

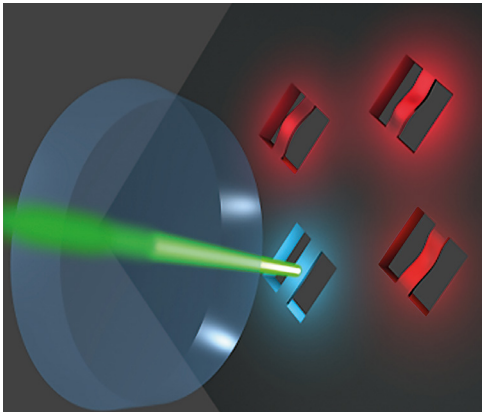
# DE LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES À L'OPTOMÉCANIQUE QUANTIQUE

Pierre-François COHADON<sup>1,\*</sup>, Michaël CROQUETTE<sup>1,2</sup>, Pierre-Edouard JACQUET<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Kastler Brossel, Paris, France

<sup>2</sup> Institut Néel, Grenoble, France

\*cohaddon@lkb.upmc.fr



Les fluctuations quantiques de la lumière limitent de façon fondamentale la sensibilité des interféromètres gravitationnels. Ce domaine a ainsi été moteur pour le développement des techniques de squeezing. Parallèlement, les progrès en nano- ou microfabrication ont permis l'émergence d'un nouveau domaine, l'optomécanique quantique, qui s'intéresse au couplage de résonateurs mécaniques mésoscopiques à la lumière, avec des applications en métrologie, mais aussi en information quantique ou en physique fondamentale.

<https://doi.org/10.1051/photon/202412938>

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.

## LES FLUCTUATIONS QUANTIQUES DE LA LUMIÈRE ET LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES

L'annonce en 2016 de la première détection des ondes gravitationnelles a suscité un intérêt considérable dans la communauté des physiciens et auprès d'un public beaucoup plus large. Au-delà des implications astrophysiques, c'est la sensibilité de l'expérience qui a marqué les esprits : elle a en effet nécessité une sensibilité de l'ordre de  $h \sim 10^{-21}$ , correspondant à des déplacements des miroirs inférieurs à  $10^{-18}$  m. Le challenge relevé

pour s'affranchir des bruits classiques (bruit thermique des miroirs, bruit sismique...) a été considérable et explique les quatre décennies d'efforts expérimentaux nécessaires entre les premières propositions au début des années 1970 et cette découverte.

Bien loin de ces considérations expérimentales, Carlton Caves a identifié dès le début des années 80 les deux bruits liés à la nature quantique de la lumière qui limitent de façon fondamentale la sensibilité de ces interféromètres. Ces bruits se discutent simplement sur le système optomécanique générique : une

cavité optique dont le miroir de fond est mobile. Quand la cavité est à résonance à la longueur d'onde  $\lambda$ , les fluctuations  $\delta\varphi_{out}$  de la phase du faisceau réfléchi par la cavité s'écrivent :

$$\delta\varphi_{out} = \delta\varphi_{in} + \frac{8\mathcal{F}}{\lambda}(\delta x + \delta x_b + \delta x_{rad}),$$

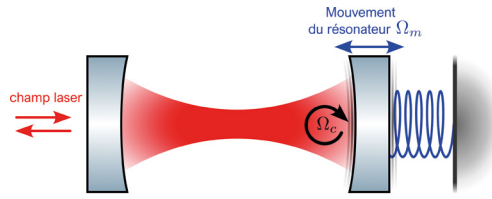
où  $\delta\varphi_{in}$  est le bruit (quantique) de phase du faisceau incident (voir l'encadré),  $\delta x$  le déplacement que l'on veut mesurer, amplifié par la finesse  $\mathcal{F}$  de la cavité,  $\delta x_b$  un éventuel bruit de position et  $\delta x_{rad}$  le bruit quantique de pression de radiation, qui correspond aux fluctuations de position du miroir mobile induites par les

fluctuations quantiques de pression de radiation du faisceau de mesure dans la cavité. Pour une expérience seulement limitée par le bruit quantique de phase du faisceau, la sensibilité est de l'ordre de  $\delta x_{min} \sim \lambda/16\mathcal{F}\sqrt{I_{in}}$  où  $I_{in}$  est l'intensité (en photons/s) du faisceau utilisé pour la mesure. Cette sensibilité est typiquement de l'ordre de  $10^{-18}$  à  $10^{-19} m/\sqrt{Hz}$  pour les interféromètres gravitationnels ou, pour des expériences table-top, 1 mW et une finesse de 10 000 à 1  $\mu m$ .

Augmenter la puissance incidente permet donc d'augmenter la sensibilité, mais pas indéfiniment. En effet, au-delà des inconvénients d'une forte puissance laser (notamment le chauffage induit par l'absorption résiduelle des miroirs, qui peut les déformer et dégrader le mode-matching), augmenter la puissance augmente le second bruit quantique  $\delta x_{rad}$ , qui traduit à l'échelle macroscopique l'action-en-retour de la mesure. Ces deux bruits  $\delta\varphi_{in}$  et  $\delta x_{rad}$  étant conjugués (au sens quantique du terme : deux observables qui ne commutent pas et dont le produit des fluctuations quantiques obéit à une inégalité de Heisenberg) et évoluant de façon inverse avec la puissance du faisceau laser, la sensibilité optimale est obtenue en effectuant un compromis. On aboutit à la Limite Quantique Standard (LQS) [1], le plus petit déplacement observable avec un faisceau laser dans un état cohérent. L'existence des fluctuations quantiques et leur impact sur la sensibilité de ces mesures a donc été une motivation majeure pour les premières expériences de compression des fluctuations quantiques de la lumière.

**LA LUMIÈRE COMPRIMÉE EN ACTION**

À partir du milieu des années 1980, de nombreux résultats expérimentaux ont été publiés sur la réduction du bruit quantique sur toutes sortes de systèmes (gaz d'atomes, cristaux non-linéaires, lasers à semi-conducteurs...), avec des niveaux de réduction de bruit d'abord modestes (d'abord quelques %,



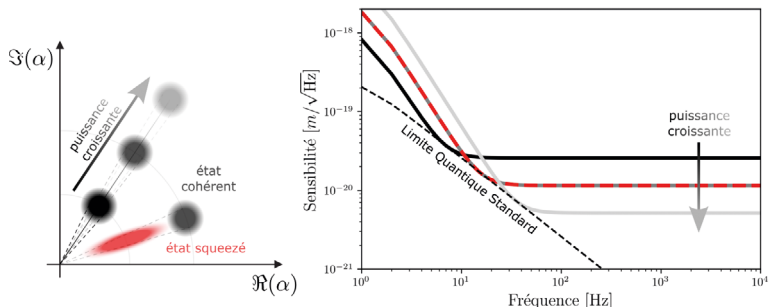
**Figure 1.** Représentation d'un système optomécanique générique. Un faisceau laser est incident sur une cavité optique dont le miroir de fond est mobile. Le déplacement du miroir et le faisceau sont couplés par la pression de radiation.

puis quelques dB), des pertes optiques importantes, des faisceaux de petite taille (pour optimiser les effets non-linéaires) et des fréquences d'analyse (vers 1 MHz) choisies pour leur accessibilité expérimentale (à la fois suffisamment élevées pour s'affranchir de toutes sortes de bruits techniques et suffisamment basses pour être facilement détectées).

Dès le début des années 2000, alors que les interféromètres sont pourtant encore loin d'avoir atteint la sensibilité nécessaire à toute détection d'événement astrophysique, des chercheurs préparent déjà la suite et travaillent sur des sources de lumière comprimée adaptées à ce contexte : opérant à plus basse fréquence (entre 10 Hz et 10 kHz), adaptées aux dimensions de l'expérience (avec des faisceaux de quelques cm), plus stables (avec l'objectif d'un fonctionnement 24/7 et une automatisation du contrôle des différents asservissements). Ce travail, mené en parallèle avec l'adaptation des interféromètres à de telles sources (notamment la minimisation des pertes optiques, qui sont encore plus pénalisantes avec de la lumière comprimée), a permis une démonstration de principe de la technique sur l'interféromètre GEO600 dès 2011, et sur LIGO dès 2013, ●●●

**FLUCTUATIONS QUANTIQUES ET SENSIBILITÉ DES INTERFÉROMÈTRES GRAVITATIONNELS**

Les fluctuations quantiques de la lumière (représentées par les disques sur la représentation du champ dans le plan complexe) correspondent à des fluctuations de la phase (angle depuis lequel on voit l'état depuis l'origine du plan), qui décroissent avec une puissance laser croissante (distance depuis l'origine, disques noir, gris et gris clair) et à des fluctuations d'amplitude (distance au centre), qui induisent des fluctuations de pression de radiation qui augmentent elles avec la puissance. L'utilisation d'un état comprimé (ellipse rouge, squeezing de la phase) permet d'atteindre la même sensibilité pour une puissance réduite. On voit sur la courbe de droite (courbe de sensibilité d'un interféromètre-modèle) l'influence de la puissance laser sur les bruits de phase (à haute fréquence) et de pression de radiation (à basse fréquence), ainsi que l'effet d'un état comprimé. Les courbes sont calculées ici pour des miroirs « en chute libre », c'est-à-dire pour des fréquences nettement supérieures à la fréquence de résonance des suspensions des miroirs.

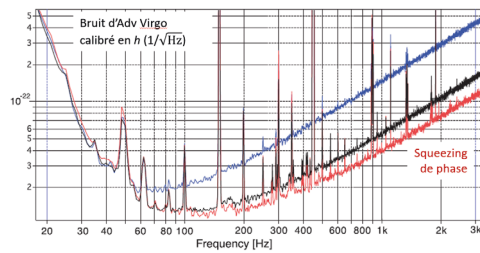


avec un bruit diminué de 3 dB. Cette technique est utilisée depuis 2018 sur tous les interféromètres gravitationnels (Advanced Virgo, Advanced LIGO et GEO600) lors de leurs prises de données scientifiques [2]. Ces travaux se poursuivent aujourd'hui pour améliorer continuellement la sensibilité des interféromètres au gré de leurs campagnes d'améliorations successives, qui permettent de réduire encore les bruits classiques, et entraînent des exigences toujours plus fortes sur le squeezing.

### L'OPTOMÉCANIQUE : REFROIDIR UN MIROIR AVEC LA PRESSION DE RADIATION...

En mettant en évidence la LQS, Caves a accordé un nouveau statut aux miroirs de l'interféromètre : de simples dispositifs pour réfléchir la lumière, ceux-ci deviennent de vrais objets physiques, qui réagissent aux fluctuations de la pression de radiation du faisceau laser de mesure. Personne ne le sait et personne ne l'appelle encore ainsi, mais l'optomécanique est née [3]. Si ces effets sont encore loin de toute démonstration expérimentale, l'idée fait son chemin qu'on pourrait réaliser des expériences similaires avec des miroirs mobiles de plus faible masse, répondant mieux à la pression de radiation. De telles expériences table-top se montent, notamment au Laboratoire Kastler Brossel, avec comme premier objectif de mettre en évidence les limites quantiques dans les mesures de position ou de générer de la lumière comprimée avec la non-linéarité optique liée à la pression de radiation. Mais ces objectifs apparaissent rapidement difficiles à atteindre : le bruit de pression de radiation ne sera finalement mis en évidence qu'en 2013 [4].

Néanmoins, le bruit thermique des résonateurs mécaniques, initialement perçu comme un bruit, particulièrement gênant dans ces expériences généralement réalisées à température ambiante, est bientôt plutôt vu comme un sujet d'étude en soi. La pression de radiation, permet



**Figure 2.** La réduction du bruit quantique à l'œuvre dans les interféromètres gravitationnels. Courbes de sensibilité d'Advanced Virgo dans sa configuration standard (courbe noire) et avec injection de vide comprimé sur la quadrature de phase (courbe rouge). Le gain est d'environ 3 dB à haute fréquence. La courbe bleue représente l'effet d'une compression sur la quadrature d'amplitude, qui augmente le bruit de phase et dégrade ainsi la sensibilité. Celle-ci est inchangée à basse fréquence, où des bruits classiques sont prédominants. Figure tirée de [2]. Crédit : Collaboration Virgo.

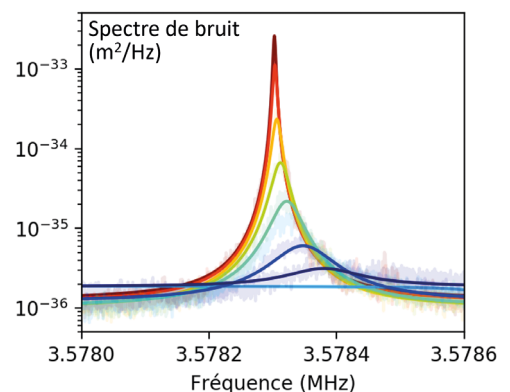
en effet d'agir sur le résonateur pour le refroidir, de façon analogue à ce qui était déjà utilisé avec des ions piégés. Une première expérience de refroidissement est réalisée au LKB en 1999 avec le mode de vibration fondamental d'un miroir plan-convexe en silice fondue : le signal sur le déplacement est alors utilisé pour appliquer en temps réel une force de frottement supplémentaire. Cette force de friction froide n'injectant pas de fluctuations dans le système, on peut montrer que la température est réduite par un facteur  $1 + \Gamma_{rad}/\Gamma$ , où  $\Gamma_{rad}$  est l'amortissement induit par la pression de radiation et  $\Gamma$  celui intrinsèque du résonateur mécanique. Le résultat sur la température est encore modeste : le miroir initialement à température ambiante ne voit sa température abaissée qu'à 10 K [5]. L'année 2006 voit l'introduction d'une nouvelle technique qui tire parti du couplage entre phase et intensité dans une cavité optique désaccordée : le miroir est alors refroidi par la seule pression de radiation du faisceau qui est utilisé pour mesurer son déplacement. Les premières expériences, réalisées simultanément au LKB et à Vienne, se limitent encore

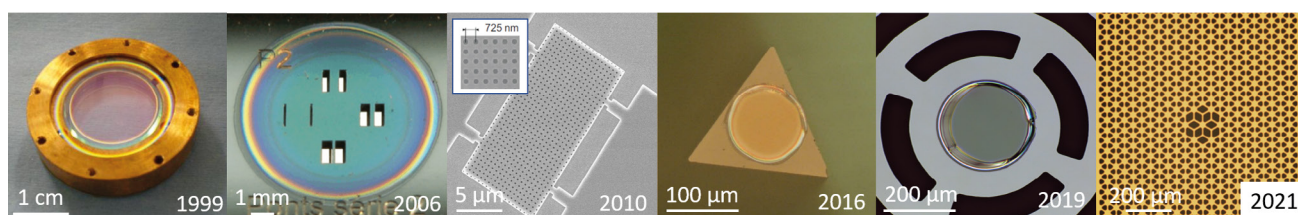
à des démonstrations de principe, de la température ambiante à une température finale de quelques K [6], mais les expériences se multiplient très vite : à température cryogénique, dans le domaine optique puis micro-ondes, avec toutes sortes de géométries de résonateurs... Le graal est atteint en 2011 : pour la première fois, un résonateur mécanique est refroidi au voisinage de son état quantique fondamental [7] : les résonateurs mécaniques sont désormais des oscillateurs harmoniques quantiques (presque) comme les autres.

### ... MAIS PAS SEULEMENT

Le domaine continue de s'étendre pendant la décennie qui suit. À côté des systèmes déjà très répandus en métrologie et en optique ou information quantiques (atomes, ions, centres NV, cavités optiques ou micro-ondes, qubits supraconducteurs...), les résonateurs mécaniques apparaissent comme un élément supplémentaire de la boîte à outils expérimentale, avec comme point fort leurs très longs temps de cohérence (avec par exemple des facteurs de qualité mécaniques de plusieurs centaines de

**Figure 3.** Refroidissement d'un résonateur mécanique (micropilier en quartz, 2021) par la pression de radiation. Sous l'effet de la force de friction froide, les spectres de bruit de position s'élargissent (largeur totale) et sont réduits (diminution de la température), de la température de base du cryostat (courbe rouge, 1 K) à la température minimale atteinte (courbe bleue, température de 1 mK, correspondant à 7 phonons thermiques à la fréquence de 3,6 MHz).





**Figure 4.** 25 ans d'évolution des résonateurs optomécaniques au Laboratoire Kastler Brossel. 1999 : miroir plan-convexe en silice fondue. 2006 : micropuce en silicium. 2010 : membrane à cristal photonique en InP (collaboration avec le C2N). 2016 : vue optique de la face supérieure d'un micropilier en quartz (collaboration avec l'ONERA). 2019 : oscillateur de torsion en silicium (avec un miroir de Bragg, collaboration avec le LENS Florence). 2021 : Membrane à cristal phononique en SiN. Les traitements diélectriques (1999, 2006 et 2016) ont été réalisés au Laboratoire des Matériaux Avancés de Villeurbanne.

millions pour les membranes à cristal phononique, voir la figure 4) et la possibilité de les coupler à tous les effets et systèmes possibles et imaginables : cavités, atomes, centres NV, forces, accélérations, contraintes mécaniques, champs extérieurs... Au-delà du simple refroidissement dans l'état quantique fondamental, bientôt réalisé sur toutes sortes de systèmes, des propriétés purement quantiques sont mises en évidence : asymétrie des bandes latérales (liée aux propriétés des opérateurs  $\hat{\alpha}$  et  $\hat{\alpha}^\dagger$ ) [8], états comprimés du mouvement, intrication de deux résonateurs ou état chat de Schrödinger d'un résonateur mécanique [9]... avec des masses s'échelonnant sur près de 20 ordres de grandeur, des nanoparticules en silice piégées dans des pinces optiques ( $m \sim 10^{-18}$  kg) aux miroirs suspendus d'Advanced LIGO ( $m \sim 40$  kg). Facilement couplés au champ optique ou micro-ondes, éventuellement aux deux simultanément, les systèmes optomécaniques sont notamment envisagés comme mémoires quantiques ou pour effectuer la transduction entre ces deux domaines de fréquences, pour permettre la dissémination par fibre optique d'information quantique entre deux nœuds quantiques (placés dans des cryostats, dans lesquels fonctionnent les systèmes de qubits supraconducteurs).

### CONCLUSION : VERS L'OPTOMÉCANIQUE QUANTIQUE

Parallèlement au développement des sources de lumière comprimée et à leur application aux interféromètres gravitationnels, les progrès considérables effectués récemment en micro- et nanofabrication ont permis l'émergence d'un nouveau domaine,

l'optomécanique, qui consiste à coupler des résonateurs mécaniques mésoscopiques à la lumière, dans le domaine optique ou microondes. Au-delà des applications à la métrologie (thermométrie, capteurs de pression, microscopie à force atomique...), l'accent peut être mis sur l'état quantique des champs (génération de lumière comprimée, sur celui du résonateur (états non-classiques) ou sur les deux (intrication entre la lumière et l'état quantique du résonateur). Ce domaine est très prometteur pour le traitement quantique de l'information ou pour l'étude des fondements de la mécanique quantique, par exemple la caractérisation d'états quantiques et de leur décohérence pour des résonateurs mécaniques macroscopiques [10].

### REMERCIEMENTS

Les travaux résumés ici ont été menés en partie dans l'équipe Optomécanique et Mesures Quantiques du Laboratoire Kastler Brossel, en collaboration avec Antoine Heidmann, Michel Pinard, Tristan Briant, Samuel Deléglise et Thibaut Jacqmin. Ils ont également profité de nombreuses collaborations en France et à l'étranger, notamment avec plusieurs équipes de la Collaboration Virgo, le Laboratoire des Matériaux Avancés, l'équipe de Francesco Marin au LENS de Florence, l'équipe de Rémy Braive au Centre de Nanosciences et Nanotechnologies et celle d'Olivier Le Traon au Département de Mesures Physiques de l'ONERA. ●

### RÉFÉRENCES

- [1] C. M. Caves, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 75 (1980)
- [2] F. Acernese *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 231108 (2019)
- [3] M. Aspelyer, T. Kippenberg et F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86**, 1391 (2014)
- [4] T. P. Purdy, R. W. Peterson et C. A. Regal, *Science* **339**, 801 (2013)
- [5] P.-F. Cohadon, M. Pinard et A. Heidmann, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3174 (1999)
- [6] S. Gigan *et al.*, *Nature* **444**, 67 (2006). O. Arcizet *et al.*, *Nature* **444**, 71 (2006)
- [7] J. D. Teufel *et al.*, *Nature* **475**, 359 (2011)
- [8] A. H. Safavi-Naeini *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 033602 (2012)
- [9] M. Bild *et al.*, *Science* **380**, 274 (2023)
- [10] M. Croquette *et al.*, *AVS Quantum Sci.* **5**, 014403 (2023)