

L'optique au LAPP

Un état des lieux

Romain Bonnand - 22 octobre 2024

- L'optique au LAPP :
 - Les simulation optiques au LAPP.
 - Les expériences optiques au LAPP.
 - Difficultés et besoins.

- Dans le cadre de l'expérience Virgo.
- **Responsabilité** et **participation** du LAPP dans plusieurs sous-système :
- **Détection** :
 - Construction et gestion de 7 bancs optiques suspendus (dont 2 pour le squeezing).
 - Design optique.
 - Cavité de sortie de l'interféromètre « OMC ».
 - Lumière diffusée : Backscatter meter au LAPP.
- **Calibration** :
 - Photon Calibrator (PCal) \Rightarrow dispositif optique permettant la calibration de Virgo avec un laser de puissance.
- **OSD (Optical Simulation and Design)** :
 - Simulation pour le commissioning.
 - Simulation pour les futurs up-grades (cavités sables).



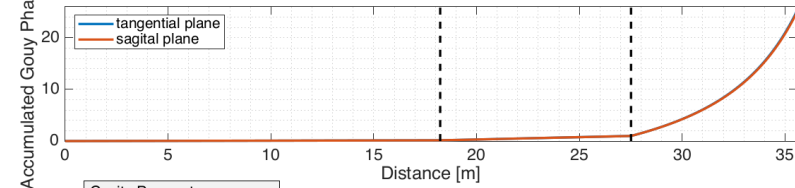
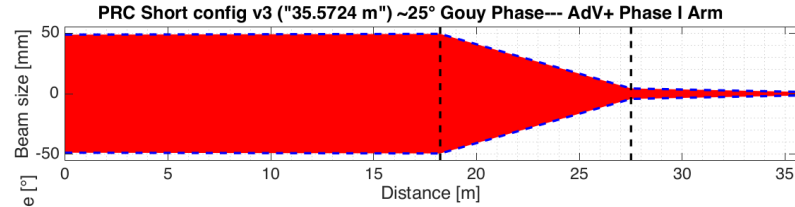
- Simulation en prop. Gaussienne :

- Code de simulation en matrice ABCD.

- 2D avec astigmatisme.
 - Utilisé pour les simulations des futures cavités stables de Virgo.
 - 1 permanent expert.

- OptoCad :

- 2D avec astigmatisme.
 - Utilisé pour la design optique global de Virgo.
 - 1 permanent expert, d'autres utilisateurs.

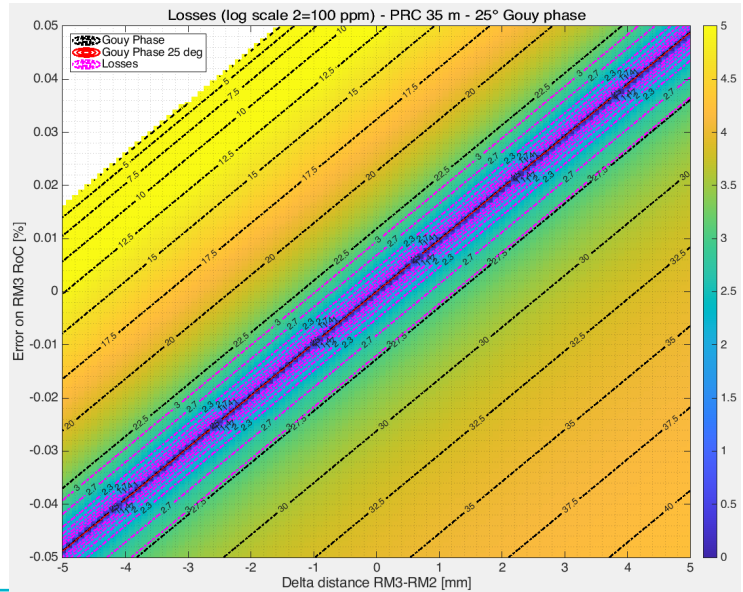
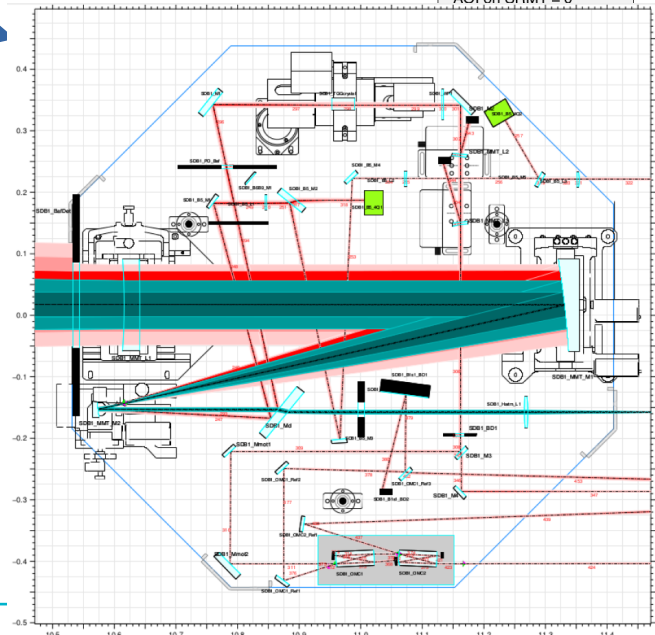



Cavity Parameters:

- SRM3 RoC = 20.2 m
- SRM2 RoC = -1.929 m
- SRM1 RoC = -5.209 m
- d3 = 18.2315 m
- d2 = 9.279 m
- d1 = 8.0619 m
- Total Length = 35.5724 m
- AOI on SRM3 = 1.08 °
- AOI on SRM2 = 3.74 °
- AOI on SRM1 = 0 °

Beam Parameters:

- Size on SRM3 $w_{x/y}$ = 49.29 / 49.28 mm
- Size on SRM2 $w_{x/y}$ = 4.317 / 4.333 mm
- Size on SRM1 $w_{x/y}$ = 1.546 / 1.555 mm
- Beam waist $w_{0,x/y}$ = 0.9181 / 0.9166 mm @ -3.373 / -3.398 m from SRM1 (outside cavity)
- Gouy Phase on SRM1 x/y = 25.1382 / 24.9042 °
- Losses = 0.00320259 ppm

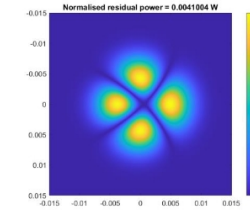


- Code FFT : **Oscar (& SIS)**.
 - Simulation avec défauts (planéité, thermiques, etc.)
 - ⇒ spécifications de la planéité des miroirs.
 - Utilisé pour le commissioning ou les futurs upgrades.
 - Différents utilisateurs, + ou – experts.
- **Finesse** (code en onde plane ou modal).
 - Une nouveauté au LAPP (1 permanent, 1 doctorant).
 - Simulation des signaux de contrôle pour Virgo. 
 - Étude des bruits dans Virgo.
- **+ des codes de simulations spécifiques en Matlab** (simulation OMC, calcul analytique des gains optique dans l'ITF Virgo, code de ray-tracing...)

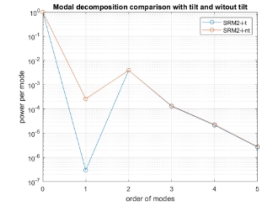
Simulation of the P/SRC telescope

- Simple reflection on SR3

Losses ~ 4000ppm

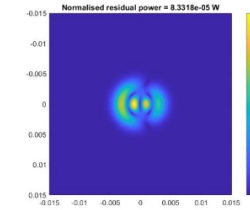


dominant HOM 02

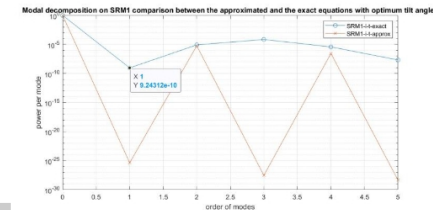


- Double reflection: SR3 and SR2

Losses ~ 83 ppm
Astigmatic compensation 2%



dominant HOM 03



OSCAR

Finesse 3

- **Optickle :**

- **Simulations en ondes planes avec effet de pression de radiation.**
- Utilisé pour le noise budget de Virgo.
- 1 permanent.

- **Autre code ad-hoc sur Matlab :**

- Calcul analytique des gains optique dans l'ITF.
- Code **Ray-Tracing 3D** développé sur Matlab (à l'état v0), pour calculer la séparation des faisceaux B1 et B5.
 - https://graphics.stanford.edu/courses/cs148-10-summer/docs/2006--degreve--reflection_refraction.pdf
 - General Ray Tracing Procedure, Spencer & Murty <https://doi.org/10.1364/JOSA.52.000672>
 - D'autres ressources glanés sur le web.
- Code **ABCD 4x4** (à l'état v0) pour l'analyse des effets de désalignements.
 - Basé sur *Matrix methods in treating decentred optical systems*, Wang Shaomin <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00619988>
- Code de simulation des performances filtrage de la cavité de sortie de Virgo (OMC).

2.3 Exact Ray Tracing of Skew Rays 73

Based on Equation 2.4, the primed direction cosines satisfy $a'^2 + b'^2 + c'^2 = 1$ (2.53)

2.3.3 Summary of equations and application

We have now finished the derivation of all the translation and refraction equations for exact ray tracing. One of the attractive features of these equations is that they work for all spherical surfaces: convex ($r > 0$), concave ($r < 0$), and plane ($r = \infty$ or ∞). The flow chart in Figure 2.19

```

cList = [c1, c2, ..., cN, cN+1]
nList = [n1, n2, ..., nN, nN+1]
rList = [r1, r2, ..., rN, rN+1]

Given x, y, z, and a, b, c, calculate  $\gamma = \sqrt{1 - a^2 - b^2}$ 
Print x, y, z
Print  $\alpha, \beta, \gamma$  and A, B, C
i = 1
 $\epsilon = k\gamma - (x\alpha + y\beta + z\gamma)$  (2.22)
 $M_i = z + \epsilon r_i$  (2.24)
 $M_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 - r_i^2 + \epsilon^2 - 2\epsilon z$  (2.29)
 $\cos \theta = \sqrt{1 - M_i^2 / (r_i^2 - 2M_i)}$  (2.35)
 $T = \epsilon + \frac{c_i M_i^2 - 2M_i}{\gamma + \cos \theta}$  (2.37)
 $x_1 = x + T\alpha$  (2.20a)
 $y_1 = y + T\beta$  (2.20b)
 $z_1 = z + T\gamma - \epsilon$  (2.20c)
Print  $x_1, y_1, z_1$ 
Is i = m + 1? Yes → Stop
No
 $\mu = n_i / n_{i+1}$  (2.45)
 $\cos \theta' = \mu \sqrt{1 - \mu^2 (1 - \cos^2 \theta)}$  (2.47)
 $g = \cos \theta' - \mu \cos \theta$  (2.46)
 $a' = \mu a - c_i g$  (2.52a)
 $b' = \mu b - c_i g$  (2.52b)
 $c' = \mu c + g$  (2.52c)
Print  $\alpha', \beta', \gamma'$  and A', B', C'
 $x = x_1, y = y_1, z = z_1$  (Change  $P_i$  to  $P'$ )
 $\alpha = \alpha', \beta = \beta', \gamma = \gamma'$  (Change primed to unprimed)
i = i + 1
    
```

Figure 2.19 Basic flow chart for tracing skew rays.

Figure 2.20 A generalized optical system to help understand the notation used in the flow chart for tracing skew rays.

Figure 2.21 Exact ray tracing of a skew ray.

Figure 2.22 In Figure 2.21 we show a biconvex lens, and in Figure 2.22 we give the numerical values for this system. We now want

r (mm)	n	r (mm)
$x = 2.00$	1.000	10.00
$y = 1.00$	20.00	
$z = 2.00$	1.500	5.00
$\alpha = 0.200$	1.000	12.00
$\beta = 0.200$	∞	

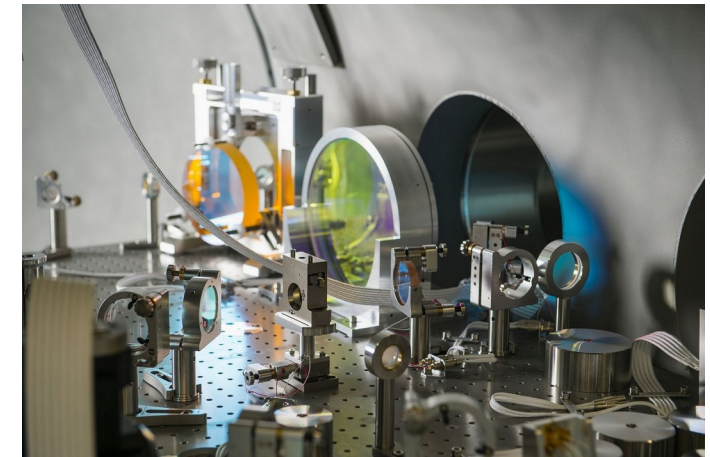
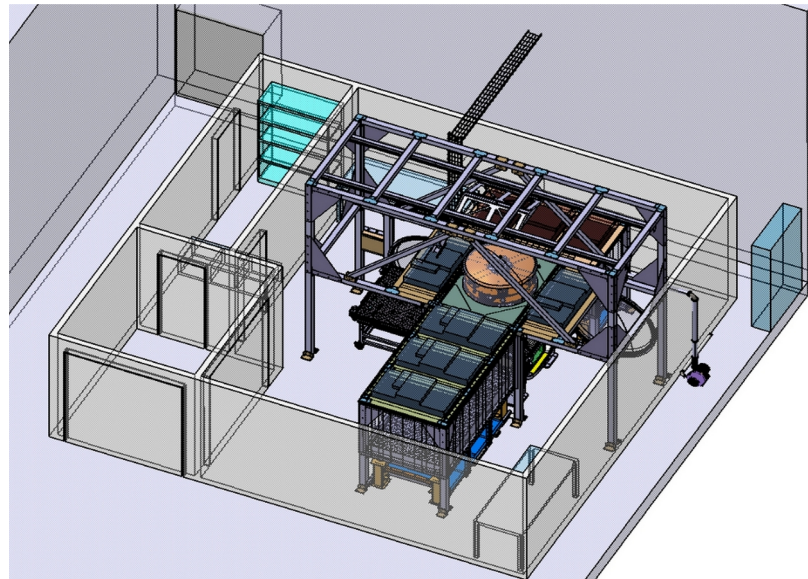
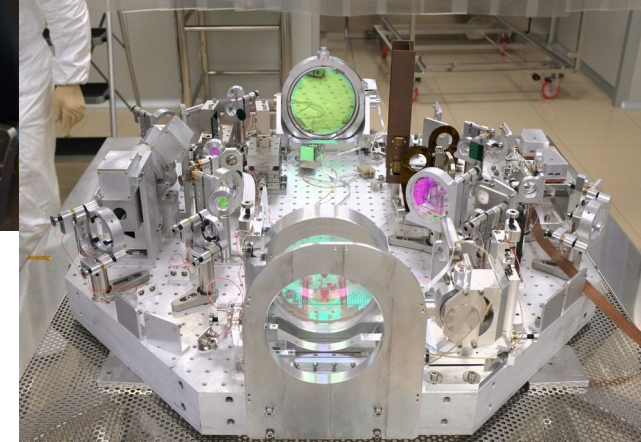
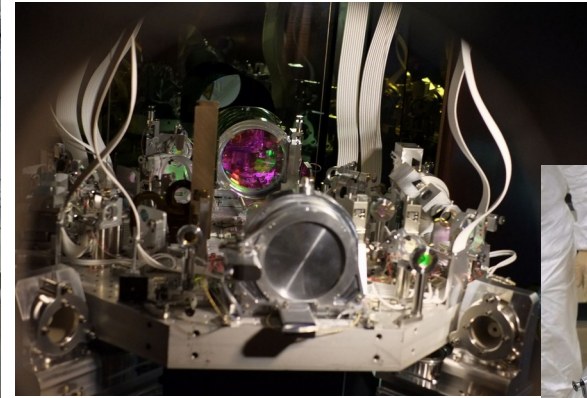
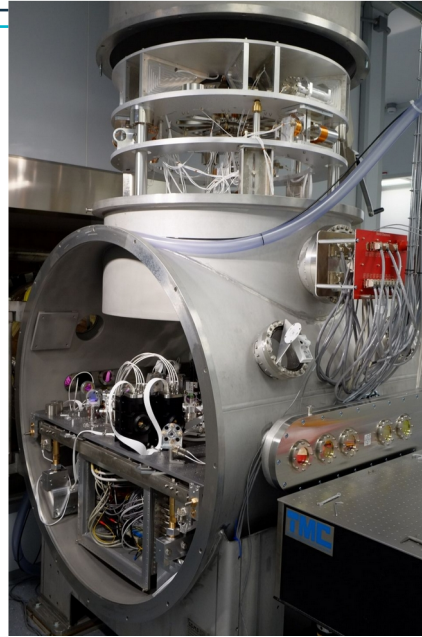
Matrix methods in treating decentred optical systems

TABLE (contd.)

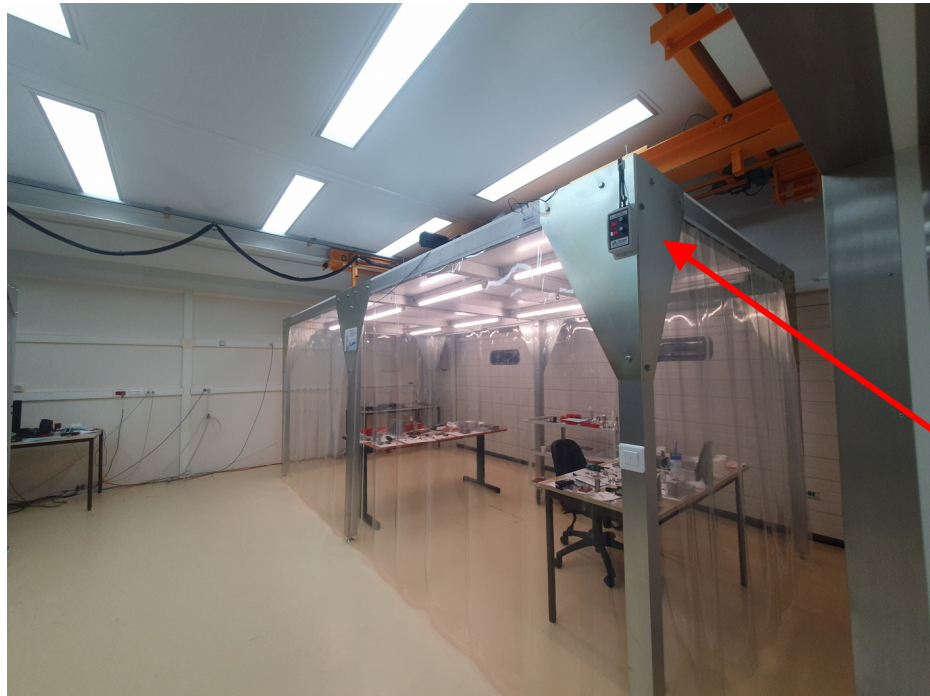
Number	Description	Misaligned diagram	Augmented 4 x 4 ray transfer matrix	Corresponding flow graph
5	Misaligned thin lens†		$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & a_1 \epsilon & \beta_1 \epsilon \\ \epsilon_1 & d_1 & \gamma_1 \epsilon & b_1 \epsilon \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
6	Misaligned thin lens		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1/f & 1 & \epsilon/f & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
7	Misaligned wedge		$\begin{bmatrix} 1 & l/n & 0 & (1-l/n)\epsilon \\ 0 & 1 & 0 & (1-\theta)(\epsilon-l) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
8	Misaligned lens-like medium†		$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & a_1 \epsilon & \beta_1 \epsilon \\ \epsilon_1 & d_1 & \gamma_1 \epsilon & b_1 \epsilon \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
9	Misaligned spherical mirror		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2/R & 1 & -2\epsilon/R & -2\epsilon \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
10	Misaligned flat mirror		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2\epsilon \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
11	Misaligned corner-cube reflector		$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 2\epsilon & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	
12	Misaligned PCM formed by DFWM		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	

† $c_1 = -(1 - n_1/n_2)/R$
 $\epsilon_1 = 1 - (1 - l/n)R$, $b_1 = l/n$, $c_1 = -\left[\frac{1}{R} - \frac{1}{R} + \frac{1}{R}\right] - (1 - l/n)R$, $d_1 = 1 - (1 - l/n)R$
 $l > 0$: $a_1 = \cos[(2\beta_1)^{1/2}]$, $b_1 = \frac{1}{2\beta_1} \sinh[(2\beta_1)^{1/2}]$, $c_1 = -2\beta_1 d_1$, $d_1 = a_1$
 $\beta_1 < 0$: $a_1 = \cosh[(-2\beta_1)^{1/2}]$, $b_1 = \frac{1}{(-2\beta_1)^{1/2}} \sinh[(-2\beta_1)^{1/2}]$, $c_1 = -2\beta_1 d_1$, $d_1 = a_1$

- **Sur le site Virgo :**
 - Banc optique suspendu sous vide et « Photon Calibrator (PCal)».
- **Au LAPP :**
 - Une salle « blanche » ~ ISO 7/8 avec 2 bancs optiques :
 - « Calibration » : test et mesure du Pcal
 - « Détection » : caractérisation OMC, backscatter-meter.
 - Zone d'assemblage des bancs optique Virgo.
- **Un projet de plateforme R&D** pour accueillir un banc suspendu sous vide et 1 ou 2 banc optique.
 - ANR MICRONG : mesure de bruit thermique des coatings.



- Une salle « blanche » ~ ISO 7/8 avec 2 bancs optiques :
 - « Calibration » : test et mesure du Pcal
 - « Détection » : caractérisation OMC, backscatter-meter.
 - Zone d'assemblage des bancs optique Virgo.



Plafonds soufflant (ISO 5/6 dessous)

- **Cavité de filtrage de sortie « OMC » :**

- Une cavité installé sur le site Virgo.
- **Cavité monolithique.**
- **Caractérisation au LAPP :**
 - 20 ans d'expériences.
 - Mesure de pertes.
 - 1 permanent expert + non-permanents.
- **Limite atteinte :**
 - 2 % de pertes internes ($\sim 1\%$ lié au « Rayleigh scattering » dans le substrat.
 - Bruit de longueur de la cavité limité par le bruit thermo-refractif.
 - Biréfringence.

- **Nouvelle techno à développer :**

- Cavité ouverte.
- 1 stagiaire (2 x 6 mois)

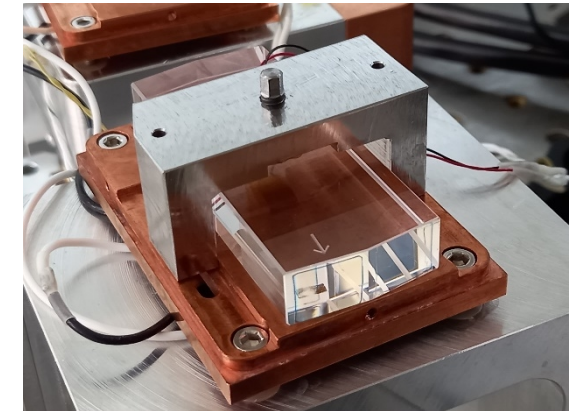
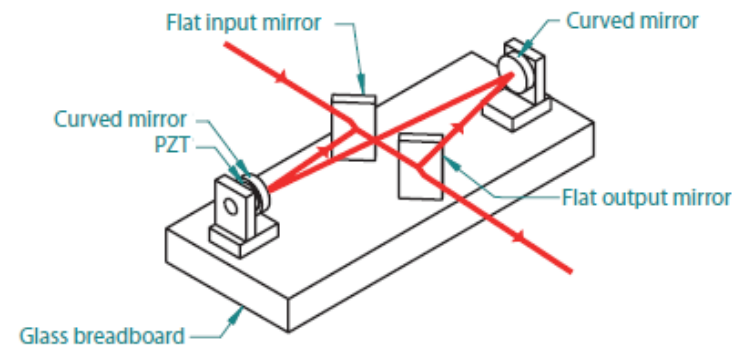
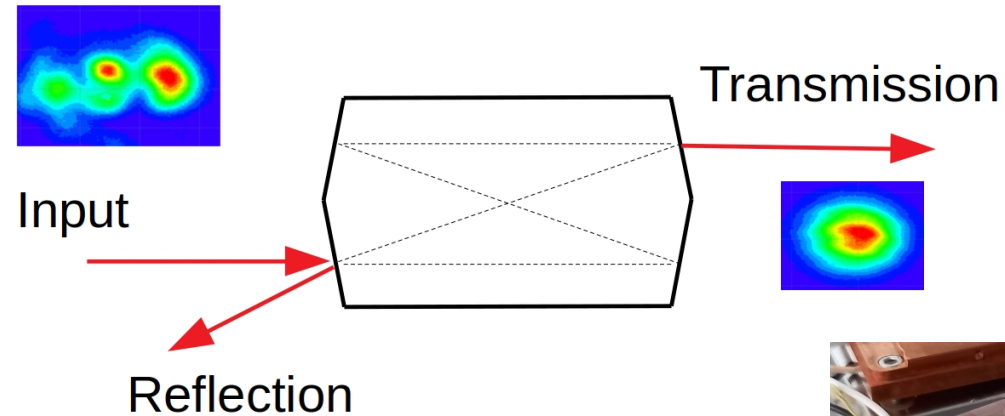


Figure 2. CAD view of the GEO 600 OMC. All parts are made of fused silica except for the PZT. The glass breadboard is 400 mm \times 160 mm and 38 mm thick.

M. Prijatelj et al., 2012 Class. Quantum Grav. 29 055009

• Backscatter meter :

M. Was, E. Polini, *Opt. Lett.* 47(9), 2334-2337 (2022)

- Mesure précise de la lumière rétro-diffusée.
- Prototype installé sur un des bancs du LAPP.
 - Sensibilité de $f_{sc} \sim 10^{-14}$ de lumière rétro-diffusé obtenue sur un banc non isolé sismiquement.
 - Futur : installé le dispositif sur le banc suspendu de la future plateforme R&D.
 - 1 permanent, plusieurs non-permanents.

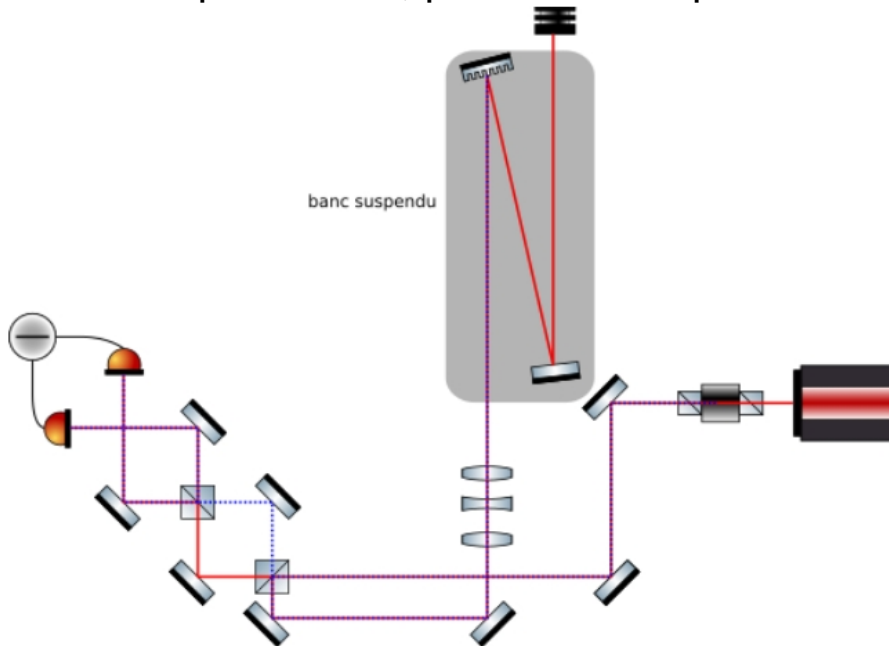
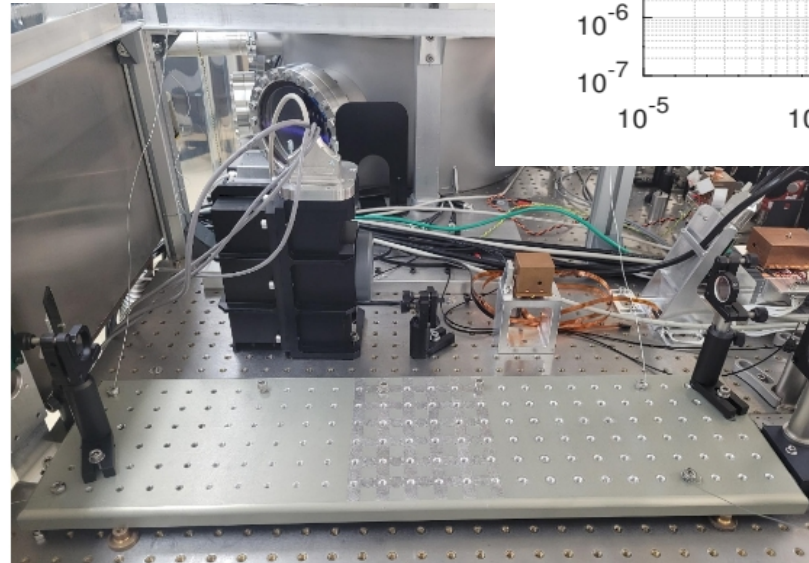
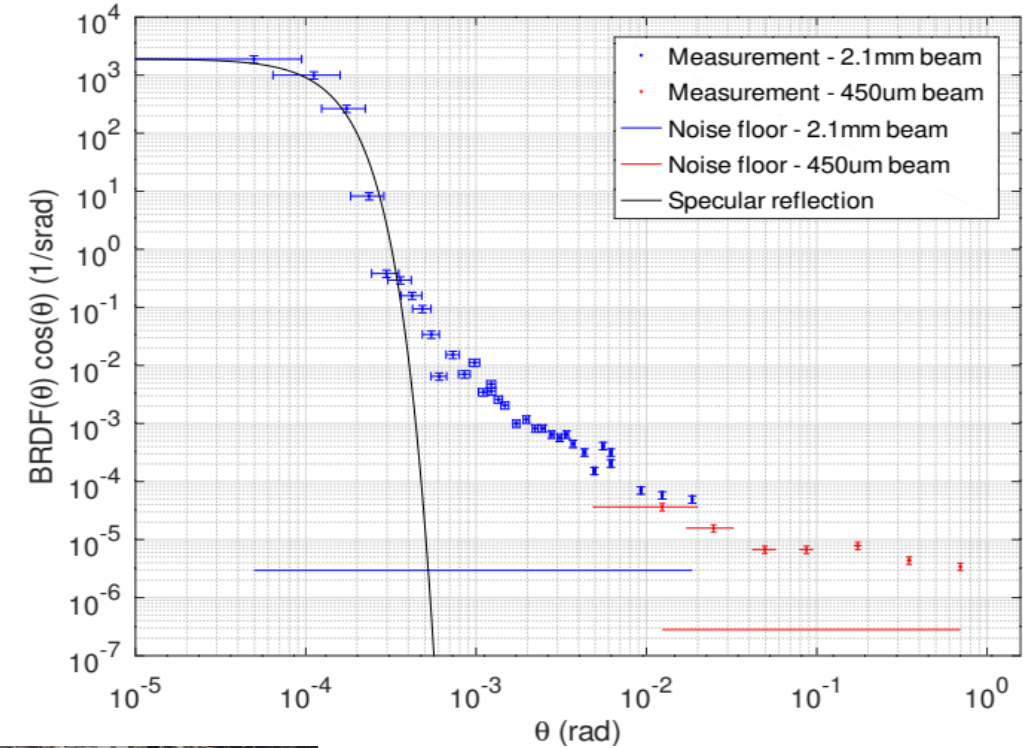
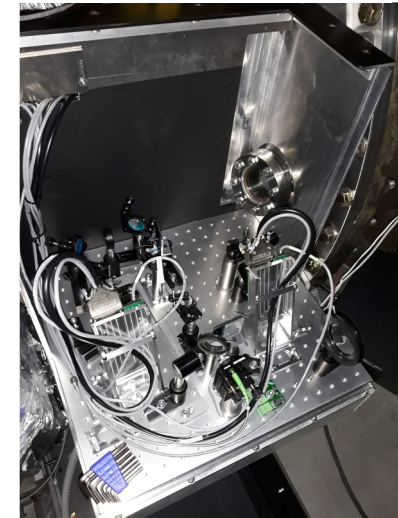
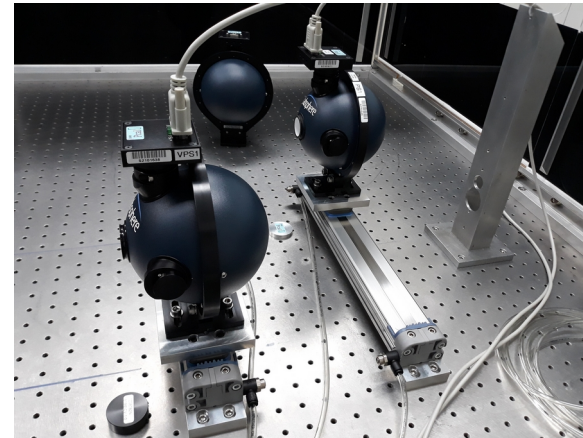
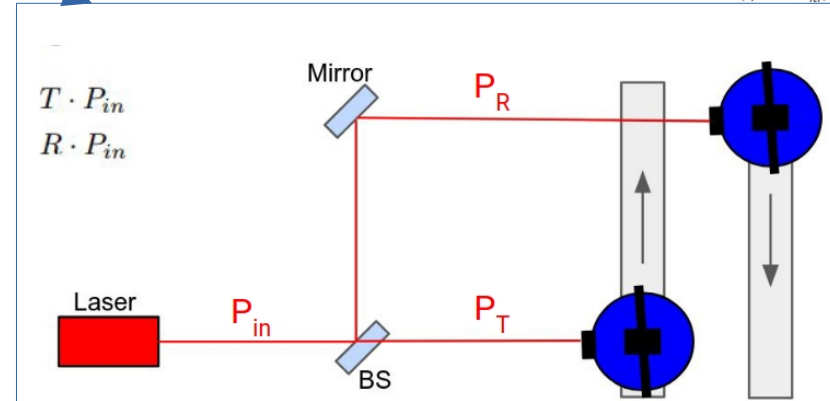
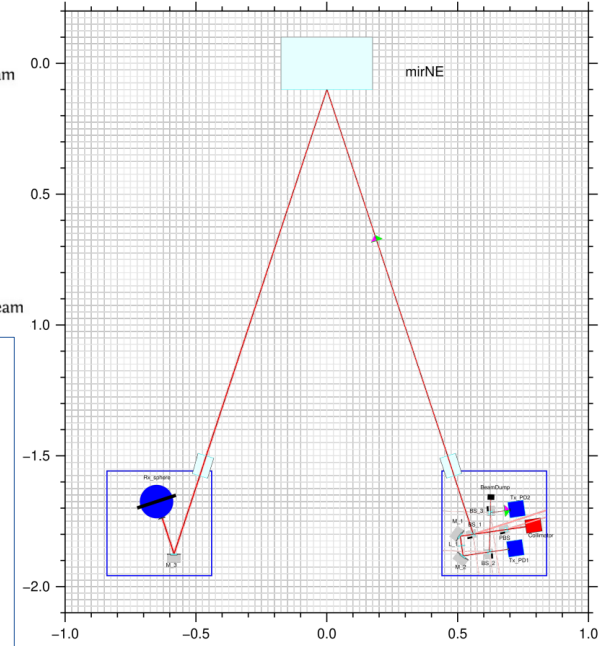
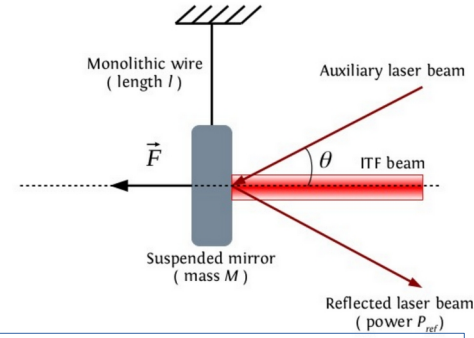


FIGURE 3.2 – Nouveau schéma du diffusiomètre



- **Photon Calibrator :**

- Installé sur le site Virgo :
- Caractérisation au LAPP :
- 1 permanent expert, 1 doctorant.



*Étalonnage ABSOLU de la puissance du faisceau laser
-> collaboration avec NIST et PTB (et LIGO, Kagra)

* Étalonnage en DC, mais utilisation entre 10 Hz et quelques kHz
-> réponse fréquentielle des capteurs à caractériser (pas évident à mesurer pour $f < \sim 10$ Hz)

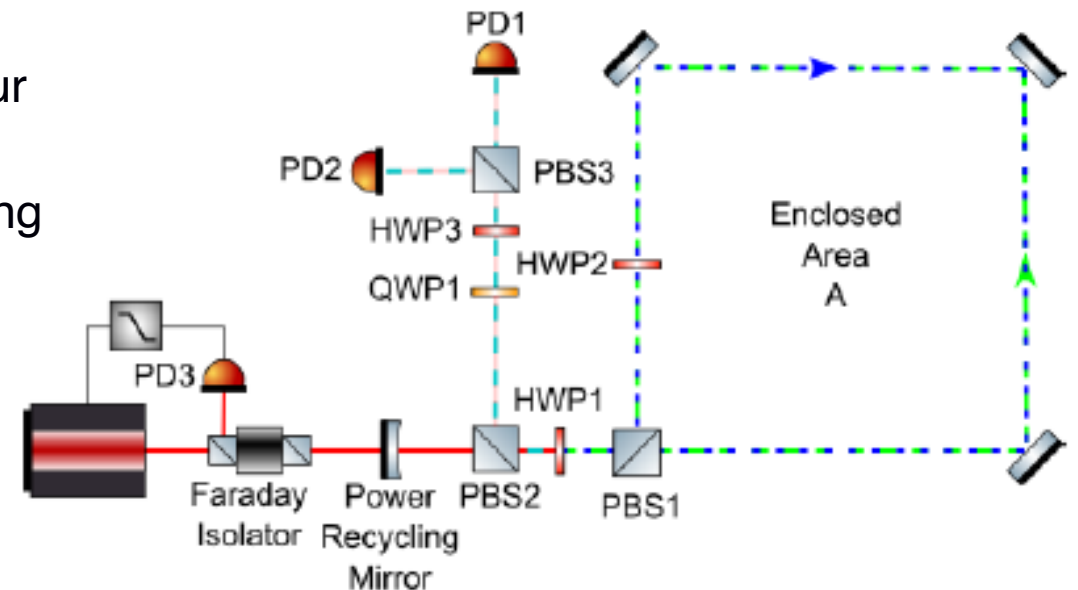
* Étalonnage en DC à 0.3 W (contrainte de NIST pour le moment), mais utilisation autour de 1.3 W + modulation de la puissance autour

-> linéarité des capteurs à caractériser : setup à mettre en place par Cervane (doctorante) au LAPP, basé sur deux lasers dont on additionne les puissances.

* Caractérisation des pertes optiques (hublots en particulier) et monitoring de la stabilité du système optique sur le long terme (vs alignement, humidité, ...)

--> incertitudes sur le déplacement du miroir induit par le PCal estimées à 0.4% pour O4

- Projet ANR « **MICRONG** » (Collaboration LAPP, LMA, CEA-LETI, III-V Lab, RIBER)
 - Objectif : développement des coatings AlGaAs de très hautes qualité optique sur des miroirs de 200 mm de diamètre.
 - Plateforme R&D et banc suspendu pour la mesure du bruit thermique des coatings.
- Projet **Sagnac** :
 - Explorer l'utilisation d'interféromètre de Sagnac pour la mesure du mouvement angulaire des bancs suspendus.
 - Utilisation comme capteurs in-situ ou comme référence pour la caractérisation d'autres capteurs.
 - Amélioration du contrôle angulaire des bancs (cross coupling angulaire/translation).
 - ==> réduire le couplage de la lumière diffusée.



- **Simulations :**

- Peu de temps pour développer les outils de simulations.
- Certaines expertises entre les mains de non-permanent.
- Virgo pourrait bénéficier d'un outil de simulation « temps-réels » comme le faisait SIESTA.
 - Personne de dispo pour ça.
- Connaissance limité de quelles logicielles sont disponibles par les moyens mutualisés (CNRS, IN2P3, Université...).

- **Expérimentales :**

- Un certain nombre des futurs R&D basé sur la création d'une plateforme R&D que l'on peine à financer.
- Temps limité pour les permanents de s'impliquer dans la R&D, activité Virgo prioritaire.
 - Risque de discontinuité dans les activités R&D.