

Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine, très lointaine, deux trous noirs ont entamé une danse cosmique d'abord lente et à distance, puis de plus en plus rapide et rapprochée. Ils ont spiralé l'un autour de l'autre pendant une période qui pourrait avoir duré jusqu'à des milliards d'années. Puis la chorégraphie s'est achevée brutalement avec la collision des deux corps, qui ont fusionné en un trou noir plus massif.

Au cours de ce ballet, et surtout pendant l'ultime fraction de seconde, le tissu de l'espace-temps a fortement vibré, et ces vibrations se sont propagées à la vitesse de la lumière à travers le cosmos. Environ 1,3 milliard d'années plus tard, le 11 février 2016, les équipes des collaborations *LIGO* et *Virgo* ont annoncé avoir détecté ces « ondes gravitationnelles » dont l'existence a été prédite en 1916 par Albert Einstein. « Gravitationnelles », parce que la théorie de la relativité générale, dont on vient de fêter les cent ans, décrit la gravitation comme une manifestation de la déformation de l'espace-temps.

Une prédiction centenaire

L'événement est historique. Un siècle a été nécessaire pour relever les défis aussi bien théoriques qu'expérimentaux que posaient les ondes gravitationnelles. Dès 1905, en étudiant un modèle incomplet de gravitation incluant l'invariance de la vitesse de la lumière, Henri Poincaré évoquait déjà la notion d'« onde gravifique ». Mais c'est bien dans le cadre de la relativité générale qu'Einstein a émis l'hypothèse la plus convaincante des ondes gravitationnelles. Les physiciens ont mis plusieurs décennies à développer les outils mathématiques pour étudier ces ondes et comprendre qu'il était en principe possible de les détecter.

En 1974, les Américains Joseph Taylor et Russell Hulse ont donné la première preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles. Ils ont découvert le système binaire PSR B1913+16, qui contient un pulsar (une étoile à neutrons qui émet des ondes électromagnétiques de façon régulière, un signal utile pour effectuer des mesures précises), puis ils ont montré que la période de révolution du système diminuait lentement (les deux corps se rapprochaient l'un de l'autre) car ce dernier perdait

de l'énergie en accord avec les calculs de relativité générale où l'énergie est dissipée sous la forme d'ondes gravitationnelles. Les deux chercheurs ont reçu le prix Nobel de physique en 1993 pour ces travaux.

Il restait à détecter directement les ondes gravitationnelles. La piste la plus prometteuse était d'utiliser un interféromètre géant, concept imaginé dans les années 1960 et qui a connu une amélioration décisive dans les années 1970 sous l'impulsion de Rainer Weiss, du MIT (Institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis. Une première génération de ces dispositifs a été mise en service dans les années 2000 avec *TAMA300* au Japon, *GEO600* en Allemagne, *LIGO* aux États-Unis (situé sur deux sites séparés de plusieurs milliers de kilomètres, l'un à Livingston, en Louisiane, et l'autre à Hanford, dans l'État de Washington, voir les figures page 32) et *Virgo*, une expérience franco-italienne installée près de Pise.

Ces expériences n'ont pas observé d'ondes, mais elles ont ouvert la voie à des améliorations techniques qui ont permis d'augmenter la sensibilité des détecteurs *Advanced LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*), opérationnel depuis septembre 2015, et *Advanced Virgo*, qui prendra des données à partir de 2016.

Le signal tant attendu a été détecté le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure de Paris) par les deux détecteurs jumeaux de l'expérience *Advanced LIGO*. Ce signal entre dans l'histoire sous le nom GW150914, forgé avec la date et l'abréviation de *Gravitational Wave*. L'analyse des données étant assurée conjointement par les équipes de *LIGO* et de *Virgo*, la découverte est attribuée aux deux collaborations.

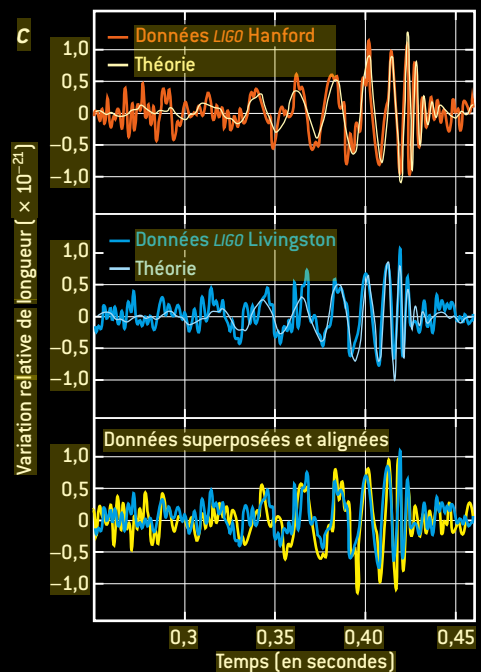
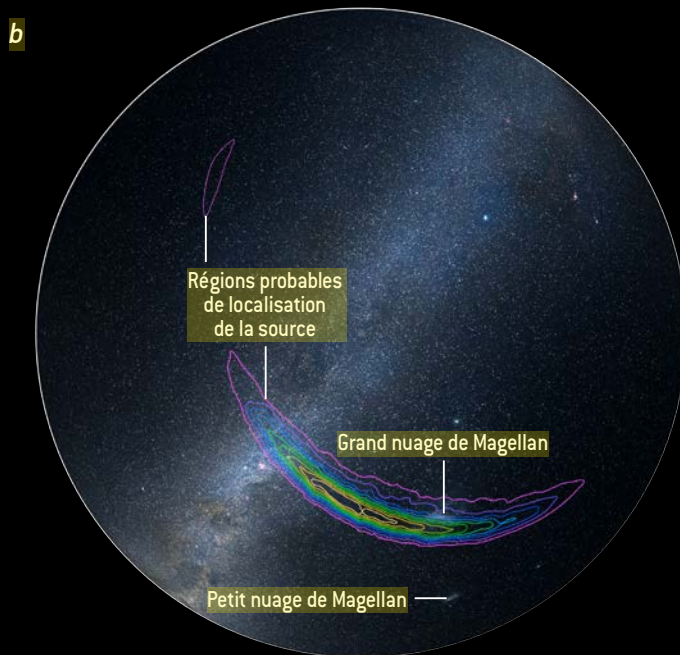
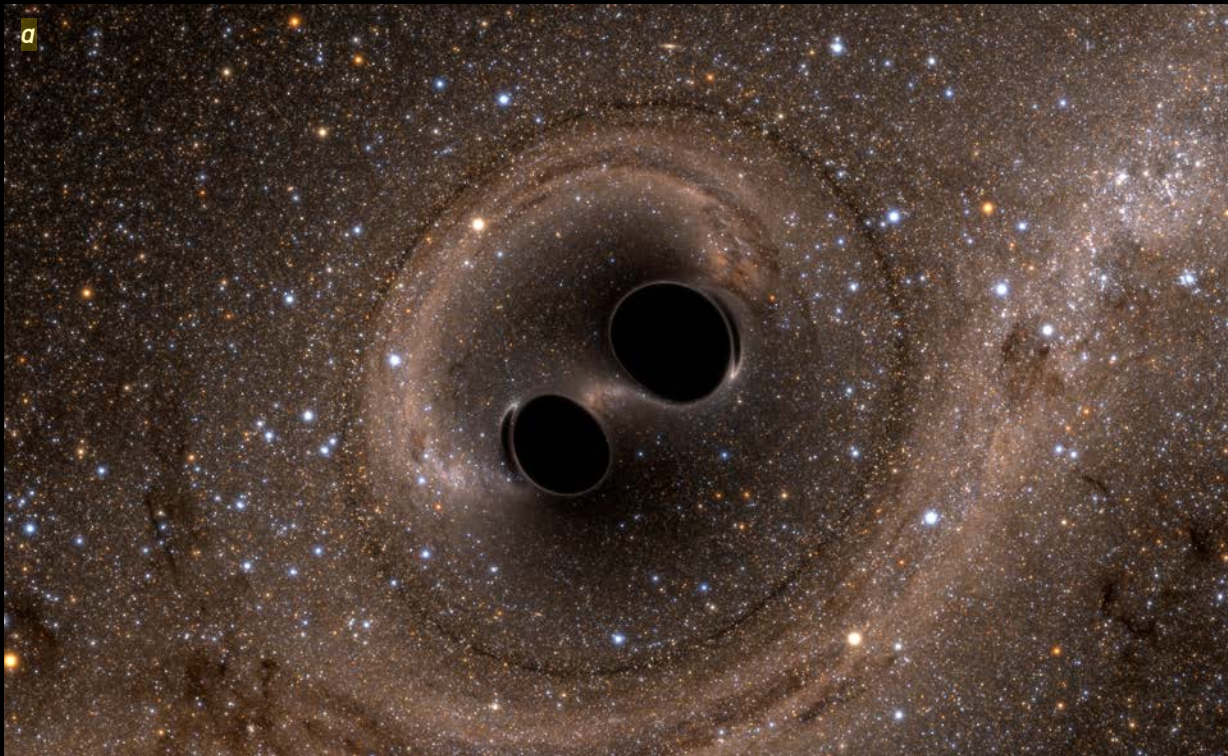
Le signal GW150914 est en réalité une double découverte : c'est la première détection directe d'ondes gravitationnelles, mais aussi la confirmation de l'existence de systèmes binaires de trous noirs (voir la figure à page ci-contre). Ces objets d'une densité extrême courbent l'espace-temps environnant de sorte que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière. Ainsi, les systèmes binaires de trous noirs isolés n'émettent aucun rayonnement et ne peuvent donc être détectés que par l'émission d'ondes gravitationnelles.

■ L'AUTEUR



Sean BAILY est docteur en cosmologie et journaliste à *Pour la Science*.

Des ondes émises
il y a 1,3 milliard
d'années
ont été enregistrées par
les interféromètres de *LIGO*
le 14 septembre 2015



LA FUSION DE DEUX TROUS NOIRS d'environ 30 masses solaires chacun a produit les ondes gravitationnelles détectées par LIGO. La simulation numérique [a] du système en coalescence montre comment ces objets déforment l'espace-temps dans leur voisinage. Le signal enregistré par les deux détecteurs de LIGO a permis d'estimer que le système était situé à près de un milliard d'années-lumière. Sachant que l'onde se propage à la vitesse de la lumière et que le signal est arrivé à Livingston 7 millisecondes avant d'atteindre Hanford [c], les physiciens ont délimité une zone

où se trouverait la source du signal : approximativement dans la direction du Grand nuage de Magellan, visible dans le ciel de l'hémisphère Sud [b, les courbes délimitent la région d'où viendrait l'onde gravitationnelle]. La similarité des signaux de Livingston et de Hanford [c, en bas] a été une preuve que les deux détecteurs avaient enregistré le même phénomène. Par ailleurs, le signal théorique d'ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs [c] reproduit de façon satisfaisante les variations de fréquence et d'amplitude du signal mesuré.

DES LASERS POUR DÉTECTER LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Dans les années 2000, une première génération d'interféromètres géants a vu le jour (*LIGO* sur deux sites aux États-Unis, *Virgo* en Italie, *GEO600* en Allemagne et *TAMA300* au Japon). Ces instruments utilisent les propriétés ondulatoires de la lumière pour détecter les vibrations de l'espace-temps. S'ils n'ont pas enregistré d'ondes gravitationnelles, ils ont servi à améliorer les techniques aujourd'hui utilisées par *Advanced LIGO* (dont le détecteur de Livingston est schématiquement représenté ci-contre), *Advanced Virgo* et d'autres projets à venir.

L'ESPACE OSCILLE

Les ondes gravitationnelles (*en vert*) déforment l'espace sur leur passage. Elles le contractent et l'étirent alternativement. Pour détecter leur passage, une solution est de mesurer les variations de la distance qui sépare deux objets, des masses-test.

QUELLE EST LA FORME DE L'ONDE GRAVITATIONNELLE ?

Les ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs ou d'étoiles à neutrons et d'une supernova ont des formes différentes. Leurs caractéristiques dépendent des propriétés de la source, telle la masse des objets qui la composent.

Le signal obtenu en septembre 2015 par *Advanced LIGO* correspond à la coalescence de deux trous noirs. Il se compose de trois parties liées au processus de coalescence. Dans un premier temps, les corps décrivent une spirale l'un autour de l'autre en se rapprochant. La fréquence et l'amplitude du signal augmentent progressivement et l'onde devient détectable juste avant la fusion (le *chirp* en anglais). Lors de la fusion, le signal est bref, irrégulier et d'amplitude importante. Puis l'horizon du trou noir né de la fusion vibre avant de se stabiliser. Cette désexcitation s'accompagne d'un signal dont l'amplitude et la fréquence diminuent régulièrement, le *ringdown* en anglais.

« Chirp »
(phase finale
de rotation
en spirale)

Fusion
(coalescence)

« Ringdown »
(désexcitation
du trou noir)

LIGO
HANFORD

LIGO LIVINGSTON

Miroir de fond
du bras sud
(masse-test)

MESURER UNE VARIATION INFIME

Le passage d'une onde gravitationnelle à travers un interféromètre de *LIGO* – ici celui de Livingston – fait osciller la longueur des bras (en étirant l'un et contractant l'autre, puis en inversant les effets). Les miroirs aux extrémités des bras servent de masses-test. Grâce à un laser, on mesure la variation de distance entre ces masses-test. La longueur des bras (4 kilomètres) et la centaine d'allers et retours du laser dans les bras amplifient les variations de distance. Néanmoins, celles-ci restent de l'ordre de cent milliardièmes de la taille d'un atome.

Laser

Modulateur
de fréquence :
il crée un faisceau
de référence

Résonateur :
il supprime
les instabilités
du laser