

Les ondes gravitationnelles enfin détectées

Des instruments américains ont observé ces déformations de l'espace-temps prédites par Einstein en 1916

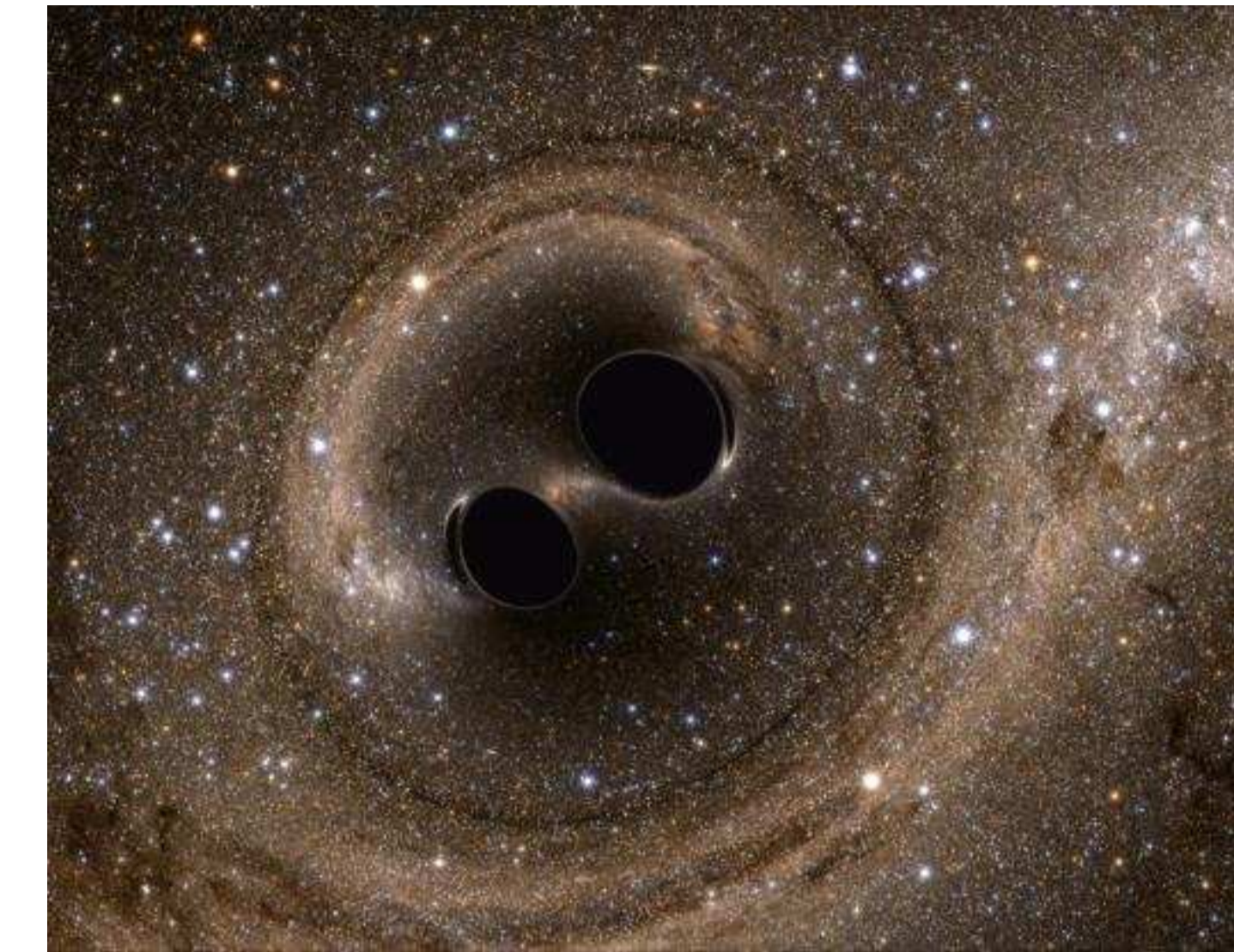
Enorme secousse dans le monde scientifique, pour une découverte majeure, à ranger au sommet des plus grandes percées de la connaissance. Pour la première fois, des vibrations venues de l'espace et d'une étrange nature ont été détectées sur Terre, confirmant une prédiction d'Albert Einstein vieille d'un siècle.

Ces tressautements, baptisés « ondes gravitationnelles », compriment et dilatent à la vitesse de la lumière l'espace-temps qui nous entoure, comme le son le fait avec l'air. « *Ou comme du veau en gelée tremblote lorsqu'on le secoue* », aime à dire Thibault Damour, spécialiste de la relativité générale à l'Institut des hautes études scientifiques de Bures-sur-Yvette (Essonne). L'espace-temps, c'est-à-dire la trame même du monde dans lequel nous vivons, est donc un contenant élastique, susceptible d'onduler à la manière des rides à la surface d'une eau perturbée par le lancer d'un caillou.

Aboutissement

La détection de ce premier clapotis cosmique est détaillée dans la revue *Physical Review Letters* du 11 février par l'équipe de l'instrument LIGO, aux États-Unis, en collaboration avec celles de Virgo, détecteur essentiellement franco-italien et construit près de Pise, et de GEO600, en Allemagne. « *Cette détection est le début d'une nouvelle ère, celle de l'astronomie des ondes gravitationnelles devenue désormais une réalité* », a lancé Gabriela Gonzalez, porte-parole de l'équipe LIGO, professeur d'astrophysique à la Louisiana State University.

Les chercheurs ont repéré l'infime effet du passage d'une telle onde, qui a la capacité étonnante de distordre les distances, de les allonger ou de les réduire très légèrement. Aucune autre onde ne peut le faire. L'effet est faible, de l'ordre d'une variation du dix millièmes de la taille d'une particule élémentaire (environ 10^{-19} m). Autrement dit, comme si l'étoile la plus proche, Proxima du Centaure, située à plus de quatre



Simulation des deux trous noirs observés par le détecteur américain LIGO. LIGO LABORATORY/MIT/CALTECH/REUTERS

nées-lumière de la Terre, se rapprochait de nous d'un demi-mètre de cheveu...

Pour mesurer une si minuscule distance, les chercheurs ont construit depuis vingt ans des « amplificateurs » géants. LIGO est ainsi fait de deux tunnels perpendiculaires de quatre kilomètres de long chacun. A l'intérieur, deux faisceaux laser, parfaitement synchronisés entre eux, effectuent des dizaines d'allers-retours entre des miroirs. Puis, ces deux rayons sont recombinaés à la sortie afin

de vérifier leur synchronisation. Si une onde gravitationnelle secoue l'espace-temps et se propage jusque-là, elle étire un trajet lumineux avant l'autre, désynchronisant les lasers.

C'est ce qui s'est passé le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure française) sur les deux sites américains jumeaux construits en Louisiane et dans l'Etat de Washington à 3 000 kilomètres de distance. Les « sismographes » se sont agités avec 7 millisecondes de décalage. « *C'était trop beau pour être*

« Nous verrons enfin des choses jamais vues parce qu'elles n'émettent pas de lumière. Nous changeons d'époque »

PIERRE BINÉTRUY
université Paris-VII

vrai ! », se souvient Jean-Yves Vinet, ancien responsable de Virgo (2007-2011), aujourd'hui directeur de recherche CNRS à l'Observatoire de la Côte d'Azur. Mais après des semaines de vérifications, écartant toute erreur, la confirmation est arrivée. « *C'est l'aboutissement d'un très gros travail. C'est enthousiasmant* », constate Eric Chassande-Mottin, chercheur CNRS du laboratoire Astroparticule et cosmologie.

Le signal enregistré par les chercheurs précise, en outre, l'origine

de cette secousse, apportant une seconde découverte majeure. Il s'agit de la fusion de deux trous noirs en un nouveau, deux fois plus gros. Le duo est, respectivement, vingt-neuf et trente-six fois plus massif que le Soleil, et situé à plus d'un milliard d'années-lumière de la Terre. « *C'est extraordinaire. Quand j'ai commencé ces travaux, dans les années 1970, les trous noirs n'étaient à peine qu'une hypothèse* », souligne Jean-Yves Vinet.

Mieux, les chercheurs ont vu respirer ces géants d'où aucune lu-

LE LEXIQUE

RELATIVITÉ RESTREINTE

Albert Einstein a bouleversé les notions intuitives de temps, d'espace et d'énergie. Selon sa théorie de la relativité restreinte (1905), la description de l'Univers ne doit pas séparer le temps et les positions dans l'espace mais les considérer ensemble : un point dans l'espace-temps est en fait un événement, c'est-à-dire une position attachée à un temps. Le temps absolu n'existe pas. Il dépend des vitesses relatives entre observateurs, par exemple. Une horloge qui se déplace affiche un temps qui s'écoule plus lentement qu'une autre immobile.

RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Une conséquence de cette seconde théorie, datant de 1915, est que la trame de l'Univers est structurée par la force de gravitation : les objets lourds courbent l'espace-temps, comme une boule sur un drap tendu. En retour, la structure de l'espace-temps force la matière et la lumière à suivre ses courbes. C'est dans cet espace élastique que nous vivons et que se propagent les ondes gravitationnelles qui distordent les distances.

« C'est la preuve de l'existence des trous noirs »

Pour le physicien Thibault Damour, la théorie d'Einstein est confirmée « à un niveau inégalé »

ENTRETIEN

Le physicien théoricien Thibault Damour (Institut des hautes études scientifiques de Bures-sur-Yvette, Essonne), n'a pas participé directement à la détection des ondes gravitationnelles. Mais il avait calculé en 2000 le signal produit par la fusion de deux trous noirs, perçu en septembre 2015 par les détecteurs américains LIGO. Il évoque l'importance de la percée annoncée jeudi 11 février par la revue *Physical Review Letters*.

Peut-on parler d'une découverte, ou s'agit-il d'une confirmation ?

D'une découverte, et même d'une double découverte. On savait que les ondes gravitationnelles étaient réelles et on avait vu leur propagation entre deux pulsars [astres émettant de fortes impulsions électromagnétiques], mais c'est la première fois qu'on voit des ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs très distants.

Mais, à mon sens, la découverte la plus importante, c'est de prouver pour la première fois l'existence des trous noirs. Les preuves antérieures sont objectivement

très indirectes, alors que, cette fois, on a pu observer les deux trous noirs au tout dernier moment de leur rapprochement. On voit le signal qui est dû à la fusion de ces trous noirs, dont la surface, comme celle de deux bulles de savon, se coalesce [fusionne]. On observe les caractéristiques de vibration du trou noir nouvellement formé. Cela, c'est la preuve non seulement de l'existence de trous noirs, mais aussi de la dynamique de l'espace-temps quand deux trous noirs fusionnent, ce qui est une confirmation de la théorie d'Einstein à un niveau inégalé.

Ce qui a été observé correspond à un instant très fugace, un clignement d'œil...

Cela n'a duré que deux dixièmes de seconde. On voit les dernières orbites de ces deux trous noirs. Quand on y réfléchit, c'est inimaginable. Vous avez deux trous noirs, qui font une trentaine de masses solaires chacun, qui étaient à un milliard d'années-lumière de nous, qui ont tourné l'un autour de l'autre pendant des centaines de millions d'années, d'abord très lentement, puis de plus en plus rapidement. Et là, on a vu les quelques dernières orbites

et leur fusion. On « attrape » la fin du signal (0,2 seconde) qui a voyagé pendant un milliard d'années avant d'arriver sur Terre !

Cette détection n'épuise-t-elle pas votre intérêt pour les ondes gravitationnelles ?

Non, car contrairement à la découverte du boson de Higgs, qui d'une certaine manière concluait le modèle standard, ici on ouvre un nouveau domaine scientifique, l'astronomie des ondes gravitationnelles. Avec en plus une très bonne nouvelle : le fait que LIGO ait observé un signal alors qu'il n'était pas encore au maximum de ses capacités signifie qu'il existe bien plus de sources d'ondes gravitationnelles qu'on ne pouvait l'espérer.

En outre, j'ai une satisfaction personnelle, car nous avons été les premiers, avec ma collègue Alessandra Buonanno, à prévoir la théorie du signal qui a été observé. En l'an 2000, nous avons calculé le signal de coalescence de deux trous noirs, cinq ans avant que la relativité numérique, calculée par les gros ordinateurs, puisse le simuler, et quinze ans avant qu'on l'observe dans la nature. Les méthodes que nous avons deve-

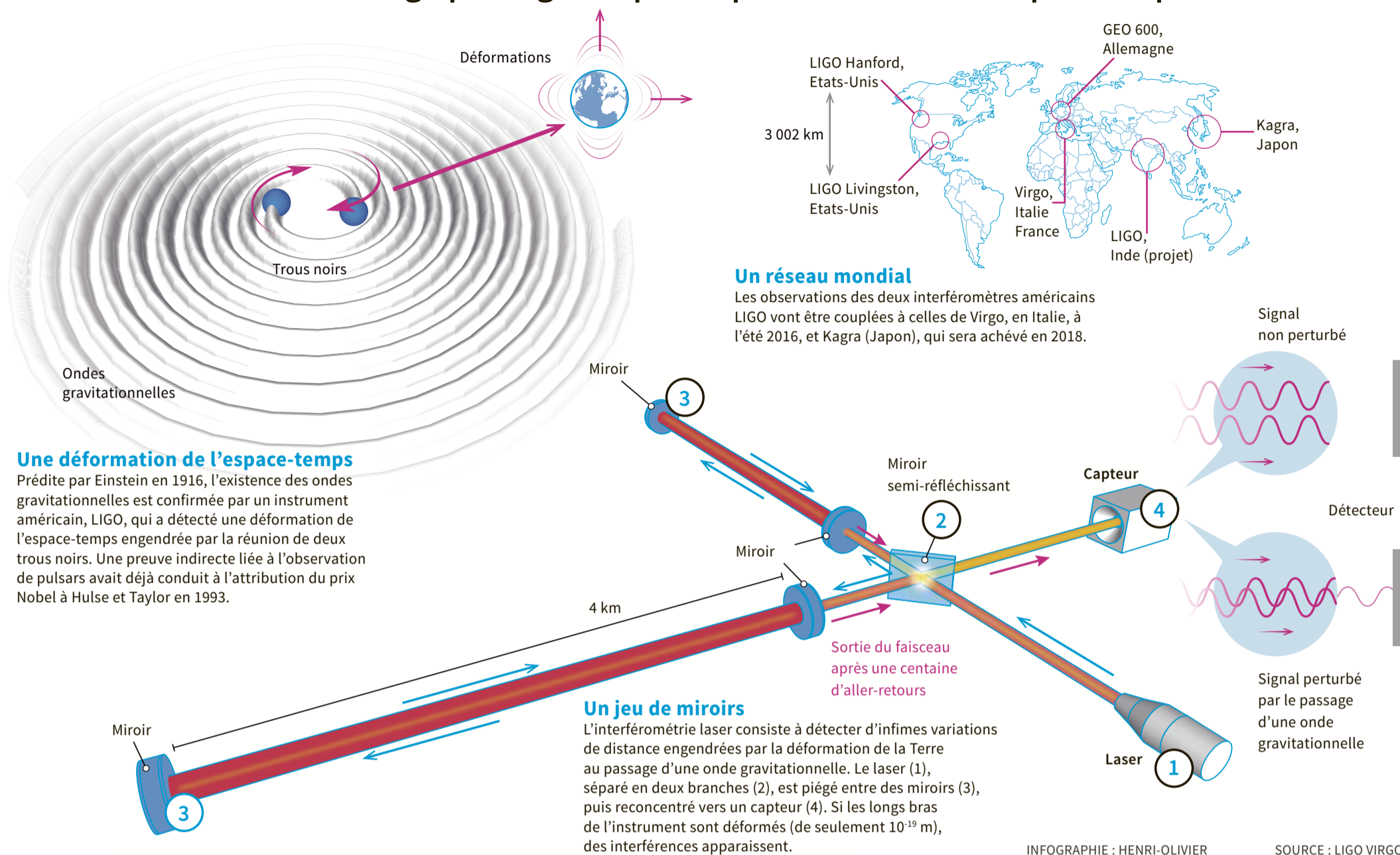
loppées ont été utilisées par les Américains dans la détection. Donc la France peut être fière que son école théorique ait contribué à cette découverte.

Mais c'est bien une découverte des deux détecteurs américains LIGO. Le détecteur européen Virgo, qui n'est pas encore « branché », n'y a pas participé directement. Il faut pourtant souligner que la technologie et les concepts qui ont permis à LIGO d'aboutir ont pour partie pour origine des efforts des équipes de Virgo – et en particulier celle d'Alain Brillet, qui dès 1980 a commencé à travailler en France sur la question de la détection des ondes gravitationnelles au moyen de rayons laser. Il a inventé plusieurs idées qui ont été cruciales pour cette détection.

Il faut aussi évoquer les miroirs qui doivent réfléchir les rayons laser sans aucune perte : cela a été fait dans le Laboratoire des matériaux avancés du CNRS à Lyon. Il y a donc des contributions plus que non négligeables, et c'est pourquoi l'article décrivant la découverte dans les *Physical Review Letters* est cosigné par l'équipe américaine de LIGO et les équipes de Virgo. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR
HERVÉ MORIN

Des « sismographes » géants pour capter des rides dans l'espace-temps



Une déformation de l'espace-temps

Prédite par Einstein en 1916, l'existence des ondes gravitationnelles est confirmée par un instrument américain, LIGO, qui a détecté une déformation de l'espace-temps engendrée par la réunion de deux trous noirs. Une preuve indirecte liée à l'observation de pulsars avait déjà conduit à l'attribution du prix Nobel à Hulse et Taylor en 1993.

Un jeu de miroirs

L'interférométrie laser consiste à détecter d'infimes variations de distance engendrées par la déformation de la Terre au passage d'une onde gravitationnelle. Le laser (1), séparé en deux branches (2), est piégé entre des miroirs (3), puis reconcentré vers un capteur (4). Si les longs bras de l'instrument sont déformés (de seulement 10^{-19} m), des interférences apparaissent.

Un réseau mondial

Les observations des deux interféromètres américains LIGO vont être couplées à celles de Virgo, en Italie, à l'été 2016, et Kagra (Japon), qui sera achevée en 2018.

INFOGRAPHIE : HENRI-OLIVIER

SOURCE : LIGO VIRGO

mière ni matière ne peuvent s'échapper. Lorsque les deux trous noirs se rapprochent, des ondes gravitationnelles sont créées, affolant périodiquement les détecteurs de LIGO. Puis, quand ils fusionnent, l'objet patateïde qui en résulte n'adopte pas immédiatement une forme stable.

Il vibre, telle une cloche, et fait trembler la gelée cosmique jusqu'aux détecteurs terrestres, d'une manière différente de la sarabande précédente. Un nouveau trou noir est en train de naître. « La masse finale du trou noir est 62 fois celle du Soleil. C'est moins que la somme des deux trous noirs ; l'excédent a été converti en ondes gravitationnelles », indique Nicolas Arnaud (CNRS) du Laboratoire de l'accélérateur linéaire à Orsay.

Nouvelle fenêtre astronomique

C'est à ce spectacle et à bien d'autres que rêvent d'assister plus souvent les astronomes désormais. « Cela ouvre une grande période nouvelle et excitante. L'Univers est mû par la gravité, mais on ne l'observe qu'avec la lumière. Nous verrons enfin des choses jamais vues parce qu'elles n'émettent pas de lumière, estime Pierre Binétruy, professeur à l'université Paris-VII. Nous changeons d'époque. »

« A chaque fois que nous braquons un nouvel instrument vers le ciel, on voit et on comprend des choses nouvelles. Ce fut le cas avec Galilée pointant sa lunette vers Jupiter et découvrant ses satellites »,

rappelle Jean-Yves Vinet. Seuls des événements impliquant de gros objets en mouvement peuvent faire osciller la gelée de veau cosmique. Comme des étoiles explosant en supernova ; ou des étoiles mourant et se contractant en trou noir ou en étoiles à neutrons, appelées également « pulsars », qui condensent l'équivalent de la masse du Soleil sur seulement dix kilomètres de rayon ; ou encore l'origine violente de l'Univers au moment du Big Bang, il y a plus de treize milliards d'années.

Cette première découverte ouvre donc une nouvelle fenêtre astronomique sur ces phénomènes, en élargissant le spectre des moyens d'observation après la lumière visible, les rayons X, infrarouges, ultraviolets, les ondes radio ou même les neutrinos (des particu-

les quasiment sans masse qui interagissent peu avec la matière).

Pour la suite, Virgo fait actuellement peau neuve pour être aussi précis que son collègue américain et reprendre du service avant la fin 2016. Son couplage avec LIGO permettra une localisation précise des sources dans le ciel. Les Japonais achèvent Kagra ; les Indiens comptent sur LIGO India. Et les chercheurs voient encore plus loin. Les instruments terrestres sont en effet limités à l'observation d'objets peu massifs et proches, toutes proportions gardées.

En effet, plus les « cailloux » agitant l'espace-temps sont gros, plus les crêtes des vagues créées sont éloignées et plus il faut des bras grands pour en saisir le passage. Des trous noirs, plusieurs millions de fois plus lourds que le Soleil,

Des rumeurs bruissent déjà sur le fait que le détecteur LIGO aurait d'autres secousses dans son sac

comme celui au cœur de notre galaxie, resteront en fait invisibles à LIGO et à Virgo.

La suite consistera à installer en orbite eLISA, une sorte de triangle de faisceaux laser dont les « bras » d'un million de kilomètres de long bougeraient sous l'effet d'ondes gravitationnelles. Lancement prévu dans les années 2030. L'Agence spatiale européenne a mis sur orbite, le 3 décembre 2015, LISA Pathfinder, un satellite destiné à tester des technologies nécessaires à eLISA.

Cette détection d'ondes gravitationnelles, aussi compliquée soit-elle, n'est pas une surprise. La relativité générale est fiable et éprouvée depuis de nombreuses années : la plupart des phénomènes étranges prévus par cette théorie ont déjà été observés. Par exemple, les gros objets dévient les rayons lumineux, ce qui décale effectivement la position des étoiles dans le ciel. Ou bien une horloge bat moins vite le tempo en altitude qu'en surface (une infor-

mation essentielle pour corriger les signaux GPS).

Quant aux ondes gravitationnelles elles-mêmes, leur présence avait été repérée en 1978 et saluées par un prix Nobel en 1993 : la rotation de deux pulsars détectés en 1974 et se tournant autour s'accélérait à cause de l'émission d'ondes gravitationnelles entre les deux objets. En revanche, jamais ces ondes n'avaient été ressenties sur Terre. Des rumeurs bruissent déjà sur le fait que LIGO aurait d'autres secousses dans son sac.

S'il ne fait pas de doute qu'un prix Nobel couronnera cette découverte, les noms des lauréats seront difficiles à choisir. L'Américain Rainer Weiss, du MIT, est à l'origine, dans les années 1970, des premières études précises sur les défis à relever pour de futurs instruments. Kip Thorne, charismatique physicien américain, a poussé à la réalisation de LIGO dans les années 1990. Ronald Drever, un Écossais, a eu l'une des idées-clés permettant d'augmenter la puissance des lasers.

Côté européen, le Français Alain Brillet et l'Italien Adalberto Giazzotto ont contribué largement aux techniques optiques et mécaniques nécessaires au fonctionnement parfait de Virgo. Et, bien sûr, les porte-parole de LIGO, Gabriela Gonzalez, ou de Virgo, Fulvio Ricci, sont aussi sur les rangs. De quoi secouer encore le landerneau scientifique. ■

DAVID LAROUSSERIE

LES DATES

1916

Einstein déduit l'existence d'ondes gravitationnelles à partir de sa théorie de la relativité générale, présentée en 1915.

1969

L'Américain Joseph Weber annonce par erreur avoir détecté des ondes gravitationnelles.

1974

Russell Hulse et Joseph Taylor découvrent un couple d'étoiles à neutrons dont le comportement apporte une preuve indirecte des ondes gravitationnelles. Ils obtiendront le Nobel en 1993.

1990

Les États-Unis approuvent la construction du détecteur LIGO, inauguré en 1999. Une version renouée redémarre en septembre 2015. En 1993, la France et l'Italie décident de construire, près de Pise, Virgo, en service entre 2007 et 2011, qui sera relancé en 2016.

2016

Le 11 février, annonce de la découverte par Virgo-LIGO.