

Développement des miroirs en saphir

J. Degallaix pour le LMA – IP2I et iLM



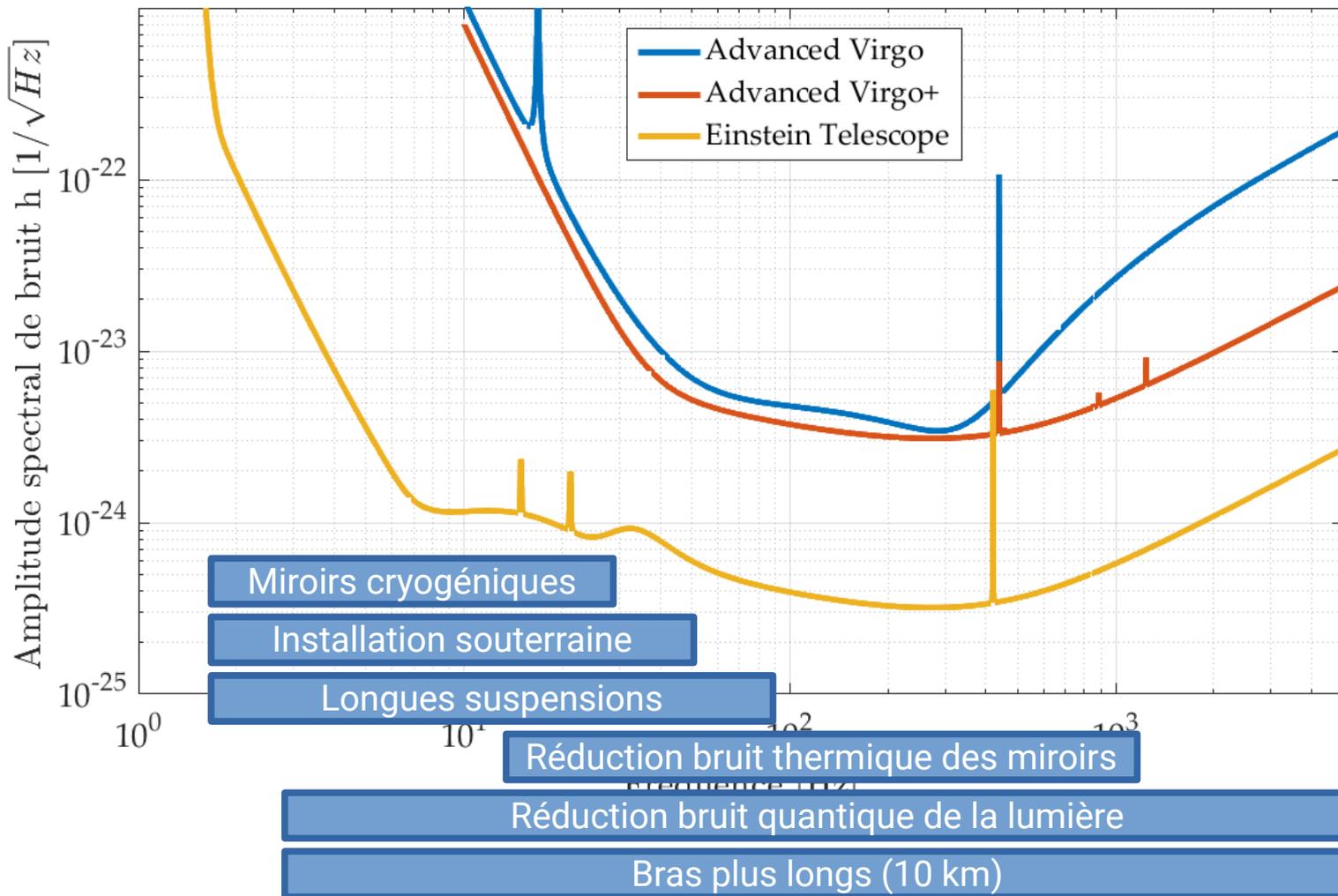
Workshop R&Ds
Virgo & ET

I

Introduction

- présentation du saphir

Einstein Telescope et la stratégie du xylophone



- ET-LF
 - cryogénique
 - substrats cristallins
 - basse puissance
- ET-HF
 - température ambiante
 - miroirs en silice
 - 3MW de lumière

Einstein Telescope et la stratégie du xylophone

Science with the Einstein Telescope: a comparison of different designs

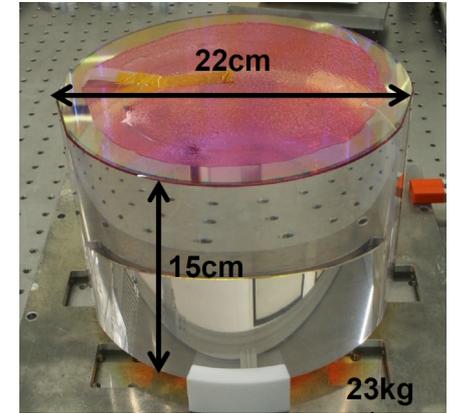
8.2 The role of the low-frequency sensitivity

We now draw our conclusions from the comparison between the two different choices of the amplitude spectral density (ASD) that we have studied, namely the full xylophone design, consisting of a high-frequency instrument together with a low-frequency instrument working at cryogenic temperature ('HFLF-cryo'), and the situation in which there is only the high-frequency instrument ('HF-only'). The main messages that emerge from our analysis are the following:

4. The low-frequency sensitivity is crucial for exploiting the full scientific potential of ET. In the HF-only configuration, independently of the geometry chosen, several crucial scientific targets of the science case would be lost or significantly diminished.

Les miroirs cryogéniques

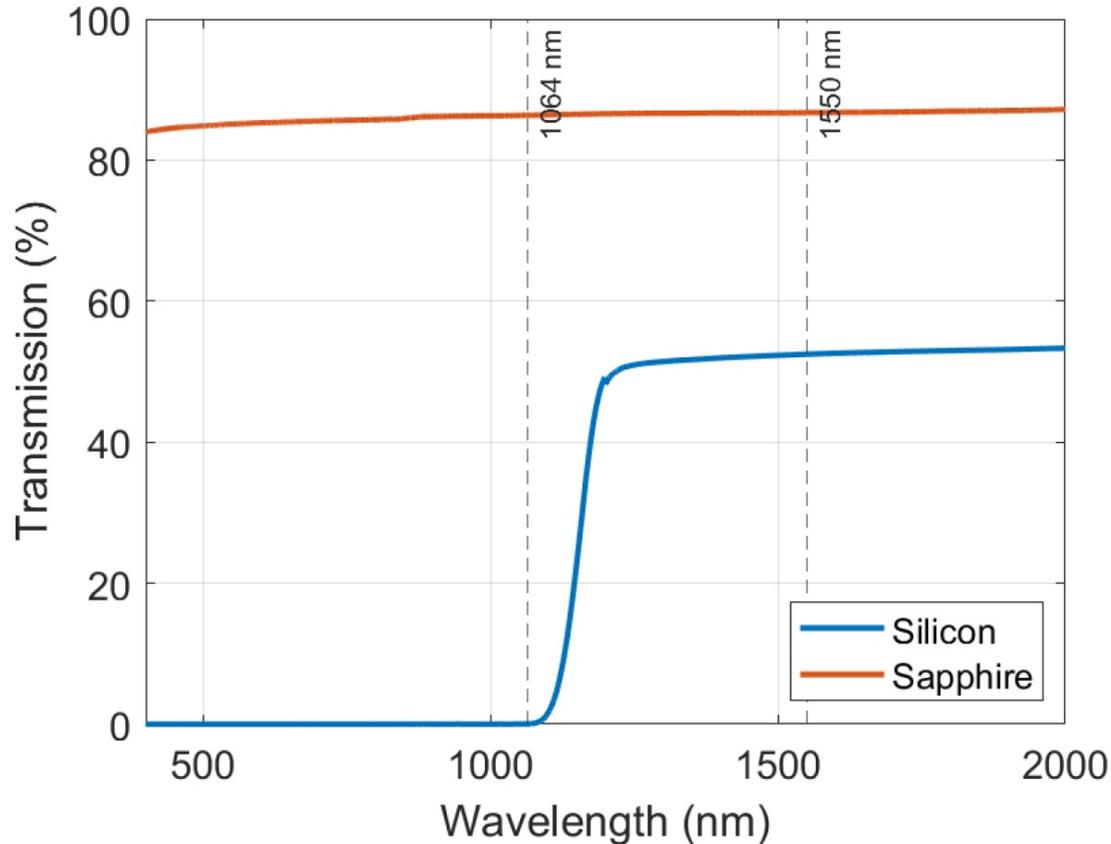
- la silice n'est plus compatible
- substrats cristallins candidats:
 - silicium (baseline pour ET)
 - saphir (KAGRA)
- être disponible en \varnothing 450 mm, 200 kg
 - et avec de bonnes propriétés optiques
 - R&D sur les couches minces à basse T



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

Avantages du saphir

Transmission d'une fenêtre (sans AR) :



Saphir transparent à
532 nm et 1064 nm

Possibilité d'utiliser les
technologies de Virgo
et LIGO

Les avantages du saphir

Parameter	Sapphire		Silicon	
	10K	20K	10K	20k
Thermal Conductivity κ [W/(m.K)]	2900 (<i>c</i> -plane) [81]	4300 (<i>c</i> -plane) [82]	1000 (111) [83]	3000 (111) [83]
Thermal Expansion α [K ⁻¹]	5.3×10^{-10} [84]	4.6×10^{-10} [84]	4.8×10^{-10} [85]	-2.9×10^{-9} [85]
Specific Heat C [J/(kg.K)]	0.085 [86]	0.72 [86]	0.276 [87]	3.41 [87]
Density ρ [kg/m ³]	3997		2331	
Young's modulus Y [GPa]	464		169 (110) [88]	
Poisson ratio σ	0.27 – 0.30		0.22	

Meilleure conduction thermique, gradient de température plus faible

Les avantages du saphir

Parameter	Sapphire		Silicon	
	10K	20K	10K	20k
Thermal Conductivity κ [W/(m.K)]	2900 (<i>c</i> -plane) [81]	4300 (<i>c</i> -plane) [82]	1000 (111) [83]	3000 (111) [83]
Thermal Expansion α [K ⁻¹]	5.3×10^{-10} [84]	4.6×10^{-10} [84]	4.8×10^{-10} [85]	-2.9×10^{-9} [85]
Specific Heat C [J/(kg.K)]	0.085 [86]	0.72 [86]	0.276 [87]	3.41 [87]
Density ρ [kg/m ³]	3997		2331	
Young's modulus γ [GPa]	464		169 (110) [88]	
Poisson ratio σ	0.27 – 0.30		0.22	

Plus haute densité, miroir ×1.7 moins épais
(impact plus faible de la biréfringence / absorption)

Les difficultés mises en évidence par KAGRA

(relative) haute absorption
optique - non uniforme

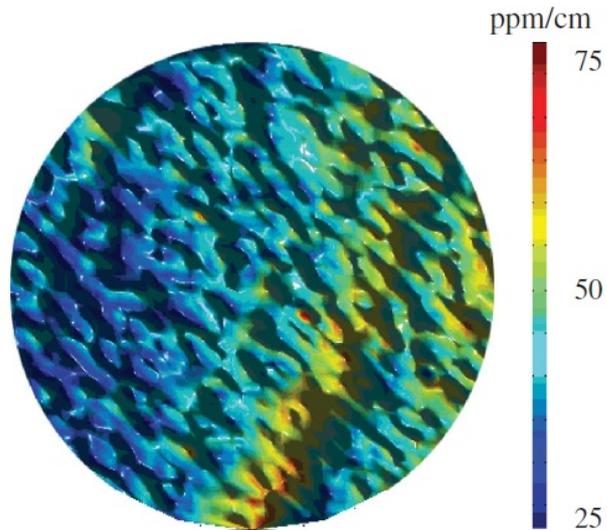


FIG. 7 (color). Absorption of 100 mm sapphire substrate in ppm/cm. The aperture size is 50 mm and the interaction point is 2 mm from the surface. There is a line where absorption is higher than the other regions.

Biréfringence présente en
transmission

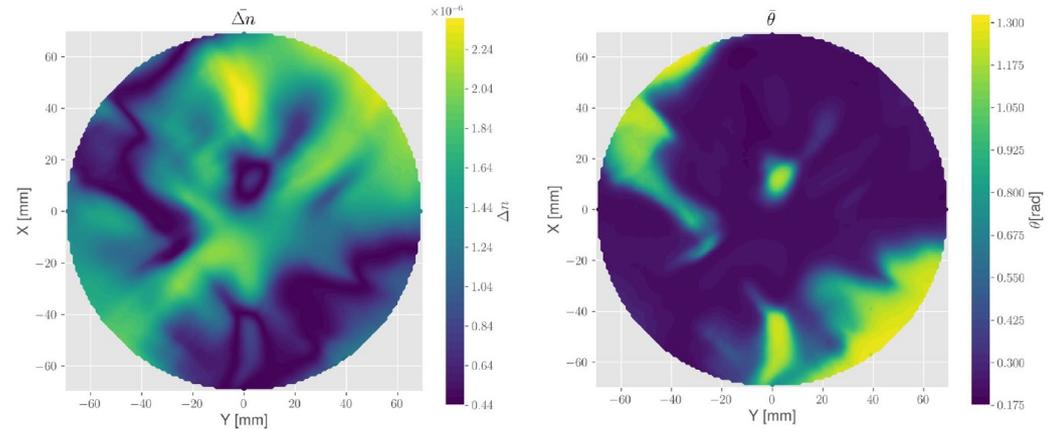
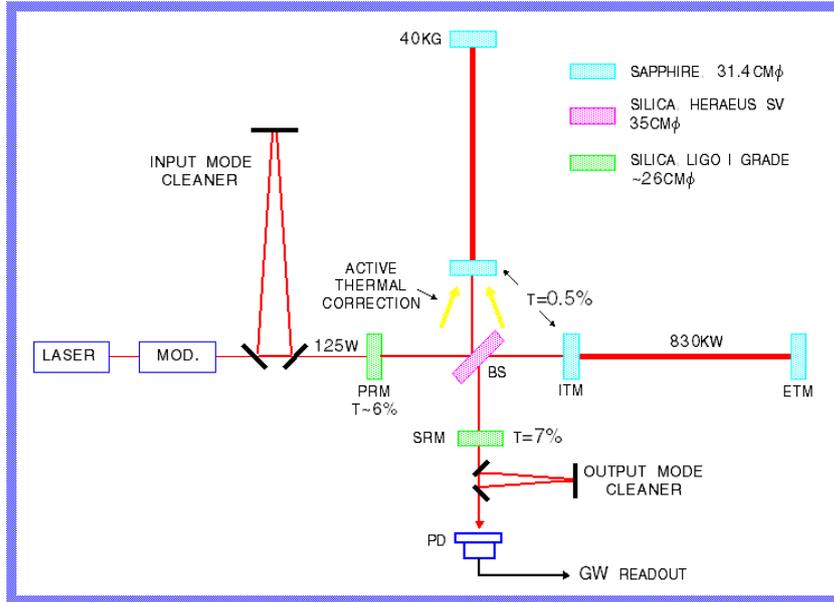


Figure 4. Mean distribution of both birefringence Δn and θ -angle, calculated from the six input-polarization combinations which led to no miscalculations.

Plus de 20 ans d'étude (regard dans le rétroviseur)



- Dans les années 2000, considéré pour LIGO 2 (nombreuses caractérisations à cette époque)
- finalement silice fondue pour AVirgo et ALIGO

OPEN ACCESS

Superiority of sapphire over silicon test masses regarding thermal noise and thermal lensing for laser interferometers with transmissive optics

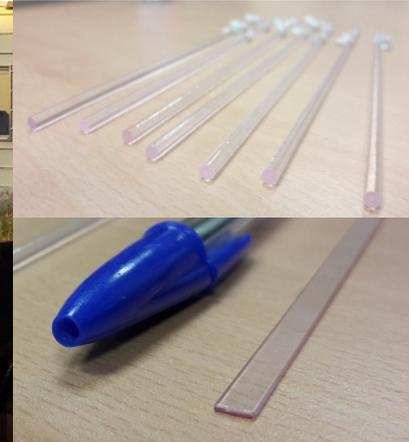
To cite this article: Jérôme Degallaix *et al* 2006 *J. Phys.: Conf. Ser.* **32** 404

II

L'engagement lyonnais

Le contexte local et régional

- sur le campus de Lyon I
 - spécialiste du saphir à l'iLM →
 - et de la croissance cristalline
 - la métrologie du LMA



- un écosystème régional
 - RSA le rubis
 - plateforme Crystal Innov
 - et des équipementiers

(~ Grenoble)



(~ Chambéry)

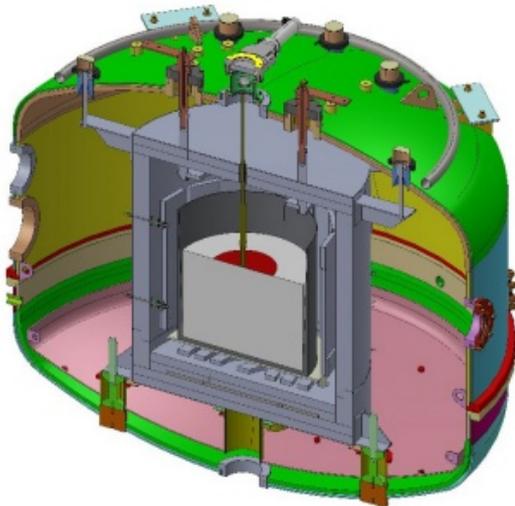


Plusieurs financements successifs obtenus

Projet	Date	Financeur	Porteur <i>Partenaires</i>	Objectifs
OSAG	2019 - 2022	Idex	iLM (G. Cagnoli) <i>LMA</i>	Achat four de croissance et banc de caractérisation optique au LMA
UIA	2019 - 2022	Région	Polygon Physics <i>LMA</i>	Démonstration de polissage ionique sur saphir
DOSFaP	2020 - 2025	Région	LMA (J. Degallaix) <i>iLM</i>	Thèse iLM-LMA pour la réduction des pertes optiques dans le saphir
Veloce	2022	CPER	IP2I - LMA	Achat d'une machine de polissage compatible saphir
SEPO 450	2024 - 2027	Région	ECM Greentech <i>iLM, LMA</i>	Création de nouvelles offres (four, rodage, mesure de surface) par les équipementiers pour la production d'optiques en saphir

Résultats – croissance grande optiques

Four OSAG en opération. Dimensionné pour croître des saphirs de \varnothing 450 mm

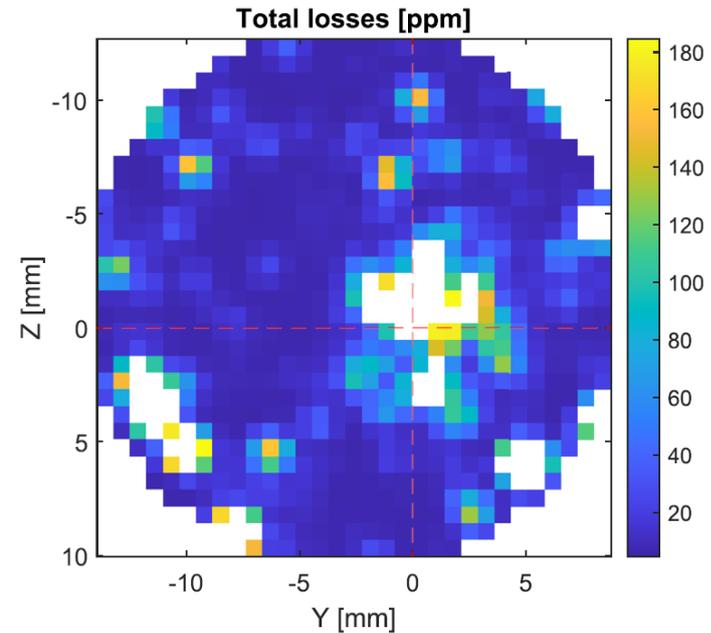


- saphirs de $\varnothing > 300$ mm produit
- pas de défaut apparent
- caractérisation optique en cours

Intérieur et extérieur du four de croissance

Résultats – pertes optiques

Démonstrations de miroirs en saphir très faibles pertes dans une cavité optique ($F \sim 250\,000$)

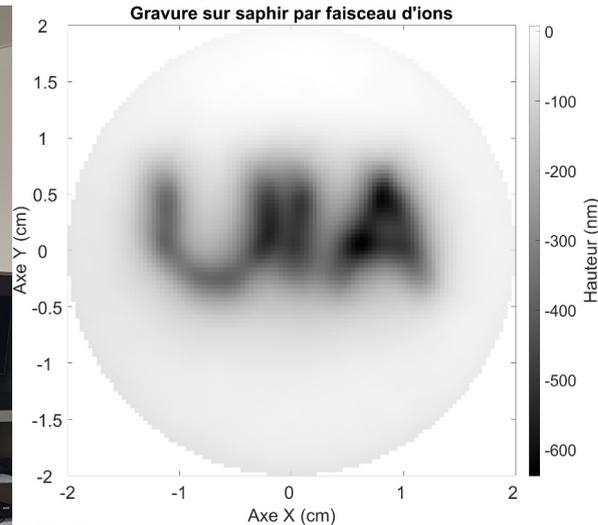


doi

*Pertes optiques de la cavité
en fonction de la position du miroir* 15

Résultats – polissage ionique

Avec le recyclage d'une ancienne enceinte à vide

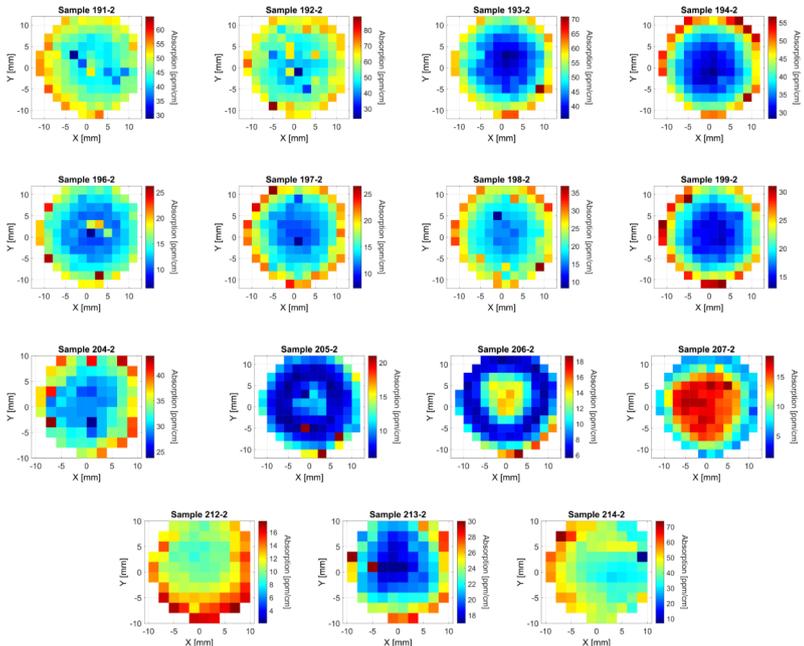


Test de gravure

- ▶ nouvelle enceinte en cours d'installation
- ▶ pour traiter substrats de diamètre de 300 mm
- ▶ besoin d'une nouvelle source d'ions

Résultats – absorption / biréfringence

Croissance d'une vingtaine de saphirs de \varnothing 30 mm avec différents paramètres de tirage.



- ▶ Absorption maîtrisée (< 15 ppm/ cm)
- ▶ validation de la matière première, conditions de tirage
- ▶ optimisation de la biréfringence en cours

Cartographie d'absorption

III

Le court terme

Ce qu'on sait déjà faire...



*Croissance
cristalline*



*Traitement de
surface*

La suite logique pour produire un miroir complet

Miroir =



*Croissance
cristalline*

+



Polissage

+



*Traitement de
surface*

Pas juste un équipement



Raw glass

Cutting

Chamfering edges

Grinding

Polishing

Cleaning

Inspection

En cours
de discussion
à l'iLM

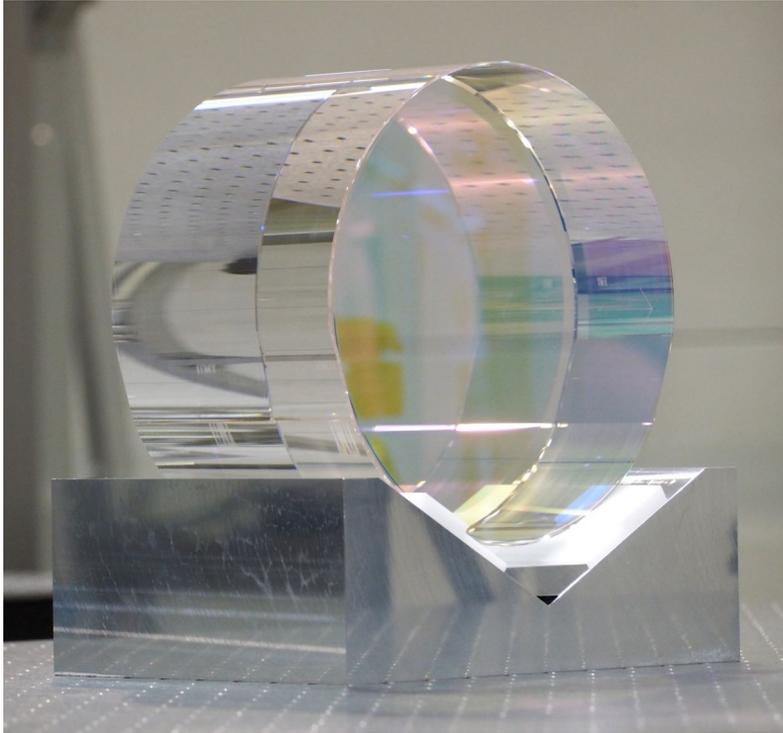
Polissage
mécanique

Polissage
ionique
(démonstrateur
au LMA)



(livraison
à l'été)

Ambition pour les 2-3 années à venir

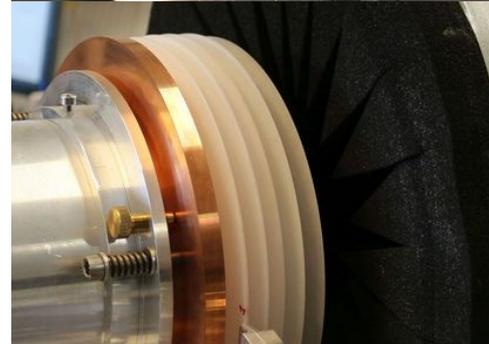
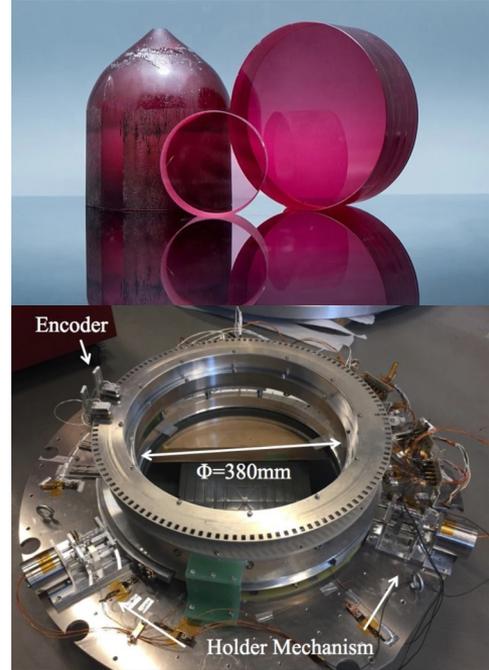


- maîtriser la découpe, le polissage
- développement et caractérisation d'un miroir complet en saphir (Ø 300mm)
- si performances ok, proposition à KAGRA pour une amélioration post-05
- (+ tard), tests en froid, suspendu ?

Au delà des ondes gravitationnelles

Demandes pour des saphirs de grande taille :

- amplificateurs pour lasers pulsés de très haute puissance (Ti:saphir)
- lame demi-onde pour la polarimétrie du fond diffus cosmologique (Polarbear, LiteBIRD)
- haloscope pour la recherche de matière noire (MadMax)



Conclusion



- Nouvelles activités à Lyon, complémentaires des développements sur les coatings au LMA ou à l'iLM
- Pas de concurrence au niveau mondial pour la production de grands saphirs très faibles pertes
- La route sera longue pour la maîtrise du polissage au niveau nanométrique