

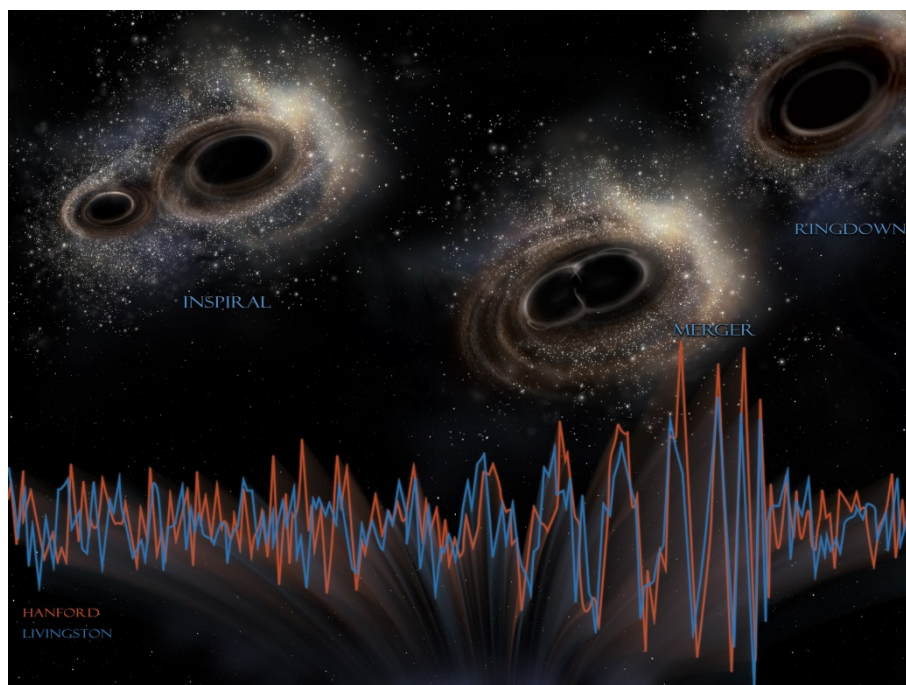
# Premières détections directes des ondes gravitationnelles

V4, 12/09/2016

Contact : Nicolas ARNAUD ([narnaud@lal.in2p3.fr](mailto:narnaud@lal.in2p3.fr))

## Introduction

Le 11 février 2016, les collaborations internationales LIGO et Virgo ont annoncé la première détection directe des ondes gravitationnelles. L'événement GW150914<sup>1</sup> a été enregistré le 14 septembre 2015 par les deux détecteurs « LIGO Avancés ». Clin d'œil du hasard, ceux-ci étaient en prise de données depuis quelques jours à peine après une campagne d'amélioration des instruments qui avait duré plusieurs années. Le signal GW150914 est très faible et dure à peine quelques dixième de seconde. Pourtant, il a été identifié comme prometteur en quelques minutes par des algorithmes qui analysent les données en direct. Et l'analyse précise de ces données, qui a pris cinq mois, a confirmé que ce signal vient bien du cosmos.



Vue d'artiste montrant trois étapes de la fusion des deux trous noirs de l'événement GW150914 ainsi que les signaux (courbes rouge et bleue ; durée : environ trois dixièmes de seconde) enregistrés par les deux détecteurs LIGO Avancés. Ils ont été superposés pour mieux faire ressortir leurs ressemblances

© LIGO/Aurore Simonnet

Il y a environ 1,3 milliards d'années, deux trous noirs d'une trentaine de masses solaires chacun ont fusionné en un seul trou noir. Cet événement, le plus puissant jamais détecté (l'équivalent de trois masses solaires a été converti en énergie au moment de la fusion), a produit un signal d'onde gravitationnelle qui s'est propagé dans l'espace-temps à la vitesse de la lumière, tout en s'atténuant. Les détecteurs LIGO Avancés, les instruments scientifiques les plus sensibles au monde, ont capté cette perturbation infime de l'espace-temps : une variation relative de longueur de l'ordre de quelques  $10^{-18}$ , soit pour un détecteur de 4 km de long une

<sup>1</sup> Acronyme mélangeant les initiales de la traduction anglaise d'ondes gravitationnelles, « gravitational waves », et la convention d'écriture américaine pour la date de la détection, année – mois – jour : 14/09/2015 en français.

vibration de l'ordre du millième de la taille d'un nucléon. Des algorithmes informatiques très complexes ont identifié ce signal mélangé au bruit de mesure. Ce processus a été facilité par les progrès théoriques qui ont eu lieu en parallèle des avancées expérimentales. Les experts en calculs analytiques et en relativité générale numérique avaient réussi à prédire très précisément le signal d'ondes gravitationnelles émis lors d'une telle fusion de trous noirs.

Ce résultat est très important à plusieurs titres.

- D'abord, c'est une nouvelle vérification d'une prédiction de la relativité générale, vieille d'un siècle – Einstein introduit le concept d'ondes gravitationnelles dès 1916, quelques mois après la publication de la théorie. Auparavant, l'étude sur trois décennies (~1975 – ~2005) du pulsar binaire 1913+16 (un système de deux étoiles à neutrons dont l'une, un pulsar, envoie avec une régularité de métronome un signal électromagnétique vers la Terre) avait mis en évidence un phénomène<sup>2</sup> qui s'expliquait très bien en supposant une émission d'ondes gravitationnelles telle que prédite par la relativité générale. Mais il s'agissait d'une preuve indirecte (certes très convaincante) de l'existence des ondes gravitationnelles. Avec le signal GW150914, on a pour la première fois une détection directe : une onde gravitationnelle a été « vue » traversant des détecteurs sur Terre.
- De plus, c'est aussi la première preuve directe de l'existence de trous noirs (jusqu'à présent on détectait les trous noirs soit par leurs effets gravitationnels, par exemple Sagittarius A\* au centre de la Voie Lactée, soit parce qu'ils accrètent la matière d'un astre compagnon : systèmes binaires X), de l'existence de systèmes binaires de trous noirs et de l'existence de trous noirs dans cette gamme de masse.

Ce premier signal a été suivi d'un second, GW151226, enregistré le 26 décembre 2015 et rendu public le 15 juin 2016. Il s'agit également d'une fusion de deux trous noirs, plus légers que ceux de GW150914. Ce signal est donc plus faible (les deux sources sont à peu près à la même distance) mais il dure plus longtemps dans les détecteurs, ce qui a permis de le mettre en évidence.

Depuis 2007, les collaborations LIGO et Virgo (France, Italie, Pays-Bas, Pologne, Hongrie et Espagne) sont liées par des accords d'échange des données enregistrées par les différents détecteurs. Ces données sont ensuite analysées par les deux collaborations et les résultats publiés dans des articles scientifiques communs. Cette organisation, différente de celle adoptée par exemple en physique des particules<sup>3</sup>, s'explique par le fait que les détecteurs d'ondes gravitationnelles sont tous sensibles aux mêmes signaux en provenance du cosmos. De plus, la détection et l'analyse d'un signal d'onde gravitationnelle transitoire (c'est-à-dire d'une durée finie), demandent plusieurs détecteurs : à la fois pour démontrer que le signal est réel et pour obtenir des informations sur le phénomène qui l'a produit. Par exemple, il faut au moins trois détecteurs pour localiser la position de la source dans le ciel. C'est pour cela que la collaboration Virgo est cosignataire de la découverte alors que son détecteur (Virgo Avancé, situé à Cascina près de Pise en Italie) est encore en phase d'amélioration. D'ici quelques mois, Virgo devrait rejoindre LIGO pour de nouvelles prises de données.

D'ici la fin de la décennie, les LIGO et Virgo seront rejoints par un quatrième instrument, KAGRA au Japon. Puis, dans les années suivantes, il est possible qu'un troisième détecteur LIGO soit installé en Inde. Le réseau mondial d'interféromètres compterait alors cinq

---

<sup>2</sup> L'avance du périastre du système.

<sup>3</sup> Où chaque expérience produit d'abord ses propres résultats, avant éventuellement de les combiner avec d'autres.

instruments, ce qui en ferait l'équivalent d'un « télescope à ondes gravitationnelles » qui ouvrirait vraiment une nouvelle fenêtre sur l'Univers<sup>4</sup>.



Vue aérienne (novembre 2015) du détecteur Virgo, installé en Italie près de Pise.  
© N. Baldocchi/The Virgo Collaboration.

Le CNRS est l'un des deux organismes de recherche à l'origine du projet Virgo – avec l'INFN italien. Six laboratoires français sont membres de la collaboration Virgo.

- le laboratoire Astroparticule et cosmologie (CNRS/Université Paris Diderot/CEA/Observatoire de Paris), à Paris : [http://www.apc.univ-paris7.fr/APC\\_CS/experiences/virgo](http://www.apc.univ-paris7.fr/APC_CS/experiences/virgo)
- le laboratoire Astrophysique relativiste, théories, expériences, métrologie, instrumentation, signaux (CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Nice Sophia Antipolis), à Nice : <https://artemis.oca.eu/?lang=fr>
- le Laboratoire de l'accélérateur linéaire (CNRS/Université Paris-Sud), à Orsay : <https://groups.lal.in2p3.fr/virgo>
- le Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (CNRS/Université Savoie Mont Blanc), à Annecy-le-Vieux : <http://lapp.in2p3.fr/spip.php?rubrique161>
- le Laboratoire Kastler Brossel (CNRS/UPMC/ENS/Collège de France), à Paris : <http://www.lkb.upmc.fr/blog/virgo/>
- le Laboratoire des matériaux avancés (CNRS), à Villeurbanne : <http://lma.in2p3.fr/Activites/virgo.htm>

Les activités de ces équipes sont multiples :

- Laser et système d'injection
- Optiques et miroirs

---

<sup>4</sup> En plus des messagers à l'aide desquels nous observons déjà l'Univers : l'ensemble du spectre électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et gamma), les particules chargées (les « rayons cosmiques ») et des neutrinos.

- Ultravide
- Systèmes de contrôle du détecteur
- Acquisition des données
- Calibration, reconstruction et caractérisation des données
- Analyse des données
- Activités de recherche-développement pour améliorer les performances du détecteur.

Ces laboratoires sont en général ouverts au public pendant la Fête de la Science. Le site de Virgo peut également se visiter, sur inscription préalable (<http://public.virgo-gw.eu/visit-us>, page en anglais) et en tenant compte des contraintes liées aux activités scientifiques.

## Ressources

### Les ondes gravitationnelles

- PhD Comics, « Expliquez-moi les ondes gravitationnelles » : une bande dessinée (traduite en français) et une vidéo associée (avec sous-titres en français) <http://www.phdcomics.com/comics.php?f=1853#french>
- Minute Physics : les ondes gravitationnelles expliquées avec des dessins (en anglais) <https://www.youtube.com/watch?v=YHS9g72npqA>

### Virgo et le détecteur Virgo Avancé

- Site internet de la collaboration : <http://www.virgo-gw.eu>
- Site internet public, en français : <http://public.virgo-gw.eu/language/fr>
- Site internet de l'European Gravitational Observatory (EGO) sur le site duquel est installée l'expérience Virgo (en anglais) : <http://www.ego-gw.it>
- Une vidéo en français sur le détecteur et la première détection : <https://lejournald.cnrs.fr/videos/ondes-gravitationnelles-les-detecteurs-de-lextreme>
- Dossier de presse du CNRS, préparé pour l'annonce de la première détection : [http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/dp\\_virgo\\_og\\_ok\\_web.pdf](http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/dp_virgo_og_ok_web.pdf)
- Infographie sur Virgo : <https://owncloud.ego-gw.it/index.php/s/cS1dh9FL11tkOTb>
- Infographie sur le réseau mondial de détecteurs d'ondes gravitationnelles : <https://owncloud.ego-gw.it/index.php/s/bgjj8Ye3kFR9sSm>
- Une animation montrant le principe de fonctionnement du détecteur Virgo Avancé : <https://www.youtube.com/watch?v=6raomYII9P4> (sous-titrée en français).
- Animation montrant le principe de fonctionnement des détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles : [https://www.youtube.com/watch?v=tQ\\_telUb3tE](https://www.youtube.com/watch?v=tQ_telUb3tE)

### LIGO

- Ressources pédagogiques : <http://www.ligo.org/public.php> (Collaboration Scientifique LIGO) et <https://www.ligo.caltech.edu/page/educational-resources> (Observatoires LIGO)

### Les détections GW150914 et GW151226

- Version française du résumé scientifique de l'article de la découverte GW150914 : <http://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/science-summary-french.pdf>
- Version audio du signal GW150914 (la bande de fréquence dans laquelle les détecteurs d'ondes gravitationnelles sont sensibles correspond à des fréquences audibles : on peut donc transformer un signal d'onde gravitationnelle en son) : <https://www.youtube.com/watch?v=QyDcTbR-kEA>

- Simulation de la fusion des deux trous noirs GW150914 et de l'émission d'ondes gravitationnelles associée : <https://www.youtube.com/watch?v=flvFpFUzEXY>
- Effet, très exagéré, du passage du signal d'ondes gravitationnelles GW150914 sur Terre : [https://www.youtube.com/watch?v=WgE6lb\\_i78A](https://www.youtube.com/watch?v=WgE6lb_i78A)
- Version française du résumé scientifique de l'article de la découverte GW151226 : <http://www.ligo.org/science/Publication-GW151226/translations/french.pdf>
- Simulation de la fusion des deux trous noirs GW151226 et de l'émission d'ondes gravitationnelles associée : <https://www.youtube.com/watch?v=3pK5oenm5gw>
- Une infographie extraite des « Défis du CEA » d'avril 2016 : <http://portail.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/defis-du-cea-ondes-gravitationnelles.pdf>

### Trous noirs

- Un recensement des trous noirs stellaires connus et de leurs propriétés : <https://gravity.astro.cf.ac.uk/plotgw/bhbubble.html?lang=fr>
- Repérer à l'oreille (!) des signaux de trous noirs noyés dans du bruit de mesure : <http://www.blackholehunter.org> (site partiellement traduit en français); c'est une façon d'introduire l'une des principales techniques d'analyse des données utilisée pour chercher un signal dont la forme d'onde est connue : le filtrage adapté

### Exemples de présentation faites dans les lycées

- Lycée Michelet à Vanves, classe de terminale, mai 2016 : <https://indico.lal.in2p3.fr/event/3290/material/slides>
- Classes préparatoires MPSI, Saint Brieuc, mai 2016 : <https://indico.lal.in2p3.fr/event/3233/material/slides>

### Pages Wikipédia

- Pulsar binaire PSRB 1913+16 : [https://fr.wikipedia.org/wiki/PSR\\_B1913%2B16](https://fr.wikipedia.org/wiki/PSR_B1913%2B16)

### Divers

- Une application montrant l'effet du passage d'une onde gravitationnelle sur un détecteur (en anglais) : <https://www.laserlabs.org/stretchandsquash.php>
- Une application déformant des photos pour montrer l'effet de distorsion des rayons lumineux produit par le champ gravitationnel très intense d'un trou noir (en anglais) : <https://www.laserlabs.org/pocketblackhole.php>