



LIGO  
Scientific  
Collaboration



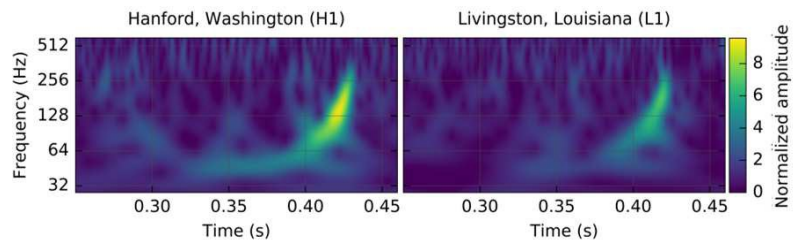
## OBSERVATION DES ONDES GRAVITATIONNELLES EMISES LORS DE LA COALESCENCE D'UN SYSTEME BINAIRE DE TROUS NOIRS

La théorie de la relativité générale d'Einstein, publiée il y a un siècle, a été décrite par le physicien Max Born comme « le plus grand exploit de la pensée humaine quant à la Nature ». Dans cet article, nous présentons deux avancées scientifiques majeures en lien avec des prédictions centrales de la théorie d'Einstein : 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 (figure 1, identifié par l'acronyme **GW150914**), a eu lieu dans une galaxie lointaine située à plus d'un milliard d'années-lumière de la Terre. Il a été observé le 14 septembre 2015 par les deux détecteurs de « l'Observatoire des ondes gravitationnelles par interférométrie laser » (**Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO**), probablement les instruments scientifiques les plus sensibles jamais construits. Les scientifiques 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

### 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.



**Figure 1.** 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.

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 émis par les deux trous noirs – à mesure qu'ils se rapprochent et jusqu'à leur fusion pour former un trou noir unique plus massif. 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.

Visitez nos sites internet :

<http://www.ligo.org>

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

Sur les réseaux sociaux :

**#ondesgravitationnelles**

**#AdvancedLIGO**

**@LIGO**

**#advirgo**

**@ego\_virgo**

## LES DÉTECTEURS LIGO

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.

Un interféromètre comme LIGO 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 long, 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 changent. C'est pour cela qu'on appelle « interféromètres » les détecteurs LIGO.

La différence de longueurs entre les deux bras est proportionnelle à l'**amplitude de l'onde gravitationnelle** incidente, et ce nombre est incroyablement petit. Pour une onde gravitationnelle détectable typique, on s'attend à ce qu'elle crée une variation de longueur de l'ordre d'un cent-millionième de la taille d'un atome ! Cependant, les détecteurs LIGO sont si sensibles qu'ils peuvent mesurer des variations aussi faibles.

La figure 2 montre un schéma simplifié de l'un des détecteurs avancés LIGO.

Pour détecter avec succès une onde gravitationnelle comme l'événement GW150914, les détecteurs LIGO 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 il existe deux détecteurs Advanced LIGO. En effet, cette configuration permet de distinguer les ondes gravitationnelles d'effets locaux, instrumentaux ou environnementaux : seule un vrai signal gravitationnel peut apparaître dans les deux détecteurs – les deux signaux sont séparés par quelques millièmes de seconde pour prendre en compte le temps mis par l'onde gravitationnelle pour atteindre successivement les deux sites.

L'encart b) de la figure 2 montre comment le bruit instrumental des détecteurs LIGO varie en fonction de la fréquence. Ce bruit est minimal dans une « région idéale » située autour de quelques centaines de hertz, mais augmente rapidement à la fois aux basses et hautes fréquences. On remarque également la présence d'un grand nombre de pics étroits où le bruit instrumental est particulièrement important, par exemple à cause de vibrations des fibres de verre qui suspendent les miroirs et les masses test dans chaque interféromètre.

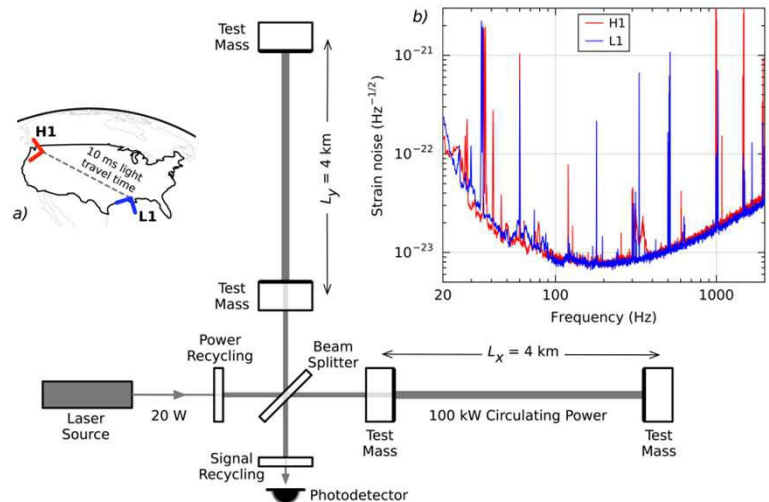
Atteindre le niveau de sensibilité record d'Advanced LIGO a nécessité l'amélioration de presque tous les composants des détecteurs LIGO initiaux. En particulier :

- L'augmentation de la puissance du laser, pour réduire le bruit haute-fréquence
- La refonte des cavités de recyclage pour tenir compte de la distribution spatiale du laser
- Des miroirs plus grands et plus lourds pour diminuer leurs mouvements aléatoires
- La suspension des miroirs par des fibres de verre pour diminuer leur bruit thermique
- Une suspension comportant quatre étages de pendules pour améliorer l'isolation sismique
- L'utilisation d'une compensation active pour réduire l'impact des mouvements du sol

Vous pouvez en apprendre plus sur les technologies remarquables utilisées par les détecteurs LIGO avancés sur la page :

<http://tinyurl.com/ALIGO-upgrades-pdf>

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. 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 (en anglais) : <http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>.



**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 dans 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 GW150914 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

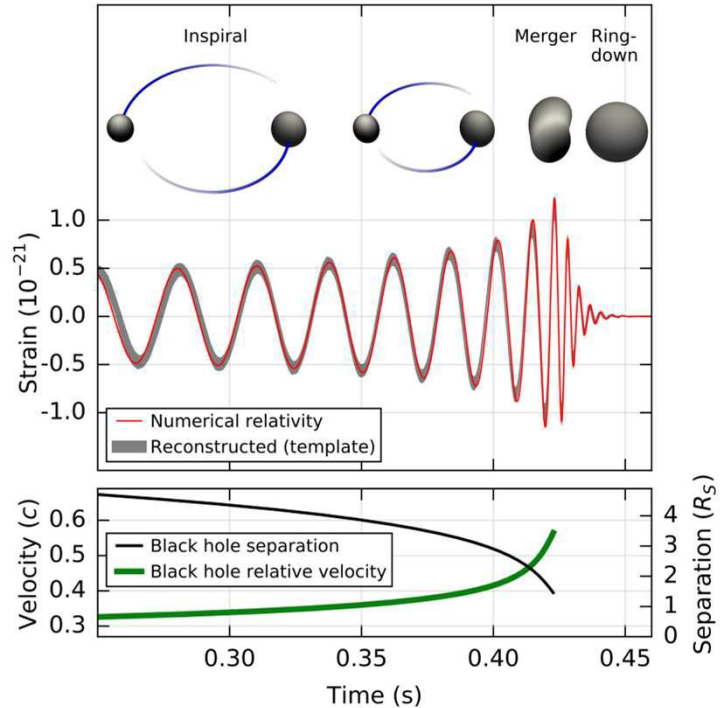
Le 14 septembre 2015 à 11h 50 minutes et 45 secondes heure de Paris, les détecteurs LIGO de Hanford et de Livingston ont détecté tous les deux le signal GW150914. Il a d'abord été découvert par l'une des méthodes de recherche d'ondes gravitationnelles *temps-réel*, qui sont conçues pour analyser très 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 celle 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. Au milieu de la figure, on peut voir le signal reconstruit dans le détecteur Hanford. Il convient de noter l'accord remarquable entre ce signal (courbe grise) et une forme d'onde de coalescence de trous noirs (en rouge), calculée en relativité générale et compatible avec les données.

Des représentations de trois stades de l'événement sont représentées dans la partie haute de la figure : la phase « spirale » (« **inspiral** ») lorsque les deux trous noirs se rapprochent ; la fusion (« **merger** ») lorsqu'ils entrent en collision ; enfin, la phase de désexcitation (« **ringdown** ») où le trou noir unique juste formé oscille brièvement avant de se stabiliser.

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.



**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 »), la fusion (« merger ») et la désexcitation (« ringdown »). 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.

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**.

## 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 l'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** que 150 Hz.

## 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 le sentiment 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 les bavardages qui règnent 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. Nous avons introduit des délais artificiels

entre les données de H1 et de L1 pour les désynchroniser et créer ainsi un lot de données bien plus conséquent dans lequel on a cherché des signaux apparents aussi forts (ou plus forts) que ceux associés à l'événement GW150914. En utilisant uniquement des décalages temporels supérieurs à 10 ms (le temps mis par la lumière pour voyager entre les détecteurs) nous étions sûrs que ce lot de données artificiel ne pouvait pas contenir de vraies ondes gravitationnelles, mais seulement des coïncidences fortuites entre des bruits instrumentaux ou environnementaux. On peut ainsi mesurer la fréquence avec laquelle pourrait se produire une fluctuation du bruit ressemblant à l'événement GW150914. Cette analyse nous donne le **taux de fausses alarmes**, c'est-à-dire la fréquence à laquelle on risque de considérer comme réel, par erreur (« fausse alarme ») un événement aussi fort, mais cette fois-ci dû à du bruit.

La figure 4 montre les résultats de l'analyse statistique pour l'une des recherches effectuées sur les données des détecteurs. Les courbes en noir et en violet représentent le « bruit de fond » (calculé avec des hypothèses légèrement différentes dans les deux cas) : le nombre « d'événements », dus à des bruits coïncidents dans les deux instruments, attendus en fonction de leur force. Les carrés orange montrent la distribution d'événements effectivement observée dans les données, sans aucun décalage temporel. Le message principal fourni par cette figure est combien l'événement observé GW150914 est loin du bruit de fond. Cela signifie qu'un événement de bruit ressemblant à GW150914 est *extrêmement rare* – effectivement, on attend moins d'un événement de ce type en 200 000 ans de données ! Ce taux de fausses alarmes peut être converti en un nombre de « sigmas » (notés par la lettre grecque «  $\sigma$  »), une unité utilisée couramment pour mesurer la signification statistique d'une découverte annoncée. Eh bien cette analyse identifie l'événement GW150914 comme 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, KAGRA au Japon et peut-être un 3<sup>ème</sup> 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 !

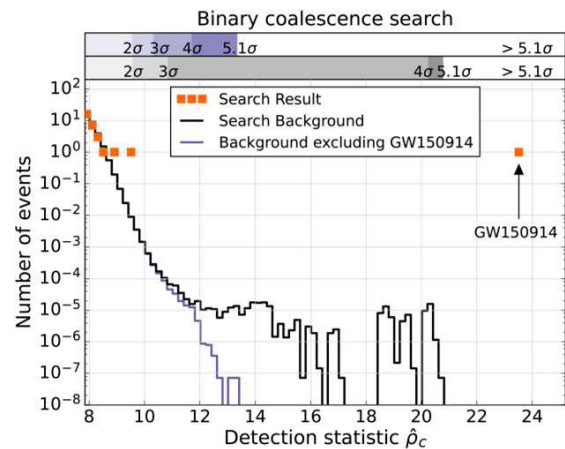


Figure 4. Les résultats de la recherche de coalescence de systèmes binaires permettent de quantifier la rareté de l'événement GW150914 quand on le compare aux « faux événements » dus à des fluctuations du bruit. Cette analyse a conclu qu'un événement de bruit ressemblant à GW150914 serait extrêmement rare – moins d'une occurrence en environ 200 000 ans de données – un taux qui correspond à une détection significative à plus de 5 « sigmas ».

### POUR EN SAVOIR PLUS

Page d'accueil de la collaboration scientifique LIGO (inclut un lien vers l'article publié dans *Physical Review Letters*): <http://www.ligo.org>  
Page d'accueil d'Advanced Virgo : <http://public.virgo-gw.eu/language/en/>

Quelques-uns des articles complémentaires de la publication principale:

Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions  
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500229/public/main/>

GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO  
Data associated with GW150914: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500269/public/main>

Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914  
<https://dcc.ligo.org/P1500262/public/main/>

Tests of general relativity with GW150914  
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500213/public/main/>

The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914  
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500217/public/main/>

Properties of the binary black hole merger GW150914  
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500218/public/main/>

Le Centre LIGO pour la science ouverte (accès aux données GW150914) :  
<https://losc.ligo.org/about/>