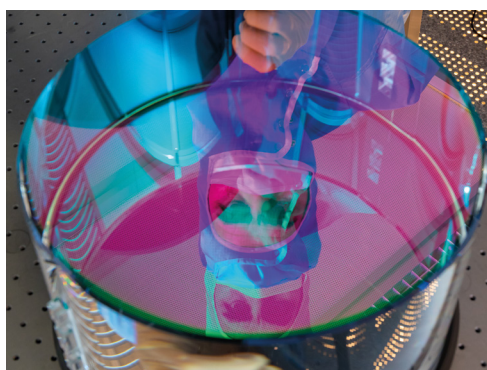


COUCHES MINCES AUX PERFORMANCES ULTIMES POUR LES DÉTECTEURS D'ONDES GRAVITATIONNELLES ET LES INSTRUMENTS DES TÉLESCOPES

Laurent PINARD*

Laboratoire des Matériaux Avancés – IP2I - CNRS Nucléaire et Particules, Villeurbanne, France

*pinard@lma.in2p3.fr



Les miroirs utilisés par les détecteurs d'ondes gravitationnelles Virgo et LIGO sont synthétisés par une technique de dépôt bien particulière : la pulvérisation par faisceaux d'ions. C'est la seule capable de réaliser des empilements de couches minces exempts de pertes optiques, tout en ayant une uniformité remarquable sur des grands diamètres. Ces propriétés sont également recherchées pour d'autres grands instruments, comme les spectrographes installés sur les grands télescopes terrestres.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513322>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Les grands instruments scientifiques actuels ont besoin d'optiques de grandes dimensions (30-50 cm de diamètre) nécessitant des revêtements de couches minces ayant des performances ultimes dans le visible et proche infrarouge : pertes optiques (absorption, diffusion) et pertes mécaniques (bruit thermique)

très basses, uniformité poussée. C'est le cas de tous les interféromètres gravitationnels terrestres tels que Virgo, LIGO (USA) ou KAGRA (Japon), mais également des spectrographes de dernière génération ou Etalon Fabry-Perot installés sur les télescopes terrestres.

Pour réaliser ces composants, la technique de Pulvérisation par Faisceaux d'ions (ou Ion Beam

Sputtering, IBS) [1] est utilisée car c'est la seule capable réaliser des couches minces ayant les performances optiques ultimes nécessaires. Les matériaux utilisés sont des oxydes (SiO_2 , Ta_2O_5 , $\text{Ti}:\text{Ta}_2\text{O}_5$) pour leurs excellentes propriétés optiques dans le visible et proche infrarouge. Le LMA a développé en 2000 un bâti de dépôt IBS unique au monde par sa taille et ses performances capables de



Figure 1. Bâti de dépôt IBS développé pour Virgo (©Cyril FRESILLON LMA CNRS Photothèque_2016)

traiter deux miroirs Virgo ou LIGO en même temps (Figure 1).

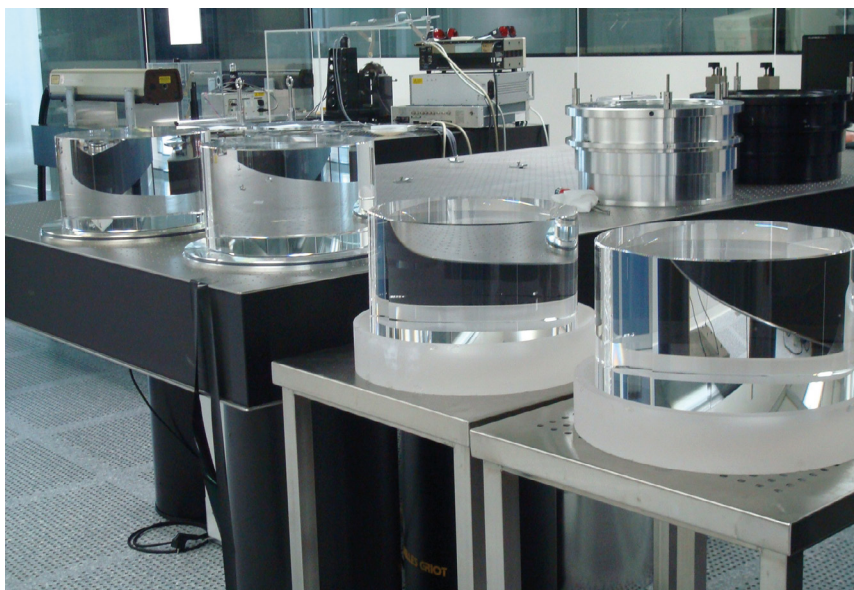
SPÉCIFICATIONS DES SUBSTRATS EN SILICE ET DES EMPILEMENTS DE COUCHES MINCES

Pour répondre aux besoins de ces instruments, la première étape consiste à avoir des substrats en silice fondue ultrapure de très haute qualité (Ø35 cm, 20 cm d'épaisseur - Figure 2). Ainsi, pour le détecteur Virgo, la dernière génération

de Suprasil développée par Heraeus [2] en Allemagne (Suprasil 3002) a été utilisée comme matériau de base pour les miroirs d'entrée des cavités Fabry-Perot. Ce choix est motivé par la grande homogénéité de l'indice de réfraction et l'absorption extrêmement faible à 1064 nm : 0,2 ppm/cm (partie par million).

Des spécifications de polissage très sévères ont aussi été définies afin de garantir après traitement un faible niveau de diffusion ainsi qu'une très

Figure 2. Substrats Advanced LIGO avant traitement dans la salle blanche du LMA (crédits LMA)



EURO
PM25
CONGRESS & EXHIBITION

INSCRIVEZ-VOUS
DÈS MAINTENANT

sur www.europm25.com

Exposition

Congrès

Networking

14-17 SEP 2025
Glasgow, Écosse



bonne planéité (Figure 3). En effet, voici ci-dessous les spécifications les plus contraignantes demandées aux entreprises de polissage qui sont peu nombreuses à pouvoir atteindre ces niveaux de performances (AMETEK ZYGO (USA), THALES-SESO (France)) :

- Microrugosité : < 0.1 nm RMS
- Planéité de surface : < 0.5 nm RMS sur Ø15 cm central
- Défauts ponctuels : densité < 1/4 mm² dans Ø15 cm (défauts < 5µm), <15 dans Ø15 cm (défauts [5µm, 50µm])

En ce qui concerne les spécifications des empilements haute réflexion des miroirs des détecteurs d'ondes gravitationnelles, des performances optimales en termes d'absorption, de diffusion et de planéité sont requises :

- Planéité après traitement : < 0,5 nm RMS sur Ø15 cm
- Absorption moyenne à 1064 nm < 0,5 ppm
- Diffusion moyenne à 1064 nm < 10 ppm
- Dépôts Antireflets à 3 bandes (532, 800, 1064 nm) : R<100 ppm à 1064 nm (face arrière du miroir)

De plus, une faible dissipation mécanique des couches minces est nécessaire pour minimiser le bruit thermique.

LES MIROIRS DÉVELOPPÉS POUR LES DÉTECTEURS VIRGO, LIGO ET KAGRA

A. Bruit thermique et absorption

Une source importante de bruit dans les interféromètres a été identifiée comme étant le bruit thermique des empilements de couches minces. De nombreux travaux ont été réalisés [3] pour modifier et optimiser les couches à haut indice de réfraction (Ta₂O₅) qui sont la principale source de perte mécanique (directement proportionnelle à l'épaisseur totale de Ta₂O₅). Le meilleur compromis trouvé a été de doper le Ta₂O₅ avec des atomes de Ti.

Afin de réduire l'épaisseur totale de

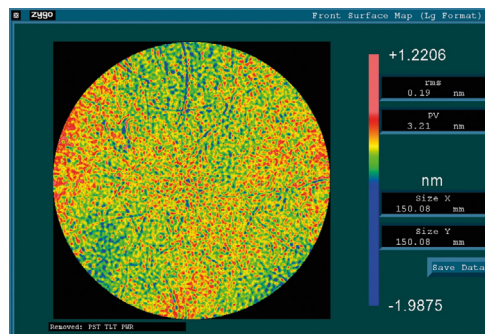


Figure 3. Planéité de la surface (0,19 nm RMS Ø15 cm) d'un substrat Virgo.

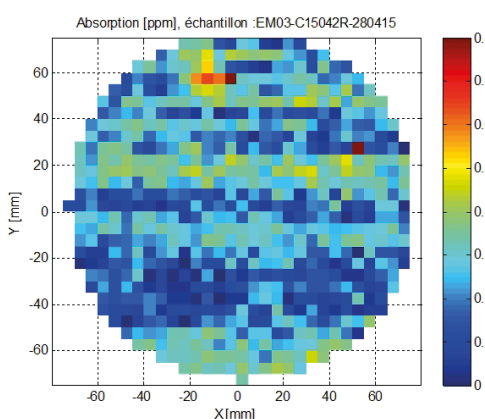
Ti:Ta₂O₅ tout en conservant les propriétés du miroir, un empilement optimisé du miroir avec des couches non quart d'onde (aH (bL cH)x dL, avec a,c<1 et b>1) a été étudié [4]. Des mesures expérimentales ont montré que les pertes mécaniques du miroir diminuaient [5] par rapport à un empilement quart d'onde classique et que l'absorption moyenne à 1064 nm était également plus faible (mesure par déflexion photothermique).

La figure 4 montre une carte d'absorption réalisée sur un miroir haute réflectivité de Virgo dont la transmission est de 3 ppm à 1064 nm : valeur moyenne de 0,24 ppm sur Ø15 cm à 1064 nm.

B. Diffusion

Afin d'améliorer le niveau moyen de diffusion après dépôt, une nouvelle machine de nettoyage humide a été

Figure 4. Cartographie d'absorption Ø15 cm à 1064 nm d'un miroir Virgo.



développée, permettant une meilleure efficacité du nettoyage sur les très petites particules (combinaison d'ultrasons, de mégasons).

Pour les 20 miroirs Advanced LIGO traités, voici ci-dessous la diffusion moyenne (Figure 5) sur Ø15 cm à 1064 nm obtenue pour les deux types de dépôt réfléchissant (miroirs d'entrée, miroirs de sortie) :

- Sur 10 ITM (Input Test Mass): 3,7 +/- 1,2 ppm
- Sur 10 ETM (End Test Mass): 4,9 +/- 1,5 ppm

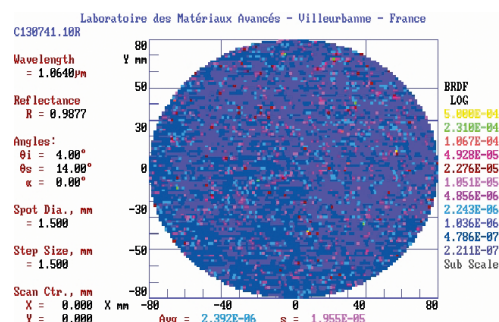


Figure 5. Carte de diffusion moyenne Ø15 cm sur un miroir d'Advanced LIGO mesurée avec un diffusomètre CASI.

C. Planéité du miroir

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles de 2^e génération (à partir de 2015) ont eu besoin de miroirs haute réflectivité ayant une planéité meilleure que 0,5 nm RMS sur le même diamètre central de 15 cm. C'est un énorme challenge, compte tenu des spécifications pour la 1^{ère} génération de composants (3-4 nm RMS).

Le contrôle de l'épaisseur de l'empilement de couches minces est donc un point crucial. Il est nécessaire d'avoir des couches minces avec une très bonne uniformité d'épaisseur afin de garantir des propriétés optiques constantes sur la surface de l'optique. Les deux cavités Fabry-Perot des interféromètres gravitationnels (composées d'un miroir d'entrée et d'un miroir de sortie) doivent avoir les mêmes caractéristiques optiques :

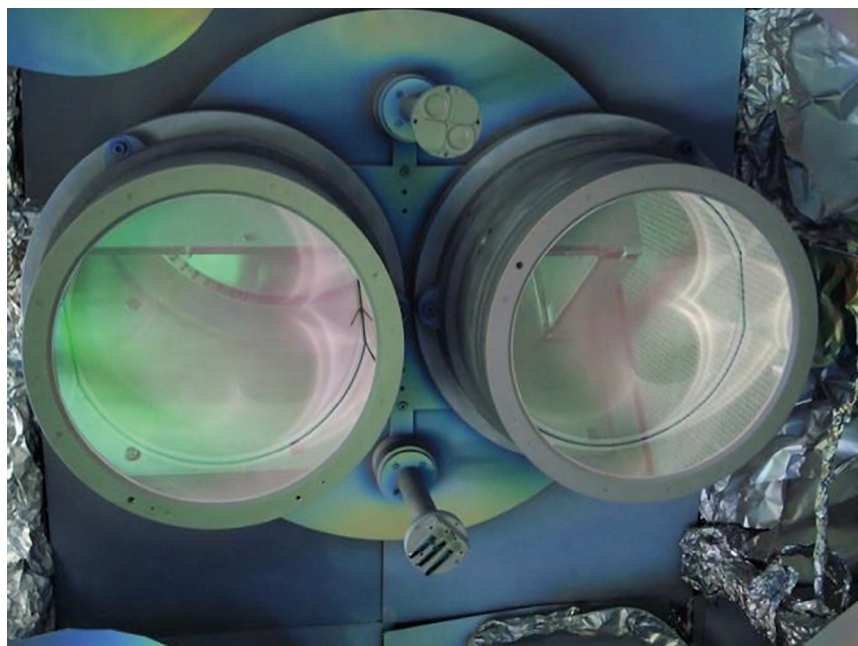


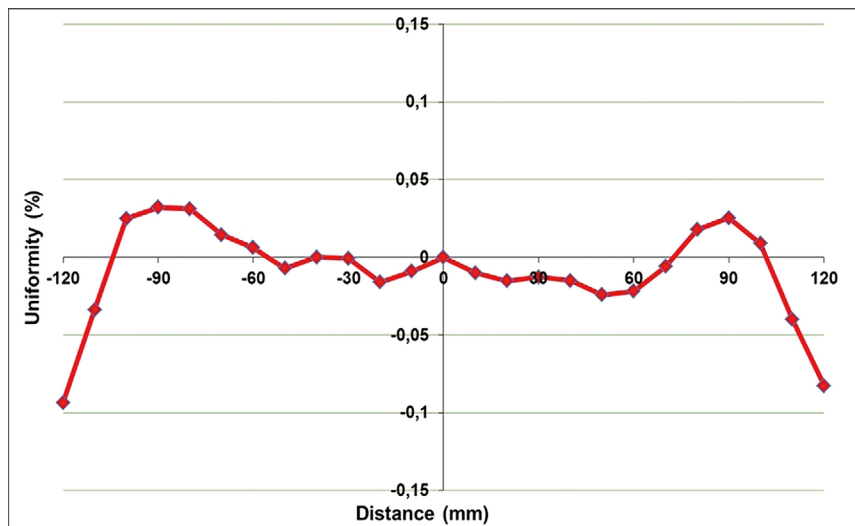
Figure 6. Deux miroirs de Ø35 cm montés sur le porte-échantillon de la machine de dépôt (crédits LMA)

transmission du miroir, finesse, pertes aller-retour. Cela implique de traiter deux substrats de silice de 35 cm (Figure 6) en même temps (miroirs jumeaux).

Pour atteindre le niveau de planéité requis par LIGO et Virgo, il a été nécessaire de développer un nouveau porte-échantillon incluant un mouvement planétaire couplé à des masques dédiés situés entre les cibles et les substrats.

Pour chaque matériau (SiO_2 , $\text{Ti-Ta}_2\text{O}_5$), la forme du masque est calculée à l'aide d'un logiciel de simulation, car les profils des particules pulvérisées sont différents. L'optimisation de la forme du masque a d'abord été réalisée sur des monocouches déposées sur de grandes plaques de silice fondue (Ø35 cm, 6 mm d'épaisseur) avec des mesures spectrophotométriques le long des diamètres. ● ● ●

Figure 7. Profil d'uniformité moyen sur Ø24 cm d'un empilement miroir haute réflectivité



SOLUTIONS POUR LE TRAITEMENT DE SURFACE

LASER FS 50W SANS EAU



- ▲ 1030/515/343nm
- ▲ Jusqu'à 50W, 1mJ
- ▲ Monocoup à 50MHz
- ▲ Mode rafale MHz-GHz ou mixte MHz+GHz
- ▲ Impulsion à la demande
- ▲ Extension de la durée d'impulsion jusqu'à 1 ns
- ▲ Refroidissement sec (sans chiller)

LASERS CO2



- ▲ Choix de la longueur d'onde, adaptée à l'absorption des matériaux
- ▲ Large choix de puissance, jusqu'à 250W
- ▲ Contrôle des paramètres du faisceau
- ▲ Stabilité de la puissance
- ▲ Technologie Ceramicore = pas de dégradation du gaz

Recharge gratuite pendant 7 ans !



Des limitations liées au dispositif de métrologie ont été rapidement observées lorsque le niveau d'uniformité est devenu inférieur à 0,2% sur Ø16 cm (impossibilité de bien optimiser la forme du masque, incertitudes).

Il a alors été décidé de mesurer l'uniformité du revêtement directement sur les empilements haute réflectivité (HR) complets. Les profils d'uniformité sont déduits également des mesures spectrales en évaluant le décalage en longueur d'onde de la bande de réflexion induit par les non-uniformités.

La Figure 7 montre le profil d'uniformité moyen obtenu sur Ø24 cm pour un revêtement HR d'un End Mirror (EM) (6µm d'épaisseur totale, 40 couches). L'uniformité atteinte est remarquable : #0.05% sur Ø20 cm ou 3 nm PV.

Grâce à une telle uniformité, les spécifications de planéité de surface des miroirs des détecteurs d'ondes gravitationnelles ont pu être atteintes comme on peut le voir sur la Figure 8 (0,37 nm RMS sur Ø15 cm).

AUTRES APPLICATIONS POUR CES COUCHES MINCES IBS DE HAUTE QUALITÉ

Ces développements qui ont conduit à pouvoir déposer des empilements de couches minces complexes ayant de faibles pertes optiques et une excellente uniformité sur des grands diamètres ont suscité un grand intérêt dans d'autres projets instrumentaux. Cela concerne par exemple les spectrographes ou les cavités Fabry-Perot installés autour des grands

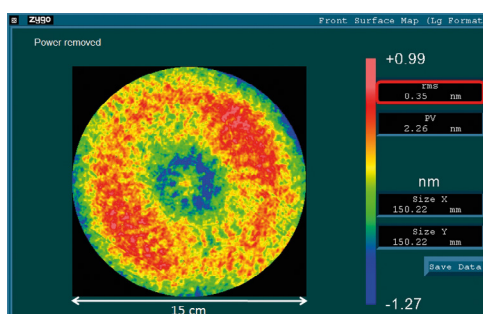


Figure 8. Planéité d'un miroir d'Advanced Virgo sur Ø15 cm (Courbure soustraite).

télescopes terrestres.

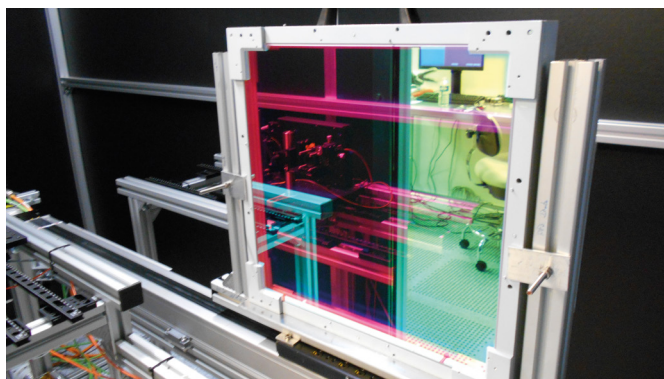
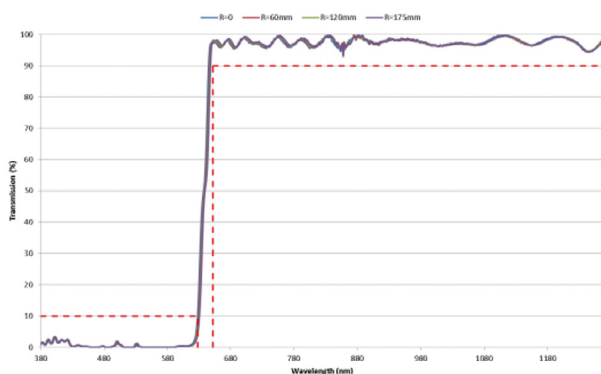
Les spectrographes ont besoin de lames dichroïques de 30 ou 40 cm (Figure 9b) de côté pour permettre l'analyse spectrale du flux lumineux du télescope. Il est nécessaire de déposer un empilement d'une centaine de couches pour atteindre les réponses spectrales en transmission et réflexion souhaitées. Mais la principale difficulté de ce genre d'empilement est de garantir une zone de transition étroite et raide entre les deux zones du spectre (comme on peut le voir sur la figure 9a). La bonne uniformité des dépôts IBS garantit que la zone de transition ne bouge pas spectralement entre le bord et le centre du composant, ce qui est fondamental pour que l'instrument fonctionne de façon nominale. Sur la Figure 9a, on voit que tous

les spectres sont confondus entre le centre (rayon 0 mm) et le bord (rayon 175 mm).

Ces couches minces très uniformes ont été aussi utilisées pour réaliser deux grands Etalon Fabry-Perot de 35 cm de diamètre (le plus grand du monde), en collaboration avec ZYGO (USA) et le Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik (Freiburg, Allemagne). Cet étalon est utilisé comme filtre accordable dans le visible pour le télescope solaire DKIST (Hawaï). L'empilement est réflecteur (95%) sur la bande 520-870 nm. La principale exigence concerne la variation RMS de l'espace d'air entre les deux miroirs de l'étalon (Figure 10) qui doit être inférieure à 3 nm RMS sur 250 mm de diamètre.

Pour garantir cela, il faut d'une part que les deux miroirs de l'étalon aient une planéité de surface <1 nm RMS sur Ø25 cm, ce qui a pu être atteint. Mais il a fallu également compenser la courbure générée (10 nm d'amplitude) par les contraintes compressives de couches minces IBS. Pour réaliser cela, une couche de SiO₂ d'épaisseur contrôlée (même matériau que le substrat) a été déposée sur la face arrière. Le stress également compressif de cette couche va lui aussi induire une variation de courbure sur la face avant du miroir et ainsi annuler la déformée liée à l'empilement réflecteur.

Figure 9. a) Spectres en transmission d'un empilement dichroïque (instrument PFS, <https://pfs.ipmu.jp/>) mesurés au centre et à 60, 120, 175 mm du centre. b) Photo d'un dichroïque de l'instrument HRS du télescope 4MOST (ESO, crédits LMA).



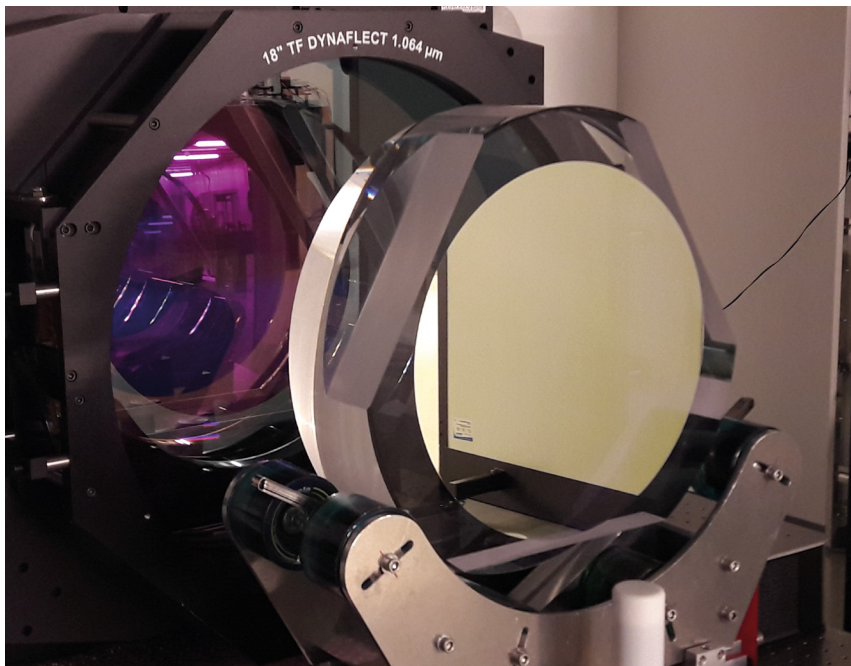


Figure 10. Miroir d'une cavité Fabry-Perot de l'instrument VTF (crédits LMA)

CONCLUSION

La technologie IBS développée au LMA depuis plus de 20 ans a permis de réaliser des miroirs de grandes dimensions aux performances optiques (absorption, diffusion, uniformité) et mécaniques ultimes pour tous les détecteurs d'ondes gravitationnelles au monde. Cela a permis aux interféromètres LIGO de détecter expérimentalement en 2015 pour la 1ère fois une onde gravitationnelles sur terre.

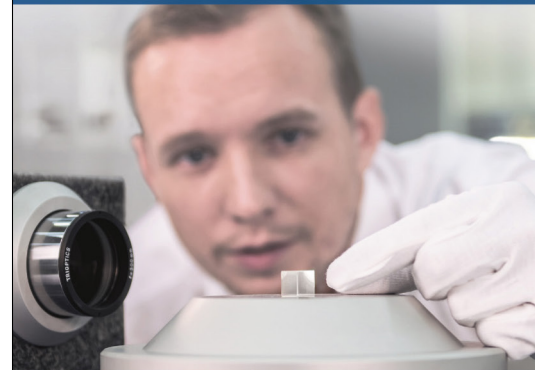
Mais, les futures upgrades et nouvelles générations de détecteurs (Einstein

Telescope) vont demander de pousser encore plus loin la technologie pour produire des composants plus grands et plus lourds (60 cm de diamètre 100-200 kg). Il va falloir optimiser encore le procédé de dépôt IBS et trouver des matériaux en couches minces plus performants (bruit thermique plus bas). De même, les nouveaux instruments qui seront installés sur l'ELT de l'ESO ont également besoin de composants dichroïques encore plus grand (94 cm de diamètre) ce qui représentera un nouveau défi pour cette technique IBS. ●

RÉFÉRENCES

- [1] B. Cima, D. Forest, P. Ganau, B. Lagrange, J.M. Mackowski, C. Michel, J.L. Montorio, N. Morgado, R. Pignard, L. Pinard, A. Remillieux, *Appl. Opt.* **45**, 1436 (2006)
- [2] <https://www.heraeus-conamic.com/>
- [3] M. Granata, E. Saracco, N. Morgado, A. Cajgfinger, G. Cagnoli, J. Degallaix, V. Dolique, D. Forest, J. Franc, C. Michel, L. Pinard, R. Flaminio, *Phys. Rev. D* **93**, 012007 (2016)
- [4] L. Pinard, B. Sassolas, R. Flaminio, D. Forest, A. Lacoudre, C. Michel, J.L. Montorio, N. Morgado, *Opt. Lett.* **36**, 1407 (2011)
- [5] A. E. Villar *et al.*, *Phys. Rev. D* **81**, 122001 (2010)

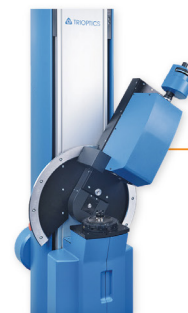
Instrumentation de test optique



Mesure de la plupart des paramètres optiques

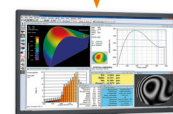
FTM, EFL, BFL, centrage, alignement front d'onde

Applications en R&D et production



Banc de FTM
UV, VIS, IR

Interféromètre "μPhase"



Station de centrage optique

TRIOPTICS France

76 rue d'Alsace
69100 Villeurbanne
Tel. +33 (0)4 72 44 02 03
www.trioptics.fr