

NICOLAS ARNAUD

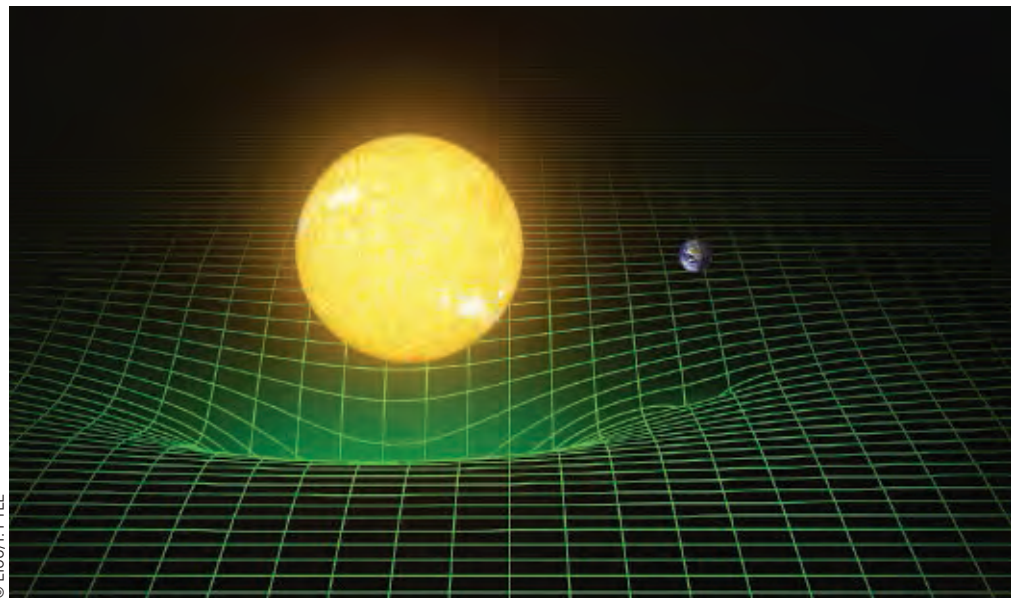
Laboratoire de l'accélérateur linéaire (IN2P3/CNRS & université Paris-Sud), European Gravitational Observatory

ON A DÉTECTÉ LES ONDES GRAVITATIONNELLES

L'existence des ondes gravitationnelles est un phénomène prédit il y a un siècle dans le cadre de la théorie de la relativité générale. En 2015, ces ondes ont pu être détectées et l'année 2016 a été marquée par la confirmation de ces détections. Ces découvertes très prometteuses ouvrent une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

REPÈRES

Et un, et deux, et peut-être trois... Eh non, il ne s'agit pas de football mais bien de science et plus particulièrement des premières détections des ondes gravitationnelles (« OGs »). Depuis une cinquantaine d'années, des détecteurs de plus en plus sensibles cherchaient à observer de tels signaux, à la fois communs (car émis *a priori* par toute masse accélérée) et insaisissables (car extrêmement ténus). Et ce sont finalement les détecteurs « LIGO avancés », deux instruments géants installés aux États-Unis, qui ont réussi cette prouesse scientifique fin 2015. Ces résultats, vérifiés, consolidés et validés par des mois d'analyses auxquelles des centaines de personnes ont contribué, ont été annoncés en février et juin 2016 par les collaborations LIGO et Virgo, liées depuis 2007 par des accords assurant la mise en commun des données enregistrées et leur étude conjointe.



© LIGO/T. PYLE

Vue d'artiste montrant la déformation de l'espace-temps (figurée par le quadrillage vert bidimensionnel) due à la présence du Soleil. La Terre, visible sur la droite de l'image, se déplace dans cet espace courbe en suivant le « chemin le plus court possible ». Cette trajectoire, qui serait une ligne droite dans un espace plat, est en fait une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers, comme Kepler l'a postulé le premier à la fin du *xvi^e* siècle.

LES OGs ONT ÉTÉ INTRODUITES dès 1916 par Einstein, quelques mois après la publication de la relativité générale. Dans cette théorie, la gravitation apparaît comme la manifestation de la courbure de l'espace-temps, déformé par la présence de masses. L'Univers dans son ensemble – non seulement la matière ordinaire (étoiles, planètes, etc.) mais aussi la lumière et, si elle existe, l'hypothétique matière noire – est soumis à cette loi : on se déplace sur l'espace-temps en suivant sa courbure.

« On pouvait observer un trou noir via l'influence gravitationnelle qu'il a sur son environnement »

Plus un astre est massif et plus la courbure de l'espace-temps qu'il induit est prononcée. On peut donc imaginer un corps dont le champ gravitationnel est si intense que la courbure associée empêche tout objet passant à proximité d'en ressortir – rayons lumineux compris. Un tel astre est un « trou noir » au sens littéral du terme : il est complètement invisible. Jusqu'aux découvertes décrites

dans cet article, on ne pouvait observer un trou noir qu'indirectement, *via* l'influence gravitationnelle qu'il a sur son environnement.

RAYON DE SCHWARZSCHILD

Un trou noir concentre sa masse dans un volume très petit par rapport à ceux qu'ont les objets célestes de même masse que l'on a l'habitude de rencontrer en explorant l'Univers : planètes, étoiles, etc. Par exemple, un trou noir d'une masse solaire a un « rayon de Schwarzschild » d'environ 3 km. Cette quantité, qui apparaît dans le cadre de la relativité générale, correspond à la taille de « l'horizon » du trou noir de l'intérieur duquel rien (ni matière, ni lumière, ni information physique) ne peut ressortir. Elle est directement proportionnelle à la masse du trou noir. Par définition, tout astre a une taille supérieure ou égale à son rayon de Schwarzschild. Plus ces deux grandeurs sont proches et plus l'astre est dit « compact ».

Toute masse accélérée émet des OGs mais l'espace-temps est si rigide qu'elles ont en général une amplitude très petite – la gravitation est, de très loin, la plus faible des quatre interactions fondamentales connues à ce jour. Ainsi, aucune source terrestre d'OGs ne sera jamais détectable. Pour l'être, il faut conjuguer trois qualités : être compact – un trou noir est donc idéal – ; mettre en jeu des vitesses proches de celles de la lumière ; et enfin, avoir une forme asymétrique – une sphère parfaite n'émet pas d'OGs. Cette dernière caractéristique n'est pas intuitive : elle est liée à la nature mathématique – « quadrupolaire » – de ces ondes.

SURVEILLER LES CATACLYSMES COSMIQUES

Des événements cataclysmiques à l'échelle du cosmos peuvent correspondre à ce

portrait-robot. Par exemple la fusion (ou coalescence) de deux astres compacts, étoiles à neutrons¹ ou trous noirs. Lorsque deux astres compacts sont en orbite l'un autour de l'autre, le système perd de l'énergie par émission d'OGs ; les deux corps se rapprochent peu à peu et leur mouvement s'accélère. Cette évolution, d'abord très lente, peut

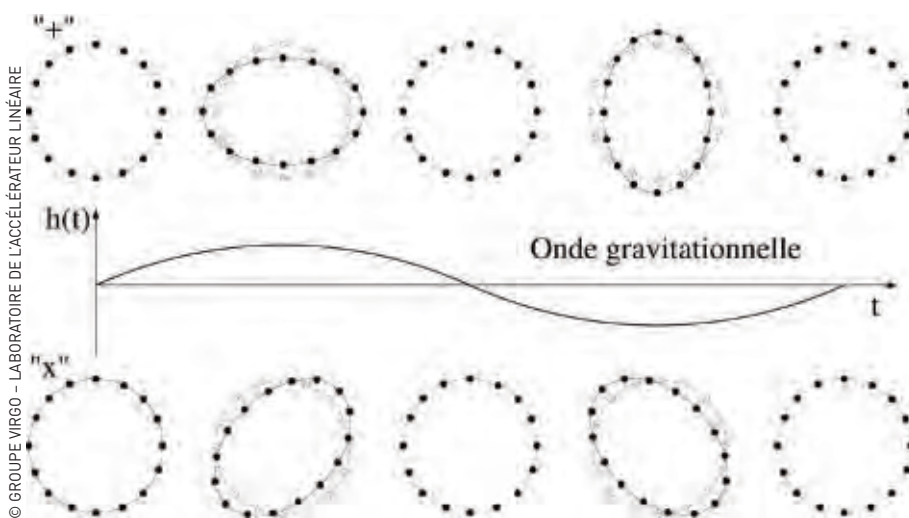
durer des centaines de millions d'années. Le phénomène s'intensifie brusquement quand les astres sont très proches et atteint son paroxysme au moment de leur fusion. C'est à ce moment qu'une quantité d'énergie colossale est libérée sous forme d'OGs, produisant un signal potentiellement détectable sur Terre, à condition que la source ne soit pas être trop éloignée. En effet, les détecteurs, l'américain LIGO et l'européen Virgo, sont directement

sensibles à l'amplitude d'une OG, laquelle décroît comme l'inverse de la distance sur laquelle l'onde s'est propagée. Ainsi, un gain d'un facteur 10 en sensibilité permet de voir 10 fois plus loin les sources d'OGs et donc de gagner un facteur $10^3 = 1\,000$ sur le taux d'événements détectables – en supposant l'Univers homogène et isotrope, ce qui est vrai à grande échelle.

DÉTECTER LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Comment détecter une OG ? En exploitant l'effet qu'elle produit dans le plan transverse à sa direction de propagation : l'espace-temps y est alternativement étiré et comprimé. Un faisceau laser permet d'observer ces variations. En effet, la lumière se déplace à vitesse constante et donc son temps de parcours entre deux points est allongé ou raccourci selon que l'espace-temps les séparant est étiré ou comprimé.

« Toute masse accélérée émet des ondes gravitationnelles »



Visualisation de l'effet d'une OG se propageant de vos yeux vers la page. L'anneau de « particules tests » soumises uniquement à l'action de la gravitation permet de suivre les déformations de l'espace-temps dans deux directions perpendiculaires : horizontale et verticale pour la polarisation « + » [en haut], tournées de 45 degrés pour la polarisation « x » [en bas]. Le cercle devient une ellipse.

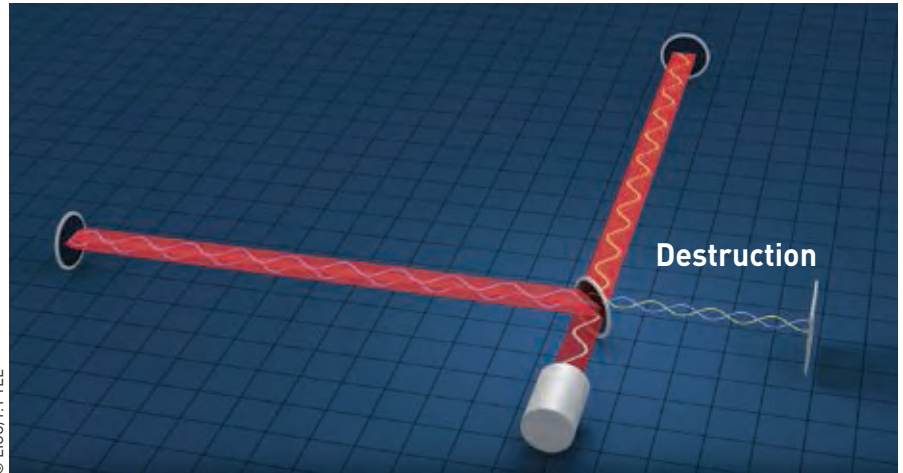
Ce principe est utilisé dans les détecteurs LIGO et Virgo. Ceux-ci sont des interféromètres de Michelson, un instrument inventé au XIX^e siècle pour mesurer d'éventuelles variations de la vitesse de la lumière. De nombreux perfectionnements sont apportés à ce schéma de base pour optimiser la sensibilité des détecteurs aux OGs et pour s'assurer qu'ils sont isolés au maximum de l'environnement, afin d'éviter que des perturbations extérieures (microséismes, phénomènes météorologiques, etc.) ne viennent polluer les données enregistrées.

UNE AVENTURE QUI COMMENCE VERS 1970

Les premières études sur l'utilisation d'interféromètres de Michelson comme détecteurs d'OGs remontent au début des années 1970. Les expériences Virgo et LIGO ont été approuvées dans les années 1990. Ont suivi des années de construction et de mise au point des instruments « de première génération », lesquels ont mené plusieurs campagnes de prise de données entre 2005 et 2011. Les détecteurs ont atteint les niveaux de sensibilité prévus, mais sans détecter d'OGs. Pour aller plus loin, des programmes d'amélioration sur plusieurs années ont été proposés puis financés au tournant des années 2010, au moment où la crise financière internationale battait son plein. Ces circonstances ont notamment impacté Virgo et expliquent en partie pourquoi les deux détecteurs « LIGO avancés » ont été prêts les premiers et ont pris seuls des données scientifiques de septembre 2015 à janvier 2016.

Si le détecteur Virgo avancé ne fonction-

« Les études visant à confirmer la réalité de cette OG ont duré cinq mois »



© LIGO/T. PYLE

Vues d'artiste représentant des interférences destructives (à gauche) et constructives (à droite) dans un interféromètre de Michelson. Un laser (en rouge) émis par une source (le cylindre blanc) est envoyé sur un miroir incliné à 45 degrés, appelé lame séparatrice, qui le divise en deux faisceaux perpendiculaires. Ceux-ci se propagent dans les « bras » du détecteur, jusqu'à des miroirs sur lesquels ils sont réfléchis et

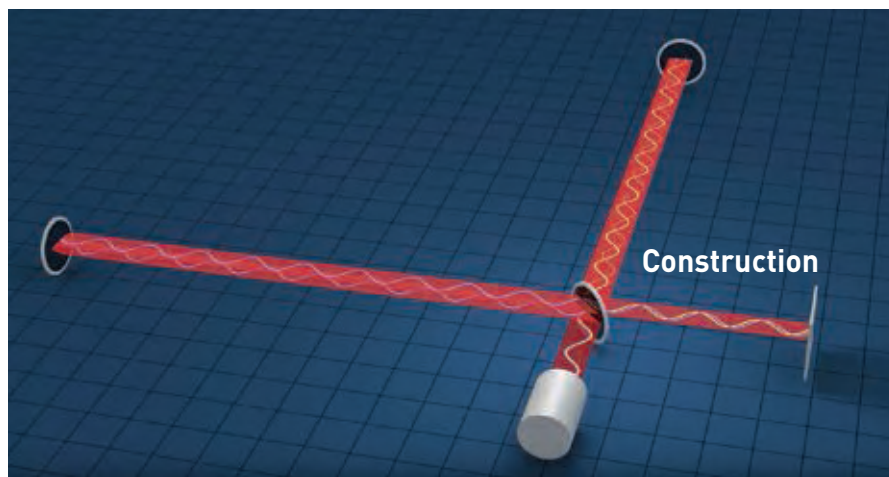
nait pas pendant cette période, les deux collaborations ont analysé conjointement les données des instruments LIGO avancés, en vertu d'un accord datant de 2007. Ce mode de fonctionnement trouve son origine dans le fait que tous les interféromètres sont sensibles aux mêmes événements en provenance du cosmos et donc que les collaborations ont tout

à gagner à mettre leurs données en commun dès le début de leur étude. De plus, la détection d'un signal court comme la coalescence de deux astres compacts demande au minimum la confirmation de deux détecteurs. Et la localisation de la position de

la source dans le ciel par triangulation (une méthode basée sur le fait que les OGs n'arrivent pas exactement au même moment dans des détecteurs éloignés : le délai peut atteindre quelques dizaines de millisecondes) requiert au moins trois instruments.

GW150914 PREMIÈRE DÉTECTION DIRECTE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Le 14 septembre 2015 vers midi heure de Paris, un signal émis par la fusion de deux trous noirs d'une trentaine de masses solaires chacun, situés à environ 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre, a été observé : l'événement « GW150914 ». À peine trois minutes après le passage de l'OG, des algorithmes qui analysent en temps réel les données enregistrées ont identifié cette période comme prometteuse et, une heure plus tard, les premiers courriels ont commencé à circuler. Les informations se sont précisées dans la journée : le signal observé n'est pas artificiel ; il ressemble beaucoup à celui attendu pour la fusion de deux trous noirs ; les deux détecteurs LIGO fonctionnaient correctement à ce moment-là et la qualité des données était bonne. Les études visant à confirmer la réalité de cette OG et à obtenir des informations sur sa source ont alors commencé ; elles ont duré cinq mois.



renvoyés vers la lame séparatrice. Leur recombinaison produit finalement des interférences qui peuvent être constructives (de la lumière est détectée en sortie du détecteur) ou destructrices (aucune lumière n'est détectée). Celles-ci dépendent de la différence entre les temps de parcours de la lumière dans les deux bras – et donc du passage éventuel d'une OG. Source : https://www.youtube.com/watch?v=tQ_telUb3tE

DEUX MÉTHODES POUR IDENTIFIER LE PHÉNOMÈNE

Le signal GW150914 a été identifié par deux méthodes indépendantes qui ont donné des résultats comparables. Comme GW150914 est très court (moins de trois dixièmes de seconde), il a été vu par un algorithme qui cherche des signaux de faible durée présents dans les données des deux détecteurs LIGO, sans faire aucune hypothèse sur la forme d'onde observée. De plus, GW150914 a été produit par la fusion de deux astres compacts, un type de source pour lequel on connaît le signal attendu grâce aux travaux d'experts en calculs analytiques (les « développements postnewtoniens ») et en relativité générale numérique. Dans ce cas, la façon la plus efficace de chercher la forme d'onde consiste à la comparer aux données et à chercher des similitudes – mathématiquement, on parle de « corrélation ».

Si cette méthode, dite du « filtrage adapté », est optimale, elle a aussi un

inconvenient majeur : elle ne fonctionne que si le signal prédit et celui présent dans les données sont très ressemblants. Or, l'OG émise par un système binaire donné dépend des paramètres de celui-ci, en particulier des masses des astres compacts en orbite l'un autour de l'autre. Ces informations sont inconnues *a priori* et donc chercher un signal par filtrage adapté revient à explorer toutes les combinaisons de paramètres possibles, associées chacune à une forme d'onde différente. En pratique, on compare les données avec un ensemble de signaux « représentatifs » – environ 200 000 pour la recherche de coalescences trou noir-trou noir. Et la relation entre la forme d'onde et les paramètres physiques de la source d'OGs permet ensuite de mesurer les caractéristiques du système qui a émis le signal détecté et d'estimer la précision avec laquelle on connaît ces paramètres.

ÉLIMINER LES FAUX SIGNAUX

Une fois qu'un signal a été observé par l'une ou l'autre des méthodes décrites ci-dessus, comment s'assurer qu'il provient bien du cosmos ? On commence par vérifier qu'il ne peut pas avoir été causé par des problèmes sur les instruments ou par une interaction entre l'environnement et les détecteurs. Pour cela, on utilise les informations fournies par des milliers de capteurs (photodiodes, caméras, accéléromètres, sondes magnétiques, micros, etc.) installés sur chaque site. Cette surveillance de la qualité des données est un élément clef du processus qui permet d'aboutir à la détection d'une OG : sans elle, la quantité de « faux signaux » serait beaucoup trop importante.

Ensuite se pose la question suivante : puisque les données des interféromètres sont essentiellement du bruit, lequel varie dans le temps de façon aléatoire, quelle est la probabilité que des fluctuations « normales » de ce bruit dans les deux instruments produisent un signal au moins aussi fort que celui qui a été détecté ? Ce n'est que si cette probabilité est très faible qu'on pourra parler de détection. La procédure

à suivre est bien établie : on produit une grande quantité de données dont on sait à l'avance qu'elles ne peuvent pas contenir de vraies OGs et on les analyse dans les

mêmes conditions que les données réelles. Pour GW150914, ce sont ainsi environ 200 000 ans de données « bruit seul » qui ont été étudiées, sans que l'on trouve un seul « faux signal » aussi fort que celui qui a été mesuré. La probabilité de « fausse détection » pour cet événement est inférieure à une chance sur trois millions, ce qui a permis d'annoncer officiellement sa détection le 11 février 2016.

« Le contrôle de la qualité des données est un élément clef du processus »



© N. BALDOCCHI/THE VIRGO COLLABORATION

Le détecteur Virgo, installé en Italie près de Pise sur le site de l'European Gravitational Observatory (EGO). Les deux bras de l'interféromètre mesurent chacun trois kilomètres de long.

UN SECOND ÉVÉNEMENT DÉTECTÉ

Pendant l'analyse des données du signal GW150914, un second événement prometteur, baptisé « GW151226 », a été enregistré le lendemain de Noël 2015. Son étude détaillée a vraiment démarré après l'annonce officielle de la première détection et les résultats le concernant ont été rendus publics le 15 juin 2016. En suivant la même procédure que celle décrite pour GW150914, il est apparu que ce nouveau signal avait

« Les prochaines prises de données du réseau international de détecteurs s'annoncent prometteuses »

également été produit par la coalescence de deux trous noirs, plus légers que ceux observés précédemment.

En conclusion, 2016 restera une année « fameuse » pour l'étude de notre Univers.

Un siècle après la prédiction de leur existence et un demi-siècle après le début de leur recherche, les OGs ont finalement été détectées. C'est également la première fois qu'on observe directement des trous noirs. Ces découvertes ouvrent vraiment une nouvelle fenêtre sur l'Univers qui va compléter les moyens d'obser-

vation dont on disposait déjà : le spectre électromagnétique dans son ensemble (des ondes radio aux rayons gamma), les rayons cosmiques et les neutrinos. Les prochaines prises de données du réseau international de détecteurs d'OGs (les deux instruments LIGO avancés bien sûr, mais aussi Virgo avancé très prochainement, puis un détecteur japonais avant la fin de la décennie et peut-être plus tard un cinquième instrument en Inde quelques années plus tard) s'annoncent prometteuses. ■

1. Une étoile à neutrons est l'un des stades ultimes d'évolution d'une étoile en fin de vie. Un tel astre concentre une masse équivalente à celle du Soleil dans une sphère d'une dizaine de kilomètres de rayon ; sa densité est telle qu'il n'est plus composé que de neutrons.