



Des interféromètres laser à l'écoute de l'espace temps

Jérôme Degallaix

Laboratoires des Matériaux Avancés



I

La nouvelle astronomie avec les ondes gravitationnelles

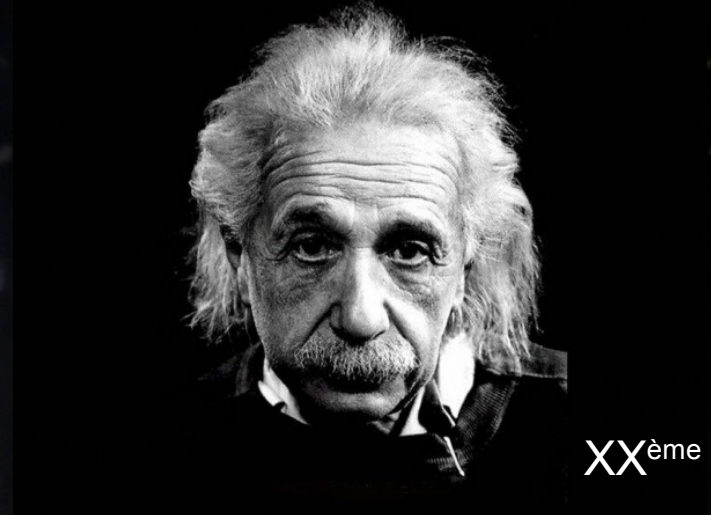
La gravité

Du temps de Newton



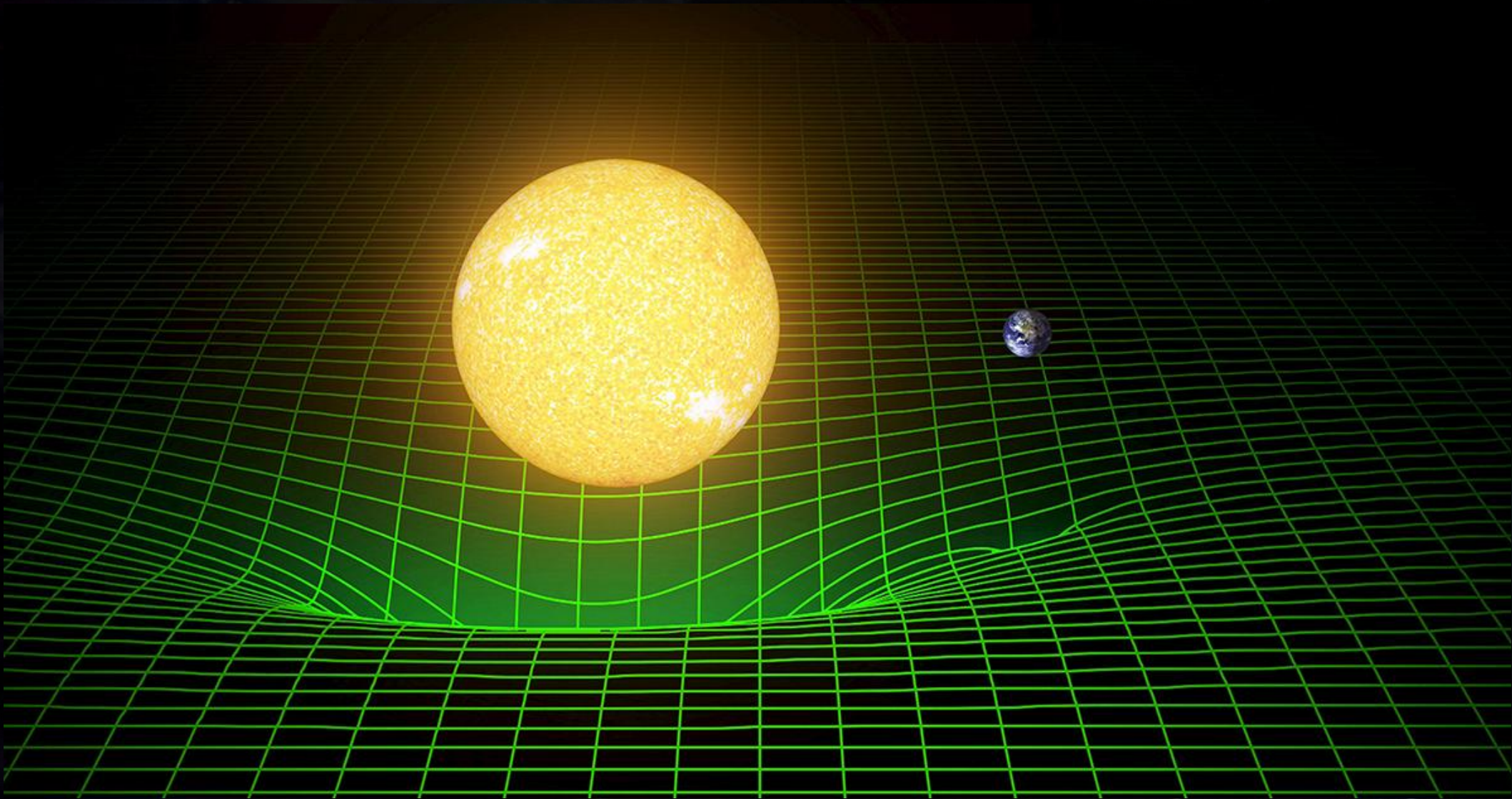
- une force
- attraction à distance
- instantanée

La Relativité Générale d'Einstein



- courbure de l'espace temps
- agit à la vitesse de la lumière
- le passage du temps n'est plus uniforme

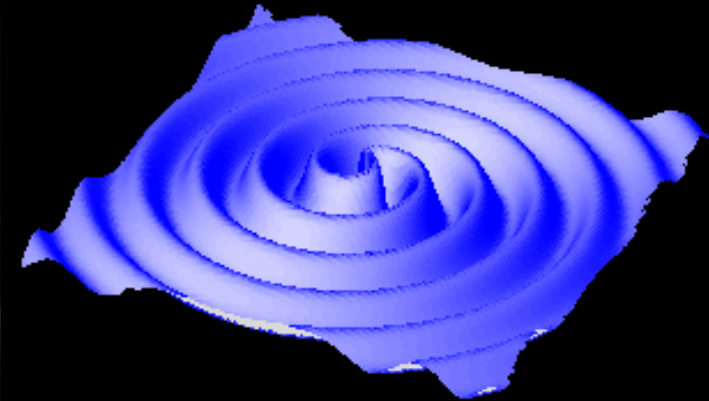
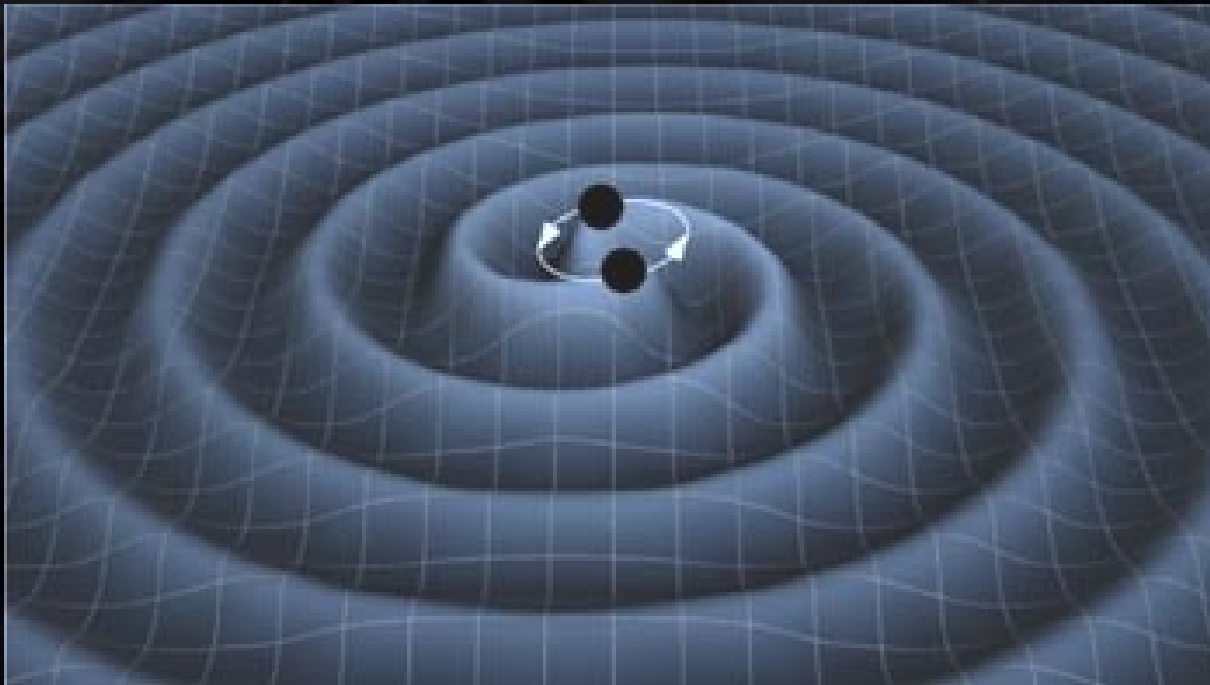
Représentation de l'espace temps



- La relativité générale a passé tous ses tests avec succès ₄

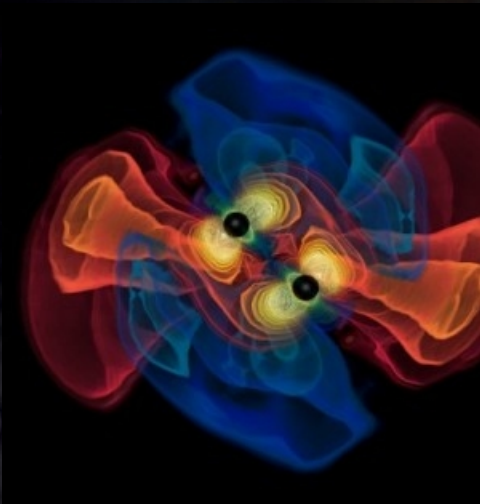
Les ondes gravitationnelles

- Ondes gravitationnelles = perturbations de l'espace temps
- Générées par l'accélération de masses
- Forme d'onde dépend de la source

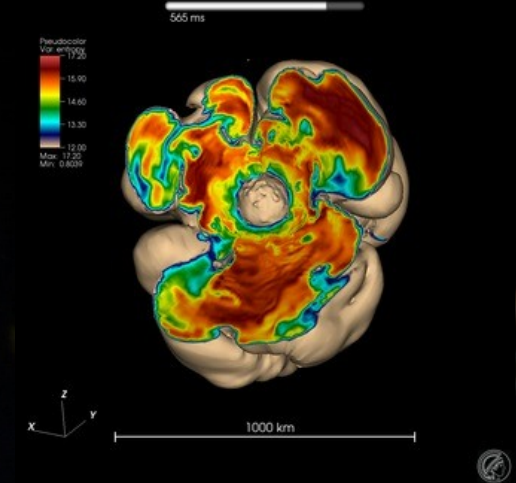


Exemple : coalescence de 2 objets massifs

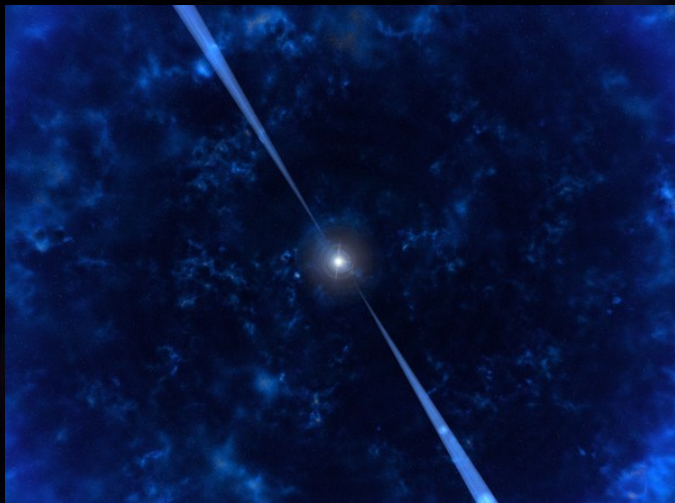
Sources possibles...



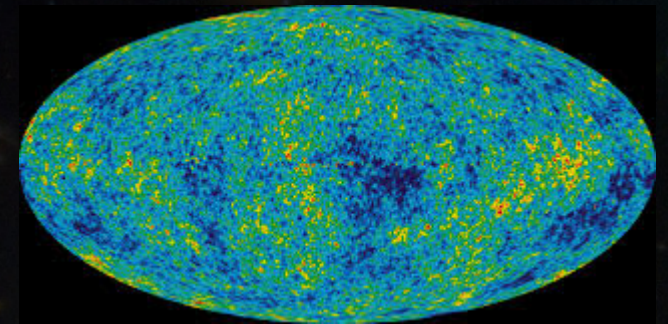
*Coalescence
d'objets compacts*



*Effondrement
asymétrique d'étoiles*

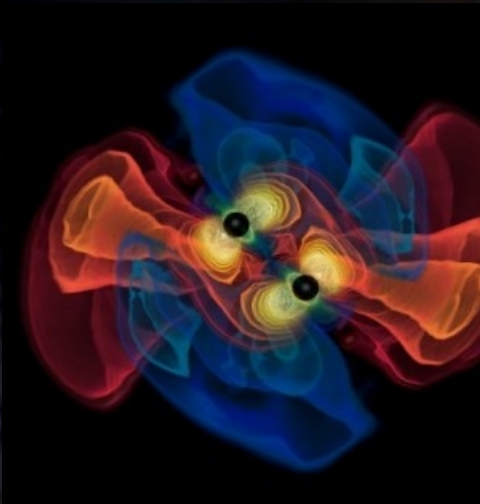


Pulsars



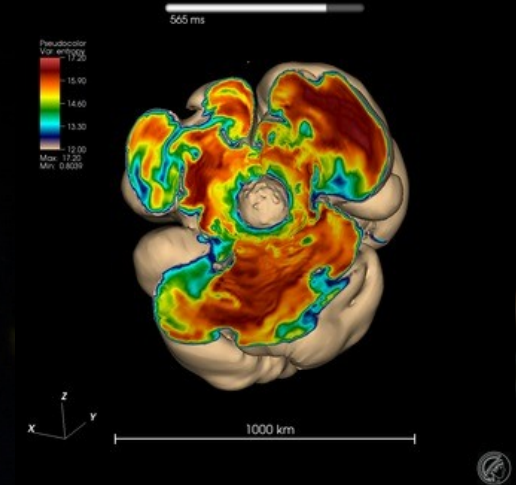
*Fond diffus
cosmologique*

Sources possibles...



*Coalescence
d'objets compacts*

Signaux courts
(< 1 s)

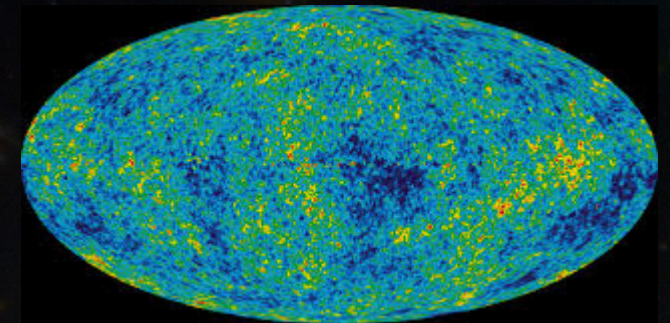


*Effondrement
asymétrique d'étoiles*



Pulsars

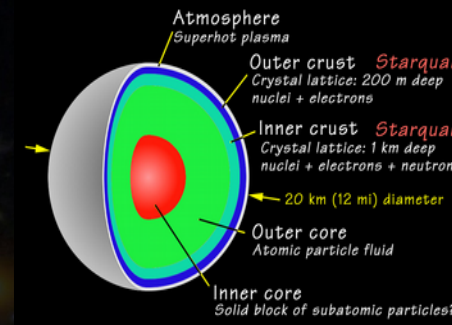
Signaux
continus



*Fond diffus⁷
cosmologique*

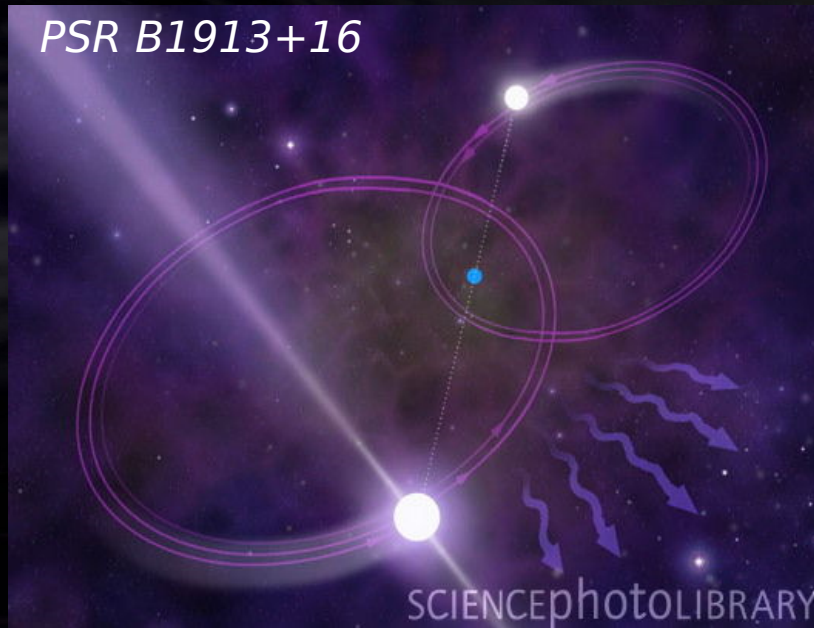
Une nouvelle astronomie !

- Signal totalement complémentaire du du spectre EM
- N'est pas absorbé, ou arrêté
- Test de la Relativité Générale en champs fort
- Évolution et distribution des trous noirs
- Équation d'état des étoiles à neutrons
- Origine des rayons gamma
- ... et bien sûr des surprises !

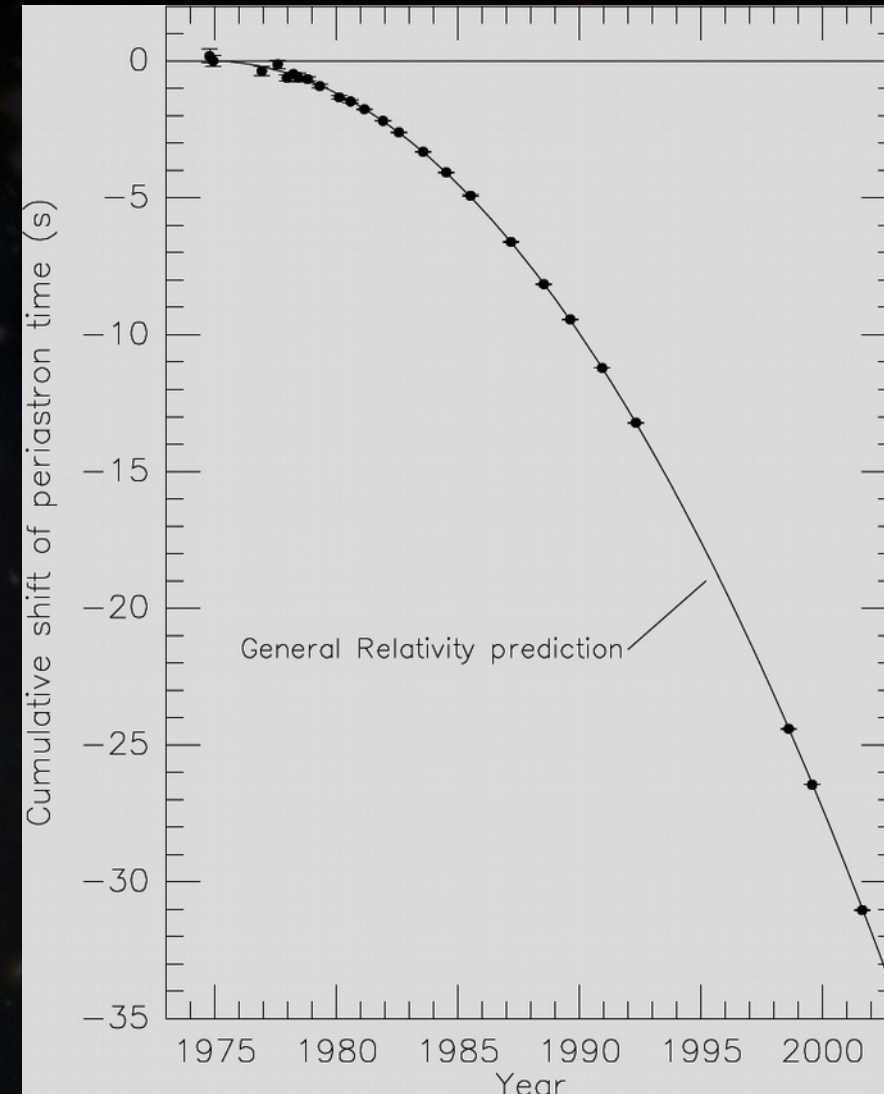


La preuve indirecte

- Système binaire : pulsar - étoile à neutron



- Découvert par Taylor et Hulse, prix Nobel en 1993

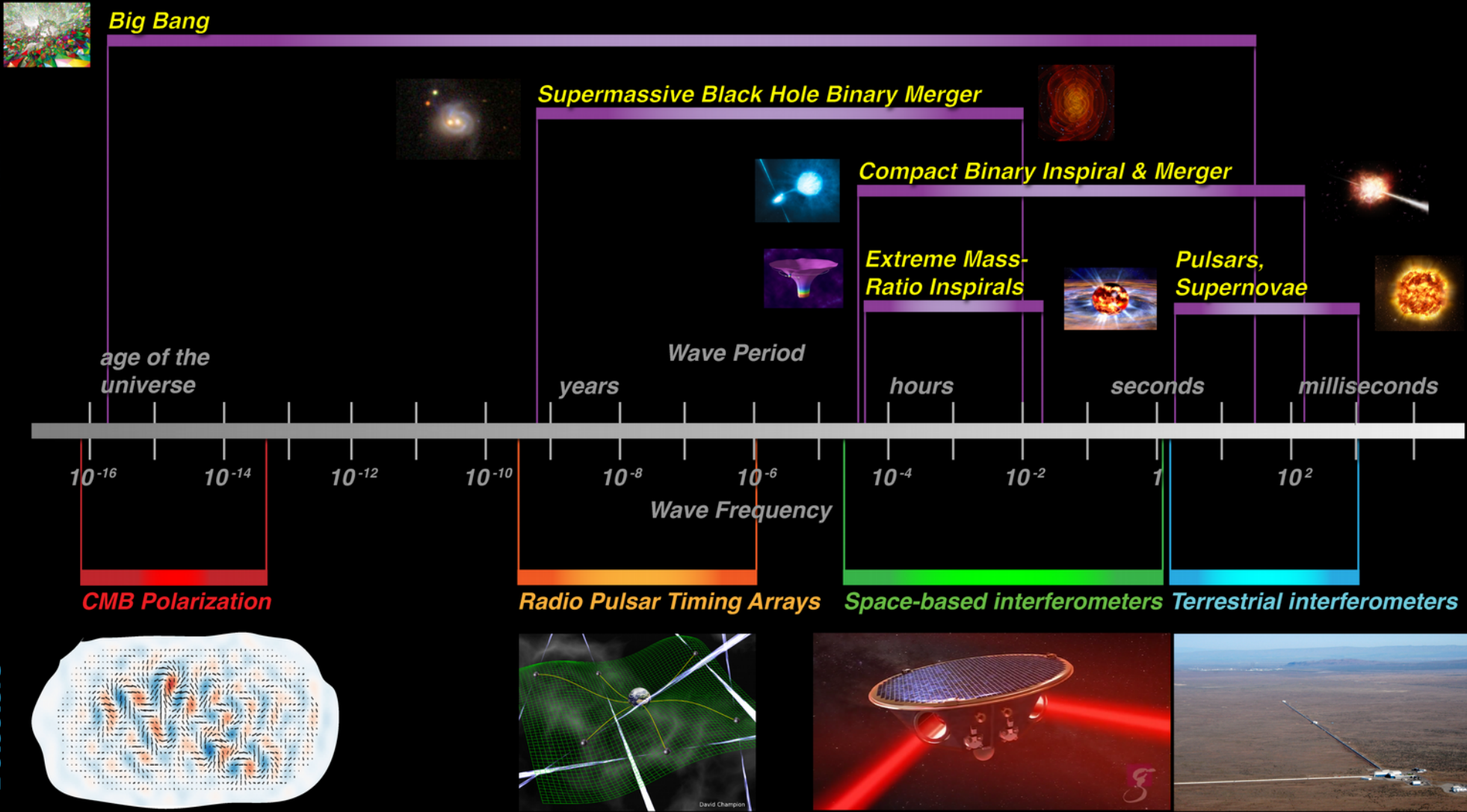


Un large spectre

The Gravitational Wave Spectrum

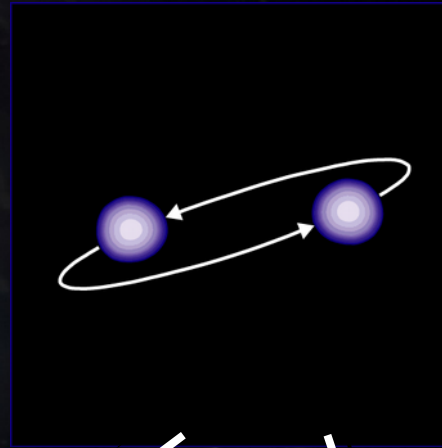
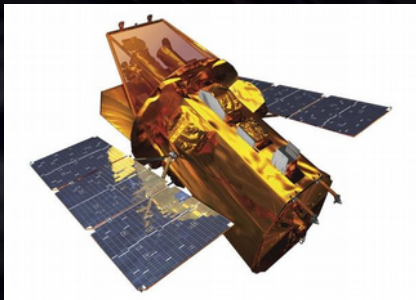
Sources

Detectors



L'astronomie multi-messagers

- 72 MoU signés, accès à 160 instruments (pour tout le spectre, sur terre et dans l'espace)



Signal d'un événement



II

Les premières détections

Une longue quête

1915 – Théorie de la Relativité Générale

1957 – Acceptation de l'existence physique des ondes gravitationnelles

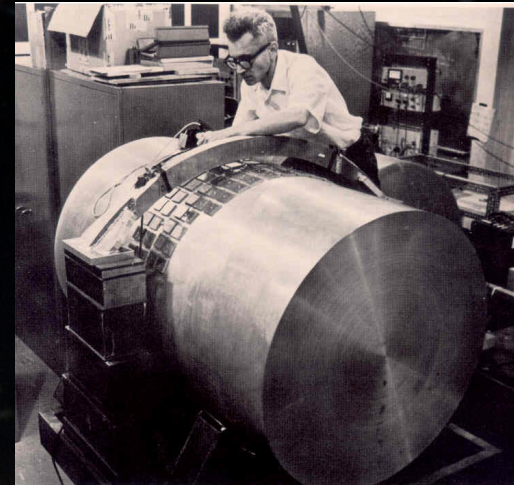
1960 – Premiers détecteurs

1970 – Idées des interféromètres lasers

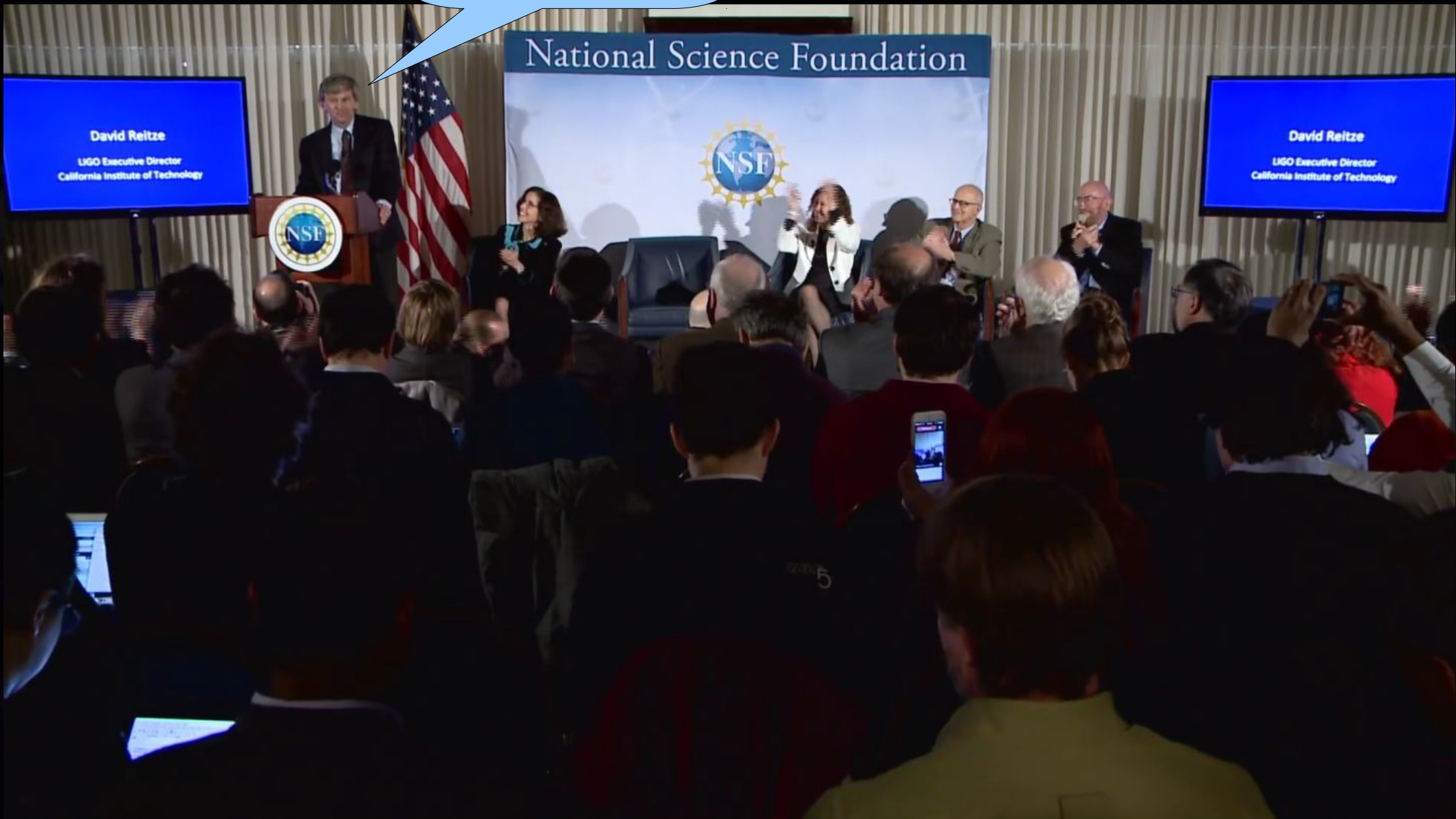
1989 – Propositions de projets (LIGO, Virgo)

2008 – Prise de données conjointe (1^{ère} gén.)

2015 – Premières observations (2^{ème} gén.)



We did it!



David Reitze
LIGO Executive Director
California Institute of Technology

David Reitze
LIGO Executive Director
California Institute of Technology

National Science Foundation





President Obama ✓

@POTUS



Following

Einstein was right! Congrats to [@NSF](#) and [@LIGO](#) on detecting gravitational waves - a huge breakthrough in how we understand the universe.

RETWEETS

9,489

LIKES

21,085



3:43 PM - 11 Feb 2016





Les petits calculs d'un remaniement

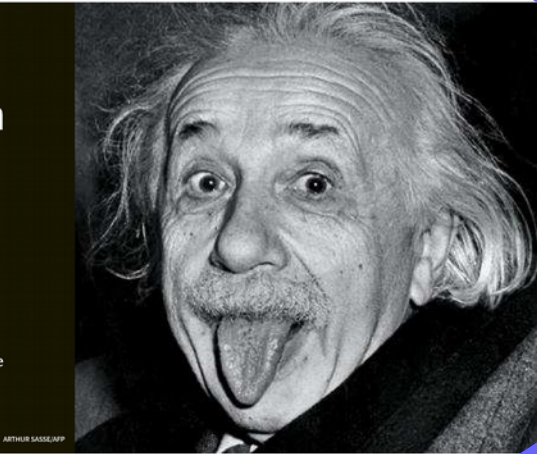
- François Hollande a choisi un remaniement technique pour régler les différents composantes de la majorité avant 2017
- Les écologistes, dont Emmanuelle Cosse, portent un coup sévère au parti de Cécile Duflot
- Le retour au pouvoir du premier ministre Jean-Marc Ayrault, nommé au Quai d'Orsay, tient à la volonté de rassurer la gauche du PS
- Le chef de l'Etat a choisi une équipe de ses proches, Ayrault, nommé, pour remplacer Manuel Valls au ministère de l'Intérieur
- Plus qu'un gouvernement de combat, c'est un gouvernement de contrats qu'a choisi le président

► LIRE PAGES 9-11 ET 14

Einstein avait raison

- Le physicien avait prédit l'existence des ondes gravitationnelles en 1916, la preuve directe en est aujourd'hui apportée
- Cette découverte majeure est à ranger parmi les plus grandes percées de la connaissance
- Les trous noirs existent et l'espace-temps est bien un contenant élastique susceptible d'onduler

► LIRE PAGES 6-7



ARTHUR SASSER/APP

Pourquoi les banques sont attaquées en Bourse

Les banques allemandes, Deutsche Bank en tête, courent le risque de subir les assauts du marché, faisant plonger les Bourses américaine et européennes. Les investisseurs reprochent à ces banques une rentabilité insuffisante et des engagements trop hasardeux, notamment dans le secteur pétrolier. Les propositions des responsables politiques de la zone euro et de certains des institutions financières n'y font rien : le spectre d'un nouveau krach hante les esprits.

► LIRE LE CAHIER ECO P. 4-5

ÉDITORIAL

UN AIR DE LEHMAN BROTHERS

► LIRE PAGE 20

COMMENTAIRE

LE GRAND BAZAR DU TRAVAIL DU DIMANCHE

► LIRE LE CAHIER ECO PAGE 6

CULTURE

LE THÉÂTRE DE L'EUROPE AUX EUROPÉENS

► LIRE PAGES 16-17

CULTURE & IDÉES

LIVRES POLITIQUES : FAUT-IL ÊTRE LU POUR ÊTRE ÉLU ?

► LIRE LE SUPPLÉMENT

SPORT & FORME

PROFESSION GLADIATEUR

► LIRE LE SUPPLÉMENT

Plan russo-américain pour une trêve en Syrie

► Sergueï Lavrov et John Kerry s'accordent sur un accès humanitaire aux villes assiégées



RFP / CHRISTOPH STACHE

Le secrétaire d'Etat américain, John Kerry, et le ministre des affaires étrangères russe, Sergueï Lavrov, ont présenté, vendredi 12 février, à Munich, un plan prévoyant une cessation temporaire des hostilités en Syrie et un accès humanitaire à certaines villes assiégées. Dix jours après l'offensive du régime Assad et de son allié russe contre Alep, cette trêve doit permettre la reprise « des que possible » des pourparlers entre parties belligères. L'aviation russe a conduit 510 raids et frappé près de 2 000 cibles en une semaine. Face à cet engagement intense, la « passivité » de Barack Obama est critiquée par les alliés des Etats-Unis, Turquie en tête, et par de plus en plus de voix à Washington même. ► LIRE PAGES 2-3

MIGRANTS L'ÉTAT VA RASSEMBLER LA « JUNGLE » DE CALAIS

PAR MARLYNE BAUMARD

La préfète du Pas-de-Calais va réduire de moitié la surface de la « jungle » de Calais. Fabienne Buccié devait annoncer, vendredi 12 février, qu'elle donne une semaine aux migrants qui campent dans la partie sud du bidonville pour quitter les lieux. Entre 800 et 1 000 personnes, installées sur 7 hectares dans des tentes ou des cabanes, seraient concernées. Il s'agit de la deuxième réduction du bidonville depuis le début de l'année. Une nouvelle étape avant la disparition souhaitée par l'Etat de ce lieu qui concentre, en France, les vives tensions engendrées par la crise migratoire que traverse l'Europe. Le ministère de l'Intérieur souhaite, à terme, ne conserver que des hébergements structurés et contrôlés. « Je me suis rendue sur les lieux cette semaine. J'ai constaté que, dans la partie sud du campement, deux abris sur trois n'étaient plus habités », explique la préfète au Monde. ► LIRE LA SUITE P. 12

BACCHANALES MODERNES !

Le nu, l'ivresse et la danse dans l'art français du XIX^e siècle



12 février - 23 mai 2016

Galerie des Beaux-Arts
Place du Colonel Raynal
33000 Bordeaux
musée-bordeaux.fr

lefigaro.fr

LE FIGARO

• Sans la liberté de blâmer, il n'est point d'éloge flatteur • Beaumarchais

ROYAUME-UNI
LES BRITANNIQUES CÉLÈBRENT 300 ANS DE JARDINS À L'ANGLAISE PAGES 30 ET 31

FUMAROLI
« CE QUE L'AVENIR DOIT À NOTRE PASSÉ »
PAGE 18

ENTRETIEN Bruno Retailleau : « Oui à la déchéance, non à l'apatridie » PAGE 6

SYRIE Les négociations de paix tournent au bras de fer entre Washington et Moscou PAGE 8

JUSTICE La question prioritaire de constitutionnalité, nouvelle arme de la défense PAGE 13

CANNABIS Dans un centre de consultation pour ados accros PAGE 12

RUGBY Guy Novès remanie le XV de France PAGE 15

PÉTROLE Face à la chute des cours, Total résiste mieux que ses concurrents PAGE 25

CHAMPS LIBRES • Reportage : Kirill, le patriarcat mal-aimé de l'Église orthodoxe russe

• Le bloc-notes d'Ivan Rioufol

• L'analyse de Jean-Marie Guénois PAGES 17 ET 19

FIGARO OUI FIGARO NON

Réponses à la question de jeudi : Laurent Fabius a-t-il été un bon ministre des Affaires étrangères ?

OUI 30% NON 70%

TOTAL DE VOTANTS : 60 216

Votez aujourd'hui sur lefigaro.fr

François Hollande peut-il se relancer après ce remaniement ?

MMJ / MARIANNE MAERJUS - SEBASTIEN SORIANO/LE FIGARO

Découvrez au moins 4 raisons qui vous donnent envie de mettre ce numéro dans vos contacts favoris.

Un dernier replâtrage pour finir le quinquennat

Marqué par l'arrivée de l'écologiste Emmanuelle Cosse et le retour de Jean-Marc Ayrault, le remaniement suscite le scepticisme général.

► DES SEMAINES D'ANGOISSE ET UN SECRET TRÈS BIEN GARDÉ JUSQU'À L'ANNONCE DE LA CANDIDATURE DE MÉLÉCHON PLOMBE LA PRIMAIRE ► JEAN-MARC AYRAULT REVIENT PAR LA GRANDE PORTE ► EMMANUELLE COSSE, LA CAUTION ÉCOLOGIQUE PAGES 2 A 4 ET ÉDITORIAL

Les doutes sur la solidité des banques font plonger les marchés

La défiance à l'égard du secteur bancaire, fragilisé par la baisse de la croissance, s'amplifie. Jeudi, les valeurs du secteur ont encore plongé, entraînant la Bourse de Paris (-4,05%) dans

Ondes gravitationnelles : la découverte qui donne raison à Albert Einstein

Cent ans après la publication de la théorie de la relativité générale, des chercheurs ont apporté une nouvelle preuve du génie d'Albert Einstein. Pour la première fois, ils ont pu observer des ondes gravitationnelles provoquées par la collision de deux trous noirs. Des fluctuations de l'espace qui avaient été prévues par l'illustre physicien. PAGE 14

ÉDITORIAL par Paul-Henri du Limbert phd.hlimbert@lefigaro.fr

MESSIEURS, J-2 AVANT LA SAINT-VALENTIN !

Bienvenue sur le « Titanic » !

Ceux – rares il est vrai – qui rêvaient d'une fin de quinquennat audacieuse, transgressive, et menée sabbat au clair, en seront pour leurs frais. François Hollande a fait du François Hollande : il a calculé, soupesé, saupoudré, pour finalement s'attacher à respecter les peils équilibrés de la minuscule majorité qu'il lui reste. Et voilà donc Jean-Marc Ayrault, devenu semi-froudeur après une expérience calamiteuse à Matignon, promu ministre des Affaires étrangères. Cela lui permettra évidemment de revenir à de meilleures dispositions à l'endroit du couple exécutif et l'empêchera par conséquent de distiller de méchantes petites phrases à l'approche de la présidentielle. Il retrouvera à la table du Conseil des ministres trois Verts dits « fréquentables » (Cosse, Ploact, Pompidu), qui ont la particularité de voter aux géométries le projet d'aéroport de Notre-Dame-des-Landes, ardemment soutenu par le nouveau patron du Quai d'Orsay. La aussi, Hollande a cédé à ce péché mignon qu'on lui connaît bien et qui se définit ainsi : mettons ensemble des pour et des contre, et le sorti-

ra toujours quelque chose que l'on baptisera « synthèse ». Et advenue que pourra. Il y avait mieux à faire. Dans la situation précaire où il se trouve, le chef de l'Etat aurait pu tenter un vrai coup de poker. Ainsi, plutôt que de ménager diverses susceptibilités dont l'importance est très relative, il aurait été bien inspiré de confier à Emmanuel Macron un super-ministère de l'Économie et des Finances. En lui demandant de mettre en pratique toute affaire cessante, et pourquoi pas par ordonnances, les idées judicieuses qu'il distille régulièrement (35 heures, fonction publique, etc.). Crise de nerfs assurée chez les froudeurs ? Sans doute, mais une de plus ou de moins... Las ! François Hollande n'a eu ni cette hardiesse ni ce panache. Le Titanic gouvernemental, dont l'angle de gîte impressionne un peu plus chaque jour, continuera donc de s'enfoncer irrémédiablement jusqu'à la fin du quinquennat. Le plus surprenant, finalement, c'est que le chef de l'Etat ait réussi à trouver des volontaires pour monter à bord. ■



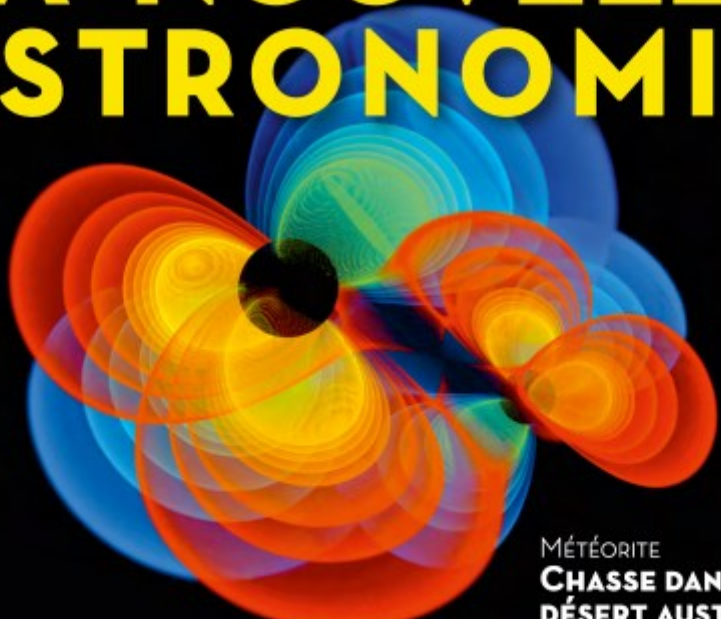
Miranda Kerr

L'UNIVERS DE L'ASSOCIATION FRANÇAISE D'ASTRONOMIE

Ciel & espace

ONDES GRAVITATIONNELLES

LA NOUVELLE ASTRONOMIE



VIE SUR MARS
L'HEURE
DE VÉRITÉ

LUNDI 9 MAI
MERCURE PASSE
DEVANT LE SOLEIL

MÉTÉORITE
CHASSE DANS LE
DÉSERT AUSTRALIEN

M 01362 - 546 - F: 7,50 € - RD

ISSN 0373-8129 - Andorre: 7,80€ - Danemark: 8,20€ - France: 7,50€ - Allemagne: 9,50€ - Belgique: 7,80€ - Suisse: 12CHF - Canada: 10,50\$CAN - Espagne: 7,80€ - Grèce: 7,80€ - Italie: 7,80€ - Luxembourg: 7,80€ - Autriche: 7,80€ - Malaisie: 9,50€ - Portugal: 7,80€ - Espagne: 7,80€ - Israël: 7,80€ - Japon: 10,50\$JPY - Tunisie: 6,50\$TND - Zone CFA: 4900CFA



SCIENCE

ÉGYPTOLOGIE
Un chemin d'étoiles
pour les défunts

DÉMOGRAPHIE
Six milliards
d'Africains en 2100?

ÉTHOLOGIE
Vivre connecté, un
atout pour l'animal!

POUR LA SCIENCE

Avril 2016 - n° 462

www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

Ondes gravitationnelles

- La dernière preuve de la THÉORIE D'EINSTEIN
- Les TROUS NOIRS comme on ne les a jamais vus
- Une RÉVOLUTION pour l'astronomie



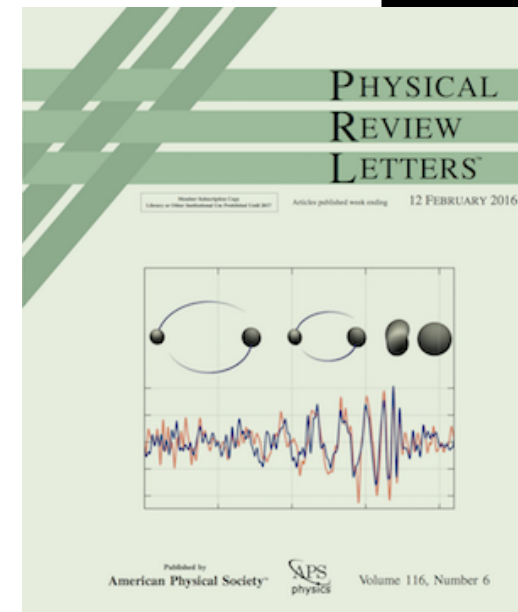
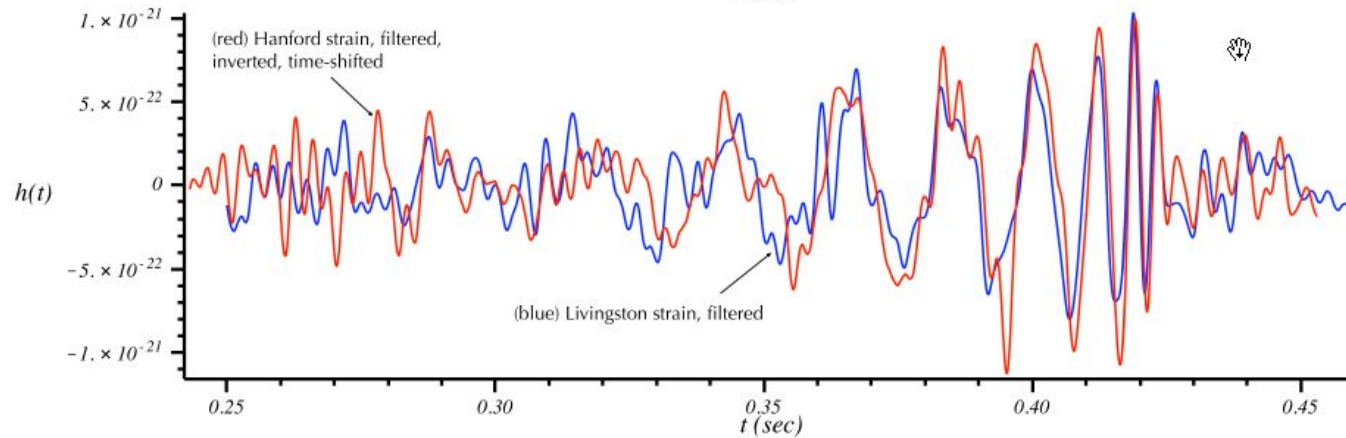
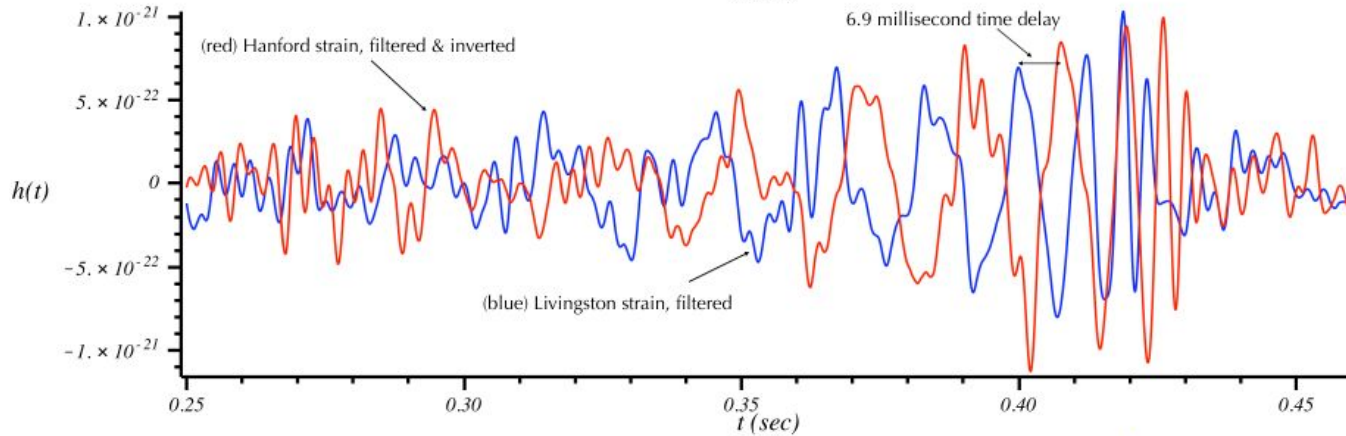
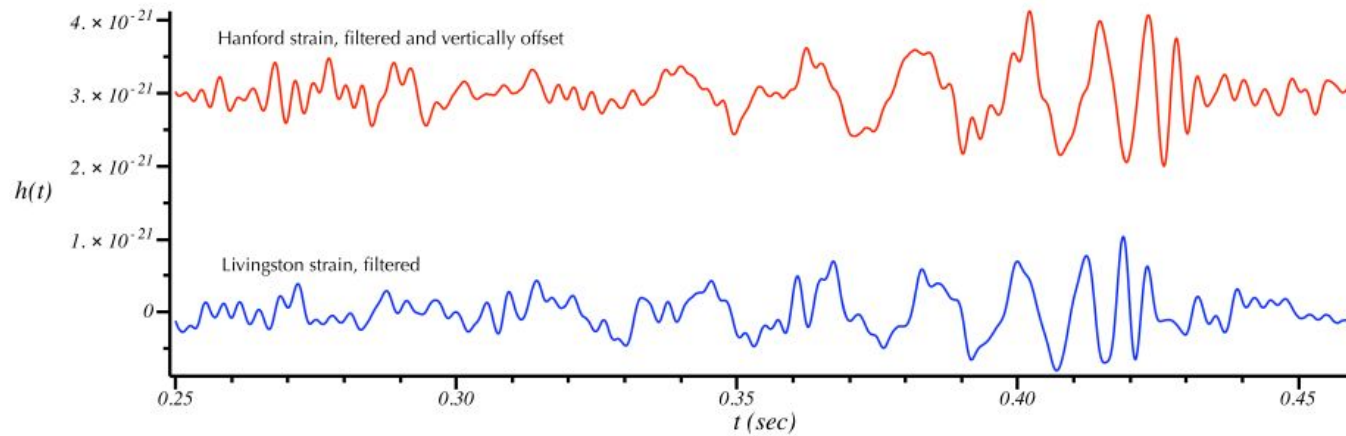
OBÉSITÉ, DIABÈTE, DÉPRESSION, CANCER
QUAND LES HORLOGES
BIOLOGIQUES SE DÉRÈGENT

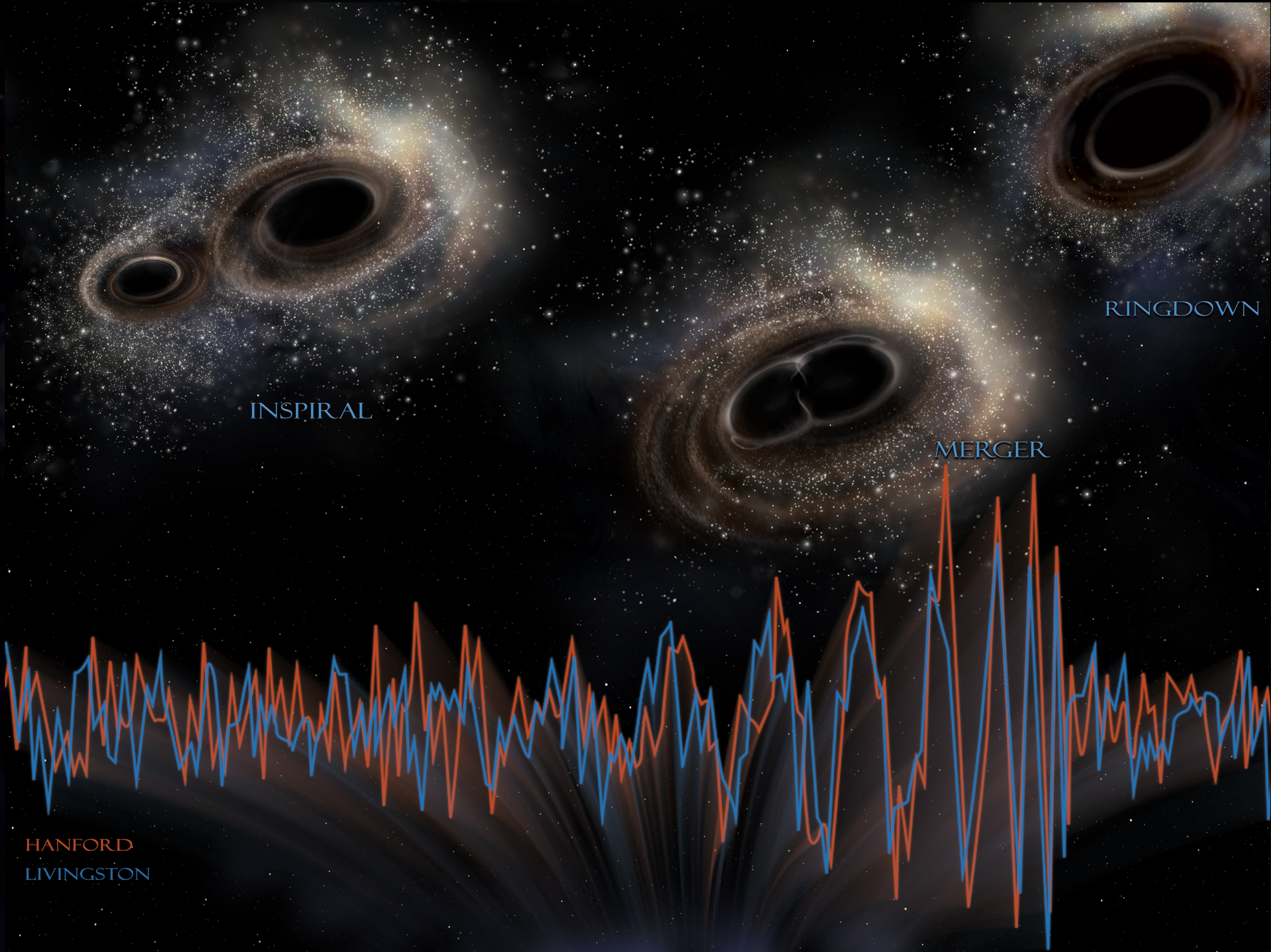


M 02687 - 4625 - F: 6,50 € - RD

ISSN 0373-8129 - Andorre: 7,80€ - Danemark: 8,20€ - France: 7,50€ - Allemagne: 9,50€ - Belgique: 7,80€ - Suisse: 12CHF - Canada: 10,50\$CAN - Espagne: 7,80€ - Grèce: 7,80€ - Italie: 7,80€ - Luxembourg: 7,80€ - Autriche: 7,80€ - Malaisie: 9,50€ - Portugal: 7,80€ - Espagne: 7,80€ - Israël: 7,80€ - Japon: 10,50\$JPY - Tunisie: 6,50\$TND - Zone CFA: 4900CFA

La première observation (19 Sept. 2015)





INSPIRAL

RINGDOWN

MERGER

HANFORD
LIVINGSTON

Les paramètres des sources

| | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| observed by | LIGO L1, H1 | duration from 30 Hz | ~ 200 ms |
| source type | black hole (BH) binary | # cycles from 30 Hz | ~10 |
| date | 14 Sept 2015 | peak GW strain | 1×10^{-21} |
| time | 09:50:45 UTC | peak displacement of interferometers arms | ± 0.002 fm |
| likely distance | 0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc | frequency/wavelength at peak GW strain | 150 Hz, 2000 km |
| redshift | 0.054 to 0.136 | peak speed of BHs | ~ 0.6 c |
| signal-to-noise ratio | 24 | peak GW luminosity | 3.6×10^{56} erg s ⁻¹ |
| false alarm prob. | less than 1 in 5 million | radiated GW energy | 2.5-3.5 M _⊙ |
| false alarm rate | 1 in 200,000 yr | remnant ringdown freq. | ~ 250 Hz |
| Source Masses | M _⊙ | remnant damping time | ~ 4 ms |
| total mass | 65 | remnant size, area | 180 km, 3.5×10^5 km ² |
| chirpmass | 28 | consistent with general relativity? | passes all tests performed |
| primary BH | 32 to 41 | graviton mass bound | $< 1.2 \times 10^{-22}$ eV |
| secondary BH | 25 to 33 | coalescence rate | 2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹ |
| remnant BH | 62 | online trigger latency | ~ 3 min |
| mass ratio | 0.6 to 1 | # offline analysis pipelines | 5 |
| primary BH spin | < 0.7 | CPU hours consumed | ~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days) |
| secondary BH spin | < 0.9 | papers on Feb 11, 2016 | 13 |
| remnant BH spin | 0.7 | # researchers | ~1000, 80 institutions in 15 countries |
| signal arrival time delay | arrived in L1 7 ms before H1 | | |
| likely sky position | Southern Hemisphere | | |
| likely orientation resolved to | face-on/off ~600 sq. deg. | | |



GW151226: Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 31 May 2016; published 15 June 2016)

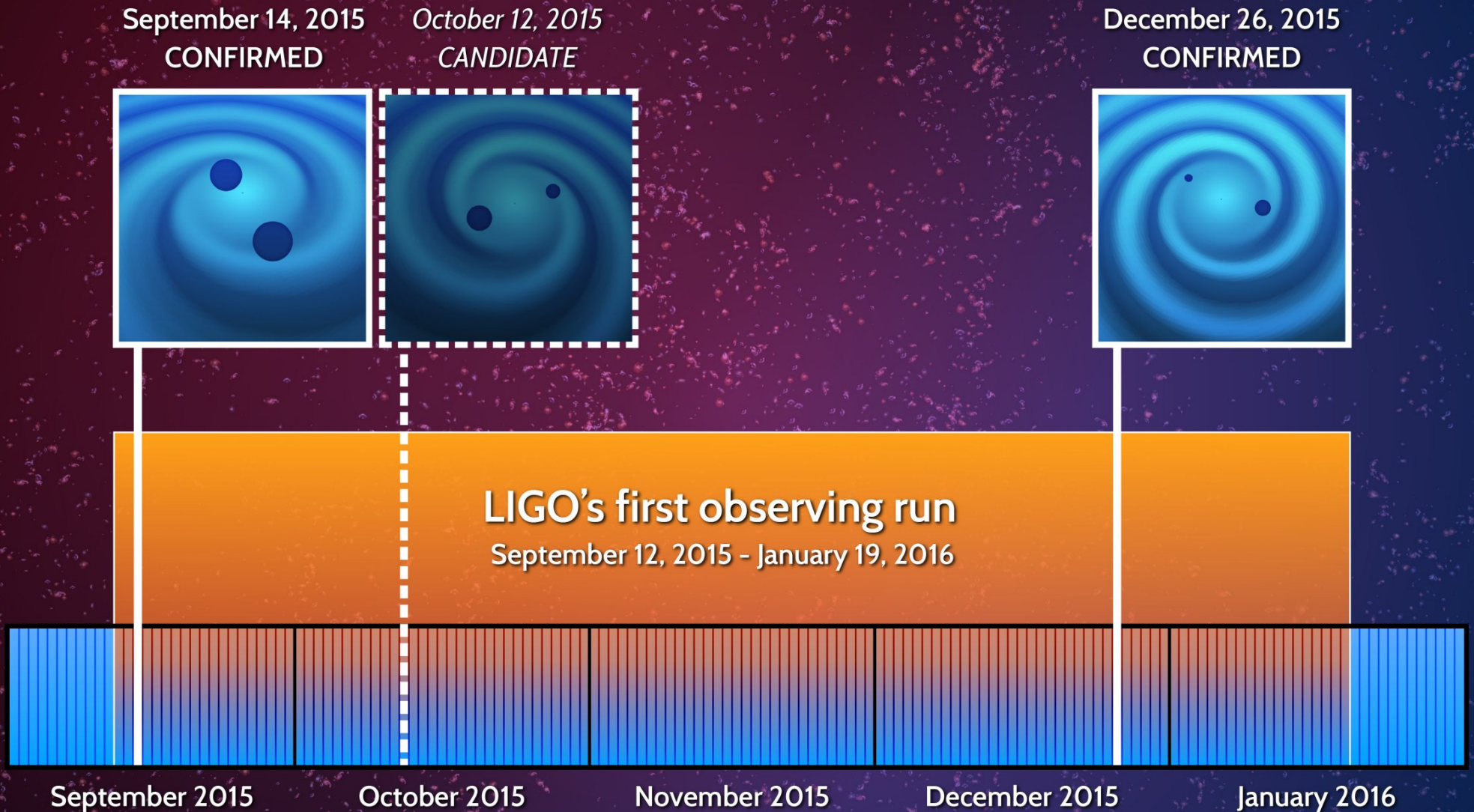
We report the observation of a gravitational-wave signal produced by the coalescence of two stellar-mass black holes. The signal, GW151226, was observed by the twin detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) on December 26, 2015 at 03:38:53 UTC. The signal was initially identified within 70 s by an online matched-filter search targeting binary coalescences. Subsequent off-line analyses recovered GW151226 with a network signal-to-noise ratio of 13 and a significance greater than 5σ . The signal persisted in the LIGO frequency band for approximately 1 s, increasing in frequency and amplitude over about 55 cycles from 35 to 450 Hz, and reached a peak gravitational strain of $3.4^{+0.7}_{-0.9} \times 10^{-22}$. The inferred source-frame initial black hole masses are $14.2^{+8.3}_{-3.7} M_{\odot}$ and $7.5^{+2.3}_{-2.3} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $20.8^{+6.1}_{-1.7} M_{\odot}$. We find that at least one of the component black holes has spin greater than 0.2. This source is located at a luminosity distance of 440^{+180}_{-190} Mpc corresponding to a redshift of $0.09^{+0.03}_{-0.04}$. All uncertainties define a 90% credible interval. This second gravitational-wave observation provides improved constraints on stellar populations and on deviations from general relativity.

| | |
|----------------------------------|------------------------|
| observed by | LIGO L1, H1 |
| source type | black hole (BH) binary |
| date | 26 Dec 2015 |
| time | 03:38:53 UTC |
| distance | 250 to 620 Mpc |
| redshift | 0.05 to 0.13 |
| signal-to-noise ratio | 13 |
| false alarm prob. | ~ 1 in 10 million |
| Source Masses M_{\odot} | |
| total mass | 20 to 28 |
| primary BH | 11 to 23 |
| secondary BH | 5 to 10 |
| remnant BH | 19 to 27 |



15 Jun 2016 – San Diego

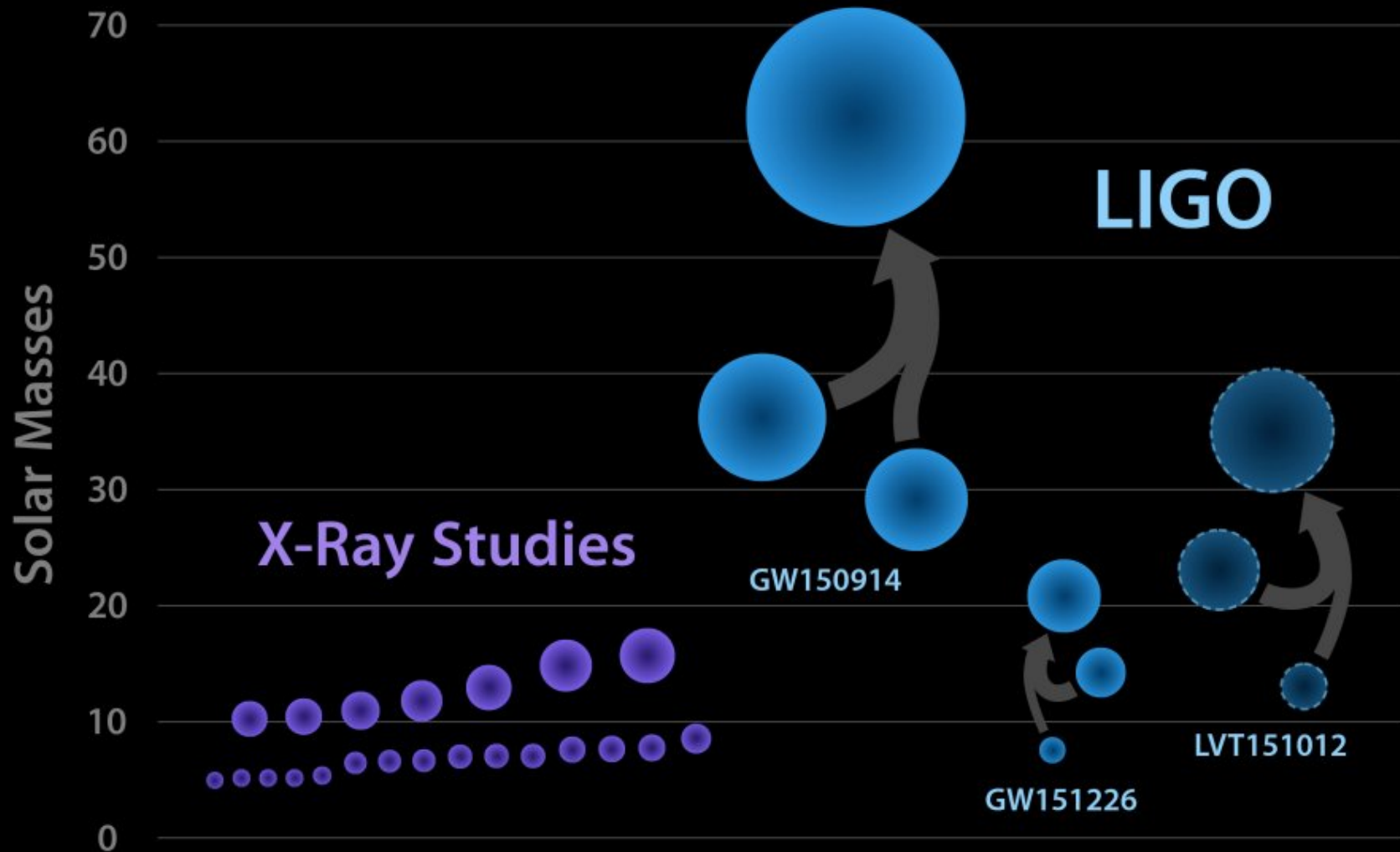
2.5 détections en 5 mois!



Mais seulement 43 % du temps, les 2 détecteurs enregistraient ensemble des données !

Une nouvelle population

Black Holes of Known Mass



Plusieurs découvertes en une

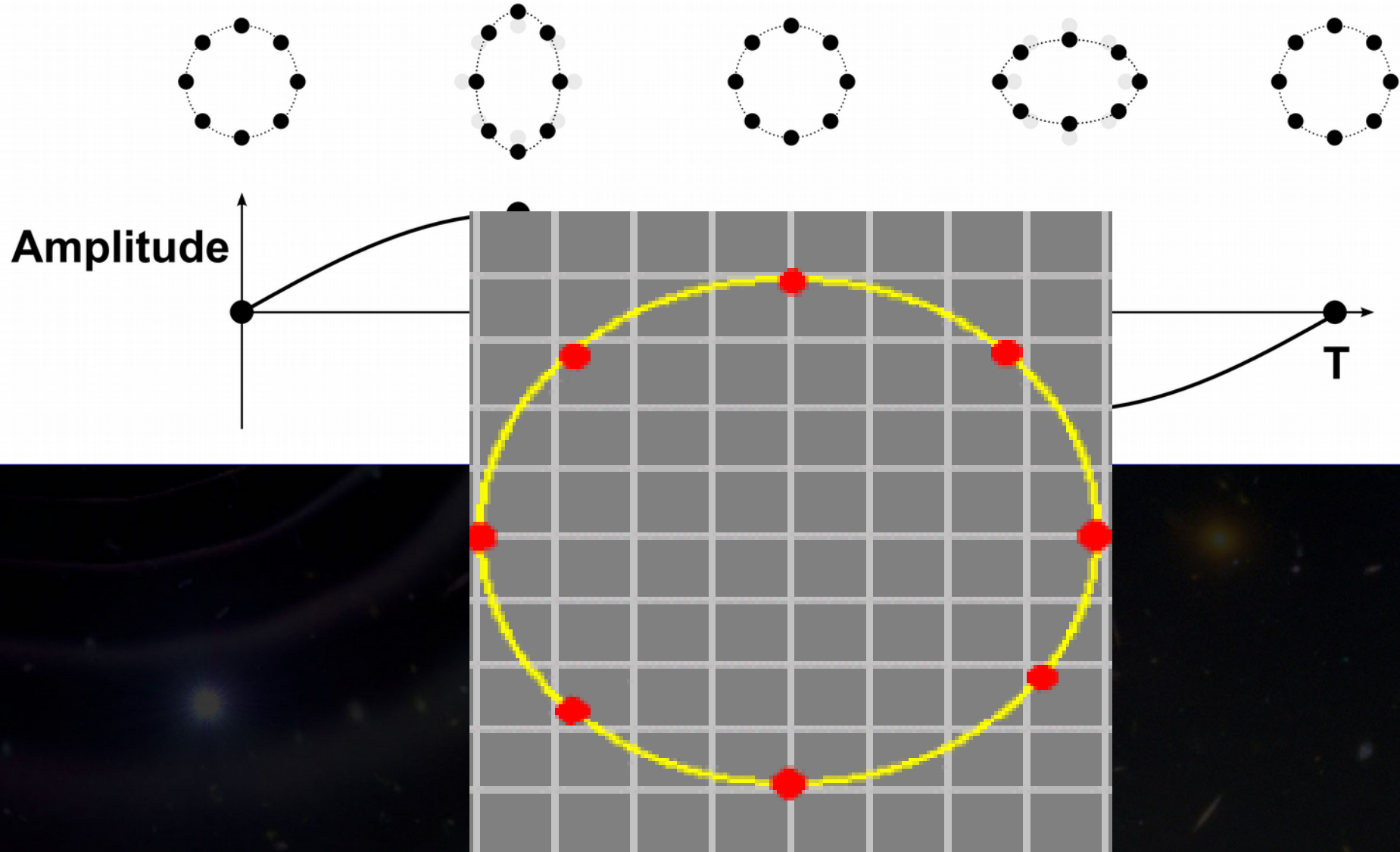
- Première détection directe des ondes gravitationnelles
- Première observation directe d'un trou noir
- Première observation d'un couple de trous noirs
- L'événement le plus énergétique jamais découvert
- Conforme à la théorie de la Relativité Générale

Bonus !

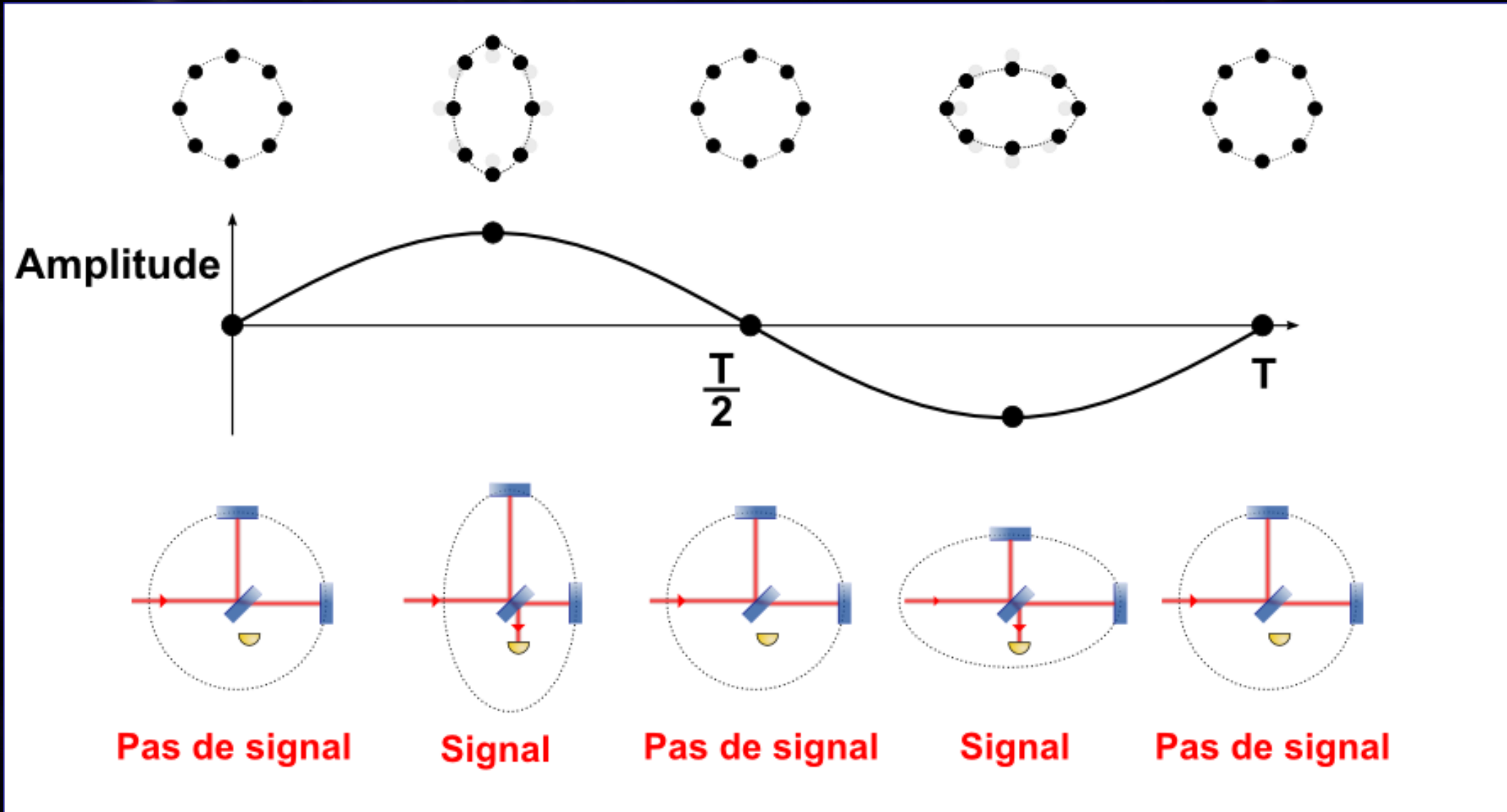
III

Le défi de la détection

Effet d'une onde gravitationnelle



Principe de la détection

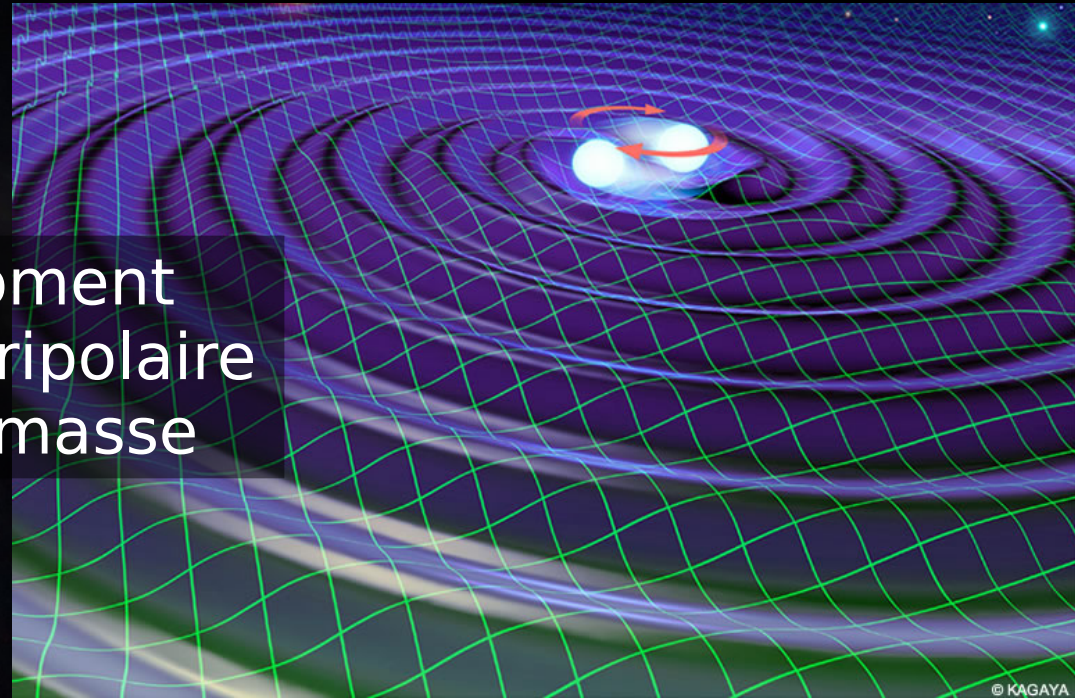


Amplitude d'une onde gravitationnelle

Formule du quadrupole :

$$h = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}$$

Amplitude \nearrow h ← Moment quadripolaire de masse \ddot{I}
Distance \uparrow r

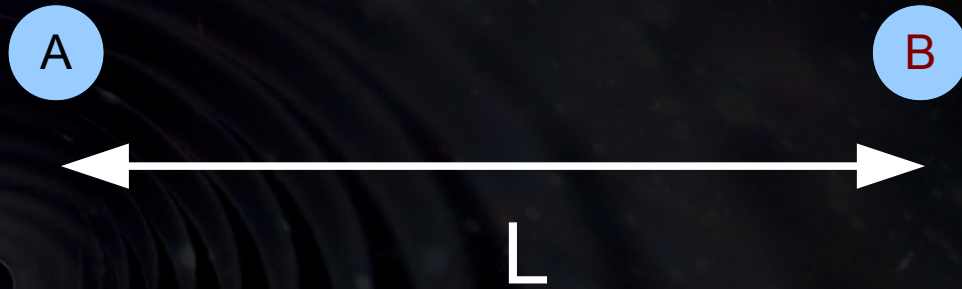


Amplitude typique pour un couple de trous noirs:

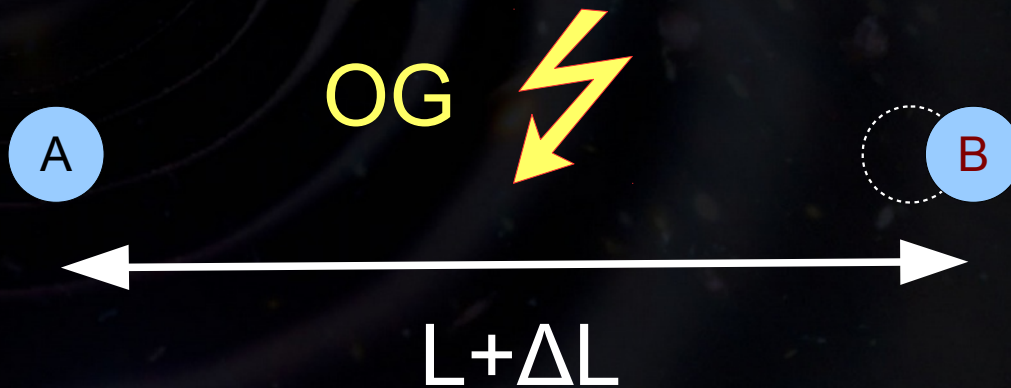
$$h = 1,5 \times 10^{-21} \left(\frac{\text{Masse}}{30 M_{\odot}} \right) \left(\frac{400 \text{ Mpc}}{\text{Distance}} \right) \left(\frac{\text{Fréquence OG}}{50 \text{ Hz}} \right)^{2/3}$$

$$\text{Fréq. OG} = 2 \times \text{fréq. orbitale}$$

Amplitude d'une onde gravitationnelle



2 masses, A et B
en chute libre



Amplitude de
l'onde :
 $h = \Delta L / L$

Ordre de grandeur de la mesure

Si $h \sim 10^{-21}$ cela revient à mesurer:

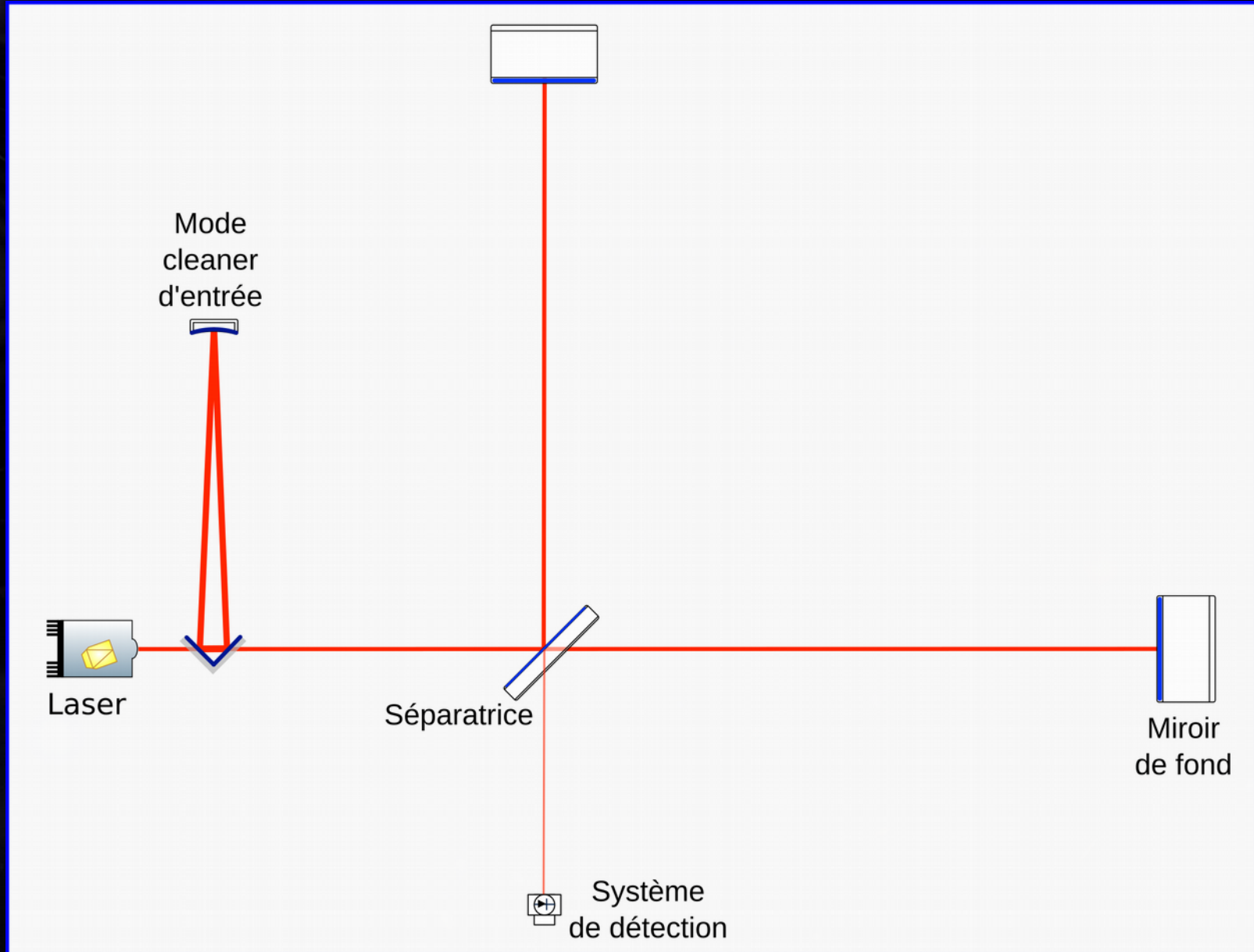


La distance Soleil – Proxima Centauri à 0.05 mm près !

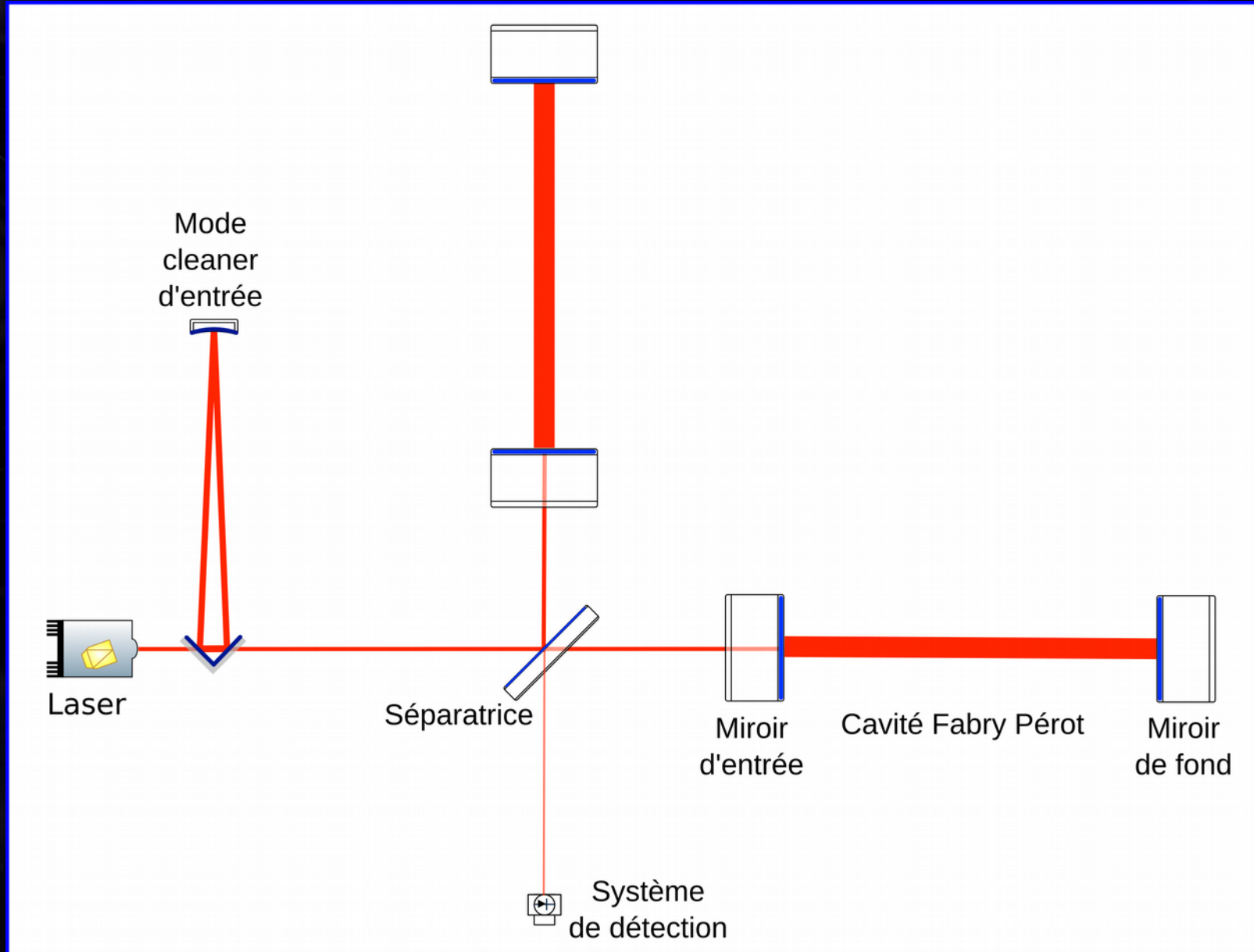


Ou 1 km à 10^{-18} mètre près !

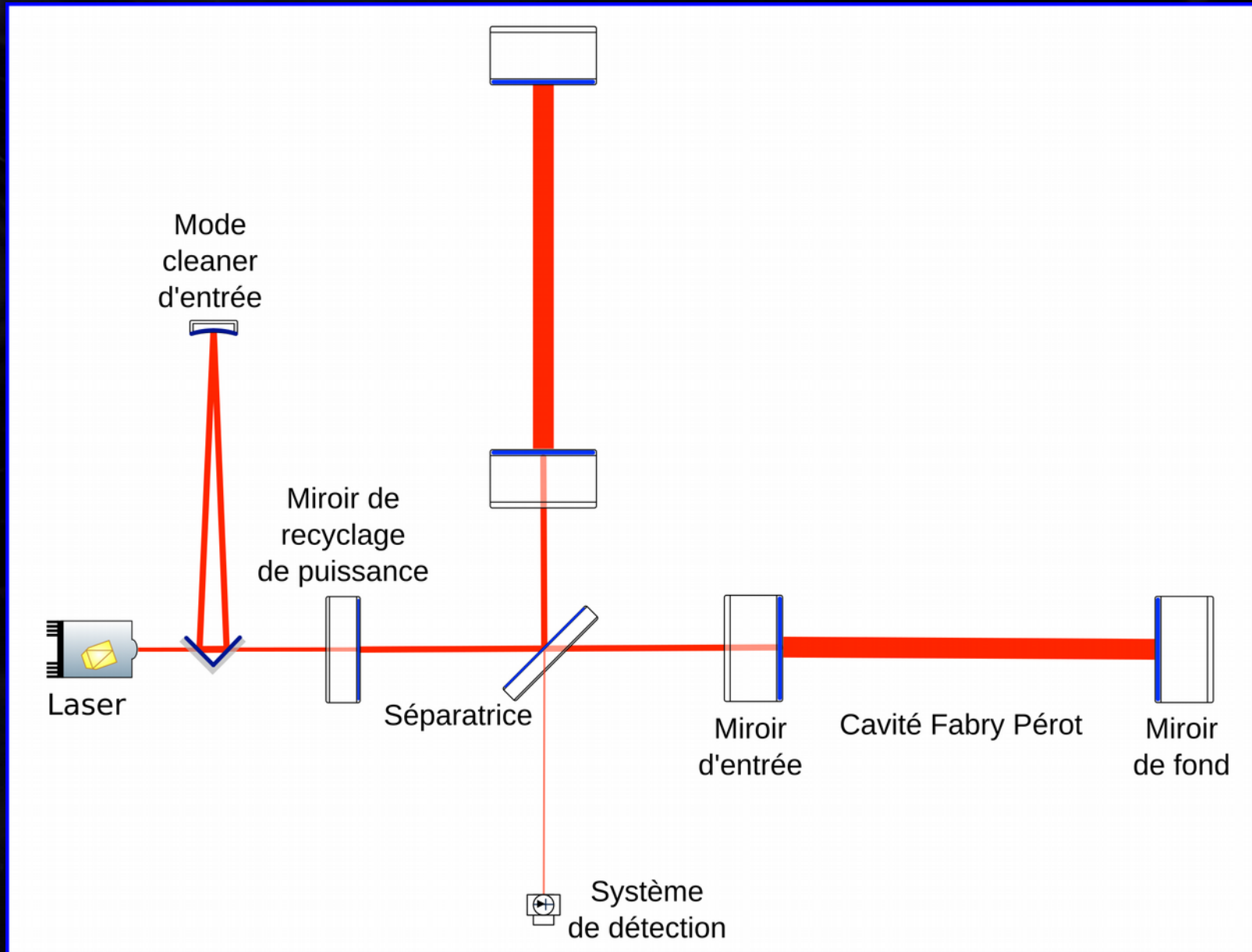
Le schéma optique



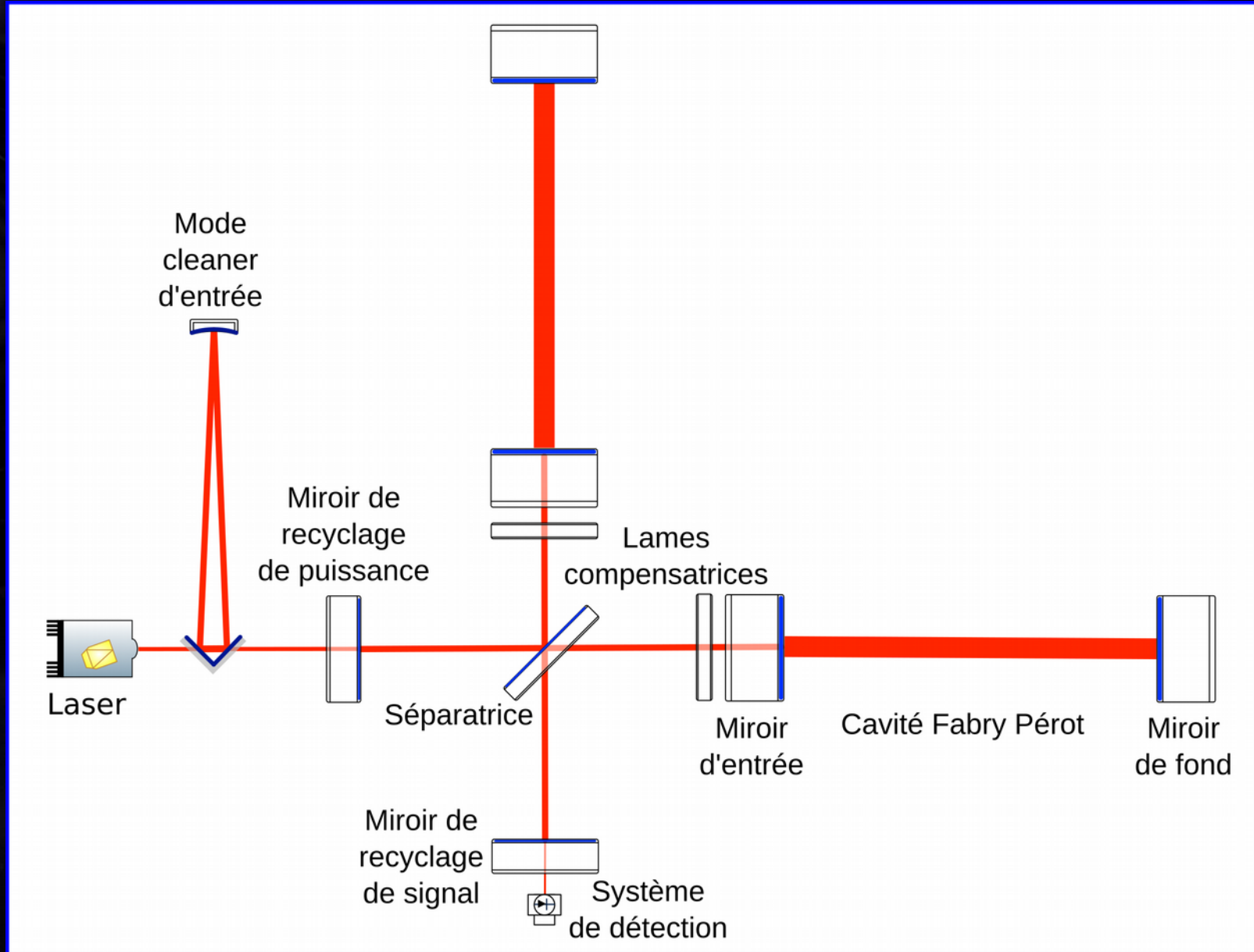
Le schéma optique



Le schéma optique



Le schéma optique



Vues d'un détecteur d'ondes gravitationnelles



Vue des tubes à vide



Photo de Virgo - Italie

Un microphone géant à l'écoute des vibrations de l'espace temps ³⁵

III

**De la première à la seconde
génération**

L' héritage de la première génération :

Une infrastructure !



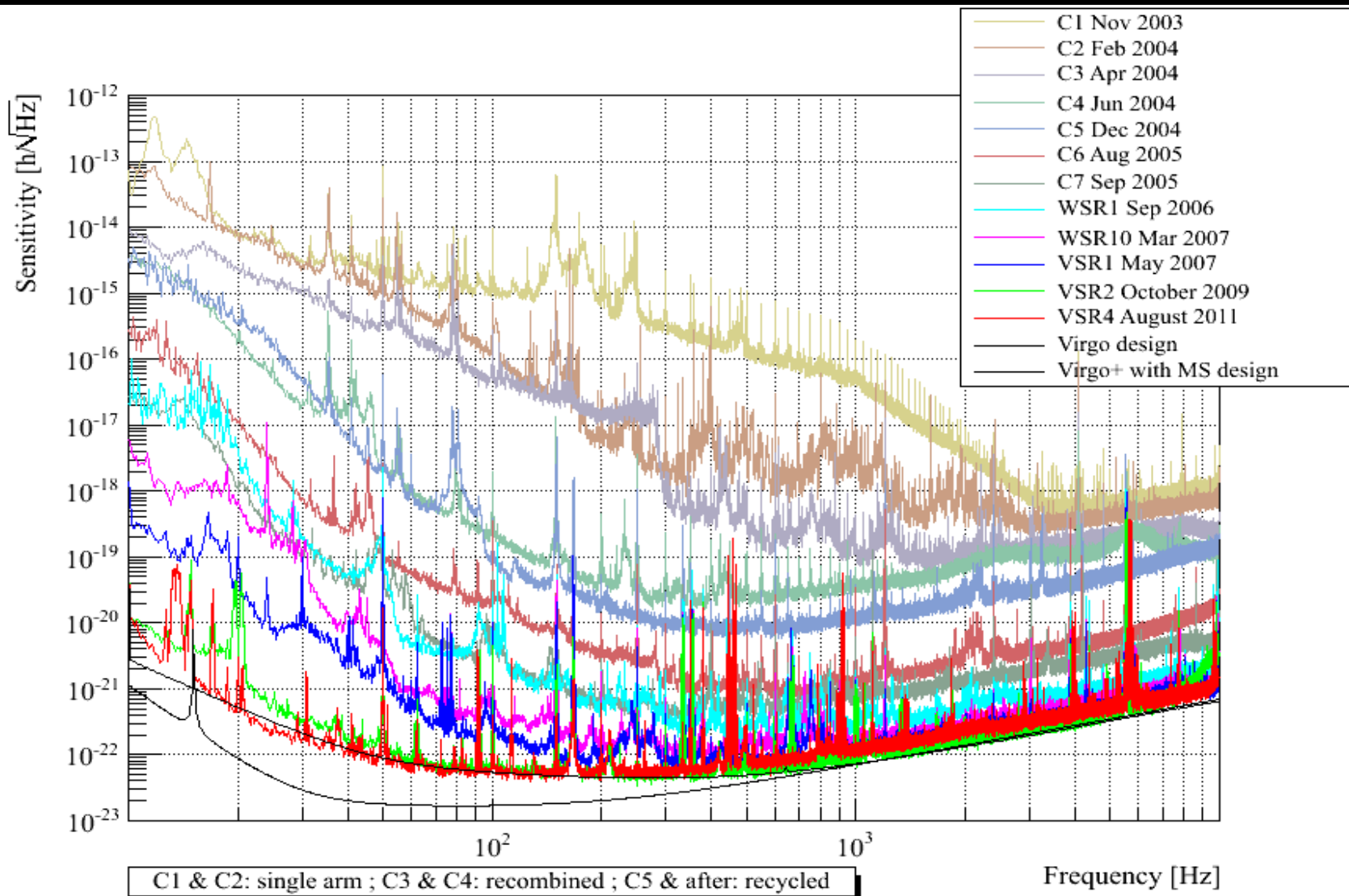
L' héritage de la première génération :

Un réseau de détecteurs :



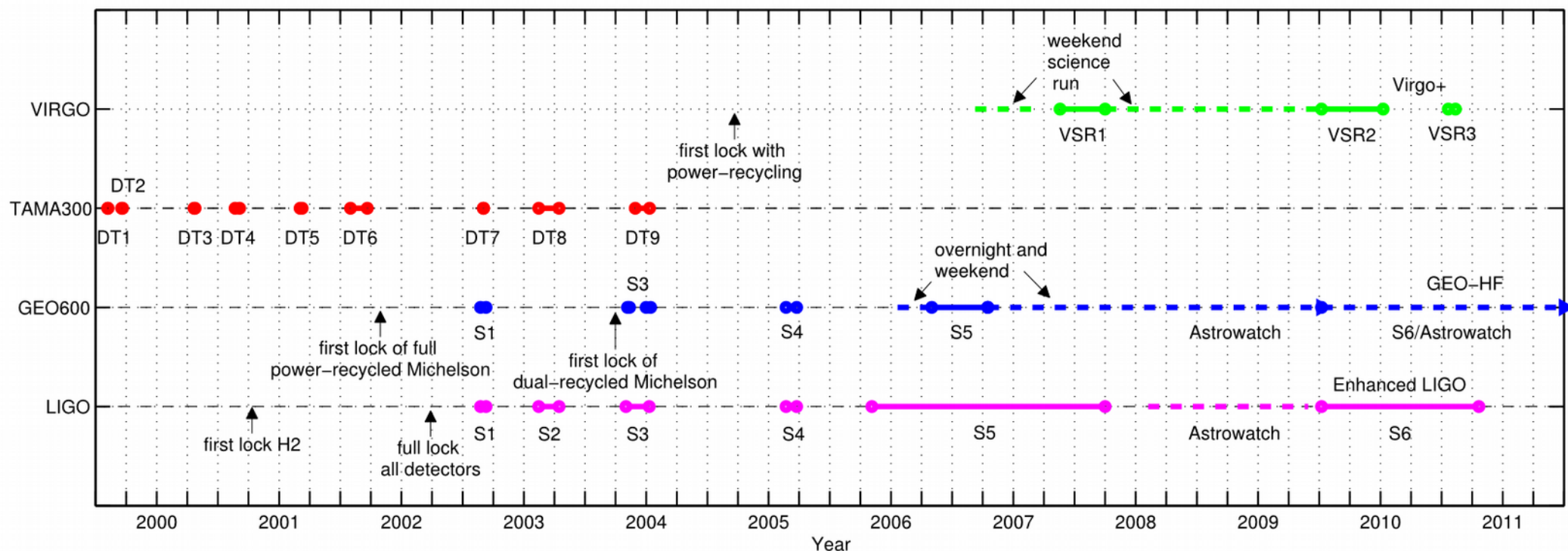
L' héritage de la première génération :

- 10 ans de 'commissioning'
- Une bonne compréhension des sources de bruits
- Une machine robuste (80 % du temps)



L' héritage de la première génération :

- Plusieurs années d'enregistrement de données
- La collaboration internationale fonctionne...
- ... mais pas de détections !



(Une centaine de papiers publiés sur les résultats des observations)

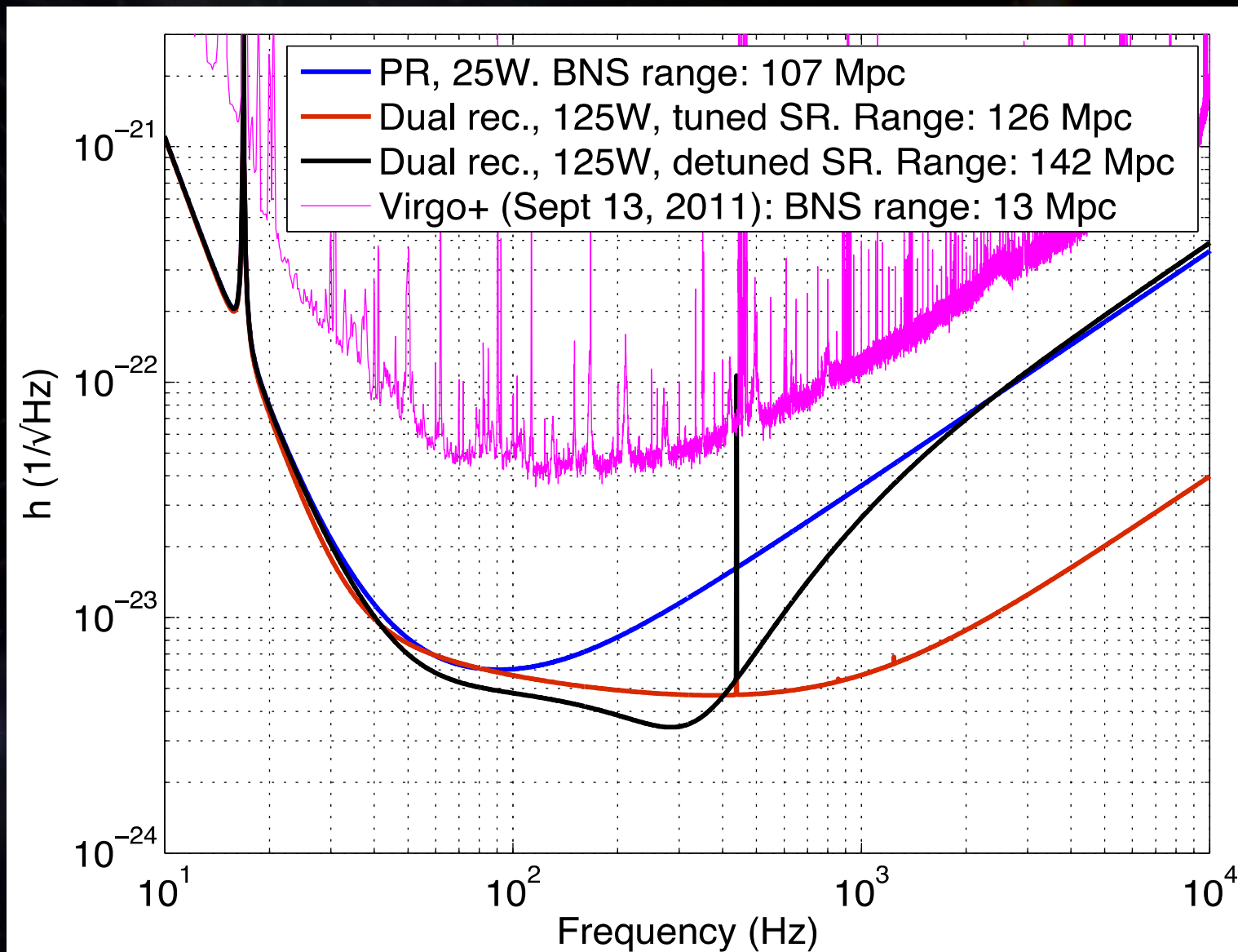
Vers une deuxième génération

- But : être 10 fois plus sensible
- Donc augmenter le volume de détection $\times 1000$
- Atteindre 10^5 galaxies, au moins une détection par mois



Comment augmenter la sensibilité ?

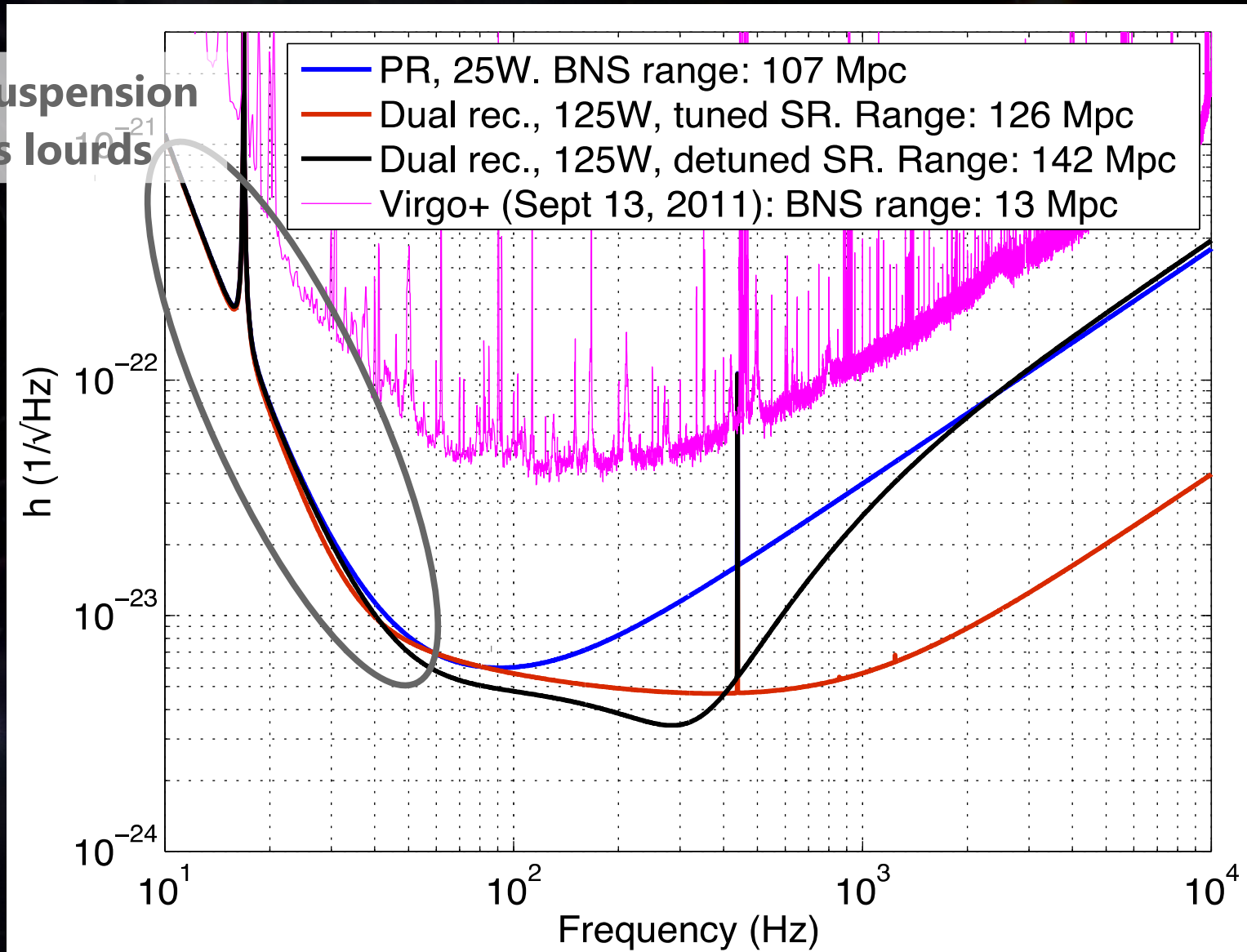
Garder l'infrastructure mais améliorer le reste



Comment augmenter la sensibilité ?

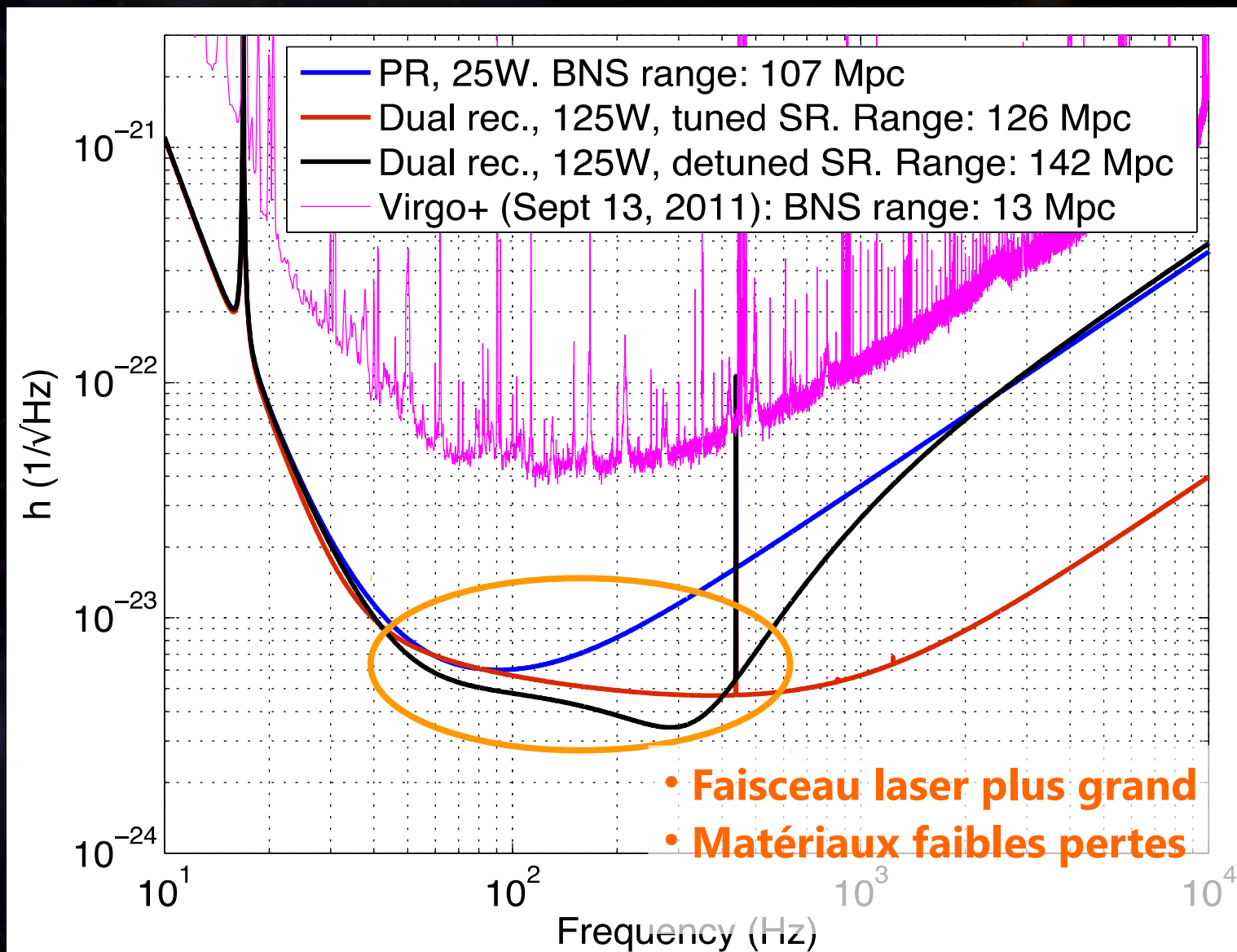
Garder l'infrastructure mais améliorer le reste

- Meilleure suspension
- Miroirs plus lourds



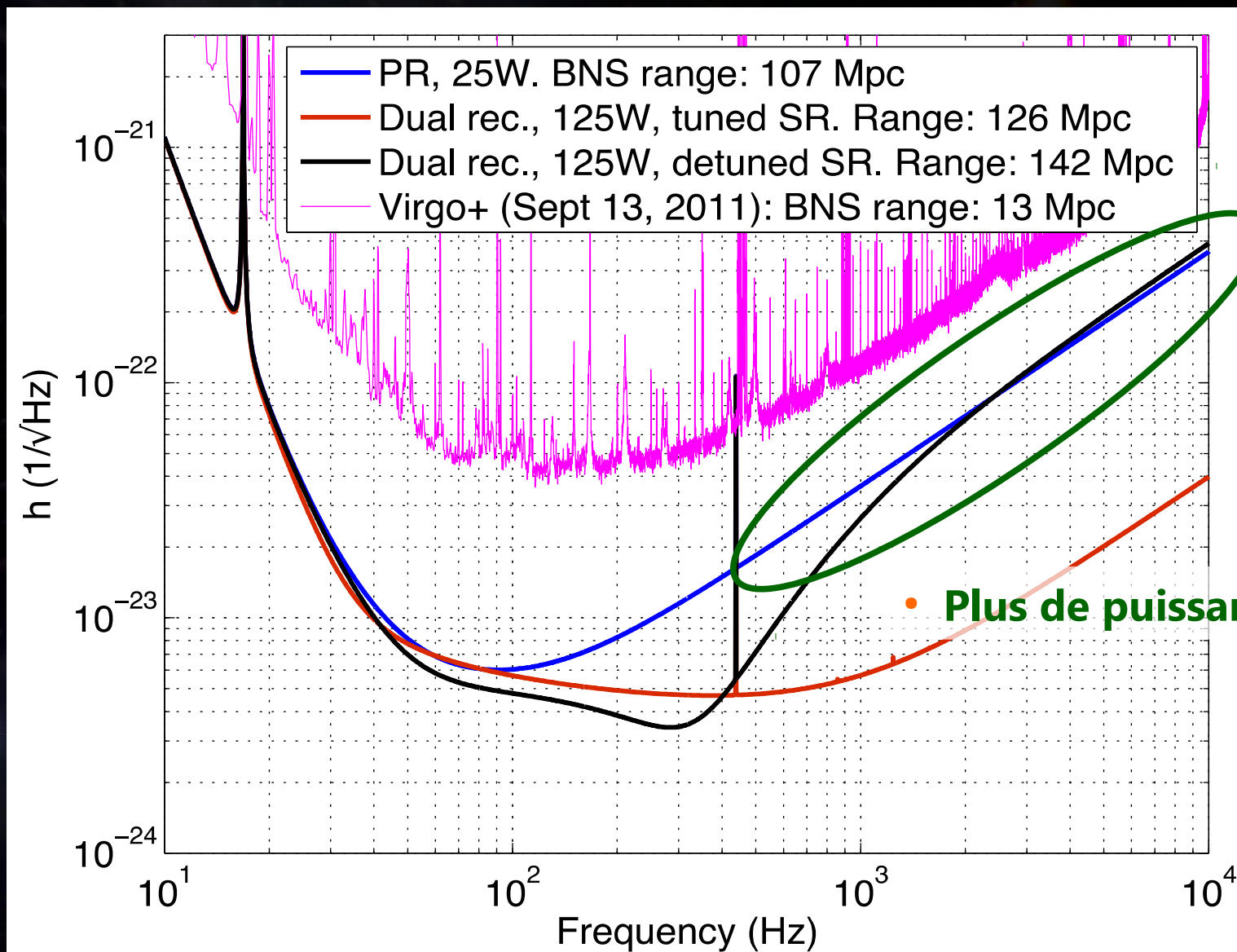
Comment augmenter la sensibilité ?

Garder l'infrastructure mais améliorer le reste

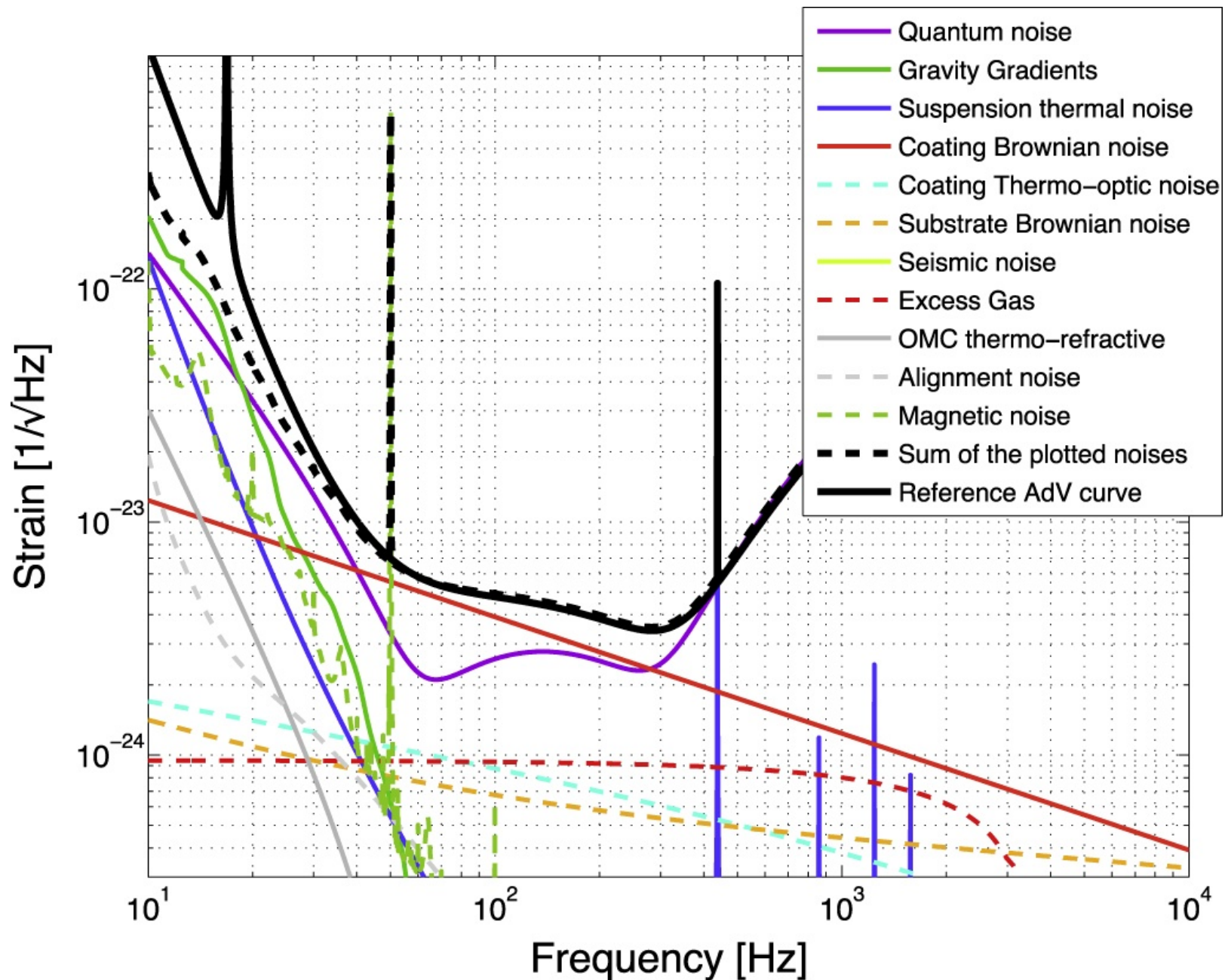


Comment augmenter la sensibilité ?

Garder l'infrastructure mais améliorer le reste



Les bruits limitant la sensibilité



<http://stacks.iop.org/0264-9381/32/i=2/a=024001>

IV

Advanced Virgo plus en détails (une sélection)

Quelques dates...

2011 – Dernière prise de données de Virgo

2012 – Finalisation du design d'Advanced Virgo

2013 – Préparation des sous systèmes dans les laboratoires – travaux sur le site

2014 – Installation sur le site

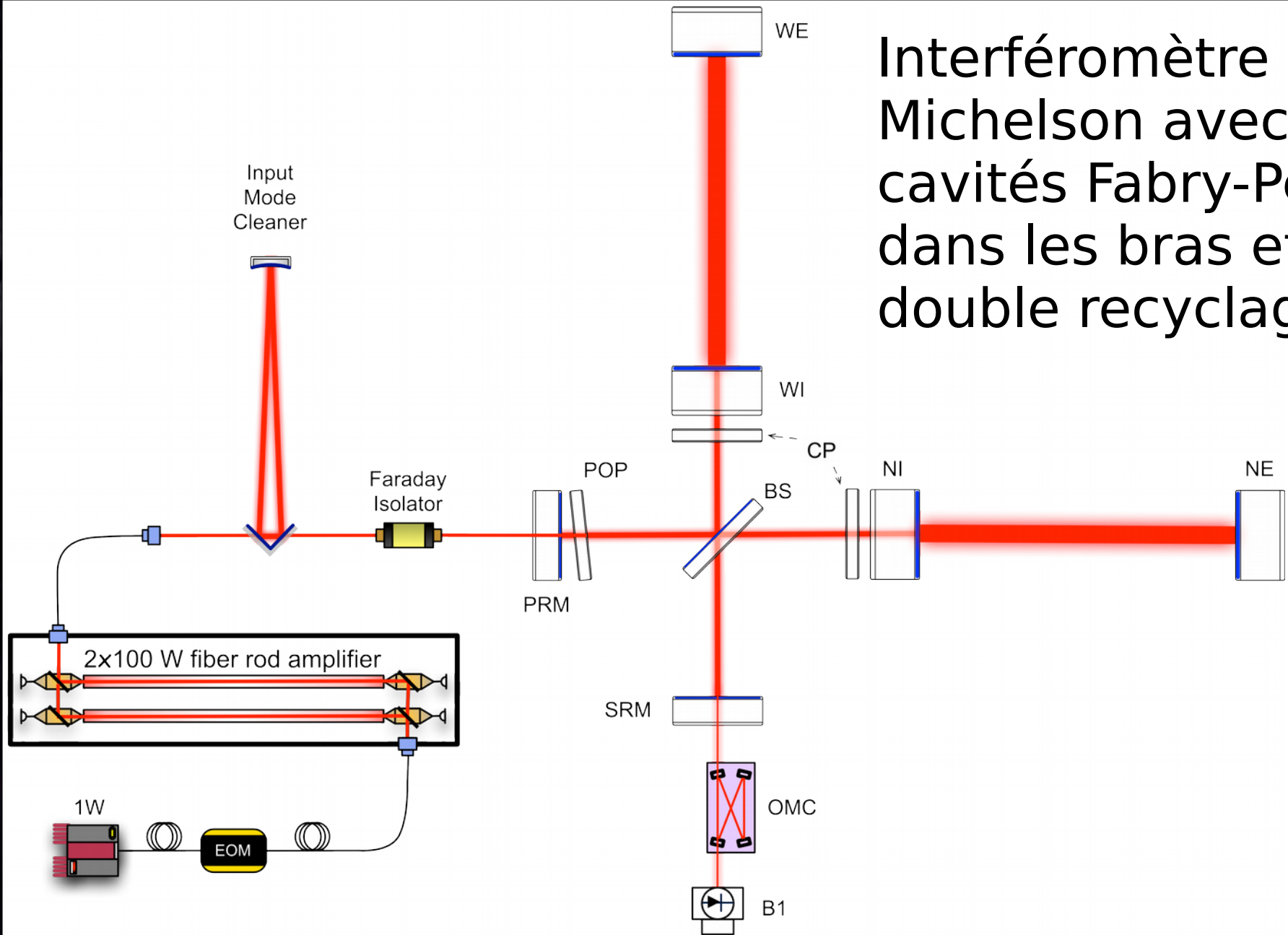
2015 – Injection système prêt, installation continue

2016 – 2 longs bras lockés

2017 – Première prise de données

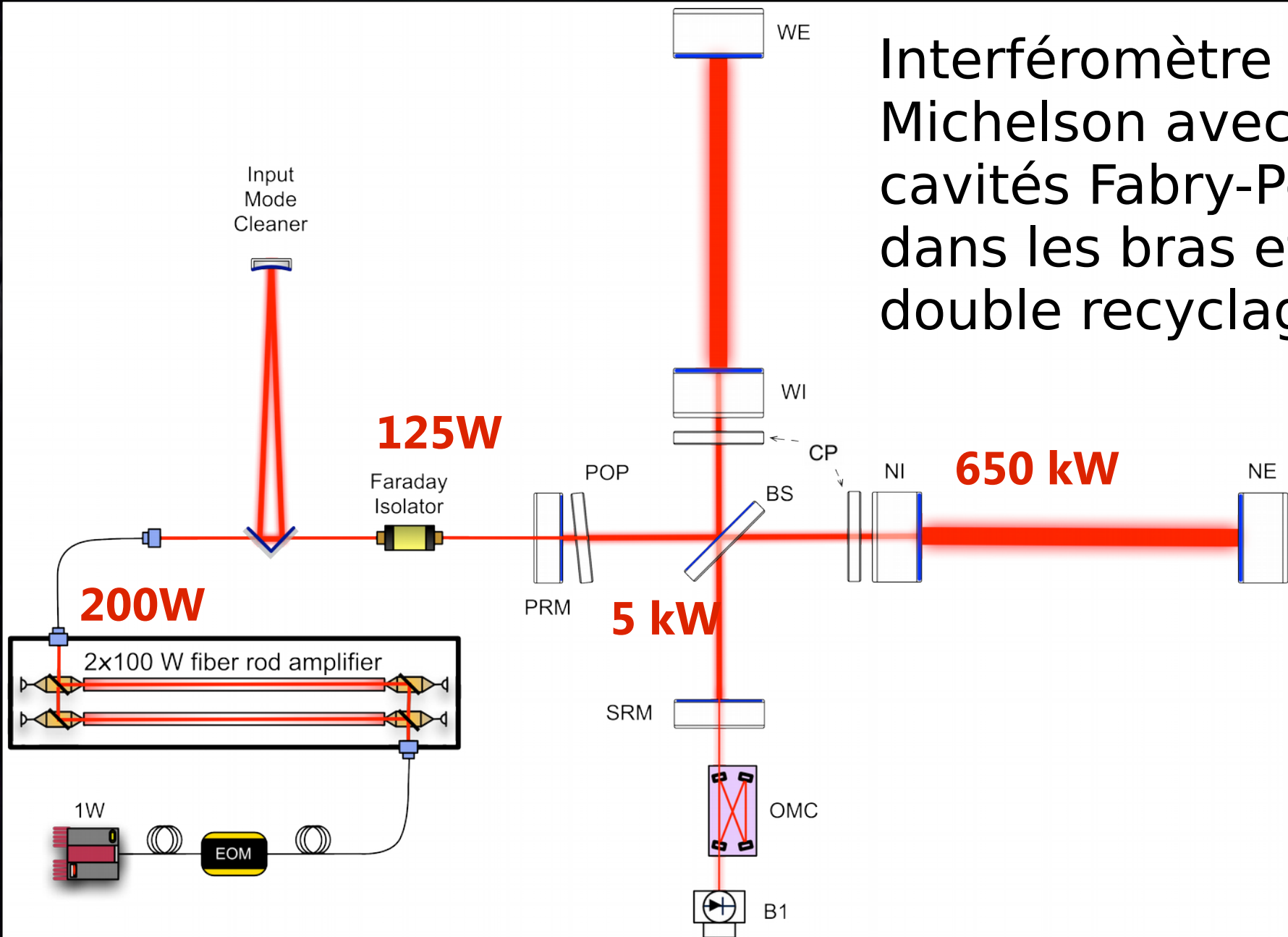
Le design optique d'Advanced Virgo

Interféromètre de Michelson avec cavités Fabry-Pérot dans les bras et double recyclages

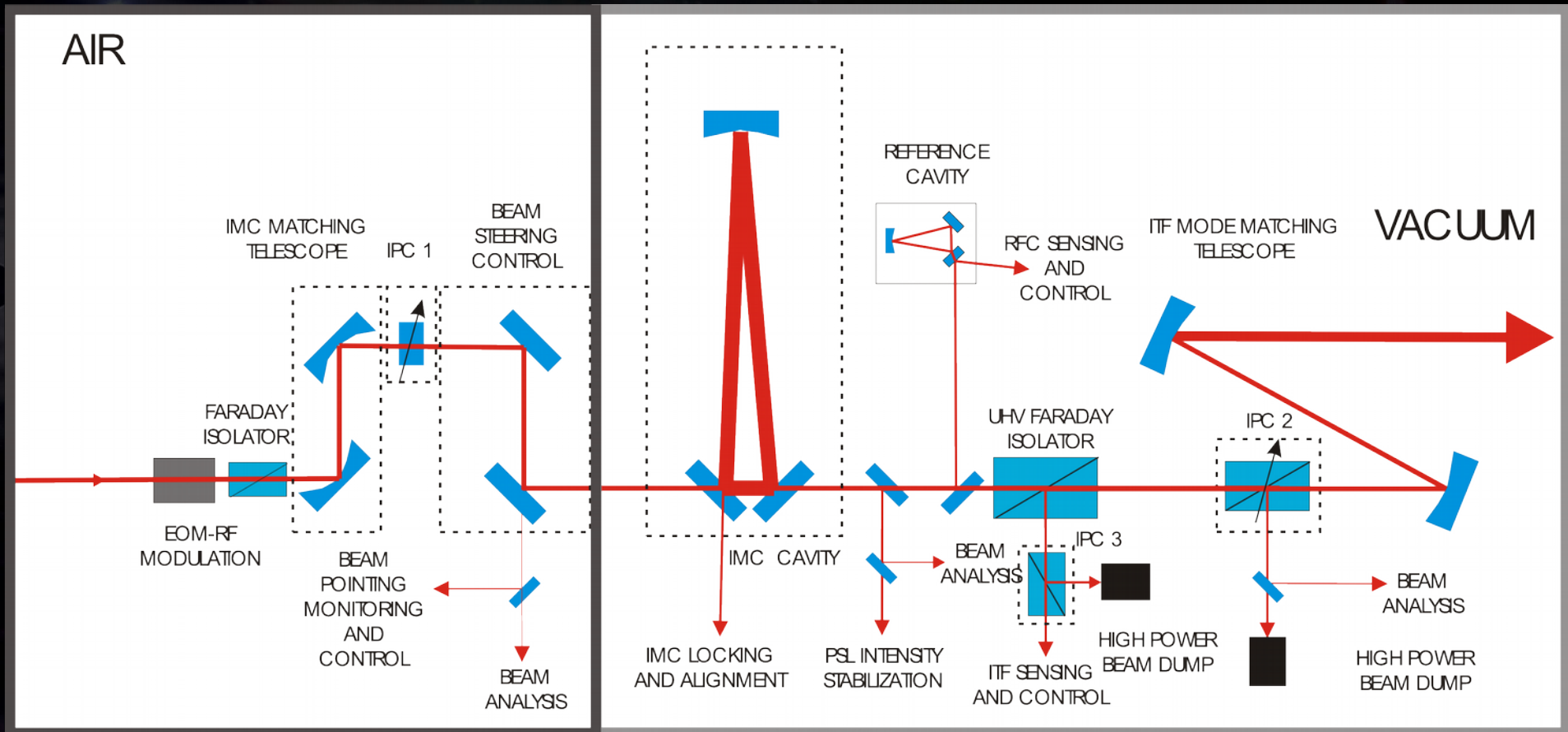


Le design optique d'Advanced Virgo

Interféromètre de Michelson avec cavités Fabry-Pérot dans les bras et double recyclages

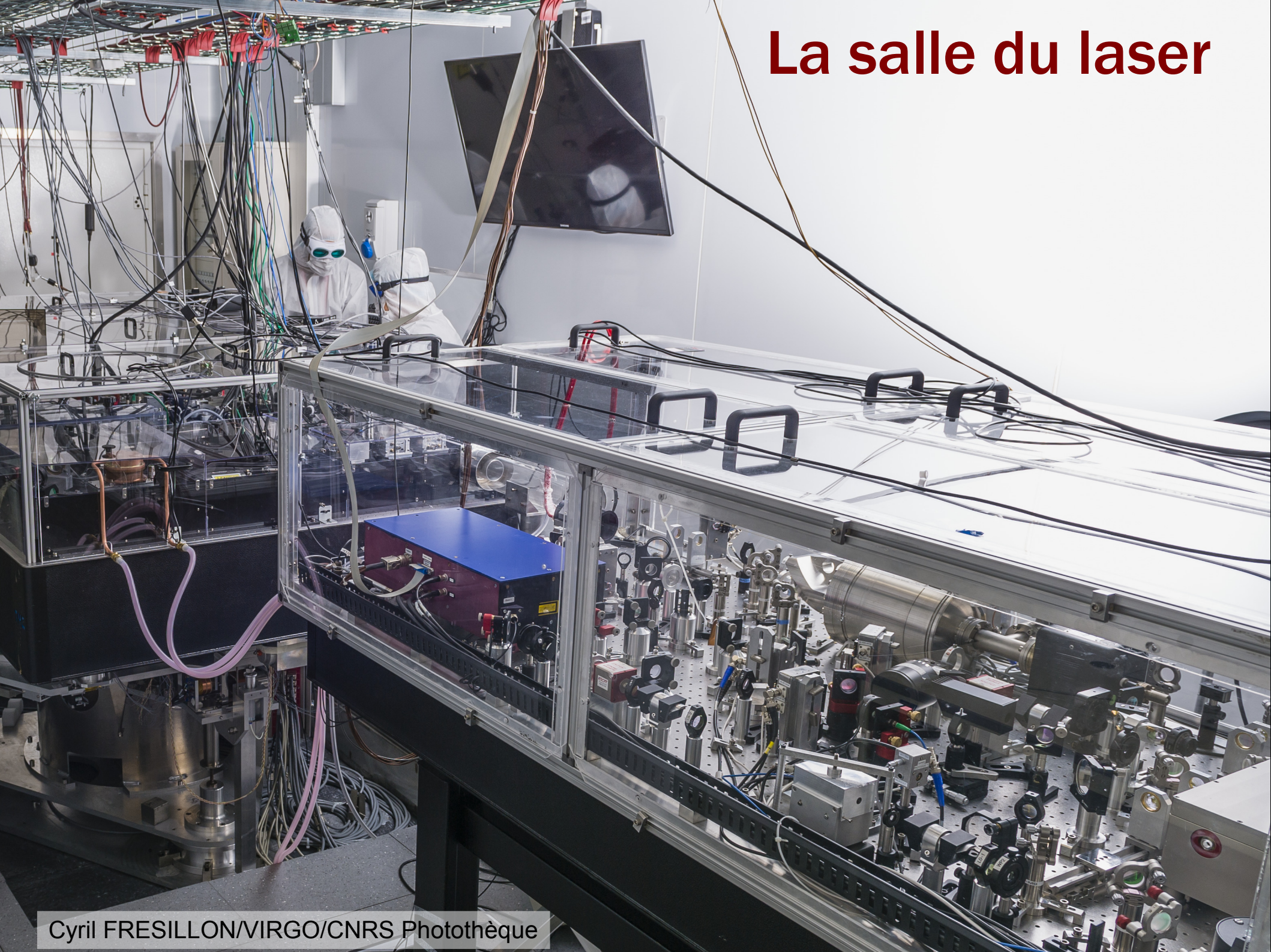


Le système d'injection

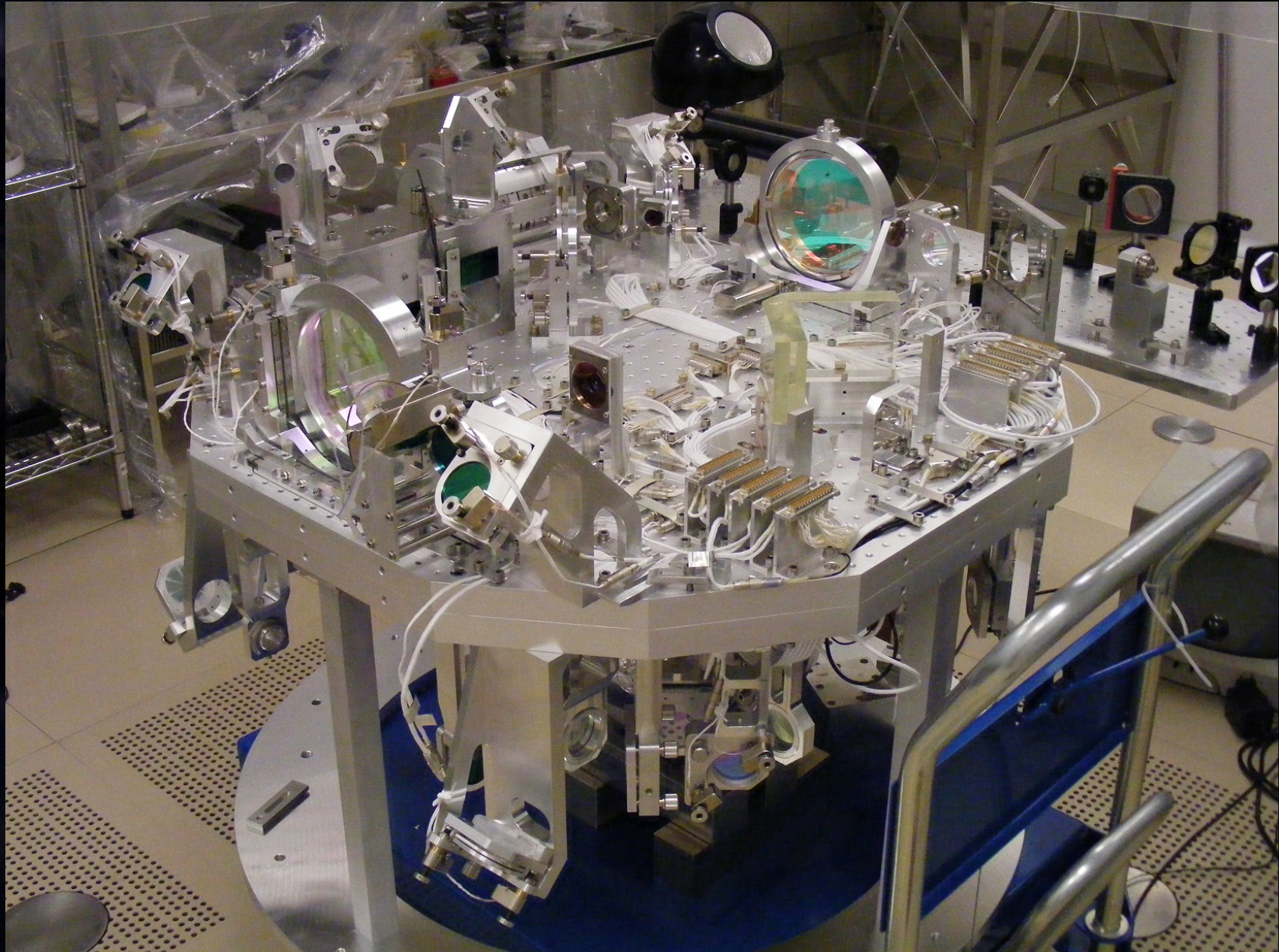


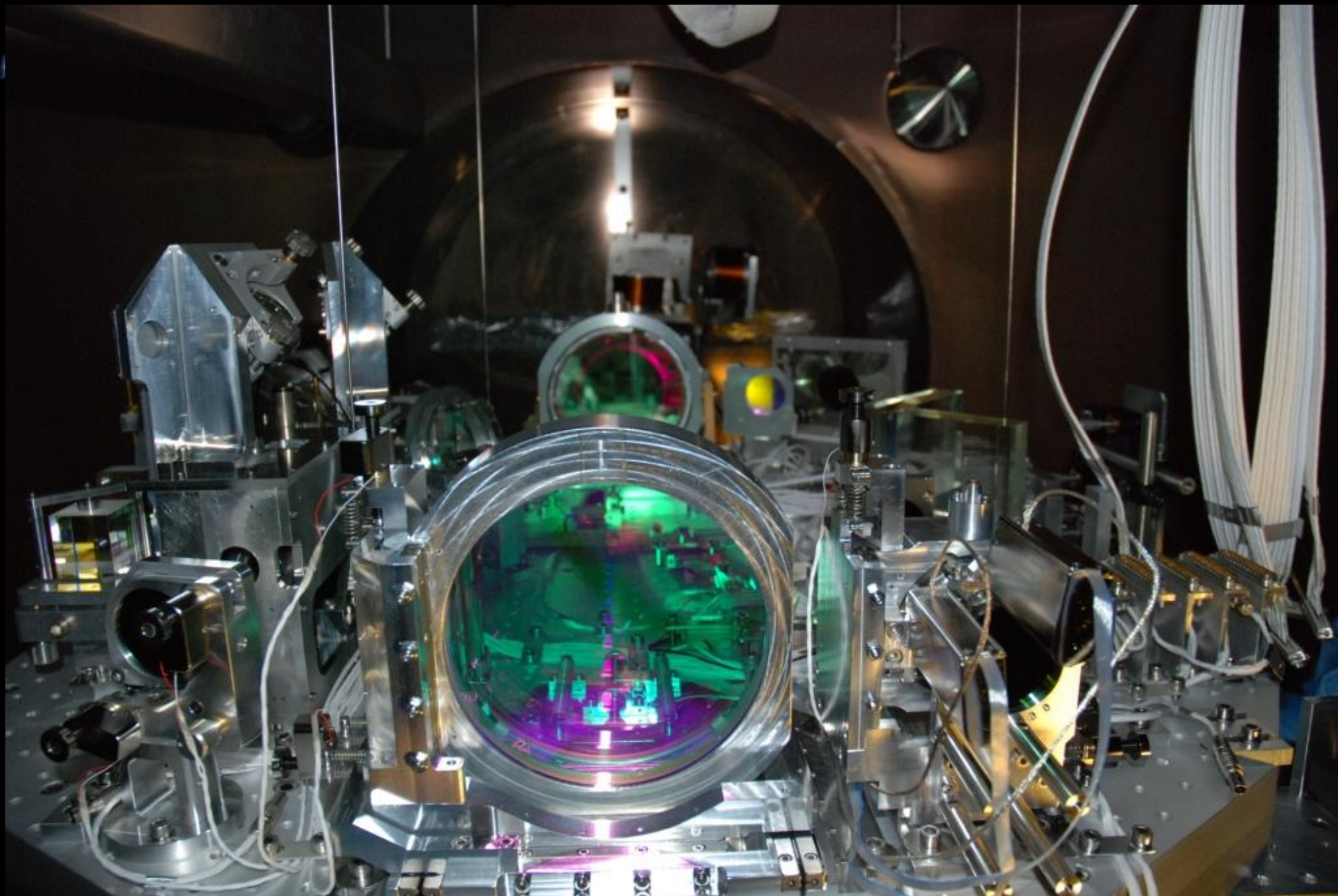
- Sert à façonner et stabiliser le faisceau
- Ajouter les bandes latérales
- Contrôler la puissance

La salle du laser

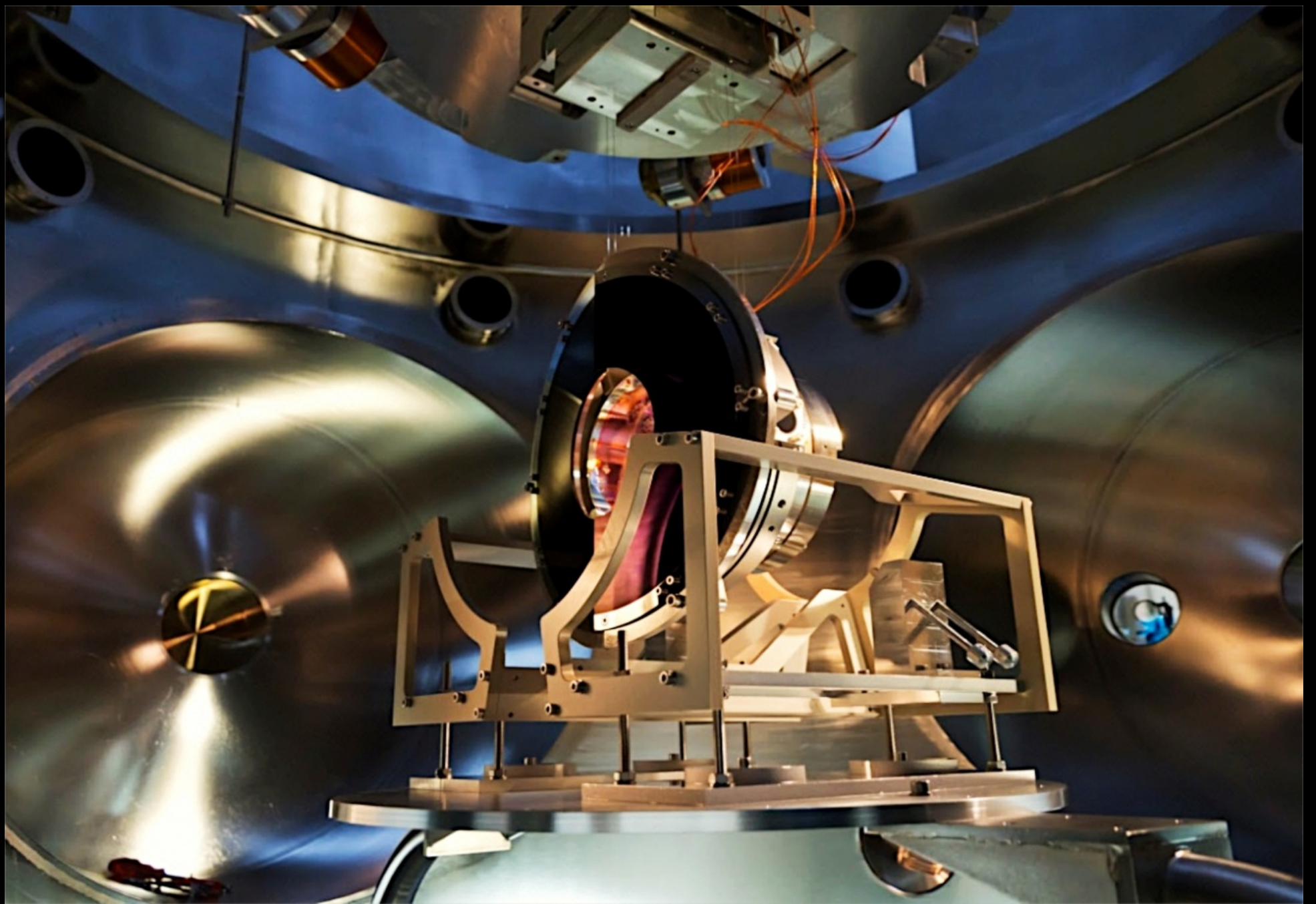


Le banc suspendu d'injection





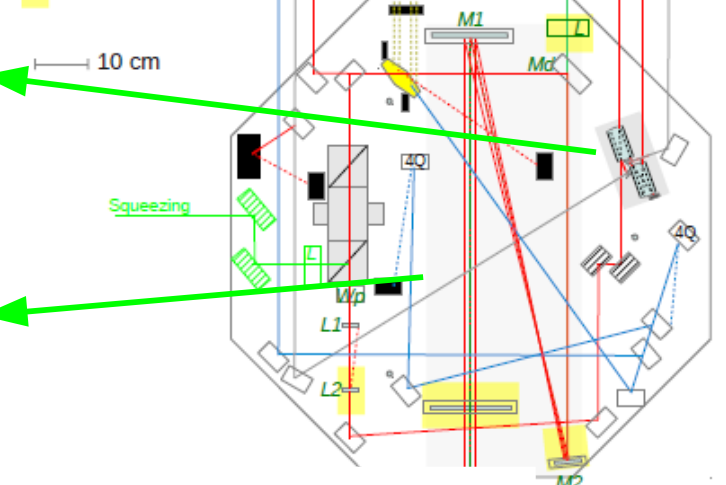
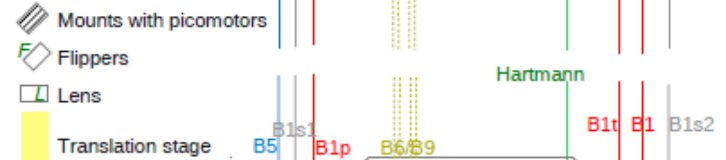
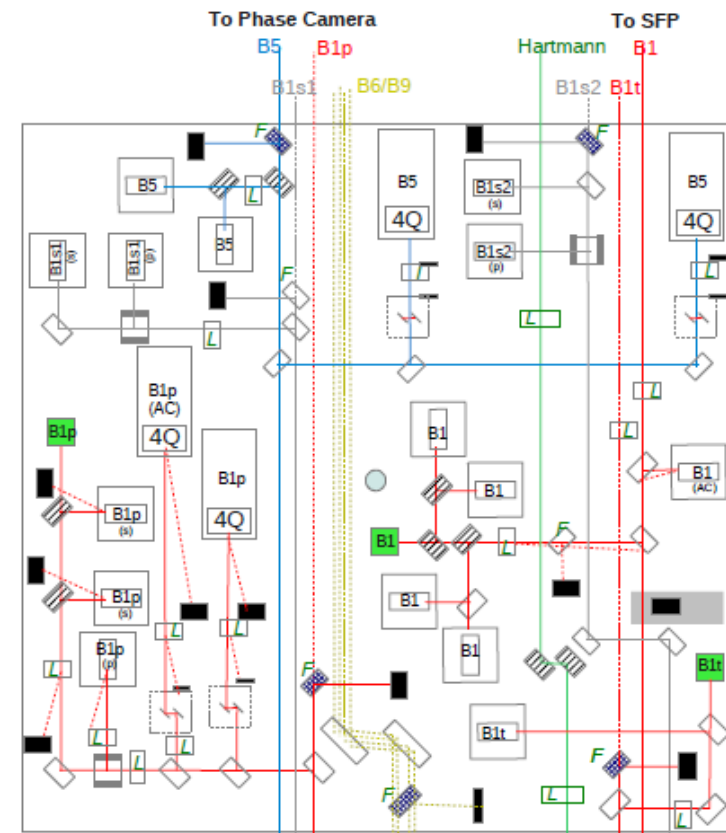
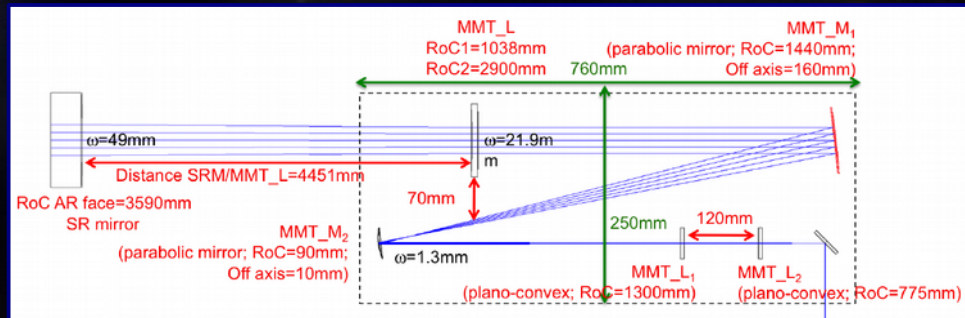
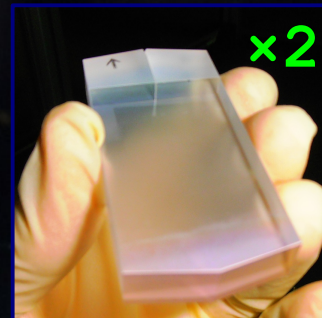
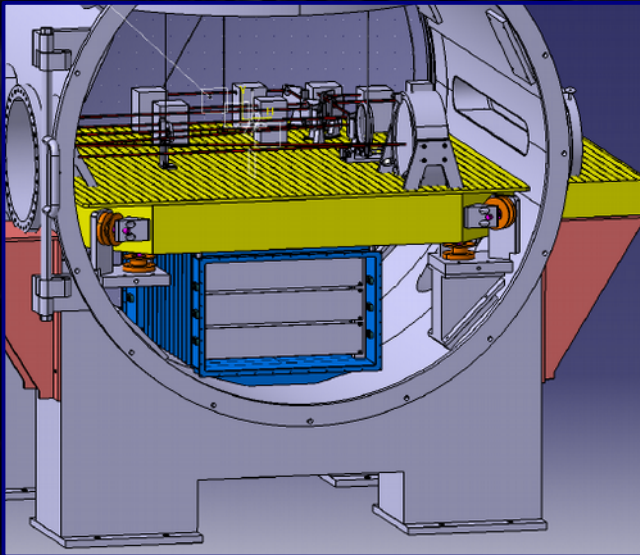
Le même banc dans la tour à vide



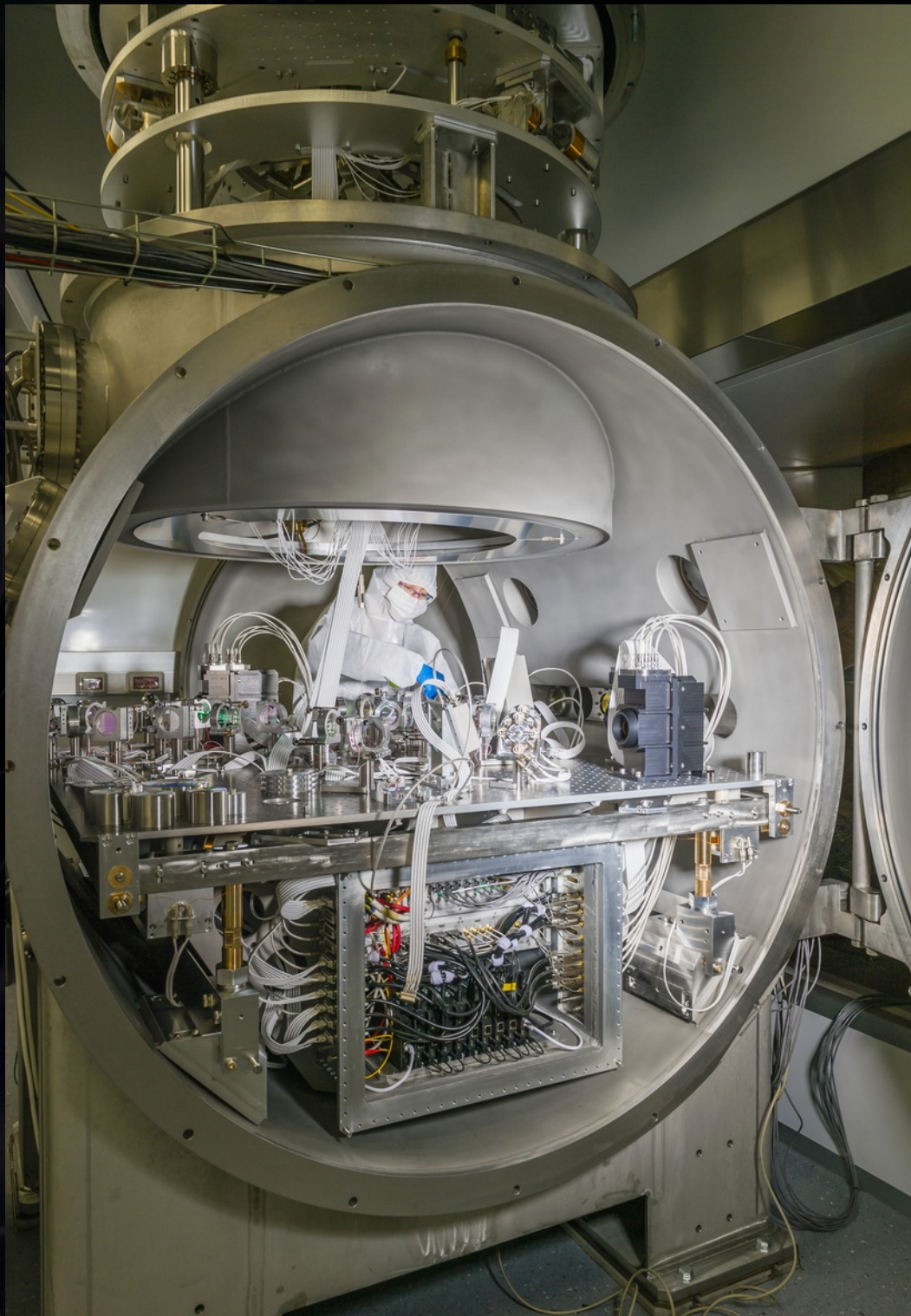
Le miroir de fin du mode cleaner

Du coté de la détection

- Création des signaux pour le contrôle
- Enregistre le signal gravitationnel
- Banc suspendue sur la frange noire (droite) mais aussi en bout de bras (dessous)



From ITF

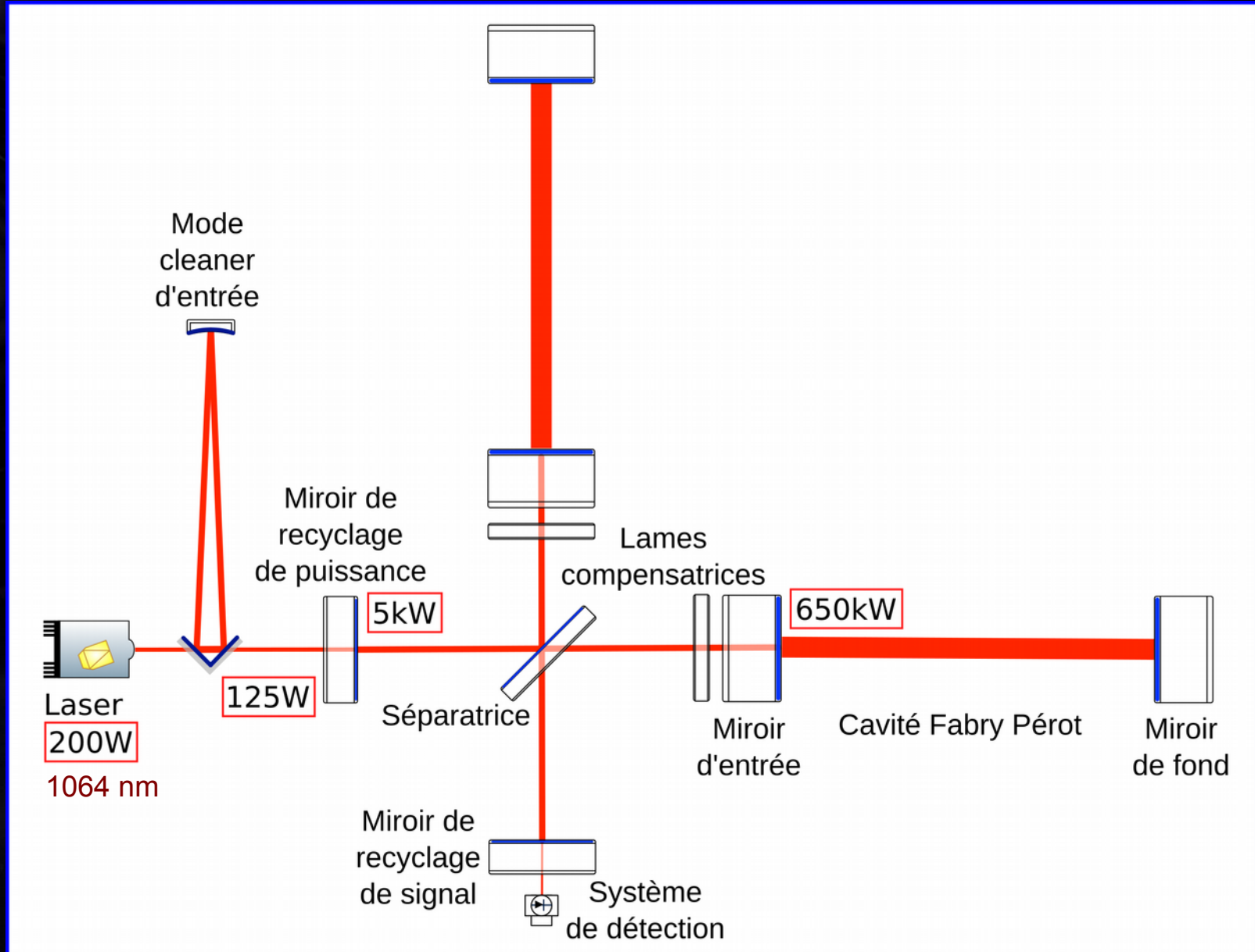


Cyril FRESILLON/VIRGO/CNRS Photothèque



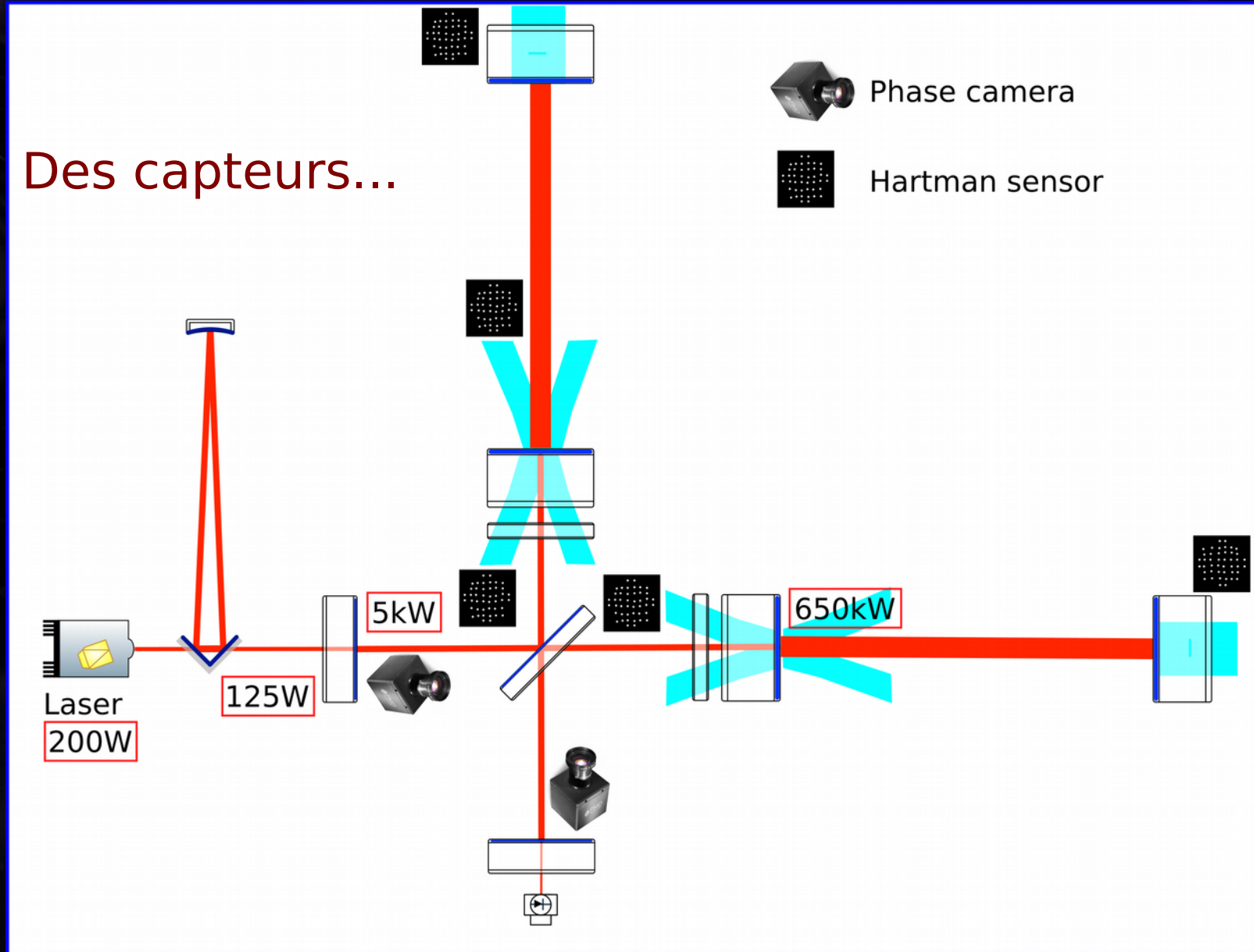
Cyril FRESILLON/VIRGO/CNRS Photothèque

Systeme actif de compensation thermique



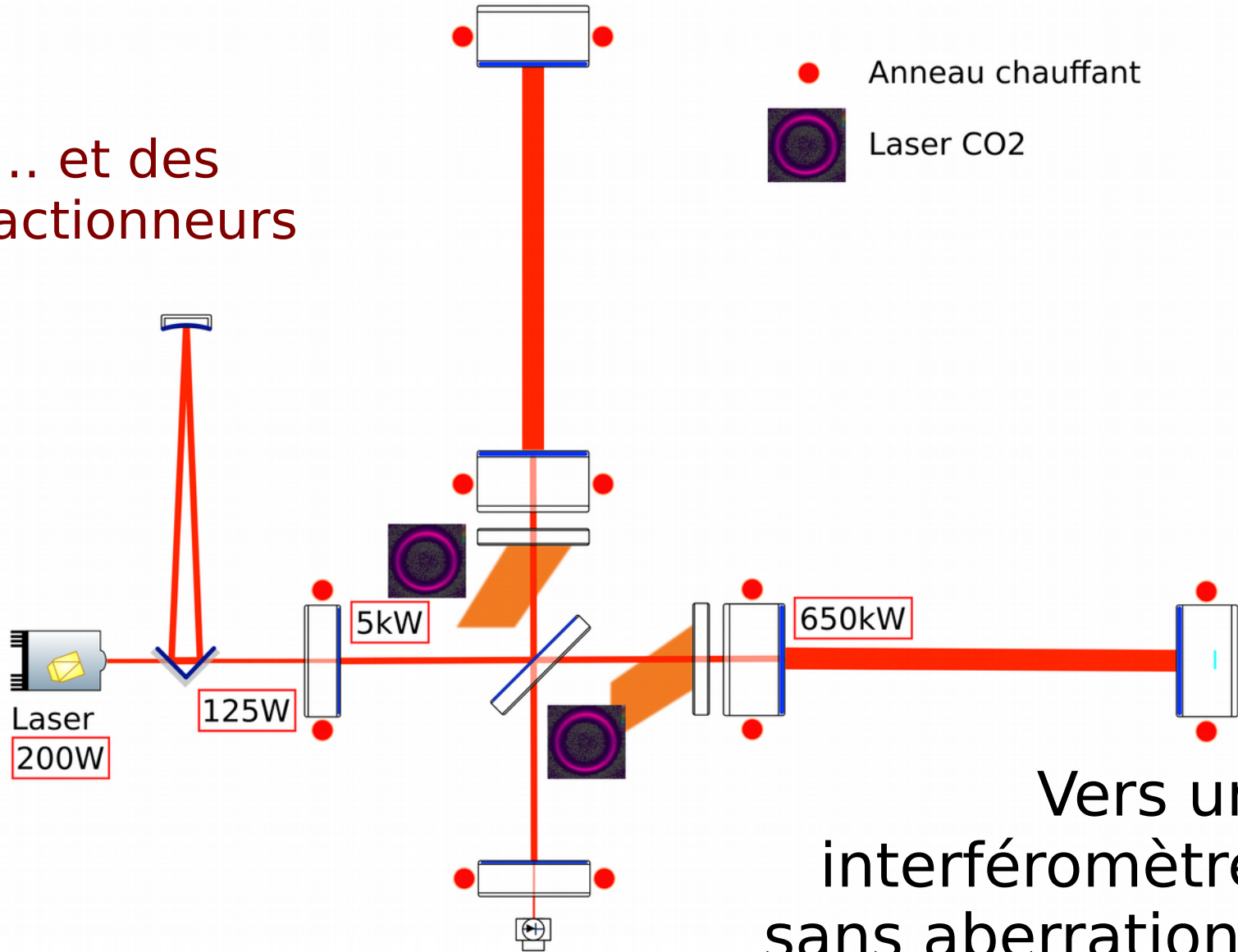
Systeme actif de compensation thermique

Des capteurs...

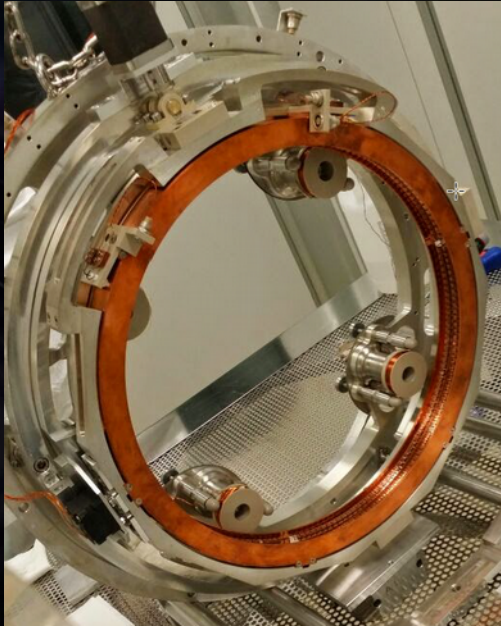


Systeme actif de compensation thermique

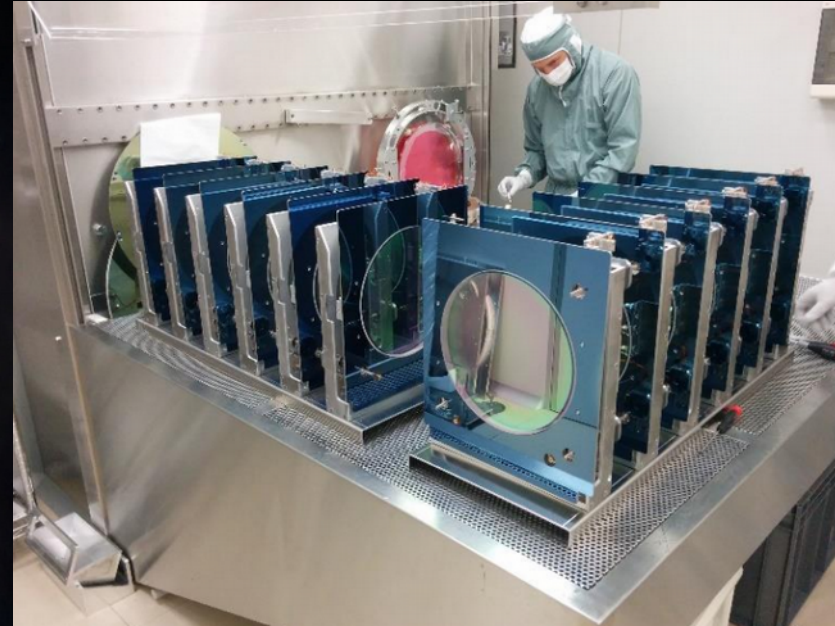
... et des actionneurs



Systeme actif de compensation thermique



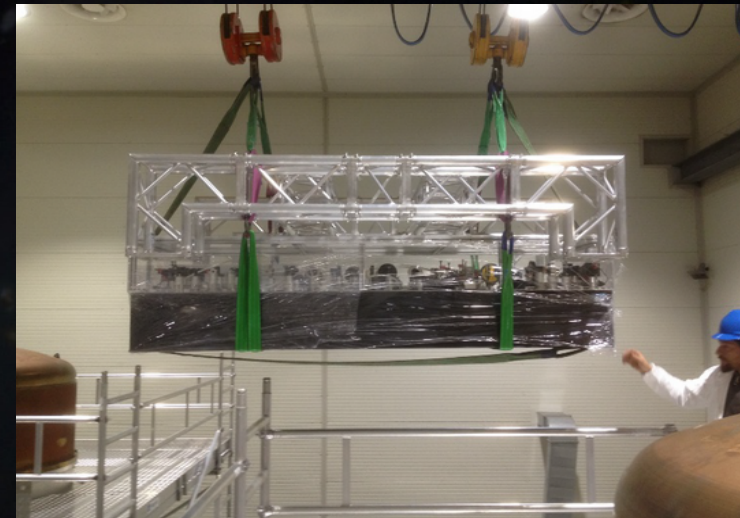
Anneau chauffant



Miroirs de renvoi pour le faisceau Hartman



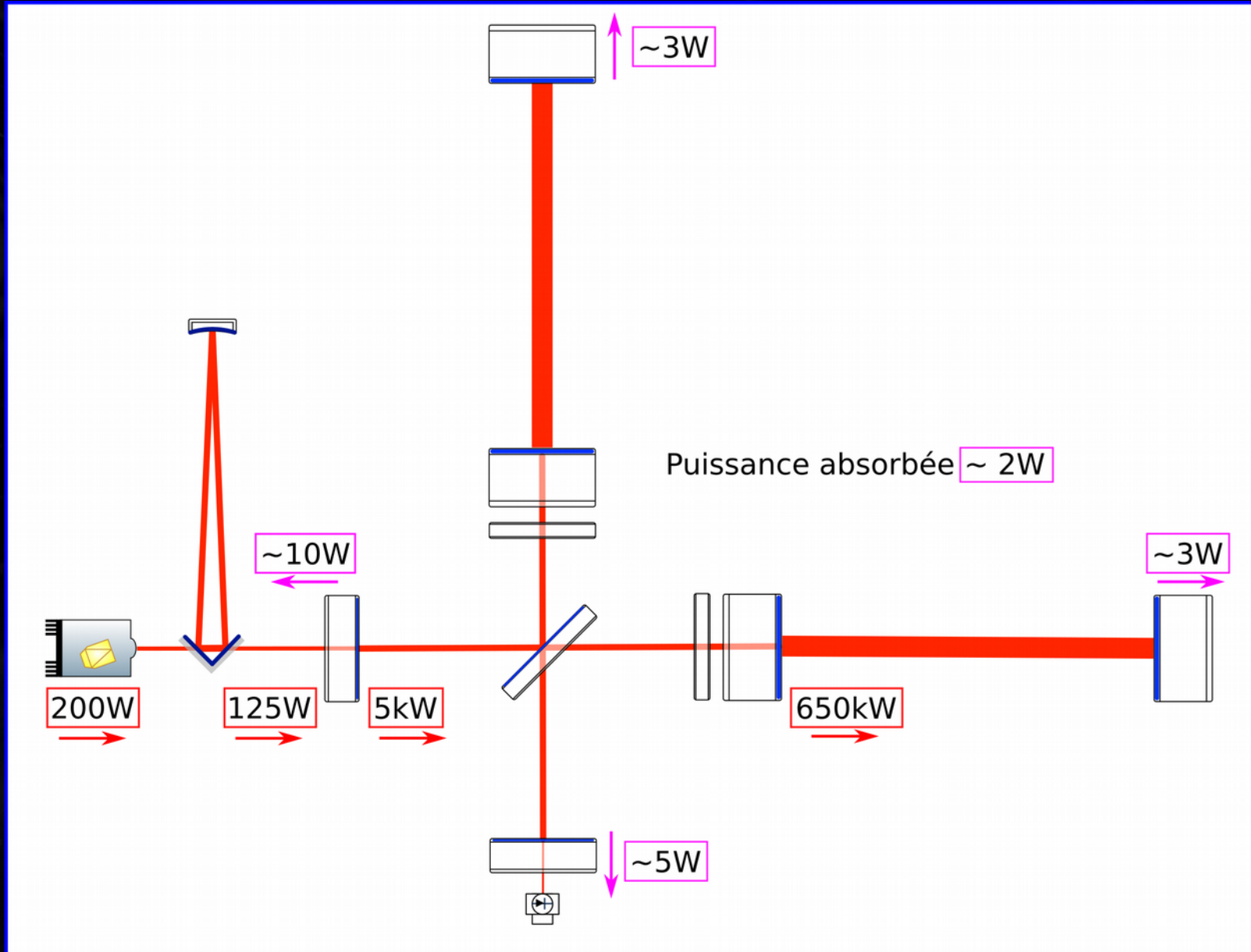
Banc du laser CO₂



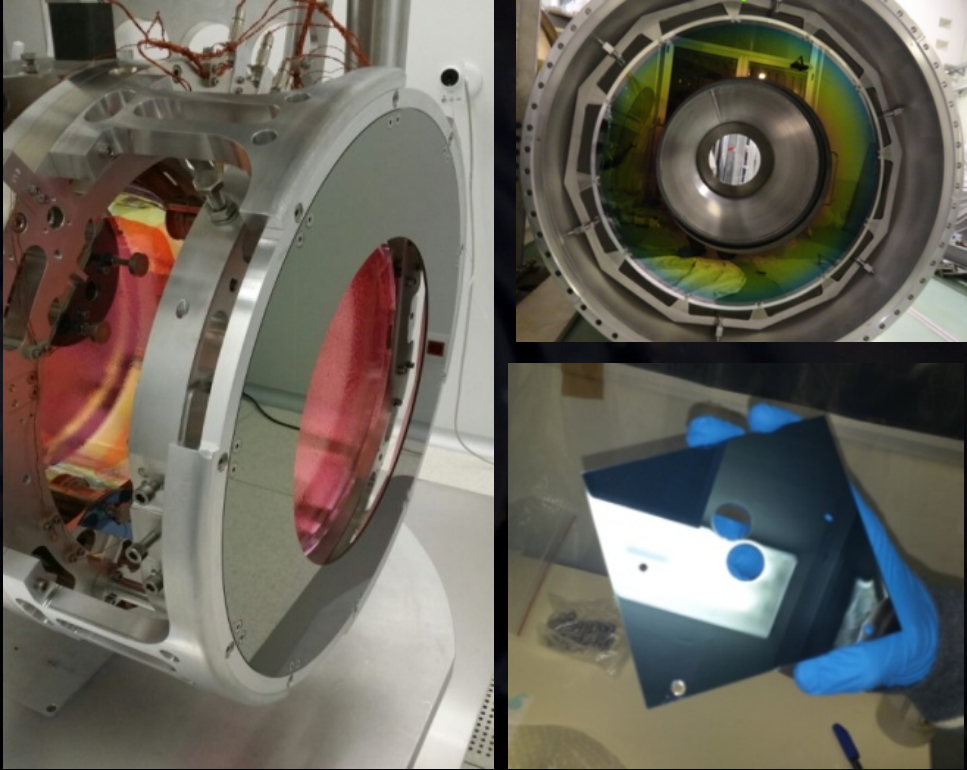
Installation du banc sur le site

Une ennemie : la lumière diffusé

Une dure leçon de la première génération !



Une ennemie : la lumière diffusé



Piège à lumière autour des miroirs, dans les tubes à vide et sur les bancs

Optiques importantes sous vide et suspendues



Cyril FRESILLON/VIRGO/CNRS Photothèque

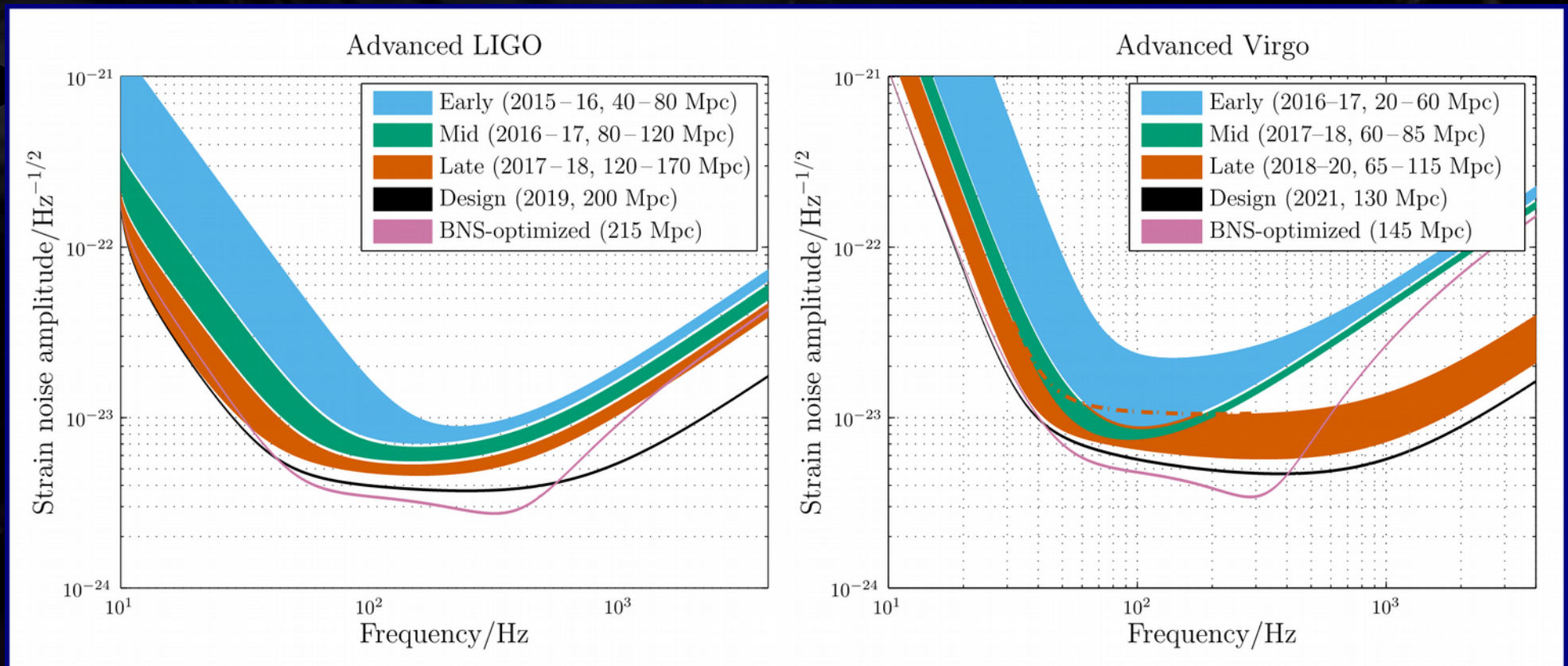


IV

Un futur brillant !

Évolution de la sensibilité

- Virgo : première prise de données début 2017
- LIGO continue à améliorer sa sensibilité puis prise de données cet hiver



ArXiv:1304.0670v3

Dans les prochaines années...

Observing time

Commissioning time

Downtime for upgrades

2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026



O2

O3

O4

both squeezing and coating?
both LIGO sites simultaneously?

O5

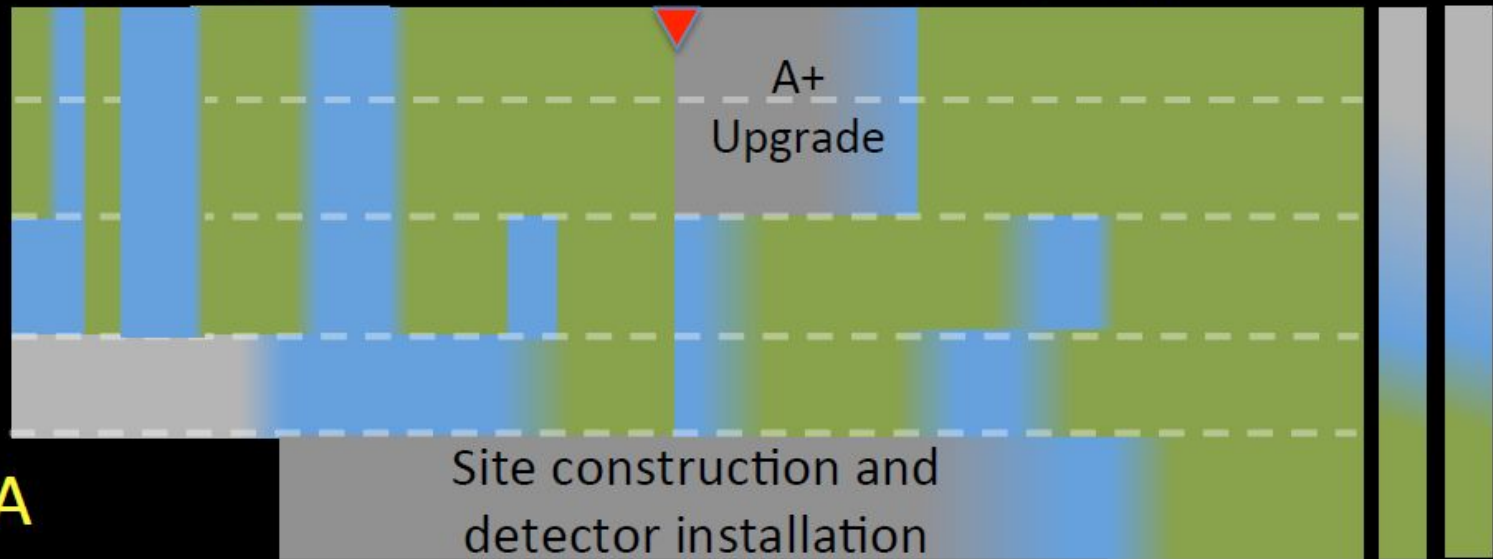
LIGO-H1

LIGO-L1

VIRGO

KAGRA

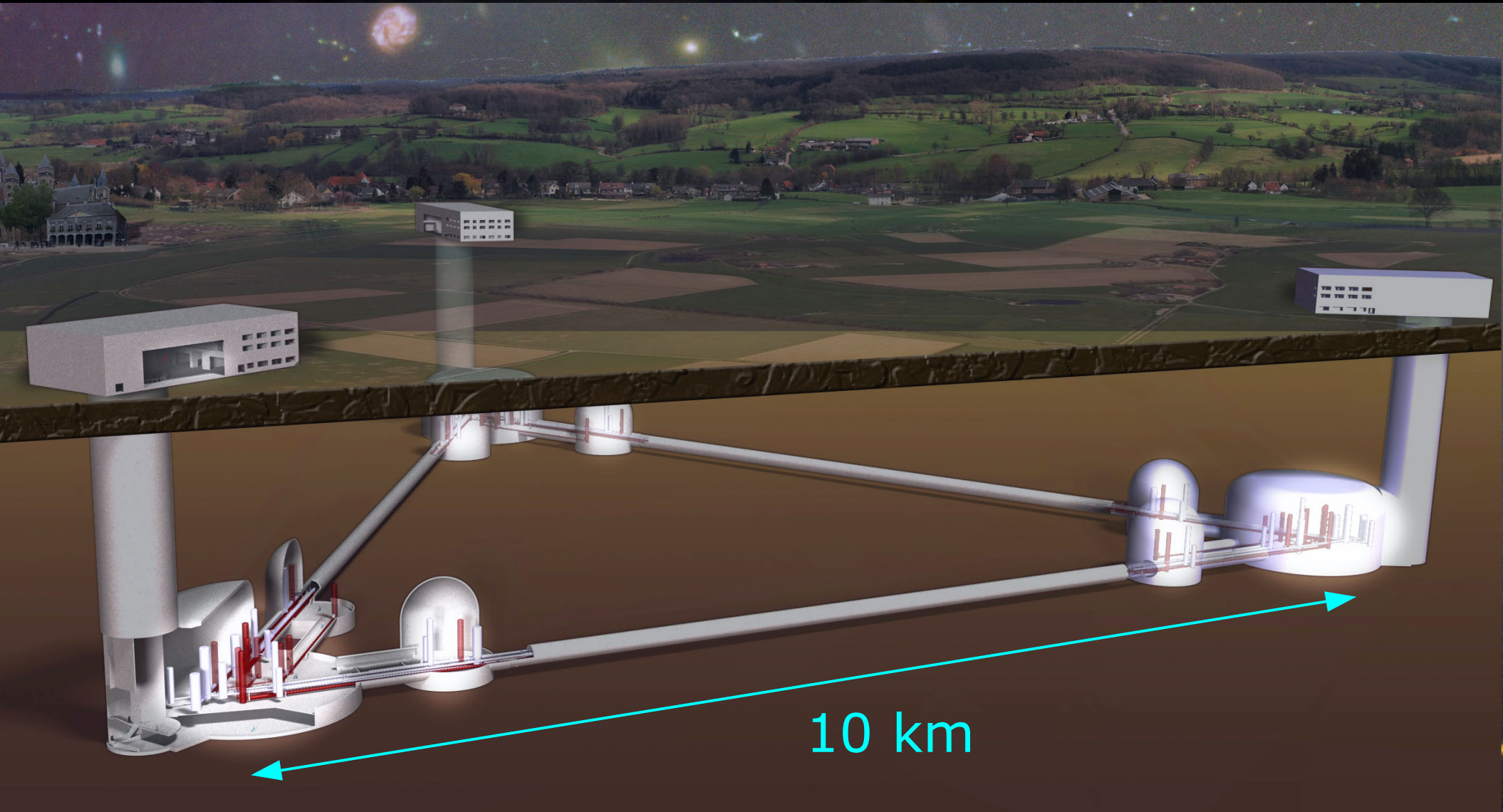
LIGO-INDIA



Pris de LIGO Document G1601460-v4

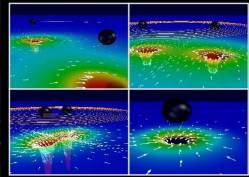
Dans la prochaine décade

Le projet Européen: l'Einstein Telescope
(encore 10 fois plus sensible)

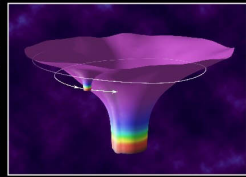


Et dans l'espace...

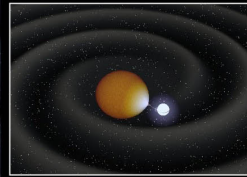
3 satellites reliés par des lasers



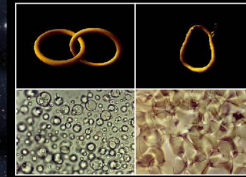
Numerical Simulation (Callech/Cornell)
Supermassive
Black Hole Binaries



MIRI Rendering
Compact Object
Captures



Numerical Model/Rendering (G. Rosati)
Galactic White
Dwarf Binaries



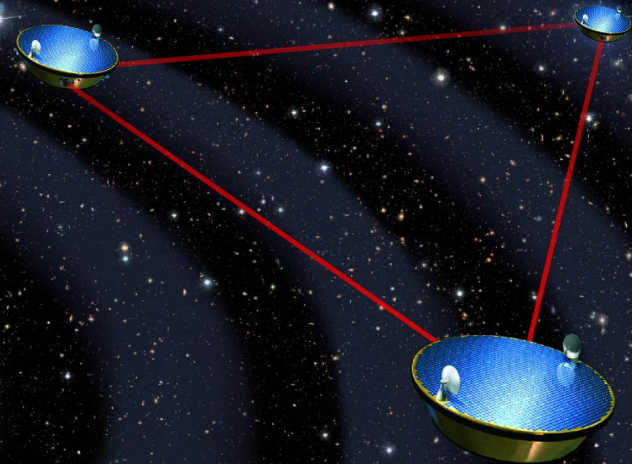
Numerical Simulation (A. Gupta, I. G. Madaffari, LISA-Photography, J.M. Sintes)
Cosmic Strings and
Phase Transitions

LISA

Laser Interferometer Space Antenna



Gravity is talking. LISA will listen.



Conclusion

