MIGA, infrastructure souterraine basée sur les technologies quantiques

Benjamin CANUEL[1,*], Arnaud LANDRAGIN[2],

[1] LP2N, Laboratoire Photonique, Numérique et Nanosciences, Université de Bordeaux - IOGS - CNRS:UMR 5298, Talence, France

[2] LTE, Observatoire de Paris - Université PSL, Sorbonne Université, Université de Lille, LNE, CNRS Paris, France

*** benjamin.canuel@institutoptique.fr**

https://doi.org/10.1051/photon/202513523

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.

Nous présentons ci-après le projet MIGA, antenne gravitationnelle souterraine basée sur l'interféromètre atomique en cours de construction au laboratoire Souterrain Bas Bruit (LSBB, UAR CNRS-Université d'Avignon). Cette expérience consiste en un réseau d'interféromètres à ondes de matière d'une longueur de base de 150 m permettant de mesurer simultanément des effets d'élongation et les effets inertiels agissant à l'intérieur d'une cavité optique.

Toute première infrastructure de ce type au monde basée sur les technologies quantiques, MIGA ouvre des perspectives nouvelles pour la détection des ondes gravitationnelles à basse fréquence mais également pour les géosciences à travers la mesure de long terme des fluctuations spatio-temporelles du champ de gravité terrestre.

Après une première démonstration il y a une trentaine d'années, l'interférométrie atomique a rapidement révélé son potentiel pour la mesure précise des forces inertielles. Le développement ultérieur des techniques de refroidissement d'atomes a conduit à la réalisation d'un grand nombre de capteurs, stables et précis permettant des mesures aussi bien d'accélérations que de rotations et rivalisant en termes de sensibilité et d'exactitude par rapport à leurs contreparties classiques [1]. Ces constantes améliorations en termes de performances ont également permis à l'interférométrie atomique d'accéder à un large éventail d'applications en physique fondamentale : on peut citer par exemple la réalisation de différents tests de relativité générale comme le test du principe d'équivalence ou de l'invariance de Lorentz, mais également la mesure de différentes constantes fondamentales. La maturité technologique de ces méthodes ont permis également diverses applications pratiques dans le domaine des géosciences, notamment en gravimétrie ou en géodésie. Le développement de nouvelles architectures basées sur des réseaux de senseurs ouvre également la voie vers de nouvelles méthodes d'imagerie du sous-sol avec un vaste champ d'applications industrielles possibles. Ces diverses applications pratiques sont portées par le transfert technologique de ces techniques vers l'industrie et le développement de dispositifs compacts, robustes et transportables et dont les applications phares sont la gravimétrie et la navigation inertielle.

Depuis une quinzaine d'années, les progrès de l'interférométrie atomique s'entrecoupent également avec les développements spectaculaires du domaine de l'astronomie gravitationnelle. La première détection directe des ondes gravitationnelles (OG) par les deux interféromètres optiques d'Advanced LIGO en ●●●

septembre 2015 [2] a marqué une rupture pour la physique et l'astronomie en ouvrant la voie vers l'observation de l'univers au-delà du domaine électromagnétique. Depuis lors, l'opération conjointe des détecteurs LIGO et VIRGO a permis la détection des signaux gravitationnels de centaines de sources constituées de systèmes binaires de trous noir, d'étoiles à Neutrons et de leurs combinaisons. L'astronomie gravitationnelle promet de nouveaux champs d'études pour l'exploration de la gravité dans ses régimes les plus extrêmes, l'astrophysique, mais également la cosmologie. Afin d'exploiter pleinement le potentiel de l'astronomie gravitationnelle, il est nécessaire de concevoir de nouveaux détecteurs permettant d'accéder à l'ensemble du spectre en fréquence des ondes gravitationnelles, allant du mHz jusqu'au kHz. Les technologies actuelles, basées sur des interféromètres optiques de type Michelson utilisant des bras en cavité de longueurs kilométriques comme les détecteurs de seconde génération Advanced LIGO et Advanced VIRGO, possèdent une bande de détection limitée aux hautes fréquences (10 Hz- 10 kHz). Les futurs projets de détecteurs terrestre comme l'Einstein Telescope ou le Cosmic Explorer, ou spatiaux comme l'antenne spatiale LISA permettront d'élargir la gamme de fréquences accessibles, mais sans couvrir la gamme des infrasons (0.1 Hz-10 Hz).

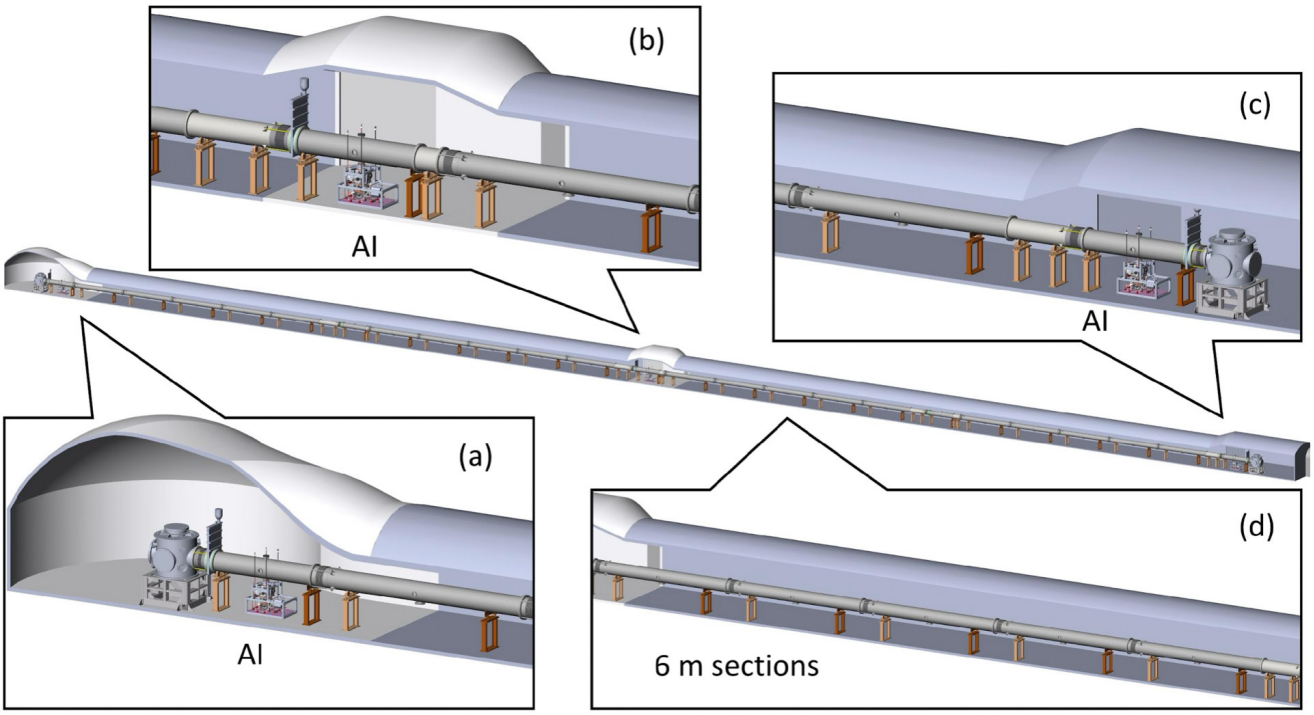
La réalisation d'une nouvelle classe de détecteur dans le domaine infrasonore est donc primordiale afin d'ouvrir l'ère de l'astronomie gravitationnelle multibande. Le projet MIGA, a pour but l'étude de ce nouveau type d'expérience en se basant sur la stabilité intrinsèque des niveaux d'énergie utilisés dans les interféromètres à ondes de matière.

MIGA, un instrument combinant interférométrie atomique et optique

L'antenne gravitationnelle MIGA [3], financée dans le cadre des actions Equipex, est ainsi constituée d'un réseau de trois interféromètres atomiques « interrogés » par le champ résonant d'une cavité optique de 150 m de long. Cette géométrie permet de mesurer simultanément les effets de strain et les effets inertiels agissant à l'intérieur d'une cavité optique. L'instrument est optimisé pour atteindre un pic de sensibilité dans le domaine des infrasons, à la fréquence d'environ 2 Hz. Cette infrastructure est en cours d'achèvement au Laboratoire Souterrain Bas Bruit dans des galeries souterraines dédiées, situées à une profondeur de 300 m à l'intérieur d'un massif rocheux de type karstique. Ce site présente un niveau de bruit de fond sismique et électromagnétique exceptionnel et est situé loin de toute source de bruit anthropogénique importante.

Le dessin technique du dispositif est visible en Fig 1. L'antenne consiste en une enceinte à vide de 150 m de

Figure 1. Schéma de l'antenne MIGA dans une galerie souterraine du LSBB. Les trois interféromètres à atomes froids (AI) sont situés en (a), (b) and (c). L'ensemble du système laser d'injection est situé dans la cavité (a). Extrait de B. Canuel et al. Proceedings of the 56th Rencontres de Moriond, La Thuile, Italie (2022)



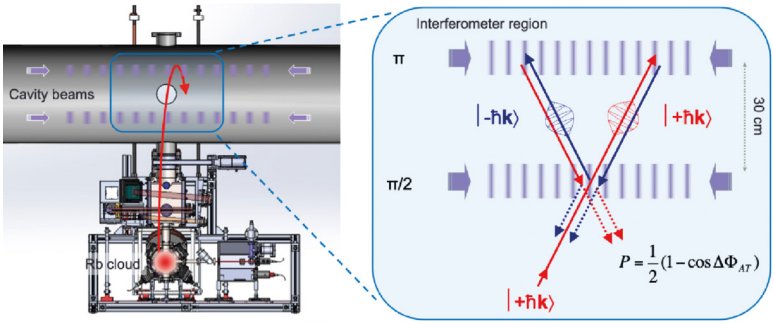
longueur permettant la propagation sous vide de deux champs résonants horizontaux interrogeant simultanément trois interféromètres atomiques placés régulièrement le long du dispositif. Le système à vide est majoritairement composé de sections de 6 m de long et d'un diamètre de 50 cm interconnectées par des joints métalliques ultra vides ((d) Fig. 1)). Deux tours à vide placées aux extrémités du système permettent d'accommoder les optiques des cavités ainsi qu'une partie du système optique d'injection et de contrôle des résonateurs (cylindres verticaux sur les détails (a) et (c) Fig. 1). Chaque interféromètre atomique est basé sur l'utilisation d'une source de Rb [5] refroidie au niveau du µK qui est interrogée et manipulée par un processus de diffraction de Bragg sur les champs en cavité circulant dans l'enceinte à vide de l'antenne.

Dans la géométrie de MIGA, une mesure différentielle entre deux interféromètres atomiques corrélés par la cavité permet d'extraire le déphasage induit par les ondes gravitationnelles sur le champ résonant. En comparaison avec la technologie actuelle de détecteurs basés sur des interféromètres optiques, ce sont ici les sources d'atomes froids qui constituent les « masses de test » dont on mesure la distance relative et non plus les miroirs de la cavité. Il en résulte un avantage potentiel pour la détection des OGs dans le domaine des infrasons : l'utilisation de masses de test en chute libre pendant la séquence de mesure offre une immunité très forte aux vibrations du sol. De plus, en utilisant une série d'interféromètres répartis le long de la cavité optique, il devient possible d'utiliser non seulement deux masses de test, mais un réseau de masses de test afin d'extraire le signal d'OG. Il a été démontré [4] que cette particularité peut permettre de réduire l'influence des fluctuations du champ de gravité Terrestre, appelé « bruit Newtonien » sur la mesure, ce qui constitue un autre avantage pouvant être décisif pour la détection d'OG dans le domaine des infrasons.

L'antenne gravitationnelle MIGA ouvre également de nouvelles possibilités pour les Géosciences. L'utilisation de réseaux de capteurs quantiques corrélés permettant d'envisager la détection de défauts gravitationnels dans le sous-sol avec une précision inégalée. La sensibilité initiale de MIGA, permettra ainsi de résoudre le signal gravitationnel d'une masse d'une Tonne à une distance de 100 m. De plus, en utilisant des mesures différentielles combinant les signaux de différentes masses de test d'un même réseau, il devient possible de mesurer non seulement le gradient mais également des moments d'ordres supérieurs de la gravité afin de reconstruire les variations tridimensionnelles du champ gravitationnel local.

FONCTIONNEMENT DES SOURCES D'ATOMES FROIDS ET D'UN CYCLE DE MESURE

(gauche) schéma d'un interféromètre atomique de MIGA monté sur le tube ultra-vide de 150 m. Une source d'atomes froids de 87Rb est obtenue en utilisant une combinaison de MOT 2D et 3D. Après piégeage et refroidissement, les atomes sont lancés sur une trajectoire parabolique (rouge) et entrent dans la zone interférométrique où ils sont manipulés par deux faisceaux en cavité (mauve). Des faisceaux laser dans la zone intermédiaire permettent de préparer les atomes dans le bon état quantique à la montée et de réaliser la mesure du déphasage en sortie de l'interféromètre. (droite) L'interféromètre est réalisé par trois impulsions dans lesquelles les paquets d'ondes atomiques sont diffractés dans le régime dit de Bragg. Le déphasage en sortie de l'interféromètre dépend alors de l'accélération horizontale des atomes par rapport aux deux ondes stationnaires. Les trois interféromètres partageant les mêmes faisceaux lasers, les mesures différentielles sont immunes aux vibrations mécaniques des optiques les supportant. Extrait de la Ref [3].



Réalisation de MIGA au LSBB

Un important travail préparatoire d'une dizaine d'années a permis de développer les différents sous-systèmes de l'antenne grâce à une étroite collaboration entre de nombreux partenaires académiques et industriels.

Une des pièces centrale de l'expérience, les sources d'atomes froids de Rb, a ainsi été réalisée en collaboration avec le laboratoire LTE. Ce système (voir figure 1-droite) se base sur des techniques de refroidissement d'atomes par laser afin de produire toutes les secondes environ un nuage de 10^9 atomes de Rb refroidis à une température de quelques µK. Après un cycle de piégeage et refroidissement, les atomes sont lancés sur une trajectoire parabolique en direction des faisceaux d'interrogation circulant dans ● ● ●

l'enceinte à vide et créant les interféromètres atomiques. Un système de détection intégré aux sources permet, à la re-descente des atomes, de mesurer le déphasage accumulé par les ondes de matières à l'intérieur de l'interféromètre (voir encart détaillant un cycle de mesure). Un total de 5 sources de Rb a ainsi été réalisées par le LTE : trois sont destinées à l'antenne au LSBB et deux autres pour une version réduite de l'expérience développée au laboratoire LP2N à Talence.

Afin de réaliser l'ensemble des fonctions laser permettant d'opérer les sources d'atomes froids, un système laser compact basé sur l'utilisation de technologies telecom a été réalisé en partenariat avec la société Exail (ex MUQUANS). L'architecture de ce système est basée sur l'utilisation de quatre diodes laser en cavité étendue fibrées à 1560 mn. Un de ces lasers est utilisé comme laser de référence et est stabilisé par spectroscopie sur une raie d'absorption saturée du Rb. Trois autres lasers sont alors asservis par battement sur cette référence et leur longueur d'onde peut être ajustée par une chaîne de fréquence utilisant des oscillateurs de type DDS (Synthèse numérique directe). Ces lasers sont alors amplifiés par des EDFAs puis doublés en utilisant des cristaux de PPLN fibrés afin d'atteindre la longueur d'onde de 780 nm permettant l'interrogation des atomes. Un système de séparatrices/recombinateurs réalisés en micro optique permet alors d'obtenir la quinzaine de sorties fibrées nécessaires au refroidissement, à la préparation et la détection des atomes.

Une autre pièce majeure de l'antenne est constituée par son enceinte à vide. La réalisation de ce système est un vrai défi technologique. En effet, le fonctionnement des sources d'atomes froids impose un niveau de vide très poussé, meilleur que 10^{-9} mbar le long de la trajectoire des atomes, afin d'éviter les pertes induites par collision avec les gaz résiduels dans l'enceinte. L'utilisation d'une zone interférométrique de grande dimension afin d'atteindre des mesures de haute sensibilité nécessite l'utilisation d'une enceinte d'environ 50 cm de diamètre afin de propager les faisceaux manipulant les ondes de matière. La conduction obtenue dans un tel système impose alors un niveau de vide quasi homogène dans toute l'enceinte, soit 10^{-9} mbar. Atteindre ces performances en termes de niveau de vide nécessite alors d'étuver l'ensemble du dispositif à une température supérieure à 100 °C pendant quelques jours, ce qui pose différents problèmes techniques : gestion de la thermique, des dilatations du dispositif, de la puissance électrique, etc... La réalisation du système a donc nécessité de nombreuses études menées au LP2N conjointement avec la société SAES RIAL Vacuum (Parme, Italie), prestataire en charge de la fabrication du dispositif.

En vue de L'installation de MIGA au LSBB, d'importants travaux d'infrastructure ont également été nécessaires. Le LSBB est une plateforme de recherche multidisciplinaire provenant de la reconversion d'un des centres de commandement souterrain des installations militaires du plateau d'Albion. Au début du projet MIGA, le LSBB disposait de presque 4 km de tunnels d'une profondeur sous terre variant de 0 à presque 600 m. Néanmoins, ces galeries présentaient une inclinaison de l'ordre de quelques pourcents, rendant leur utilisation inappropriée pour l'antenne. Fruit d'une collaboration entre le LSBB, le LP2N et la société GTM (filiale de Vinci), deux nouvelles galeries horizontales de 150 m ont donc été percées afin d'accueillir MIGA et une éventuelle future évolution de l'infrastructure vers une géométrie 2D. Ces travaux ont été réalisés à l'explosif courant

Figure 2. Gauche : Système laser fibré développé avec la société Exail (extrait de D. O. Sabulsky *et al.* Sci Rep 10, 3268 (2020)). Droite : Source d'atomes froids de Rb.

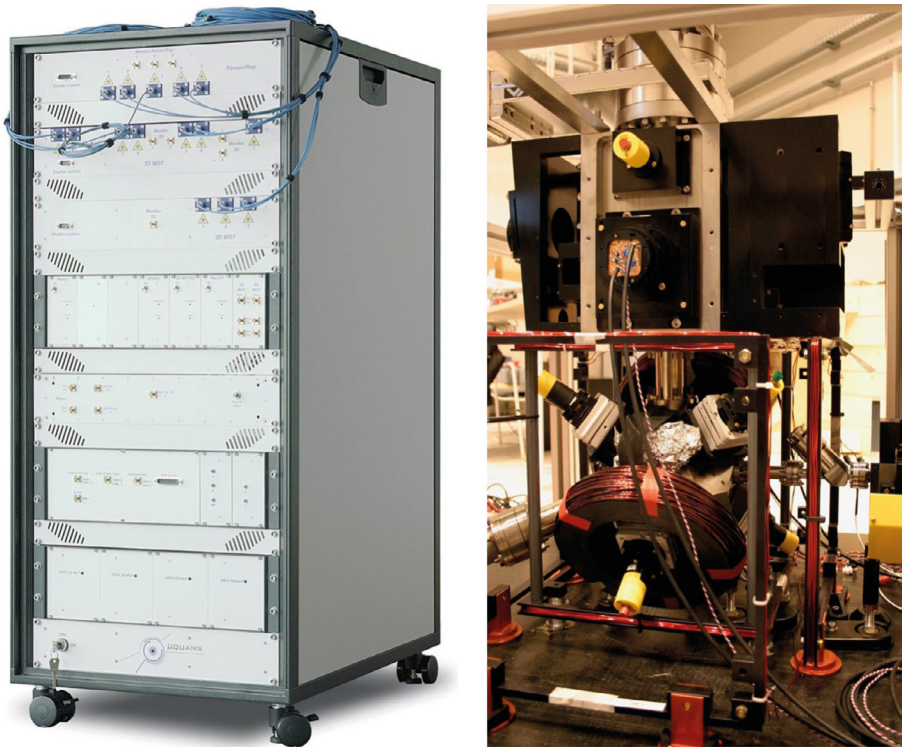


Figure 3. Antenne MIGA installée dans l'infrastructure souterraine du laboratoire LSBB.

2019 et ont fait l'objet d'un cofinancement avec le Fonds Européen de Développement Régional (programme FEDER).

Au terme de ces différents travaux préparatoires, le projet est entré récemment dans sa phase finale de construction et d'importants progrès ont ainsi été réalisés concernant la mise en place de MIGA au LSBB. Un des défis techniques majeurs de l'expérience, concernant la mise en place du système à vide, a ainsi été relevé en 2025 (voir Figure 3). L'ensemble du système est ainsi sous vide à une pression résiduelle de 10-7 mbar, ce qui permet d'envisager très prochainement l'étuvage du dispositif afin d'atteindre la pression résiduelle nominale et la mise en place des interféromètres atomiques de l'antenne. D'ici fin 2025, les sources de Rb seront installées au LSBB et commenceront à fournir des atomes froids sur site. L'année 2026 verra alors le début de la mise en place de deux des interféromètres atomiques en vue de l'obtention des premiers signaux de gradient.

Conclusion

L'antenne Miga entre dans sa dernière phase d'assemblage comprenant l'enceinte à vide de 150 m, les sources d'atomes froids et les laser d'interrogation. Le projet a pu prendre forme grâce à la possibilité de s'appuyer sur des briques technologiques éprouvées. C'est un point particulièrement critique en ce qui concerne les lasers, basés sur des technologies télécom doublées en fréquences. Le développement de ces systèmes pour le projet a aidé à atteindre la maturité de ces techniques pour ce type d'application. La mise à l'épreuve dans ce site difficile permettra sans aucun doute de démontrer la pleine pertinence de ce choix. Les premiers résultats scientifiques de l'antenne porteront probablement sur les signaux pour les géosciences, pour lesquelles ce nouveau type de capteur ouvre des perspectives variées, en particulier en hydrologie et en sismologie. Au fur et à mesure de l'amélioration de la sensibilité de l'antenne, des résultats de premier plan sont attendus comme de nouveaux tests de relativité générale ou des études relatives à la matière noire. D'une manière plus générale, l'antenne MIGA permettra aux scientifiques français d'accéder à une infrastructure unique à l'échelle mondiale dans un contexte international très compétitif avec des projets similaires de réseaux d'interféromètres atomiques récemment financés en Chine, aux Etats-Unis ou en Grande Bretagne. ●

RÉFÉRENCES

[1] R Geiger *et al.*, AVS Quantum Sci. **2**, 024702 (2020)

[2] B. P. Abbott *et al.*,Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016)

[3] B. Canuel *et al.*, Sci Rep **8**, 14064 (2018)

[4] W. Chaibi *et al.*, Phys. Rev. D **93**, 021101 (2016)

[5] Q. Beaufils *et al.* Sci Rep **12**, 19000 (2022)