

Mariage heureux entre mécanique quantique et relativité

ASTROPHYSIQUE - Les instruments Virgo et LIGO profitent d'une technique d'optique quantique dans la détection d'ondes gravitationnelles

Le 1^{er} avril, les trois grands « télescopes » qui ont été les premiers à découvrir en septembre 2015 des signaux extraterrestres d'un nouveau type ont repris du service après un an et demi de travaux pour doubler leurs performances. Ces signaux sont des ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps causées par des phénomènes astrophysiques géants, telle la rotation fusionnelle d'un couple de trous noirs gros comme plusieurs dizaines de Soleil, ou la collision violente entre deux étoiles à neutrons (des astres très compacts), dix fois moins lourds.

Avant même que les instruments LIGO (deux télescopes aux Etats-Unis) et Virgo (en Italie) ne soient à nouveau agités par de telles secousses, ils ont réalisé une jolie prouesse : la réconciliation des deux grandes théories de la physique moderne, réputées incompatibles, la mécanique quantique et la relativité générale. La première, élaborée dans les années 1920, décrit le monde des particules. La seconde, développée par Albert Einstein en 1915, est parfaite pour comprendre les objets massifs comme les étoiles ou les galaxies. Mais, dès lors que trop de matière est concentrée dans une petite région, comme dans un trou noir, les deux théories ne collent pas entre elles...

Augmenter la précision des détecteurs

Or LIGO et Virgo ont permis en quelque sorte ce mariage impossible en utilisant la mécanique quantique pour repérer les phénomènes de relativité générale. « Une branche entière de la physique, l'optique quantique, a été développée pour être appliquée à la détection des ondes gravitationnelles », souligne Antoine Heidmann, directeur du laboratoire Kastler-Brossel (LKB) (CNRS, Sorbonne Université, Collège de France). Et cela dès les années 1980. Cette branche s'est ramifiée ensuite en communication, calcul ou information quantiques.

A l'époque, le but était d'augmenter la précision des détecteurs d'ondes gravitationnelles, car les sources de telles vibrations ont beau être énormes, elles ne font que des ridules à la surface de l'espace-temps. Arrivées sur Terre, elles



Le détecteur Virgo, en Italie, et ses deux bras de 3 kilomètres chacun. THE VIRGO COLLABORATION

déplacent les objets de moins du millième du diamètre d'un proton. Autant dire un clapotis dans une mer démontée. Mais, même après avoir amorti toutes les perturbations extérieures, il reste l'irréductible, l'équivalent d'une écume d'origine quantique. C'est-à-dire les phénomènes intrinsèques à la matière, qui perturberont les mesures. Par exemple, dans un faisceau laser, comme ceux utilisés par LIGO et Virgo, le nombre de grains de lumière, les photons, est variable et aléatoire, causant inévitablement des fluctuations dans les mesures.

C'est là que la mécanique quantique arrive à jouer contre elle-même. Au début des années 1980, les chercheurs, dont Antoine Heidmann, montrent, en théorie, comment réduire ce bruit « quantique ». En 1985, une première démonstration est faite, aux célèbres Bell Labs américains, deux ans avant les Français. « Ensuite, à la construction de LIGO et Virgo, il n'était pas nécessaire de disposer de cette technique car il y avait des perturbations plus importantes à réduire en priorité », rappelle Pierre-François Cohadon du LKB. Ce n'est qu'en 2004 que l'Allemand Roman Schnabel à l'Institut Albert-Einstein d'Hanovre relance la technique pour l'appliquer avec succès cinq ans plus tard à un détecteur réel, GEO600, quatre fois plus petit que Virgo. Depuis le 1^{er} avril,

les jumeaux de ces appareils allemands sont installés sur LIGO et Virgo. Comment fonctionnent-ils ? D'abord, il faut rappeler le principe de la détection de ces ondes. Il s'agit de créer l'analogie d'un système en équilibre, susceptible de basculer à la moindre pichenette, tel un funambule aux deux bras étendus qu'un moineau atterrisant sur une main ferait chuter. LIGO et Virgo disposent de bras de « lumière » : deux longues cavités (de 4 kilomètres chacune pour LIGO et de 3 kilomètres pour Virgo) perpendiculaires parcourues par un faisceau laser. Ce faisceau, divisé en deux dans les deux bras, est recombinaison ensuite afin de comparer précisément les distances parcourues. Si une onde gravitationnelle passe, elle déforme différemment les deux bras, et l'« équilibre » est rompu.

Réduire les perturbations

Mais, si la lumière fluctue plus que le clapotis gravitationnel, les chercheurs ne verront rien. Pour réduire ces perturbations, une partie du faisceau principal est détournée vers un cristal qui le transforme en deux faisceaux jumeaux, qui ont la propriété d'avoir des fluctuations exactement opposées l'une de l'autre. Ainsi, cette nouvelle lumière, dite comprimée, pourra, par interférence avec le faisceau principal, com-

prendre l'essentiel du bruit quantique total. Magique et efficace pour gagner de 5 % à 10 % de précision et augmenter ainsi le volume détectable de ciel d'où pourraient venir ces ondes.

Malheureusement, rien n'est gratuit. La lumière a en fait deux propriétés appariées, l'intensité (la hauteur des « vagues ») et la phase (le moment d'arrivée du sommet de la « vague »). En « comprimant » l'une, la phase, on « décomprime », l'autre, l'intensité, qui sera donc plus « bruitée »...

Pour l'instant ce n'est pas grave, mais cela le sera à l'étape suivante, dans deux ans environ. A ce moment-là, les lasers seront plus intenses pour améliorer les performances. Mais qui dit laser plus intense, dit aussi plus de « poussée » radiative sur les miroirs les réfléchissant, qui vont donc « bouger » et perturber les mesures. Et d'autant plus qu'on aura augmenté ces fluctuations d'intensité en réduisant celles sur la phase.

Mais les opticiens quantiques ont des idées et sont déjà en train d'élaborer un nouveau faisceau magique dont les caractéristiques sont variables, comprimant quand il faut l'intensité ou la phase. Le tout tiendra dans une nouvelle cavité de 300 mètres. Une petite concession pour entretenir l'union quantique et relativiste. ■

DAVID LAROUSSIERE

Un signal du troisième type ?

LIGO/Virgo ont, depuis le 1^{er} avril, repéré sept nouvelles ondes gravitationnelles potentielles, des candidates à confirmer qui s'ajoutent aux onze événements des années précédentes. Celui du 26 avril suscite beaucoup d'intérêt car il pourrait correspondre à une émission par une source encore jamais vue. Ni une fusion de trous noirs ni une collision d'étoiles à neutrons, mais, peut-être l'engloutissement d'une étoile à neutrons par un trou noir. « Si ce scénario, prédit par la théorie, est confirmé, il permettrait d'étudier un type nouveau de dynamiques, où le trou noir massif déchiète la « petite » étoile à neutrons. Jusqu'à présent, les fusions observées concernent au contraire des objets sensiblement de même taille », indique Frédéric Daigne, professeur à Sorbonne-Université à l'Institut d'astrophysique de Paris. Cela permettrait par exemple de mieux connaître la « solidité » des étoiles à neutrons.

Embrouilles à propos de l'accès aux revues scientifiques

ÉDITION - Un projet d'accord prévoit une baisse des tarifs d'abonnement. Certains estiment qu'il entrave le développement du libre accès

Depuis plusieurs années, les chercheurs s'irritent de l'augmentation importante des prix des abonnements aux revues scientifiques, souvent plus de 5 % par an en moyenne. L'irritation est d'autant plus grande qu'ils travaillent gratuitement pour ces revues, en donnant leur avis avant publication, en participant bénévolement à leurs comités éditoriaux...

Alors, en France, lorsque, le 16 avril, un préaccord sur une baisse des tarifs d'abonnement de 13,3 % a fuité, on pouvait s'attendre à de la satisfaction. Pas tout à fait...

L'accord, révélé par le journaliste Martin Clavey sur son blog, Soudofscience.fr, concerne l'éditeur Elsevier et l'association Couperin. Le premier est le leader mondial de l'édition scientifique avec plus de 2500 journaux, qui publient environ 25 % de la production française. Le second est un consor-

tium national qui rassemble depuis vingt ans la plupart des universités, CHU, organismes de recherche, pour lesquels il négocie périodiquement les tarifs d'abonnement. Le projet d'accord, qui doit encore être transformé en protocole avant d'être signé, porte sur quatre ans (2019-2022) pour une facture, non communiquée, proche des 35 millions d'euros par an (sur la base des chiffres précédents), ce qui correspond environ au tiers des dépenses françaises d'accès aux journaux.

Même si Couperin souhaitait jusqu'à 25 % de baisse, cette diminution est historique. Tout comme un catalogue beaucoup plus complet de revues médicales. Mais c'est un second volet de l'accord qui fâche, notamment la Société française de physique, le groupe spécialisé de l'Alliance des sciences et technologies du numérique, aussi appelé Allistene

(CNRS, Inria, CEA...), et le Comité pour l'accessibilité aux publications en sciences et humanités, qui appellent, par communiqué, peu ou prou à corriger ce contrat, voire à ne pas le signer.

Développement du libre accès

Ce second volet porte sur l'accès ouvert aux publications scientifiques, c'est-à-dire la mise à disposition gratuite des résultats de recherches largement financées sur fonds publics. Depuis une quinzaine d'années, de plus en plus d'éditeurs ou de chercheurs s'engagent par différents moyens vers cet *open access* (OA) : articles gratuits (avec frais de publication, voie dite « dorée »); dépôt sur des sites dits « archives » des versions préliminaires ou publiées après une certaine période (voie dite « verte »); soutien public pour des éditeurs « gratuits » (voie dite « diamant »)...

Mais des critiques estiment que l'accord dresserait des obstacles au développement du libre accès en France.

Le texte contredirait ainsi des dispositions récentes en faveur de la science ouverte, comme le plan national annoncé en juillet 2018 ou le plan S, à l'échelle européenne, présenté un mois plus tard. Tous deux obligent en quelque sorte les chercheurs à publier en accès ouvert, soit dans les archives, soit dans des journaux en OA, afin de rendre immédiatement disponible la connaissance. Mais si l'accord avec Elsevier prévoit bien la mise à disposition gratuite des manuscrits publiés dans les archives, celle-ci n'interviendrait qu'au bout de... deux ans. Ou, pour être plus exact et complexe, soit immédiatement, pour les abonnés d'Elsevier du monde entier, mais en streaming; soit un an, pour tous, toujours en stream-

ing; soit, pour tous et sans streaming, au bout de deux ans ! Pour les uns, cela n'incitera pas les chercheurs à faire l'effort de déposer leur article dans l'archive ouverte nationale HAL, puisque l'éditeur s'en charge à moyen terme. Pour les autres, c'est au contraire favorable car c'est un moyen de massivement alimenter HAL avec environ 13 000 articles par an.

L'option streaming fait également tiquer car, comme une vidéo sur le Web, le fichier de l'article reste chez Elsevier, qui, du coup, aura des informations sur les consultations de HAL. Ce dernier devra en outre être modifié afin de se conformer à cet accord. Cette « clause donne une emprise trop importante à un éditeur privé sur les développements nationaux en matière d'accès ouvert », tacle le texte des spécialistes d'Allistene.

D'autres controverses portent sur les licences associées à ces tex-

tes, plus restrictives chez Elsevier que sur HAL. Ou sur la durée, quatre ans, de l'accord dans un monde éditorial qui change si vite... Autant de détails que le futur protocole d'accord, dont la rédaction a débuté lundi 13 mai, devra régler. Ces hiatus technico-juridiques sont en fait le résultat notamment de l'absence de consensus en France, entre disciplines et entre types d'établissements, sur la meilleure manière d'accélérer l'accès ouvert.

En tout cas, le ministère de la recherche compte sur la ristourne avec Elsevier pour alimenter un fonds de 2,5 millions d'euros destiné à soutenir l'innovation dans la science ouverte. A condition que de gros « clients » – universités ou organismes publics – ne fassent pas défaut à la signature, ce qui mettrait à mal l'équilibre financier... ■

D. L.