

UNE DÉTECTION HISTORIQUE

Jeudi 11 février 2016. Les équipes des collaborations *Ligo* et *Virgo* organisent une conférence de presse. L'euphorie règne et les sourires rayonnent. C'est qu'elles viennent d'annoncer avoir détecté des ondes gravitationnelles, le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure de Paris). C'est la première détection directe de ce type. L'événement observé par *Ligo* et noté GW150914 est un système binaire de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires, distant de 1,3 milliard d'années-lumière. Les deux détecteurs de *Ligo* ont enregistré le même signal avec seulement 7 millisecondes d'écart, le temps que l'onde se propage d'un détecteur à l'autre. Cette coïncidence ainsi que la forme du signal sont des indices convaincants que *Ligo* a enregistré une onde gravitationnelle. Les ondes gravitationnelles émises par les trous noirs constituent un signal très particulier : la fréquence et l'amplitude du signal

augmentent à mesure que les astres s'approchent de plus en plus vite en spirale l'un de l'autre. Les deux astres finissent par fusionner en formant un trou noir dont l'« horizon des événements », sa frontière en quelque sorte, est très déformée. Il se stabilise en une fraction de seconde et devient un trou noir en rotation sur lui-même, de forme plus régulière. C'est cette coalescence qui a produit des ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être détectées. L'analyse du signal enregistré indique que la masse du trou noir résultant est 62 fois celle du Soleil. Ainsi, pas moins de 3 masses solaires ont été converties ($E = mc^2$, rappelons-le) en ondes gravitationnelles en moins d'une seconde ! Et juste avant la fusion des deux astres, ces derniers tournaient l'un autour de l'autre à une cadence de 75 tours par seconde, à une vitesse voisine de la moitié de celle de la lumière...

Sean Bailly

solaire est d'environ 10^{46} watts, une valeur à comparer à la puissance lumineuse du Soleil, 10^{26} watts. Mais toutes les sources notables d'ondes gravitationnelles, aussi puissantes soient-elles, sont lointaines. En conséquence, les signaux percevables sur Terre sont extraordinairement faibles.

L'existence des ondes gravitationnelles a pour la première fois été prouvée de façon observationnelle par un biais indirect grâce à l'étude du pulsar binaire PSR B1513-16, découvert en 1974 par les Américains Joseph Taylor et Russell Hulse (ce qui leur valut le prix Nobel de physique en 1993). La diminution progressive de la période de révolution du système est liée à une perte d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Les calculs, notamment des physiciens français Thibault Damour et Nathalie Deruelle, ont confirmé l'accord entre la relativité générale et les observations.

Il restait ensuite à détecter directement les ondes gravitationnelles, un défi relevé par les

expériences *Ligo*, sur deux sites éloignés aux États-Unis, et *Virgo*, au sud de Pise, en Italie, capables de mesurer des variations relatives de distance similaires à la taille d'un atome comparée au diamètre du Système solaire.

Ces détecteurs reposent sur le principe de l'interférométrie. Les masses-test sont des miroirs suspendus aux extrémités de deux bras perpendiculaires où se propage un faisceau laser de grande puissance (jusqu'à 200 watts). La moindre variation de longueur des deux bras influe sur l'intensité de la lumière au point de rencontre des deux faisceaux laser.

DE LA SUPERPOSITION DES ONDES LASER

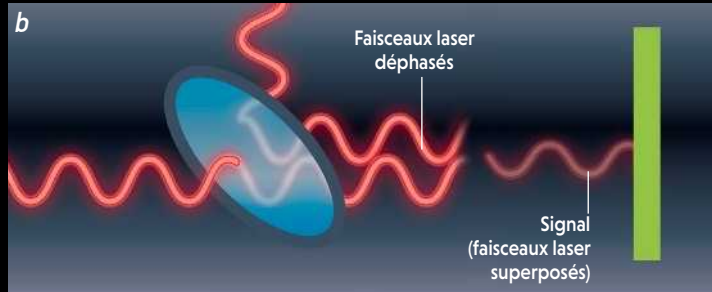
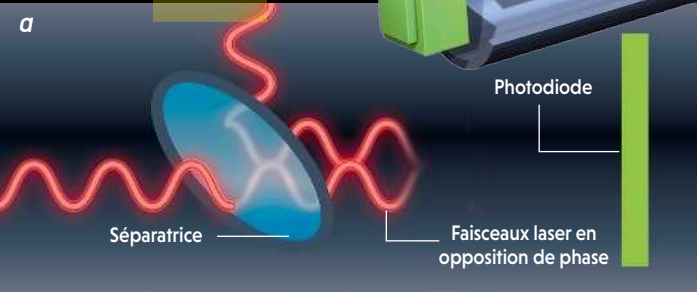
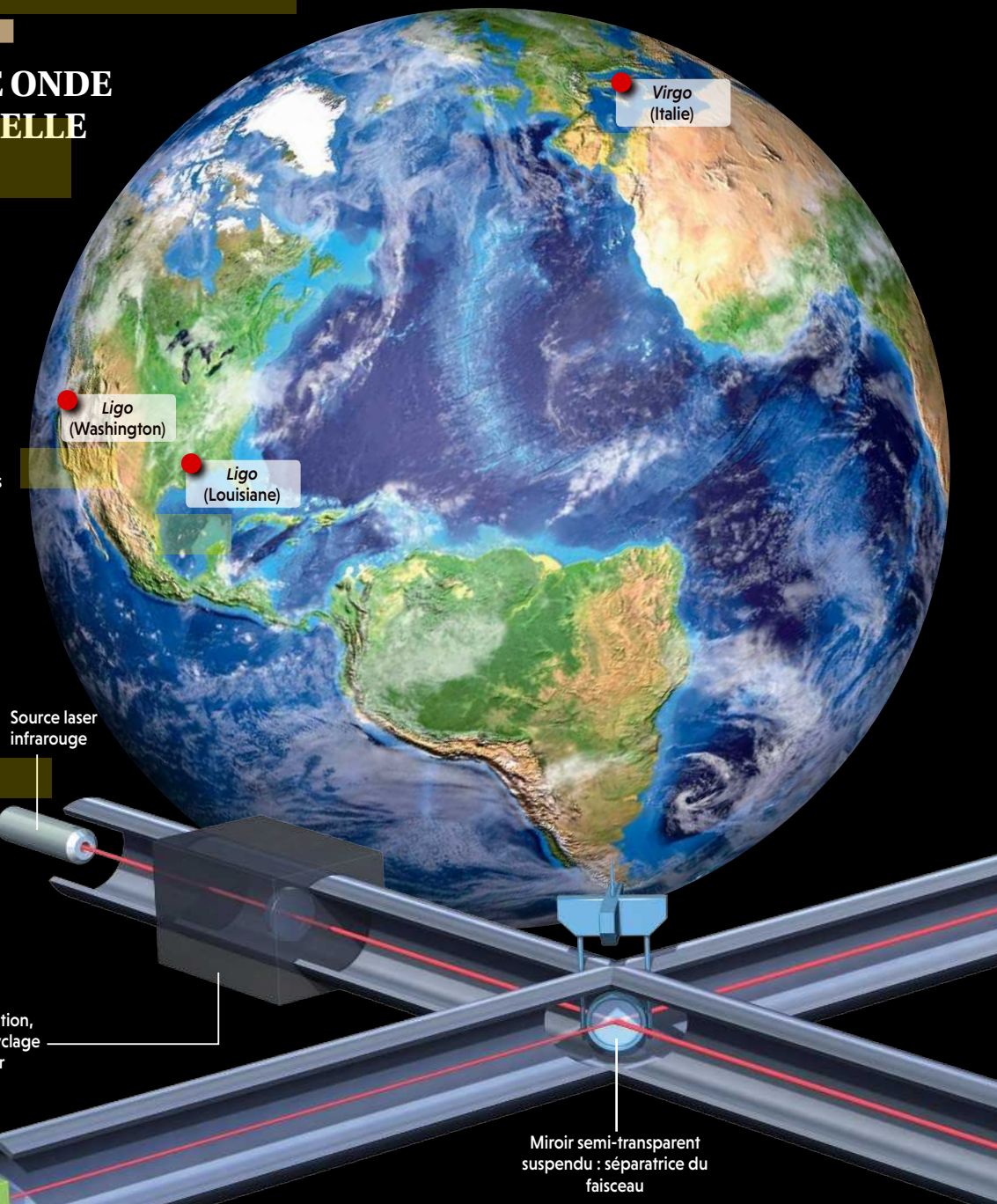
Plus les miroirs sont éloignés, plus la variation de distance induite par le passage d'une onde gravitationnelle est grande et donc « facile » à mesurer. Ainsi, pour l'expérience franco-italienne *Virgo*, les deux bras perpendiculaires mesurent trois kilomètres de long (voir l'encadré page suivante). Un laser infrarouge émet un faisceau qu'un miroir semi-transparent, la « séparatrice », scinde en deux. Chacun des deux faisceaux entre dans une cavité optique de trois kilomètres avant d'atteindre un miroir (la masse-test) qui le renvoie vers la séparatrice. La lumière fait un grand nombre d'allers et retours dans la cavité avant de sortir, ce qui augmente considérablement la longueur effective des bras du détecteur. Sur la séparatrice, les deux faisceaux se superposent et interfèrent, à cause du caractère ondulatoire de la lumière. Au départ, l'appareil est réglé de sorte que les deux faisceaux interfèrent de façon destructive : les crêtes de l'onde lumineuse d'un des faisceaux correspondent aux creux de l'autre, et inversement. Les deux ondes se compensent et le signal enregistré par le capteur est nul.

Lorsqu'une onde gravitationnelle passe, la longueur du trajet de chaque faisceau varie de façon infime. Cela modifie la position relative des crêtes et des creux des ondes laser. Leur superposition ne s'annule plus totalement et le capteur enregistre un signal. Les chercheurs en déduisent les variations de longueur des bras et concluent sur le passage éventuel d'une onde gravitationnelle. Avec les interféromètres actuels, les plus petites variations de longueur détectables sont de l'ordre de 10^{-20} mètre, un cent millième de la taille d'un proton ! Cependant, de nombreux phénomènes autres que les ondes gravitationnelles peuvent modifier la distance. Les physiciens doivent isoler le signal lié aux ondes gravitationnelles de ce « bruit ».

Les interféromètres fonctionnent indépendamment, mais aussi de concert. L'intérêt est de combiner leurs informations afin de

DÉTECTER UNE ONDE GRAVITATIONNELLE

Les ondes gravitationnelles déforment l'espace sur leur passage. Elles le contractent et l'étirent alternativement. Pour détecter le passage d'une telle onde, une solution est de mesurer les variations de la distance qui sépare deux objets, des masses-test. Les variations sont infimes même lorsque les masses sont séparées de plusieurs centaines de kilomètres. Il est néanmoins techniquement possible d'atteindre la sensibilité nécessaire avec un interféromètre géant (*Virgo, ci-contre*). En combinant en temps réel les données de plusieurs interféromètres répartis sur la Terre (*Virgo* en Italie, *Ligo* dans les États de Washington et de Louisiane), on peut estimer la position, sur la voûte céleste, de la source de l'onde gravitationnelle détectée.



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'INTERFÉROMÈTRE

Une source laser émet un faisceau qui est dirigé sur deux chemins perpendiculaires grâce à un miroir semi-transparent, la séparatrice. Les deux faisceaux parcourent des cavités de trois kilomètres de long, à l'extrémité desquelles se trouvent les deux masses-test. Lorsque les faisceaux ont effectué un grand nombre d'allers et retours, ils se rejoignent sur la séparatrice, où ils interfèrent. En

l'absence d'onde gravitationnelle, la longueur des deux trajets est définie de telle sorte que les deux faisceaux sont en opposition de phase, ils interfèrent de façon destructive (a). Si une onde traverse le détecteur, elle contracte ou étire la longueur d'un bras, l'annulation des deux faisceaux n'est alors pas parfaite et un signal est enregistré par la photodiode (b).