

Le jour où l'espace-temps a tremblé

Einstein avait prédit leur existence il y a cent ans. Les ondes gravitationnelles détectées le 14 septembre dernier par l'expérience américaine Ligo ne viennent pas seulement valider cette théorie et confirmer l'existence des trous noirs ; elles ouvrent aussi la voie à une nouvelle astronomie, pour aller plus loin dans notre compréhension de l'univers et des objets qui le peuplent.

Espace-temps

Représentation mathématique qui associe l'espace et le temps. L'espace-temps a 4 dimensions : 3 dimensions spatiales et 1 dimension temporelle.

Trou noir

Objet céleste si dense que rien – ni matière ni onde électromagnétique – ne peut échapper à son attraction.

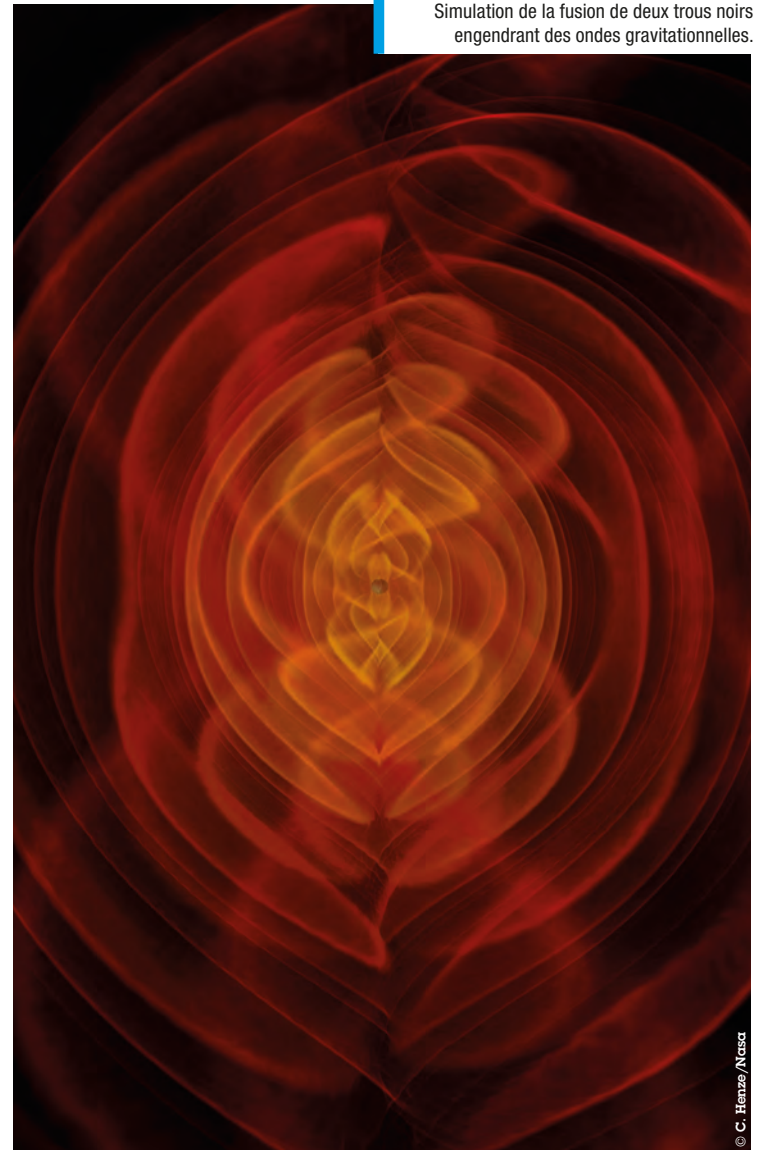
Note :

1. Source : BBC, 11 février 2016.

Le 14 septembre 2015 est à marquer d'une pierre blanche dans l'histoire de la physique et de l'astronomie. Ce jour-là, pour la première fois, les détecteurs américains Ligo frémissent au passage d'une onde gravitationnelle, une infime fluctuation de l'**espace-temps** prédite il y a un siècle par Albert Einstein. L'événement, rendu public cinq mois plus tard, secoue la communauté scientifique ; le célèbre astrophysicien Stephen Hawking n'hésitant pas à le qualifier de « révolution pour l'astronomie »¹. Au CEA, les chercheurs qui étudient les phénomènes cosmiques les plus violents et la physique dite « des hautes énergies » ne sont pas moins enthousiastes : la détection des ondes gravitationnelles ouvre d'incroyables perspectives dans leurs domaines d'investigation.

Einstein avait raison... et tort

Pourquoi un tel engouement ? Parce qu'avant tout, l'observation des ondes gravitationnelles, très attendue, est une nouvelle preuve en faveur de la théorie de la relativité générale d'Einstein ; théorie sur



Simulation de la fusion de deux trous noirs engendrant des ondes gravitationnelles.

© C. Henze/Nasa

laquelle ne repose rien moins que notre compréhension de l'Univers ! « C'est une très belle confirmation de la validité de la relativité générale dans des conditions que nous n'avions encore jamais explorées », indique Pierre Vanhove, membre de l'Institut de physique théorique du CEA (IPHT/CEA). Les conditions en question, ce sont des champs de gravitation immenses : l'onde a

été produite par le mouvement d'attraction de deux **trous noirs** jusqu'à leur fusion pour n'en former qu'un. Parue en 1915, la théorie de la relativité générale décrit la gravitation comme une courbure de l'espace-temps. Ainsi, toute masse « creuse » la trame de l'espace-temps, un peu comme le fait une balle posée sur un drap tendu. Plus la masse est importante, plus la courbure s'intensifie et

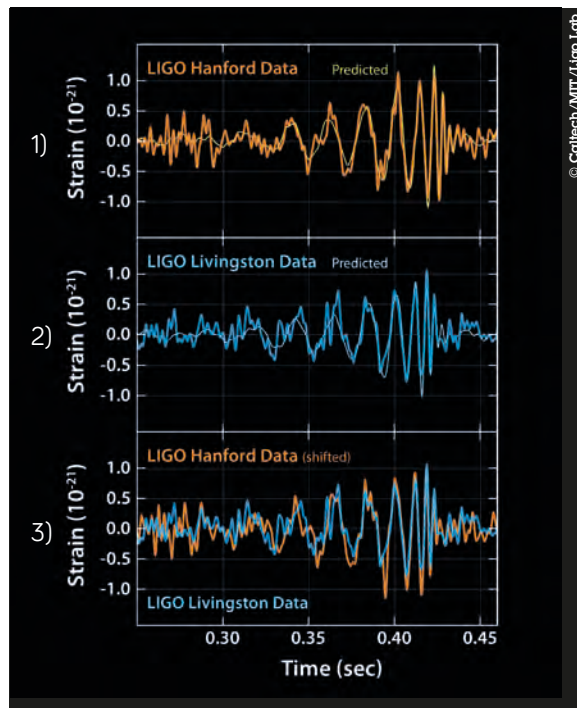
plus le « puits » de gravité est profond. De cette définition découle l'existence des trous noirs : lorsqu'une masse gigantesque est concentrée en un point, le puits de gravité est sans fond. Rien ne peut plus en sortir, pas même la lumière ! En 1916, Albert Einstein émet une autre hypothèse, conséquence de la première : lorsque des masses subissent une accélération, elles font vibrer l'espace-temps, produisant une onde comparable aux rides qui se propagent à la surface de l'eau lorsqu'une pierre la frappe. La fameuse onde gravitationnelle.

Toutefois, la déformation de l'espace-temps – qui s'avère très « rigide » – est infime : mille voire dix mille fois plus petite que la taille d'un proton (10^{-18} à 10^{-19} mètres). Des ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être détectées sur Terre doivent donc provenir d'événements cataclysmiques, mettant en jeu de très grandes masses subissant de fortes accélérations. Même Einstein a douté qu'il puisse être un jour possible de les observer, allant même jusqu'à réfuter leur existence quelques années après les avoir prédites ! Einstein avait donc raison et tort à la fois.

Installés aux États-Unis, les deux détecteurs de l'expérience Ligo ont réagi au passage d'une onde gravitationnelle ayant pris sa source à 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre, quelque part au-dessus de l'hémisphère sud. Deux trous noirs, l'un d'environ 36 masses solaires, l'autre d'environ 29 masses solaires, ont fusionné dans une danse spirale. Le cataclysme, qui n'a duré que deux dixièmes de seconde, a donné naissance à un trou noir d'environ 62 masses solaires et a libéré une onde gravitationnelle d'une énergie équivalente à 3 masses solaires (selon la célèbre formule d'Einstein, $E=mc^2$). « Le signal reçu est de très bonne qualité et correspond en tout point à ce que l'on peut attendre théoriquement d'une telle collision », explique Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien de l'institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu/CEA).

Vers une nouvelle astronomie

La confirmation de la théorie d'Einstein n'est évidemment pas la seule conséquence de cet incroyable exploit technique. Elle est aussi la preuve de l'existence des trous noirs. « C'est la découverte dans la découverte, s'enthousiasme Jérôme Rodriguez, autre chercheur de l'Irfu/CEA. Même s'ils font partie du bestiaire cosmique depuis un moment, les trous noirs sont des objets avant tout mathématiques dont la réalité est parfois remise en question. Jusqu'à maintenant, nous n'avions que des preuves indirectes de leur existence. » Non seulement l'observation des ondes gravitationnelles démontre la réalité des trous noirs mais elle révèle aussi qu'ils peuvent former des duos, à l'instar des systèmes binaires d'étoiles. Une sacrée surprise pour ceux qui les étudient. L'événement donne enfin un coup d'accélérateur énorme à l'astronomie dite gravitationnelle, à savoir l'étude de l'univers à travers l'analyse de ce type d'ondes. Et les découvertes pourraient être nombreuses tant ces ondes peuvent voyager, quasi librement, sur des distances infinies alors que la lumière rencontre de nombreux obstacles sur son parcours². Jusqu'à maintenant, ce champ de recherche se cantonnait à la théorie,



Signaux des ondes gravitationnelles, détectés par chacun des instruments de Ligo et corrélés aux équations de la théorie générale (1 et 2) ; et leur superposition montrant que l'expérience a détecté le même événement (3).

peuplant l'univers, même si ceux-ci n'émettent pas ou très peu de lumière. » Des objets comme les trous noirs, donc, mais aussi les étoiles à neutrons, issues de l'effondrement du cœur d'étoiles massives, ou encore les cordes cosmiques,

Masse solaire

Unité de mesure de la masse des objets peuplant l'univers. Elle correspond à la masse du Soleil.

Le signal reçu est de très bonne qualité et correspond en tout point à ce que l'on peut attendre théoriquement d'une telle collision entre deux trous noirs.

Jean-Marc Bonnet-Bidaud, de l'Irfu/CEA

à la mise au point de détecteurs et à la simulation numérique. Dorénavant, il va pouvoir se déployer à partir de résultats expérimentaux. « Les ondes gravitationnelles sont porteuses d'informations précieuses sur les événements qui les ont produites, précise Pierre Vanhove. Elles peuvent donc nous renseigner sur certains objets

déformations de l'espace-temps qui formeraient des lacets dans l'univers et que les théories physiques les plus modernes pensent être capables de produire des ondes gravitationnelles. On aurait donc pu penser que l'observation de ces ondes le 14 septembre 2015 était un aboutissement. Il s'agit au contraire du début de l'aventure. ♦

Note :

2. La lumière se propage également sur des distances infinies mais est déviée par les corps célestes ce qui rend difficile la localisation de sa source.