



www.cnrs.fr

Virgo et LIGO : un effort mondial pour détecter les ondes gravitationnelles



© LIGO Laboratory & Virgo / N. Baldocchi



www.cnrs.fr

Les ondes gravitationnelles : prédiction d'Einstein et nouvel outil pour étudier le cosmos

La théorie de la relativité générale d'Einstein, qui est la théorie moderne de la gravitation, prévoit l'existence d'ondes gravitationnelles, des déformations infimes de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière. On peut s'en faire une image simple par analogie avec la vague qui se propage à la surface d'un lac lorsqu'on y jette une pierre. Ces ondes gravitationnelles peuvent être produites par des phénomènes violents dans l'Univers comme des explosions d'étoiles ou des fusions de trous noirs.

Depuis près de 50 ans, les scientifiques cherchent à détecter ce phénomène pour améliorer notre connaissance de l'Univers et vérifier finement les prédictions de la relativité générale. Pour progresser, les scientifiques doivent exploiter toutes les informations reçues du cosmos : lumière, particules (rayons cosmiques, neutrinos) et également ondes gravitationnelles. Par exemple, dans le cas de la fusion de deux trous noirs et du tourbillon final qui la précède, les ondes gravitationnelles sont le seul signal détectable.

Un nécessaire travail en réseau

Les effets des ondes gravitationnelles sur Terre sont tellement faibles qu'un instrument unique ne permet pas de faire de manière fiable la différence entre des signaux parasites et les signaux d'ondes gravitationnelles. De plus, un détecteur d'ondes gravitationnelles est sensible aux ondes arrivant de presque toutes les directions, et ne peut pas, seul, indiquer d'où provient un signal observé à un moment donné. En effet, les ondes gravitationnelles, interagissant très faiblement avec la matière, traversent la Terre sans perturbation. Mais de ce fait, elles sont aussi observables partout sur Terre, quasiment simultanément.

La mise en commun des observations d'au moins deux instruments séparés par une grande distance permet tout d'abord de réduire significativement les signaux parasites. Par ailleurs, la comparaison des temps d'arrivée des signaux et de leurs caractéristiques renseigne sur la position de la source dans le ciel. Cette position, déterminable de manière relativement grossière avec deux instruments, s'améliore significativement avec un troisième instrument. De plus, l'orientation différente du détecteur Virgo par rapport aux détecteurs LIGO apporte des informations supplémentaires permettant de mieux évaluer la distance de la source.

Un réseau d'instruments distribués sur la Terre est donc nécessaire pour l'avènement d'une nouvelle astronomie, qui utilise les ondes gravitationnelles afin de mieux connaître les objets astrophysiques qui les émettent.

L'émergence d'un réseau mondial pendant les années 2000

La toute première prise de données des deux détecteurs jumeaux LIGO a eu lieu en 2002 avec une sensibilité réduite. Les années suivantes ont été marquées par de rapides progrès puisqu'en 2006 a débuté la première prise de données de longue durée de LIGO. L'interféromètre franco-italien Virgo est entré en service en 2007. Ces instruments, de par leurs tailles et leur sensibilité, étaient uniques au monde. Les deux collaborations scientifiques LIGO et Virgo se sont donc associées pour mettre en commun leurs efforts et réaliser ainsi le premier réseau mondial de détecteurs d'ondes gravitationnelles. L'instrument GEO, pionnier de sensibilité bien plus modeste situé en Allemagne, complète ce réseau. Il



sert de plateforme d'innovation et il est utilisé pour des observations lorsque les instruments principaux sont à l'arrêt afin de pouvoir détecter un éventuel événement proche d'intensité exceptionnelle.

De 2007 à 2011, LIGO et Virgo ont fonctionné en alternant les périodes de prise de données, qui ont été exploitées conjointement, et les périodes de mise au point et d'optimisation des instruments.

Ces années d'efforts se sont concrétisées par une première prouesse expérimentale, consistant à faire fonctionner ces antennes de grande envergure avec la sensibilité et la fiabilité anticipées. Cette démonstration a fourni les fondements pour imaginer la deuxième génération d'instruments.

Les données collectées lors de cette première phase ont été analysées pour y rechercher les traces des différents types de sources astrophysiques envisageables. Ces recherches ne se limitaient pas aux sources les mieux prédites par la théorie (comme deux trous noirs orbitant l'un autour de l'autre) mais incluaient aussi des recherches beaucoup plus ouvertes (sur des objets astrophysiques moins bien modélisés comme les explosions d'étoiles). Les résultats obtenus, qui n'ont pu mettre en évidence aucun signal, ont permis d'exclure certains modèles optimistes (qui prédisaient des sources plus fréquentes et/ou des ondes gravitationnelles plus intenses).

Bénéficiant de trois instruments, les premiers programmes de recherche en temps réel d'événements violents produisant des ondes gravitationnelles ont été mis en place. Lors de la détection d'un possible événement, des cartes du ciel indiquant la position approximative des sources potentielles ont été transmises à des partenaires de l'astronomie traditionnelle pour qu'ils y cherchent d'éventuelles manifestations visibles avec des télescopes classiques ou à rayons X, esquissant les débuts de l'astronomie des ondes gravitationnelles.

L'exploitation de ces instruments de première génération s'est arrêtée en 2010 pour LIGO et en 2011 pour Virgo afin de construire des versions améliorées, Advanced LIGO et Advanced Virgo. Lorsque ces nouveaux détecteurs seront pleinement opérationnels, ils exploreront un volume d'Univers mille fois plus grand que les instruments initiaux.

LIGO-Virgo : une collaboration globale et unique

La mise en commun depuis 2007 des données de LIGO et Virgo a ouvert de nombreuses opportunités scientifiques mais a aussi profondément modifié la manière de travailler des chercheurs. Les deux collaborations ont unifié leurs groupes de travail en charge de l'exploitation de ces données. Ces groupes sont codirigés par deux ou trois scientifiques, dont un certain nombre de chercheurs de laboratoires français. Les scientifiques des deux projets vivent depuis au rythme de nombreuses téléconférences hebdomadaires, ajustées afin de prendre en compte les fuseaux horaires des participants. Les résultats sont publiés conjointement, les articles scientifiques étant signés par un millier d'auteurs (dont environ soixante-quinze en France) provenant de plus d'une centaine d'institutions réparties de par le monde.

Cette collaboration très étroite pour l'exploitation des instruments LIGO et Virgo complète une collaboration technique plus informelle et plus ancienne, bien que le financement et la gestion des instruments restent séparés. La similitude des instruments est le fruit de ces échanges. Citons, comme exemples de technologies développées par Virgo puis reprises par LIGO, l'utilisation de lumière laser infrarouge, l'organisation des données. Autre exemple phare et majeur pour LIGO : le traitement des surfaces des



www.cnrs.fr

miroirs les plus importants des détecteurs LIGO a été réalisé dans un laboratoire français grâce à l'expertise acquise et aux investissements faits dans le cadre de Virgo.

L'extension du réseau

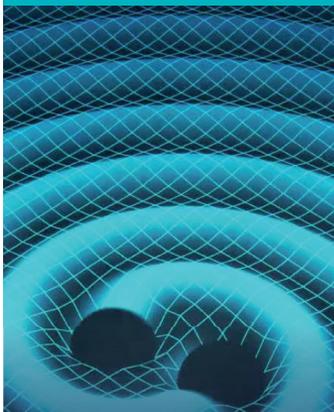
L'effort international pour chercher les ondes gravitationnelles n'est pas limité à LIGO et Virgo. Au Japon, le détecteur KAGRA, de même taille que Virgo, est en cours de construction au cœur d'une montagne. KAGRA, dont les premières prises de données devraient avoir lieu vers 2018, compléterait avantageusement le réseau LIGO-Virgo en améliorant son efficacité et certaines de ses performances.

L'Inde manifeste également un fort intérêt pour ce type de recherche. Le financement d'un site pour l'installation d'un interféromètre de type LIGO est en cours de finalisation. Le démarrage de LIGO-India est envisagé vers 2022 et apporterait une dimension supplémentaire au réseau.

L'infographie page 18 donne un aperçu de ce réseau en devenir.

Une collaboration mondiale pour observer les ondes gravitationnelles

LES ONDES GRAVITATIONNELLES



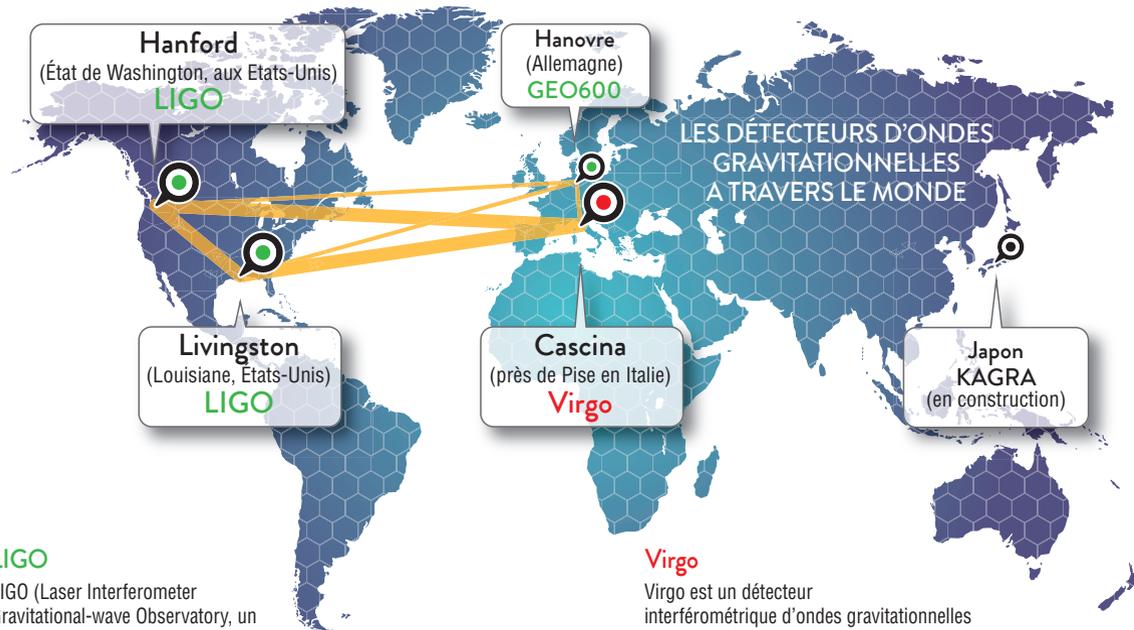
Les supernovae, les collisions entre deux étoiles à neutrons ou des trous noirs et, plus généralement, les événements astrophysiques les plus violents, produisent tous des vibrations rapides dans le « tissu » de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière : ce sont les ondes gravitationnelles, une prédiction de la théorie de la relativité générale d'Einstein qui attendait une confirmation expérimentale depuis un siècle.

COMMENT LES DÉTECTER : LES INTERFÉROMÈTRES À LASER GÉANTS

La gravitation est la plus faible des interactions fondamentales. Détecter les ondes gravitationnelles est donc une tâche extrêmement complexe. Pour y parvenir, les physiciens ont conçu et construit des détecteurs spéciaux : des **interféromètres à laser géants**.

UNE COLLABORATION ENTRE PLUSIEURS EXPÉRIENCES

Les données de plusieurs interféromètres sont nécessaires pour reconstruire la direction d'arrivée d'une onde gravitationnelle et donc pour identifier sa source. C'est pourquoi **un réseau de détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles a été mis en place et fonctionne comme une expérience unique** au niveau mondial. Depuis près d'une décennie, les collaborations LIGO et Virgo ont passé des accords pour partager et échanger des technologies, coordonner les périodes de fonctionnement, analyser ensemble les données collectées et publier en commun les résultats.



LIGO

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, un « observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser ») a deux détecteurs jumeaux en fonctionnement aux États-Unis. Ce projet est financé par la **National Science Foundation (NSF)**, avec des contributions du Science and Technology Facilities Council (STFC) de Grande-Bretagne, de la Max Planck Society en Allemagne et de l'Australian Research Council (ARC). Il est conduit par des équipes de Caltech et du MIT. La collaboration scientifique LIGO inclut également le détecteur **GEO600** en Allemagne. Environ **1000 scientifiques** issus de laboratoires aux États-Unis et dans 14 autres pays contribuent à ce projet.

LIGO avancé

La mise à niveau des détecteurs LIGO pour aboutir aux détecteurs « LIGO avancé » (Advanced LIGO) a démarré avant celle conduite par la collaboration Virgo. Elle s'est conclue au printemps 2015 et la première période de prise de données des détecteurs Advanced LIGO a commencé en septembre de la même année, pour se terminer mi-janvier 2016.

Virgo

Virgo est un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles construit à Cascina près de Pise en Italie. À l'origine du projet on trouve le **Centre national de la recherche scientifique français (CNRS)** et l'**Institut national de physique nucléaire italien (INFN)**. Les autres partenaires de la collaboration sont Nikhef (aux Pays-Bas), POLGRAW (l'académie polonaise des sciences) et l'institut Wigner (en Hongrie). L'**Observatoire gravitationnel européen (EGO)** est responsable du fonctionnement du détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo.



Virgo avancé

Advanced Virgo (« Virgo avancé »), une version améliorée de l'interféromètre Virgo, est en cours de construction. Ce détecteur prendra ses premières données fin 2016.