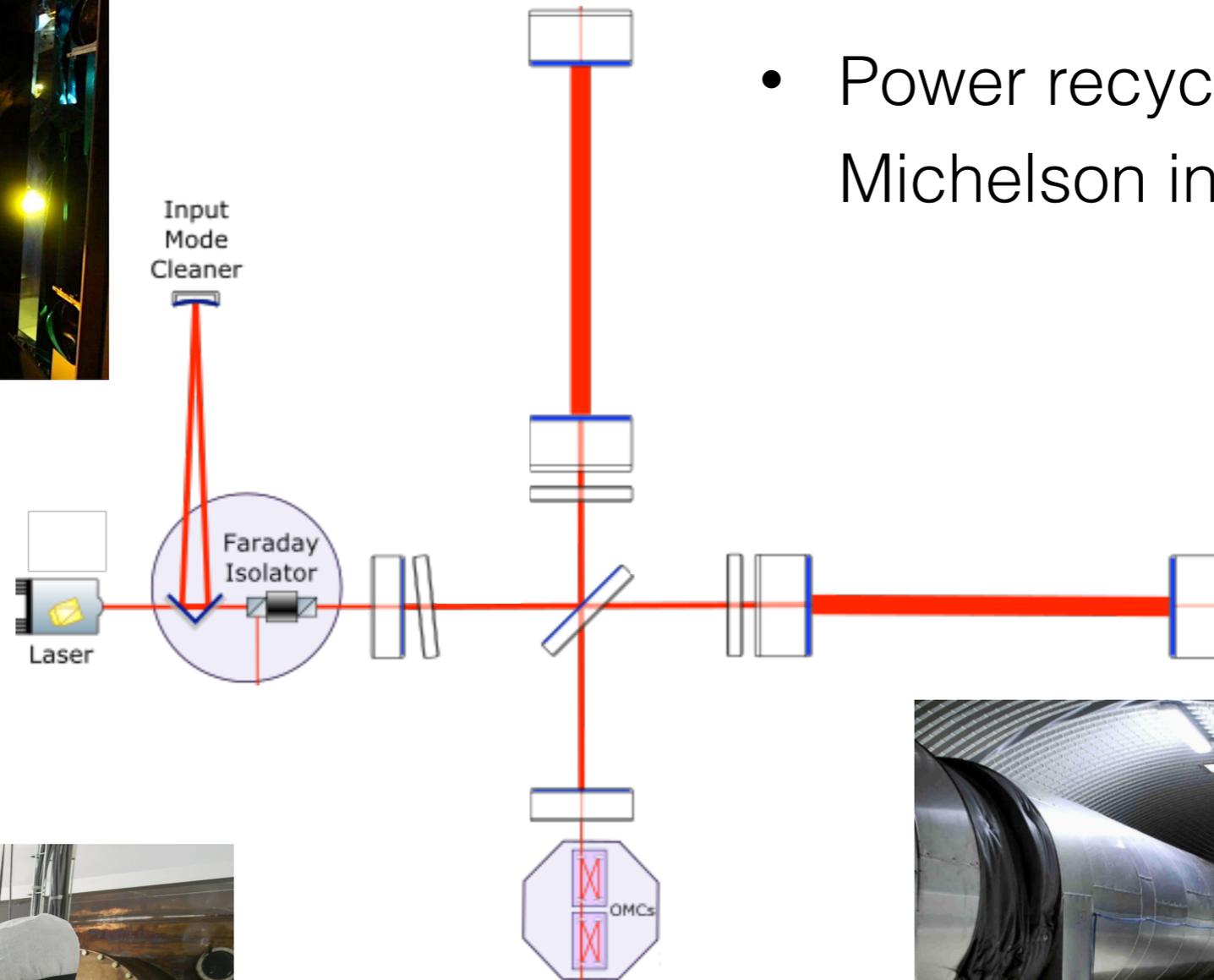
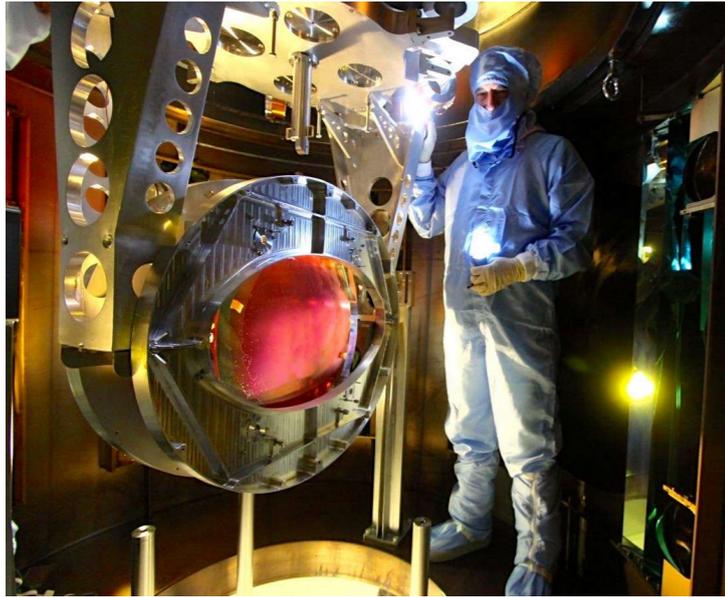
Link to the video: <https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v8>

Principe de détection: interféromètre de Michelson



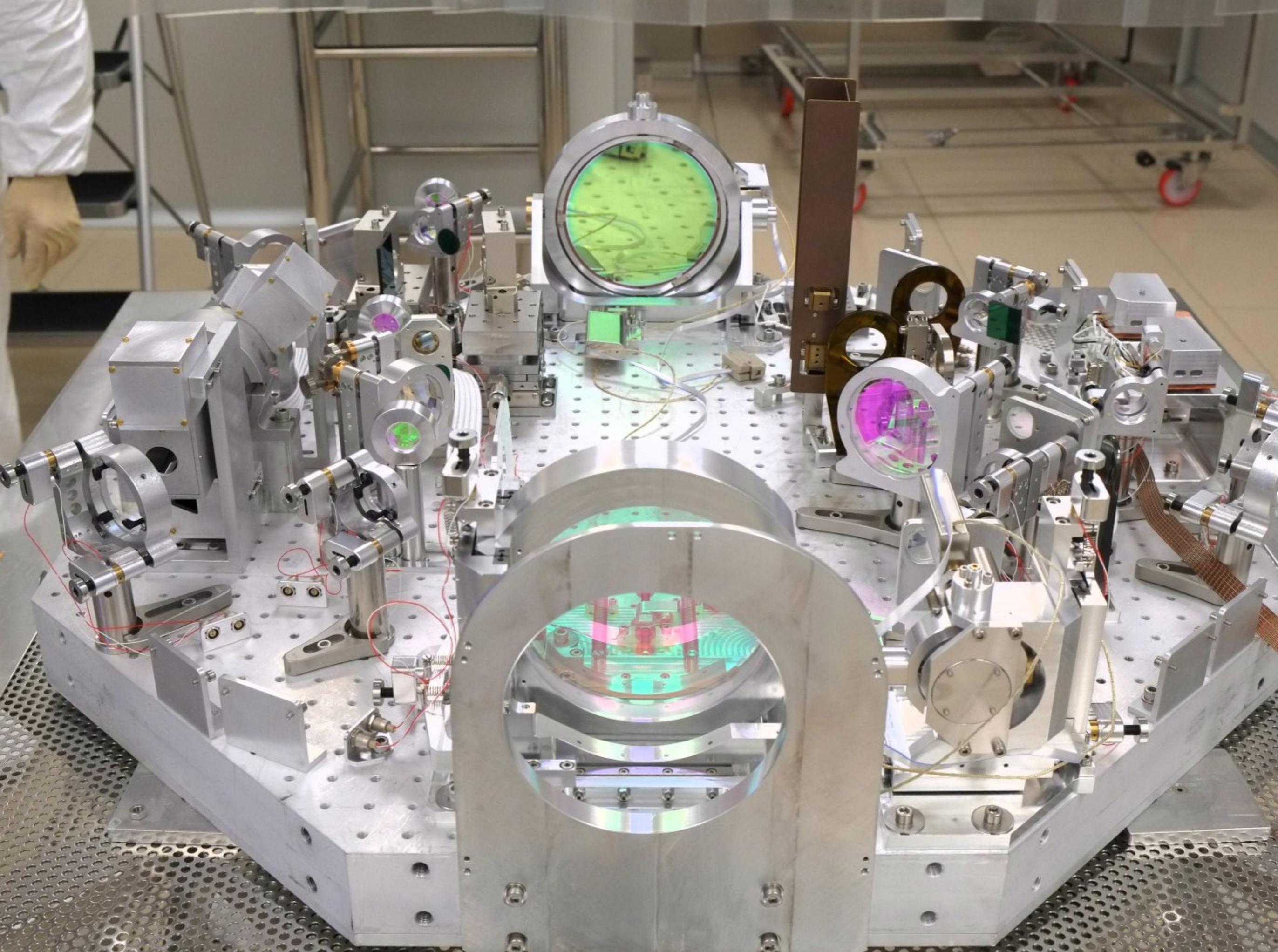
Link to the video: <https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v6>

Un détecteur réel



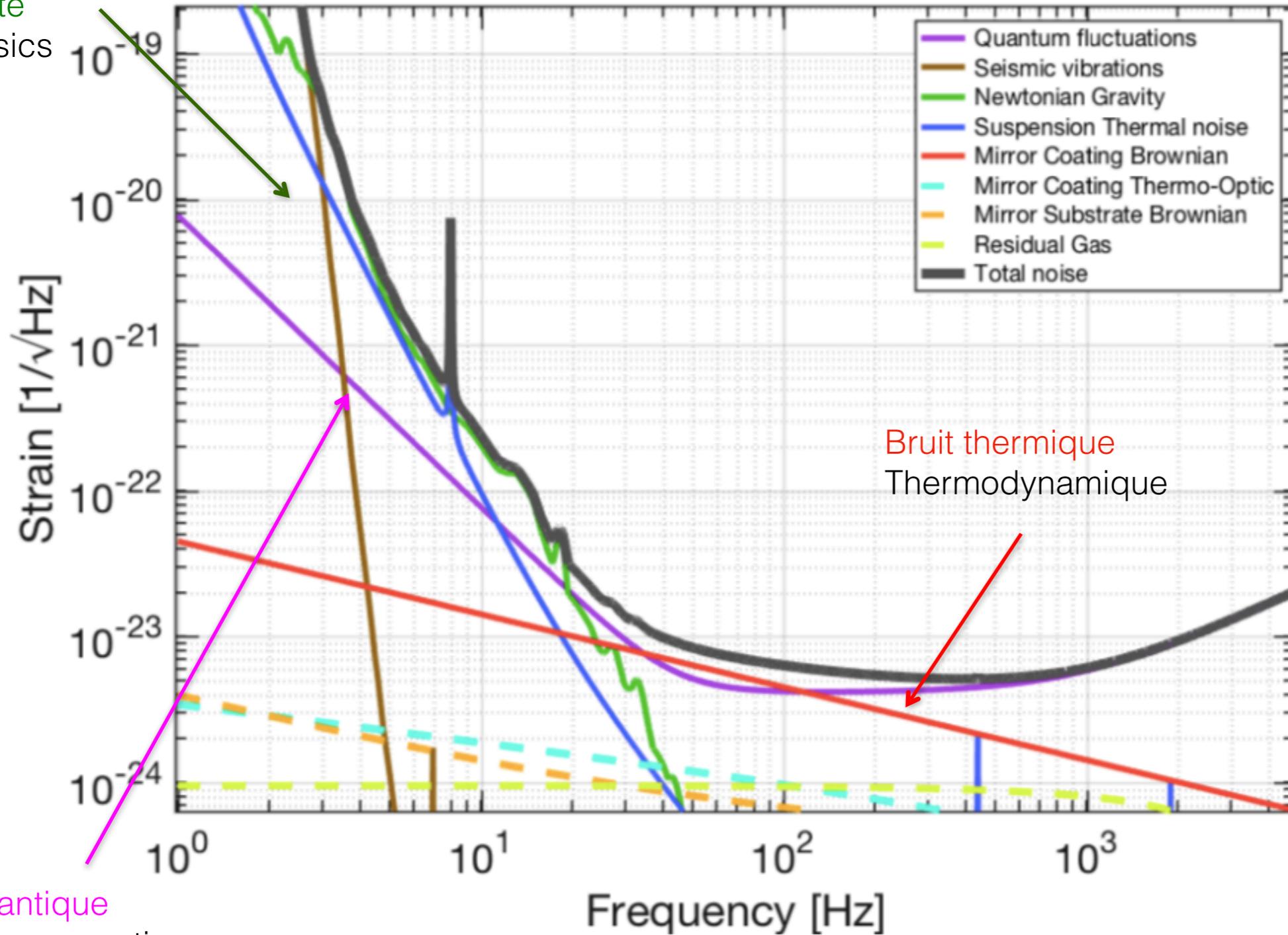
- Power recycled Fabry-Perot Michelson interferometer





La courbe de sensibilité de Virgo

Bruit sismique et
bruit de gradient
de gravité
Geophysics



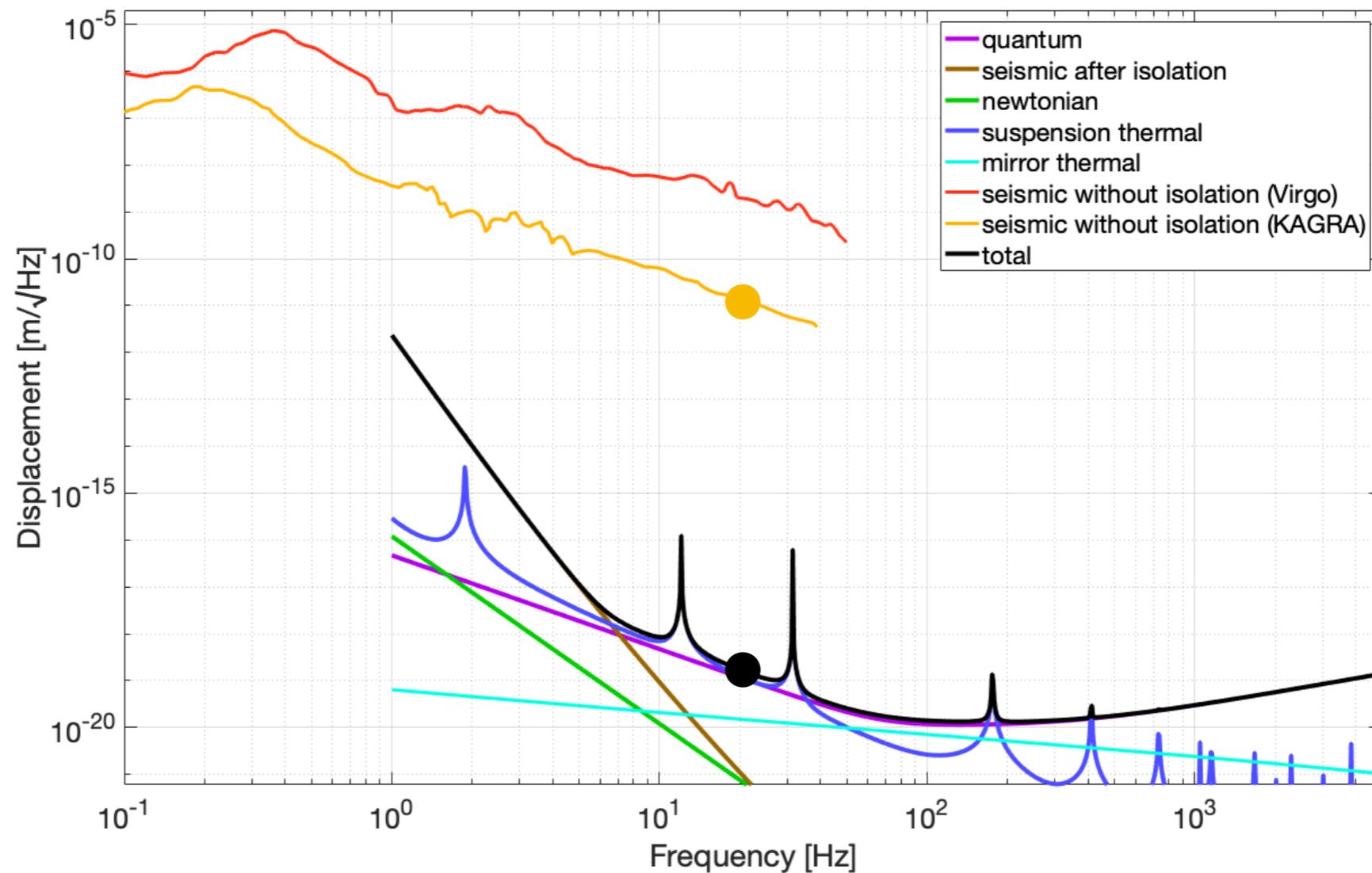
Bruit quantique
Mécanique quantique

Isolation des vibrations du sol

- Mouvement sismique à ~ 10 Hz: $\sim 10^{-9}$ m/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- Mouvement du miroir requis à ~ 10 Hz: $\sim 10^{-19}$ m/ $\sqrt{\text{Hz}}$

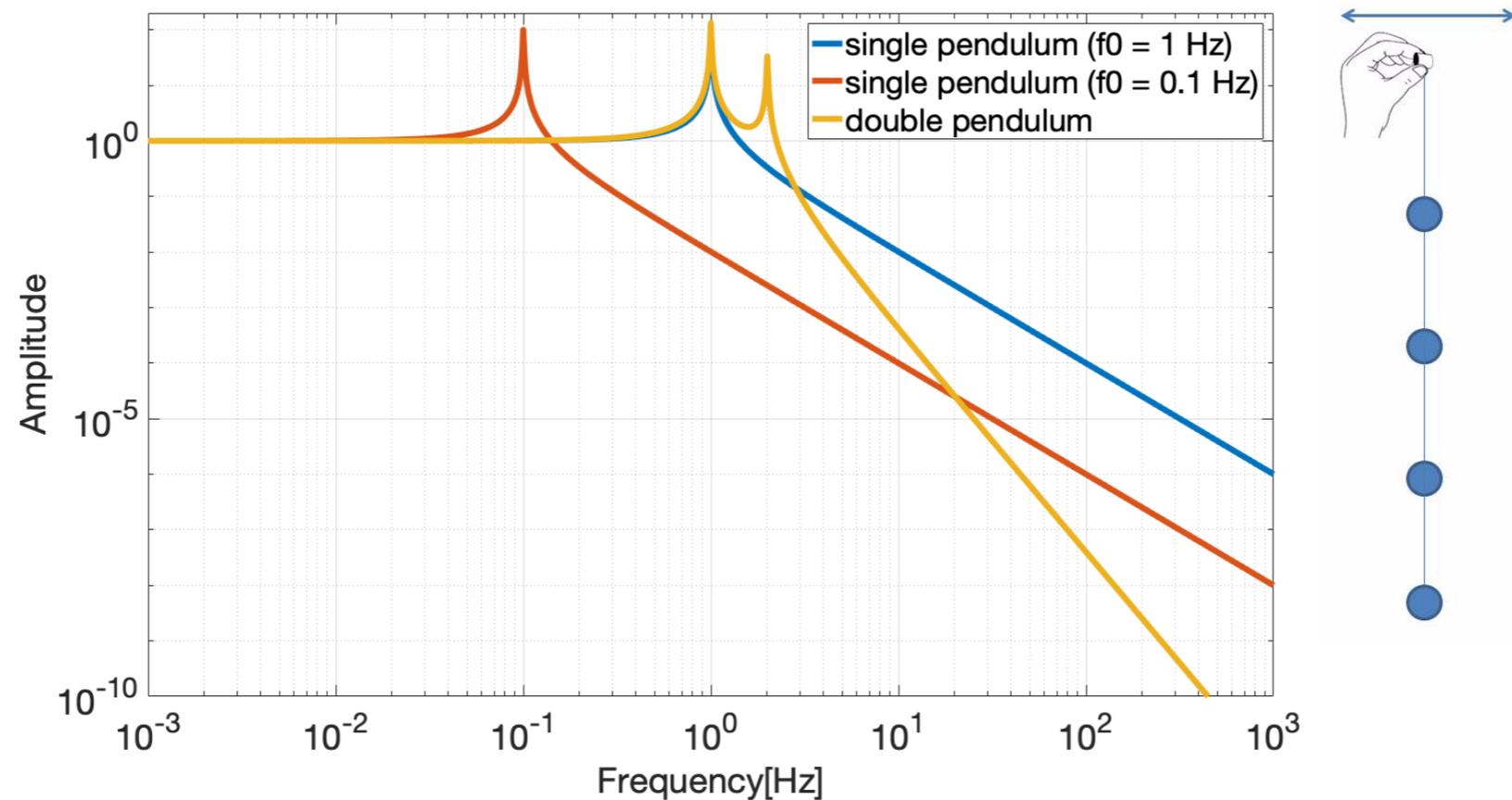


Un système d'isolation très performant est nécessaire (~ 10 ordres de grandeur)



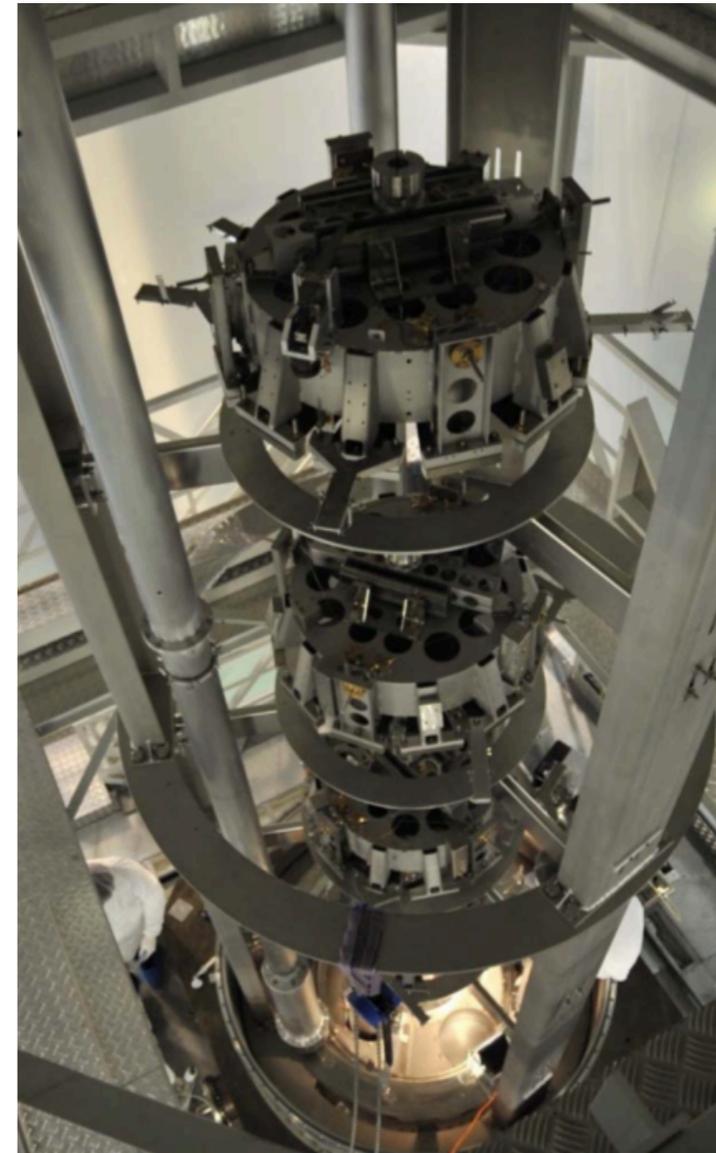
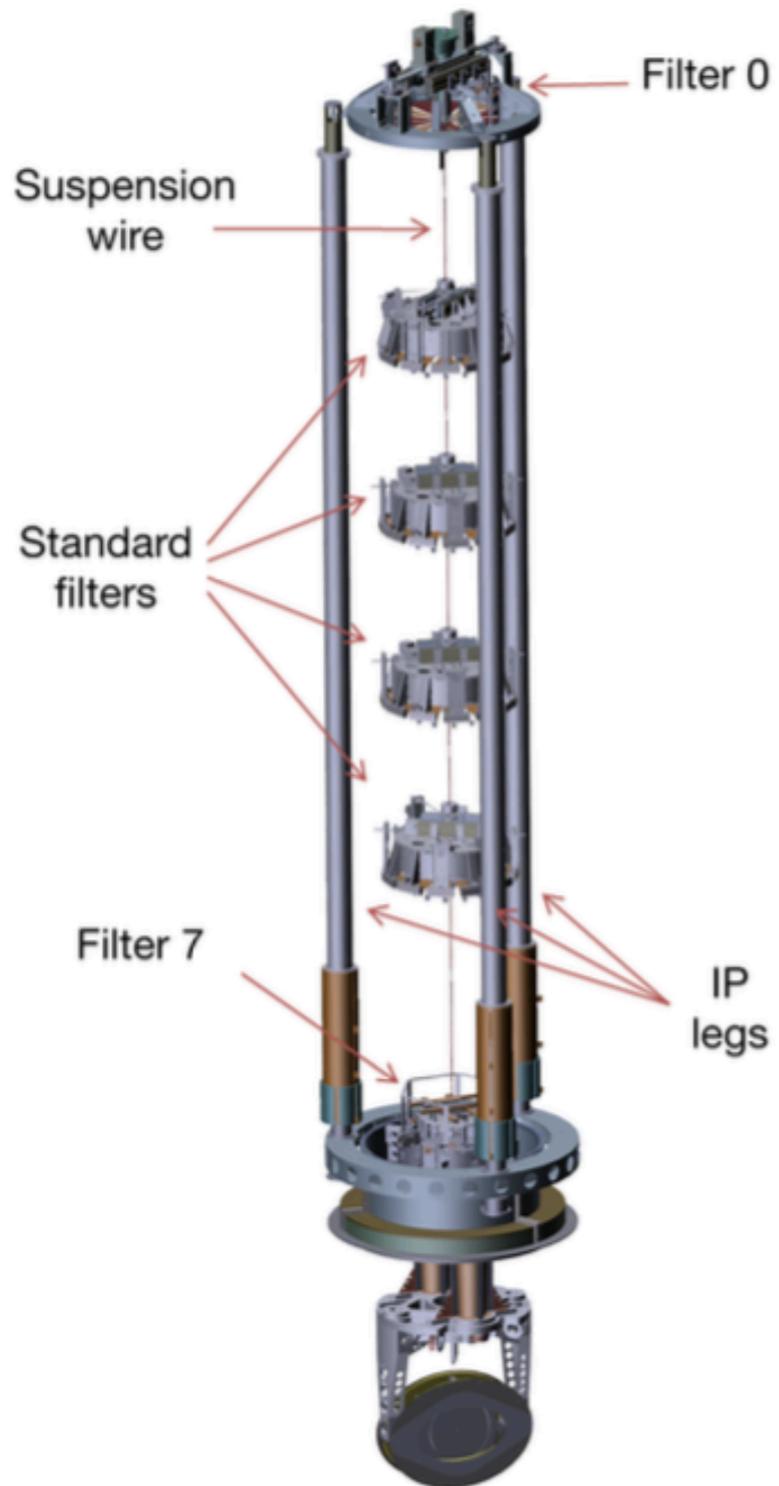
Systeme d'isolation des vibrations

- Systeme basé sur une chaîne de pendules pour isoler les miroirs des vibrations du sol.



Transfer function: motion of mirror/motion of support

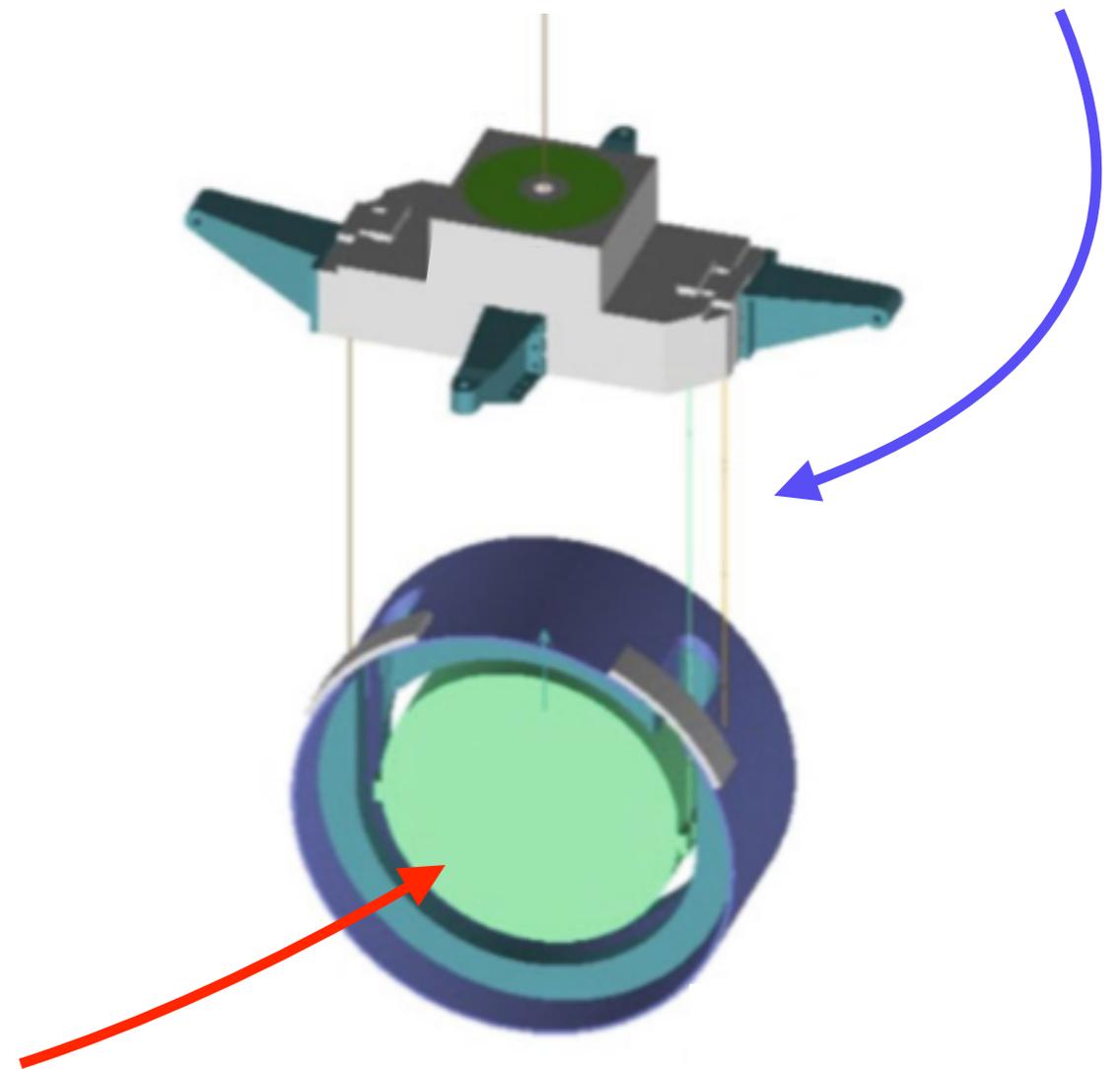
Virgo superattenuator



Bruit thermique

- Fluctuation thermique des atomes et molécules a cause de leur température
- Recherche de matériaux plus performants
- Cryogénie

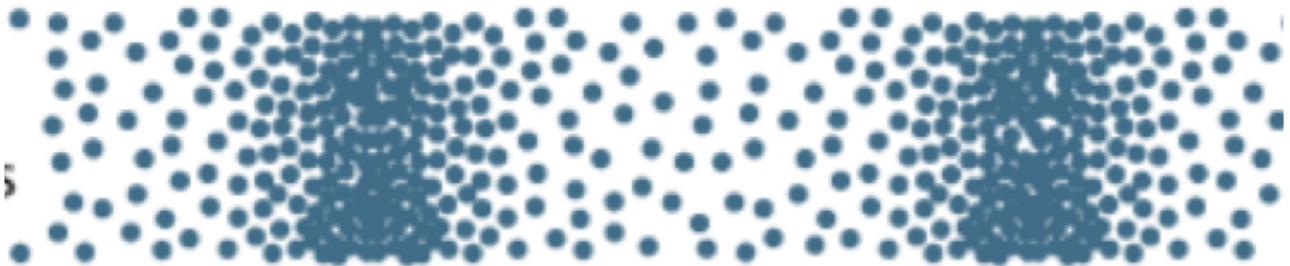
Bruit thermique de la suspension



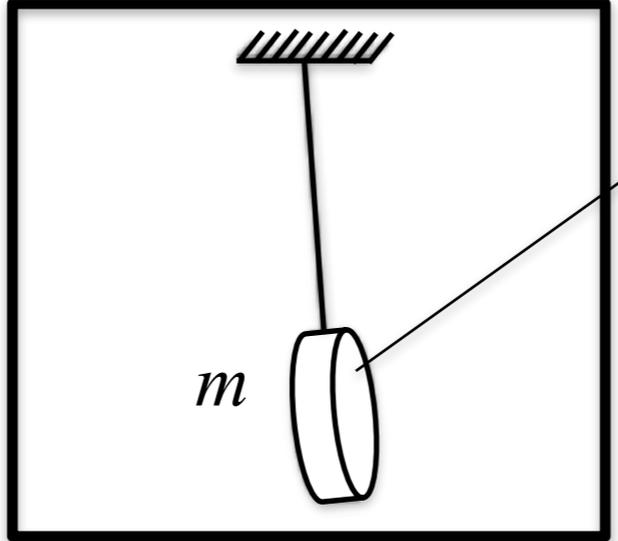
Bruit thermique du miroir

Bruit de gradient de gravité

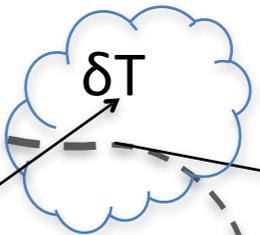
Molécules d'air



Ondes infrasonores

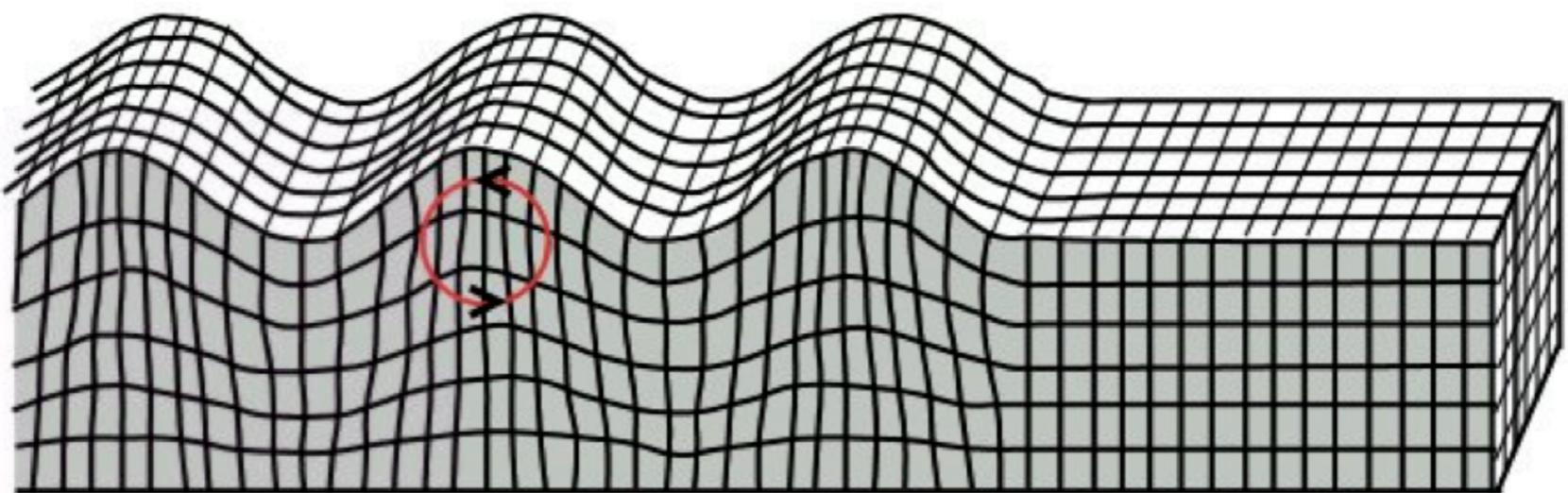


$r(t)$
Attraction gravitationnelle



$v(t)$

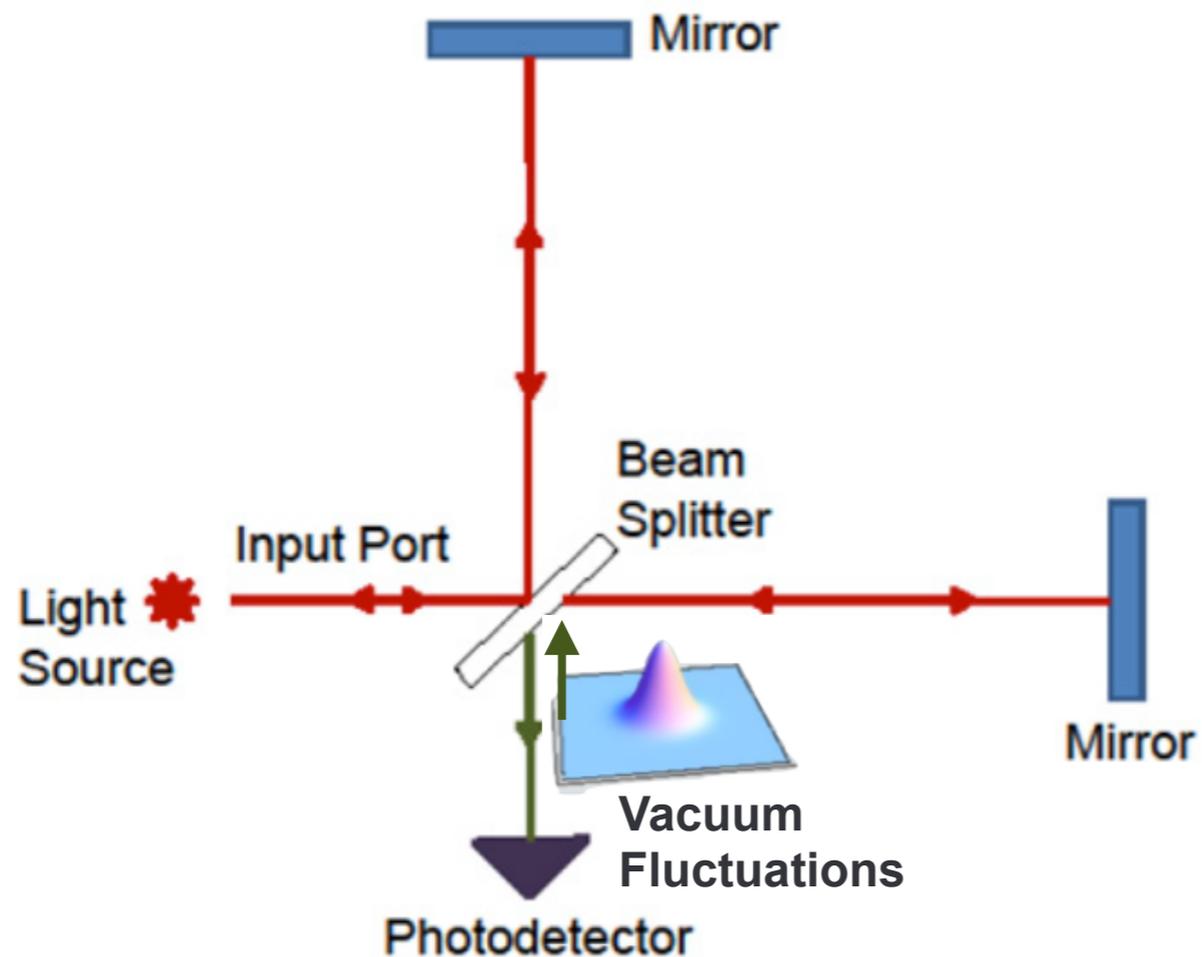
Fluctuations de température



Ondes Sismiques

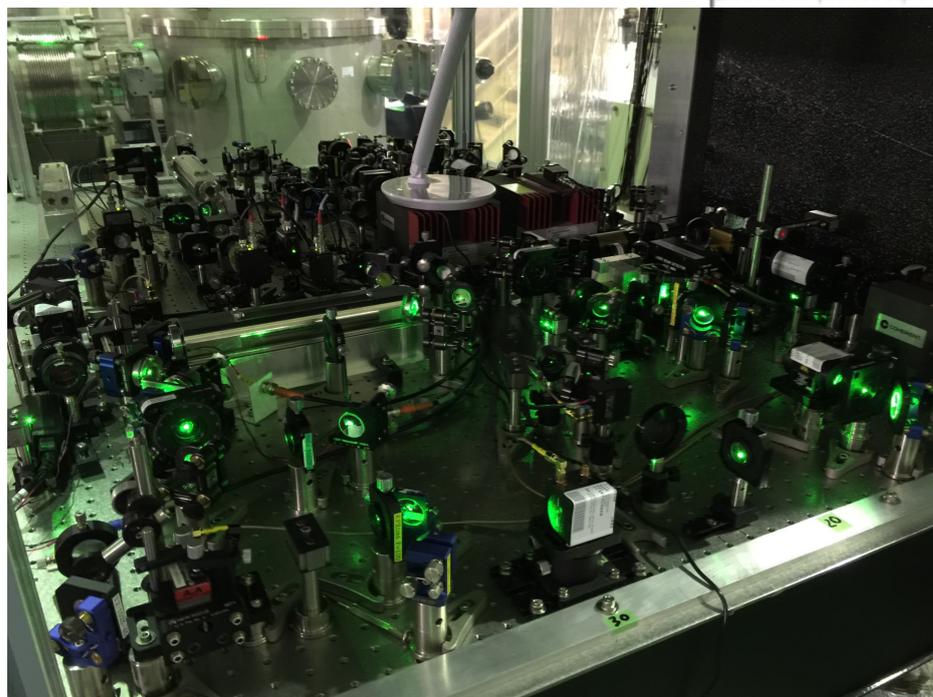
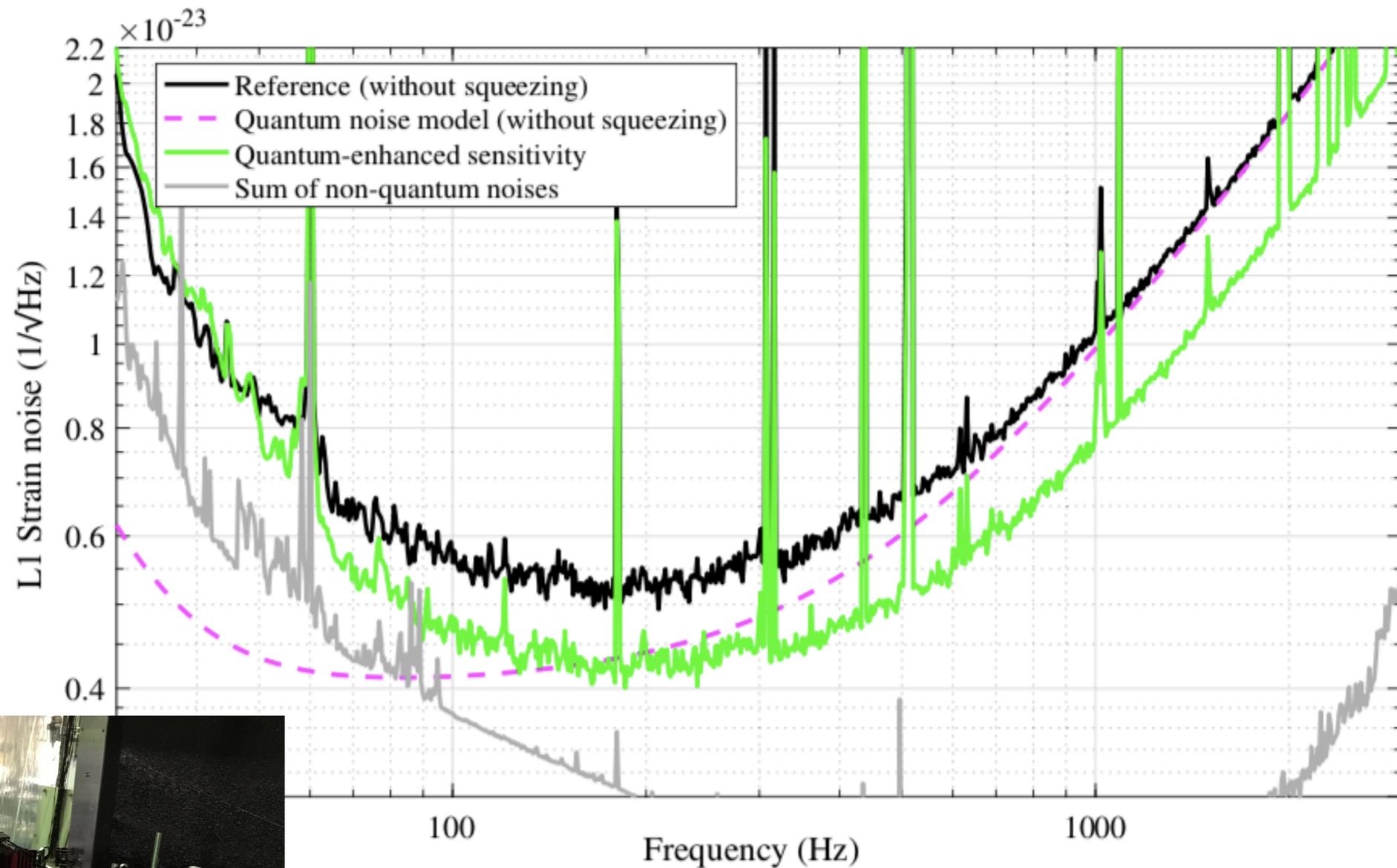
Credit: D.Fiorucci

Bruit quantique



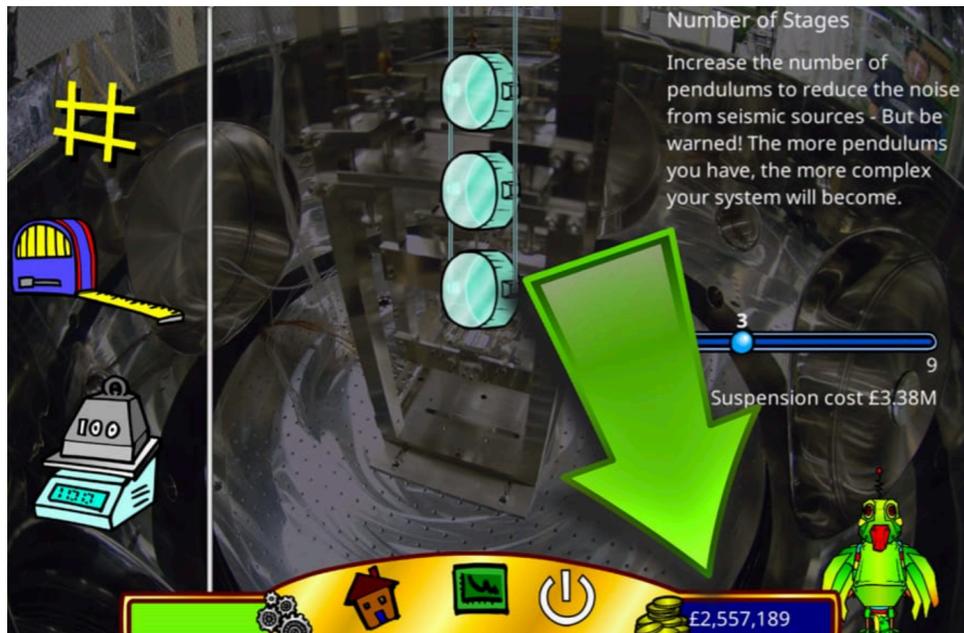
- Liée à la nature quantique de la lumière qu'on utilise pour la détection
- Il est due aux fluctuations du vide du champ électromagnétique qui entrent dans la port de détection

Manipuler le vide pour réduire le bruit quantique

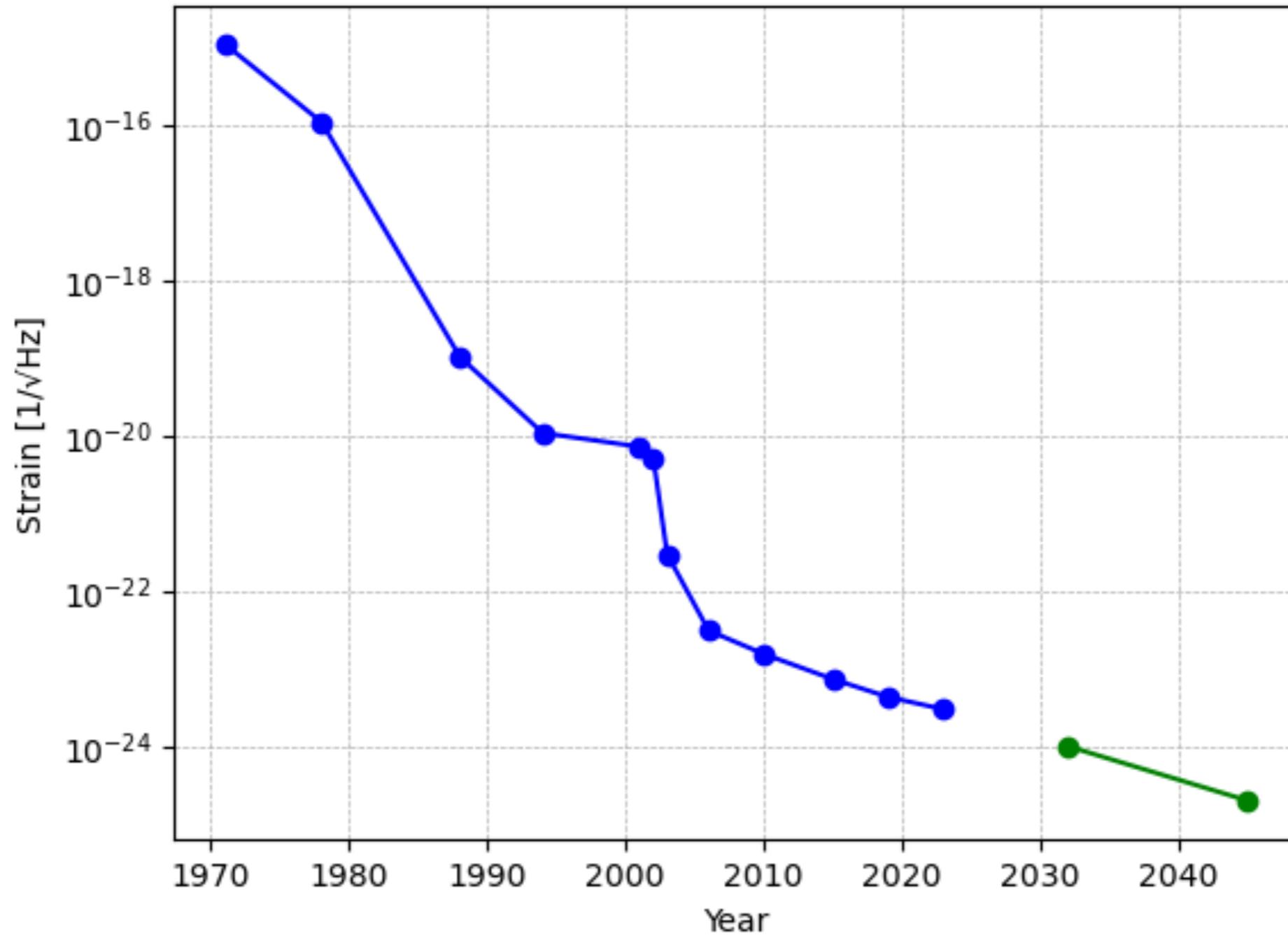


- A partir de 2019, une source de squeezing intégrée en Virgo et LIGO

un jeu pour simuler la la construction d'un détecteur

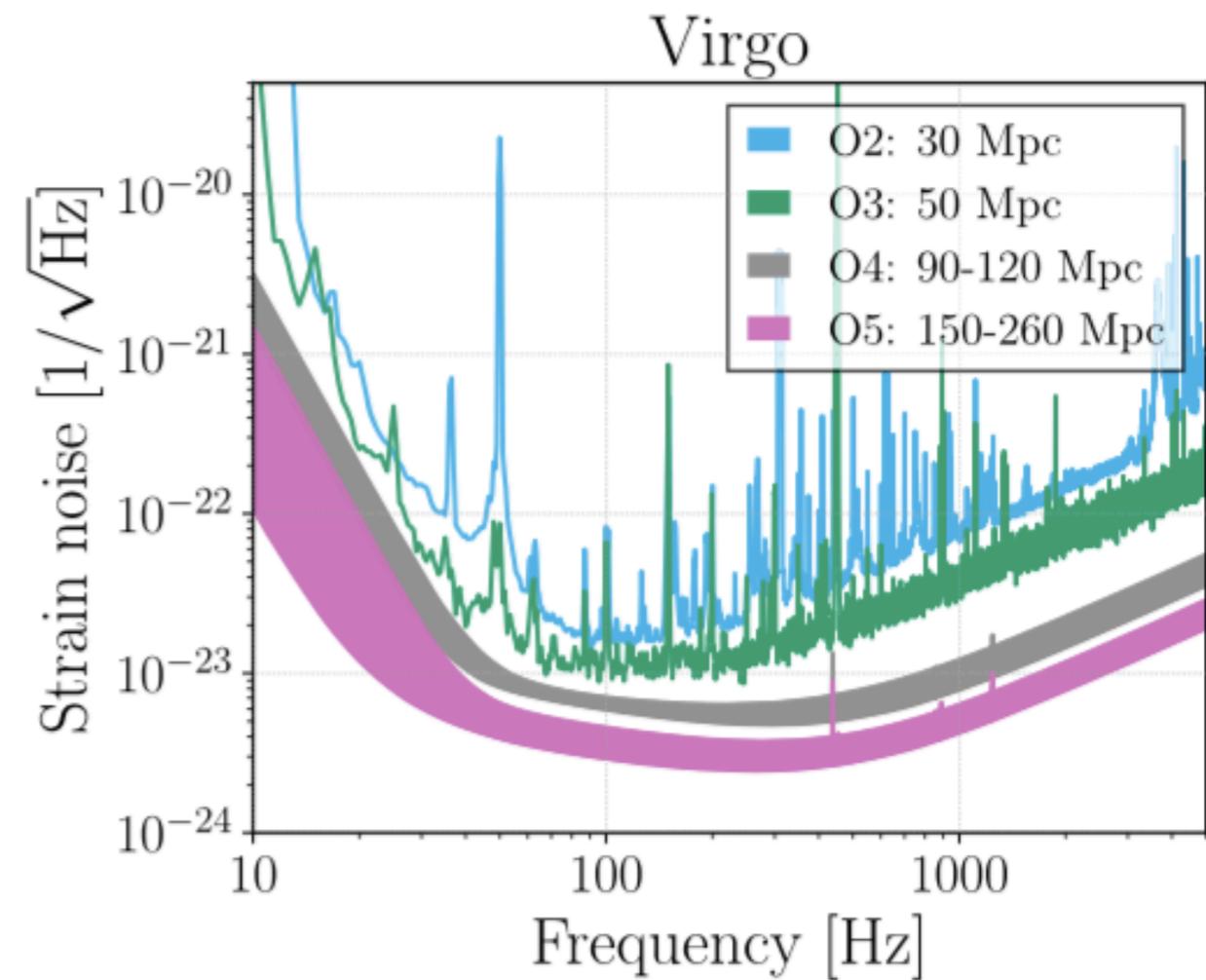
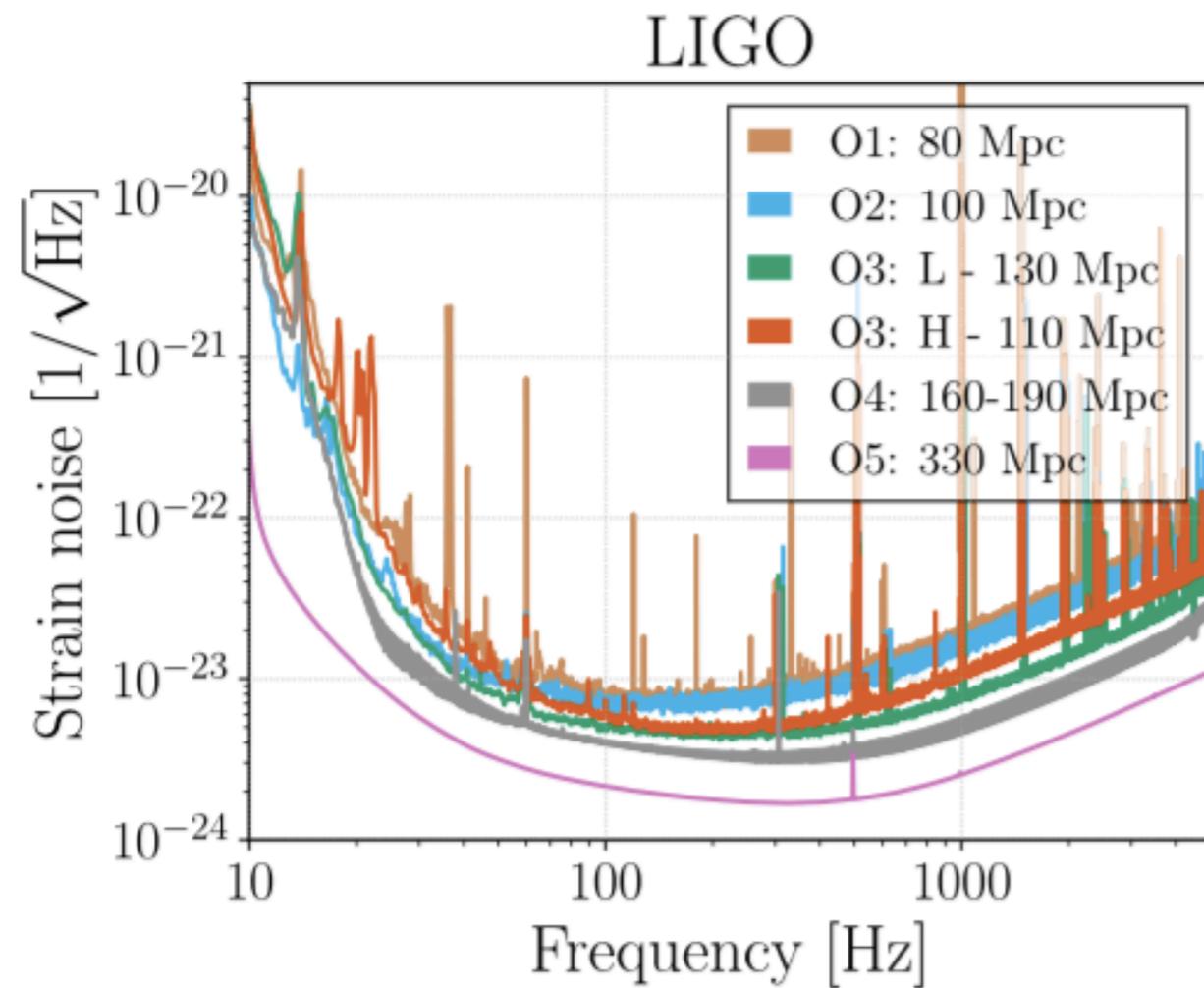


Les progrès de la sensibilité des détecteurs



Adapted from R.Adhikari, Gravitational Radiation Detection with Laser Interferometry, arXiv:1305.5188, 2013

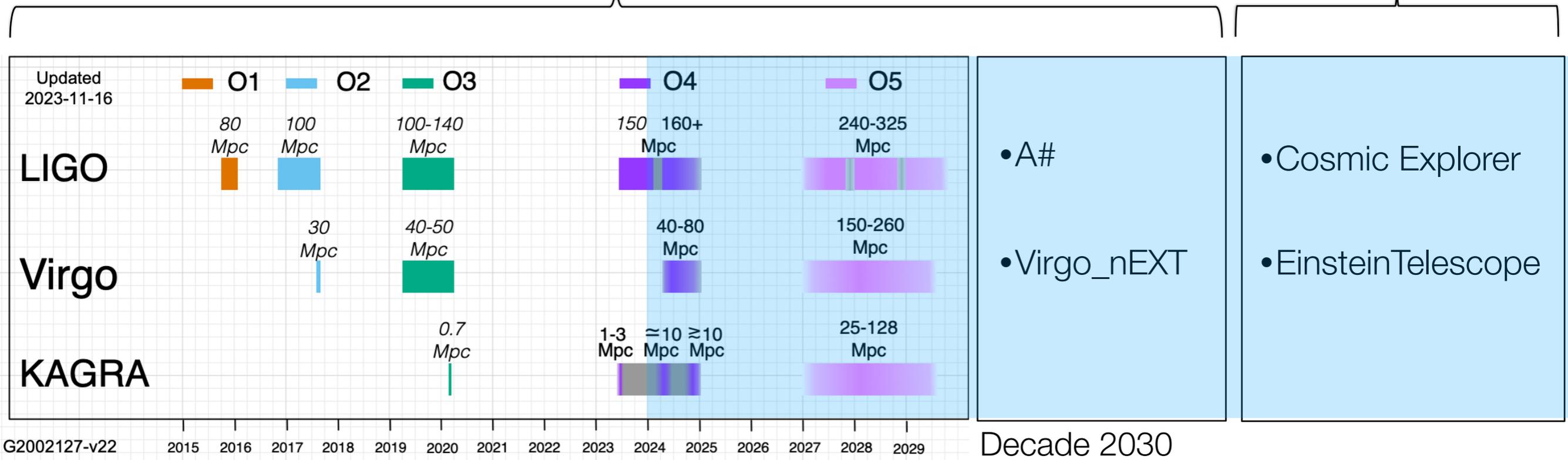
Amélioration progressive de la sensibilité



Quelle est la prochaine étape ?

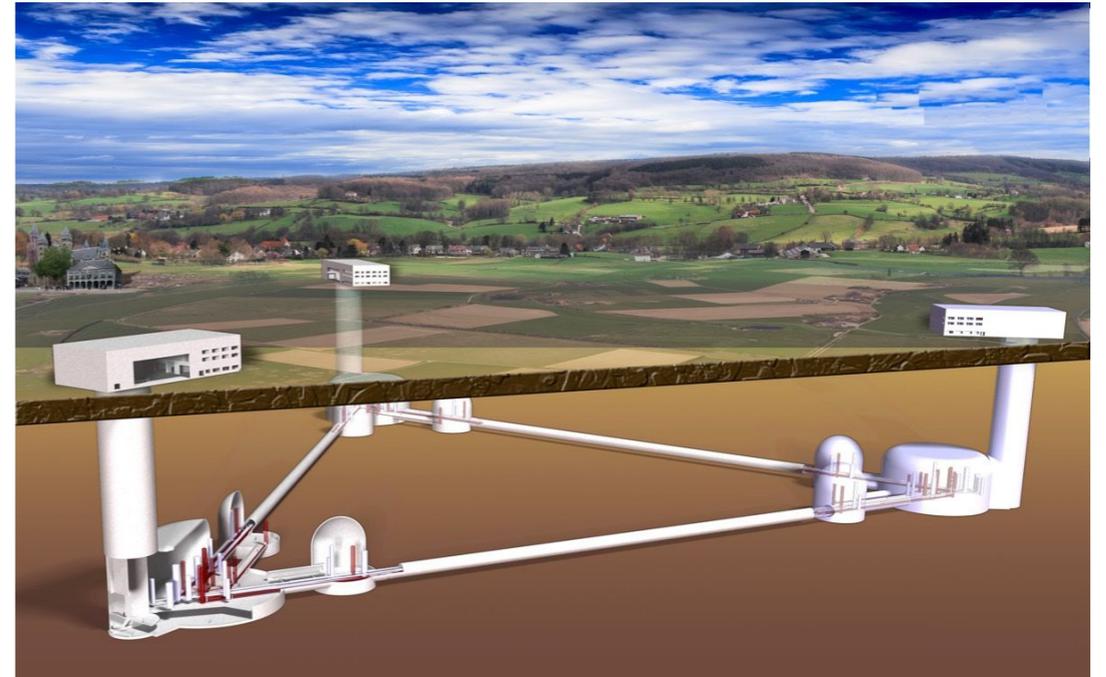
Current infrastructures

New infrastructures



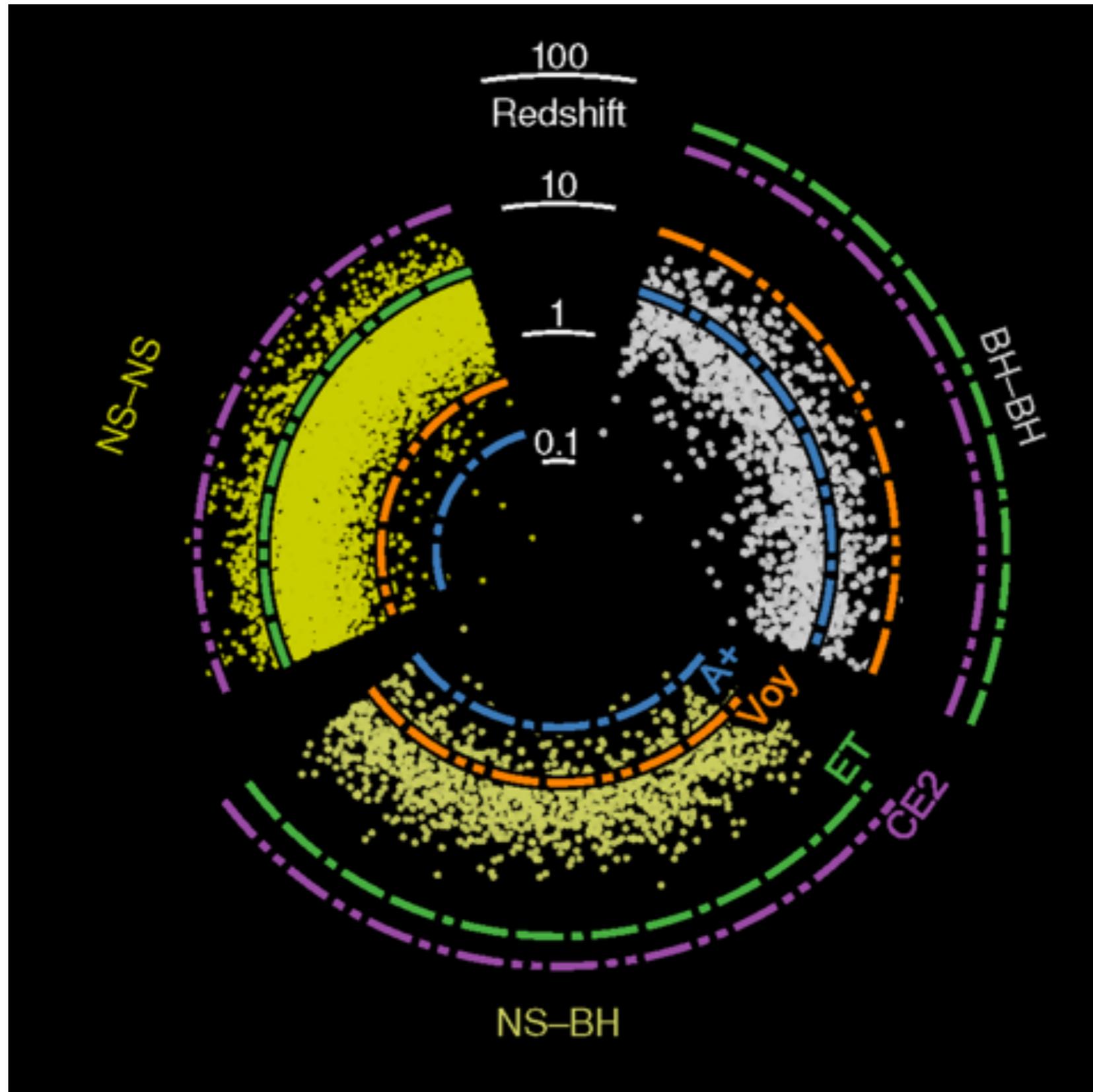
Détecteurs 3G : Einstein Telescope and Cosmic Explorer

- Objectif : amélioration de la sensibilité de 10 fois par rapport au détecteurs actuels
- **ET** : 10 km, cryogénique, souterrain
- **CE** : même configuration que LIGO mais 10 fois plus long.



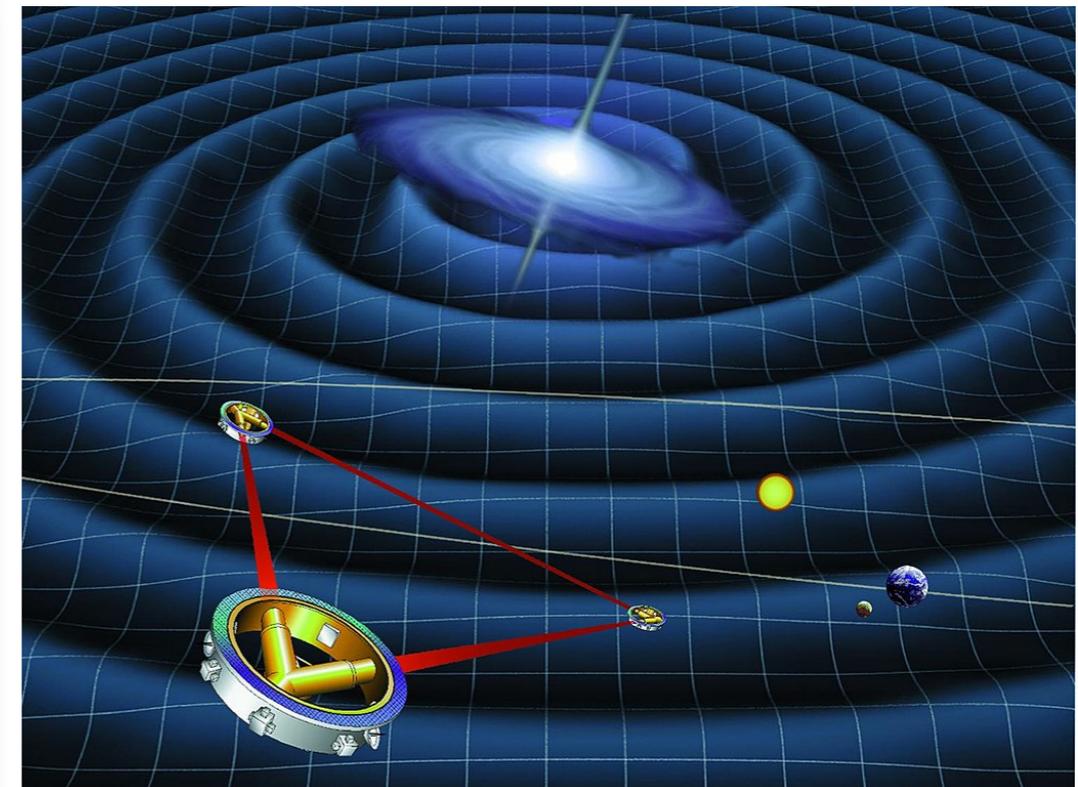
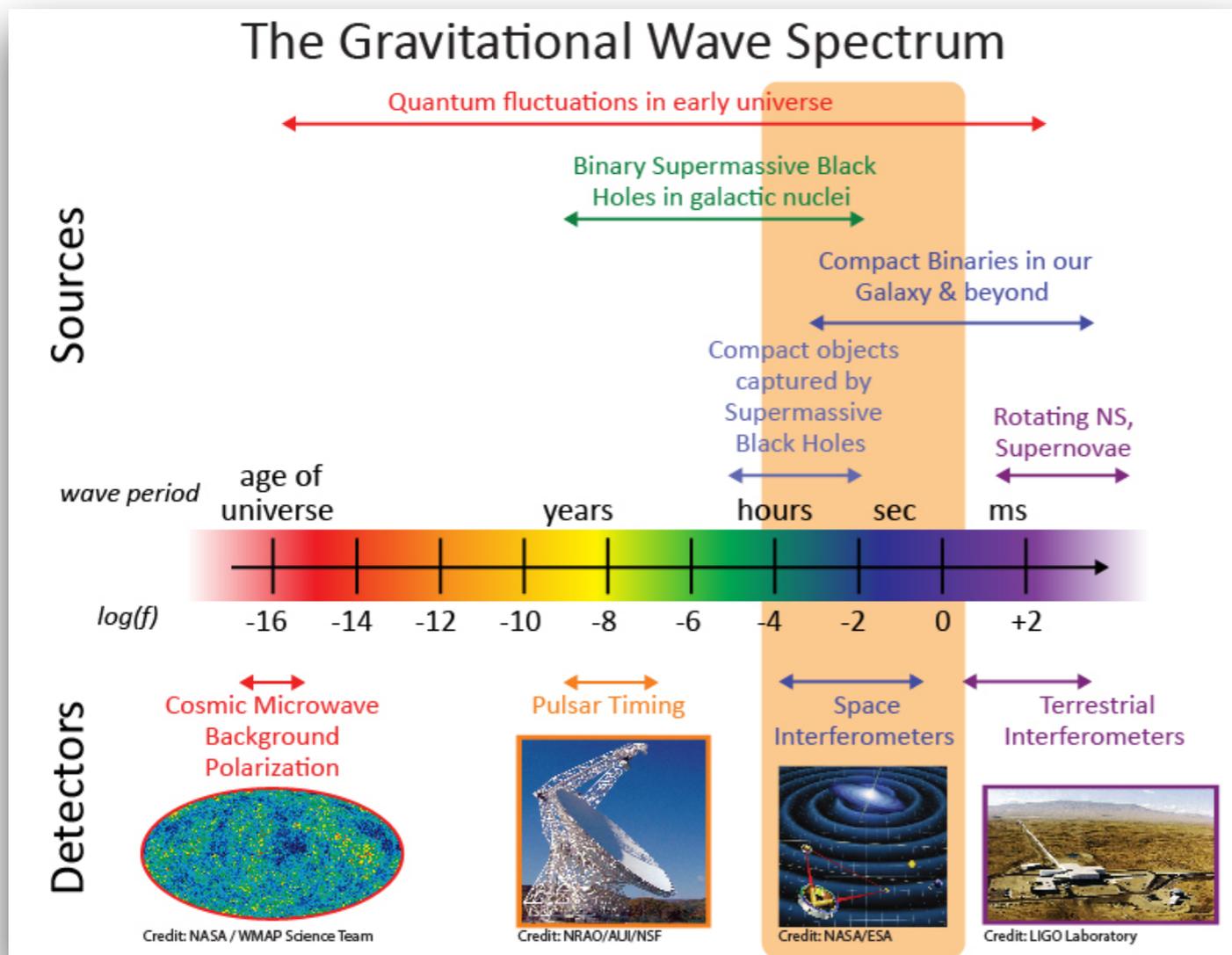
- Première prise de données prévue en 2036

Les détecteur 3G observeront tous les fusion de trous noirs de l'univers



LISA

- Interféromètre spatial (lancement prévu en 2037)
- Constellation de 3 satellites en orbite héliocentrique formant un triangle équilatéral de 2,5 millions km
- Explorer les basses fréquences



Résumé

- La détection des ondes gravitationnelles a été un événement révolutionnaire qui a ouvert l'astronomie gravitationnelles.
- Au cours des 8 dernières années, 150 signaux ont été détectés, produisant de nombreux résultats scientifiques mais nous ne sommes qu'au début
- La communauté scientifique travaille pour réaliser de détecteurs de plus en plus sensibles qui nous permettront de regarder plus loin dans l'univers et mieux comprendre son origine et son fonctionnement.

Ressources



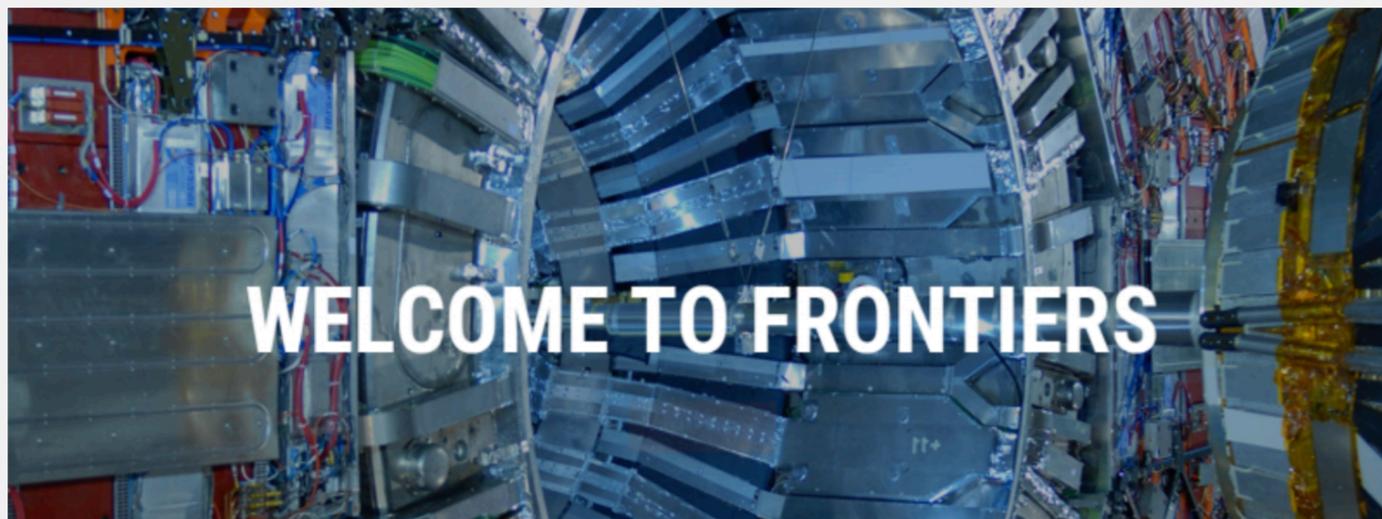
Communauté FRONTIERS en France. La physique des prix Nobel dans les classes.

France

Domain: Science

Parent Community: **Bringing Nobel Prize Physics in the Classroom**

Bienvenue dans la communauté française de FRONTIERS!



<https://portal.opendiscoveryspace.eu/en/community/communaute-frontiers-en-france-la-physique-des-prix-nobel-dans-les-classes-855299>

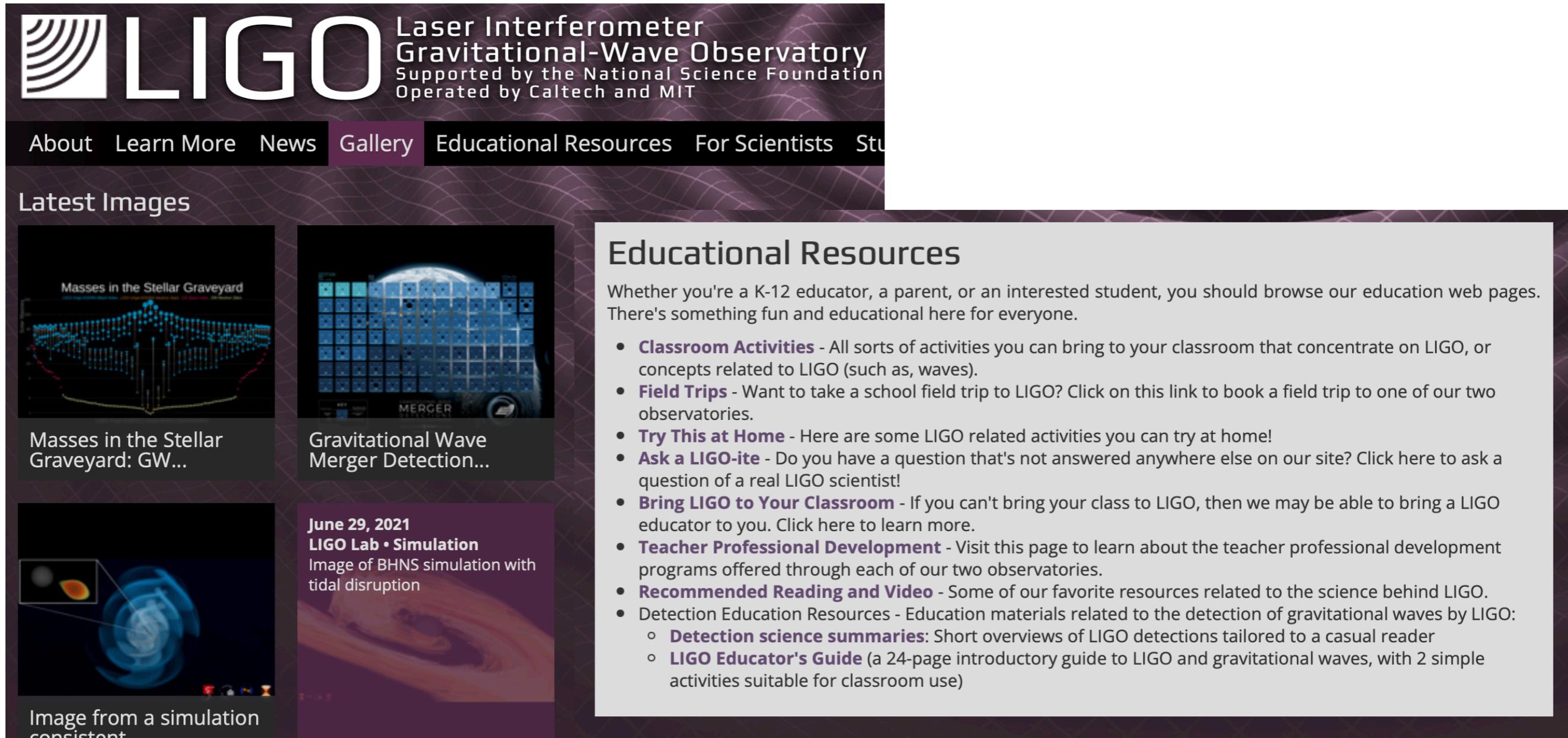
Astronomie aux ondes gravitationnelles

- [Interféromètre sismique "Trouver des trous noirs dans un chirp" : Comprendre les premières détections d'ondes gravitationnelles](#)
- [Visite Virtuelle de Virgo](#)
- [Chasse au bruit des ondes gravitationnelles](#)
- [Salle \(de classe\) de contrôle de EGO](#)

Ressources

<https://www.ligo.caltech.edu/page/educational-resources>

<https://www.ligo.caltech.edu/gallery>



LIGO Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory
Supported by the National Science Foundation
Operated by Caltech and MIT

About Learn More News **Gallery** Educational Resources For Scientists Stu

Latest Images

Masses in the Stellar Graveyard: GW...

Gravitational Wave Merger Detection...

June 29, 2021
LIGO Lab • Simulation
Image of BHNS simulation with tidal disruption

Image from a simulation consistent

Educational Resources

Whether you're a K-12 educator, a parent, or an interested student, you should browse our education web pages. There's something fun and educational here for everyone.

- **Classroom Activities** - All sorts of activities you can bring to your classroom that concentrate on LIGO, or concepts related to LIGO (such as, waves).
- **Field Trips** - Want to take a school field trip to LIGO? Click on this link to book a field trip to one of our two observatories.
- **Try This at Home** - Here are some LIGO related activities you can try at home!
- **Ask a LIGO-ite** - Do you have a question that's not answered anywhere else on our site? Click here to ask a question of a real LIGO scientist!
- **Bring LIGO to Your Classroom** - If you can't bring your class to LIGO, then we may be able to bring a LIGO educator to you. Click here to learn more.
- **Teacher Professional Development** - Visit this page to learn about the teacher professional development programs offered through each of our two observatories.
- **Recommended Reading and Video** - Some of our favorite resources related to the science behind LIGO.
- **Detection Education Resources** - Education materials related to the detection of gravitational waves by LIGO:
 - **Detection science summaries:** Short overviews of LIGO detections tailored to a casual reader
 - **LIGO Educator's Guide** (a 24-page introductory guide to LIGO and gravitational waves, with 2 simple activities suitable for classroom use)