



LIGO
Scientific
Collaboration

Virgo et LIGO réalisent la première détection d'ondes gravitationnelles produites par la collision d'étoiles à neutrons

Cette découverte est le premier événement en provenance du cosmos observé à la fois en ondes gravitationnelles et sous forme de lumière

Suivez la conférence de presse en direct à l'adresse:

<http://www.virgo-gw.eu/>

Pour la première fois, des scientifiques ont directement détecté des ondes gravitationnelles – des vagues infimes se propageant sur l'espace-temps – ainsi que de la lumière en provenance d'une collision spectaculaire de deux étoiles à neutrons. Grâce à cette découverte (une première !), un événement en provenance du cosmos est observé à la fois en ondes gravitationnelles et sous forme de lumière.

Cette découverte a été réalisée avec les détecteurs LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), construits aux Etats-Unis ; avec le détecteur européen Virgo ; et avec environ 70 observatoires, au sol ou dans l'espace.

Les étoiles à neutrons sont les étoiles les plus petites et les plus denses connues à ce jour; elles se forment lors de l'explosion d'une étoile massive en fin de vie – une « supernova ». Lorsque les deux étoiles à neutrons du système dont la découverte est présentée ici spiralaient l'une vers l'autre, elles ont émis des ondes gravitationnelles, suffisamment fortes pour être détectables pendant environ les 100 dernières secondes qui ont précédé la fusion des deux astres. Au moment de la collision, un flash de lumière très énergétique (des rayons gamma) a été émis et est arrivé sur Terre environ deux secondes après les ondes gravitationnelles. Dans les jours et les semaines qui ont suivi ce télescopage cosmique, d'autres types de lumière – on parle de rayonnement électromagnétique : rayons X, ultraviolet, visible, infrarouge, ondes radio – ont également été détectés.

Ces observations ont pour la première fois permis aux scientifiques d'étudier la collision de deux étoiles à neutrons. Par exemple, des observations faites par l'observatoire américain Gemini, par le « Very Large Telescope » européen et par le télescope spatial Hubble de la NASA ont révélé l'émission d'éléments chimiques créés au cours du processus, dont de l'or et du platine. Cette découverte résout un mystère vieux de plusieurs décennies : où étaient donc produits la moitié des éléments chimiques plus lourds que le fer, présents dans l'Univers ?



LIGO
Scientific
Collaboration

Les résultats Virgo-LIGO sont publiés aujourd'hui dans la revue scientifique *Physical Review Letters* ; d'autres articles signés des collaborations LIGO et Virgo ainsi que de la communauté astronomique ont déjà été acceptés ou soumis à plusieurs revues scientifiques.

« C'est très excitant d'être le témoin d'un événement rare qui transforme ainsi notre vision de l'Univers », a déclaré France A. Córdova, la directrice de la National Science Foundation (NSF) qui finance le projet LIGO. « Cette découverte réalise un rêve que nous étions nombreux à avoir depuis longtemps, à savoir l'observation simultanée d'un événement cosmique catastrophique à la fois avec des instruments traditionnels et avec des détecteurs d'ondes gravitationnelles. C'est uniquement grâce à un investissement de la NSF sur une période de 40 ans, dans la recherche des ondes gravitationnelles et l'observation de l'ensemble du spectre électromagnétique – des ondes radio aux rayons gamma –, que nous avons pu augmenter nos chances de détecter de tels phénomènes nouveaux et de comprendre la physique qui prévaut dans les étoiles à l'agonie.

Un signe des étoiles

Le signal d'ondes gravitationnelles, appelé GW170817, a été détecté le 17 août à 14h41 heure de Paris ; la détection a été réalisée par les deux détecteurs jumeaux LIGO, construits pour l'un à Hanford (état de Washington), pour l'autre à Livingston (Louisiane). Les informations fournies par le troisième détecteur du réseau, Virgo, situé près de Pise en Italie, ont largement amélioré la localisation de la source de l'événement dans le ciel. A cette date, la seconde campagne de prise de données de LIGO consécutive au programme d'amélioration « Advanced LIGO » s'achevait. Virgo avait lui démarré sa campagne de prise de données le 1^{er} août, après la fin de son propre programme d'amélioration sur plusieurs années, appelé « Advanced Virgo ».

Les observatoires LIGO, financés par la NSF, ont été conçus, construits et pilotés par les laboratoires Caltech et MIT. Virgo a été financé par l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) en Italie et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) en France; il est piloté par l'European Gravitational Observatory (EGO). Environ 1 500 scientifiques issus des deux collaborations LIGO et Virgo ont travaillé ensemble pendant les périodes de prise de données et pour analyser les signaux d'ondes gravitationnelles détectés.

Chaque détecteur se compose de deux longs tunnels construits à angle droit. A leur extrémité commune, un laser est séparé en deux par un miroir semi-réfléchissant incliné à 45 degrés : chaque faisceau voyage jusqu'au bout du



LIGO
Scientific
Collaboration

tunnel, y est réfléchi par un miroir suspendu et repart en sens inverse. En l'absence d'onde gravitationnelle, les faisceaux laser se recombinaient au point où ils ont été séparés d'une manière telle qu'ils « s'annulent mutuellement » : aucune lumière n'est détectée en sortie. Par contre, lorsqu'une onde gravitationnelle traverse la Terre, elle perturbe le trajet des deux faisceaux et modifie leur temps de parcours, ce qui change de manière ténue la puissance laser détectée en sortie de l'interféromètre.

Le 17 août, les programmes d'analyse en temps réel des données LIGO ont observé un fort signal, probablement une onde gravitationnelle en provenance de l'espace. A peu près au même moment, le système de recherche de sursauts gamma du télescope spatial Fermi de la NASA (l'instrument « GBM ») a observé une bouffée de rayons gamma. Les programmes d'analyse des données LIGO-Virgo ont rassemblé ces deux informations et ont calculé qu'il était très improbable que ce soit une coïncidence due au hasard. En parallèle, une autre analyse automatique a trouvé un signal en coïncidence dans le second instrument LIGO. La détection rapide des ondes gravitationnelles par la collaboration LIGO-Virgo, associée à celle du sursaut gamma par Fermi, a permis le lancement d'une large campagne de suivi par des télescopes dans le monde entier.

Les données LIGO-Virgo montrent que deux astres situés à environ « seulement » 130 millions d'années-lumière de la Terre ont spiralé l'un vers l'autre jusqu'à fusionner. Ces objets n'étaient pas aussi massifs que les systèmes doubles de trous noirs dont quatre exemplaires ont déjà été détectés par Virgo et LIGO. Plus précisément, les masses de ces astres ont été estimées entre 1,1 et 1,6 fois celle de notre Soleil, c'est-à-dire dans la gamme de masse des étoiles à neutrons. Une étoile à neutrons mesure environ 20 km de diamètre mais est si dense qu'une cuillère à café d'un tel astre pèse environ un milliard de tonnes.

Alors que la fusion de deux trous noirs ne produit un « gazouillis » détectable dans les détecteurs LIGO-Virgo que pendant une fraction de seconde, le gazouillis du 17 août est observable pendant environ cent secondes dans les détecteurs LIGO et traverse une grande partie de l'intervalle de fréquences accessibles par les interféromètres géants - lequel correspond approximativement à celui des instruments de musique ordinaires. Les scientifiques ont démontré que les sources du gazouillis étaient des objets bien moins massifs que les trous noirs observés jusqu'alors.

« Très rapidement, il a été clair que la source de ce signal était vraisemblablement la fusion de deux étoiles à neutrons, l'autre source d'ondes gravitationnelles que nous convoitions et espérons voir - et que nous avons promis au monde de découvrir », témoigne David Shoemaker,



LIGO
Scientific
Collaboration

porte-parole de la collaboration LIGO et directeur de recherche au MIT (Kavli Institute for Astrophysics and Space Research). « Cet événement est d'une richesse incroyable : il nous donne des informations détaillées sur le fonctionnement interne des étoiles à neutrons sur les émissions que leur fusion génère ; il permet également de réaliser des tests de physique fondamentale - notamment en relativité générale. C'est un cadeau dont nous allons profiter pendant longtemps. »

« Nos analyses ont montré qu'un événement de cette force, s'il était produit par des fluctuations aléatoires du bruit de mesures des détecteurs, surviendrait moins d'une fois tous les 80 000 ans. La découverte est donc apparue rapidement comme très solide et en provenance d'une source remarquablement proche à l'échelle de l'Univers », ajoute Laura Cadonati, professeur de physique à l'Université Georgia Tech et porte-parole adjointe de la collaboration LIGO. « Cette détection ouvre de nouvelles perspectives en astrophysique ; je m'attends à ce qu'elle entre dans l'histoire comme l'un des événements les plus étudiés en astronomie. »

Les physiciens théoriciens ont prédit que lorsque deux étoiles à neutrons entrent en collision elles émettent des ondes gravitationnelles et des rayons gamma, ainsi que de puissants jets qui produisent de la lumière sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Le sursaut gamma détecté par le satellite Fermi est ce qu'on appelle un « sursaut court » ; l'observation de GW170817 montre qu'au minimum certains de ces sursauts gamma courts sont induits par la fusion de deux étoiles à neutrons - une hypothèse purement théorique jusqu'à maintenant.

« Pendant des décennies nous avons suspecté que les sursauts gamma courts étaient produits par des collisions d'étoiles à neutrons », indique Julie McEnery, scientifique responsable du projet Fermi et chercheur au Goddard Space Flight Center de la NASA. « Aujourd'hui, avec les données incroyables enregistrées par les détecteurs LIGO et Virgo, nous en avons la confirmation. Les ondes gravitationnelles nous disent que les objets qui ont fusionné avaient des masses compatibles avec celles des étoiles à neutrons tandis que la bouffée de sursauts gamma observés nous apprend que ces astres ne sont sans doute pas des trous noirs car on ne s'attend pas à ce qu'une fusion de trous noirs produise de la lumière. »

Mais, pour un mystère résolu, d'autres apparaissent. Le sursaut gamma court était l'un des plus proches de la Terre jamais observé ; pourtant, il était anormalement faible pour une telle distance. « Les scientifiques commencent à proposer des modèles pour expliquer cette observation », conclut McEnery en précisant que d'autres indices seront probablement récoltés dans les prochaines années.



LIGO
Scientific
Collaboration

Une tache dans le ciel

Même si les détecteurs LIGO ont été les premiers à observer clairement cette onde gravitationnelle, le détecteur Virgo a joué un rôle clef dans la découverte. En effet, Virgo n'a vu qu'un signal faible à cause de son orientation par rapport à la source à l'instant de la détection. Ce résultat, combiné avec les informations des détecteurs LIGO (amplitudes et temps d'arrivée des signaux détectés), a permis aux scientifiques de « trianguler » avec précision la position de la source dans le ciel. Après avoir mené à bien une série d'études rigoureuses pour éliminer la possibilité que l'événement soit un artefact des instruments ou ait une origine terrestre, les chercheurs ont conclu que la source de l'onde gravitationnelle se trouvait dans une petite région - à peine une « tache » - du ciel austral.

« Cet événement est celui qui a été localisé le plus précisément parmi toutes les détections d'ondes gravitationnelles à ce jour », s'enthousiasme Jo van den Brand de Nikhef (l'Institut National Néerlandais pour la Physique Subatomique) et de l'Université VU à Amsterdam, le porte-parole de la collaboration Virgo. « Cette précision record a permis aux astronomes de réaliser de nombreuses observations complémentaires, un suivi multi-longueurs d'onde qui a déjà permis d'obtenir une pléthore de résultats à couper le souffle ! ».

« Cette découverte est un exemple remarquable d'efficacité dans le travail d'équipe ; il démontre l'importance de la coordination entre projets et illustre la valeur ajoutée apportée par la collaboration scientifique », ajoute Federico Ferrini, le Directeur d'EGO « Nous sommes ravis d'avoir joué un rôle important dans cet extraordinaire défi scientifique. Sans Virgo, il aurait été très difficile de localiser la source de ce nouveau signal d'ondes gravitationnelles ».

Le télescope Fermi a fourni une première localisation de la source dans le ciel, confirmée avec les coordonnées bien plus précises fournies ensuite par le réseau LIGO-Virgo. Munis de ces informations, une poignée d'observatoires dans le monde ont pu, quelques heures plus tard, commencer à observer la région du ciel qui devait contenir la source. Des télescopes optiques ont, les premiers, trouvé un point lumineux qui ressemblait à une nouvelle étoile. Au final, environ soixante-dix observatoires, sur Terre ou dans l'espace, ont observé l'événement dans les gammes de longueurs d'ondes auxquelles ils étaient sensibles.

« Cette détection marque le vrai début de l'astronomie « multi-messager » espérée depuis longtemps », indique David Reitze, le directeur exécutif des



LIGO
Scientific
Collaboration

laboratoires LIGO. « C'est la première fois qu'un événement astrophysique cataclysmique a été observé à la fois avec des ondes gravitationnelles et des ondes électromagnétiques - nos messagers cosmiques. L'astronomie en ondes gravitationnelles offre de nouvelles opportunités pour comprendre les propriétés des étoiles à neutrons qui vont bien au-delà de ce qu'il est possible de faire avec uniquement l'astronomie classique, basée sur la lumière.

Une boule de feu et une émission rémanente de lumière multi-longueurs d'onde

Chaque télescope électromagnétique publiera le détail de ses propres observations de cet événement astrophysique. Mais un scénario global se dessine à partir de l'ensemble de ces résultats : il confirme que le signal initial d'ondes gravitationnelles a bien été émis par une paire d'étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre.

Il y a à peu près 130 millions d'années, les deux étoiles à neutrons vivaient les derniers instants de leur pas de deux, séparées de seulement 300 kilomètres. Et leur mouvement s'accélérait à mesure qu'elles se rapprochaient. Alors que ces astres spiralaient l'un vers l'autre, toujours plus vite et de plus en plus proches, ils ont déformé l'espace-temps autour d'eux, libérant de l'énergie sous la forme de puissantes ondes gravitationnelles, avant de finalement se fracasser l'un contre l'autre.

Au moment de la collision, la majeure partie des deux étoiles à neutrons a fusionné pour former un objet ultra-dense tout en émettant une « boule de feu » sous forme de rayons gamma. Les mesures de ce sursaut gamma, combinées avec la détection des ondes gravitationnelles, confortent également la théorie de la relativité générale d'Einstein qui prédit que les ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière.

Les physiciens théoriciens ont prédit que la boule de feu initiale produit une « kilonova », un phénomène au cours duquel la matière restant après la collision des étoiles à neutrons est éjectée loin dans l'espace en émettant de la lumière. Les observations basées sur le spectre électromagnétique montrent que des éléments chimiques lourds, comme le plomb ou l'or, sont créés au cours de ces phénomènes et sont ainsi dispersés dans l'Univers.

Dans les prochaines semaines et les prochains mois, les télescopes du monde entier vont continuer à observer l'émission rémanente consécutive à la collision des deux étoiles à neutrons et à rassembler ainsi des indices supplémentaires sur l'évolution de l'objet créé par la collision, son interaction avec les astres qui se trouvent dans son voisinage immédiat ainsi que sur les



LIGO
Scientific
Collaboration

réactions qui produisent les éléments chimiques les plus lourds dans l'Univers.

« Quand nous avons commencé à planifier le projet LIGO à la fin des années 1980, nous savions que nous aurions besoin à terme d'un réseau international de détecteurs d'ondes gravitationnelles, Europe incluse, pour obtenir une localisation précise de la source du signal et permettre aux télescopes électromagnétiques de prendre le relais en observant la lumière émise par des objets créés par exemple lors de la fusion de deux étoiles à neutrons », se souvient Fred Raab du laboratoire Caltech, directeur adjoint en charge du fonctionnement des détecteurs LIGO. « Aujourd'hui, nous pouvons affirmer que notre réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles fonctionne brillamment et de concert avec les observatoires électromagnétiques pour ouvrir une nouvelle ère de l'astronomie. Et les performances de ce réseau s'amélioreront encore avec les ajouts prévus de détecteurs au Japon et en Inde. »

La collaboration Virgo comprend plus de 280 physiciens et ingénieurs appartenant à 20 groupes de recherche européens différents : six du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) en France ; huit de l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) en Italie ; deux aux Pays-Bas dont le Nikhef ; le MTA Wigner RCP en Hongrie ; le groupe POLGRAW en Pologne ; l'Espagne avec l'Université de Valence ; enfin, le « European Gravitational Observatory », EGO, le laboratoire en charge du site du détecteur Virgo près de Pise ; EGO est financé par le CNRS, l'INFN et le Nikhef.

LIGO est financé par la NSF et piloté par les laboratoires Caltech et MIT, qui ont conçu LIGO et réalisé les projets LIGO « Initial » et « Advanced ». Le financement du projet Advanced LIGO est assuré par la NSF, avec des contributions importantes de l'Allemagne (Max Planck Society), du Royaume-Uni (Science and Technology Facilities Council) et de l'Australie (Australian Research Council).

Plus de 1 200 scientifiques issus d'une centaine de laboratoires du monde entier participent à cet effort au sein de la collaboration LIGO, qui inclut la collaboration GEO et la collaboration australienne OzGrav. Les autres partenaires sont recensés sur la page <http://ligo.org/partners.php>.

INFORMATIONS SUPPLÉMENTAIRES

Article GW170817 : « Observation of gravitational waves from a binary neutron star merger. »

*** La publication sera disponible en ligne le lundi 16 octobre 2017 à 16h00 heure de Paris.*



LIGO
Scientific
Collaboration

CONTACTS MEDIA

Séverine Perus, Virgo-EGO
severine.perus@ego-gw.it; +39 050 752 325

Kimberly Allen, MIT
allenkc@mit.edu; +1 617-253-2702

Emily Velasco, Caltech
evelasco@caltech.edu; +1 626-395-6487

Jason Maderer, Georgia Tech
maderer@gatech.edu; +1 404-385-2966

Aya Collins, National Science Foundation
acollins@nsf.gov; +1 703-292-7737