

Einstein, un siècle après : l'onde gravitationnelle, pourquoi faire ?

Un événement scientifique majeur

mercredi 17 février 2016, par [KRIVINE Hubert](#) (Date de rédaction antérieure : 16 février 2016).

La toute récente mise en évidence des ondes gravitationnelles par l'expérience de LIGO (USA) est certes une prouesse technique incroyable mais c'est surtout un événement scientifique majeur pour deux raisons : i) il confirme la théorie de la relativité générale, ii) il ouvre une voie totalement nouvelle d'exploration de l'Univers. Cet article vise à mettre en perspective cette découverte

La lunette de Galilée

Depuis la nuit des temps, bergers, marins, astrologues, prêtres, astronomes et savants ont scruté le ciel. Ils l'ont fait avec les moyens du bord : en regardant à l'œil nu les lumières qui nous parvenaient des astres. Puis à la Renaissance, Galilée a eu l'idée d'amplifier ces lumières à l'aide de la lunette des Hollandais. Il découvrit les montagnes de la Lune, les satellites de Jupiter, les taches solaires et surtout la confirmation du modèle de Copernic qui affirmait le mouvement de la Terre. Toutes choses interdites par l'Église. Sur le plan scientifique notre vision du monde sera bouleversée, mais pas seulement, sur le plan sociétal également.

Les ondes radio

Mais qu'était cette lumière porteuse d'information sur l'Univers ? Il a fallu attendre les travaux de Maxwell dans la seconde moitié du XIX^e siècle pour en avoir une idée plus précise. Il établit dans ses célèbres équations le lien entre l'électricité et le magnétisme, jusque là phénomènes séparés. Il établit que les charges électriques en mouvement créent une onde qu'on appellera onde électromagnétique qui se propage dans tout l'espace. La lumière visible en est seulement un cas particulier caractérisé par une longueur d'onde : de 0,4 (pour le rouge) à 0.7 microns (pour le violet). À d'autres longueurs d'onde, cette onde existe mais n'est pas visible, comme les infrarouges (IR) ou l'ultraviolet (UV).

Le domaine est encore plus vaste : en deçà de la longueur d'onde des UV, il y a les rayons X puis gamma ; au-delà de celle des IR, les ondes radios. Tout ceci, Maxwell l'ignorait ; il avait seulement écrit une théorie qui prévoyait une telle onde. Trente ans plus tard, Hertz la mettait en évidence, par une première expérience de ce qu'on appellera ensuite la Transmission Sans Fil (TSF). Impossible encore une fois d'en minimiser les profondes implications sociales (imaginons une société sans internet, télévision, ou portable). Et encore une fois, dans le domaine scientifique, l'observation du ciel en dehors de la lumière visible (UV et IR) va ouvrir de nouveaux horizons.

Les neutrinos

Les neutrinos sont des particules élémentaires neutres postulées en 1930 par Pauli pour rendre compte de la conservation de l'énergie dans certaines réactions nucléaires et mises expérimentalement en évidence 26 ans plus tard. Ils interagissent très peu avec la matière et donc, bien que difficiles à détecter, ils peuvent véhiculer de l'information issue de zones éloignées et denses que l'observation optique ne saurait fournir. On parle de « télescopes à neutrinos ».

Les ondes gravitationnelles

En 1917, Einstein achevait sa théorie de la relativité générale. Comme avec les équations de Maxwell, cette théorie contenait une « équation d'onde » dont la solution était une onde se propageant aussi dans le vide à la vitesse de la lumière (300.0000 km/s). Chez Maxwell, cette onde était créée par tout déplacement de charges électriques, tandis qu'ici c'est une onde de nature tout à fait différente, elle est créée par tout mouvement accéléré de masses. L'usage est de dire que cette onde « déforme l'espace-temps ». Ce qui, avouons-le, est peu clair pour les non-initiés.

L'idée est que l'espace-temps est de façon général « déformé » par la présence de masses. Il faut de très grosses masses pour que cet effet soit décelable – sinon on s'en serait déjà aperçu ! Cette déformation signifie en pratique qu'au voisinage du Soleil par exemple les rayons lumineux sont courbés. Il y a plus : quand les masses sont accélérées, se génère une « onde gravitationnelle ». Tandis que les ondes électromagnétiques de Maxwell se détectaient en faisant apparaître un courant électrique sur une antenne, le passage de cette onde peut se détecter parce qu'elle modifie les distances sur les objets qu'elle traverse. Le problème est que cette modification est si dérisoire (voir plus loin) qu'Einstein avait les plus grands doutes sur sa possible mise en évidence expérimentale. Il faut des mouvements extrêmement rapides de masses extrêmement colossales et des détecteurs extrêmement sensibles.

Une bonne indication de l'existence de ces ondes avait été fournie en 1974 par la décroissance orbitale d'un pulsar binaire (une étoile orbitant autour d'une étoile à neutrons). Ce raccourcissement de l'orbite signifie une perte d'énergie et comme cette dernière doit se conserver, on devait la retrouver dans l'énergie de l'onde gravitationnelle émise. L'observation du raccourcissement de l'orbite va être en accord avec les prévisions théoriques. Mais ce n'était pas une preuve directe : après tout d'autres théories pouvaient expliquer la chose.

On peut raisonnablement saluer les résultats de la toute récente expérience de LIGO aux États Unis comme une preuve directe de l'existence de ces ondes gravitationnelles : on a vu, au 14 septembre 2015 à 11 h 51, deux distances situées à plusieurs milliers de kilomètres l'une de l'autre osciller une fraction de seconde exactement selon les prévisions théoriques décrivant la coalescence (la collision) de deux trous noirs. Ces distances étaient matérialisées par les bras de 3 km de long d'un interféromètre laser. La perte de matière due à la collision, trois fois la masse du Soleil, a fourni l'énergie de l'onde gravitationnelle. Ajoutons en passant que c'est aussi la preuve la plus directe de l'existence des trous noirs.

Un miracle technique

Pour espérer « voir » une onde gravitationnelle, il faut qu'entrent en jeu des masses énormes (au moins de dizaines de fois la masse du Soleil) animées de vitesses énormes (une fraction de celle de la lumière). Ceci ne peut être fourni que par la Nature ; mais il faut de plus être capable de mesurer des variations relatives de longueur infinitésimales de l'ordre de 10^{-20} à la puissance -20. soit un milliardième de fois l'épaisseur d'un cheveu sur la distance Paris-New York ! Il faut ensuite être capable de faire un vide valant 1 millionième de la pression atmosphérique dans 7000 mètres cubes.

Sans parler de l'appareillage qui doit être insensible aux vibrations occasionnées par les vagues d'un océan même lointain ou d'une baignoire qui se vide dans les environs.

Et grâce à tout cela et quelques milliards de dollars en moins, on sait maintenant que l'univers a connu un événement cataclysmique quelque part au-delà de la galaxie naine du Grand Nuage de Magellan, il y a quelques 1,3 milliards d'années.

Et alors ?

La même question s'est posée pour la découverte du boson de Higgs. Nous avons répondu qu'il n'y avait jamais de progrès décisif dans la connaissance qui ne soit suivi tôt ou tard - et de façon non prédictible - d'implications pratiques. Ici, il s'agit d'une confirmation forte de la théorie de la relativité générale au moment où les mystères de la matière et de l'énergie noires en justifiaient une relecture critique. C'est enfin la naissance d'une nouvelle sonde des profondeurs de l'univers dont la moisson ne saurait tarder.

Hubert Krivine

Paris le 15 février 2016

PS Une leçon aussi de cette narration est la fameuse « déraisonnable efficacité des mathématiques » selon le mot de Wigner . En effet, les ondes électromagnétiques ont été découvertes d'abord au bout du stylo, les neutrinos également et aussi les ondes gravitationnelles. Mais c'est un autre sujet.
