

DOSSIER DE PRESSE

Attention, sous embargo jusqu'au jeudi 11 février 2016 à 16h30 !

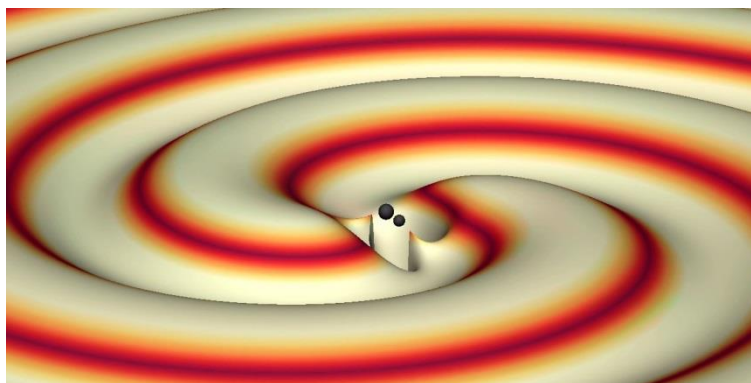
Première détection directe d'ondes gravitationnelles par les collaborations LIGO et Virgo

Conférence de presse à Paris

Visite de presse et conférence de presse à Cascina (Italie)

Conférence de presse à Washington

11 février 2016



© Max Planck Institute for Gravitational Physics

Contacts

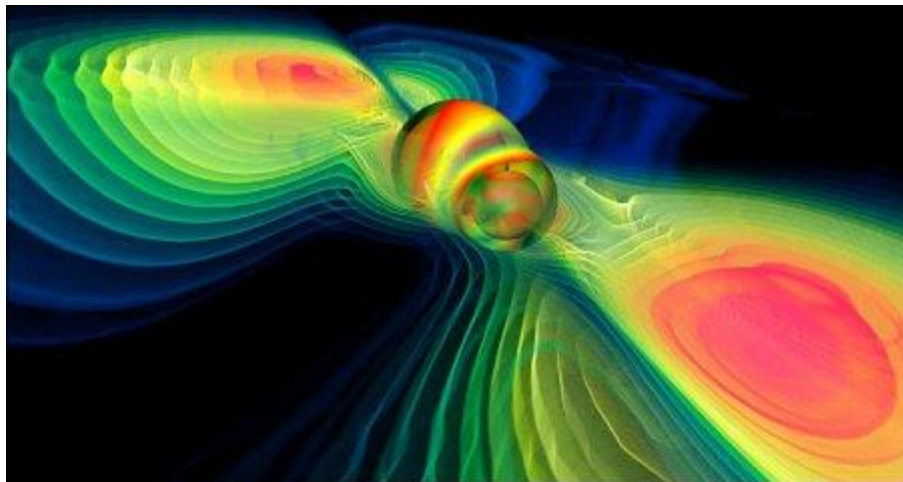
CNRS Presse | T 01 44 96 51 51 | presse@cnrs.fr
Véronique Etienne | T 01 44 96 51 37 | veronique.etienne@cnrs-dir.fr
Priscilla Dacher | T 01 44 96 46 06 | priscilla.dacher@cnrs-dir.fr



SOMMAIRE

> GW150914 : le début de l'astronomie gravitationnelle	3
- <i>Communiqué de presse</i>	4
- <i>La découverte en détails</i>	9
> Virgo et LIGO : un effort mondial pour détecter les ondes gravitationnelles	14
> Advanced Virgo	19
> FAQ sur Virgo, les ondes gravitationnelles et GW150914	30
> D'autres projets sur les ondes gravitationnelles au CNRS	38
> Ressources disponibles	42
- <i>Photos, vidéos, animations, liens, ...</i>	43
- <i>Contacts et biographies des chercheurs rencontrés</i>	47
- <i>Glossaire</i>	52

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.

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.

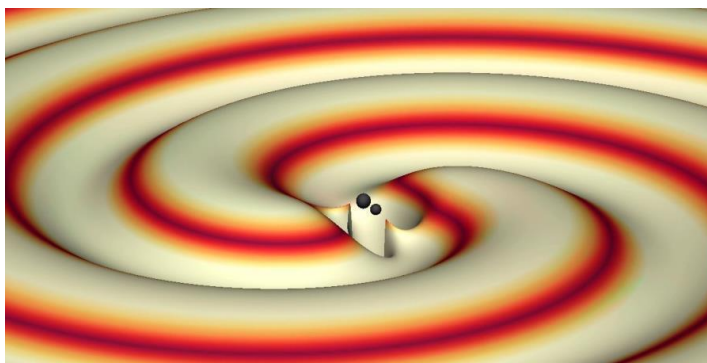
Le projet Advanced Virgo, financé par le CNRS, l'INFN et Nikhef, a ensuite été lancé. Le nouveau détecteur sera opérationnel d'ici la fin de l'année. En outre, d'autres organismes et universités des 5 pays européens de la collaboration Virgo contribuent à la fois à Advanced Virgo et à la découverte annoncée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

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 !



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.

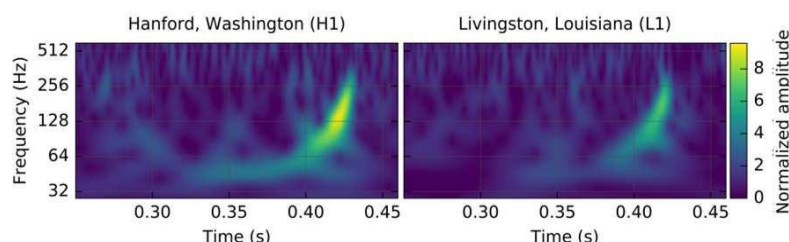


Figure 1 (adaptée de la figure 1 de la publication scientifique). L'événement GW150914 observé par les détecteurs LIGO de Hanford (H1, à gauche) et Livingston (L1, à droite). Ces deux images montrent comment le signal d'ondes gravitationnelles (voir ci-dessous) enregistré dans chaque détecteur a évolué 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 minimes, 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.

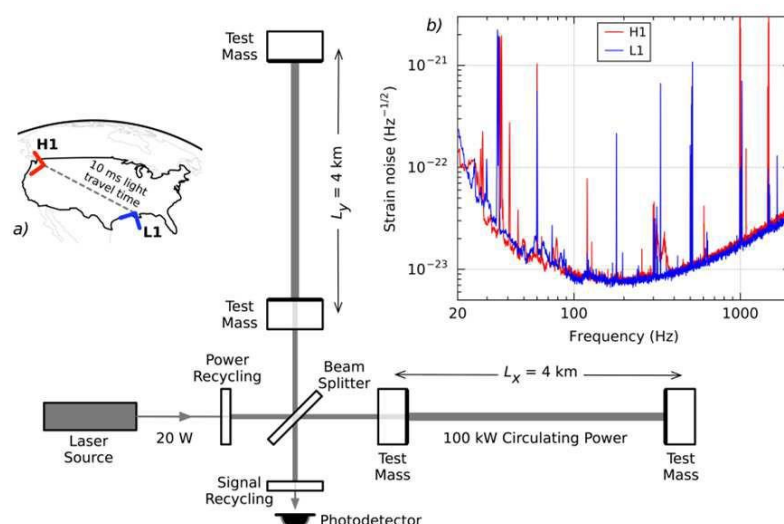


Figure 2. Représentation simplifiée (et pas à l'échelle) d'un détecteur Advanced LIGO montrant les améliorations principales apportées au schéma de base : une **cavité optique** qui fait recirculer le faisceau laser de nombreuses fois dans chaque bras, amplifiant d'autant l'effet du passage d'une onde 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**.

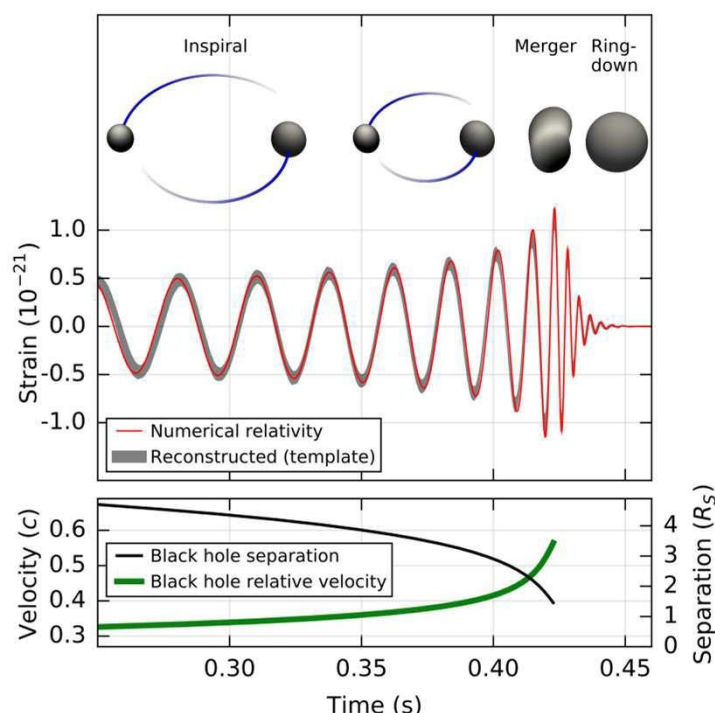


Figure 3. Certains des principaux résultats de l'analyse de l'événement GW150914 comparant le signal reconstruit (vu par le détecteur H1 à Hanford) et les prédictions de la forme d'onde calculée à l'aide de la relativité générale et qui décrit le mieux le signal observé de manière globale, au cours des 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 !



www.cnrs.fr

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



© LIGO Laboratory & Virgo / N. Baldocchi

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

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

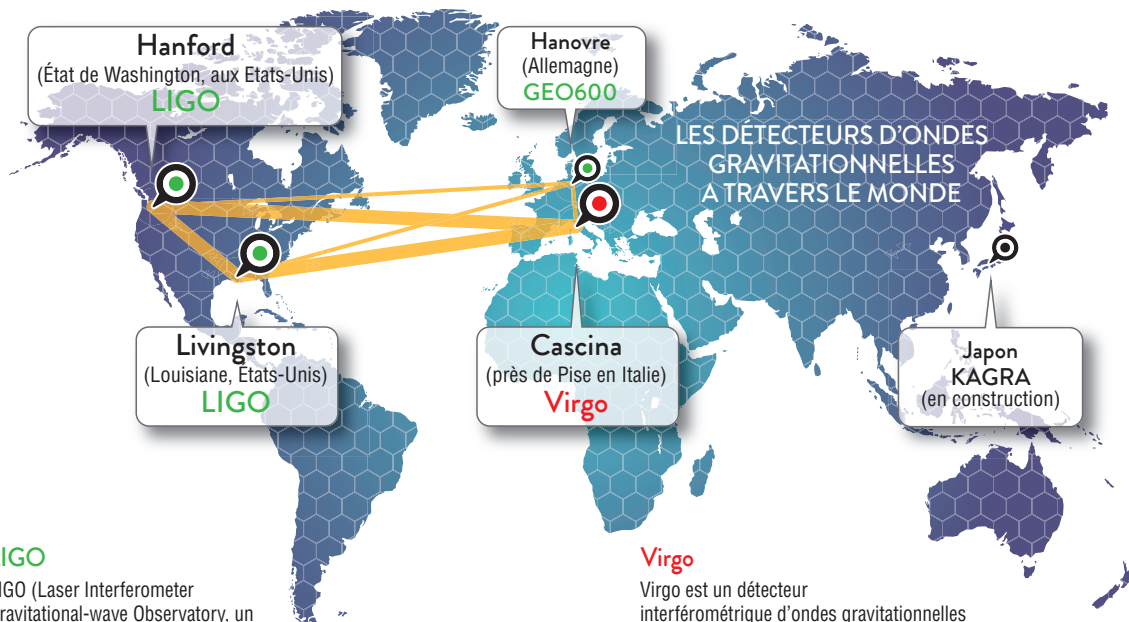
Les supernovae, les collisions entre deux étoiles à neutrons ou des trous noirs et, plus généralement, les événements astrophysiques les plus violents, produisent tous des vibrations rapides dans le « tissu » de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière : ce sont les ondes gravitationnelles, 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), POLGRAU (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.





www.cnrs.fr

Advanced Virgo : un détecteur de deuxième génération, pour l'astronomie gravitationnelle



© Virgo / N. Baldocchi

L'INSTRUMENT

L'infographie page 22 donne un aperçu de la composition et du fonctionnement de l'instrument.

De Virgo à Advanced Virgo

La construction du détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo a été décidée en 1993-1994 par la France et l'Italie. Les phases d'acquisition du site, de réalisation de l'infrastructure, d'installation puis de mise au point de l'instrument ont abouti à sa mise en route en 2007. Les années suivantes ont été dédiées aux périodes de prise de données, entrecoupées d'améliorations de l'instrument. En 2011, ayant atteint les limites de ce qu'il était possible de faire avec Virgo en tant qu'instrument de première génération, l'exploitation de l'instrument a été arrêtée afin de procéder à des modifications majeures pour augmenter significativement sa sensibilité. L'instrument amélioré, appelé Advanced Virgo, redémarrera à l'automne 2016.

Comment fonctionne Advanced Virgo ?

Les ondes gravitationnelles déforment l'espace qu'elles traversent. Cela signifie qu'au passage d'une onde gravitationnelle, la distance qui sépare deux objets va osciller de manière minime. Ces déformations ne se produisent pas dans toutes les directions de la même manière. En fait, l'espace est « étiré » dans une direction et « raccourci » dans une autre direction (perpendiculaire à la première).

Pour détecter les ondes gravitationnelles sur Terre, il faut donc pouvoir comparer deux distances, chose qu'un interféromètre fait à merveille. Dans l'interféromètre Virgo, la lumière d'un laser ultrastable est séparée en deux par un miroir semi-réfléchissant. Chacun de ces deux faisceaux parcourt, sous vide, une distance de 3 km dans des directions perpendiculaires (que l'on appelle communément des « bras » de l'interféromètre) jusqu'à un miroir qui renvoie la lumière vers le point de départ. A cet endroit, les deux faisceaux se recombinaient. L'intensité du faisceau laser recombina dépend des variations de longueur d'un bras par rapport à l'autre ; sa mesure porte donc la signature de l'onde gravitationnelle.

Mesurer d'infimes variations de longueur

Advanced Virgo mesure ainsi des variations de longueurs. Le plus petit signal mesurable – la sensibilité – dépend de la nature de ces variations : si elles sont lentes ou rapides, si elles se répètent ou ne se produisent qu'une fois. Advanced Virgo est sensible à des variations de longueur qui sont environ un milliard de fois plus petites que la taille d'un atome et qui évoluent en moins d'un dixième de seconde.

La difficulté consiste à construire un instrument capable de mesurer de telles variations, alors que les déplacements naturels des objets causés par les vibrations du sol ou de l'air sont d'environ mille fois la taille d'un atome. Pour éviter que de tels signaux parasites ne viennent masquer les infimes signaux recherchés, l'interféromètre est placé sous vide et isolé des déplacements du sol par des systèmes complexes, un peu comme s'il flottait en apesanteur et se trouvait hors de l'atmosphère terrestre.

Pour optimiser la sensibilité d'Advanced Virgo, plusieurs techniques sont utilisées. Tout d'abord, les bras de l'interféromètre sont longs (3 km), afin d'accumuler l'effet d'étirement de l'espace provoqué par les ondes gravitationnelles. Ensuite, des miroirs supplémentaires permettent d'augmenter l'intensité du

faisceau lumineux, et de lui faire parcourir plusieurs centaines de fois les bras de l'interféromètre, afin d'amplifier le signal observable. Cela nécessite des miroirs qui renvoient ou transmettent parfaitement la lumière et ne l'absorbent quasiment pas.

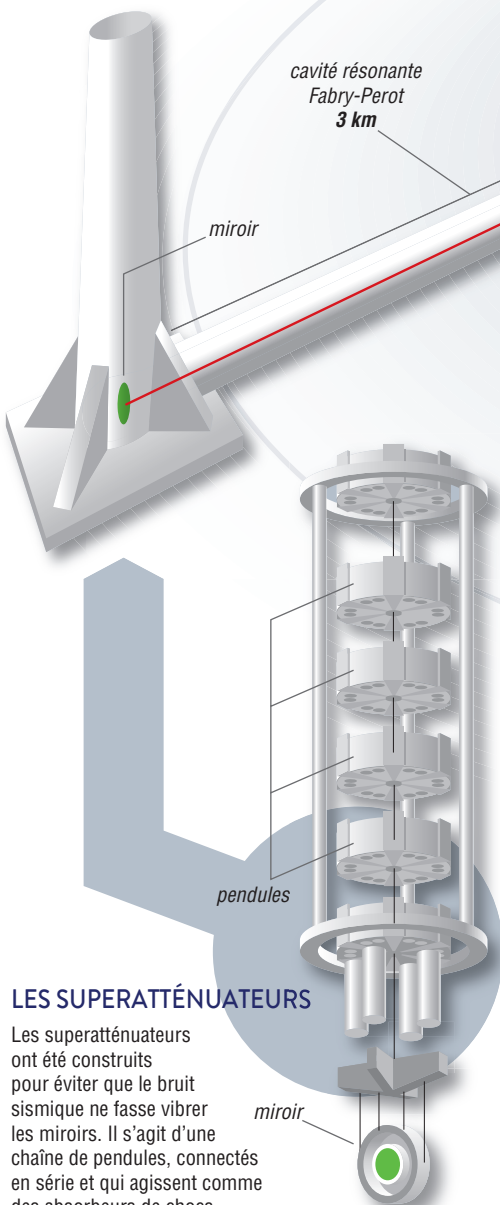
Un soin particulier est apporté à ce que la lumière parasite provoquée par les défauts résiduels de l'interféromètre soit éliminée et ne pollue pas la mesure. La taille des faisceaux laser est élargie au maximum pour limiter l'impact des vibrations dues à l'agitation thermique des surfaces des miroirs.

L'objectif est d'aboutir à un instrument dix fois plus sensible, à même d'observer un volume d'Univers 1000 fois plus grand. Ainsi, il pourra détecter des fusions de couples d'étoiles à neutrons jusqu'à 1 milliard d'années-lumière, et celle de couples de trous noirs jusqu'à 6 milliards d'années-lumière.

Virgo est un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles construit à Cascina près de Pise en Italie. A 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 collaborations 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. Advanced Virgo (« Virgo avancé »), une version améliorée de l'interféromètre Virgo, est en cours de construction. Ce détecteur prendra ses premières données fin 2016.

DE QUOI S'AGIT-IL?

Le détecteur **Virgo** est un **interféromètre de Michelson** dont les deux bras perpendiculaires font 3 km de long et à l'intérieur desquels circule sous vide un faisceau laser.



cavité résonante
Fabry-Perot
3 km

cavité résonante
Fabry-Perot
3 km

miroir

pendules

miroir

LE FAISCEAU LASER

La source laser ultra-stable émet un faisceau infrarouge qui est divisé en deux faisceaux, envoyés chacun dans un bras de l'interféromètre. La puissance laser stockée dans l'interféromètre peut atteindre plusieurs centaines de kilowatt, ce qui permet d'améliorer sa sensibilité. Cependant, la chaleur absorbée par les miroirs déforme leur surface. C'est pourquoi un système avancé de compensation thermique a été mis au point pour contrebalancer cet effet.

CAVITÉS RESONANTES FABRY-PEROT

Elles sont formées de deux miroirs très réfléchissants entre lesquels le faisceau laser est piégé. Cela augmente la longueur de son parcours dans les bras kilométriques de l'interféromètre et amplifie ainsi l'effet du passage d'une onde gravitationnelle. Le miroir de « recyclage de puissance » sert à stocker la puissance du laser dans le détecteur tandis que le miroir de « recyclage du signal » permettra d'améliorer la sensibilité de Virgo. Les irrégularités de la surface des miroirs sont réduites à quelques fractions de milliardième de millimètre afin d'optimiser le stockage de la lumière dans les cavités optiques.

LAME SÉPARATRICE

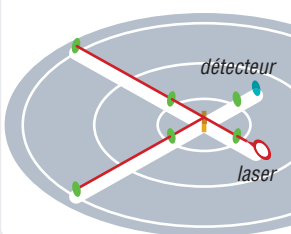
La lame séparatrice, qui fait un angle de 45 degrés avec le faisceau laser incident, divise ce faisceau en deux faisceaux identiques qui sont envoyés dans les bras kilométriques, se réfléchissent en bout de bras et reviennent se recombinaison sur ce miroir. Le résultat de cette interférence est détecté en sortie de l'interféromètre.

LES TUBES À VIDE À L'INTÉRIEUR DES BRAS

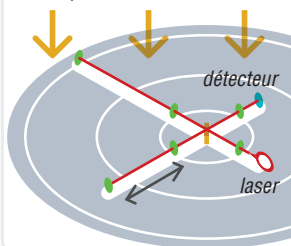
Afin de minimiser les perturbations qui pourraient diminuer la qualité de la mesure, tous les composants principaux de Virgo sont suspendus et sous vide. Pour éviter au maximum les interactions avec les molécules d'air, le faisceau laser circule sous ultra-vide (la **pression résiduelle est un milliardième de milliardième de la pression atmosphérique**). Les miroirs sont accrochés au bout de suspensions actives hautes de 6 m, les superatténuateurs.

COMMENT FONCTIONNE L'INTERFÉROMÈTRE

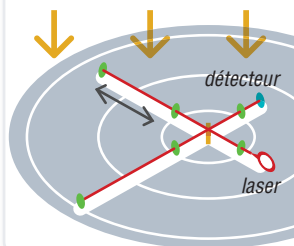
Quand les deux faisceaux ressortent des bras, ils ont des phases opposées : aucune lumière n'est détectée en sortie.



Lorsqu'une **onde gravitationnelle** traverse l'interféromètre, elle produit une variation infime (bien plus petite que le diamètre d'un noyau atomique) des longueurs des bras : l'un s'allonge tandis que l'autre rétrécit.



Ces variations produisent une modification de la figure d'interférence détectée en sortie de l'interféromètre : le signal mesuré est proportionnel à l'amplitude de l'onde gravitationnelle.



LES SUPERATTÉNUATEURS

Les superatténuateurs ont été construits pour éviter que le bruit sismique ne fasse vibrer les miroirs. Il s'agit d'une chaîne de pendules, connectés en série et qui agissent comme des absorbeurs de chocs.

LES ACTEURS

La collaboration Virgo

Pour réaliser, faire fonctionner et exploiter les données de l'interféromètre Virgo, plusieurs équipes de scientifiques français et italiens se sont associées pour former la collaboration Virgo. Au fil de la construction et des prises de données, leur nombre a augmenté. Elles ont également été rejointes par des scientifiques néerlandais puis polonais et enfin hongrois.

Le consortium EGO, une société de droit civil italien financée à parité par le CNRS et l'INFN (Italie), a été mis en place en 2000 pour assurer la gestion des infrastructures du site. Il travaille étroitement avec la collaboration Virgo pour la réalisation et l'exploitation de l'instrument.

Actuellement la collaboration Virgo compte environ 250 personnes provenant de 18 groupes de scientifiques, dont environ une centaine de personnes en France, réparties dans six laboratoires (voir ci-dessous).

La collaboration Virgo a un accord privilégié avec la collaboration scientifique LIGO et le laboratoire LIGO pour l'exploitation commune des instruments Virgo et LIGO, se traduisant par des publications scientifiques conjointes, signées par un millier d'auteurs, dont 74 français.

Les laboratoires du CNRS dans la collaboration Virgo

Six laboratoires français, tous associés au CNRS, font partie de la collaboration Virgo :

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

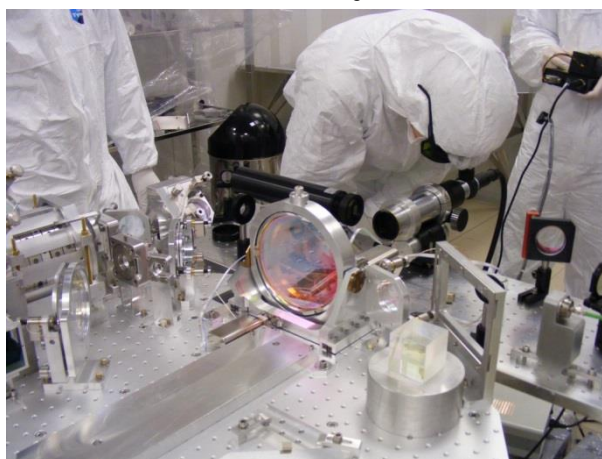
APC

Grâce à son implication dans Virgo depuis 2008 et dans les expériences *LISA Pathfinder* et *eLISA*, le laboratoire APC est pleinement engagé dans la recherche des ondes gravitationnelles. Le groupe Virgo de l'APC contribue aussi bien au développement de l'instrument qu'à l'exploitation scientifique de ses données.

Un des membres du groupe a été en charge de la configuration optique de l'interféromètre lors de la conception d'Advanced Virgo. Le groupe est responsable de la conception, de la production et de l'installation des "télescopes d'adaptation de modes" qui ajustent la taille du faisceau laser en entrée et en sortie du détecteur. Le groupe étudie de nouvelles techniques permettant de réduire le bruit thermique des miroirs par l'utilisation de faisceaux non-gaussiens, et le bruit quantique par l'utilisation d'états compressés de la lumière (*squeezing*), en vue des améliorations futures du détecteur Virgo et du développement des prochaines générations de détecteurs. En

connexion avec ces activités expérimentales, l'application des détecteurs d'ondes gravitationnelles aux géosciences est également étudiée.

Le groupe contribue également à l'analyse des données de Virgo et LIGO, plus spécifiquement aux recherches de sources impulsionnelles – un des membres du groupe en partage la responsabilité. Le groupe APC est aussi l'initiateur de plusieurs projets combinant les observations des ondes gravitationnelles et celles de l'astronomie conventionnelle. Un des membres du groupe APC a copiloté la mise en place du programme international de coopération entre des astronomes et les détecteurs LIGO et Virgo.



Alignement du télescope d'injection d'Advanced Virgo. © APC

Artemis

Le groupe Virgo Artemis a été créé en 1985 par des spécialistes des lasers et des mesures optiques de précision, basés à l'époque à l'Université Paris-Sud et qui sont à l'origine du projet Virgo en France. Les membres du groupe Artemis ont réalisé des contributions majeures au niveau du laser de Virgo, des simulations optiques (abondamment utilisées dès la conception des détecteurs Virgo et LIGO, et plus récemment pour définir les configurations des détecteurs avancés) et de l'analyse des données. Ils participent également à la conception des détecteurs d'ondes gravitationnelles de la prochaine génération, comme la mission spatiale eLISA ou le télescope souterrain « Einstein ».

Advanced Virgo est alimenté par un système laser construit par le groupe Artemis et dont les caractéristiques finales (en termes de stabilité, d'intensité et de précision) seront sans équivalent. Côté analyse des données, le groupe s'intéresse au fond stochastique d'ondes gravitationnelles, c'est-à-dire au signal produit par la superposition incohérente de toutes les sources qui existent mais qui sont trop faibles pour être détectées individuellement. Cela inclut à la fois un signal possible émis peu de temps après le Big Bang et une grande variété de sources dans notre galaxie. De plus, le groupe travaille sur la détection des contreparties optiques des sursauts gamma. Il pilote le réseau de télescopes automatiques Tarot qui est intégré au programme de suivi des sources potentielles d'ondes gravitationnelles identifiées par Virgo et LIGO. Enfin, le groupe Artemis travaille sur des applications dérivées de ses développements pour Virgo, dans les domaines de la métrologie des longueurs et des faisceaux laser de haute intensité dans des cavités optiques. Ces techniques sont prometteuses pour le suivi de la position des satellites et pour la production d'énergie dans le réacteur ITER.



Le banc laser de Virgo. © Artemis

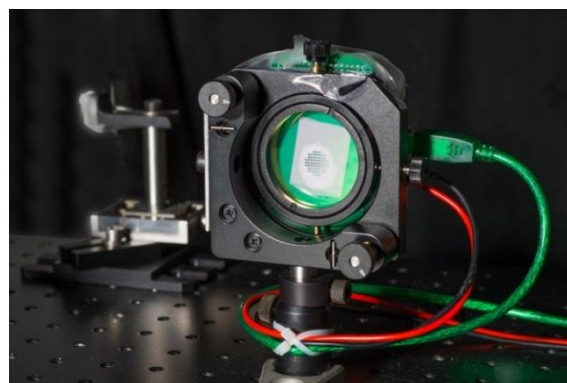
LAL

Le Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL) est l'un des membres fondateurs de la collaboration Virgo. Le groupe Virgo du LAL a été responsable de la construction des tubes à vide de grand diamètre présents dans chaque bras de 3 km de l'interféromètre, dans lesquels circule la lumière. Actuellement, ses activités vont du contrôle et de la caractérisation du détecteur à la recherche de signaux transitoires d'ondes gravitationnelles, en passant par la R&D.

Pour Advanced Virgo, le groupe du LAL est responsable de l'amélioration du système de contrôle du vide : le remplacement des trente châssis d'électronique nécessite à la fois la fabrication de nouvelles cartes électronique et les développements logiciels associés. Le groupe est également en charge de l'utilisation de lasers auxiliaires pour l'acquisition du contrôle de l'interféromètre (une procédure nécessaire pour amener le détecteur à son point de fonctionnement où il est le plus sensible). Dans ce but, le LAL utilise la plate-forme CALVA installée à Orsay. Cette double cavité (5 m et 50 m) suspendue et sous vide permet de tester et de valider des stratégies d'acquisition du contrôle des cavités qui pourront ensuite être mises en œuvre pour Advanced Virgo. Ces développements sont menés en collaboration avec le Laboratoire de physique et d'étude des matériaux de l'ESPCI.



*L'une des deux salles blanches de la plate-forme CALVA.
© CNRS/Cyril Fréssillon*



*Prototypage d'un miroir déformable thermiquement, installé sur
la table optique principale de la plate-forme CALVA.
© CNRS/Cyril Fréssillon*

Avec les groupes Virgo du LAPP, du LKB et du LMA, le groupe du LAL étudie les « états compressés de la lumière » (« squeezing »), une méthode pour diminuer le bruit quantique et qui pourrait être mise en pratique dans une seconde phase du projet Advanced Virgo. Les effets d'un squeezing dépendant de la fréquence seront étudiés sur la

plateforme CALVA du LAL. Enfin, le groupe du LAL développe, en collaboration avec le groupe « Optique » du consortium EGO, une activité de R&D portant sur les miroirs déformables thermiquement. L'idée est d'agir sur la surface du miroir pour l'adapter à la forme du faisceau laser incident, ce qui permettra de diminuer les pertes dans le détecteur.

Le groupe du LAL est également actif dans le domaine de l'analyse des données, en particulier au sein du groupe de travail commun LIGO-Virgo qui étudie les signaux transitoires d'ondes gravitationnelles. Ses activités portent sur la recherche d'ondes gravitationnelles en coïncidence avec des sursauts gamma (en utilisant les données des télescopes en orbite Swift, Fermi et IPN), sur les signaux potentiels émis par les cordes et les supercordes et sur la recherche de signaux transitoires « longs » (durée supérieure à 1 seconde). Enfin, le groupe est impliqué dans les études portant sur la qualité des données du détecteur. Il développe notamment des méthodes pour identifier les périodes pendant lesquelles les données sont trop "bruyantes" pour être analysées.

LAPP

Le groupe du LAPP est membre de la collaboration Virgo depuis le début des années 1990. Ses contributions au projet sont multiples : de la construction à la mise en service du détecteur (enceintes à vide, bancs optiques, électronique, système d'acquisition des données, etc.), à la recherche de signaux, en passant par la calibration des données et les études portant sur leur qualité.

Le groupe du LAPP a conçu, produit et installé les enceintes à vide qui contiennent les grands miroirs de Virgo et leurs suspensions de 10 mètres de haut, mais aussi les plates-formes pour travailler autour de ces enceintes et les accès vers l'intérieur des enceintes à vide à partir des salles blanches.

Il a aussi pris en charge, avec des aspects optique, électronique et mécanique, la conception, la production et l'installation de bancs optiques sous vide (un pour Virgo, six pour Advanced Virgo). Ceux-ci permettent de mesurer, en permanence et en de nombreux endroits, les caractéristiques du faisceau laser. Ces données contiennent les signaux potentiels laissés par les ondes gravitationnelles ainsi que les informations utiles pour amener et maintenir l'interféromètre à son point de fonctionnement.

Des systèmes d'asservissement informatiques utilisant de l'électronique synchronisée par GPS permettent de contrôler et d'ajuster en temps réel la position et l'alignement des miroirs. Leurs cartes électroniques et les logiciels associés ont été conçus, produits et installés sous la responsabilité du LAPP. Il est aussi en charge de l'acquisition, du stockage et de la visualisation des données enregistrées par l'ensemble du détecteur, de la calibration de l'interféromètre et de la reconstruction des données. Le groupe du LAPP contribue également à la caractérisation du détecteur, à la fois pour améliorer et optimiser les différents éléments de l'interféromètre, et aussi pour comprendre l'origine des bruits qui limitent la sensibilité de l'instrument.

Au niveau de l'analyse des données, le groupe du LAPP se concentre sur la recherche des signaux d'ondes gravitationnelles provenant de la coalescence de systèmes binaires d'astres compacts, étoiles à neutrons ou trous noirs. Il a notamment mis en œuvre une recherche en temps réel de ces signaux dans les données de LIGO et Virgo, pour permettre l'envoi d'alertes à des partenaires de l'astronomie traditionnelle à même d'explorer les zones du ciel susceptibles de contenir les sources potentielles, ceci afin d'y rechercher d'éventuels signaux électromagnétiques accompagnant le rayonnement gravitationnel.



www.cnrs.fr



Préparation d'un banc optique dans la salle blanche du LAPP en 2015 :
assemblage des optiques et des composants électroniques.
© LAPP/VIRGO Collaboration



Préparation de cartes électroniques digitales au LAPP en 2015.
© LAPP/VIRGO Collaboration



Insertion d'un banc optique dans son enceinte à vide (2016)
© CNRS/Cyril Fréssillon

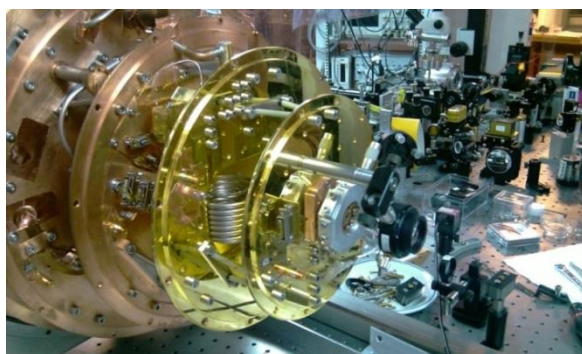
LKB

Le groupe Virgo du LKB fait partie de l'équipe « Optomécanique et mesure quantique » de ce laboratoire, qui a une expertise reconnue dans l'étude de la manière dont le couplage, dû à la pression de radiation, entre un faisceau laser et des résonateurs mécaniques limite au niveau quantique des mesures extrêmement sensibles, comme celles effectuées par Virgo.

Le groupe Virgo du LKB étudie la possibilité d'utiliser des états comprimés de la lumière (le « squeezing ») dépendants de la fréquence pour améliorer la sensibilité d'Advanced Virgo. Des tests seront effectués sur la plateforme CALVA du LAL. Le « squeezing » dépendant de la fréquence permettrait de diminuer le bruit quantique à la fois dans le domaine des basses fréquences (où la sensibilité d'Advanced Virgo sera limitée par la pression de radiation) et à haute fréquence (où domine le bruit de grenaille des photons du faisceau laser).

De plus, le groupe du LKB étudie les effets classiques de la pression de radiation dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles et développe des stratégies de contrôle pour l'atténuer. Par exemple, l'utilisation d'une puissance laser élevée crée un couplage entre les modes de vibration internes des substrats des miroirs et les modes optiques transverses des cavités kilométriques. L'apparition d'instabilités dynamiques est prédite dans certaines conditions, un phénomène que le groupe du LKB a mis en évidence et étudié sur des expériences de table. De telles instabilités

pourraient empêcher les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles avancés d'utiliser la pleine puissance de leurs lasers.



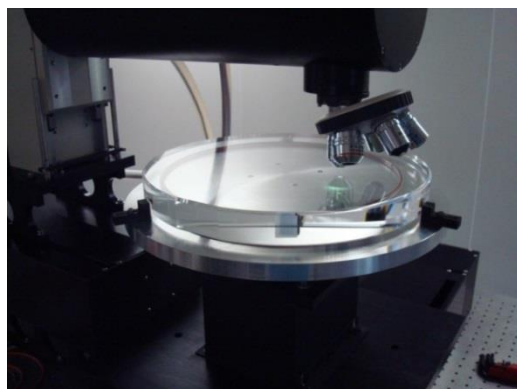
Système de refroidissement par dilution utilisé pour diminuer le bruit thermique mécanique d'un système, afin d'étudier le bruit de pression de radiation quantique dans une expérience sur table. Les différents étages sont à des températures différentes : de gauche à droite 300 K, 200 K, 100 K, 4 K, 1 K et 100 mK pour la cavité située juste derrière la lentille de focalisation. En arrière-plan on peut voir différents composants typiques utilisés pour réaliser des mesures interférométriques très sensibles avec un laser.

© CNRS/A. Kuhn

LMA

Le Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA) du CNRS est spécialisé dans l'étude, la réalisation et la caractérisation de dépôts très fins de matériaux très performants sur des optiques de grande dimension. Membre de la collaboration Virgo depuis le démarrage du projet en 1993, l'équipe Virgo du LMA joue un rôle majeur dans l'expérience puisque tous ses principaux composants optiques (une dizaine de grands miroirs et une centaine d'autres plus petits, utilisés pour mettre en forme le faisceau laser avant son entrée dans l'interféromètre et en sortie de celui-ci) ont reçu leurs dépôts de couches et ont été caractérisés dans ce laboratoire. Le groupe est en charge de la fabrication des miroirs (achat des substrats, polissage et dépôt des fines couches de matériaux optiques) et coordonne le développement des simulations de la configuration optique de l'interféromètre. Enfin, il participe à la mise au point du détecteur, afin de l'amener à sa sensibilité nominale.

En plus de ceux d'Advanced Virgo, les miroirs des détecteurs Advanced LIGO ont également été traités au LMA où ils ont reçu les fines couches de matériaux optiques qui forment leur revêtement. Le LMA conduit un important programme de recherche pour améliorer l'uniformité du dépôt des couches sur de grandes surfaces et pour trouver de nouveaux matériaux permettant de réduire le bruit thermique lié aux couches déposées. Grâce à ses compétences techniques, le LMA est également impliqué dans des projets importants en astrophysique, ainsi que dans des expériences de physique fondamentale de plus petite taille.



Recherche de possibles défauts ponctuels sur l'un des grands miroirs d'Advanced Virgo

© L. Pinard / Virgo Collaboration



Un grand miroir de 40 kg pour Advanced Virgo (350 mm de diamètre, 200 mm d'épaisseur)

© L. Pinard / Virgo Collaboration.

L'Observatoire gravitationnel européen (EGO)

Constitué en décembre 2000 par les institutions publiques de recherche que sont le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), EGO est un consortium privé soumis à la loi italienne. Il a comme principale finalité la construction, le fonctionnement et l'amélioration de l'antenne d'ondes gravitationnelles Virgo, ainsi que de favoriser et coordonner la recherche sur la gravitation. Outre les membres français et italien, CNRS et INFN, le *Nationaal instituut voor subatomaire fysica* (Nikhef) néerlandais siège en tant qu'observateur au Conseil d'Administration de EGO, organe de gouvernance du consortium.

Dans le cadre de l'expérience Virgo, EGO met ses infrastructures à la disposition de plus de 300 chercheurs appartenant aux laboratoires de la Collaboration Virgo, collaboration élargie, outre les pays membres, à la Hongrie et la Pologne.

D'autres communautés scientifiques (ASPERA, ISAPP, VESF) ont occasionnellement utilisé les infrastructures d'EGO pour l'organisation d'événements spécifiques tels que des assemblées générales, forums et écoles de formation dans le domaine de la physique des astroparticules.

En outre, dans le cadre du programme de financement de l'Union Européenne FP7, EGO a été le coordinateur européen de l'étude de conception du Télescope Einstein, futur observatoire souterrain et cryogénique d'ondes gravitationnelles proposé comme instrument de troisième génération. EGO coordonne également d'autres projets dont le réseau de formation initiale GraWIToN pour la recherche et la formation dans le domaine de la détection des ondes gravitationnelles.

Ayant signé avec eux des accords spécifiques de collaboration, le Consortium EGO est aussi un partenaire privilégié d'organisations de recherche internationales : le CERN, la communauté scientifique LIGO, l'Institut pour la recherche sur les rayons cosmiques de l'Université de Tokyo, l'Institut de physique appliquée de l'Académie des sciences de Russie et l'Université d'Adélaïde en Australie.

EGO en bref

Lieu	Cascina, près de Pise (Italie) Site de l'Interféromètre Virgo Adresse: Via E. Amaldi, 56021 S. Stefano a Macerata, Cascina (PI), Italie
Site web	www.ego-gw.it
Logo	
Directeur actuel	Prof. Federico Ferrini (depuis 2011) Courriel : federico.ferrini@ego-gw.it
Personnel sur site	63 (membres du personnel et collaborateurs inclus), provenant d'Allemagne, de France, d'Italie, des Pays-Bas, du Royaume-Uni et de Russie

FAQ :
**30 questions sur Virgo, les ondes
gravitationnelles et GW150914**

1) Qu'est-ce que Virgo ?

Virgo est un instrument scientifique conçu pour détecter les ondes gravitationnelles. C'est un interféromètre de Michelson dont les deux bras perpendiculaires font trois kilomètres de long et qui a comme source lumineuse un laser infrarouge. Virgo est le plus grand détecteur de ce type en Europe et le troisième au monde. Son nom vient d'un amas d'environ 1500 galaxies, situé dans la constellation de la Vierge («Virgo» en latin), distant d'une cinquantaine de millions d'années-lumière et qui devait être à portée de la première version du détecteur. Virgo a été construit en Italie près de Pise, sur le site de l'Observatoire gravitationnel européen (EGO) ; il est principalement financé par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) français et l'*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* (INFN) italien. En 2006, le *National instituut voor sub-atomaire fysica* (Nikhef) néerlandais a rejoint la collaboration Virgo et contribué de manière importante à la construction du détecteur. Ont suivi en 2008 l'équipe POLGRAW de Varsovie (Pologne), puis en 2010 le KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics (RMKI) de Budapest (Hongrie).

2) Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?

Une onde gravitationnelle est une infime ondulation de l'espace-temps qui se propage dans l'Univers à la vitesse de la lumière. Ces ondes sont produites par des phénomènes astrophysiques violents, comme la coalescence² d'étoiles à neutrons ou de trous noirs, ou bien l'explosion d'étoiles massives en supernovæ. Les ondes gravitationnelles sont une des conséquences de la théorie de la relativité générale, publiée par Albert Einstein en 1915, il y a un siècle. Néanmoins, ce n'est que dans les dernières décennies que les progrès technologiques ont permis de concevoir des instruments comme Virgo, suffisamment sensibles pour détecter directement les ondes gravitationnelles sur Terre.

3) A-t-on des preuves de l'existence des ondes gravitationnelles ?

Il existe des preuves indirectes de leur existence. La principale est basée sur PSR B1913+16, un pulsar en orbite autour d'un autre astre compact. Un pulsar est une étoile à neutrons qui émet un rayonnement électromagnétique intense dans une direction donnée. Comme le pulsar est en rotation rapide, ce jet balaie un cône dans l'espace. Si la Terre est sur son trajet, le pulsar est détecté sous forme de flashes périodiques, un peu comme un phare. Le suivi, sur trois décennies, des signaux émis par PSR B1913+16 a montré que le rayon de l'orbite du pulsar diminue et que son mouvement s'accélère. Cette évolution est lente mais les mesures précises sont en très bon accord avec les prédictions de la relativité générale : ce système binaire perd peu à peu son énergie en émettant des ondes gravitationnelles.

4) Les ondes gravitationnelles sont-elles différentes des ondes électromagnétiques³, comme celles qui constituent la lumière ?

Oui, ces deux types d'ondes sont de natures complètement différentes bien que les « mécanismes » à l'origine de leurs émissions soient similaires. Les ondes gravitationnelles sont des ondulations de l'espace-temps produites par des masses accélérées, alors que les ondes électromagnétiques sont des perturbations du champ électromagnétique créées par des charges électriques accélérées – par exemple lorsque du courant électrique circule dans une antenne. En plus de leurs origines bien distinctes, ces deux types d'ondes agissent sur des quantités

² En physique, le mot "coalescence" désigne un processus au cours duquel deux objets identiques (par exemple des gouttes d'eau) fusionnent pour n'en former qu'un seul. Lorsque deux astres (étoiles à neutrons ou trous noirs) orbitent l'un autour de l'autre, ils perdent de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles et se rapprochent. Ce phénomène, très long et progressif, s'amplifie dans les derniers instants qui précèdent la coalescence, c'est-à-dire la fusion des deux astres.

³ Les ondes électromagnétiques sont utilisées pour décrire l'ensemble du rayonnement électromagnétique : ondes radio, micro-ondes, infrarouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma. Ce sont des oscillations des champs électrique et magnétique qui se propagent à la vitesse de la lumière.

physiques différentes : les ondes gravitationnelles sur la géométrie de l'espace-temps, les ondes électromagnétiques sur les charges électriques. De plus, la gravitation est une force bien plus faible que l'électromagnétisme : on s'attend à ce que l'effet du passage d'une onde gravitationnelle sur Terre soit extrêmement faible, ce qui explique pourquoi des instruments spéciaux, aussi complexes que Virgo, sont nécessaires pour le détecter.

5) Quelles sont les sources potentielles d'ondes gravitationnelles ?

Aucune source d'origine terrestre (naturelle comme anthropique) ne peut produire d'ondes gravitationnelles suffisamment fortes pour être détectées par Virgo. Par contre, de nombreux phénomènes violents dans l'Univers pourraient générer de telles ondes. Par exemple, la théorie prédit que des ondes gravitationnelles détectables pourraient être brièvement émises à la fin de la coalescence de deux astres compacts (comme des étoiles à neutrons ou des trous noirs), ou encore lors d'une explosion de supernova. De plus, des étoiles à neutrons asymétriques et en rotation émettraient en continu des ondes gravitationnelles périodiques. Il devrait également y avoir un fond stochastique⁴ d'ondes gravitationnelles, issu de la superposition d'un grand nombre de sources faibles (trop éloignées pour être détectées individuellement), auquel pourrait s'ajouter un signal produit peu de temps après le Big-bang. Et aussi, peut-être, des objets astrophysiques encore inconnus.

6) Pourquoi les scientifiques cherchent-ils les ondes gravitationnelles ?

Détecter les ondes gravitationnelles ouvrira une nouvelle fenêtre sur le cosmos. Les ondes gravitationnelles sont des « messagers » complémentaires des observations astronomiques traditionnelles, basées sur l'ensemble du spectre électromagnétique (la lumière visible, l'infrarouge, les ondes radios, les rayons X et gamma), les rayons cosmiques ou les neutrinos. De plus, la détection directe des ondes gravitationnelles fournira un test puissant de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Celle-ci explique la gravitation au moyen de la courbure de l'espace-temps mais elle n'a jusqu'à présent été testée que dans des cas où la gravitation est faible, comme dans le Système solaire. Les ondes gravitationnelles sont un moyen unique de tester la gravitation dans des conditions extrêmes, par exemple lors de la coalescence de deux astres compacts comme des étoiles à neutrons ou des trous noirs. Détecter puis étudier les ondes gravitationnelles seront des étapes majeures pour comprendre la nature de la gravitation.

7) Comment fonctionne Virgo ?

Selon la relativité générale, le passage d'une onde gravitationnelle induit une déformation extrêmement ténue de la structure de l'espace-temps. Pour détecter cette perturbation, Virgo mesure en permanence les interférences entre deux faisceaux laser (issus d'une source commune et séparés à l'aide d'une lame séparatrice) qui se propagent dans des directions perpendiculaires. En effet, une onde gravitationnelle modifie de manière différente les trajets suivis par la lumière dans les deux bras du détecteur, ce qui se traduit par un changement au niveau du signal d'interférence enregistré en sortie. Cette configuration optique, appelée « interféromètre de Michelson » (inventée au XIX^e siècle pour mesurer d'éventuelles variations de la vitesse de la lumière selon sa direction de propagation), permet de mettre en évidence des déformations spatiales infimes, comme celles produites par des ondes gravitationnelles. En fait, l'effet d'une onde gravitationnelle est si faible qu'il peut être masqué par de nombreuses sources de signaux parasites, appelés de manière générique « bruits ». Pour atteindre son objectif, Virgo doit donc réduire autant que possible tous ces différents bruits.

⁴ L'adjectif "stochastique" est utilisé pour qualifier des phénomènes dont l'évolution au cours du temps n'est pas prédictible. Dans l'exemple développé ici d'un fond stochastique d'ondes gravitationnelles d'origine astrophysique, on ne sait pas combien de sources distinctes y contribuent à un instant donné mais on peut décrire leurs caractéristiques (nombre moyen de sources, intensité du rayonnement) de manière statistique et tester la possibilité de détecter un tel signal après un temps d'observation très long.

8) Quelles sont les principales sources de bruit pour Virgo ?

Ces bruits ont des origines très diverses et peuvent générer des signaux parasites dans la bande de fréquence à laquelle Virgo est sensible (de 10 Hz environ à 10 kHz). Un premier exemple de perturbation est le bruit sismique, aux causes multiples : vagues sur le rivage, activités humaines, microséismes autour de Virgo, etc. D'autres bruits ont une origine plus fondamentale, comme le bruit thermique, induit par les vibrations aléatoires de la surface des miroirs, ou le bruit de grenaille des photons, dû à la nature quantique de la lumière du laser. Pour être sensible au passage des ondes gravitationnelles, il faut réduire tous ces bruits : c'est tout l'enjeu de la conception du détecteur Virgo.

9) Qu'est-ce que le détecteur Advanced Virgo ?

Le détecteur Advanced Virgo (« Virgo Avancé ») est une mise à jour majeure du détecteur Virgo initial. En 2011, à la fin de la prise de données, tous les principaux composants de Virgo ont été démontés puis peu à peu remplacés par d'autres, améliorés, pour assembler le détecteur Advanced Virgo. Ce nouvel instrument permettra d'améliorer la sensibilité de Virgo d'un facteur dix, d'observer donc dix fois plus loin et d'explorer ainsi un volume d'Univers mille fois plus important que le détecteur Virgo initial.

10) Quelle sera la sensibilité du détecteur Advanced Virgo ?

Le détecteur Advanced Virgo sera sensible à des variations de longueur de l'ordre du milliardième de milliardième de mètre, soit environ un millième du diamètre d'un proton ! A comparer à la longueur des bras de l'interféromètre : 3 km. Advanced Virgo pourra détecter les signaux émis lors de la coalescence d'un système de deux étoiles à neutrons jusqu'à une distance d'environ quatre cent millions d'années-lumière, et bien plus loin dans le cas où le système binaire inclut au moins un trou noir. Advanced Virgo sera sensible aux ondes gravitationnelles dans une gamme de fréquences très large, comprise entre 10 Hz environ et 10 kHz.

11) Quelles technologies rendent Advanced Virgo aussi sensible ?

Ces technologies sont très variées et font appel à de nombreux domaines de l'ingénierie ; c'est pourquoi seules les principales sont mentionnées ici. Les miroirs d'Advanced Virgo sont plus lourds (42 kg) que ceux de Virgo, ce qui les rend moins sensibles aux légères fluctuations de la puissance du laser (activement stabilisé par ailleurs). La taille du faisceau est plus grande, pour moyenniser au mieux les fluctuations de position des surfaces des miroirs – le bruit thermique. Les miroirs ont également un revêtement spécial qui minimise les pertes de puissance à chaque réflexion et permet ainsi aux faisceaux laser de faire de nombreux allers-retours dans l'interféromètre. Au final, la puissance stockée dans les bras du détecteur devrait atteindre environ 500 kW, pour une puissance laser en entrée de 200 W. Cela permettra de réduire le bruit de grenaille des photons du laser, dominant à haute fréquence. Les miroirs sont toujours suspendus aux « super-atténuateurs », un système capable de réduire les vibrations du sol d'un facteur 10 000 milliards à partir de 10 Hz. De plus, l'ensemble de l'instrumentation utilisée pour suivre en temps réel l'état de l'interféromètre (photodiodes et caméras) est également isolé du bruit sismique et placé sous vide. Un vide très poussé (pression résiduelle inférieure au millionième de millionième d'atmosphère⁵) règne dans l'interféromètre afin d'éviter au maximum les interactions entre les faisceaux laser et les molécules d'air. Le maintenir nécessite entre autres l'emploi de « pompes cryogéniques », faites de tubes refroidis à l'azote liquide et situées aux extrémités des deux bras kilométriques.

12) Y a-t-il d'autres instruments comme Virgo ?

Un réseau « d'interféromètres gravitationnels » comme Virgo est en train de se mettre en place. En effet, utiliser les mesures de plusieurs détecteurs est un élément clef pour rejeter les signaux parasites dus aux bruits et pour localiser la position de la source d'ondes gravitationnelles dans le ciel. Ce réseau comprend notamment les deux

⁵ Une atmosphère est la valeur de la pression atmosphérique au niveau de la mer.

interféromètres LIGO (*Laser Interferometer Gravitational Observatory*) construits aux Etats-Unis (à Hanford dans l'état de Washington et à Livingston en Louisiane) et dont les bras font 4 km de long. Il inclut également le détecteur GEO-600 aux bras de 600 m, installé près de Hanovre en Allemagne. Un cinquième interféromètre, KAGRA, est en construction au Japon sous une montagne, dans la mine de Kamioka : il sera terminé vers 2018. A plus long terme, la collaboration LIGO souhaite installer un troisième interféromètre de 4 km en Inde : c'est le projet LIGO-India.

13) Virgo est-il un télescope observant l'Univers ?

En un sens Virgo est un télescope, puisqu'il cherche des phénomènes qui se déroulent loin dans le cosmos. Mais son apparence et son principe de fonctionnement sont complètement différents de ceux d'un télescope traditionnel. En effet, Virgo n'utilise pas ses miroirs et ses lentilles de la même façon qu'un télescope optique. Le détecteur est composé de deux bras perpendiculaires de 3 km de long qui servent à mesurer les déformations infimes de l'espace-temps générées par le passage d'une onde gravitationnelle. De plus, ni Virgo ni les autres interféromètres gravitationnels (en particulier les deux détecteurs LIGO situés aux Etats-Unis) ne peuvent être pointés dans une direction particulière : à chaque instant ils observent une grande partie du ciel. C'est pour cette raison qu'il est crucial d'avoir plusieurs interféromètres en fonctionnement simultané, afin de localiser la source des ondes gravitationnelles à partir des différences entre les temps d'arrivée et les formes des signaux mesurés dans les instruments. Le vrai télescope est en fait le réseau global composé des détecteurs indépendants Virgo et LIGO. C'est pourquoi les scientifiques de LIGO et de Virgo se sont associés : depuis la première période de prise de données de Virgo en 2007, ils partagent leurs connaissances techniques sur les instruments et exploitent en commun les données scientifiques produites.

14) Peut-on identifier les sources des ondes gravitationnelles provenant de l'Univers ?

Les informations fournies par le réseau des instruments LIGO et Virgo ne fourniront qu'une localisation approximative pour une source d'ondes gravitationnelles : la zone sélectionnée dans le ciel sera bien plus grande que celle occupée par la pleine lune. Des accords ont été passés avec des télescopes optiques qui observent différentes gammes de longueurs d'onde électromagnétiques, ainsi qu'avec des détecteurs de neutrinos. Lorsqu'un candidat « onde gravitationnelle » potentiel est identifié, ces observatoires sont prévenus et explorent la zone où pourrait se trouver sa source. L'observation simultanée d'ondes gravitationnelles et d'autres signaux émis par la même source permettrait d'améliorer sa localisation dans le ciel et d'identifier sa nature ; elle fournirait aussi des informations sur les mécanismes astrophysiques qui produisent de tels signaux.

15) Qu'est-ce que la collaboration Virgo ?

La collaboration Virgo est une équipe internationale de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens qui travaillent ensemble pour construire, mettre en service, exploiter et améliorer le détecteur Virgo, dans le but de permettre la détection puis l'étude des ondes gravitationnelles. Actuellement, plus de 300 personnes sont membres de la collaboration Virgo. Elles viennent de nombreux laboratoires issus de cinq pays européens : la France, l'Italie, les Pays-Bas, la Pologne et la Hongrie. L'expérience Virgo est principalement financée par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) français et l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) italien. Le National Institute for Subatomic Physics (Nikhef) néerlandais a rejoint la collaboration en 2006 et a contribué au financement d'Advanced Virgo. Plus récemment, en 2008 et en 2010, le groupe POLGRAW de Varsovie (Pologne) et le KFKI Research Institute for Particle and Nuclear Physics (RMKI – Budapest, Hongrie) sont devenus membres de Virgo.

16) Qu'est-ce qu'EGO ?

L'Observatoire européen pour la gravitation (*European Gravitational Observatory*, EGO) est un consortium franco-italien créé par un accord entre le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Ces deux agences financent à parts égales le fonctionnement de ce consortium depuis sa fondation en décembre 2000. En 2009, EGO a accueilli le National Institute for Subatomic Physics (Nikhef) comme observateur au sein de son conseil. Le site d'EGO, situé près de la ville de Cascina dans la province de Pise, comprend le détecteur Virgo et les bâtiments associés. Les missions principales d'EGO sont de mener à bien la construction d'Advanced Virgo, de garantir son fonctionnement, sa maintenance et ses améliorations, ainsi que l'exploitation de ses données scientifiques. EGO fait partie de la collaboration Virgo à laquelle il apporte son support technique tout en étant responsable du site de l'interféromètre. Enfin, EGO promeut l'étude de la gravitation en Europe.

17) Quel est le montant de l'investissement consenti pour Virgo ?

Les investissements pour Virgo sont de l'ordre de 10 à 15 millions d'euros par an, sur une période d'environ 20 ans. Ce montant comprend la construction des infrastructures, les améliorations apportées à l'instrument ainsi que les salaires des chercheurs, ingénieurs et techniciens qui travaillent sur le projet. Ces investissements ont principalement été pris en charge par la France et l'Italie, avec plus récemment des contributions en matériel et en personnel des Pays-Bas.

18) Quels sont les principaux résultats de Virgo pour le moment ?

Le détecteur Virgo initial a atteint sa sensibilité nominale⁶ en 2010, ce qui a validé les choix technologiques et les développements de pointe faits pour construire cet instrument. Les périodes de prises de données communes avec LIGO entre 2007 et 2010 ont permis d'obtenir des contraintes sur les taux des événements astrophysiques recherchés. La prise de données finale de 2011 a exploré la gamme des basses fréquences pour chercher des signaux émis par des étoiles à neutrons en rotation. Cette étude a été permise par la mise en place anticipée d'une technologie développée pour Advanced Virgo, les « suspensions monolithiques » : une nouvelle manière de suspendre les miroirs, à l'aide de fibres de verre soudées remplaçant les fils métalliques originaux. Ce progrès a ouvert la voie vers Advanced Virgo.

19) Quand Advanced Virgo commencera-t-il à observer le cosmos ?

La construction du détecteur Advanced Virgo se terminera en 2016. Ensuite, une phase de test et de démarrage de l'instrument sera nécessaire, avant de commencer une première période d'observation, commune avec les détecteurs LIGO et qui durera six mois environ. D'autres périodes de prise de données suivront, entrecoupées de phases d'arrêt pendant lesquelles les différents détecteurs seront optimisés afin d'améliorer encore leurs sensibilités. Ces nouvelles données seront analysées en commun par les membres des collaborations LIGO et Virgo, tout comme celles enregistrées précédemment par les détecteurs initiaux à partir de 2007.

20) Puis-je visiter le site de l'expérience Virgo ?

Bien sûr : vous êtes le bienvenu ! Une visite est guidée par des scientifiques ; elle commence par une présentation d'introduction et se poursuit par la visite de certaines parties de l'instrument. Les créneaux de visite sont réservés en priorité aux écoles, lycées, établissements d'enseignement supérieur et aux journalistes. Les associations, groupes, et plus généralement toute personne intéressée par la découverte de l'interféromètre sont également invités à venir nous voir, notamment lors des journées « portes ouvertes » organisées chaque année. Vous pouvez également

⁶ La "sensibilité nominale" était l'objectif (en matière de performance) défini pour le détecteur Virgo lors de sa conception. Atteindre cette sensibilité a marqué à la fois l'aboutissement du travail sur l'instrument de première génération et le coup d'envoi de la phase d'amélioration du détecteur – Advanced Virgo.

visiter « virtuellement » Virgo en visionnant les nombreuses vidéos en ligne dans la galerie multimédia de notre site internet. Les visites publiques ont en général lieu le samedi et peuvent être réservées auprès du secrétariat scientifique d'EGO (voir <http://public.virgo-gw.eu/visiter-virgo> pour plus d'informations).

21) Que sait-on de la source astrophysique à l'origine du signal détecté le 14 septembre ?

Le signal a été émis lors des derniers instants de l'évolution d'un couple de trous noirs liés par l'attraction gravitationnelle. Les deux trous noirs pesaient chacun environ de 30 fois notre Soleil et ont fusionné pour former un trou noir plus lourd, tournant sur lui-même. Juste avant de fusionner, les trous noirs tournaient l'un autour de l'autre 75 fois par seconde, à une vitesse approchant la moitié de la vitesse de la lumière. Les perturbations de l'espace-temps engendrées par ce phénoménal tourbillon se sont propagées pendant plus d'un milliard d'années avant de traverser la Terre et d'être captées par les détecteurs LIGO le 14 septembre.

22) Quelles sont les implications de la détection pour l'astrophysique ?

Cette première détection représente l'avènement d'une nouvelle discipline scientifique, l'astronomie des ondes gravitationnelles, ouvrant la possibilité d'observer des phénomènes astrophysiques avec un nouvel outil complémentaire de l'astronomie traditionnelle, pour un "spectacle son et lumière" de l'Univers. (Les ondes gravitationnelles ne sont pas des ondes sonores, l'analogie tient à ce que la gamme de fréquence des signaux accessibles aux détecteurs interférométriques terrestres comme Virgo et LIGO est la même que celle des sons accessibles à l'oreille humaine – la fréquence définissant la hauteur du son, du grave à l'aigu.) Plus spécifiquement, cette première détection démontre qu'à la fin de leur vie des étoiles massives peuvent former des trous noirs très lourds (environ 30 fois plus lourds que notre Soleil) et que ces trous noirs peuvent se trouver sous la forme de couples qui évoluent jusqu'à la fusion en un temps relativement court (à l'échelle de l'âge de l'Univers) : des informations précieuses pour mieux comprendre l'évolution des étoiles.

23) Quelles sont les implications de la détection pour la physique fondamentale ?

Cette détection représente la première observation directe de trous noirs, via leur rayonnement gravitationnel. Elle permet de tester la relativité générale de manière inédite, dans des circonstances extrêmes : celles d'astres lourds et compacts évoluant à des vitesses significatives par rapport à la vitesse de la lumière. La confrontation du signal observé le 14 septembre aux prédictions théoriques montre un bon accord avec celles-ci. La détection de futurs événements similaires permettra d'affiner ces mesures pour pousser la théorie dans ses retranchements. L'enjeu est de taille dans la mesure où la gravitation se trouve au cœur des énigmes les plus fascinantes de l'Univers aujourd'hui, la matière sombre et l'énergie sombre.

24) Les scientifiques de LIGO et Virgo sont-ils sûrs de cette découverte ?

Oui ! Leur certitude repose sur deux piliers : d'une part les détecteurs LIGO fonctionnaient parfaitement au moment du passage de l'onde gravitationnelle, et la "météo" autour des détecteurs était calme (météo au sens habituel mais également au sens sismique, magnétique...). D'autre part le signal détecté est un cas d'école : il est très clair et correspond à ce qui est prédit pour la fusion de deux trous noirs. Sa détection simultanée dans deux détecteurs indépendants ne laisse aucune place au doute.

25) Comment les scientifiques de LIGO et Virgo ont-ils réagi à cette découverte ?

L'incrédulité des premiers instants a rapidement laissé la place à l'émerveillement de voir cette longue quête enfin aboutir, un accomplissement qui est le fruit d'un cadeau de la nature et de décennies de travail. Et surtout, les scientifiques des collaborations Virgo et LIGO ont beaucoup travaillé pendant cinq mois, pour vérifier les résultats dans les moindres détails et préparer la publication scientifique annonçant la découverte, ainsi que la dizaine d'articles complémentaires qui l'accompagne.

26) Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Un trou noir est un astre si compact que rien hormis les ondes gravitationnelles ne peut s'en échapper : la matière comme la lumière y sont prisonnières de l'attraction gravitationnelle. Celle-ci est si forte que les trous noirs sont des

objets singuliers, qui ne sont pas constitués de matière ordinaire. Prédits par la relativité générale, ils n'avaient été observés qu'indirectement jusqu'à présent, à travers les effets qu'ils produisent sur la matière ou la lumière dans leur environnement. L'événement du 14 septembre met en scène trois trous noirs : les deux trous noirs d'origine, vestiges de deux étoiles massives liées par l'attraction gravitationnelle, et le trou noir final résultant de la fusion des deux premiers.

27) Comment sait-on que des trous noirs sont à l'origine du signal détecté ?

Le signal détecté porte beaucoup d'informations sur la source émettrice : l'évolution de sa fréquence et de son amplitude au cours du temps est très caractéristique (comme un son qui devient plus fort et plus aigu) et permet d'estimer les masses des astres impliqués. Celles-ci sont de l'ordre de 30 fois la masse de notre Soleil. De plus, juste avant la fusion, les deux astres tournent l'un autour de l'autre 75 fois par seconde et doivent donc être très proches l'un de l'autre (quelques centaines de kilomètres) sans se toucher. Les seuls objets connus qui soient suffisamment compacts pour entrer en contact aussi tardivement sont les trous noirs.

28) S'attendait-on à ce qu'une telle source – la fusion de deux trous noirs – soit à l'origine de la première détection ?

On s'attendait à ce que la fusion d'astres compacts, étoiles à neutrons ou trous noirs, donne lieu aux premières observations d'ondes gravitationnelles. Mais les prédictions n'étaient pas assez précises pour pronostiquer qui des fusions d'étoiles à neutrons ou de trous noirs seraient les plus fréquemment observées. En particulier, il n'était pas certain que les étoiles puissent former des trous noirs aussi massifs à la fin de leur vie. C'est cette possibilité qui a permis à une fusion de trous noirs de l'emporter : plus les trous noirs sont lourds et plus leur fusion est visible à grande distance, ce qui augmente la probabilité d'observer un tel signal.

29) Comment la source est-elle localisée ?

En comparant les propriétés, notamment le temps d'arrivée, du signal reçu dans au moins deux détecteurs distants, on peut estimer d'où provenait l'onde gravitationnelle (un peu comme notre cerveau, en comparant le son entendu par nos deux oreilles, est capable d'en localiser approximativement l'origine). Avec deux détecteurs cette estimation est grossière ; le renfort de Virgo permettra de gagner en précision pour la localisation des sources, qui s'affinera davantage à mesure que le réseau de détecteurs continuera à s'étoffer.

30) Est-il normal qu'aucun signal lumineux n'ait été observé en lien avec ce signal d'onde gravitationnelle ?

Oui. Les signaux lumineux qui témoignent de nombreux phénomènes violents dans l'Univers sont le fait de la matière plongée dans des circonstances hors du commun (radioactivité, accélérations gigantesques, collisions, explosions...) Les trous noirs n'étant pas constitués de matière ordinaire, aucun signal lumineux n'est attendu lors de leur fusion. Par ailleurs, la zone du ciel susceptible de contenir la source de ces ondes gravitationnelles est vaste et n'a pas été explorée entièrement, de sorte qu'on ne peut pas conclure à l'absence de signal lumineux – pas plus qu'on ne pourrait conclure qu'un signal lumineux détecté dans cette zone serait nécessairement lié à la source d'ondes gravitationnelles.



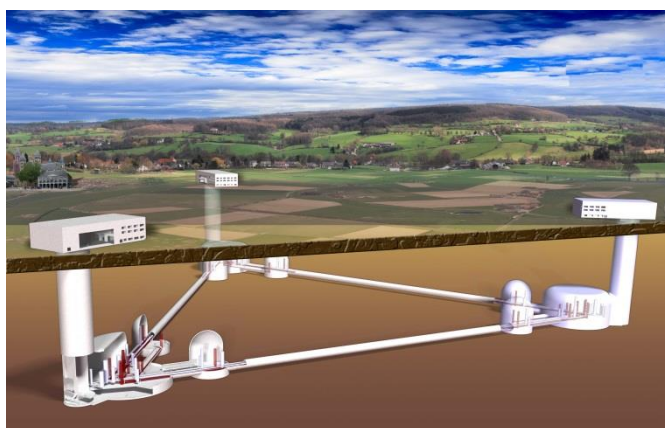
Les autres projets sur les ondes gravitationnelles au CNRS

Le télescope « Einstein » : vers un instrument de troisième génération

L'idée d'un détecteur de troisième génération a commencé à être discutée par des scientifiques européens des projets GEO et Virgo à la fin des années 2000. L'objectif recherché est de faire un saut quantitatif et qualitatif dans nos capacités d'observation des sources d'ondes gravitationnelles, en atteignant une sensibilité qui permette d'observer un volume d'Univers au moins mille fois plus grand que ce qui pourra être fait avec Advanced Virgo. Un tel instrument devrait ainsi observer quotidiennement des dizaines de sources, dont certaines se trouvant aux confins de l'Univers.

La première étude du concept de ce détecteur, baptisé Einstein Telescope (ET), a été conduite grâce à l'aide du septième programme cadre de recherche et développement de l'Union Européenne. Elle a abouti à la publication en 2011 du document décrivant des solutions envisageables pour un tel instrument.

Les limitations actuelles ou ultimes d'Advanced Virgo (et Advanced LIGO) plaident pour la réalisation d'une nouvelle infrastructure, plus grande (au moins 10 km de long) afin d'augmenter l'effet des ondes gravitationnelles sur l'instrument. Une installation souterraine pour limiter certaines perturbations dues au mouvement du sol, la mise en œuvre de plusieurs interféromètres pour couvrir au mieux les différents types de signaux astrophysiques attendus, sont des éléments clefs étudiés pour ET. Le détecteur ferait naturellement appel à de nouvelles technologies. Il s'agit par exemple d'utiliser une nouvelle longueur d'onde pour le laser, d'adopter de nouveaux matériaux pour réaliser les miroirs, qui seraient refroidis à basse température. Ces défis technologiques sont actuellement explorés par différentes équipes des projets LIGO et Virgo en vue de préparer un programme de détecteurs de troisième génération, qui pourrait être lancé en Europe et aux Etats-Unis dans les années 2020, pour un début d'exploitation dans les années 2030.



Vue d'artiste de ce que pourrait être ET. La distance entre les trois éléments d'ET, situés aux trois coins, serait d'une dizaine de kilomètres.

eLISA (Evolved Laser Interferometer Space Antenna)

eLISA est une future mission spatiale L3 du programme « Cosmic vision » de l'ESA, avec la participation de l'agence spatiale américaine (NASA). Prévus pour la décennie 2030, elle est composée d'une flottille de trois satellites placés à plusieurs millions de kilomètres l'un de l'autre, dont l'objectif est de participer au nouveau champ d'observations qu'est l'astronomie gravitationnelle. Des faisceaux laser mesureront en permanence la distance entre les satellites, formant un gigantesque interféromètre dans l'espace. Celui-ci sera complémentaire des détecteurs au sol. En effet, *eLISA* sera capable de détecter des objets plus gros, comme les trous noirs supermassifs au cœur des galaxies, qui émettent des ondes gravitationnelles de basse fréquence, noyées dans le bruit de fond sur Terre. En revanche, en raison de sa taille, il ne sera pas sensible aux objets plus « petits » observés par Virgo et LIGO (paires d'étoiles à neutrons ou de trous noirs en coalescence).

La mission de démonstration *LISA Pathfinder* (ESA) s'est envolée le 3 décembre 2015 pour tester les technologies nécessaires à la réalisation de la mission *eLISA* : s'assurer que les détecteurs peuvent être correctement isolés des perturbations extérieures, et que le système de mesure est suffisamment sensible

En savoir plus : http://www.apc.univ-paris7.fr/APC_CS/experiences/lisa

European pulsar timing array (EPTA)

Les astrophysiciens disposent d'un moyen complémentaire pour rechercher les ondes gravitationnelles : l'étude des signaux provenant d'un ensemble de pulsars millisecondes (*pulsar timing array*) voisins de la Terre.

Les pulsars sont des étoiles à neutrons, vestiges d'étoiles massives tournant très rapidement sur elles-mêmes (quelques millièmes de seconde ici). Ils émettent des rayonnements (notamment des ondes radio), repérés par les télescopes de manière périodique quand ils passent dans le champ de vue de l'instrument, à la faveur de la rotation de l'étoile.

Les ondes gravitationnelles de très grande longueur d'onde (et donc de très petite fréquence) passant à proximité de la Terre vont modifier le temps d'arrivée du signal des pulsars. Ces ondes gravitationnelles de très grande longueur d'onde sont produites par la fusion de deux trous noirs supermassifs situés au centre de deux galaxies en fusion (qui orbitent l'une autour de l'autre avec des périodes de l'ordre de plusieurs mois ou années), ou par les perturbations de l'univers primordial.

Du fait de leur très faible fréquence (de l'ordre du nanohertz), elles ne peuvent pas être « vues » par les autres instruments (Advanced Virgo et LIGO, sensibles à des fréquences autour de 10-100 Hz, ou LISA, qui sera sensible à des fréquences de l'ordre du millihertz).

Il existe trois réseaux de par le monde regroupés dans l'*International Pulsar Timing Array*, dont un en Europe (*European Pulsar Timing Array*) qui utilise notamment les données de la Station de radioastronomie de Nançay (CNRS/Observatoire de Paris/Université d'Orléans).

En savoir plus : <http://www.epta.eu.org/>



www.cnrs.fr

Les recherches théoriques sur les sources d'ondes gravitationnelles

En France, des chercheurs en physique théorique – en particulier l'équipe de « relativité numérique » du Laboratoire Univers et théories (LUTH, CNRS/Observatoire de Paris/Université Paris Diderot) et le groupe « gravitation et cosmologie » de l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP, CNRS/UPMC) – étudient les principales sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles. Les chercheurs du LUTH et de l'IAP s'efforcent notamment de prédire aussi précisément que possible les signaux émis par ces sources ; les résultats qu'ils obtiennent servent ensuite à affiner les algorithmes de recherche d'ondes gravitationnelles utilisés dans les détecteurs comme Virgo et LIGO. Ces avancées théoriques permettront de tester la gravitation et aussi de mieux comprendre certains états très denses de la matière nucléaire, comme ceux rencontrés dans les étoiles à neutrons.

Les chercheurs du LUTH utilisent des codes numériques qu'ils ont développés pour résoudre à l'aide de puissants ordinateurs les équations d'Einstein qui sont au cœur de la relativité générale. Ils ont notamment étudié l'émission d'ondes gravitationnelles par des étoiles à neutrons magnétisées (pulsars) ou encore lors d'effondrements gravitationnels d'étoiles massives (phénomène de supernova). Actuellement, ils s'intéressent aux systèmes binaires constitués d'étoiles à neutrons ou de trous noirs, un sujet également étudié à l'IAP. Dans ce laboratoire, les physiciens travaillent également sur la fusion de couples de trous noirs, testent des théories de la gravitation alternatives à la relativité générale et étudient la structure interne des étoiles à neutrons.

Ressources disponibles



Merci d'adresser vos demandes par mail à l'adresse presse@cnrs.fr.

Photos

La planche photos pages 44-46 vous donne un aperçu des photos disponibles à la photothèque du CNRS.

Des vues aériennes de l'interféromètre Virgo sont disponibles sur demande.

Films, animations et autres visuels

Film CNRS le Journal sur la découverte : <https://lejournale.cnrs.fr/node/1120>

Nous vous proposons des rushes contenant des extraits de ce film (interviews de chercheurs, images de Virgo) mais aussi des images des détecteurs LIGO et des animations. Contacter le bureau de presse du CNRS : presse@cnrs.fr

Experts scientifiques

En plus des scientifiques de la collaboration Virgo (biographies et contacts pages 47 à 51), le bureau de presse du CNRS peut vous mettre en contact avec des experts indépendants de la collaboration, sur des thèmes comme la relativité générale, les trous noirs, les études théoriques concernant les ondes gravitationnelles, les autres projets en lien avec les ondes gravitationnelles.

Liens pour en savoir plus

- Articles de CNRS le Journal :
 - o Ondes gravitationnelles en vue ?
 - o article sur la découverte : <https://lejournale.cnrs.fr/node/1119>
- PhD Comics « Expliquez-moi les ondes gravitationnelles »
<http://www.phdcomics.com/comics.php?f=1853#french>
- Virgo :
 - o Site officiel de Virgo : <http://public.virgo-gw.eu/language/fr/>
 - o Virgo sur wikipedia (page mise à jour par des scientifiques de la collaboration) :
https://fr.wikipedia.org/wiki/Virgo_%28interf%C3%A9rom%C3%A8tre%29
- Jeu « black hole hunter » : comme les scientifiques, recherchez les signaux d'ondes gravitationnelles
http://www.blackholehunter.org/index_fr.html

Expérience Virgo - Cascina



20160008_0004

© Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque



20160008_0029

© Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque



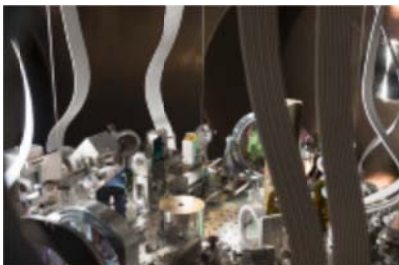
20160008_0007

© Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque



20160008_0035

© Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque



20160008_0017

© Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque



20160008_0047

© Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque



20160008_0026

© Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque



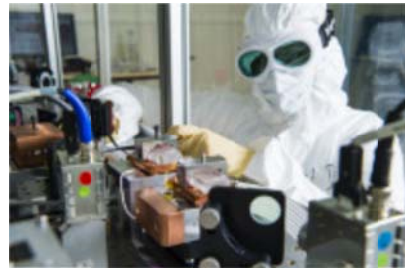
20160008_0059

© Cyril FRESILLON/Virgo/CNRS Photothèque



20160008_0074
© Romain BONNAND/Virgo/CNRS Photothèque

Expérience Virgo - LAPP



20160004_0033
© Cyril FRESILLON/LAPP/CNRS Photothèque

Expérience Virgo - LAL



20160001_0001
© Cyril FRESILLON/LAL/CNRS Photothèque

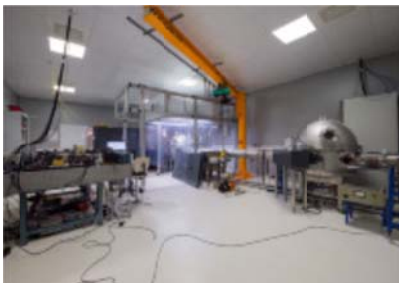


20160004_0044
© Cyril FRESILLON/LAPP/CNRS Photothèque

Expérience Virgo - LMA



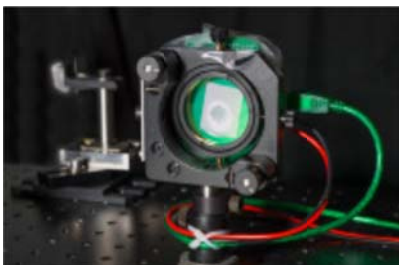
20160007_0009
© Cyril FRESILLON/LMA/CNRS Photothèque



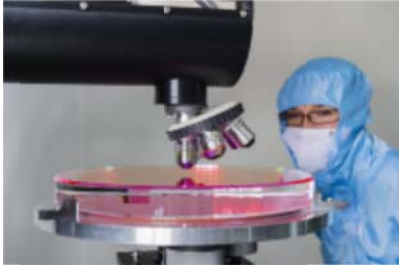
20160001_0006
© Cyril FRESILLON/LAL/CNRS Photothèque



20160007_0018
© Cyril FRESILLON/LMA/CNRS Photothèque



20160001_0014
© Cyril FRESILLON/LAL/CNRS Photothèque



20160007_0031

© Cyril FRESILLON/LMA/CNRS Photothèque



20160007_0042

© Cyril FRESILLON/LMA/CNRS Photothèque

LES CHERCHEURS RENCONTRÉS

A Cascina



Nicolas Arnaud est chargé de recherche CNRS au sein du Laboratoire de l'accélérateur linéaire (CNRS/Université Paris-Sud). Ingénieur de l'École nationale des ponts et chaussées, il a fait sa thèse sur l'expérience Virgo de 1999 à 2002, travaillant notamment sur le contrôle de la partie centrale du détecteur (alors en construction) et sur les premières études de détection des ondes gravitationnelles dans un réseau de détecteurs interférométriques. Recruté au CNRS en 2003, il a travaillé dix ans en physique des particules (avec notamment un séjour de quatre ans au laboratoire SLAC en Californie sur le détecteur BaBar) avant de revenir dans Virgo pour travailler sur l'instrument de seconde génération (*Advanced Virgo*). Il s'intéresse au contrôle du détecteur, à tous les aspects en lien avec la qualité des données et aux analyses de physique. Nicolas Arnaud est également chargé de mission « médiation et projets pédagogiques » à l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS.

Contact : T 01 64 46 89 17 | narnaud@lal.in2p3.fr



Antoine Heidmann est directeur de recherche au CNRS et travaille au Laboratoire Kastler Brossel (CNRS/ENS/UPMC/Collège de France), à Paris, dont il est le directeur depuis 2012. Son activité de recherche est centrée sur les conséquences de la physique quantique dans les mesures optiques ultrasensibles telles que celles réalisées par l'antenne gravitationnelle Virgo. La nature quantique de la lumière conduit en effet à des limites de sensibilité qui sont atteintes avec la génération actuelle de détecteurs et qu'il est utile de mieux comprendre et maîtriser. Antoine Heidmann est responsable de l'équipe « Optomécanique et mesures quantiques » du Laboratoire Kastler Brossel, dont les objectifs consistent notamment à réduire l'influence de ces effets quantiques.

Contact : T 01 44 27 43 89 ou 01 44 32 25 38 | antoine.heidmann@lkb.ens.fr



Catherine-Nary Man est directeur de recherche CNRS au laboratoire Artemis (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Nice Sophia Antipolis). Elle dirige ce laboratoire multi-disciplinaire centré sur la détection des ondes gravitationnelles, depuis sa création en 1999. Elle participe au projet Virgo depuis ses débuts, aux côtés d'Alain Brillet, le "père" de Virgo du côté français. Avec ce dernier, elle a fait les premières démonstrations des techniques de montée en puissance des lasers (le verrouillage par injection de lasers) en 1984, et suggéré à la communauté ondes gravitationnelles l'utilisation des lasers à solides dès 1987. Dès la construction de Virgo, elle a été responsable de tout le système lasers et banc d'injection. Elle a gardé la responsabilité du système laser préstabilisé depuis son mandat de directeur de laboratoire en 2000, et cela jusqu'à la phase actuelle d'Advanced Virgo. Elle a également participé à la mise au point du laser stabilisé pour le projet de détection des ondes gravitationnelles LISA dans

les années 2000, et fait le transfert de technologie vers d'autres laboratoires depuis que LISA a été relancé par l'ESA. Depuis les débuts, elle dirige l'équipe Virgo-Artemis.

Contact : T 04 92 00 31 89 | nary.man@oca.eu



www.cnrs.fr



Loïc Rolland est chargé de recherche CNRS au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (CNRS/Université Savoie Mont Blanc). Il est membre de la collaboration Virgo depuis 2006 pour la recherche de signaux d'ondes gravitationnelles. Il s'est d'abord occupé de l'étalonnage du détecteur Virgo (conversion des données brutes mesurées par le détecteur en un signal utile pour l'analyse de données), pendant les périodes d'observation communes du réseau LIGO-Virgo, entre 2007 et 2011. Ses activités se sont ensuite étendues avec sa participation à la conception du nouveau détecteur Advanced Virgo, en particulier sur des aspects optique et électronique, puis à sa construction. Il est depuis 2011 responsable du sous-système chargé des boucles de contrôle numériques du détecteur et de l'acquisition des données.

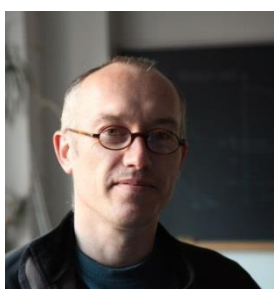
Contact : T 04 50 09 55 18 | loic.rolland@lapp.in2p3.fr

A Paris



Gianpietro Cagnoli est directeur du Laboratoire des matériaux avancés du CNRS (LMA), à Villeurbanne, qui a produit les miroirs des détecteurs LIGO et Virgo. Professeur de l'Université Claude Bernard Lyon 1, il exerce ses activités de recherche sur l'origine du bruit thermique à l'Institut Lumière Matière (ILM) et au LMA, en collaboration avec des équipes de l'ENS de Lyon et de l'INSA Lyon. Travaillant dans le domaine des ondes gravitationnelles depuis 1991, il a contribué aux développements des suspensions de l'optique des détecteurs Virgo, GEO600, Advanced LIGO et Advanced Virgo. Il a travaillé en Italie, en Ecosse et au Texas, avant d'arriver au LMA en 2012 en tant que responsable scientifique du développement des couches minces optiques. Le LMA est un leader mondial des revêtements réfléchissants de haute performance.

Contact : T 04 72 43 26 78 | g.cagnoli@lma.in2p3.fr



Eric Chassande-Mottin est chargé de recherche du CNRS. Il travaille au laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS/Université Paris Diderot/CEA/ Observatoire de Paris) où il est responsable du groupe « Gravitation ». Ses recherches portent sur l'analyse des données des détecteurs d'ondes gravitationnelles, celles du détecteur Virgo en particulier. Depuis 2014, il est co-responsable du groupe de la collaboration Virgo-LIGO en charge des recherches de sources d'ondes gravitationnelles transitoires (regroupant les phénomènes astrophysiques très énergétiques émettant des ondes gravitationnelles intenses et de courte durée). Il est aussi l'initiateur de plusieurs projets combinant les observations des ondes gravitationnelles et celles de l'astronomie conventionnelle. Il a coordonné la mise en place du programme

international de coopération entre astronomes et les détecteurs LIGO et Virgo. Il est également co-responsable du comité de rédaction de l'article faisant l'annonce de la première détection directe des ondes gravitationnelles.

Contact : T 01 57 27 60 36 | ecm@apc.in2p3.fr



Nicolas Leroy est chargé de recherche au Laboratoire de l'accélérateur linéaire d'Orsay (CNRS/Université Paris-Sud) dans le groupe Virgo depuis 2004. Il s'intéresse aux phénomènes violents de l'Univers avec les détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et Virgo dont il co-gère la prise de données. Il est aussi l'un des responsables de la recherche de l'émission en provenance de sursauts gamma, événements parmi les plus énergétiques de l'Univers. Enfin il s'investit dans les générations futures d'instruments, avec la mise en place d'une plateforme expérimentale dans son laboratoire étudiant de futures techniques pour le contrôle de cavité optique ou l'injection d'états quantiques particuliers de la lumière.

Contact : 01 64 46 83 73 | leroy@lal.in2p3.fr



Frédérique Marion est directrice de recherche au CNRS. Elle travaille sur la recherche des ondes gravitationnelles et l'expérience Virgo depuis 1993. Ses activités ont porté sur la simulation de l'instrument, son étalonnage, et l'analyse des données à la recherche de signaux provenant de la coalescence de systèmes binaires d'astres compacts (étoiles à neutrons et trous noirs). Elle a été, pendant plusieurs années, coresponsable du groupe d'analyse commun à LIGO et Virgo pour la recherche de ces signaux. Elle est actuellement responsable de l'équipe Virgo du Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (CNRS/Université Savoie Mont Blanc), et coresponsable du comité mis en place conjointement par LIGO et Virgo pour valider la première détection d'ondes gravitationnelles, et la publication scientifique la décrivant.

Contact : T 04 50 09 55 23 | marion@lapp.in2p3.fr



Benoît Mours est directeur de recherche au CNRS. Physicien des particules de formation, il s'est intéressé aux ondes gravitationnelles à la fin des années 1980 et a contribué à l'élaboration puis à la construction du détecteur Virgo. Il a notamment été responsable de l'électronique et du software de l'expérience, et a porté de nombreux projets techniques réalisés par le Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (CNRS/Université Savoie Mont Blanc) pour l'instrument. Il contribue également à l'analyse des données pour la recherche en temps réel de signaux provenant de la coalescence de systèmes binaires d'astres compacts (étoiles à neutrons et trous noirs). Il a été porte-parole de la collaboration Virgo pendant la phase de démarrage de l'expérience et a œuvré

pour la mise en place en 2007 de l'accord entre LIGO et Virgo pour le partage des données et l'unification des groupes d'analyse et des publications. Il a été le représentant français lors de l'étude préliminaire du « Einstein Telescope ». Il est le responsable scientifique français pour Virgo/Advanced Virgo.

Contact : T 04 50 09 55 21 | benoit.mours@lapp.in2p3.fr



Tania Regimbau est chargée de recherche au CNRS. Ses domaines de recherches sont l'astrophysique des objets compacts et les ondes gravitationnelles. Elle a travaillé pour le projet LIGO pendant son stage postdoctoral au Massachusetts Institute of Technology (2001-2003) et a rejoint la collaboration Virgo à son entrée au CNRS en 2004. En poste depuis cette date au laboratoire Astrophysique relativiste, théories, expériences, métrologie, instrumentation, signaux (Artemis, CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Nice Sophia Antipolis), elle travaille sur la modélisation des populations de sources astrophysiques et cosmologiques d'ondes gravitationnelles, et sur l'analyse des données des détecteurs LIGO et Virgo. Depuis 2012, elle est co-responsable du groupe commun à LIGO et Virgo sur les sources stochastiques. Elle est aussi membre des collaborations Einstein Telescope et LISA-France.

Contact : T 04 92 00 30 04 | regimbau@oca.eu

A Washington



Fabien Cavalier est directeur de recherche CNRS au Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL, CNRS/Université Paris-Sud), à Orsay. Son travail au sein du groupe Virgo a toujours été articulé autour de deux thèmes majeurs : le contrôle des cavités optiques (contrôle global de Virgo et plateforme CALVA au LAL) et l'analyse des données (caractérisation du détecteur et recherche de signaux courts non modélisés). Il a notamment été responsable du contrôle global de Virgo et coordinateur de l'analyse de données. Il est actuellement membre du comité de détection. Outre ces activités scientifiques, il est depuis février 2011 le directeur-adjoint du LAL (300 personnes dont 100 chercheurs). Dans le cadre de l'Université Paris-Saclay, il coordonne le département P2I (1500 personnes) qui recouvre l'ensemble des activités de l'IN2P3 (et en grande partie celles du CEA-Irfu) au sein de l'UPSay. Il est aussi co-directeur de l'école doctorale PHENICS de l'UPSay dont le périmètre scientifique recouvre celui du département P2I.

Contact : T 01 64 46 89 22 | cavalier@lal.in2p3.fr



Matteo Barsuglia est directeur de recherche au CNRS et travaille au laboratoire Astroparticule et cosmologie (APC, CNRS/Université Paris Diderot/CEA/Observatoire de Paris). Ses recherches portent sur la détection des ondes gravitationnelles et en particulier sur le développement des détecteurs interférométriques. Depuis 2008, il est responsable au laboratoire APC d'une équipe qui contribue au détecteur Virgo, à la recherche de signaux d'ondes gravitationnelles dans les données de LIGO/Virgo et au développement de techniques pour améliorer la sensibilité des détecteurs d'ondes gravitationnelles.

Contact : T 01 57 27 69 28 | barsuglia@apc.univ-paris7.fr



Laurent Pinard est ingénieur de recherche hors-classe du CNRS. Ingénieur opticien de formation (SupOptique) et docteur en optique de l'université Paris 11, il est depuis 2008 responsable technique du Laboratoire des matériaux avancés (LMA) du CNRS, situé à Villeurbanne. Il a intégré le CNRS et le LMA en 1993 et a été impliqué dès le début de sa carrière dans le projet phare du laboratoire : Virgo. Il a développé et mis en place au LMA tous les bancs de métrologie optique nécessaires à la caractérisation des miroirs Virgo de grande dimension. Il a été responsable du sous-système « miroir » de Virgo – qui consistait à fournir les miroirs principaux de l'interféromètre – et a exercé la même responsabilité pour Advanced Virgo. Le but était de produire des miroirs de grande taille aux performances optiques jusqu'à présent jamais atteintes. Les recherches menées pour Virgo et plus généralement sur

les couches minces « optiques faibles pertes » ont pu être valorisées en obtenant un important contrat en 2009 avec Caltech pour la réalisation des 20 grands miroirs (« test mass ») d'Advanced LIGO. Ce travail, pour lequel Laurent Pinard était chef de projet, s'est achevé début 2015. Quatre de ces miroirs sont actuellement installés dans les deux interféromètres Advanced LIGO et ont permis la détection directe d'une onde gravitationnelle.

Contact : T 04 72 43 26 68 | pinard@lma.in2p3.fr

GLOSSAIRE

Advanced Virgo / LIGO : la version améliorée des détecteurs Virgo / LIGO. Ce sont des détecteurs de deuxième génération, ayant la sensibilité nécessaire pour détecter des ondes gravitationnelles. Advanced LIGO a redémarré en septembre 2015, et Advanced Virgo devrait le rejoindre à l'automne 2016.

EGO : European Gravitational Observatory, un consortium financé principalement par le CNRS et l'INFN, avec une contribution de Nikhef, qui héberge le détecteur Virgo.

GEO600 : l'interféromètre germano-britannique GEO600, situé près d'Hanovre, est financé par la *Max Planck Gesellschaft* (Allemagne) et le *Science and Technology Facilities Council* (Royaume-Uni). Ce détecteur et la collaboration scientifique qui l'entourent (GEO) font partie de la collaboration scientifique LIGO.

INFN : l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Italie), l'une des deux principales agences de financement de Virgo, avec le CNRS.

LIGO : Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. Cet observatoire est composé de deux interféromètres identiques, situés aux Etats-Unis, gérés par le laboratoire LIGO. Autour de ces instruments s'est constituée la collaboration scientifique LIGO, LSC (*LIGO Scientific Collaboration*).

eLISA : *Evolved Laser Interferometer Space Antenna*, une future mission spatiale L3 du programme « Cosmic vision » de l'agence spatiale européenne (ESA), avec la participation de l'agence spatiale américaine (NASA), qui a pour but de faire de l'astronomie gravitationnelle de manière complémentaire à Virgo et LIGO.

LSC : *LIGO Scientific Collaboration*, un groupe de plus de 1000 scientifiques provenant d'universités de tous les États-Unis et de 14 autres pays qui mènent les travaux de recherche LIGO. Il englobe les membres de GEO.

LVC : *LIGO-Virgo Consortium*, qui regroupe les collaborations LIGO et Virgo pour analyser en commun les données collectées par les deux instruments. Les scientifiques des deux collaborations signent ensemble les découvertes.

Nikhef : *Nationaal instituut voor subatomaire fysica*, un institut des Pays-Bas entré dans la collaboration Virgo en 2006, et qui contribue au financement d'Advanced Virgo.

Virgo : le détecteur Virgo situé près de Pise. Les chercheurs travaillant sur cet instrument sont regroupés au sein de la collaboration Virgo, un groupe de plus de 250 physiciens et ingénieurs appartenant à des laboratoires du CNRS, de l'INFN (Italie), de Nikhef (Pays-Bas), à l'institut Wigner en Hongrie et au groupe POLGRAW en Pologne.