REE REVUE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'ÉLECTRONIQUE

ARTICLE EXTRAIT DE LA REE 2023-2, TOUS DROITS RESERVES



Vue aérienne des installations du projet Virgo.

Utilisation des corrélations quantiques dans le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo

Techniques de vide comprimé (ou *squeezing*) pour la réduction du bruit quantique dans le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo

Matteo Barsuglia,
CNRS, Laboratoire Astroparticule et Cosmologie

Eleonora Capocasa

Université Paris Cité
Laboratorie Astroparticules et Cosmologie

Dans la campagne de Pise, les physiciens du projet Virgo injectent une forme de vide «comprimé» dans le détecteur pour réduire son bruit. Cette technique permet d'élargir la région de l'Univers observée grâce aux ondes gravitationnelles, ces ondulations de l'espace-temps prédites par Einstein en 1916 et détectées pour la première fois en 2015.

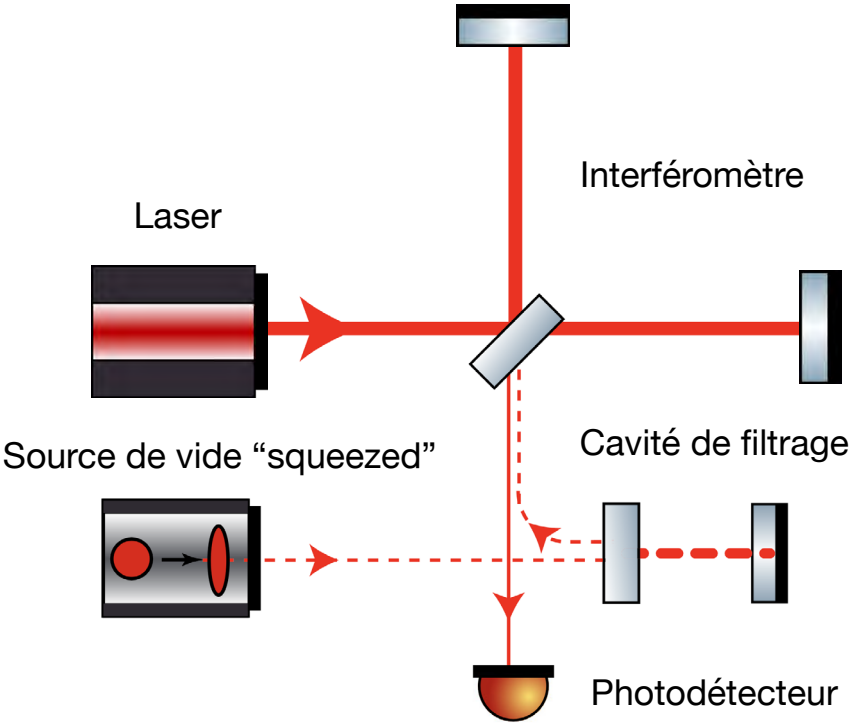
Jouer avec le vide

Avril 2019 : la prise de données des télescopes à ondes gravitationnelles LIGO et Virgo est en cours. LIGO a observé les premières vibrations de l'espace-temps en 2015 [1] et Virgo a commencé les observations en 2017. Dans le bâtiment central de Virgo, dans la campagne autour de Pise, des chercheurs et des chercheuses sont occupés à régler des bancs optiques, remplis de miroirs et de lasers. Une lumière verte est diffusée partout. Les détecteurs, qui observent des sources d'ondes gravitationnelles chaque semaine, utilisent depuis peu une technique complètement nouvelle et révolutionnaire : le « vide » est injecté à la sortie de l'instrument. Les chercheuses ouvrent un petit trou d'un centimètre de diamètre qui relie l'équi-

pement sur lequel elles travaillent au reste du détecteur, et immédiatement le bruit de l'instrument diminue. Cela permettra l'observation de plus de sources d'ondes gravitationnelles et de sources plus lointaines. Vous avez bien lu, c'est bien le « vide » qui est injecté, mais pas un vide normal, un vide spécial, comprimé, ou «*squeezed*». Quand on leur pose la question : comment l'injection de vide peut-elle faire baisser le bruit de l'interféromètre, en général les chercheurs ont un sourire narquois : ce n'est pas de la magie noire ; il suffit de connaître la mécanique quantique. Pour comprendre comment le vide permet d'observer des sources d'ondes gravitationnelles plus lointaines, il faut faire un pas en arrière, ou plutôt deux pas en arrière, et aborder les deux théories qui ont révolutionné la physique au XX^{ème} siècle : la relativité générale et la mécanique quantique. Commençons par la première.

La relativité générale

En 1915, Albert Einstein, alors professeur de physique à Berlin, prédit que l'espace-temps est courbe et révolutionne notre vision des concepts fondamentaux de la physique. Einstein montre que la théorie de la gravitation universelle de Newton, dans laquelle la gravité est une force instantanée entre deux masses, est une approximation d'une théorie plus générale. La nouvelle théorie de la relativité générale s'impose comme le paradigme avec lequel nous étudions l'infiniment grand : l'Univers à grande échelle, les étoiles et les phénomènes violents découverts au XX^{ème} siècle : pulsars, trous noirs, étoiles à neutrons. Cependant, il faut remarquer que la relativité générale ne sert pas seulement à expliquer les phénomènes astrophysiques, mais aussi à faire fonctionner correctement le GPS de notre téléphone. Peu après qu'Einstein eut formulé ses célèbres équations reliant l'énergie-matière à la courbure de l'espace-temps (les équations de champ de la relativité générale), alors que la Première Guerre mondiale éclatait en



I Figure 1 : Schéma d'un interféromètre de Michelson : le faisceau laser est divisé en deux et envoyé dans deux bras orthogonaux. Les faisceaux réfléchis se recombinent à la sortie de l'interféromètre. Le passage d'une onde gravitationnelle produit un changement dans la longueur différentielle des deux bras, ce qui entraîne un changement dans les conditions d'interférence. Le changement de puissance, proportionnel à l'effet de l'onde gravitationnelle, est alors détecté par un photodétecteur. Un faisceau de vide comprimé est injecté dans le port de sortie de l'interféromètre pour réduire le bruit quantique.

Europe, il découvrit qu'une solution particulière de ses équations était constituée par des ondes. En d'autres termes, la courbure de l'espace-temps, produite par phénomène violent dans l'univers, peut se propager dans le vide, comme se propage une onde électromagnétique. L'espace-temps en effet est comme un solide élastique, comme une barre de métal qui, lorsqu'on la percute, vibre et transmet un son. Lorsqu'un phénomène extrêmement énergétique secoue l'espace-temps, celui-ci vibre et des ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, sont transmises partout dans l'Univers. Toutefois, les ondes gravitationnelles étirent l'espace de façon infime (l'espace-temps est très rigide), on sait aujourd'hui que les sources les plus puissantes observées par LIGO et Virgo le font vibrer d'un milliardième de milliardième de mètre. C'est ce qu'ont révélé LIGO en 2015, puis LIGO et Virgo en 2017, grâce à l'incroyable précision de l'interférométrie laser et un effort expérimental mené depuis 50 ans. Le principe de mesure de ces instruments, connus sous le nom d'interféromètres de Michelson, est simple : un faisceau laser est séparé en deux parties qui se propagent le long de deux bras de quelques kilomètres dans des directions orthogonales (voir figure 1). À l'extrémité des bras, des miroirs renvoient les faisceaux, qui se recombinent à la sortie de l'interféromètre, générant une interférence. La puissance à la sortie de l'interféromètre dépend donc de la différence de longueur des bras. Le passage d'une onde gravitationnelle induit une variation différentielle de la longueur des bras, qui produit alors une variation de puissance à la sortie de l'interféromètre, enregistrée par un photodétecteur.

Toute la difficulté de la mesure réside dans la réduction de tout bruit qui peut masquer le changement de longueur ●●●

des bras induit par les ondes gravitationnelles (une variation de l'ordre de 10^{-19} m sur 3 km). Pour filtrer le bruit sismique, les miroirs sont suspendus à des chaînes de pendule. Le laser est stabilisé en fréquence et en amplitude, et tous les plus petits bruits ambiants sont écrantés. Tout ce travail a permis d'observer une centaine de sources d'ondes gravitationnelles produites par des fusions d'objets compacts, et la plupart des fusions de systèmes binaires de trous noirs. Ces astres, dont les masses sont de l'ordre de dizaines de masses solaires, orbitent l'un autour de l'autre et perdent de l'énergie en émettant des ondes gravitationnelles, en spiralisant. Après quelques millions d'années, la spiralisation aboutit à une fusion dont les derniers instants sont captés par LIGO et Virgo. En raison de la nature complètement différente de ce messager par rapport aux ondes électromagnétiques, l'astronomie des ondes gravitationnelles a déjà dévoilé un nouveau cosmos : des systèmes binaires de trous noirs ont été observés pour la première fois, ce qui a perrmis de découvrir une nouvelle population de trous noirs plus massifs que ceux déjà observés dans notre galaxie. La vitesse des ondes gravitationnelles a été mesurée, ce qui a permis d'écarter certaines alternatives à la théorie de la relativité d'Einstein, sur lesquelles les physiciens théoriciens travaillaient depuis un certain temps pour expliquer l'énergie noire. Les ondes gravitationnelles ont permis de mesurer le taux d'expansion de l'Univers d'une manière complètement différente de celles utilisant les supernovæ ainsi que le fond diffus cosmologique, contribuant à un débat scientifique majeur qui pourrait aboutir à une révolution de la cosmologie moderne. Avec les nouvelles prises de données prévues dans les dix prochaines années, les ondes gravitationnelles contribueront encore davantage à la cosmologie, à la physique nucléaire et à l'astrophysique et, on l'espère, pourront aussi offrir des éléments pour mettre en évidence des signes d'une théorie quantique de la gravitation, le graal de la physique théorique.

La réduction du bruit quantique

Mais pour poursuivre ce programme scientifique, il faut augmenter la sensibilité des détecteurs, ce qui n'est pas chose facile. Le bruit qui limite toute mesure interférométrique, appelé bruit quantique, limite la sensibilité de Virgo dans une grande partie de la bande passante de l'instrument, entre 10 Hz et quelques kilohertz. Dans une vision *semi-classique*, le bruit quantique est dû au fait que la lumière est composée de photons, des particules sans masse mais dotées d'une énergie et d'une impulsion. Les photons émis par un laser, dit la théorie, arrivent en moyenne toujours avec le même nombre (qui détermine la puissance du laser) mais avec des temps aléatoires. Le caractère aléatoire des temps d'arrivée crée un « bruit de grenaille » sur le photodétecteur qui mesure le passage des ondes gravitationnelles. Pour le réduire, il suffirait d'augmenter la puissance du laser, car la fluctuation du nombre de photons augmente moins vite que le nombre de photons lui-même (c'est-à-dire la puissance du laser). Cette technique, utilisée par Virgo et LIGO, a deux limites : la première est que si l'on augmente trop la puissance, les temps d'arrivée aléatoires des photons commencent à exercer une force aléatoire sur les miroirs, qui se déplacent. C'est ce qu'on appelle la pression de radiation quantique. La deuxième raison est que les lasers chauffent les miroirs et les déforment. Si la déformation est trop grande, le faisceau laser est inutilisable ; l'interféromètre, en d'autres termes, ne fonctionne plus. Mais la lumière n'est pas seulement constituée de particules, elle est aussi - nous le savons car c'est ainsi que fonctionne un interféromètre comme Virgo - une onde. Si l'on applique la mécanique quantique à la lumière, c'est-à-dire que l'on quantifie le champ électromagnétique, on a un point de vue différent sur le bruit quantique, avec des conséquences extraordinaires. Ce changement de point de vue a été opéré dans les années 1980 par un physicien du Nouveau Mexique, Carlton Caves [2]. A l'époque, Caves essayait de résoudre une querelle scientifique en cours dans la communauté scientifique : comment la pression de radiation d'un laser était transmise à la sortie du détecteur. Puisqu'en considérant les photons comme des particules, personne n'était sûr de la bonne réponse, Caves a donc décidé d'utiliser la quantification du champ électromagnétique et a compris que le bruit quantique provient du vide. Les fluctuations du vide, dites aussi « fluctuation de point zéro », sont une conséquence étonnante, mais démontrée expérimentalement de la mécanique quantique. Des particules virtuelles (comme des photons virtuels) ont la possibilité d'être créées et de disparaître grâce au principe d'incertitude de Heisenberg, qui permet de violer temporairement la conservation de l'énergie. Ces fluctuations sont d'ailleurs responsables de l'émission spontanée des lasers, du « *Lamb shift* » et de l'effet Casimir, la force entre deux plaques métalliques dans le vide quand elles sont très proches. Lorsque les fluctuations du vide rentrent dans Virgo et LIGO, elles génèrent le bruit de grenaille équivalent au bruit causé par le temps d'arrivée aléatoire des photons sur le détecteur, et le bruit de pression de radiation équivalent au bruit causé par le temps d'arrivée aléatoire sur les miroirs. Avec la quantification du champ électromagnétique on retrouve le même niveau de bruit qu'avec le calcul semi-classique (celui avec les photons), mais comme souvent en physique, changer de point de vue permet non seulement de vérifier un calcul mais aussi de découvrir de nouveaux phénomènes. Au début des années 1980, Caves réalise que le fait que le bruit quantique soit produit par le vide entrant dans l'interféromètre pouvait être une opportunité extraordinaire. S'il était possible de « comprimer » le vide, c'est-à-dire de réduire ses fluctuations, le bruit de l'interféromètre diminuerait. En mécanique quantique, un faisceau laser peut-être en effet représenté par un vecteur qui a une puissance (la longueur du vecteur) à laquelle on ajoute un cercle qui représente les fluctuations. Les fluctuations peuvent se situer dans la phase du faisceau ou dans l'amplitude, dans ce que l'on appelle les deux

« quadratures ». Un état de vide est un état dont l'amplitude est nulle (c'est-à-dire que le cercle se trouve à l'origine - Cf. figure 2, panneau de gauche). Selon Carlton Caves, nous pourrions comprimer le cercle dans la direction de la phase, qui est la quantité mesurée par un interféromètre comme Virgo). En vertu du principe d'Heisenberg, le petit cercle se transformera alors en ellipse, c'est-à-dire que les fluctuations dans l'amplitude augmenteront. Mais dans l'interféromètre, on ne mesure que la phase, donc cette augmentation dans l'autre quadrature, a priori, n'a pas d'inconvénient. Si seulement il était possible de produire cet état comprimé, on pourrait réduire le bruit quantique sans augmenter la puissance du laser, donc sans trop chauffer les miroirs !

La réduction du bruit

De retour dans le bâtiment central de Virgo, les chercheuses et chercheurs travaillent sur les bancs optiques et en particulier sur un « *squeezer* », un compresseur de vide. Après l'article de Caves, les scientifiques ont trouvé comment construire ces précieux et délicats états de vide pour réduire le bruit de l'interféromètre [3]. Il s'agit de créer des corrélations quantiques entre ces photons virtuels qui sont les protagonistes des fluctuations du vide. Pour ce faire, on fait passer un faisceau laser à travers des cristaux non linéaires, des composants optiques capables de créer deux photons moins énergétiques (infrarouge) à partir d'un photon plus énergétique (vert). Ces composants optiques, appelés oscillateurs paramétriques optiques (OPO), peuvent fonctionner dans un régime particulier où les photons émis ont une puissance nulle, sont des photons virtuels, qui créent un état de vide avec fluctuations modifiées. Il suffit d'injecter ce vide dans l'interféromètre pour que le bruit diminue. Cela semble simple, mais il a fallu quarante ans pour y arriver. L'une des raisons est que ces états comprimés sont très fragiles. De petites pertes optiques peuvent les détruire. Par exemple, lorsqu'ils traversent des miroirs présentant une certaine rugosité, de sorte qu'une partie du faisceau laser est diffusée, ou des lentilles présentant une surface antireflet, qui réfléchit une partie du faisceau dans une autre direction. Il est évidemment difficile d'imaginer des pertes pour un faisceau fait de vide, mais si l'on fait bien les calculs, la mécanique quantique nous dit qu'à chaque fois qu'il y a une perte, le faisceau comprimé se mélange à un faisceau normal, et ceci est dû à un principe fondamental de la théorie. Une autre raison pour laquelle il a fallu des décennies pour pouvoir utiliser des faisceaux comprimés dans des détecteurs interférométriques est que ces derniers travaillent à des fréquences relativement faibles (entre 10 Hz et 10 kHz). Or ce que demandons à un faisceau comprimé est de réduire le bruit quantique dans cette région, où règnent une multitude de bruits (électroniques, acoustiques, fréquence laser, etc.) qui limitent les mesures. Il est beaucoup plus facile d'obtenir des états comprimés à des fréquences de l'ordre du MHz.

Premiers essais de squeezing

Retour en avril 2019. Après des mois de prototypage et de commissionnement, le faisceau comprimé est injecté dans Virgo et LIGO et le bruit de fond est ●●●

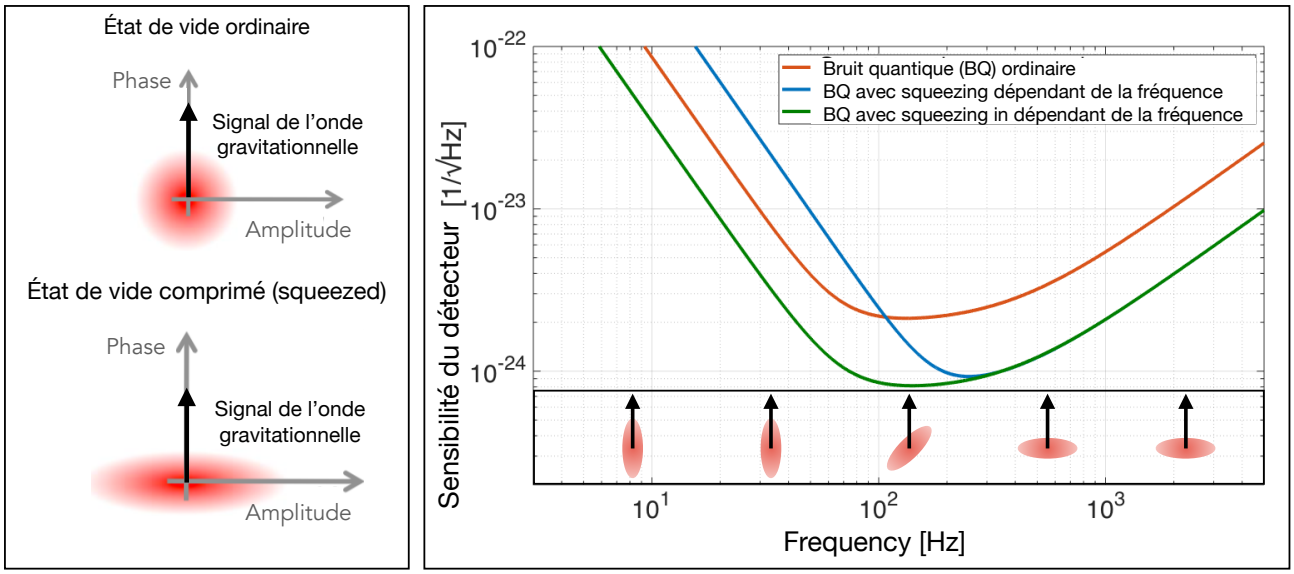


Figure 2 : **Panneau de gauche :** Représentation d'un état cohérent du vide (en haut) et d'un état comprimé (*squeezed*) (en bas) dans le plan de quadrature phase-amplitude. Dans le premier cas, l'incertitude est la même dans les deux quadratures, tandis que dans le second, le bruit est réduit dans une quadrature et augmenté dans l'autre. **Panneau de droite (en haut) :** Amélioration du bruit quantique réalisable en injectant respectivement du *squeezing* indépendant de la fréquence (courbe bleue) et du *squeezing* dépendant de la fréquence (courbe verte). Dans le premier cas, l'amélioration ne concerne que les hautes fréquences, tandis que le bruit augmente aux basses fréquences. Dans le second cas, on obtient une réduction du bruit à large bande. **Panneau de droite (en bas)** : Il montre la rotation de 90 degrés de l'angle de squeezing sur le spectre de fréquences, induite par le couplage opto-mécanique du vide avec les miroirs suspendus de l'interféromètre, qui fait que la quadrature avec bruit réduit n'est plus alignée avec le signal gravitationnel.



Figure 3 : Photo de la cavité de filtrage installée à Virgo. A droite, le tube à vide de 285 m installé à côté du bras nord de Virgo. À gauche, le miroir d'extrémité de la cavité et son système de suspension, qui l'isole du bruit sismique.

réduit de 3 dB, soit le même résultat que celui que l'on pourrait obtenir en doublant la puissance du laser [4]. Cela permet une augmentation des détections allant jusqu'à 50 % pour le réseau LIGO Virgo. En regardant de près la sensibilité à basse fréquence dans la région en dessous de 50 Hz, on remarque cependant quelque chose d'étrange : lorsque l'on injecte le vide comprimé, la sensibilité se dégrade. Elle s'améliore à haute fréquence et se dégrade à basse fréquence. En faisant des calculs, on se rend compte que c'est conforme : la théorie nous dit que l'ellipse de compression, comprimée dans la direction de la quadrature de phase (la bonne), subit une rotation à l'intérieur des interféromètres, en fonction de la fréquence de Fourier. L'ellipse est bien alignée à haute fréquence mais tourne lorsque les fréquences diminuent et se retrouve avec l'axe majeur, le plus bruyant (celui qui a plus de fluctuations), aligné avec le signal gravitationnel (figure 2, panneau droit). L'effet est encore faible et ne perturbe pas la détection, mais à l'avenir, il sera problématique d'augmenter encore les niveaux de compression. Le bruit s'améliorera à haute fréquence mais se détériorera considérablement vers 50 Hz.

Et nous voici en avril 2023. Une "cavité de filtrage quantique" est réalisée sur le site de Virgo (figure 3). Il s'agit d'une technique conçue pour résoudre le problème de la rotation de l'ellipse de compression dans l'interféromètre, cet effet opto-mécanique qui empêche la réduction du bruit dans toute la bande de détection de Virgo et de LIGO. L'idée est simple : il s'agit de pré-tourner l'ellipse, en fonction de la fréquence, avant d'injecter le faisceau comprimé dans l'interféromètre (figure 1). La cavité optique, une cavité Fabry-Pérot suspendue de 285 m de long, a été construite entre 2020 et 2023, en faisant passer un tube à vide un peu plus petit que ceux de Virgo, le long d'un des bras du détecteur. Les extrémités sont deux miroirs suspendus à des pendules. Le vide comprimé, réfléchi par la cavité, « tourne » en fonction de la fréquence de Fourier, ce qui a été démontré dans divers prototypes, y compris lors d'une expérience au Japon sur laquelle nous avons travaillé entre 2017 et 2020 [5]. Cette expérience avait été réalisée dans l'ancienne infrastructure de TAMA, l'un des premiers détecteurs d'ondes gravitationnelles, à l'observatoire astronomique du Japon (NAOJ) à Tokyo. Il s'agit d'un excellent exemple de la manière dont la science peut « recycler » une infrastructure qui n'est plus utilisée (elle a été mise hors service après le grand tremblement de terre de Tohoku en 2011) pour réaliser des prototypes et des expériences ayant un impact considérable.

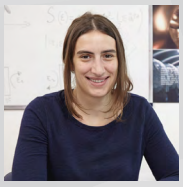
Cet effet de compression « dépendant de la fréquence » sera utilisé dans Virgo et LIGO lors des prochaines prises de données, et en particulier dans celle prévue cette année (2023), et appelée O4 (la quatrième période d'observation),

Les auteurs

Matteo Barsuglia est directeur de recherche au CNRS, au Laboratoire Astroparticule et Cosmologie à Paris. Depuis 25 ans il travaille au développement de l'astronomie des ondes gravitationnelles et, en particulier, au développement de l'interféromètre Virgo. Depuis 2020, Matteo Barsuglia est le responsable français du projet Virgo. Il enseigne à l'école doctorale STEP'UP (UniversitéParis Cité, Sorbonne Unviversité, PSL) et au master PHE de l'École polytechnique. Il est l'auteur de « ***Les vagues de l'espace-temps, la révolution des ondes gravitationnelles*** », Dunod 2019, Prix Ciel & Espace du livre d'astronomie 2020.



Eleonora Capocasa est maîtresse de conférences à l'Université Paris Cité depuis 2020. Elle travaille sur le développement des détecteurs d'ondes gravitationnelles et en particulier sur la réduction du bruit quantique avec des techniques de compression. Après une thèse de doctorat à l'Université Paris 7 (Prix L'Oréal pour les Femmes et la Science 2016), elle a contribué au détecteur d'ondes gravitationnelles japonais KAGRA et participe aujourd'hui au développement du projet Virgo et du futur projet « Einstein Telescope ».



où Virgo, les deux LIGO et le nouveau détecteur japonais KAGRA, quatre détecteurs dans le monde, contribueront ensemble à la détection des ondes gravitationnelles. Cette nouvelle technologie permettra de réduire le bruit quantique (c'est-à-dire le bruit de grenaille et la pression de radiation) dans toute la bande d'observation, et d'accroître encore les possibilités d'observation des instruments. Dans les années à venir, Virgo, LIGO et KAGRA poursuivront des prises de données alternées avec des phases d'amélioration des détecteurs, avec des niveaux de compression de plus en plus élevés, jusqu'à atteindre (nous l'espérons) 10 dB, ce qui correspond à une réduction du bruit d'un facteur 3, et équivaut à une augmentation de la puissance d'un facteur 10. Contrairement à l'augmentation de la puissance (qui sera de toute façon réalisée parallèlement à la compression), la compression dépendant de la fréquence n'augmente pas la pression de radiation aux basses fréquences, en d'autres termes, il n'a pas de contre-indications. Et surtout, il ne chauffe pas les miroirs.

En conclusion

La mécanique quantique limite la sensibilité des détecteurs d'ondes gravitationnelles mais elle offre aussi, en utilisant de façon appropriée les corrélations quantiques et les technologies offertes par l'optique non linéaire, des possibilités de contourner les limites imposées par le principe d'Heisenberg (sans le violer, bien sûr !). Jongler avec la théorie de l'infiniment petit permet de comprendre toujours plus l'infiniment grand. ■

Références

[1] "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger" B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), Phys. Rev. Lett. 116, 061102 – (2016)

[2] "Quantum-mechanical noise in an interferometer", C. M. Caves, Phys. Rev. D23 1693–1708 (1981)

[3] "Squeezed vacuum states of light for gravitational wave detectors", L. Barsotti, J. Harms, and R. Schnabel. Reports on Progress in Physics, Vol. 82, N.1 (2019)

[4] «Increasing the Astrophysical Reach of the Advanced Virgo Detector via the Application of Squeezed Vacuum States of Light», the Virgo Collaboration, Phys. Rev. Lett. 123, 231108 (2019)

[5] «Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source for Broadband Quantum Noise Reduction in Advanced Gravitational-Wave Detectors» Y.Zhao, N.Aritomi, E.Capocasa et al. Phys. Rev. Lett. 124,171101 (2020)

Résumé

En 2019, des chercheurs travaillant sur les détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO (aux Etats-Unis) et Virgo (en Europe), ont réussi à réduire le bruit quantique de ces détecteurs en injectant un « vide comprimé », également appelé « *squeezing* ». Cette technique révolutionnaire a permis d'observer davantage de sources d'ondes gravitationnelles et des sources plus lointaines pendant la troisième prise de données, effectuée entre 2019 et 2020. Le réseau LIGO-Virgo (auquel s'est joint récemment le détecteur japonais KAGRA) a détecté 90 sources d'ondes gravitationnelles jusqu'à maintenant avec plusieurs résultats scientifiques dans les domaines de l'astrophysique et de la physique fondamentale. Des améliorations de la technique du vide comprimé sont en cours pour réduire davantage encore le bruit quantique dans toute la bande de fréquence des détecteurs et elles seront testées dans les prochaines prises de données, prévues à partir de 2023. ■

Abstract

In 2019, researchers working on the gravitational wave detectors LIGO (in US) and Virgo (in Italy) succeeded in reducing the quantum noise of these detectors by injecting a 'compressed vacuum', also known as 'squeezing'. This revolutionary technique has made it possible to observe more gravitational-wave sources and at a larger distance during the third observation run, carried out between 2019 and 2020. The LIGO-Virgo network (recently also including the Japanese detector KAGRA) has detected 90 gravitational wave sources so far with several scientific results in the fields of astrophysics and fundamental physics. Improvements to the squeezing technique are underway to further reduce quantum noise across the entire frequency band of the detectors and will be tested in the next observation run, planned from 2023. ■