



Systèmes optiques intégrés dans Advanced Virgo et adaptation au vide poussé

R. Gouaty







Réseau Optique Photonique, Journée « Optique en milieux extrêmes », Ecole Polytechnique 13/12/2017

Les ondes gravitationnelles

- Générées par des masses en accélération
- > Fluctuations de la courbure de l'espace-temps se propageant dans l'espace
- L'espace se déforme: les distances séparant des masses libres changent
- Effet opposé sur deux axes orthogonaux
- Relation entre l'amplitude de l'onde et la variation de longueur:

 $h = 2 \frac{\delta L}{L}$

Des interféromètres pour les détecter:

X

- Mesurer une variation de distance entre des masses tests
- Intensité lumineuse des faisceaux interférant dépend de la différence de chemin parcouru dans les deux « bras »
- Miroirs suspendus = masses en chute libre

L'interféromètre doit être grand : ΔL proportionnel à L

➔ bras de plusieurs km !

Y4



Un réseau mondial d'interféromètres



Les premières détections



Amplitude détectée:

Pour GW170814: h = 5 x $10^{-22} \rightarrow \delta L$ (Virgo) = ± 0.8 x 10^{-18} m

≡ Observer une variation de la distance entre la Terre et le Soleil correspondant à la taille d'un atome

→ un défi expérimental

Les sources de bruit de fond



L'interféromètre Advanced Virgo



Miroirs

- Grands miroirs
- Miroirs quasi-parfaits
 - > Défaut de planéité < 0.5 nm RMS (sur 150 mm de diamètre)
 - Substrats de très faible absorption (0.2 ppm/cm)
 - Traitements de surface réalisés par le Laboratoire des Matériaux Avancés à Lyon
- Manipulés en salles blanches





-2.42





Sous ultra vide

Motivations:

- Se protéger du bruit acoustique
- Éviter le bruit de mesure qui proviendrait des fluctuations d'indice de réfraction de l'air
- Conserver la propreté des miroirs

Le vide d'Advanced Virgo en quelques chiffres:

- Dure enceinte à vide d'un volume de 7000 m³
- Des niveaux de vide différents:
 - > Jusqu'à 10⁻⁹ mbar dans les bras de 3 km
 - $\succ~10^{-6}$ à 10^{-7} mbar dans les tours abritant les miroirs et leurs suspensions
- Séparation entre bras et tours assurée par des pièges cryogéniques





Le système de détection

FIB

But: extraire les faisceaux de l'interféromètre B6PR, B6pPR, B9PR, B9pPR

- Canal pour la détection des ondes gravitationnelles
- Canaux de contrôle

En quoi cela consiste:

- Six bancs optiques suspendus et placés sous vide
 - Isolation sismigue et acoustigue \geq
 - Evolution de Virgo à Advanced Virgo: 5 nouveaux bancs \geq
- Télescopes pour réduire la taille des faisceaux
- Cavités de filtrage: « mode cleaner » de sortie
- Photodiodes, cameras
- Electronique embarquée









Bancs optiques suspendus et sous vide

- Objectifs:
 - → Minimiser l'impact de la lumière diffusée
 - \rightarrow Assurer la stabilité de la position du faisceau par rapport aux optiques & photodiodes
- Parmi les défis : fortes contraintes spatiales
 - \rightarrow Enceintes à vide compactes: « minitours »
 - ightarrow Système d'isolation sismique compact
 - → Electronique embarquée pour ne pas détériorer l'isolation sismique avec le cablage
 - → Signaux numérisés transmis à la DAQ par liens optiques
- Enceintes à vide:
 - \rightarrow conçues pour un vide jusqu'à 10⁻⁵ 10⁻⁶ mbar
 - \rightarrow séparées du vide principal par des hublots





Problématiques liées au vide

- Impact sur le choix des matériaux, des composants
- Contraintes pour l'électronique embarquée

 nécessité d'un containeur étanche intégré au banc
- Dissipation de l'énergie thermique
 - jusqu'à 200W de chaleur dissipée par l'électronique
 - la température de la surface du banc doit restée ≤ 40°c
- Contraintes sur la propreté





- Accessibilité des bancs optiques pour les réglages (commissioning)
 - séparation du vide principal facilite l'accès

→ interventions ponctuelles pour remplacement des composants défectueux avant le run O2: « shut down » \leq 2-3h

• Contrôles à distance nécessaires

ightarrow requiert des actionneurs compatibles vide

Exemples de composants sur les bancs

- Montures optiques compatibles vide: acier inox et aluminium
- Actionneurs pour l'alignement fin des optiques
 - picomoteurs compatibles vide
 - miroirs actionnés par couples aimant-bobine (galvanomètre)
 - ightarrow pilotage de ces actionneurs à partir de l'électronique placée dans containeur
- Photodiodes et caméras placées dans de petits caissons étanches
 - → inclue un PCB avec premier étage de préamplification
 - ightarrow monitoring de la température et pression
 - \rightarrow obturateur automatisé pour protéger les photodiodes des excès de lumière

→ bloqueurs de faisceaux intégrés (verre noir ou acier poli traité AR) pour le contrôle des réflexions parasites











Electronique des photodiodes



Extraire la chaleur des composants électroniques

Radiateur



Extraction de la chaleur dissipée par les composants électroniques par conduction thermique → chaleur propagée dans le corps du banc

Problème: comment dissiper la chaleur emmagasinée par le banc ?



Préparation de joints thermiques

Dissipation de l'énergie thermique

Problématique:

- jusqu'à 200W de chaleur dissipée par l'électronique contenue dans le banc
- la surface du banc doit restée ≤ 40°c (température max de fonctionnement des picomoteurs)
- dissipation par rayon nement thermique uniquement: émissivité de l'aluminium $\leq 10\%$

 \rightarrow insuffisant d'après modélisation thermique

Solutions mises en œuvre:

- Anodisation du banc en aluminium:

→ émissivité augmentée (proche de 100%)

- \rightarrow fine couche d'anodisation (~10 µm): compatible avec le niveau de vide recherché
- Sablage de l'enceinte à vide en acier inox:
 → émissivité augmentée d'un facteur 2 (~45-50%)

Modélisation thermique validée avec un prototype de banc







Transitoire thermique observé avec un banc d'Advanced Virgo

- Puissance dissipée par l'électronique ≈ 120 W
- Variation de température mesurée dans le containeur électronique ≈ 4°c
 - En accord avec la modélisation thermique
 - Température de surface du banc ≤ 40°c même avec deux fois plus de dissipation
 → Objectif atteint





Préservation de la propreté

- Nécessaire pour le vide mais également pour les optiques (lumière diffusée + risque de dommages par exposition au laser)
- Assemblage des bancs optiques en salle blanche:
 → local en surpression d'air filtré + plafonds soufflants
 → taux de particules de taille ≥ 1µm : 0







© Cyril Frésillon / Lapp / CNRS Photothèque



Résumé et conclusion

❑ Le vide est essentiel pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles:
 → Isolation du faisceau laser, des miroirs, et des bancs optiques

L'extraction et la lecture des faisceaux de l'interféromètre est réalisée à partir de bancs optiques suspendus et sous vide, intégrant de l'électronique

□ La problématique du vide a fortement contraint le design de ces bancs optiques:

- Optimisation du rayonnement thermique
- Electronique placée dans des caissons étanches
- Un grand nombre d'actionneurs pour permettre des ajustements à distance
- Ces bancs optiques sont opérationnels et ont rempli leur fonction avec succès pendant la prise de données O2