

LE CHANT DU CYGNE DE DEUX TROUS NOIRS, ENFIN ENTENDU!

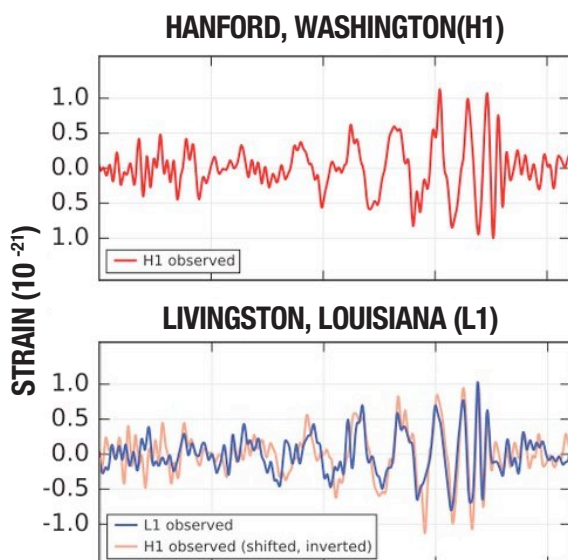
L'observation directe de la coalescence de deux trous noirs via la détection des ondes gravitationnelles émises est un événement majeur pour la Physique. Les membres du groupe de Mécanique et Gravitation de la Faculté des Sciences de l'UMONS sont impliqués directement, depuis de très nombreuses années, dans l'étude et l'enseignement de la Relativité Générale, en particulier l'étude des trous noirs et des ondes gravitationnelles.

En novembre 1915, Albert Einstein publie les équations de la relativité générale. Plus que sa complexité mathématique inhérente, cette théorie introduit un paradigme nouveau au niveau de notre perception de l'espace et du temps. Déjà en 1905, Einstein avait montré qu'espace et temps ne sont que deux facettes d'une même entité : l'espace-temps. Mais là encore, cet espace-temps, l'Univers, restait la scène rigide sur laquelle se déroulent les événements. Avec la relativité générale, l'espace-temps devient une entité dynamique : les interactions gravitationnelles y sont décrites en termes de la géométrie de l'Univers. Peu après, en 1916, il prédit l'existence d'ondes gravitationnelles et en 1918 il montre que celles-ci se propagent à la vitesse de la lumière.

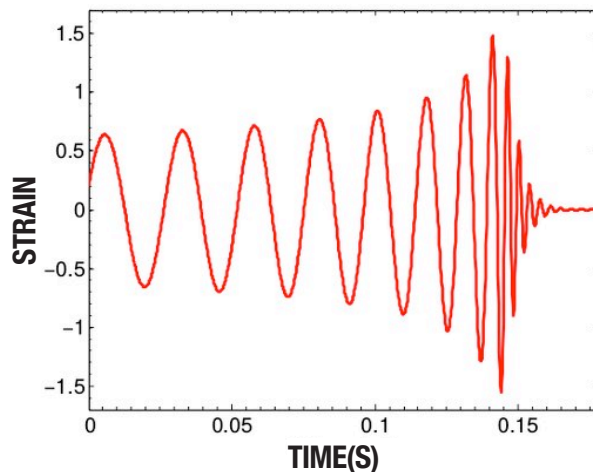
De quoi s'agit-il? Ces ondes consistent en fluctuations de la géométrie, au même titre que les ondes provoquées par la chute d'une pierre dans l'eau calme d'un lac consistent en ondulations qui se propagent en déformant sa surface. Ici c'est une onde de déformation de la géométrie de l'espace qui se propage. Mais si un simple caillou suffit à déformer la surface d'un lac, pour générer des ondes gravitationnelles observables il faut un phénomène astrophysique de nature cataclysmique majeure : le big-bang lui-même ou, plus modestement, l'explosion d'une supernova, le collapse d'une étoile en pulsar (étoile à neutrons), la formation d'un trou noir, la fusion d'étoiles à neutrons ou de trous noirs en une seule entité. C'est ce dernier phénomène : le chant du cygne de deux trous noirs, respectivement de 29 et 36 masses solaires, qui ont fusionné pour en créer un nouveau

de 62 masses solaires, qui a été observé. Après une longue période, calme, d'approche, de plusieurs millions d'années, le phénomène final s'est déroulé, en deux dixièmes de secondes! Deux dixièmes de secondes durant lesquels la différence de 3 masses solaires est convertie en énergie!

Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse la matière, à la suite de la modification de la géométrie qu'elle induit, les longueurs des objets, perpendiculaires à sa direction de propagation, changent. Ainsi un objet, convenablement orienté, se contracte dans un sens alors qu'il se dilate dans l'autre, au rythme de l'onde qui le traverse. Ces modifications des longueurs sont infinitésimales ; dans le cas présent leur variation relative est de l'ordre de 10^{-21} (ainsi la distance de Mons à Nice change de l'épaisseur d'un proton). Pour la détecter, on a construit des interféromètres constitués de deux bras, perpendiculaires l'un à l'autre, de 4 km de longs. Il s'agit d'un système dans lequel on sépare la lumière d'un faisceau laser en deux parties, chacune envoyée dans un des bras de l'interféromètre, et qui, après plusieurs allers-retours, sont amenées à se recombiner, à interférer, réalisant ainsi une figure typique constituée d'une alternance de franges sombres et claires. La position de ces franges dépend de la distance parcourue par chacune des parties du faisceau scindé. Lors du passage d'une onde gravitationnelle au travers du plan des deux bras, ces franges vont elles-mêmes se mettre à osciller en mesure avec les variations des longueurs des bras de l'interféromètre, suivant un rythme (« une signature » disent les physiciens), caractéristique du phénomène à l'origine de l'onde. La difficulté de la détection tient avant tout à la reconnaissance d'un aussi



A gauche les signaux enregistrés à Handford et Livingstone par les détecteurs LIGO^[1]; ci-dessous le signal prédit par la théorie^[4]



faible signal, noyé dans une multitude d'effets parasites, allant des vibrations générées par un camion passant au loin, aux fluctuations thermiques et quantiques même de la matière constituant les miroirs.

Le 14 septembre 2015, deux détecteurs récemment mis en activités, situés respectivement à Handford (au Nord-Ouest des Etats-Unis, dans l'état de Washington) et à Livingstone (en Louisiane, dans le Sud des Etats-Unis) ont enregistré, à des instants séparés de 7 millisecondes (le temps nécessaire à l'onde, se déplaçant à la vitesse de la lumière, pour passer successivement par chacun des sites), deux signaux aux profils semblables. Ceci exclut l'effet d'un bruit parasite : les deux sites sont à 3000 km l'un de l'autre. Ces profils sont caractéristiques des derniers instants de deux trous noirs spiralant l'un autour de l'autre, pour finalement plonger l'un sur l'autre quasiment à la vitesse de la lumière et fusionner en un nouveau trou noir. Avec toute la prudence que demande l'analyse et la confirmation de l'événement observé, ce n'est que ce 11 février que son annonce officielle a eu lieu^[1]. L'importance du résultat tient moins à l'observation de l'onde gravitationnelle elle-même qu'à la nature du processus astrophysique observé. En effet, nous avons déjà une preuve (indirecte) de l'émission d'ondes gravitationnelles au travers de l'observation de l'accroissement de la période de rotation du pulsar binaire PSR 1913+16 par J. Taylor et R. Hulse, ce qui leur valut le Prix Nobel de Physique 1993.

Ce sont des travaux théoriques de T. Damour qui ont permis d'affirmer que le processus observé s'inscrivait parfaitement dans le cadre de la relativité générale et s'y interprète comme résultat de l'émission d'ondes gravitationnelles^[2]. Ce que les physiciens de la collaboration Virgo/LIGO (pour Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) ont obtenu est la première observation directe de l'émission d'ondes gravitationnelles accompagnant le phénomène de coalescence de deux trous noirs ! Ici encore, parallèlement à des simulations numériques, ce sont également des travaux de T. Damour et ses collaborateurs^[3, 4] qui ont joué un rôle de tout premier plan dans l'interprétation physique du signal mesuré.

Même si cette découverte ne changera rien au niveau de notre quotidien — seul un auteur de science-fiction peut imaginer utiliser ces ondes comme moyen de communication — ces détecteurs ouvrent une nouvelle fenêtre sur notre compréhension de l'Univers. C'est à ce titre que nous avons ici affaire à un événement scientifique majeur. Dans les prochaines années, après l'Italie et les Etats-Unis, c'est en Allemagne, en Inde, au Japon, en Australie, et ceci avant le lancement d'un détecteur spatial, que de nouveaux instruments vont être mis en activité. Sur chacun des sites, ce seront des équipes internationales de physiciens qui œuvreront, une perspective d'avenir pour les jeunes, curieux des mystères de l'Univers. ■

N. Boulanger, Ph. Spindel

RÉFÉRENCES :

- ^[1] B.P. Abbott et al., *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, PRL 116, 061102 (2016)
- ^[2] Pour un aperçu élémentaire de la question, voir : C. Deneufbourg, *Analyse d'un nouveau test de la relativité générale : Le Pulsar 1913+16, mémoire de licence, Univ. de l'Etat à Mons, 1984*
- ^[3] A. Buonanno, T. Damour, *Effective one-body approach to general relativistic two-body dynamics*, Phys. Rev. D59, 084006 (1999) ;
- ^[4] T. Damour, A. Nagar, *An Improved analytical description of inspiralling and coalescing black-hole binaries*, Phys. Rev. D. 79 (2009) 081503
- ^[5] Pour en savoir plus, consultez par exemple les sites suivants : <http://www.ligo.org> et https://gravitational_waves.ihes.fr