

L'exposé de Patrice Hello

Les ondes gravitationnelles, une nouvelle fenêtre sur l'Univers

L'exposé de Patrice Hello sur les ondes gravitationnelles fait suite et complète celui de Luc Blanchet, effectué le 6 octobre 2014 sur le même thème.

L'exposé de Luc Blanchet a été pour une grande part consacré aux ondes gravitationnelles émises par les systèmes binaires d'objets compacts (étoiles à neutrons et de trous noirs). Son propos était en particulier de présenter la relation entre les paramètres orbitaux de ces systèmes d'une part, la forme et les paramètres caractérisant l'onde produite d'autre part. Il s'est attaché, dans ce contexte des binaires compacts, à nous décrire les méthodes utilisées dans les calculs des caractéristiques des signaux gravitationnels, ceci à chaque étape du processus conduisant à la "coalescence", c.a.d la fusion finale.

Le propos de Patrice Hello est centré sur le détecteur européen VIRGO, sa version "avancée" (Advanced VIRGO), secondairement sur ses concurrents américains, japonais et indiens. Le conférencier s'est attaché à la technique à l'oeuvre dans VIRGO et aux facteurs en affectant la sensibilité. Il a précisé les enseignements que l'on pouvait tirer de l'absence de détection, avec la sensibilité déjà atteinte pour différentes catégories d'émissions gravitationnelles ; et décrit la longue bataille menée par les astrophysiciens pour élever les seuils de détection aux niveaux estimés nécessaires, pour chacune de ces catégories.

Son exposé se structure en six volets d'importance inégale :

Un **premier volet** (diapositives 3 à 12) présente ce que sont les ondes gravitationnelles : leur nature, les équations qui en contrôlent la dynamique, leurs effets sur la matière, les conditions de leur production.

Un **second volet** (diapositives 13 à 17) rappelle rapidement la variété des sources astrophysiques émettrices et, pour certaines d'entre elles, la forme et les caractéristiques quantitatives de leurs signaux gravitationnels.

Un **troisième volet** (diapositives 18 à 28) se consacre aux techniques en oeuvre dans la projet VIRGO : le principe et le schéma du dispositif de détection par interférométrie ; la relation théorique entre le déphasage observé dans le dispositif et l'amplitude de l'onde ; les différents bruits affectant la précision de la mesure et leurs déterminants ; la longue lutte pour atténuer ces bruits et parvenir à la courbe de sensibilité / fréquence effectivement atteinte à l'heure actuelle.

Un **quatrième volet** (diapositives 29 à 35) replace le projet VIRGO dans le réseau des collaborations mondiales autour des ondes gravitationnelles. Dans cet ensemble, la coopération entre VIRGO et son partenaire/concurrent américain LIGO est particulièrement étroite. Cette coopération constitue une force de frappe formée de trois détecteurs distants les uns des autres, avec des performances comparables, assurant un repérage directionnel des sources émettrices.

Un **cinquième volet** (diapositives 36 à 42) présente une sélection de résultats actuels de la coopération LIGO/VIRGO. En effet, vu la sensibilité déjà atteinte, l'absence de détection est porteuse d'informations sur les événements ou phénomènes continus associés à la production d'ondes gravitationnelles : informations sur les limites supérieures de la fréquence de ces événements, informations sur les probabilités de présence ou sur l'intensité de ces phénomènes continus. Ce volet traite également de l'apport que constitue le rapprochement des informations portées par les signaux gravitationnels et celles portées par d'autres "messagers" (ondes électromagnétiques, flux de neutrinos ...)

Un **dernier volet** enfin évoque le futur proche, avec les augmentations de sensibilités prévues à court terme (Advanced VIRGO et Advanced LIGO) : gain d'un facteur 10, ce qui laisse espérer un gain d'un facteur 1000 sur le nombre d'événements détectables sur une période déterminée ; également, le futur plus lointain avec les détecteurs de troisième génération et la mise en oeuvre de techniques spécifiques, pour réduire au maximum les différents types de bruits affectant la sensibilité.

La suite du compte rendu reprend, sur certains de ces volets, des points qui nous ont paru particulièrement éclairants et quelques questions que nous nous sommes posé. Nous nous attardons un peu longuement sur le premier volet. Nous terminons en rapportant les thèmes de la discussion, ayant fait suite à l'exposé.

Nature et équation des ondes gravitationnelles.

Les ondes gravitationnelles sont une perturbation de la métrique de l'Espace-Temps. Elles sont engendrées par des mouvements de masses, en analogie avec les ondes électromagnétiques qui sont produites par des mouvements de charge.

La métrique. Un élément sur lequel il faut être clair concerne la *métrique*. La métrique est une propriété de l'espace-temps en chacun de ses points ; propriété *intrinsèque* car associée à des *quantités conservant la même valeur, quels que soient les repères utilisés* pour identifier les points de cet espace-temps. L'emploi du terme de *tenseur* marque ce caractère intrinsèque. Dans un système de repérage donné, le tenseur métrique - associé à un certain point $[t,x,y,z]$ prend la forme concrète d'un tableau de 16 nombres, positionnés sur quatre lignes et quatre colonnes :

d'où la notation $g_{\mu\nu}$, les indices μ et ν désignant respectivement les lignes et les colonnes du tableau. Ces indices peuvent prendre chacun les valeurs 0 (habituellement liées à la direction temporelle) et 1,2,3 (les trois directions spatiales) ; si t,r désigne génériquement un point de l'espace temps, le *champ tensoriel* sera noté $g_{\mu\nu}(t,r)$.

Les quantités associées au tenseur métrique - invariants lorsqu'on change de système de repérage - sont les "longueurs" des "trajectoires" entre deux points quelconques de l'espace-temps ; les guillemets marquent ici l'inadaptation du vocabulaire courant pour intégrer le temps comme quatrième dimension. Sans nous étendre, disons que de telles longueurs comportent une composante spatiale - une distance - et une composante temporelle - une durée - qui séparément n'ont pas de valeurs indépendantes du repérage choisi ; et qu'elles se calculent par une intégrale mobilisant les valeurs du tenseur métrique le long de la trajectoire étudiée.

Le modèle de l'onde plane. Dans son exposé, Patrice Hello nous donne un exemple de la manière dont le champ tensoriel métrique se trouve modifié par une onde gravitationnelle. Il s'agit d'un cas idéalisé - dont la réalisation impossible constitue néanmoins un modèle simple et utile - celui d'une *onde plane*. Le tenseur $g_{\mu\nu}$, par l'existence de cette onde, se trouve modifié d'un tenseur $h_{\mu\nu}$ qui, dans un repérage Ot, Ox, Oy, Oz où le dernier axe Oz est celui de la direction de propagation, prend pour expression :

$$h_{\mu\nu} = e^{i\omega\left(t - \frac{z}{c}\right)} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_x & 0 \\ 0 & h_x & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Cette expression correspond au produit d'un facteur périodique de pulsation ω et d'un tenseur constant, dans lequel interviennent deux amplitudes possiblement différentes h_+ et h_x . Elle cristallise trois propriétés des ondes gravitationnelles :

1. elles se propagent à la vitesse de la lumière c
2. elles sont transverses : parmi les composantes de la métrique, seules celles qui sont orthogonales à la direction de propagation sont modifiées. Les composantes faisant intervenir le temps ($g_{0\nu} = g_{\nu 0}$) et la direction de propagation ($g_{4\nu} = g_{\nu 4}$) restent inchangées
3. elles sont sans trace : la somme des composantes diagonales ($g_{\mu\mu}$) de la métrique reste inchangée

L'onde plane et les mouvements de matière. Il faut noter d'emblée, sur ce thème, un point important : dans l'interaction de la matière avec les ondes gravitationnelles en effet, deux phénomènes interfèrent : *d'une part, la modification des positions relatives* des particules impliquées et donc de leur distances mutuelles, et *d'autre part, la modification même du calcul de ces distances*, lié à la dynamique du champ tensoriel. La prise en compte simultanée de ces deux phénomènes est source de difficulté technique. Aussi bien, les développements mathématiques établissant, dans le cadre de la Relativité Générale, l'équation des ondes et celle des mouvements de la matière traversée par ces ondes, exigent-ils une grande rigueur, notamment dans la spécification des repères locaux utilisés.

Patrice Hello ne pouvait dans le temps imparti entrer dans de tels développements et s'est restreint à nous avancer quelques idées essentielles. Il nous présente ainsi l'équation contrôlant le mouvement relatif de deux particules initialement situées dans un même plan perpendiculaire à la direction de propagation ; prises dans l'onde gravitationnelle, elles vont rester dans ce même plan (pas de déplacement longitudinal), mais leur distance se modifie au cours d'un mouvement périodique de même pulsation ω .

Pour donner une version simple de cette équation, choisissons un repère lié à la première particule et ayant son axe Ox passant par la seconde ; *plaçons nous en outre dans le cas où seule l'amplitude h_+ n'est pas nulle*. Au cours de son mouvement dans un tel repère, la seconde particule reste alors sur ce même axe Ox . L'équation donnant, à un instant t , son déplacement δx autour de sa position initiale x est, à un facteur de phase près, $\delta x = 1/2 h_+ x \cos \omega t$. Il est clair sur cette équation que l'amplitude h_+ est sans dimension, et que le déplacement maximal est proportionnel à la distance séparant les deux particules. Dans cette équation de déplacement résident les bases des méthodes actuelles de détection des ondes gravitationnelles.

Modes de polarisation. Les deux amplitudes h_+ et h_x correspondent à deux *polarisations* différentes des ondes gravitationnelles. Patrice Hello nous a montré, à l'aide d'images animées, l'effet de ces deux polarisations sur un ensemble de particules initialement disposées en cercle, dans le plan Ox, Oy autour d'une particule de référence placée en O . Les valeurs de ces deux amplitudes sont indépendantes l'une de l'autre ; elles résultent de la configuration particulière du système émetteur des ondes gravitationnelles considérées et sont calculables à partir des données de cette configuration. Le mouvement réel des particules est une combinaison linéaire des deux polarisations.

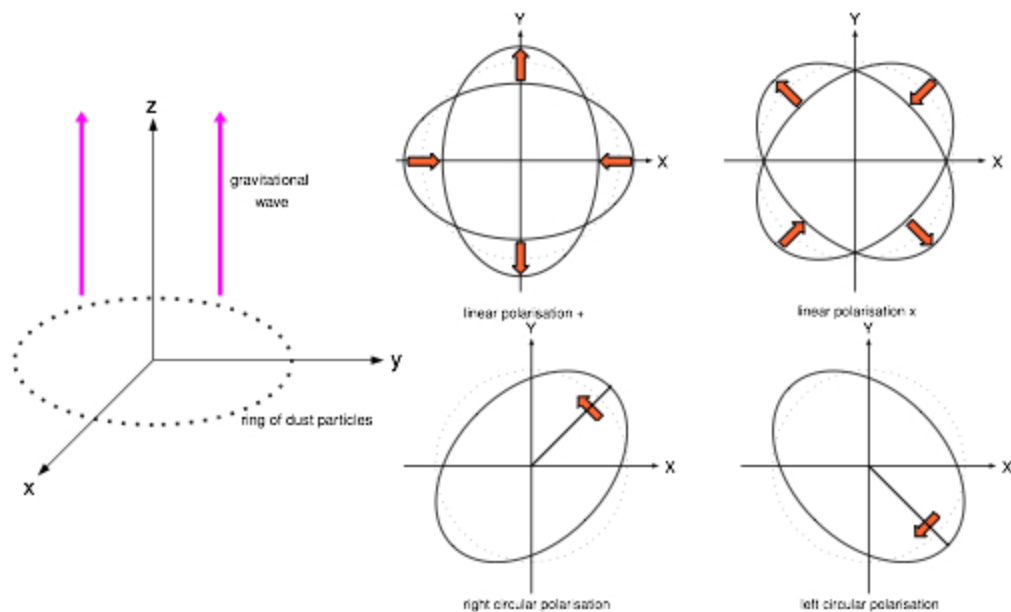
Des précisions complémentaires peuvent être trouvées dans l'exposé précédent de Luc Blanchet et dans les cours de Relativité Générale, comme celui de Ericourgoulhon (page 152 cours de Master-2 2010-2011). Un calcul simple, exprimant la position initiale des particules dans le plan

Ox, Oy - sous la forme polaire $\rho \cos \theta, \rho \sin \theta$ - et s'appuyant sur les équations complètes des déplacements périodiques δx et δy en fonction du temps, permet de comprendre les différentes dynamiques possibles : celle des particules prises individuellement et celle de la figure d'ensemble qu'elles forment. Donnons quelques exemples particuliers, extraits d'un cours de Luc Blanchet, différant selon les valeurs des amplitudes et illustrant des cas limites.

1. deux premiers cas extrêmes : le cas où l'amplitude h_+ est seule présente et le cas où l'amplitude h_x est seule présente. Ces deux cas correspondent chacun à un mode de polarisation *linéaire* ; les mouvements des particules situées sur les axes Ox et Oy (pour le premier cas) et sur les axes diagonaux (pour le second) sont rectilignes. La figure d'ensemble des particules, situées initialement sur un cercle, est une ellipse centrée sur l'origine, se contractant et s'étirant alternativement sur des axes *fixes*.
2. deux autres cas extrêmes : les cas $[h_x = i h_+ = i h]$ et $[h_x = -i h_+ = -i h]$ avec h réelle, correspondent à deux modes de polarisation *circulaire*, le mode droit et le mode gauche ; les mouvements des particules sont des petits cercles de même rayon, centrés sur les positions initiales avant le passage de l'onde. Ces mouvements, d'une particule à l'autre, présentent un décalage de phase lié à leur position angulaire θ dans le plan Ox, Oy . On peut penser ici aux mouvements circulaires des particules d'eau, au passage des vagues sur la mer. La figure d'ensemble des particules est une ellipse, toujours centrée sur l'origine, mais gardant la même forme et tournant dans son plan avec une pulsation $\omega/2$

Pour bien illustrer ces considérations, nous reproduisons ici une des figures de l'exposé de Luc Blanchet sur les modes de polarisation.

Modes of gravitational waves



Le mode de génération. Les ondes gravitationnelles sont générées par des masses de matière en mouvement, désignées comme leurs *sources*. Les caractéristiques de ce mouvement sont en conformité avec une propriété des ondes gravitationnelles, illustrée dans la figure précédente, savoir la propriété d'être quadrupolaires. La distribution des masses en mouvement doit donc présenter *un moment quadrupolaire variable*, ce qui suppose une certaine disymétrie : une masse isolée tournant autour d'un axe de symétrie et en chute libre dans l'espace ne génère pas d'ondes gravitationnelles.

Luc Blanchet et Patrice Hello ont ainsi abordé les relations entre : *d'une part*, la dynamique du moment quadrupolaire d'une source, *d'autre part* la valeur des composantes du tenseur $h_{\mu\nu}$ modifiant la métrique, sur un point donné de l'espace-temps. L'équation représentant cette relation sera une équation *à retard* : la valeur des composantes $h_{\mu\nu}$ à un instant t sur la position spatiale r sera fonction de la dynamique du moment quadrupolaire de la source à l'instant $t - \tau$, τ étant le temps mis par l'onde pour accomplir le trajet entre la source et la position r . Ici encore, les développements mathématiques qui conduisent à cette équation, dite *formule du quadrupôle*, se rattachent aux formalismes de la Relativité Générale. Ils mobilisent en outre une approximation, valable pour les *sources faiblement relativistes*, où seules interviennent la

distribution de la densité de masse et sa dynamique. On pourra consulter encore une fois les cours de Relativité Générale déjà cités.

La formule du quadrupôle. Les caractéristiques quantitatives de l'onde - sa fréquence, ses amplitudes, le flux d'énergie transporté - sont toutes reliées à la dynamique du moment quadrupolaire de la source. Il a paru donc utile de rappeler ce qu'est ce moment. Il s'agit d'un tenseur symétrique, caractérisant à un instant la source - après choix d'un repère - par un tableau de 9 valeurs numériques. Ce tenseur s'apparente au *tenseur d'inertie*, à partir duquel il peut être calculé.

Dans la formule ci dessous, les composantes du moment quadrupolaire sont notées Q_{ij} . Les indices i et j prennent chacun les valeurs 1, 2 ou 3, associées aux trois directions spatiales. Si $s = [s_1, s_2, s_3]$ désigne une position spatiale dans la région de la source et que $\rho(t, s)$ désigne la densité de masse de la source sur la position s à l'instant t , les composantes Q_{ij} ont pour expression :

$$Q_{ij}(t) = \int \rho(t, s) \left(s_i s_j - \frac{\delta_{ij}}{3} |s|^2 \right) ds$$

Les composantes spatiales h_{ij} du tenseur $h_{\mu\nu}$, à l'instant t sur la position r valent quant à elles, selon la formule reproduite de Luc Blanchet dans son exposé diapositive 16,

$$h_{ij}(t, r) = \frac{2G}{c^4 r} \left[\frac{d^2 Q_{ij}}{dt^2} \left(t - \frac{|r|}{c} \right) \right]$$

$|r|$ étant dans cette formule la distance qui sépare la position r du centre de gravité de la source, source supposée ponctuelle à l'échelle de cette distance. On reconnaît bien ici l'effet retard, la symétrie du tenseur h , et la décroissance de l'amplitude, lorsqu'on s'éloigne indéfiniment du centre de gravité. On remarque aussi que la dynamique du moment quadrupolaire est prise en compte dans la dérivée seconde par rapport au temps : une croissance ou une décroissance linéaire du moment quadrupolaire ne générerait par exemple aucune onde gravitationnelle. Une variation périodique, par contre, le fera.

Toutefois la formule ci dessus, prise sans précaution, ne saurait rendre compte du caractère transverse des ondes gravitationnelles émises, puisqu'il n'y a aucune raison que les composantes dans la direction Oz du moment quadrupolaire, et donc du tenseur h , soient nulles. En réalité un facteur complémentaire intervient dans la formule complète du quadrupole ; ce facteur, dit opérateur de projection transverse (voir cours de Relativité Générale de Luc Blanchet et d'Eric

Gourgoulhon) mobilise les coefficients directeurs de la droite Or par rapport aux axes Ox, Oy, Oz du repère ; son introduction permet à la fois - si notre compréhension des formules est exacte - de rétablir la transversalité et de rendre compte de la modulation des amplitudes selon la position de la direction Or (qui est en fait la direction vers l'observateur), par rapport aux assymétries du système source (On peut consulter à ce sujet la dispositive 27 de l'exposé de Luc Blanchet).

Variété des sources astrophysiques et caractéristiques des signaux

Dans l'exposé de Patrice Hello, comme dans l'article Cavalier/Hello "Virgo et la quête des ondes gravitationnelles", on trouve une présentation très claire des différentes sources astrophysiques, et de leurs signaux gravitationnels. On peut classer ces signaux en trois grandes catégories, en rapport avec la dynamique du moment quadrupolaire émetteur :

Les **signaux ponctuels**, ou détectables sur une courte période de temps, s'interprétant comme la trace d'évènements astrophysiques. Tels sont les signaux émis par des systèmes binaires compacts dans la phase de coalescence, où les partenaires se rapprochent en tournant de plus en plus vite pour finir par fusionner ; le modèle de ces signaux est le "chirp", signal quasi périodique, mais dont l'amplitude et la fréquence augmentent simultanément. Se placent également dans cette catégorie les signaux émis lors d'évènements de type effondrement gravitationnel (Supernovae), dont la signature - sous forme de pics et de rebonds - diffère nettement de celle des chirp.

Les **signaux continus**. Tels sont les signaux périodiques émis par les systèmes binaires compacts loin de la coalescence, comme ceux du pulsar binaire PSR1913+16, cité en exemple de détection indirecte. Les basses fréquences en jeu (moins de un dix-millième de Herz pour PSR1913+16) les rendent difficilement cependant détectables par les instruments actuels. Des pulsars *isolés*, présentant une déformation cause d'asymétrie, peuvent également être sources d'ondes gravitationnelles ; lorsqu'on compare les limites actuelles de sensibilité avec les amplitudes attribuables aux ondes émises par de tels pulsars, la détection de ces ondes ne semble pas hors de portée (page 20 de l'article Cavalier/Hello)

Les **signaux stochastiques** de type "bruits de fond", tel l'hypothétique fond cosmologique d'ondes gravitationnelles, non encore détecté mais dont la connaissance du spectre de puissance en fonction de la fréquence apporterait de précieuses informations complémentaires à celles du fond cosmologique électro-magnétique.

Ordre de grandeur des amplitudes et des puissances. Ce moment de l'exposé offre à Patrice Hello l'occasion de donner quelques ordres de grandeur concernant les fréquences et les amplitudes des ondes gravitationnelles, ainsi que les puissances transportées ; et aussi de donner

des formules semi-empiriques liant amplitudes et puissances avec les caractéristiques dynamiques des sources émettrices. Retenons ici que les très faibles amplitudes ne sont pas incompatibles avec des puissances considérables : ainsi à une distance de 10 Mpc, l'amplitude de l'onde générée par la coalescence de deux trous noirs stellaires ne sera par exemple que de 10^{-20} , alors que la puissance totale pourra atteindre 10^{50} !. Retenons aussi les enseignements des formules, dérivées de celle du quadrupôle en puissance :

1. La première donne cette puissance en fonction de la taille du système émetteur, de sa masse totale, de son assymétrie et de la période impliquée dans sa dynamique. Elle montre que la puissance sera d'autant plus forte que l'assymétrie, la masse et la taille du système seront grandes et que la période sera courte.
2. La seconde donne la puissance en fonction de la compacité du système, de son assymétrie, et des vitesses en jeu dans la dynamique rapportées à la vitesse de la lumière ; donc en fonction de facteurs sans dimension, avec une valeur maximale égale à 1 : la puissance sera d'autant plus grande que le système sera plus assymétrique, compact et rapide. Le maximum $\frac{c^5}{G}$ de puissance, lorsque tous les facteurs valent 1, est alors énorme, de l'ordre de $3.6 \cdot 10^{52}$ watts !

VIRGO et la course à la sensibilité

La difficulté de détection de signaux gravitationnels réside dans leur amplitude extrêmement faible. L'ordre de grandeur des amplitudes des signaux que l'on espère pouvoir capturer, savoir $h \approx 10^{-21}$, a un sens très concret : c'est la variation relative de la distance entre deux objets, deux miroirs par exemple dans un interféromètre, induite par le passage de l'onde. Autrement dit, sur une distance de 100 km, il faut pouvoir mesurer une différence de 10^{-7} nanomètres ! Seuls des interféromètres sont capables d'atteindre de telles performances.

Pour que le signal puisse être extrait du bruit de fond avec un degré de confiance suffisant, il faut que ce bruit de fond ait une amplitude inférieure. Et ce, sur la totalité de la bande de fréquence des ondes gravitationnelles cibles des instruments, savoir ici de la dizaine de Herz jusqu'au delà du kilo Herz. C'est le challenge auquel VIRGO s'est attaqué.

Après avoir rappelé les formules reliant dans l'interféromètre le déphasage à la variation de distance, puis reliant cette dernière à l'amplitude, Patrice Hello détaille les différentes composantes du bruit de fond, les techniques utilisées pour les réduire, les performances finalement atteintes à l'heure actuelle (voir aussi l'article Cavalier/Hello, pages 18-19).

Le bruit de comptage de photons. Ce bruit incontournable affecte directement la précision de la mesure du déphasage. L'intensité de ce bruit, exprimée dans ses conséquences sur l'amplitude, est d'autant plus petite que seront grandes 1) la distance effective parcourue par la lumière dans les bras de l'interféromètre et 2) la puissance délivrée par le laser source de cette lumière. De là, les "astuces" optiques pour "replier" les trajets lumineux au sein de bras ayant une longueur apparente de 3 km seulement ! et atteindre ainsi des distances de l'ordre de la centaine de km. De là également d'autres astuces visant à augmenter - par "recyclage" de la lumière - l'intensité lumineuse circulant dans les bras de l'interféromètre, à partir de la même source laser.

Par ailleurs, dans les bras, la lumière circule dans un vide qui n'est pas parfait, et les fluctuations de l'indice optique du gaz résiduel affecte la mesure de la phase. Patrice Hello nous présente une diapositive montrant la qualité du vide requis et atteint : pression de 10^{-7} millibar, et ce dans 7000 m³ !

Le bruit sismique. En deça du kilo Herz, ce n'est pas le bruit de comptage qui est dominant, mais le bruit sismique : il faut amortir ces bruits en s'isolant du sol au maximum. Mais les performances de réduction que l'on peut atteindre dans VIRGO lui imposent sa limite basse dans la bande de fréquence, de l'ordre de quelques Herz.

Enfin le **bruit thermique**, conséquence de la température sur les vibrations stochastiques des miroirs et de leur fils de suspension. Ces deux bruits sont dominants dans la zone intermédiaire de la bande de fréquence, entre quelques Herz et quelques centaines de Herz.

A la fin de ce volet, Patrice Hello nous présente deux graphiques de même nature. Le premier concerne la sensibilité visée - c.a.d. le niveau maximum de bruit toléré - ce, en fonction de la fréquence des ondes sur la bande passante de VIRGO et pour les différentes sources de bruits évoqués. Le second concerne les sensibilités - les niveaux de bruit maximum - effectivement atteints à différentes étapes, entre 2003 et 2009

VIRGO dans la coopération/compétition mondiale

Le projet VIRGO (et son interféromètre installé à Cascina près de Pise) correspond à une collaboration européenne, actuellement de 180 collaborateurs, initié au début entre l'INFN italien et le CNRS français, puis rejoint par la Hollande (2006), la Pologne (2008) et la Hongrie (2008).

Ce projet s'intègre dans une collaboration internationale, principalement avec le projet américain LIGO depuis 2007, et renouvelé en 2011 puis en 2014. Des discussions ont également commencé depuis 2012 avec le projet japonais KAGRA.

LIGO correspond quant à lui à une collaboration entre plus de 85 laboratoires situés aux USA, en UK, en RFA et en Australie. Il compte actuellement environ 900 membres. Les laboratoires pilotes sont le CALTECH et la MIT. LIGO exploite à l'unisson deux observatoires d'ondes gravitationnelles : l'Observatoire Livingston LIGO en [Livingston, Louisiane](#) , et l'Observatoire Hanford LIGO, situé près de [Richland, Washington](#) . Ces sites sont séparés par 3002 km. Puisque les ondes gravitationnelles sont censés se déplacer à la vitesse de la lumière, cette distance correspond à une différence de temps d'arrivée allant jusqu'à dix millisecondes. Grâce à l'utilisation de [triangulation](#), la différence effective de temps d'arrivée d'un même signal sur les deux sites permet de contraindre la direction de la source de l'onde dans le ciel.

Les trois sites, VIRGO, Livingston LIGO et Hanford LIGO, sont ainsi complémentaires, chacun des détecteurs ne pouvant prétendre seul à une détection précise. Les coïncidences de perception d'un signal entre les trois interféromètres correspondent au minimum nécessaire pour reconstruire intégralement le signal gravitationnel (direction dans le ciel et polarisation).

Déjà des résultats !

Comme nous l'avons dit, l'absence de détection avec les sensibilités actuellement atteintes apporte des informations. Patrice Hello énumère ainsi ce qu'il en est pour différentes sources astrophysiques :

Concernant **les signaux de coalescence** de systèmes binaires compacts. L'amplitude des ondes décroissant avec la distance (en $1/r$), les instruments avec leur sensibilité actuelle ne peuvent détecter ces événements qu'à l'intérieur d'un volume relativement limité. Ce volume est trop petit cependant pour qu'un de ces événements survienne dans un délai raisonnable, même dans les hypothèses les plus optimistes des astrophysiciens sur le taux de survenue de ces événements par unité de volume (le megaparsec cube) et par an. La non-détection apporte une information négative, en ce sens qu'elle *n'infirmes pas* la borne supérieure des prédictions théoriques. Les gains de sensibilité espérés à court terme (d'un ordre de grandeur) vont toutefois repousser d'un facteur 10 l'horizon de détection, et donc multiplier le volume par mille. Dans l'hypothèse optimiste, des événements devraient alors être détectés : cette détection apporterait une information *positive*, confirmant ou précisant le taux supputé par les astrophysiciens.

Concernant **les signaux ("bursts")** émis par des sources "impulsionnelles" (telles les supernovae). Les données actuellement présentées dans la littérature (cf [publication citée](#) par le conférencier) exploitent des tests de sensibilité ; ces tests mobilisent une batterie de signaux théoriques de formes prédéterminées - paquets d'ondes sinus-gaussiens, ou encore simplement gaussiens, par exemple, dans différents versions de polarisation - lesquels signaux sont supposés ressembler aux signaux gravitationnels réels ; le principe est d'injecter ces signaux sur un fond

de bruit connu, à un taux et sur une durée déterminés ; puis d'analyser la réaction de l'instrument et des algorithmes de traitement (y compris en comptabilisant les fausses alertes), en fonction du type de signal, de ses amplitudes et de sa fréquence centrale. De telles analyses aboutissent par exemple à conclure, de l'absence de toute réaction positive de l'instrument (pendant un temps de fonctionnement déterminé), avec 90% de chance de ne pas se tromper, que le taux de survenue de bursts de caractéristiques données, est nécessairement inférieur à 3 événements par an. En effet, si ce taux était supérieur, l'instrument aurait réagi positivement (par exemple) au moins une fois.

Concernant les **signaux continus**. Les choses se présentent sous un jour favorable, du moins concernant les ondes émises par certains pulsars isolés. La fréquence de ces pulsars - donc des ondes qu'ils peuvent émettre - entre en effet dans l'intervalle des fréquences accessibles par les instruments de VIRGO/LIGO. Reste la question de l'amplitude. A partir du ralentissement constaté de la rotation de tels pulsars, et en faisant l'hypothèse que la totalité de ce ralentissement est due à l'émission d'ondes gravitationnelles, on peut calculer l'amplitude théorique de ces ondes (la "spin-down limit"). On s'est aperçu que cette amplitude était parfois au dessus de la limite d'amplitude détectable par les instruments pour les fréquences considérées (Voir par exemple la figure 5 de l'article Cavalier/Hello). Puisque l'on peut remonter de la fréquence et de l'amplitude des ondes gravitationnelles aux caractéristiques d'inertie (moment) et d'asymétrie (excentricité) du pulsar émetteur, leur détection apportera des informations sur ces caractéristiques impossibles à obtenir, dans certains cas, à partir de l'analyse des ondes électromagnétiques.

Concernant les **signaux stochastiques** liés au fond cosmologique. Nous n'avons pas noté d'éléments précis concernant ce dernier point. On trouve dans l'article Cavalier/Hello un court paragraphe concluant à une limite supérieure de la densité d'énergie de l'éventuel fond stochastique d'ondes gravitationnelles "permettant déjà d'exclure certains modèles cosmologiques".

Patrice Hello termine ce volet de l'exposé par quatre dispositifs traitant de l'utilité de mettre en relation la détection des ondes gravitationnelles avec celle de l'émission d'autres "messagers" (neutrinos, sursauts gamma,...). Cette utilité se place sur deux plans : 1) faciliter la recherche d'émissions gravitationnelles (en limitant dans l'espace et le temps les fenêtres d'observation, du fait de leur association possible avec ces messagers) ; 2) apporter une meilleure connaissance de la dynamique de certains phénomènes - coalescences, effondrements - par l'analyse du timing d'arrivée des différents messagers.

Le futur proche

Comme nous venons de le voir, les interféromètres en cours de fonctionnement n'ont pas encore détecté directement le passage d'ondes gravitationnelles. Il convient cependant de souligner que ces instruments, qui représentaient un immense défi lors de leur approbation dans les années 90, ont atteint les sensibilités prévues. Ils restent la meilleure stratégie disponible pour détecter ces ondes dans un avenir proche.

Tous les espoirs sont donc dans la seconde génération du réseau LIGO-VIRGO avec (Advanced) LIGO et (Advanced) VIRGO. Les nouveaux détecteurs sont conçus pour améliorer la sensibilité d'un facteur 10 sur l'ensemble de la bande de fréquence à l'horizon 2015. C'est déjà partiellement le cas avec un des détecteur de LIGO. Ce gain d'un facteur 10 en sensibilité entraîne la possibilité de prendre en compte 1000 fois plus d'événements !

Quand une telle sensibilité sera opérationnelle (voir article Cavalier/Hello), les coalescences d'étoiles binaires seront visibles jusqu'à une distance de 140 Mpc et celles de trous noirs jusqu'à 1 Gpc. Avec de telles performances, plusieurs événements sont attendus chaque année, même dans les scénarii les plus défavorables. Au-delà de la détection directe des ondes gravitationnelles, l'observation de tels phénomènes pourra avoir de nombreuses retombées astrophysiques : modèles de formation et de mort stellaire, équation d'état de la matière dans les étoiles à neutrons ou observation directe de trous noirs. Par ailleurs, les coalescences de systèmes binaires constitueront un nouveau type de chandelle standard utilisable dans l'estimation des paramètres cosmologiques.

En ce qui concerne les étoiles à neutrons en rotation, on pense que la « spin-down limit » d'une quarantaine de pulsars sera dépassée en un an d'observation et les limites sur l'ellipticité des pulsars atteindront alors 10^{-4} voire 10^{-5} .

Enfin, une troisième génération de détecteur se prépare déjà avec le projet japonais KAGRA, dont la mise en service est prévue aujourd'hui pour 2018. KAGRA est un interféromètre de 3 km, construit dans les tunnels de la mine (pour diminuer le bruit sismique) de Kamioka au Japon et utilisant des miroirs cryogéniques (pour diminuer le bruit thermique).

La discussion

A la fin de l'exposé, plusieurs questions ont été posées au conférencier.

La première question, sur la possibilité d'un **détecteur spatial**, a permis au conférencier d'évoquer le projet LISA, déjà mentionné par Luc Blanchet. Basé sur trois satellites, il est orienté

sur les très basses fréquences (de l'ordre de 10^{-4} Herz) et destiné à l'étude de sources différentes de celles visées par VIRGO, par exemple les systèmes de binaires ordinaires, les trous noirs galactiques. Projet principalement européen, dans les cartons, en concurrence avec d'autres projets, à échéance lointaine (2034)

La seconde question porte sur l'existence d'une particule associée aux ondes gravitationnelles, savoir le **graviton**. La réponse de Patrice Hello est d'abord de souligner que l'on est avec les ondes gravitationnelles concernées ici, compte tenu des échelles de longueur et d'énergie en jeu, hors du domaine quantique. On reste dans le domaine classique relativiste. On peut certes transposer les propriétés des ondes gravitationnelles sur celles de cette hypothétique particule, en lui attribuant par exemple un spin 2. On peut même assigner une limite supérieure à sa masse "la rendant compatible avec une masse nulle". Mais selon Patrice Hello, on ne pourra jamais le détecter, on ne le verra jamais, et pour un physicien "un objet qu'on ne peut pas voir n'existe pas"

L'un des participants s'est accordé avec Patrice Hello pour penser qu'on ne tirera, de l'observation d'ondes gravitationnelles, aucun enseignement sur la **gravité quantique**.

Une quatrième intervention concerne la relation entre la précision de certaines mesures particulières - par exemple celle d'une période de temps avec une valeur évoquée de 10^{-9} - et la précision à laquelle on estime globalement vérifiée une théorie, par exemple la Relativité Générale avec une valeur mentionnée de 10^{-4} .

Une autre question concerne la **limite de fréquence inférieure** des ondes gravitationnelles : jusqu'où va-t-on dans les très basses fréquences et à quelles sources correspondent-elles ? Patrice Hello répond à ce sujet en rappelant l'une de ses dispositifs montrant une gamme de fréquence allant jusqu'à 10^{-16} Herz ; il reparle de l'éventuel fond gravitationnel cosmologique, de nature stochastique, et de son spectre de puissance et il évoque les nombreux travaux des théoriciens de l'inflation et du big bang ; il mentionne quelques méthodes d'observation qui permettraient d'accéder à certaines des fréquences de ce spectre, de l'ordre par exemple de 10^{-8} Herz : la détection de variations dans la période de certains pulsars, de décalages temporels, dus à l'interaction d'ondes gravitationnelles du fond stochastique sur la lumière qui nous parvient de ces pulsars. Une équipe de Marseille, notamment, travaille sur ce type de méthodes, sans résultat pour le moment.

Prolongeant cette question, un intervenant évoque la phase d'**inflation**, et les traces que les ondes gravitationnelles - de très basses fréquences - pourraient avoir laissé dans la polarisation du fond cosmologique ou du fond infra-rouge. On sait maintenant le caractère erroné des conclusions que les américains pensaient avoir tirées des observations dans l'Antarctique, par le télescope Bicep

2. Il faut souhaiter que les observations effectuées avec le satellite Planck amèneront du nouveau sur ce thème. La détection des traces de ce type d'onde serait une preuve forte en faveur de la théorie de l'inflation.

Un intervenant pose la question de la capacité de **mise en corrélation** de la détection d'un signal gravitationnel - celui émis par la coalescence d'un système binaire par exemple - avec celle du signal d'autres messagers. Patrice Hello nous rappelle les données du problème ; 1) en premier lieu, la détection par un seul détecteur ne fournit aucune information directionnelle ; pour avoir une indication sur la position du phénomène sur la sphère céleste, il faut qu'il ait été signalé par au moins trois détecteurs ; et encore cette indication ne sera pas très précise ; en second lieu, les signaux gravitationnels auront tendance à arriver avant les autres, car ces signaux interagissent très peu avec la matière, en comparaison avec les signaux électromagnétiques, voire même les flux de neutrinos. Dans ces conditions, la capacité de mettre en corrélation ces différents signaux repose sur la coopération étendue d'un grand nombre de partenaires, dans le cadre d'un programme de suivi systématique de grandes zones du ciel. La discussion se prolonge alors sur la collaboration /compétition entre VIRGO et LIGO et l'impact que peut avoir sur le travail en commun leur décalage de sensibilité, et le fait qu'ils ne recouvrent pas tout à fait les mêmes régions du ciel. Patrice Hello, sur ce thème de la détection des signaux et leur interprétation astrophysique, insiste sur le fait qu'un "chirp" (signalant potentiellement une fusion de deux objets compacts), lorsqu'il entre dans la bande passante du détecteur, a très peu de risque d'être un artefact.

Deux questions finales concernent l'implication des scientifiques, et en particulier de l'équipe de Patrice Hello, dans la **fabrication des instruments**, dans la maintenance et la **gestion du site**. Patrice Hello souligne que le design est bien l'affaire des physiciens eux mêmes, qui déterminent les instruments dont ils ont besoin. Le conférencier énumère ensuite différentes sociétés, laboratoires et équipes qui sont intervenus dans la fabrication : mention est ainsi faite, entre autres, d'entreprises sous-traitantes, mais aussi du [Laboratoire des Matériaux Avancés](#) de l'IN2P3 à Lyon (couches réfléchissantes de haute précision), du département technique du [LAM](#) à Marseille (tubes), etc. La gestion du site est confiée à la société de droit privé, [EGO](#), fonctionnant sous la loi italienne, avec des fonds publics des pays partenaires.