



Les prochains grands miroirs à l'écoute des vibrations de l'espace-temps

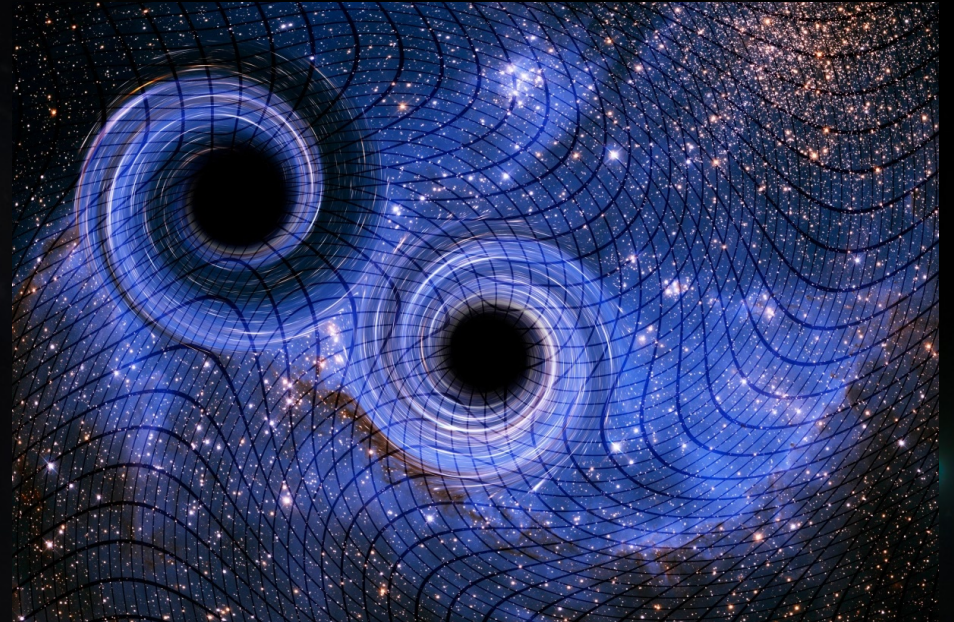
Jérôme Degallaix

Demandez le programme...

Une pièce en 3 actes :

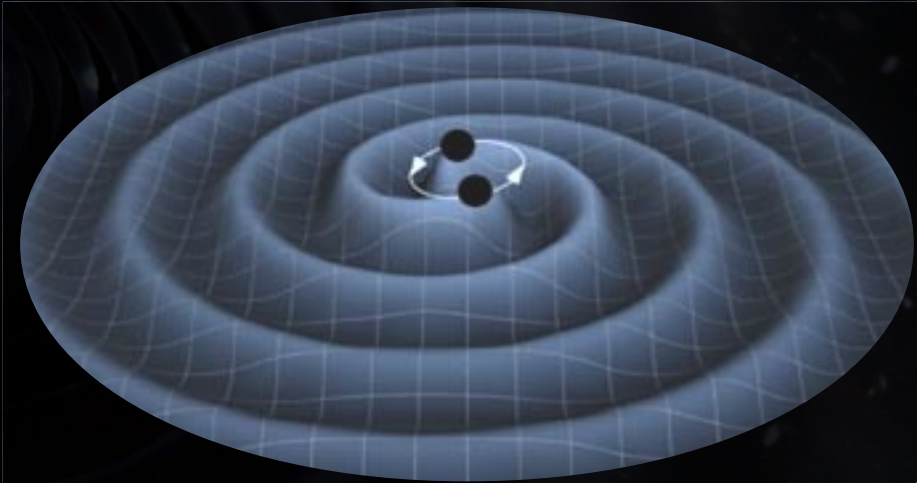
- une nouvelle astronomie
- des miroirs exceptionnels
- et la suite...

I L'astronomie des ondes gravitationnelles

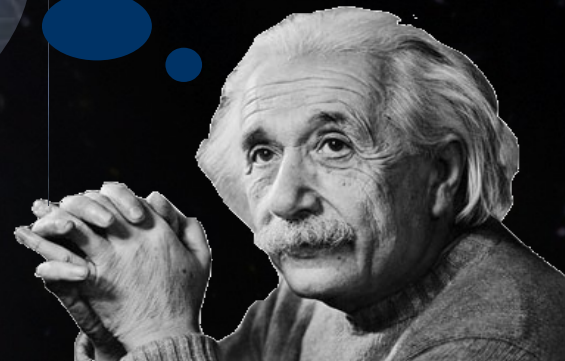


Les Ondes Gravitationnelles (OG)

- conséquence directe de la Relativité Générale (1916)
- OG = perturbations de l'espace-temps
- générées par l'accélération de masses
- se propagent à la vitesse de la lumière



*Exemple : fusion de
2 objets massifs*

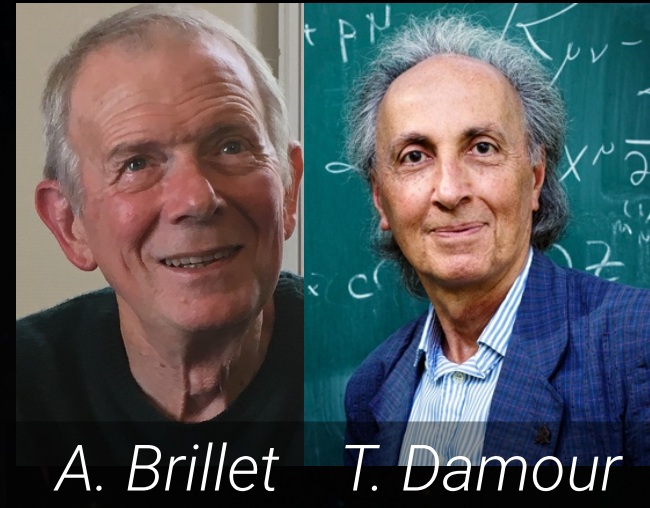


Les premières détections

- Première et seconde prises de données (2015 - 2017) :
 - 10 fusions de trous noirs
 - 1 fusion d'étoiles à neutron
- en 2017 : Prix Nobel de physique et médaille d'or du CNRS



Les pères du projet américain



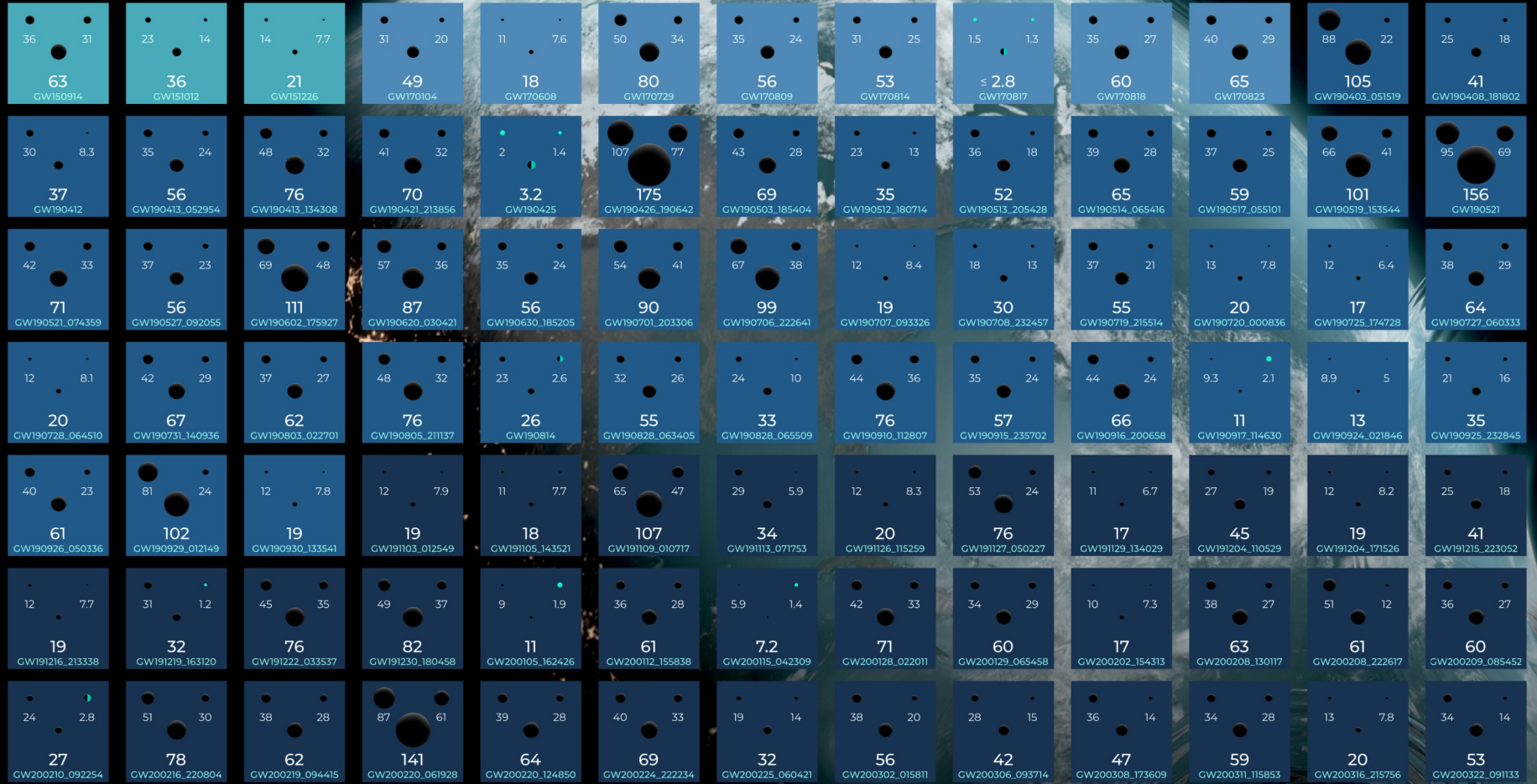
A. Brillet T. Damour

Toutes les détections (2022)

OBSERVING
01 RUN
2015 - 2016

02
2016 - 2017

03a+b
2019 - 2020

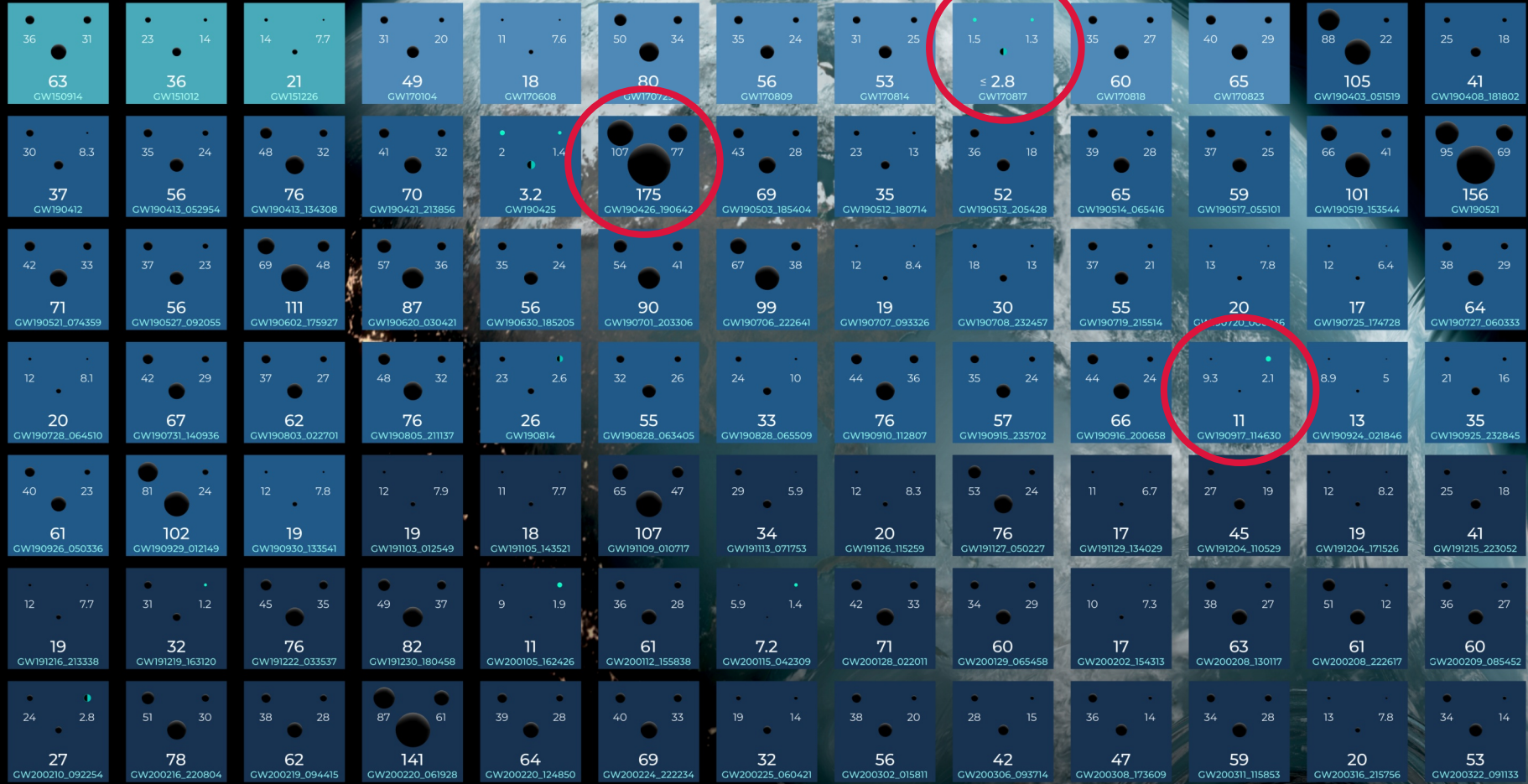


Toutes les détections (2022)

OBSERVING
01 RUN
2015 - 2016

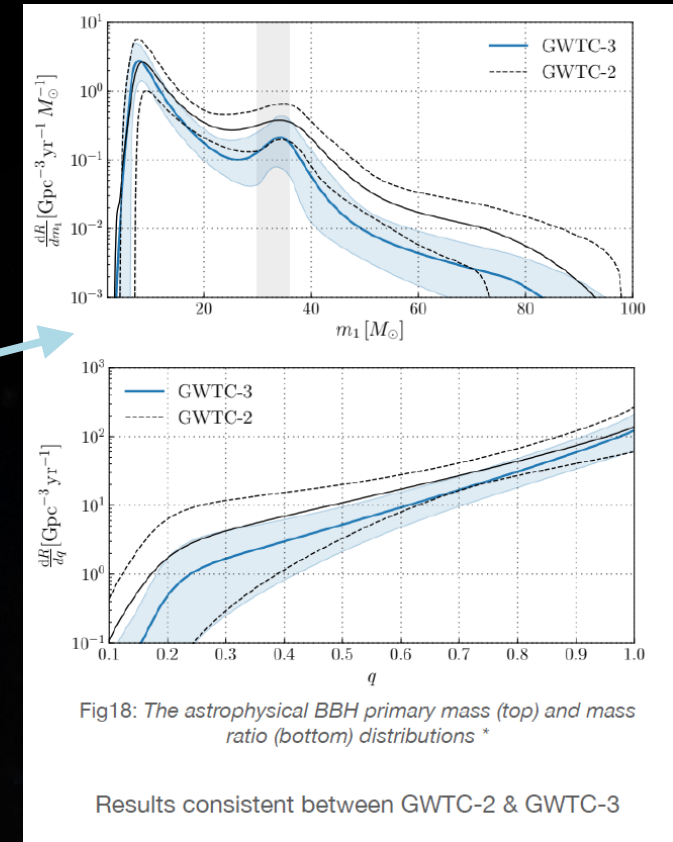
02
2016 - 2017

03a+b
2019 - 2020



Une sélection de résultats

- fusion d'étoiles à neutrons
 - astronomie multi-messagers
 - origine des sursauts gamma
 - formation des éléments lourds
- distribution en masse trous noirs
- avec certains de $m > 100 M_{\odot}$
- vitesse OG = vitesse lumière (à 10^{-15} près)
- test de la Relativité Générale

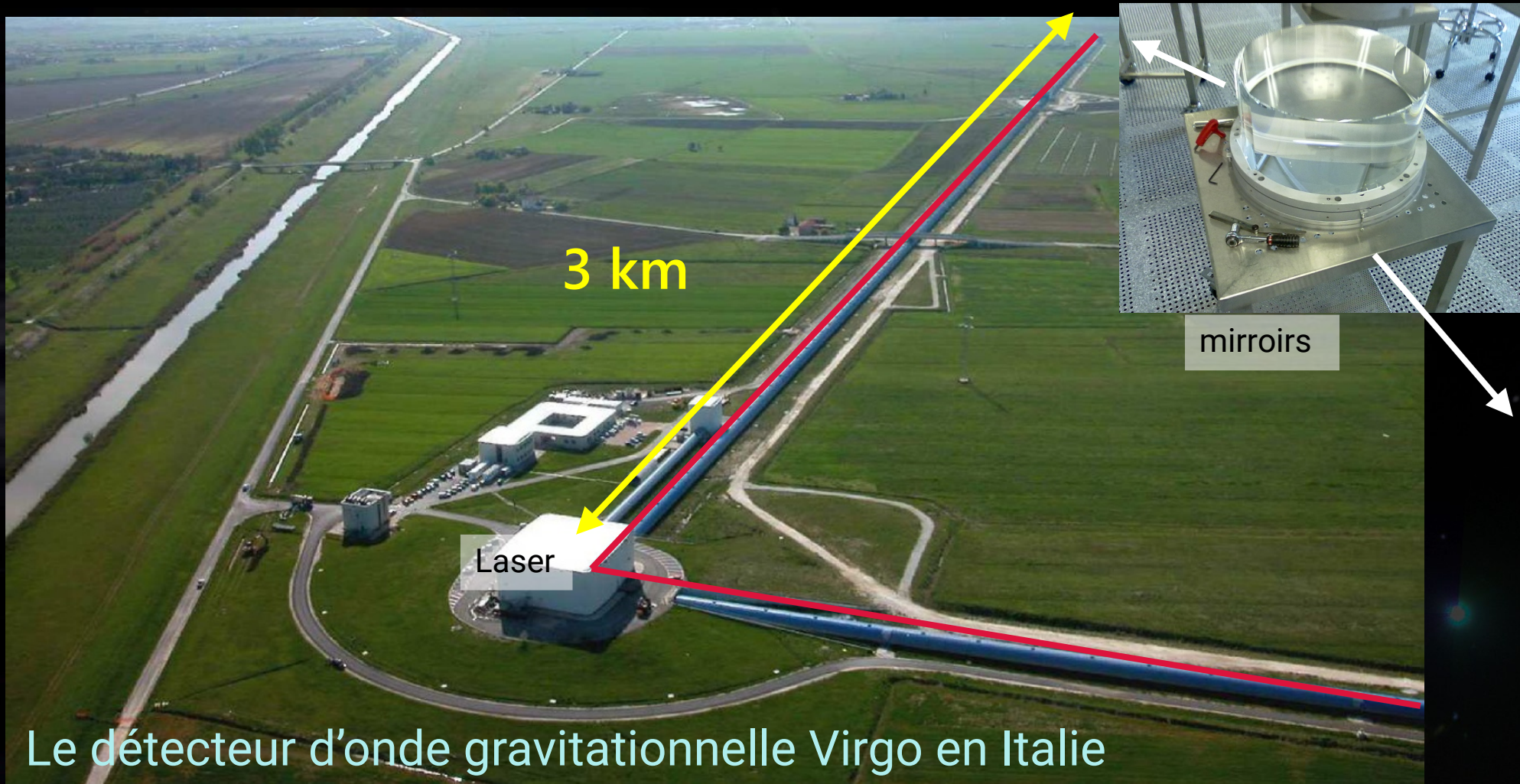


Des interféromètres géants pour les détecter

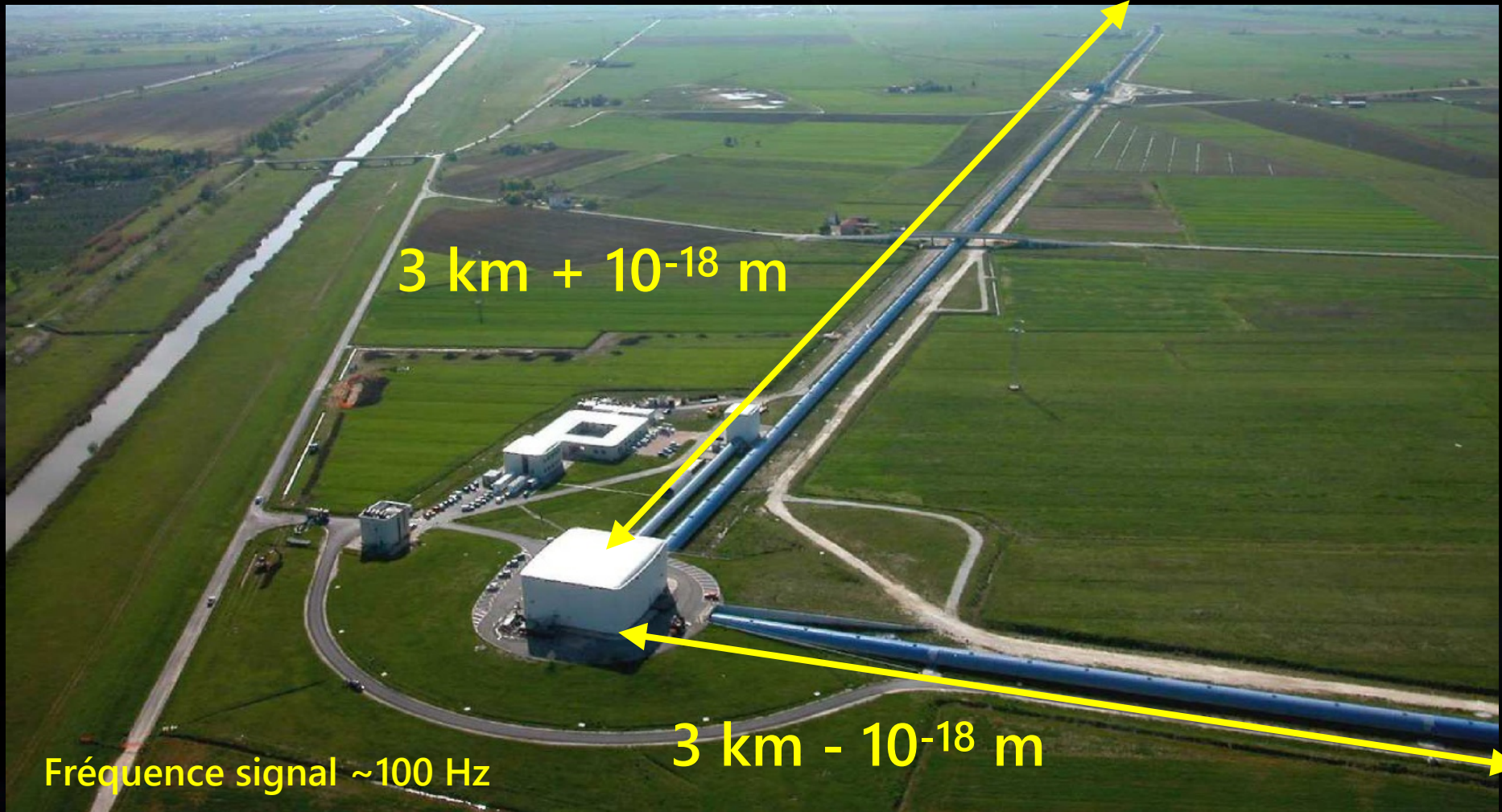


Le détecteur d'onde gravitationnelle Virgo en Italie

Des interféromètres géants pour les détecter



Au passage d'une onde gravitationnelle...



Le réseau de détecteurs (avec des miroirs traités à Lyon)



Hanford



Livingston



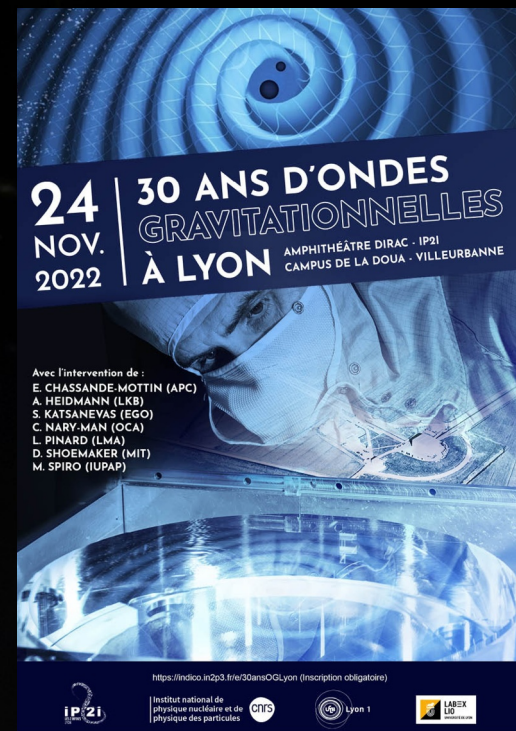
Cascina



Kamioka

II

Les miroirs au cœur des détecteurs



24 | **30 ANS D'ONDES**
NOV. | **GRAVITATIONNELLES**
2022 | **À LYON**

AMPHITHÉÂTRE DIRAC - IP2I
CAMPUS DE LA DOUA - VILLEURBANNE

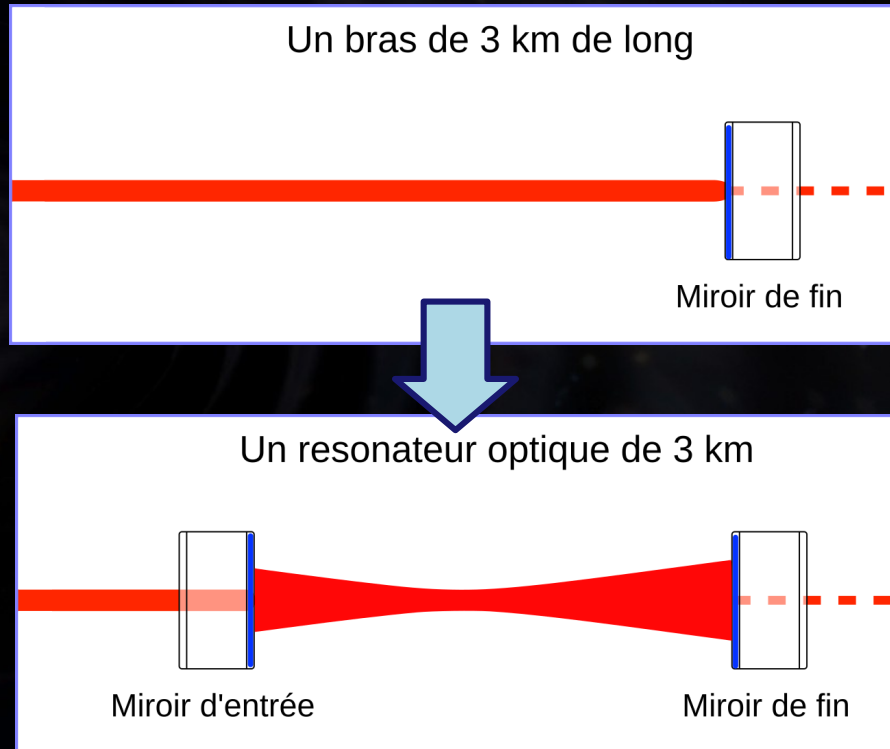
Avec l'intervention de :
E. CHASSANDE-MOTTIN (APC)
A. HEIDMANN (LKB)
S. KATSANEVAS (EGO)
C. NARY-MAN (OCA)
L. PINARD (LMA)
D. SHOEMAKER (MIT)
M. SPIRO (IUPAP)

<https://indico.in2p3.fr/e/30ansOGLyon> (inscription obligatoire)

IP2I | Institut national de physique nucléaire et de physique des particules | CNRS | Lyon 1 | LABEX I0

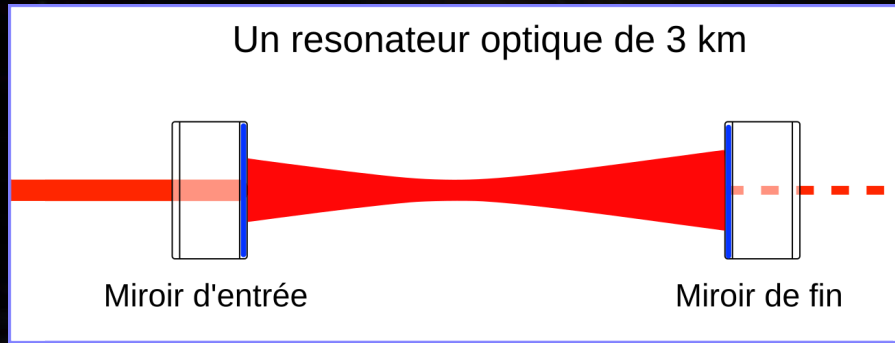
Comment augmenter la sensibilité ?

Augmenter le temps d'interaction entre la lumière et l'onde gravitationnelle dans les bras et l'onde gravitationnelle



Permet à la lumière de faire 300 aller-retour dans les bras

Le besoin de super-miroirs

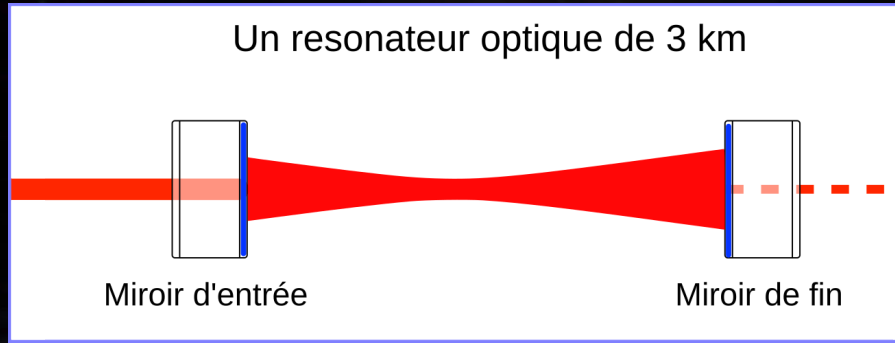


Les pertes optiques sont aussi amplifiées dans la cavité.
perte de lumière = perte de signal

Contrainte très sévère sur les pertes de lumière par aller retour : perte < 80 ppm

< 0.008 %

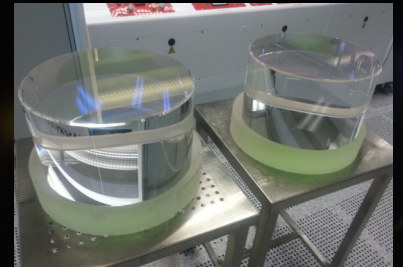
Le besoin de super-miroirs



Les pertes optiques sont aussi amplifiées dans la cavité.
perte de lumière = perte de signal

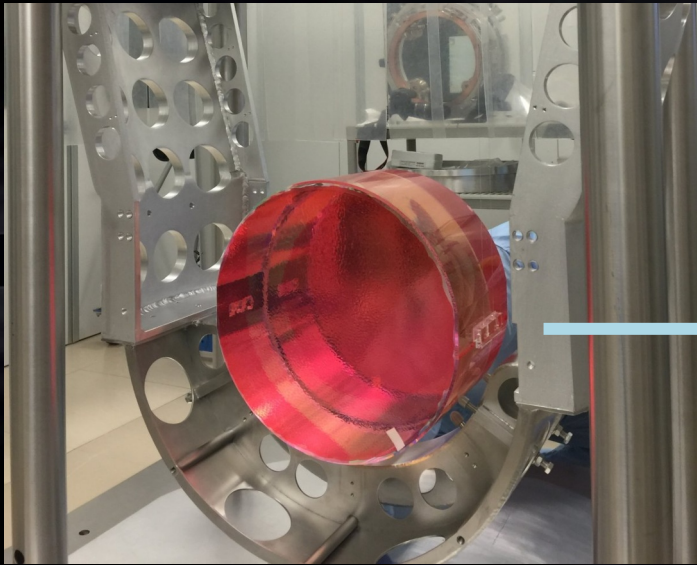
Contrainte très sévère sur les pertes de lumière par aller retour : perte $< 0.008\%$

Miroirs exceptionnels indispensables:

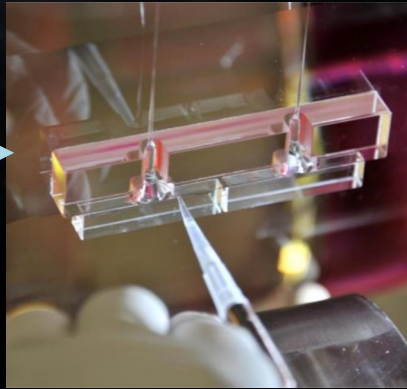


Les ingrédients du miroir parfait

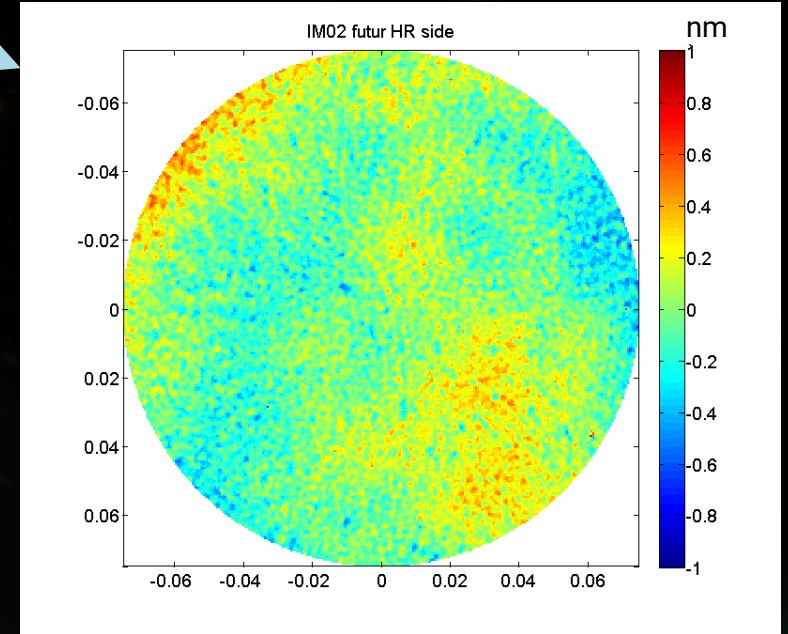
substrat parfait + polissage parfait + traitement parfait



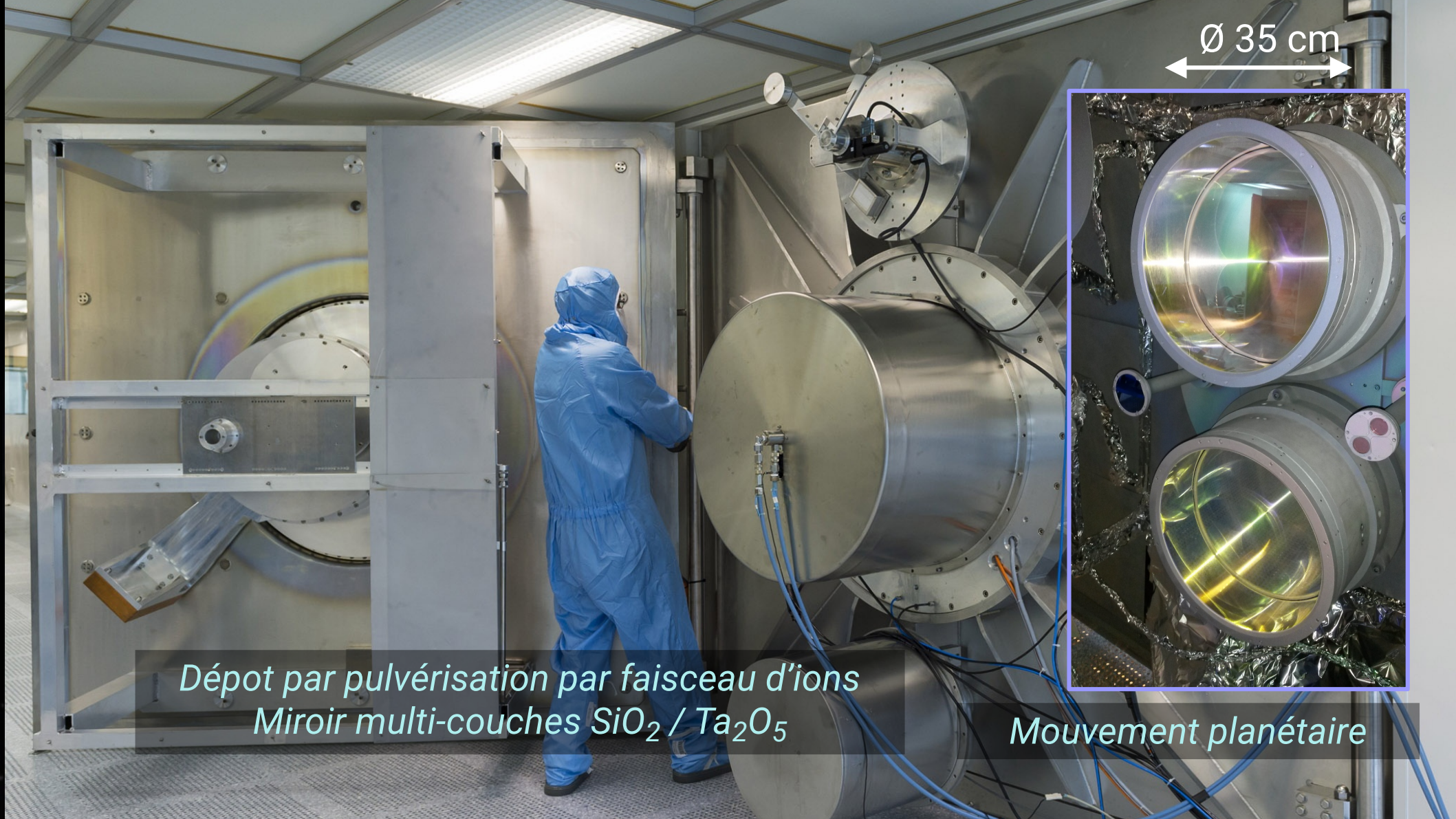
*Substrat en silice spéciale,
sans défaut, uniforme,
faible absorption (40 kg)*



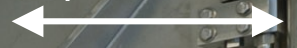
*Suspendu par
des fibres
de \varnothing 0.4 mm*



*Surface polie au niveau
atomique P-V : 2 nm
rugosité : 0.1 nm RMS*



Ø 35 cm

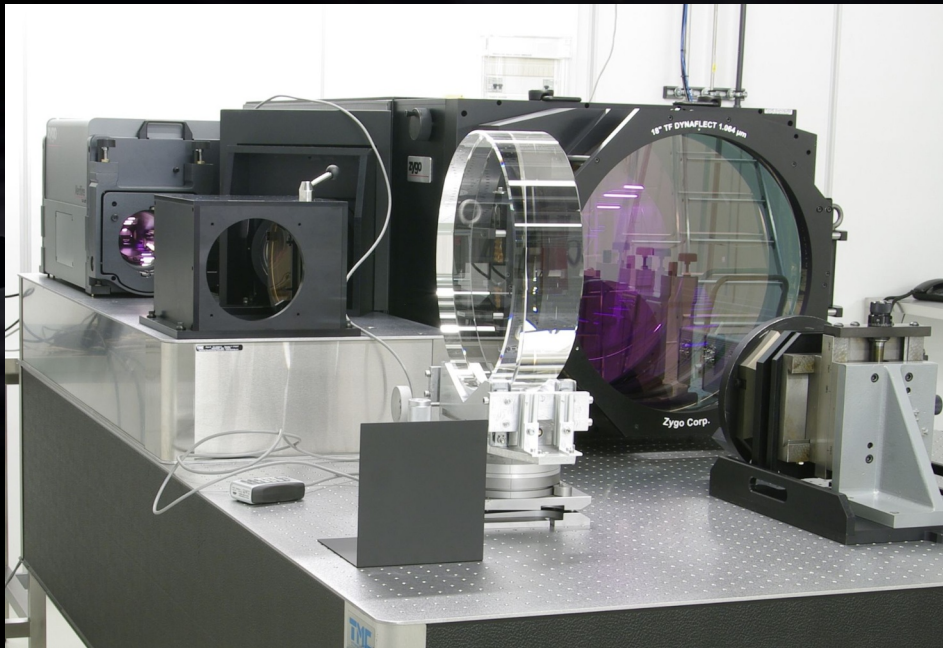


Dépot par pulvérisation par faisceau d'ions
Miroir multi-couche $\text{SiO}_2 / \text{Ta}_2\text{O}_5$

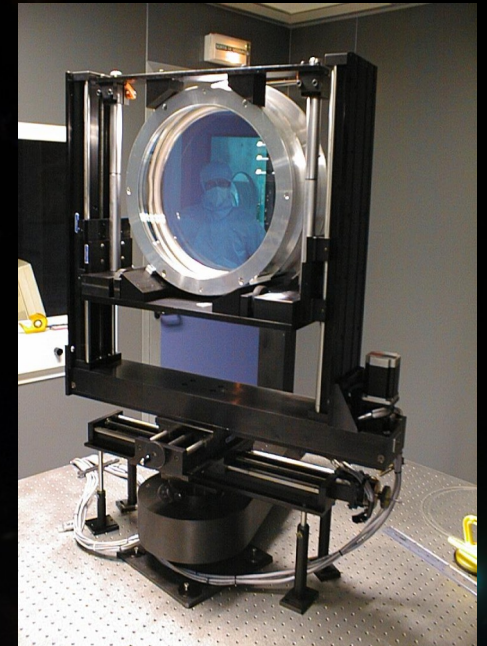
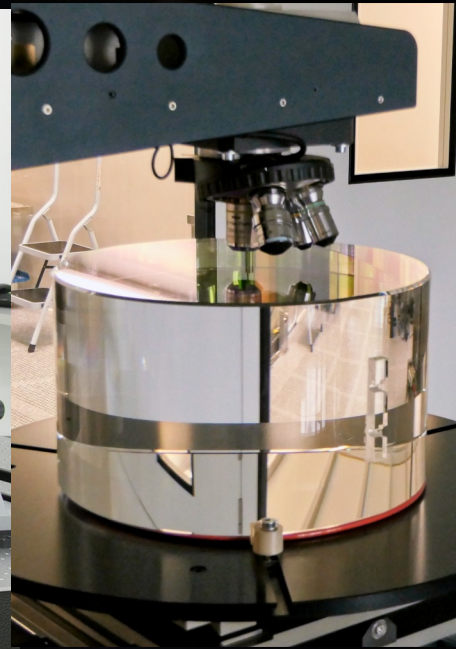
Mouvement planétaire

La métrologie (toujours en salle blanche)

Étape essentielle pour connaître les caractéristiques des miroirs avant l'installation :



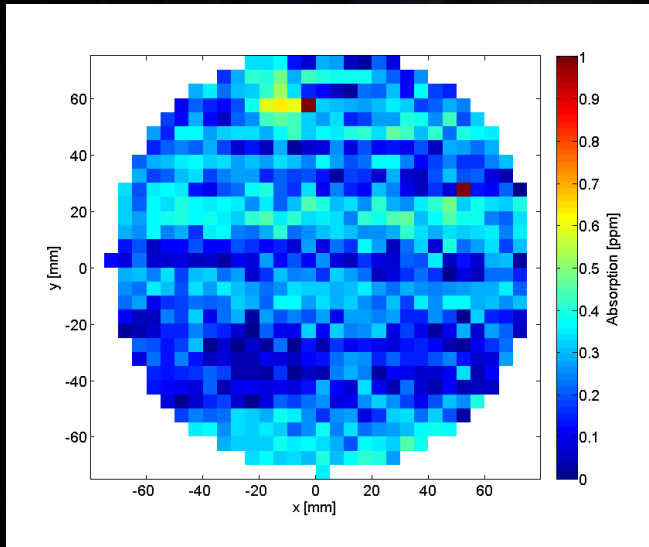
Mesure de surface (différentes fréquences spatiales)



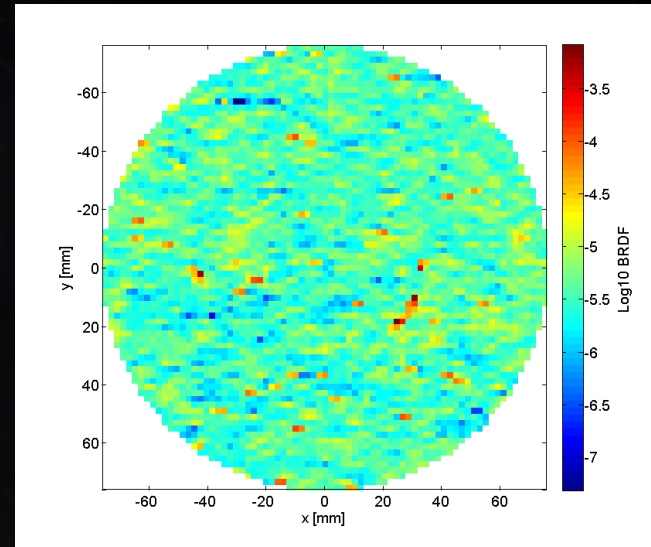
Mesure de diffusion

Les performances des miroirs

- qualité de surface préservé malgré les 6 μm de dépôt
- pertes optiques extrêmement faibles, $R > 99.999\%$ (@ 1064 nm)
- spécifications pour Virgo atteinte : 60 ppm de perte par aller-retour dans les bras



Absorption HR : 0.3 ppm

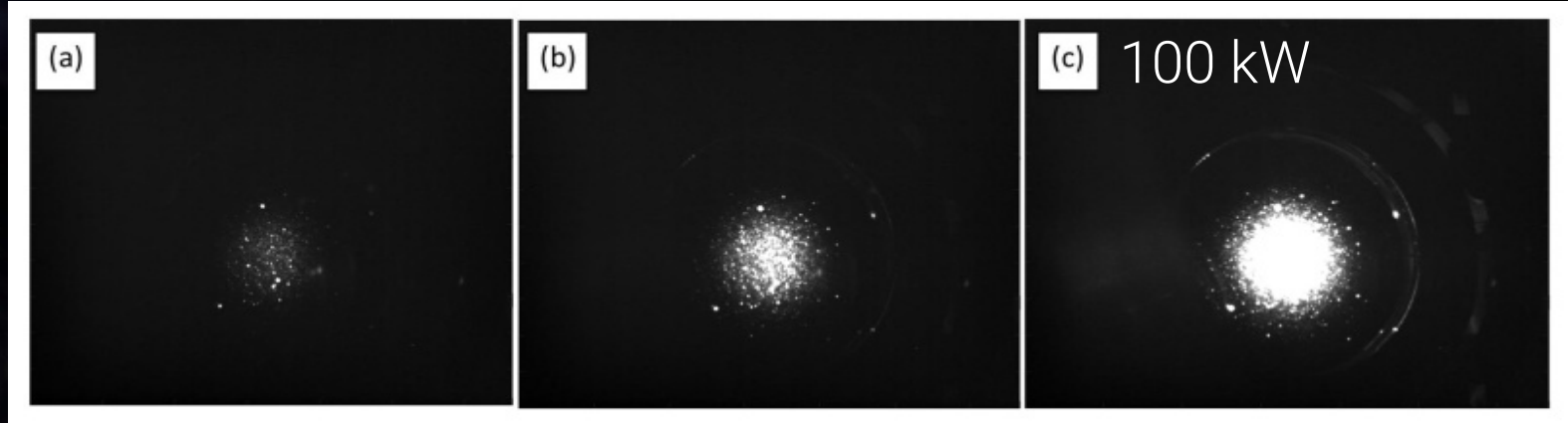


Diffusion HR ~ 10 ppm

Article

R&D en cours : diminuer les pertes optiques

- plus grande source de diffusion : défauts ponctuels dans les couches

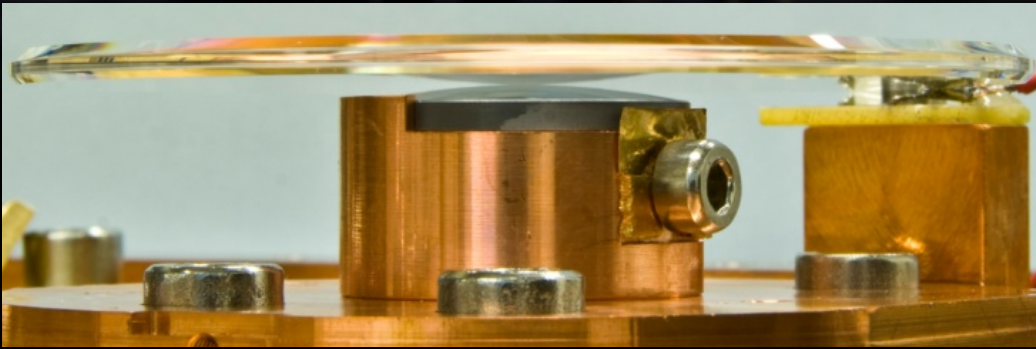


Vue d'un miroir de Virgo lors de la montée en puissance

- étude pour tester différentes conditions de dépôt, l'impact du recuit, des matériaux déposés
- en parallèle : étude physico-chimique de ces points

R&D en cours : améliorer le bruit thermique

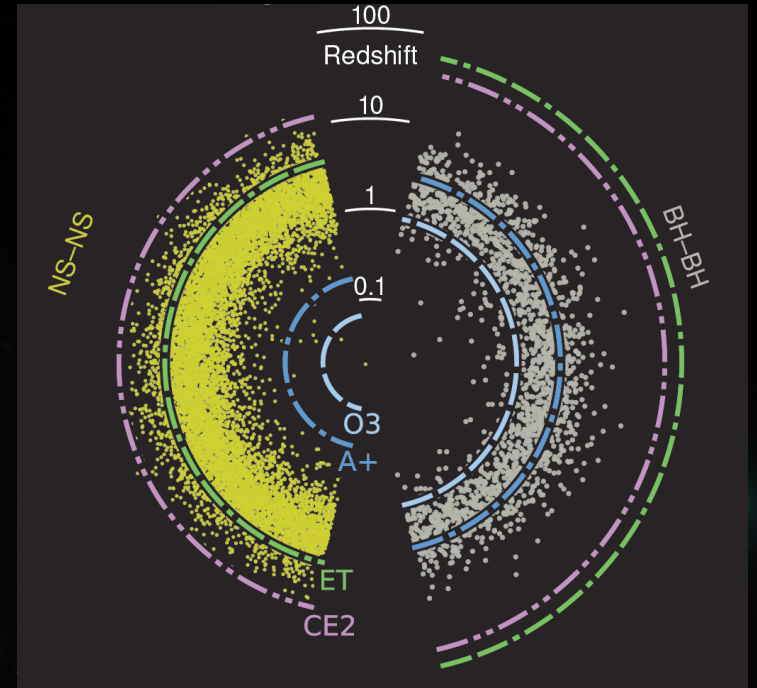
- le bruit thermique du coating est un facteur limitant de la sensibilité
- directement lié à la dissipation mécanique des matériaux
- le tantale (matériaux haut indice) est le plus dissipatif
- le remplacer par : Ti:GeO_2 ou Si_3N_4 (en espérant conserver les bonnes pertes optiques)



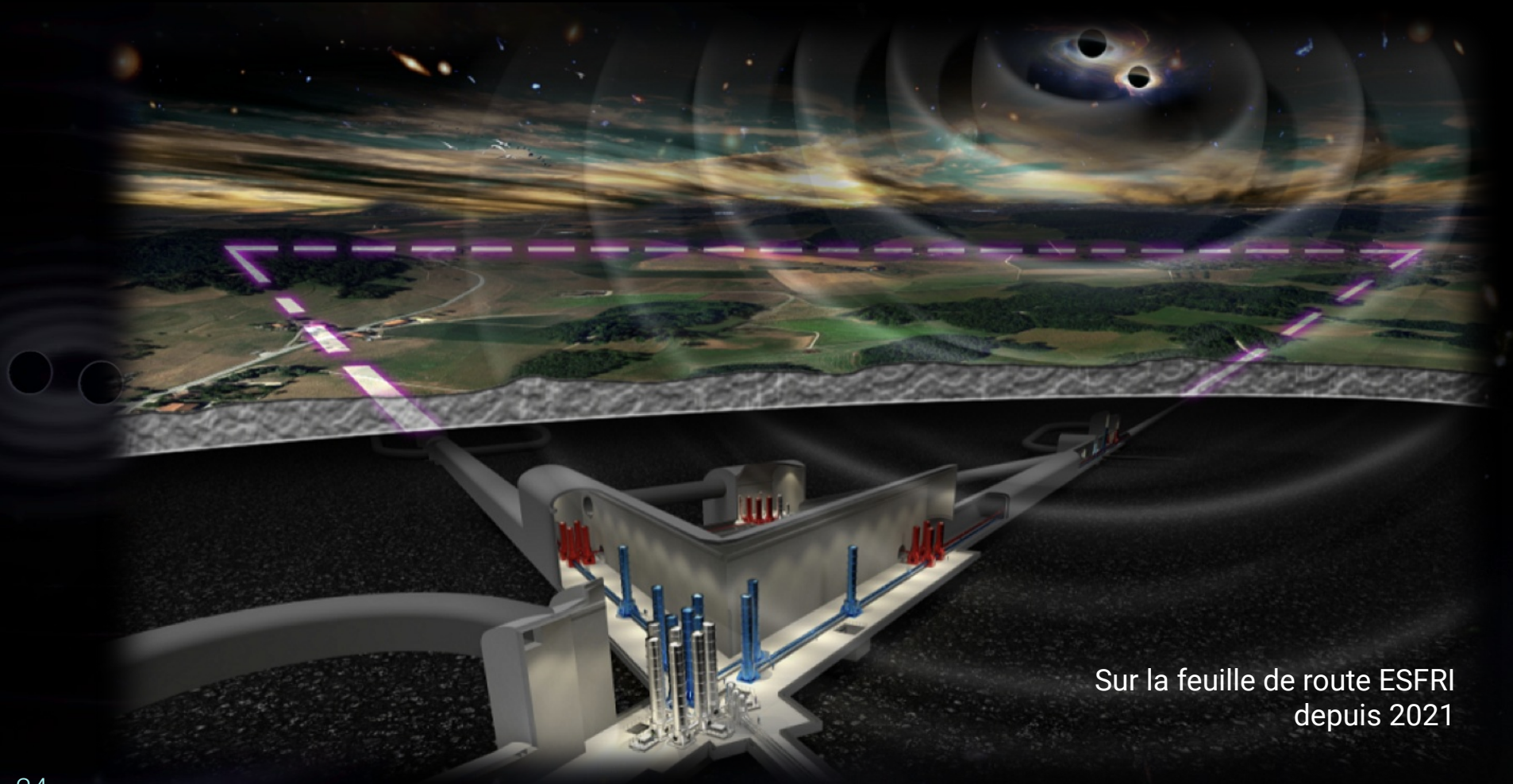
Disque de silice traité qui sert de résonateur mécanique pour la mesure des pertes

III

Des miroirs toujours plus performants (les prochaines étapes)



L'après Virgo : l'Einstein Telescope (~2035)



Sur la feuille de route ESFRI
depuis 2021

L'après Virgo : l'Einstein Telescope (~2035)

- 10 fois plus sensible que Virgo / LIGO
- mesurer toutes les fusions de trous noirs de l'Univers



Miroirs en partie cryogéniques, plus lourds

Meilleures couches minces

Installation souterraine

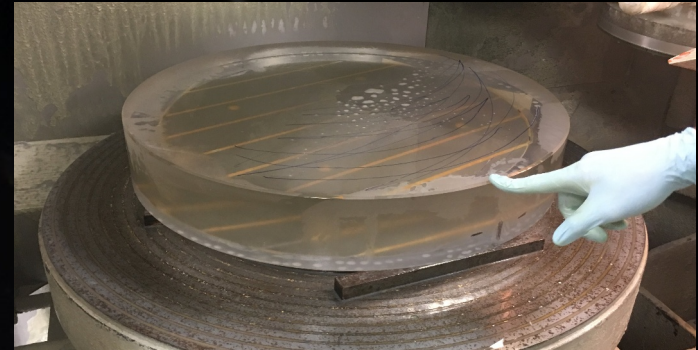
Longues suspensions

Réduction bruit quantique de la lumière

Bras plus longs (10 km)

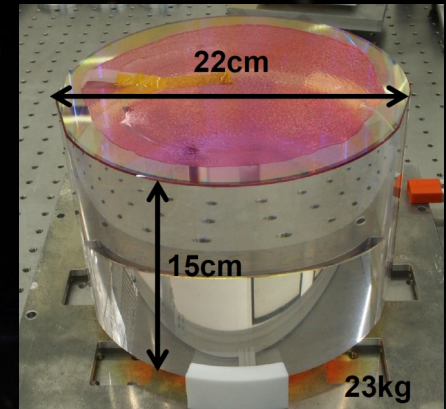
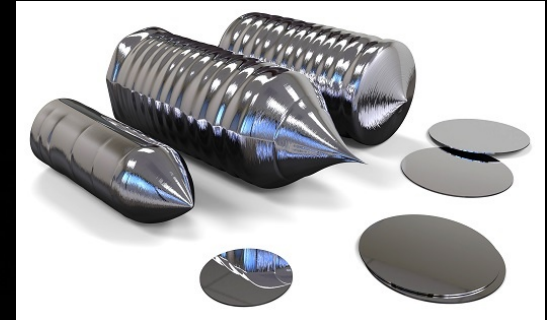
Les prochains miroirs, plus grands, plus lourds

- Pour la température ambiante
 - ▶ en silice, disponible avec les bonnes propriétés
 - ▶ Ø 600 – 800 mm, 200 – 300 kg ✓
- Pour la température cryogénique
 - ▶ substrats cristallins
 - ▶ Ø 450 mm, 200 kg ⚠
- Polissage ✓
- Nouvelles couches minces
 - ▶ réduire le bruit thermique (nouveaux matériaux)
 - ▶ réduire les pertes optiques (diffusion) ⚠



Le défi des miroirs cryogéniques

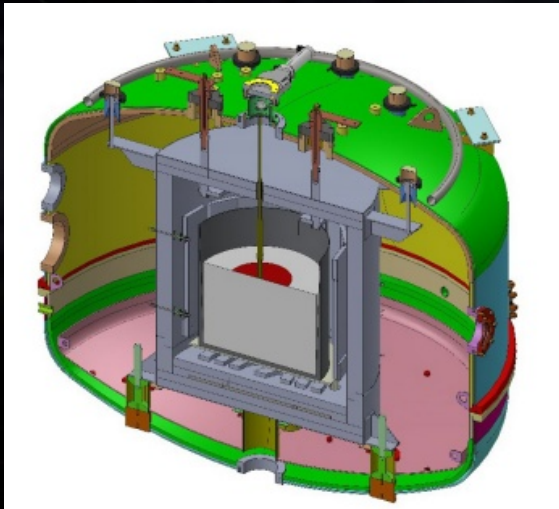
- Le verre n'est plus compatible
- Substrats cristallins potentiels:
 - ▶ silicium
 - ▶ saphir (plus avantageux)
- Doit être disponible en \varnothing 450 mm, 200 kg
 - ▶ et avec de bonnes propriétés optiques
 - ▶ couches minces dédiées



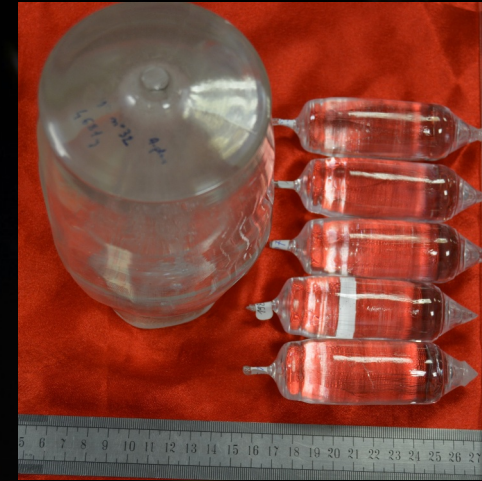
Aujourd'hui, pas de solution pour de tels substrats!

L'engagement lyonnais sur le saphir

- avec un spécialiste de la croissance cristalline (K. Lebbou)
- plusieurs financements régionaux
- Démonstration d'excellentes propriétés optiques sur petites dimensions



four pour fondre 500 kg d'alumine



Boules de test

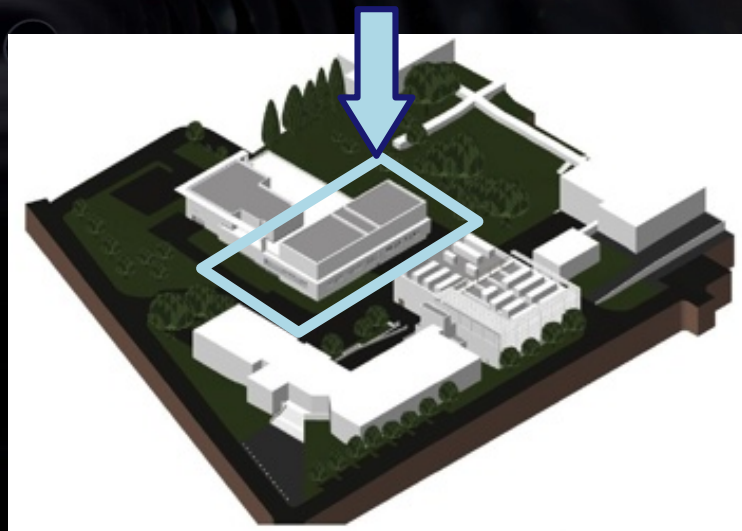
Répondre aux besoins futurs

- Extension de la salle blanche du LMA
- Nouvelle très grande machine de dépôt
- Pour 2 miroirs de \varnothing 800 mm, 300 kg

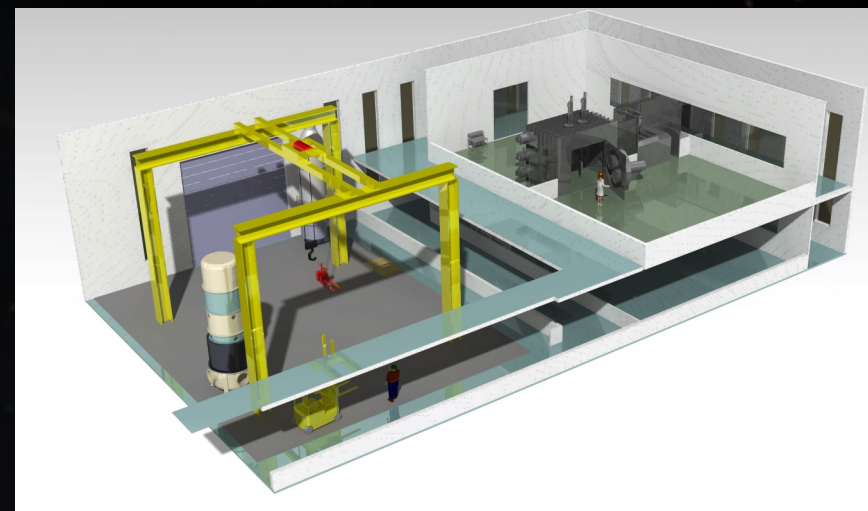


Financement CPER

Extension du LMA



Hall d'intégration et salle blanche



Conclusion

SCIENCES

Le Monde

Les meilleurs miroirs du monde sont français

► VIDÉO | Les miroirs les plus réfléchissants, qui équipent les instruments ultrasensibles que sont les détecteurs d'ondes gravitationnelles, sortent d'un laboratoire lyonnais.

01/2017

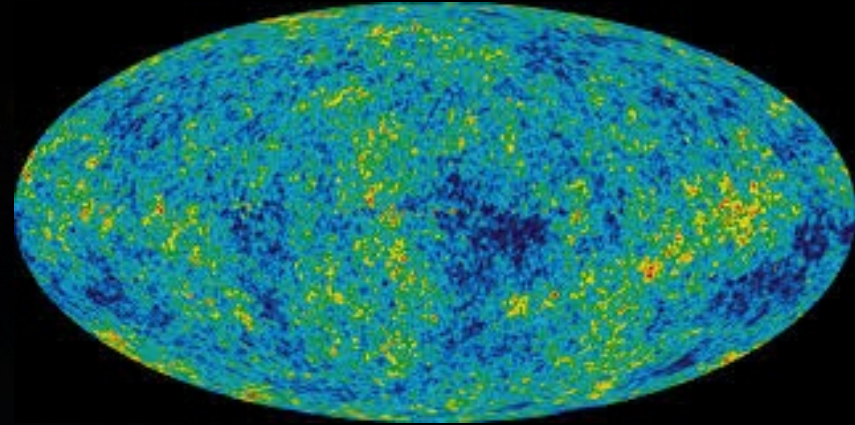
- aboutissement de 2 décennies de R&D
- programme en cours pour pérenniser et étendre cette excellence
- la technologie développée a bénéficié à de nombreuses autres expériences

Diapo bonus

Différentes sources possibles...



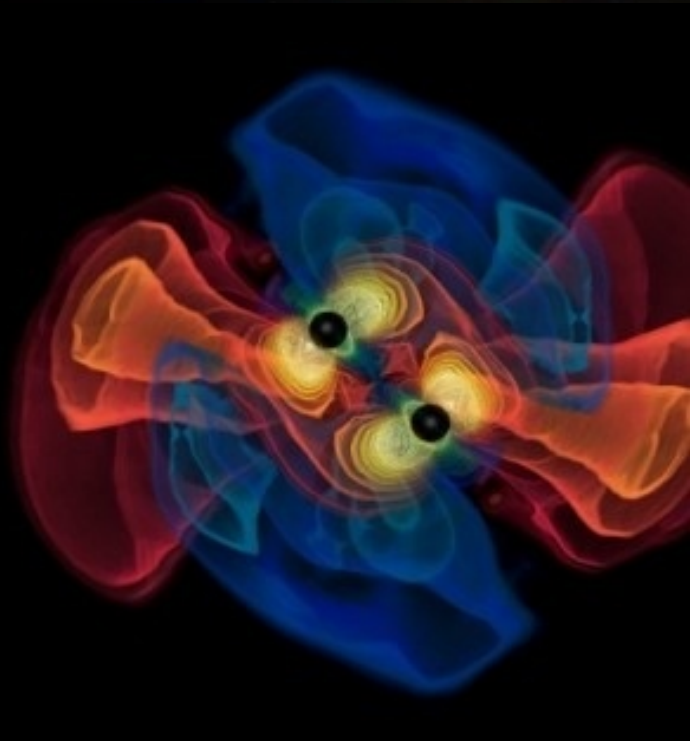
Signaux
permanents



*Pulsars
(étoiles à neutrons en rotation)*

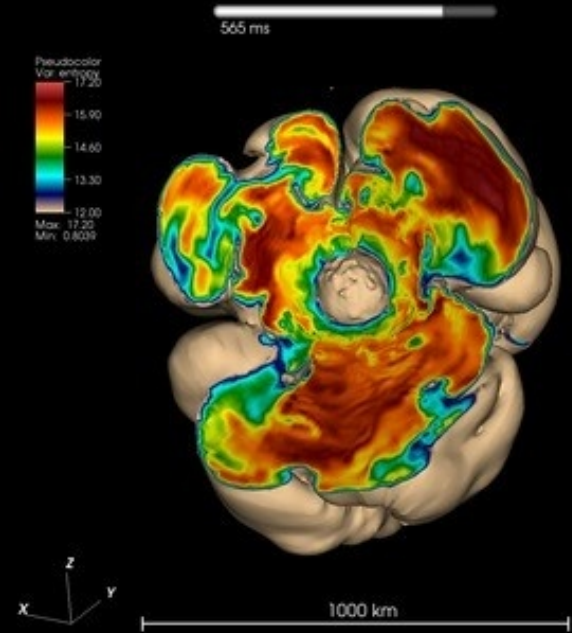
Fond diffus cosmologique

Différentes sources possibles...



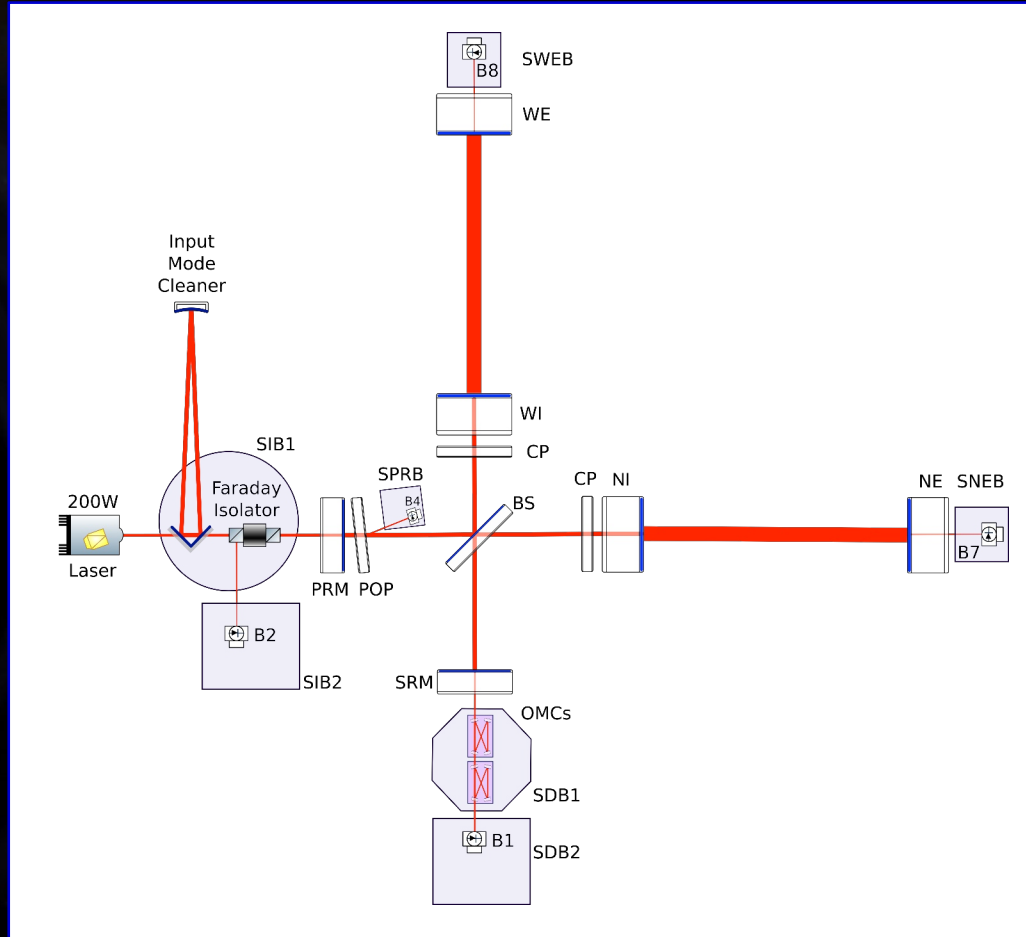
Signaux
transitoires
courts
(~ seconde)

*Fusions d'objets compacts
(trous noirs ou étoiles à neutrons)*

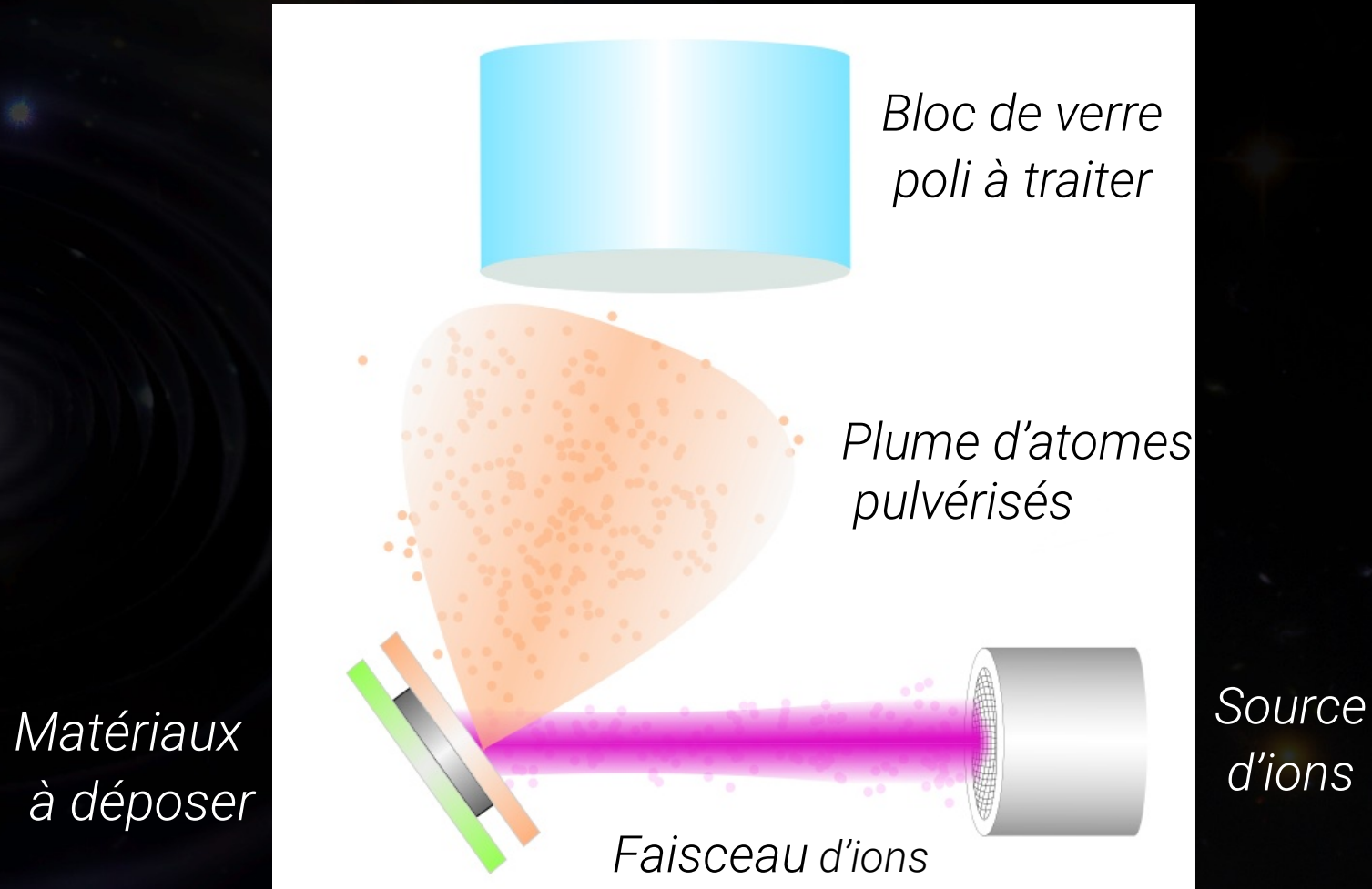


*Supernovae
(effondrement asymétrique d'étoiles)*

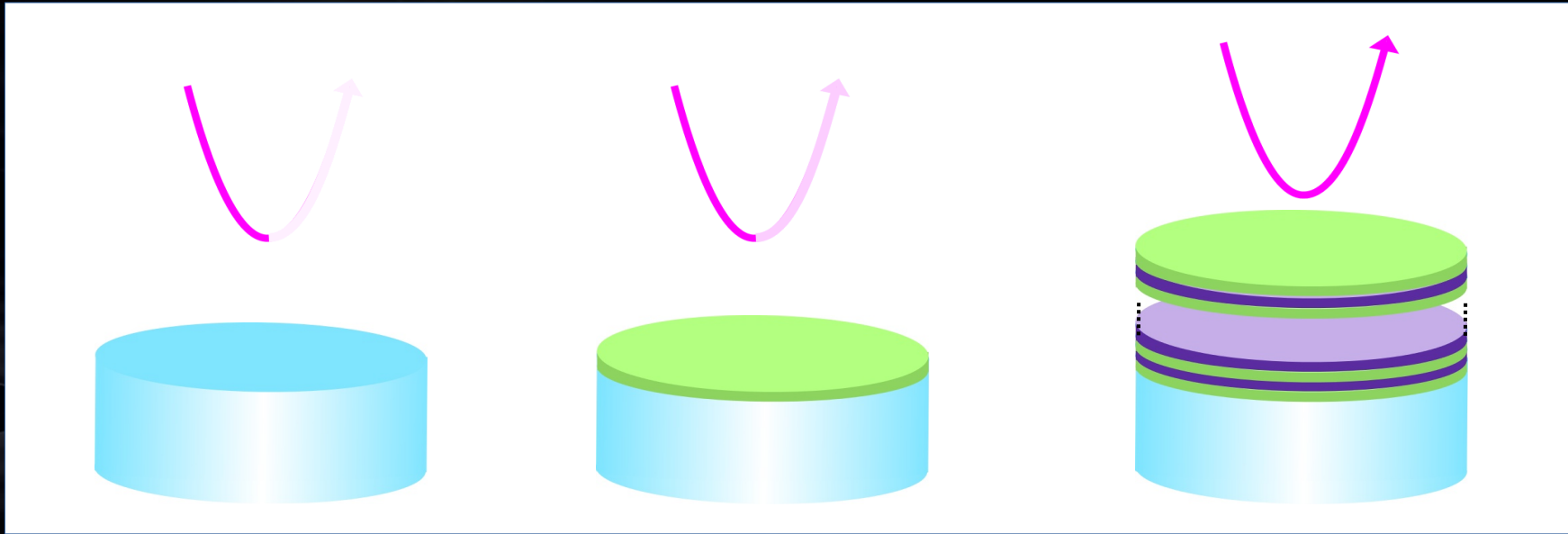
Le schéma optique simplifié



Le traitement de surface (réalisation de couches minces)



Principe d'un miroir multicouches



1 surface, $R \sim 4\%$

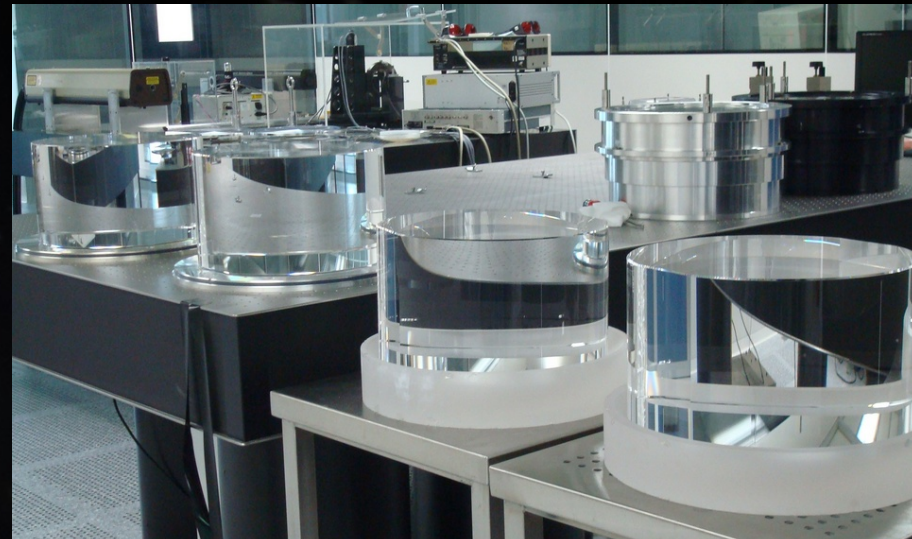
1 couche, $R \sim 20\%$

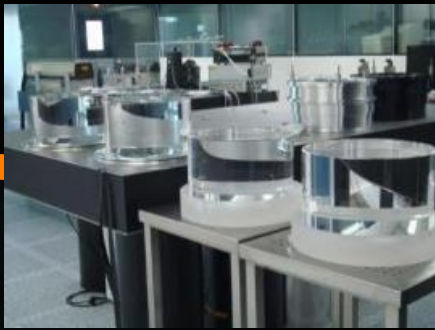
40 couches, $R \sim 100\%$

Empilement de 20 paires
de couches d'oxyde de tantale et silice (verre)

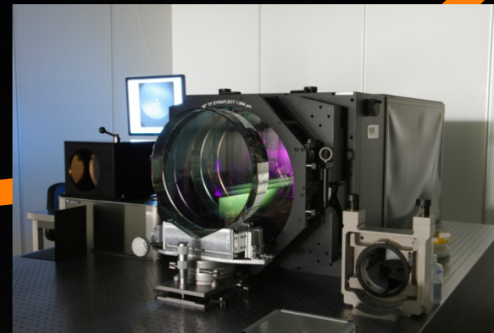
Retour à l'histoire

- fin 2001 : premier miroir pour Virgo
- Puis activité R&D pour améliorer les matériaux
- 2005 : premier contact avec LIGO
- 2009 – 2015 : contrat pour le traitement de 20 miroirs pour LIGO
(puis miroirs de Virgo et Kagra)





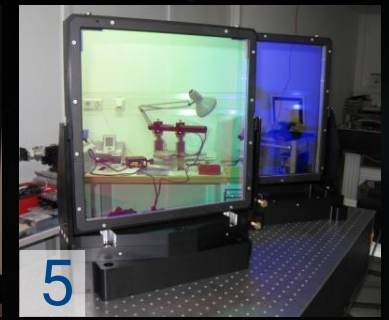
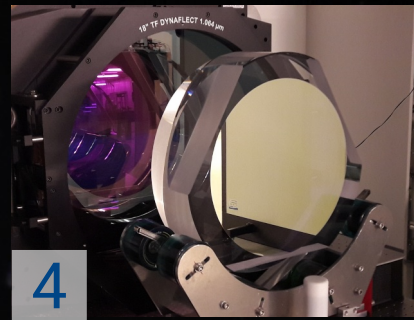
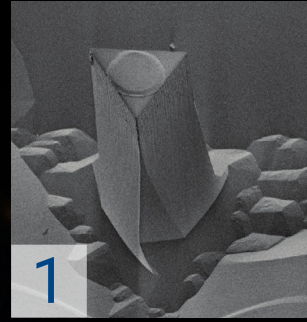
- 10 ans de R&D sur les matériaux
- 4 ans de R&D sur l'uniformité
- 36 blocs de verre de 40 kg traités
- 720 h de fabrication (dont 23 nuits blanches)
- 0.2 mm d'épaisseur totale déposée
- 350 jours de qualification



D'autres expériences ont bénéficié de la technologie

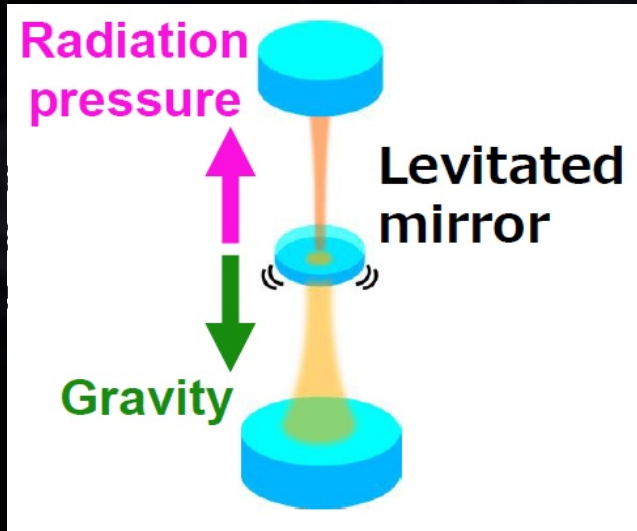
Expériences nécessitant des optiques hors-normes :

1. Opto-mécanique, LKB (INP)
2. ThomX, IJCLab (IN2P3)
3. BMV, LNCMI (INP)
4. Télescope solaire DKIST
5. Filtres colorés (VLT, Subaru, Vista)



Exemple : miroir pour la lévitation optique

- Dans le cadre d'un projet Franco-Japonais
- miroir courbe de \varnothing 3 mm, 0.025 mm d'épaisseur



ET science case

ASTROPHYSICS

- **Black hole properties**
 - origin (stellar vs. primordial)
 - evolution, demography
- **Neutron star properties**
 - interior structure (QCD at ultra-high densities, exotic states of matter)
 - demography
- **Multi-band and -messenger astronomy**
 - joint GW/EM observations (GRB, kilonova,...)
 - multiband GW detection (LISA)
 - neutrinos
- **Detection of new astrophysical sources**
 - core collapse supernovae
 - isolated neutron stars
 - stochastic background of astrophysical origin

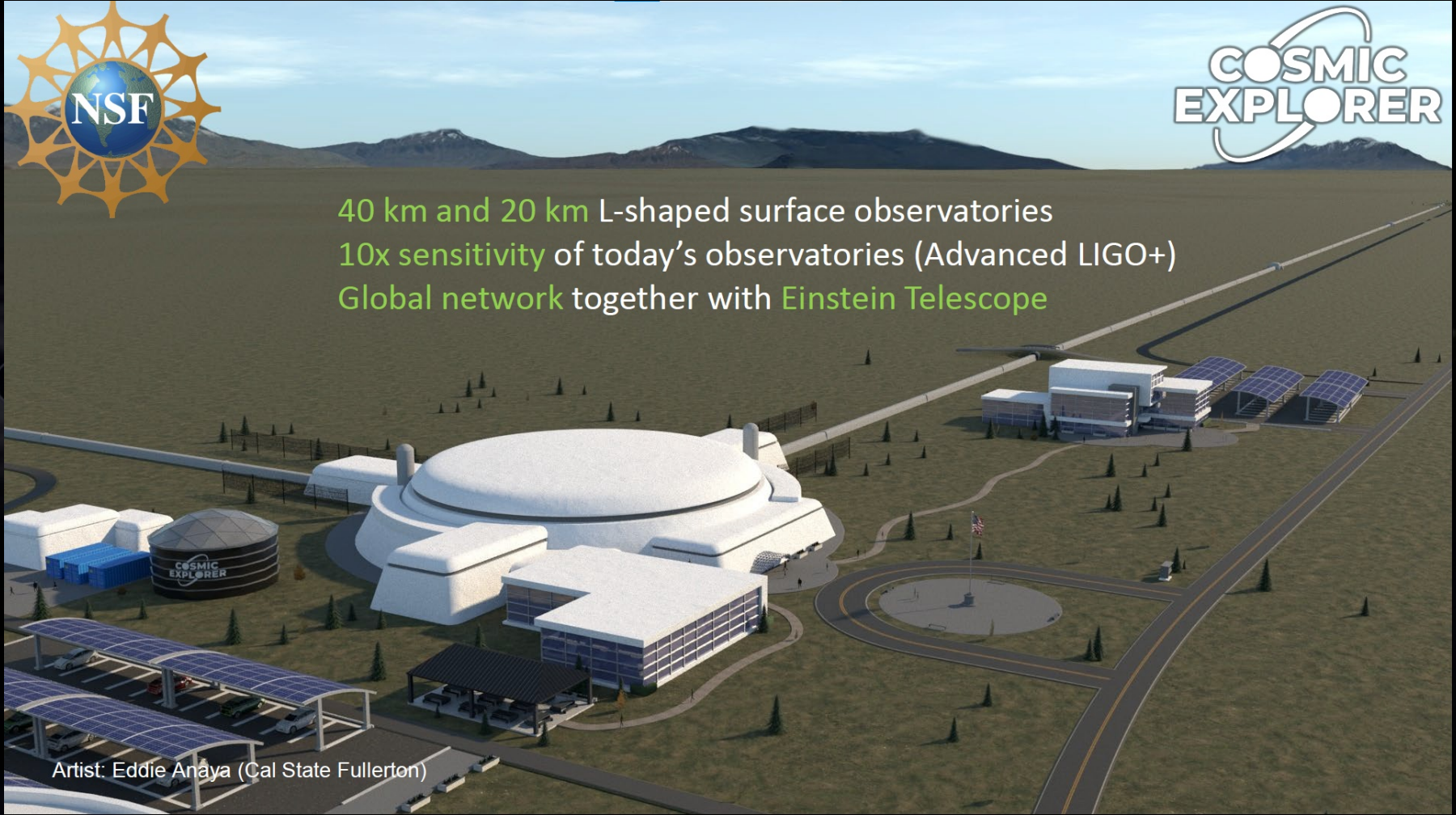
FUNDAMENTAL PHYSICS AND COSMOLOGY

- **The nature of compact objects**
 - near-horizon physics
 - tests of no-hair theorem
 - exotic compact objects
- **Tests of General Relativity**
 - post-Newtonian expansion
 - strong field regime
- **Dark matter**
 - primordial BHs
 - axion clouds, dark matter accreting on compact objects
- **Dark energy and modifications of gravity on cosmological scales**
 - dark energy equation of state
 - modified GW propagation
- **Stochastic backgrounds of cosmological origin**
 - inflation, phase transitions, cosmic strings

Le cousin américain



40 km and 20 km L-shaped surface observatories
10x sensitivity of today's observatories (Advanced LIGO+)
Global network together with Einstein Telescope



Artist: Eddie Anaya (Cal State Fullerton)

Le cousin américain



40 km and 20 km L-shaped surface observatories
10x sensitivity of today's observatories (Advanced LIGO+)
Global network together with Einstein Telescope

From the Astro2020 Decadal Survey:

- "Gravitational wave astrophysics is one of the most exciting frontiers in science."
- "This will require investment in technology development now."
- "The survey committee strongly endorses gravitational wave observations as central to many crucial science objectives."

Artist: Eddie Anaya (Cal State Fullerton)