

## LES ONDES GRAVITATIONNELLES DETECTEES 100 ANS APRES LA PREDICTION D'EINSTEIN

### **LIGO ouvre une nouvelle fenêtre sur l'Univers en observant les ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de trous noirs - Contributions clés des chercheurs de la Société Max Planck et de la Leibniz Universität Hannover**

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.

Des chercheurs de l'Institut Max Planck de physique gravitationnelle (Institut Albert-Einstein; AEI) à Hanovre et à Potsdam, en Allemagne, et de l'Institut de physique gravitationnelle à la Leibniz Universität Hannover (LUH) ont apporté des contributions essentielles à la découverte dans plusieurs domaines clés: le développement et l'opération de détecteurs extrêmement sensibles à la pointe de la physique, la mise au point de méthodes efficaces d'analyse de données exécutées sur des clusters informatiques puissants, et la construction de modèles de formes d'ondes de haute précision pour détecter le signal et en extraire des informations astrophysiques.

**Techniques pour les détecteurs avancés avec GEO600**

[www.aei.mpg.de/gwdetection](http://www.aei.mpg.de/gwdetection)

La collaboration GEO rassemble des chercheurs de l'institut Max Planck et de la Leibniz Universität ainsi que des collègues du Royaume Uni. Ils ont conçu et ils opèrent le détecteur d'ondes gravitationnelles GEO600 près de Hanovre en Allemagne. Celui-ci est utilisé comme un laboratoire d'essai pour le développement de techniques de détection avancées. La plupart des technologies clés qui ont contribué à la sensibilité sans précédent de Advanced LIGO (aLIGO) et ont permis la découverte ont été développées et testées au sein de la collaboration GEO. Le recyclage du signal (signal recycling), l'extraction des bandes latérales de résonance (resonant sideband extraction), et les suspensions de miroir monolithiques en constituent plusieurs exemples. Des chercheurs de l'AEI ainsi que du Laser Zentrum Hannover ont également développé et installé les lasers de haute puissance de aLIGO qui sont cruciaux pour les mesures de haute précision.

"Les scientifiques ont été à la recherche des ondes gravitationnelles pendant des décennies, mais nous n'avons été que tout récemment en mesure de parfaire les technologies incroyablement précises nécessaires pour déceler ces échos très, très faibles qui traversent l'Univers," a déclaré le Professeur Karsten Danzmann, directeur à l'institut Max Planck de physique gravitationnelle à Hanovre et directeur de l'Institut de physique gravitationnelle à la Leibniz Universität de Hanovre. "Cette découverte n'aurait pas été possible sans les efforts et les technologies développées par l'institut Max Planck, la Leibniz Universität, et les scientifiques britanniques travaillant dans la collaboration GEO."

#### **Puissance de calcul et méthodes d'analyse pour la découverte**

Des scientifiques du Max Planck ont développé et mis en œuvre des méthodes d'analyse de données sophistiquées et optimisées pour rechercher les signaux très faibles que sont les ondes gravitationnelles dans les flux de données des détecteurs aLIGO et ont mené à bien la majeure partie de l'analyse finale. En outre, la majorité des ressources de calcul pour la découverte et l'analyse des données de aLIGO ont été fournies par Atlas, le superordinateur conçu pour l'analyse des données des ondes gravitationnelles le plus puissant au monde et opéré par l'AEI. Atlas a fourni plus de 24 millions d'heure-processeur-équivalent pour l'analyse des données de aLIGO.

"Je suis fier que les deux premiers scientifiques à avoir eu sous leurs yeux le signal appartiennent à l'institut Max Planck de physique gravitationnelle et que notre institut ait joué un rôle de premier plan dans cette découverte passionnante», explique le professeur Bruce Allen, directeur à l'Institut Max Planck pour la Physique gravitationnelle à Hanovre. "Einstein lui-même croyait que les ondes gravitationnelles étaient trop faibles pour être détectées, et il ne croyait pas à l'existence des trous noirs. Mais je ne pense pas que cette erreur l'aurait dérangé!"

#### **Des modèles précis d'ondes gravitationnelles ouvrent la voie à l'observation de la fusion de trous noirs**

Des chercheurs du Max Planck ont développé des modèles extrêmement précis des ondes gravitationnelles que les trous noirs génèreraient au cours des dernières orbites précédant leur collision et de leur fusion finale. Ces modèles de forme d'onde ont été implémentés et utilisés dans le cadre de la recherche de coalescences de systèmes binaires dans les données de LIGO. C'est cette recherche qui a observé la fusion de trous noirs désormais connue sous le nom GW150914 avec un niveau de confiance dépassant les 5 déviations standard. Des scientifiques du Max Planck ont également utilisé ces mêmes modèles de forme d'onde pour déduire les paramètres astrophysiques de la source, tels que la masse et le moment cinétique intrinsèque des deux trous noirs, l'orientation du système et sa distance à la Terre ainsi que la masse et le moment cinétique de l'énorme trou noir final résultant de la fusion. Ces modèles de forme d'onde ont également été utilisés pour tester dans quelle mesure GW150914 est compatible avec les prédictions de la Relativité Générale.

[www.aei.mpg.de/gwdetection](http://www.aei.mpg.de/gwdetection)

"Nous avons passé des années à modéliser l'émission d'ondes gravitationnelles par l'un des événements les plus extrêmes de l'Univers: un couple de trous noirs massifs orbitant l'un autour de l'autre puis fusionnant. Et c'est exactement le type de signal que nous avons détecté! ", explique le professeur Alessandra Buonanno, directeur à l'Institut Max Planck de physique gravitationnelle à Potsdam. "Il est impressionnant de voir à quel point la théorie de la relativité d'Einstein décrit la réalité. GW150914 nous donne une occasion remarquable de voir comment la gravité fonctionne dans des conditions parmi les plus extrêmes possibles".

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, un groupe de plus de 250 physiciens et ingénieurs appartenant à 18 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 au *Nationaal instituut voor subatomaire fysica (Nikhef)* aux Pays-Bas. Les autres laboratoires sont l'institut Wigner en Hongrie, le groupe POLGRAW en Pologne, et EGO (*European Gravitational Observatory*), 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.

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 Etats-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.