

DIPLÔME NATIONAL DE DOCTORAT

(Arrêté du 25 mai 2016)

Date de la soutenance : **07 juin 2024**

Nom de famille et prénom de l'auteur : **Monsieur AVENTIN Téo**

Titre de la thèse : « *Développement de substrats en saphir à très faible absorption optique pour les miroirs des détecteurs d'ondes gravitationnelles cryogéniques* »



Résumé

La détection directe de plus de 90 ondes gravitationnelles sur terre ont ouvert une nouvelle fenêtre à travers laquelle l'univers peut être observé. Des efforts continus ces dernières décennies ont été dédiés à l'amélioration de la sensibilité de ces détecteurs.

Une des voies d'amélioration pour une meilleure sensibilité des futurs instruments est de refroidir les miroirs des cavités de Fabry-Perot des détecteurs à des températures cryogéniques pour réduire le bruit thermique. Cette opération nécessite cependant de nouveaux substrats et deux candidats se démarquent : le saphir et le silicium.

Le saphir est déjà utilisé aujourd'hui dans le détecteur à ondes gravitationnelles cryogénique japonais KAGRA. Bien que prometteur sur papier, certains problèmes quant à son utilisation en tant que substrat subsistent encore, notamment concernant son absorption optique à 1064 nm. Une absorption optique trop forte mène à une réduction de la puissance du laser pour éviter d'introduire plus de chaleur dans le miroir que ce qui peut être extrait. Cependant, une puissance de laser plus faible augmente le bruit quantique, ce qui réduit la sensibilité totale du détecteur. Une biréfringence inattendue malgré l'utilisation de saphirs orientés selon l'axe c a aussi été mesurée. Le but de cette thèse est de démontrer la faisabilité de produire des saphirs avec une absorption de moins de 50ppm/cm de manière contrôlée et répétée et d'investiguer l'origine de cette absorption.

Pendant cette thèse, les propriétés mécaniques, optiques et thermodynamiques à température cryogéniques du silicium et du saphir ont été extensivement comparées. L'impact de ces propriétés sur le bruit thermique du design du futur Einstein Telescope a été modélisé.

Un total de 16 saphirs de 32mm de diamètre et 100mm de long ont été tirés par la technique Czochralski, dont 4 selon l'axe a et les 12 autres selon l'axe c. Les paramètres de tirages ont été variés pour tester leurs influences sur l'absorption. Des méthodes visuelles ont confirmé l'absence de défauts macroscopiques. La nature monocristalline des saphirs ainsi que leur orientation cristalline ont été confirmés par polariseurs croisés. La spectroscopie Raman a montré des faibles variations du stress interne de moins de 0.1 GPa.

Les cartographies 2D du coefficient d'absorption à 1064 nm ont été effectuées par spectroscopie de photo-défection. Des absorptions de moins de 50 ppm/cm ont été obtenues sur tous les cristaux sauf un, avec 9 cristaux sous les 25 ppm/cm et le meilleur cristal à 10ppm/cm. Ces résultats confirment ainsi à la fois la faisabilité de produire de tels saphirs d'une façon contrôlée et la haute qualité de la matière première d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). La corrélation avec les paramètres de croissance montrent qu'une faible vitesse de tirage est bénéfique pour réduire l'absorption.

Les résultats de spectroscopie de transmission et de réflexion dans le visible, couplés à des analyses chimiques par GDMS suggèrent que des paires d'ions Ti^{3+} sont la source majeure d'absorption dans les saphirs, avec une contribution possible de paires d'ions Fe^{2+} - Fe^{3+} .

Un autre banc PDS permettant la cartographie 3D du coefficient d'absorption à 1550 nm des cristaux a été construit pendant la thèse. Les premiers résultats suggèrent une absorption du même ordre de grandeur mais un peu plus basse à cette longueur d'onde qu'à 1064 nm.

Une biréfringence surprenamment élevée de $\Delta n \approx 10^{-5}$ a été mesurée, et, contrairement à ce qui a été publié, pas de corrélation avec l'absorption à 1064 nm n'a pu être établie.