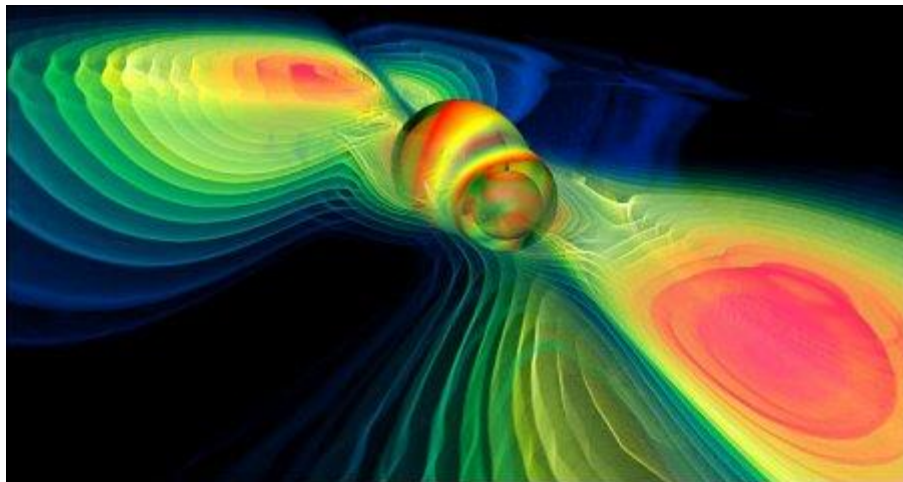




www.cnrs.fr

GW150914 : le début de l'astronomie gravitationnelle



© MPI for Gravitational Physics/W.Benger-ZIB



COMMUNIQUÉ DE PRESSE NATIONAL | PARIS | 11 FEVRIER 2016

Attention ! Sous embargo jusqu'au jeudi 11 février à 16h30.

Les ondes gravitationnelles détectées 100 ans après la prédiction d'Einstein

LIGO ouvre une nouvelle fenêtre sur l'Univers avec l'observation d'ondes gravitationnelles provenant d'une collision de deux trous noirs. Pour la première fois, des scientifiques ont observé des ondulations de l'espace-temps, appelées ondes gravitationnelles, produites par un événement cataclysmique dans l'Univers lointain atteignant la Terre après un long voyage. Cette découverte confirme une prédiction majeure de la théorie de la relativité générale énoncée par Albert Einstein en 1915 et ouvre une toute nouvelle fenêtre sur le cosmos. Les ondes gravitationnelles portent en elles des informations qui ne peuvent pas être obtenues autrement, concernant à la fois leurs origines extraordinaires (des phénomènes violents dans l'Univers) et la nature de la gravitation. La conclusion des physiciens est que les ondes gravitationnelles détectées ont été produites pendant la dernière fraction de seconde précédant la fusion de deux trous noirs en un trou noir unique, plus massif et en rotation sur lui-même. La possibilité d'une telle collision de deux trous noirs avait été prédite, mais ce phénomène n'avait jamais été observé. Ces ondes gravitationnelles ont été détectées le 14 septembre 2015, à 11h51, heure de Paris (9h51 GMT), par les deux détecteurs jumeaux de LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*) situés aux Etats-Unis – à Livingston, en Louisiane, et Hanford, dans l'Etat de Washington. Les observatoires LIGO sont financés par la *National Science Foundation* (NSF) ; ils ont été conçus et construits par Caltech et le MIT, qui assurent leur fonctionnement. La découverte, qui fait l'objet d'une publication acceptée par la revue *Physical Review Letters*, a été réalisée par la collaboration scientifique LIGO (qui inclut la collaboration GEO et l'*Australian Consortium for Interferometric Gravitational Astronomy*) et la collaboration Virgo, à partir de données provenant des deux détecteurs LIGO. Une centaine de scientifiques travaillant dans six laboratoires associés au CNRS ont contribué à cette découverte, au sein de la collaboration Virgo.

Clin d'œil de l'histoire : c'est 100 ans tout juste après la publication de la théorie de la relativité générale d'Einstein, qu'une équipe internationale vient d'en confirmer l'une des prédictions majeures, en réalisant la première détection directe d'ondes gravitationnelles. Cette découverte se double de la première observation de la « valse » finale de deux trous noirs qui finissent par fusionner.

L'analyse des données a permis aux scientifiques des collaborations LIGO et Virgo d'estimer que les deux trous noirs ont fusionné il y a 1.3 milliard d'années, et avaient des masses d'environ 29 et 36 fois celle du Soleil. La comparaison des temps d'arrivée des ondes gravitationnelles dans les deux détecteurs (7 millisecondes d'écart) et l'étude des caractéristiques des signaux mesurés par les collaborations LIGO et Virgo ont montré que la source de ces ondes gravitationnelles était probablement située dans l'hémisphère



sud. Une localisation plus précise aurait nécessité des détecteurs supplémentaires. L'entrée en service d'Advanced Virgo fin 2016 permettra justement cela.

Selon la théorie de la relativité générale, un couple de trous noirs en orbite l'un autour de l'autre perd de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Les deux astres se rapprochent lentement, un phénomène qui peut durer des milliards d'années avant de s'accélérer brusquement. En une fraction de seconde, les deux trous noirs entrent alors en collision à une vitesse de l'ordre de la moitié de celle de la lumière et fusionnent en un trou noir unique. Celui-ci est plus léger que la somme des deux trous noirs initiaux car une partie de leur masse (ici, l'équivalent de 3 soleils, soit une énergie colossale) s'est convertie en ondes gravitationnelles selon la célèbre formule d'Einstein $E=mc^2$. C'est cette bouffée d'ondes gravitationnelles que les collaborations LIGO et Virgo ont observée.

Une preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles avait été fournie par l'étude de l'objet PSR 1913+16, découvert en 1974 par Russel Hulse et Joseph Taylor – lauréats du prix Nobel de physique 1993. PSR 1913+16 est un système binaire composé d'un pulsar en orbite autour d'une étoile à neutrons. En étudiant sur trois décennies l'orbite du pulsar, Joseph Taylor et Joel Weisberg ont montré qu'elle diminuait très lentement et que cette évolution correspondait exactement à celle attendue dans le cas où le système perdait de l'énergie sous la forme d'ondes gravitationnelles. La collision entre les deux astres composants le système PSR 1913+16 est attendue dans environ... 300 millions d'années ! Grâce à leur découverte, les collaborations LIGO et Virgo ont pu observer directement le signal émis à la toute fin de l'évolution d'un autre système binaire, formé de deux trous noirs, lorsqu'ils ont fusionné en un trou noir unique.

Détecter un phénomène aussi insaisissable¹ que les ondes gravitationnelles aura demandé plus de 50 ans d'efforts de par le monde dans la conception de détecteurs de plus en plus sensibles. Aujourd'hui, par cette première détection directe, les collaborations LIGO et Virgo ouvrent une nouvelle ère pour l'astronomie : les ondes gravitationnelles sont un nouveau messenger du cosmos, et le seul qu'émettent certains objets astrophysiques, comme les trous noirs.

Autour de LIGO s'est constituée la collaboration scientifique LIGO (*LIGO Scientific Collaboration*, LSC), un groupe de plus de 1000 scientifiques travaillant dans des universités aux Etats-Unis et dans 14 autres pays. Au sein de la LSC, plus de 90 universités et instituts de recherche réalisent des développements technologiques pour les détecteurs et analysent les données collectées. La collaboration inclut environ 250 étudiants qui apportent une contribution significative. Le réseau de détecteurs de la LSC comporte les interféromètres LIGO et le détecteur GEO600. L'équipe GEO comprend des chercheurs du *Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute, AEI)*, de *Leibniz Universität Hannover* (en Allemagne), ainsi que des partenaires dans les universités de Glasgow, Cardiff, Birmingham, et d'autres universités du Royaume-Uni, et à l'Université des îles Baléares en Espagne.

Les chercheurs travaillant sur Virgo sont regroupés au sein de la collaboration du même nom, comprenant

¹ Lors de l'événement du 14 septembre 2015, la longueur des bras des interféromètres a varié d'un cent-millionième de la taille d'un atome.



www.cnrs.fr

plus de 250 physiciens, ingénieurs et techniciens appartenant à 19 laboratoires européens dont 6 au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en France, 8 à l'*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* (INFN) en Italie et 2 à Nikhef aux Pays-Bas. Les autres laboratoires sont Wigner RCP en Hongrie, le groupe POLGRAW en Pologne, et EGO (*European Gravitational Observatory*), près de Pise, en Italie, où est implanté l'interféromètre Virgo.

A l'origine, LIGO a été proposé comme un moyen de détecter ces ondes gravitationnelles dans les années 1980 par Rainer Weiss, professeur émérite de physique au MIT, Kip Thorne, professeur de physique théorique émérite à Caltech (chaire Richard P. Feynman) et Ronald Drever, professeur de physique émérite à Caltech. Virgo est né grâce aux idées visionnaires d'Alain Brillet et d'Adalberto Giazotto. Le détecteur a été conçu grâce à des technologies innovantes, étendant sa sensibilité dans la gamme des basses fréquences. La construction a commencé en 1994 et a été financée par le CNRS et l'INFN ; depuis 2007, Virgo et LIGO ont partagé et analysé en commun les données collectées par tous les interféromètres du réseau international. Après le début des travaux de mise à niveau de LIGO, Virgo a continué à fonctionner jusqu'en 2011.

Le projet Advanced Virgo, financé par le CNRS, l'INFN et Nikhef, a ensuite été lancé. Le nouveau détecteur sera opérationnel d'ici la fin de l'année. En outre, d'autres organismes et universités des 5 pays européens de la collaboration Virgo contribuent à la fois à Advanced Virgo et à la découverte annoncée aujourd'hui.

En s'engageant depuis plus de vingt ans dans la réalisation de Virgo puis d'Advanced Virgo, la France s'est placée en première ligne pour la recherche des ondes gravitationnelles. Le partenariat noué avec LIGO pour l'exploitation des instruments LIGO et Virgo, qui se traduit par la participation directe de laboratoires français aussi bien à l'analyse des données qu'à la rédaction et à la validation des publications scientifiques, est le prolongement de collaborations techniques très anciennes avec LIGO, ayant conduit par exemple à la réalisation du traitement des surfaces des miroirs de LIGO à Villeurbanne. La publication scientifique des collaborations LIGO et Virgo annonçant leur découverte est cosignée par 75 scientifiques français provenant de six équipes du CNRS et des universités associées :

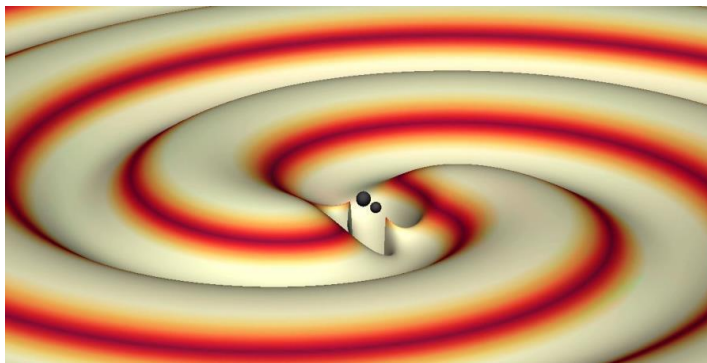
- le laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS/Université Paris Diderot/CEA/Observatoire de Paris), à Paris ;
- le laboratoire Astrophysique relativiste, théories, expériences, métrologie, instrumentation, signaux (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Nice Sophia Antipolis), à Nice ;
- le Laboratoire de l'accélérateur linéaire (CNRS/Université Paris-Sud), à Orsay ;
- le Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (CNRS/Université Savoie Mont Blanc), à Annecy-le-Vieux ;
- le Laboratoire Kastler Brossel (CNRS/UPMC/ENS/Collège de France), à Paris ;
- le Laboratoire des matériaux avancés (CNRS), à Villeurbanne.

La découverte a été rendue possible par les capacités accrues d'Advanced LIGO, une version grandement améliorée qui accroît la sensibilité des instruments par rapport à la première génération des détecteurs LIGO. Elle a permis une augmentation notable du volume d'Univers sondé – et la découverte des ondes gravitationnelles dès sa première campagne d'observations. La National Science Foundation des États-



www.cnrs.fr

Unis a financé la plus grande partie d'Advanced LIGO. Des agences de financement allemande (Max Planck Society), britannique (*Science and Technology Facilities Council*, STFC) et australienne (*Australian Research Council*) ont aussi contribué de manière significative au projet. Plusieurs des technologies clés qui ont permis d'améliorer très nettement la sensibilité d'Advanced LIGO ont été développées et testées par la collaboration germano-britannique GEO. Des ressources de calcul significatives ont été allouées au projet par le groupe de calcul Atlas de l'AEI à Hanovre, le laboratoire LIGO, l'université de Syracuse et l'Université du Wisconsin à Milwaukee. Plusieurs universités ont conçu, construit et testé des composants clés d'Advanced LIGO : l'université nationale australienne, l'université d'Adélaïde, l'université de Floride, l'université Stanford, l'université Columbia de New York et l'université d'Etat de Louisiane.



Simulation de l'évolution des deux trous noirs, juste avant leur fusion, et des ondes gravitationnelles qu'ils produisent

© Max Planck Institute for Gravitational Physics



De gauche à droite : les deux détecteurs LIGO (à Hanford et Livingston, États-Unis) et le détecteur Virgo (Cascina, Italie).

© LIGO Laboratory (deux premières photos) et Virgo / Nicola Baldocchi 2015

Pour prolonger cet événement :

Demain, vendredi 12 février, des chercheurs français du consortium LIGO/Virgo donnent rendez-vous aux curieux sur Twitter de 13h30 à 14h pour répondre aux questions sur la détection exceptionnelle des ondes gravitationnelles. Ils attendent dès maintenant les questions des Twittos avec #AskLVC !



www.cnrs.fr

Bibliographie

Observation of gravitational waves from a binary black hole merger, the LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration. *Physical Review Letters*, le 11 février 2016.

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

Une douzaine d'articles accompagnant cet article principal seront disponibles sur ArXiv.

Contacts presse

CNRS Presse | T 01 44 96 51 51 | presse@cnrs.fr

Véronique Etienne | T 01 44 96 51 37 | veronique.etienne@cnrs-dir.fr

Priscilla Dacher | T 01 44 96 46 06 | priscilla.dacher@cnrs-dir.fr

LA DECOUVERTE EN DETAILS

Dans cet article, deux avancées scientifiques majeures en lien avec des prédictions centrales de la théorie de la relativité générale d'Einstein sont présentées : la première détection directe des **ondes gravitationnelles** et la première observation de la coalescence de deux **trous noirs**.

L'événement extrême qui a produit le signal d'ondes gravitationnelles, identifié par l'acronyme **GW150914**, a eu lieu dans une galaxie lointaine située à environ un milliard d'années-lumière de la Terre. Il a été observé le 14 septembre 2015 par les deux détecteurs **LIGO** (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*), probablement les instruments scientifiques les plus sensibles jamais construits. Les scientifiques des **collaborations LIGO et Virgo** ont estimé que la puissance maximale émise sous forme d'ondes gravitationnelles au moment de la fusion des deux trous noirs était dix fois plus importante que la puissance émise sous forme de lumière par l'ensemble des étoiles et des galaxies de l'Univers observable. Cette découverte remarquable marque le début d'une nouvelle ère prometteuse pour l'astronomie. Une nouvelle fenêtre s'ouvre sur l'Univers : celle des ondes gravitationnelles.

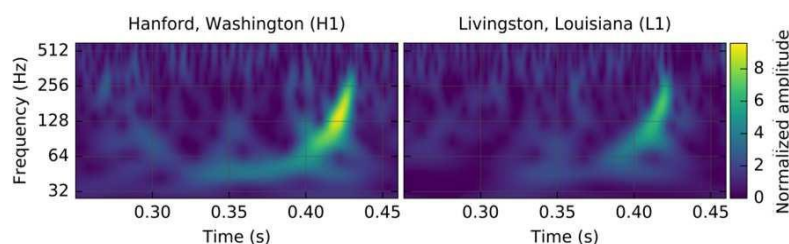


Figure 1 (adaptée de la figure 1 de la publication scientifique). L'événement GW150914 observé par les détecteurs LIGO de Hanford (H1, à gauche) et Livingston (L1, à droite). Ces deux images montrent comment le signal d'ondes gravitationnelles (voir ci-dessous) enregistré dans chaque détecteur a évolué en fonction du temps (axes horizontaux gradués en seconde) et de la fréquence (en hertz, ou nombre de cycles de l'onde par seconde). Ils montrent que la fréquence du signal augmente rapidement, de 35 Hz à environ 150 Hz en à peine deux dixièmes de seconde. GW150914 est arrivé d'abord à L1 puis environ sept millièmes de seconde plus tard à H1 – une durée compatible avec le temps mis par la lumière, ou une onde gravitationnelle, pour aller d'un détecteur à l'autre.

Introduction et contexte

Les ondes gravitationnelles sont des « ondulations » de l'espace-temps produites par certains des événements les plus violents du cosmos, comme les fusions d'astres compacts et massifs. Leur existence a été prédite par Einstein dès 1916, quand il a montré que l'accélération de ces objets ébranlait l'espace-temps si bien que des ondes transportant ces distorsions de l'espace étaient émises. Ces ondulations voyagent à la vitesse de la lumière à travers l'Univers, emportant avec elles des informations sur leur origine violente, ainsi que des indices très précieux pour comprendre la nature de la gravitation.

Au cours des dernières décennies, les scientifiques ont accumulé des preuves convaincantes de l'existence des ondes gravitationnelles, principalement en étudiant leur effet sur le mouvement de paires d'étoiles de notre galaxie, orbitant l'une autour de l'autre à faible distance. Les résultats de ces études indirectes sont en très bon accord avec la théorie d'Einstein : les orbites des étoiles rétrécissent petit à petit à cause d'une perte d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Néanmoins, la détection directe d'ondes gravitationnelles arrivant sur Terre était très attendue par la communauté scientifique dans la mesure où il s'agissait d'une avancée qui devait permettre de nouveaux tests plus stricts de la relativité générale dans des conditions extrêmes et donnerait accès à un nouveau mode d'exploration de l'Univers.



L'année même de la prédiction des ondes gravitationnelles par Einstein, le physicien Karl Schwarzschild a montré que les travaux d'Einstein impliquaient l'existence de trous noirs : des objets étranges qui sont si compacts que même la lumière ne peut échapper à leur gravité. Bien que par définition il soit impossible de « voir » un trou noir, les astronomes se sont convaincus de leur existence en étudiant les effets sur leur environnement immédiat d'objets célestes considérés comme de bons candidats pour être des trous noirs. Par exemple, on pense que la plupart des galaxies de l'Univers, dont la Voie Lactée, abritent un **trou noir supermassif** en leur centre, dont la masse est des millions voire des milliards de fois celle du Soleil. On a aussi identifié de nombreux candidats trous noirs beaucoup plus légers (dont les masses vont de quelques à quelques dizaines de masses solaires) qui seraient les restes d'étoiles mortes qui pourraient avoir subi une explosion très violente appelée **supernova à effondrement de cœur**.

En parallèle des progrès importants en matière d'observation indirecte de trous noirs, notre compréhension théorique de ces objets bizarres s'est beaucoup améliorée – en particulier au cours de la dernière décennie, grâce à des avancées remarquables dans la modélisation de systèmes binaires de trous noirs lors des dernières orbites qui précèdent leur fusion. Ces calculs informatiques nous ont permis de construire, en accord avec les prédictions de la relativité générale, des **formes d'ondes précises** – c'est-à-dire le signal d'ondes gravitationnelles émises par un système de deux trous noirs évoluant jusqu'à la fusion finale. L'observation directe de la fusion d'un couple de trous noirs est donc un laboratoire cosmique très puissant pour tester la théorie d'Einstein.

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles

LIGO est le plus grand observatoire d'ondes gravitationnelles au monde et l'une des expériences scientifiques les plus complexes. Il comporte deux **interféromètres à laser** géants, séparés de plusieurs milliers de kilomètres : l'un est à Livingston, en Louisiane, et l'autre à Hanford, dans l'État de Washington. LIGO utilise les propriétés physiques de la lumière et de l'espace pour rechercher des ondes gravitationnelles – une méthode proposée à l'origine dans les années 1960 et 1970. Un ensemble d'interféromètres de première génération a été mis en service au début des années 2000 : TAMA300 au Japon, GEO600 en Allemagne, LIGO aux États-Unis et Virgo en Italie. Des combinaisons de ces instruments ont effectué des observations conjointes entre 2002 et 2011, sans qu'aucune onde gravitationnelle ne soit détectée. Après un travail d'amélioration de plusieurs années, les détecteurs LIGO « avancés » (**Advanced LIGO**) sont devenus en 2015 les premiers représentants d'un réseau mondial d'instruments beaucoup plus sensibles. En 2016 le détecteur **Advanced Virgo** (en Italie) rejoindra le réseau mondial – tandis que d'autres interféromètres sont prévus dans le futur.

Pour plus de détails, voir par exemple : <http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>

Un interféromètre comme ceux de LIGO ou Virgo se compose de deux « bras » perpendiculaires (chacun long de plusieurs kilomètres), dans lesquels un faisceau laser circule et se réfléchit à chaque extrémité sur des miroirs (suspendus pour former des **masses test**). Lorsqu'une onde gravitationnelle arrive, l'étirement et la compression de l'espace associés font que les bras de l'interféromètre s'étirent et raccourcissent alternativement : quand l'un devient plus court, l'autre s'allonge, et vice-versa. Puisque les longueurs des bras de l'interféromètre varient, le faisceau laser a un temps de parcours différent dans chaque bras, ce qui signifie que les deux faisceaux ne sont plus « exactement synchronisés » (ou « **en phase** ») : les **figures d'interférence** mesurées en sortie de l'instrument sont alors modifiées. C'est pour cela qu'on appelle « interféromètres » les détecteurs LIGO et Virgo.

La différence de longueurs entre les deux bras est proportionnelle à l'**amplitude** de l'onde gravitationnelle incidente. L'onde gravitationnelle détectée, GW150914, a engendré une différence de l'ordre d'un cent-millionième de la taille d'un atome !

Pour détecter avec succès une onde gravitationnelle comme l'événement GW150914, les détecteurs doivent combiner une sensibilité extrême avec une grande capacité de séparation entre les signaux réels et le **bruit instrumental** : des perturbations minimales, dues par exemple à l'influence de l'environnement ou à des changements au niveau du détecteur, qui peuvent imiter – ou simplement recouvrir – la signature d'une onde gravitationnelle recherchée. C'est la raison principale pour laquelle plusieurs détecteurs sont construits. En effet, cette configuration

permet de distinguer les ondes gravitationnelles d'effets locaux, instrumentaux ou environnementaux : seul un vrai signal gravitationnel peut apparaître dans plusieurs détecteurs à la fois – quoique séparés par quelques millièmes de seconde pour prendre en compte le temps mis par la lumière (ou une onde gravitationnelle) pour se propager entre les deux détecteurs Advanced LIGO. Utiliser un réseau de deux détecteurs ou plus permet également de « trianguler » la direction du ciel de laquelle l'onde gravitationnelle arrive, en étudiant les différences de temps d'arrivée entre les détecteurs. Plus le réseau inclut d'instruments et meilleure est la localisation de la source dans le ciel.

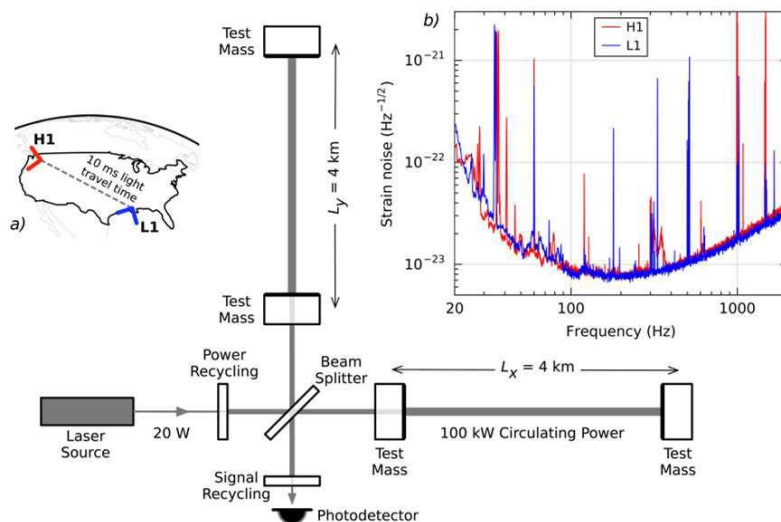


Figure 2. Représentation simplifiée (et pas à l'échelle) d'un détecteur Advanced LIGO montrant les améliorations principales apportées au schéma de base : une **cavité optique** qui fait recirculer le faisceau laser de nombreuses fois dans chaque bras, amplifiant d'autant l'effet du passage d'une onde gravitationnelle ; un **miroir de recyclage de puissance** (« Power Recycling ») qui augmente la puissance laser stockée dans l'interféromètre ; un **miroir de recyclage du signal** (« Signal Recycling ») qui permet d'optimiser encore un peu le signal extrait en sortie au niveau du **photodétecteur** (« Photodetector »). Ces améliorations multiplient la puissance du laser dans les cavités optiques par 5 000 et augmentent le temps total pendant lequel le signal circule dans l'interféromètre.

L'encart a), à gauche, montre l'emplacement et l'orientation des deux observatoires LIGO et donne le temps de parcours de la lumière entre les deux sites (10 millisecondes). L'encart b) montre comment la **sensibilité de l'instrument** variait en fonction de la fréquence pendant la période où l'événement a été enregistré. Plus le niveau de bruit est bas et meilleure est la sensibilité de l'instrument. Les grands pics montrent des bandes de fréquence très étroites pour lesquelles le bruit du détecteur est particulièrement important.

Les observations et leurs implications

Le 14 septembre 2015 à 11h50 minutes et 45 secondes heure de Paris, les détecteurs LIGO de Hanford et de Livingston ont détecté tous les deux le signal GW150914. Il a d'abord été découvert par l'une des méthodes de recherche d'ondes gravitationnelles temps-réel, qui sont conçues pour analyser très rapidement les données enregistrées et y chercher les indices du passage d'une onde gravitationnelle, mais sans chercher à reconstruire précisément les détails de la forme d'onde. Ces algorithmes ont identifié le candidat GW150914 comme prometteur **trois minutes** à peine après l'arrivée du signal dans les détecteurs. Ensuite, les données ont été comparées à un vaste catalogue de formes d'onde prédites par la théorie – la méthode dite du **filtrage adapté** – afin de trouver la forme d'onde qui décrit le mieux le signal observé.

La figure 3 montre les principaux résultats de ces analyses détaillées – qui toutes s'accordent sur le fait que le signal GW150914 a été produit par la coalescence de deux trous noirs.

Comparer les données avec des prédictions théoriques permet de tester si la relativité générale suffit pour décrire l'événement dans son ensemble. Le test est réussi haut la main : toutes les observations sont en accord avec les prédictions de la relativité générale.

On peut aussi utiliser les données pour mesurer certaines des caractéristiques physiques du système qui a produit le signal GW150914 : la masse des deux trous noirs initiaux, celle du trou noir final et la distance de l'événement.

Ces résultats montrent que le signal GW150914 a été produit par la fusion de deux trous noirs de **36 et 29 masses solaires**, tandis que le trou noir final avait une masse d'environ **62 masses solaires**. De plus, ils ont permis de conclure que le trou noir final est en rotation sur lui-même – une configuration prédite théoriquement pour la première fois en 1963 par le mathématicien Roy Kerr. Finalement, les données montrent que l'événement GW150914 a eu lieu à une distance de l'ordre du **milliard d'années-lumière**. Les deux détecteurs LIGO ont donc observé un événement particulièrement remarquable et qui a eu lieu « il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine, très lointaine » !

Si l'on compare les masses des trous noirs avant et après la fusion, on constate que la coalescence a converti environ trois fois la masse du Soleil (soit environ **six mille milliards de milliards de milliards de kilogrammes**) en énergie émise sous forme d'ondes gravitationnelles, pour l'essentiel en une fraction de seconde. En comparaison, le Soleil convertit à peine deux millièmes de milliardième de milliardième de sa masse en radiation électromagnétique (lumière) chaque seconde. En fait, la puissance en ondes gravitationnelles émise par l'événement GW150914 a atteint à son paroxysme plus de dix fois la luminosité combinée (c'est-à-dire la puissance lumineuse) émise par **l'ensemble des étoiles et des galaxies de l'Univers observable**.

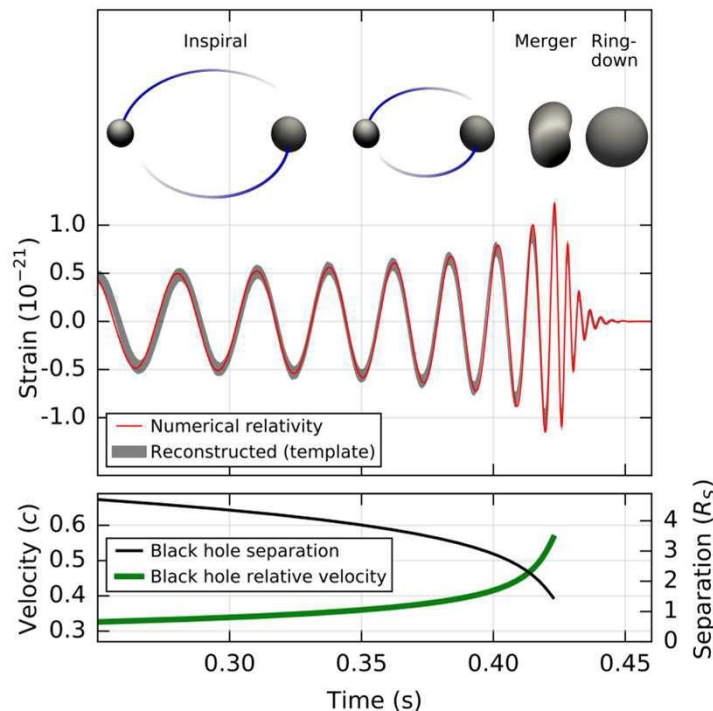


Figure 3. Certains des principaux résultats de l'analyse de l'événement GW150914 comparant le signal reconstruit (vu par le détecteur H1 à Hanford) et les prédictions de la forme d'onde calculée à l'aide de la relativité générale et qui décrit le mieux le signal observé de manière globale, au cours des trois phases de l'événement : la partie spirale (« inspiral ») lorsque les deux trous noirs se rapprochent, la fusion (« merger ») lorsqu'ils entrent en collision et la désexcitation (« ringdown ») où le trou noir unique juste formé oscille brièvement avant de se stabiliser. On peut également voir l'évolution de la distance séparant les deux trous noirs et celle de leur vitesse relative et observer comment ces deux grandeurs varient rapidement au moment de la fusion.

Comment savons-nous que l'événement GW150914 est bien une coalescence de trous noirs ?

L'estimation des masses des objets compacts qui ont fusionné lors de l'événement GW150914 est un argument très fort en faveur de l'hypothèse qu'il s'agit bien de deux trous noirs – en particulier lorsqu'on considère leur vitesse énorme et leur distance extrêmement réduite, montrées sur la partie basse de la figure 3. Sur ce graphique, la vitesse relative atteint une fraction non négligeable de la **vitesse** de la lumière alors qu'ils ne sont séparés que d'une **distance** de l'ordre de quelques **rayons de Schwarzschild**, la taille caractéristique d'un trou noir.

Ces résultats signifient que les deux objets compacts n'étaient distants que de quelques centaines de kilomètres juste avant de fusionner, c'est-à-dire quand la fréquence des ondes gravitationnelles était d'environ 150 Hz (ce qui correspond à une fréquence de 75 orbites par seconde !) Les trous noirs sont les seuls objets connus suffisamment



compacts pour se rapprocher autant sans fusionner. Etant donnée notre estimation de la masse totale des deux composants, une paire d'étoiles à neutrons aurait été trop légère tandis qu'une paire trou noir-étoile à neutrons aurait fusionné à une fréquence plus faible.

Est-on sûr que l'événement GW150914 est bien d'origine astrophysique ?

Une réponse courte à cette question est « oui ». Mais c'est évidemment un point crucial sur lequel les collaborations LIGO et Virgo ont fait porter un effort très important : de nombreux tests, indépendants et minutieux, ont été menés à bien – chacun contribuant à renforcer la conviction que l'événement GW150914 est bien une vraie détection.

Tout d'abord, comme indiqué précédemment, le délai entre les observations faites dans les deux détecteurs LIGO est compatible avec le temps de parcours des ondes gravitationnelles d'un site à l'autre. De plus, comme le montre la figure 1, les signaux observés à Hanford et à Livingston sont remarquablement similaires (ce qui est attendu dans la mesure où les deux interféromètres sont presque alignés) et suffisamment forts pour « ressortir » bien au-dessus du niveau de bruit de fond au moment où l'événement a été détecté – un peu comme un grand éclat de rire que l'on entend clairement malgré le bavardage qui règne dans une pièce bondée.

Comprendre ce bruit de fond est un élément clef de l'analyse et requiert le suivi permanent d'un vaste ensemble de données environnementales enregistrées sur chaque site : mouvements du sol, variations de température ou fluctuations du courant fourni par le secteur, pour n'en citer que quelques-uns. En parallèle, de nombreux canaux suivent en temps réel l'**état des interféromètres** – on vérifie par exemple que les différents faisceaux laser sont bien centrés sur leurs optiques. Si un seul de ces canaux (environnemental ou instrumental) détecte un problème, les données correspondantes ne sont pas utilisées. Les études exhaustives menées sur l'événement GW150914 n'ont révélé aucun problème de qualité des données.

Mais peut-être que cet événement pourrait être une très rare fluctuation des bruits instrumentaux, survenue par hasard au même instant et avec des caractéristiques très similaires sur les deux sites ? Pour pouvoir rejeter cette hypothèse, il faut pouvoir estimer la rareté d'une telle fluctuation : moins elle a de chance de se produire, et plus le scénario opposé – l'événement GW150914 a bien été produit par des ondes gravitationnelles – est probable.

Pour mener à bien cette analyse statistique, 16 jours de données de bonne qualité, enregistrées pendant le mois qui a suivi l'événement et correspondant à des périodes où les deux interféromètres fonctionnaient de manière stable, ont été utilisées. GW150914 est de loin le signal le plus fort observé dans chacun des détecteurs sur l'ensemble de la période.

On peut ainsi mesurer qu'une telle fluctuation fortuite se produit de manière simultanée moins fréquemment qu'une fois en 200 000 ans de données. Les spécialistes disent que l'événement GW150914 est bien réel, avec une signification statistique supérieure à 5 sigmas.

Conclusions et perspectives

La première détection directe des ondes gravitationnelles et la première observation d'une coalescence de deux trous noirs sont des résultats remarquables, qui ne représentent cependant que la première page d'un nouveau chapitre de l'astronomie.

La prochaine décennie verra les détecteurs Advanced LIGO progresser encore et une extension du réseau mondial avec les détecteurs Advanced Virgo en Italie, puis KAGRA au Japon et peut-être un 3ème LIGO en Inde.

Ce réseau mondial améliorera notre capacité à localiser les sources d'ondes gravitationnelles dans le ciel et à estimer de manière plus précise leurs propriétés. L'astronomie gravitationnelle a un avenir brillant devant elle !