

Les ondes gravitationnelles, cent ans après Einstein

Luc Blanchet (blanchet@iap.fr)

Institut d'Astrophysique de Paris, UMR 7095 du CNRS, 98 bis boulevard Arago, 75014 Paris

La collaboration LIGO-Virgo a détecté directement sur Terre le passage d'ondes gravitationnelles émises lors de la collision et de la fusion de deux trous noirs massifs à une distance astronomique.

Cette découverte majeure ouvre la voie à l'astronomie gravitationnelle, qui devrait révolutionner notre connaissance de la structure de l'Univers aux grandes échelles, avec notamment les mécanismes de formation des trous noirs et leur rôle dans l'évolution de l'Univers, et l'émergence probable d'une astronomie « multimessagère » conjointe avec le rayonnement électromagnétique.

On espère aussi une meilleure appréhension de la place de la théorie classique par rapport aux autres interactions fondamentales (décrites par la théorie quantique des champs).

Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?

Les ondes gravitationnelles sont prédites par toute théorie de la gravitation « relativiste », c'est-à-dire en accord avec les principes de la relativité restreinte d'Einstein, Lorentz et Poincaré de 1905. Ainsi, dès 1906, dans le cadre de sa théorie relativiste de la gravitation, Poincaré avait proposé le concept d'« ondes gravifiques ». Mais c'est bien sûr à Einstein, dans son article de 1916, soit quelques mois après la publication de la relativité générale en novembre 1915, que revient la formulation moderne des ondes gravitationnelles.

Dans le cadre de la relativité générale, une onde gravitationnelle est une déformation de la géométrie de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière (figure de la page 7). Elle est produite dans des zones de champs gravitationnels intenses, par des sources formées d'énormes quantités de matière se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière. C'est le mouvement cohérent d'ensemble de la matière qui engendre l'onde gravitationnelle, au contraire du rayonnement électromagnétique qui est en général produit par la superposition des émissions individuelles des atomes ou molécules constituant la source. À cet égard, il existe une analogie profonde entre une onde gravitationnelle et une onde sonore. Comme pour l'onde sonore, mais au contraire d'une onde électromagnétique, l'onde gravitationnelle a une longueur d'onde très grande par rapport à la taille de sa source. Cette différence essentielle avec les ondes électromagnétiques rend l'astronomie des ondes gravitationnelles très distincte de l'astronomie traditionnelle.

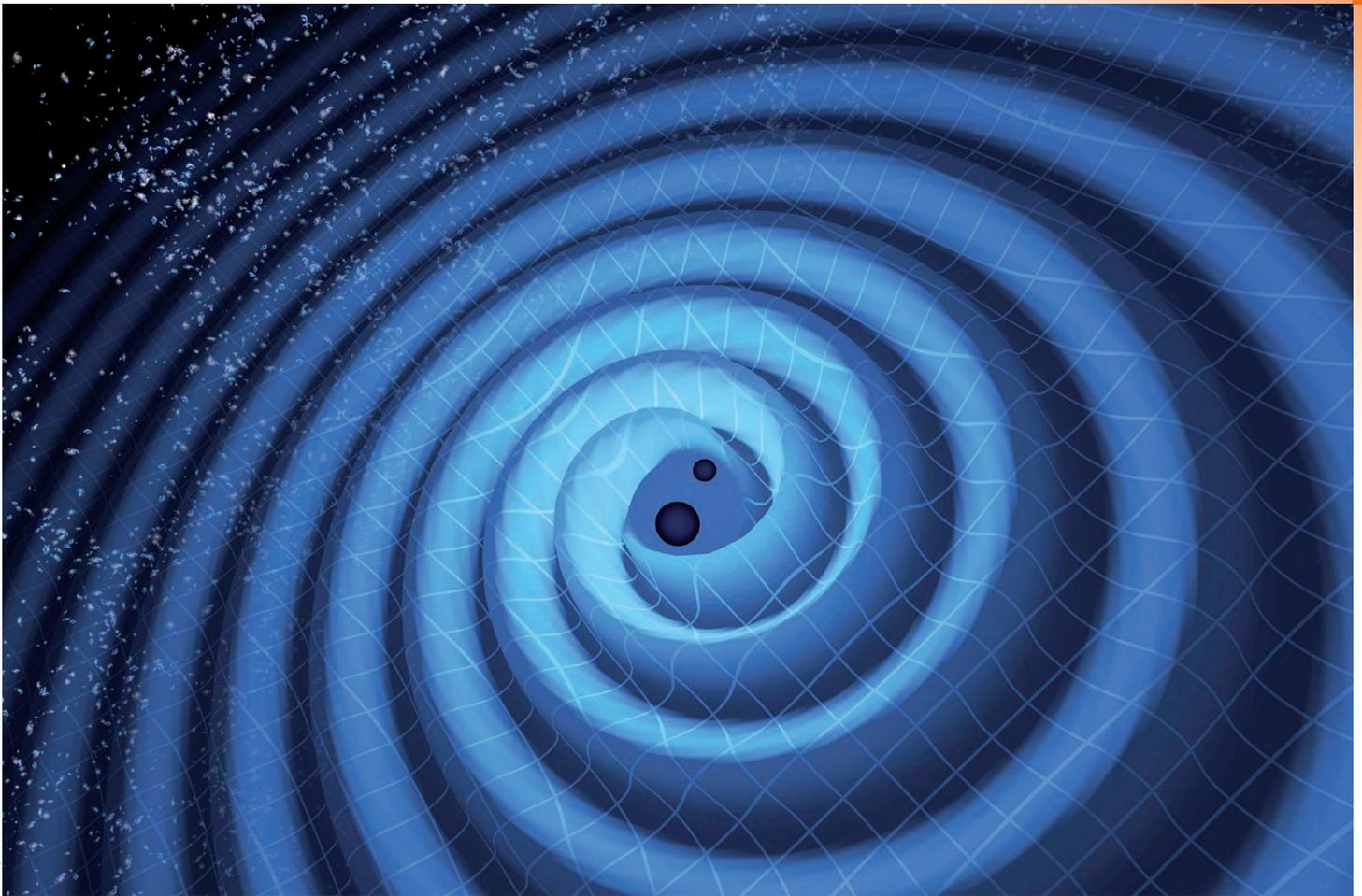
Alors que les ondes électromagnétiques sont aisément déviées et absorbées par la matière, le rayonnement gravitationnel interagit extrêmement faiblement avec la matière, et peut donc se propager sans

impunité sur de très grandes distances. En particulier, il n'existe pas d'« écran » à une onde gravitationnelle, car la masse, qui est la « charge » associée à la force gravitationnelle, est toujours positive. En revanche, le rayonnement gravitationnel subit comme la lumière des déviations par les champs gravitationnels, produits par exemple par les grandes structures dans l'Univers.

En principe, on peut associer à l'onde gravitationnelle une particule qu'on appelle le graviton, de la même façon que le photon est associé à l'onde électromagnétique. Comme le photon, le graviton a une masse nulle et deux états de polarisation. Par contre il a une *spin* égal à deux, double de celui du photon, ce qui est lié à la nature tensorielle du champ gravitationnel en relativité générale. Si on essaye d'imaginer des ordres de grandeur pour les probabilités de processus quantiques d'émission ou d'absorption de gravitons, on trouve qu'elles sont extrêmement faibles, et il n'y a guère d'espoir que l'on puisse un jour observer une transition « quantique gravitationnelle ». Les ondes gravitationnelles que l'on détecte sont des ondes extrêmement « classiques ». De plus, il n'existe malheureusement pas à l'heure actuelle de théorie quantique satisfaisante de la gravitation, qui permettrait d'unifier la relativité générale et les autres interactions connues.

La réalité physique des ondes gravitationnelles

Dans son article de 1918 [1], Einstein calcule le flux d'énergie total émis sous forme d'ondes gravitationnelles par un système de matière, dans l'approximation dominante où l'on néglige les corrections relativistes, et il obtient ce qu'on appelle aujourd'hui la formule du quadrupôle d'Einstein^(a). Une amélioration cruciale de cette formule a été apportée par Landau et Lifchitz dans leur traité de *Théorie des champs*



© L. Pyle / IJGO

Impression d'artiste montrant les ondes gravitationnelles se propageant dans l'espace-temps lorsque deux trous noirs sont proches de la collision.

de 1947, où ils montrent que la formule est valable dans le cas d'un système de matière autogravitant, c'est-à-dire dont les mouvements sont engendrés par la force gravitationnelle elle-même. La formule s'applique donc à un système binaire d'étoiles en mouvement sous l'action de la force gravitationnelle newtonienne.

Avec les connaissances actuelles (notamment sur les méthodes d'approximation en relativité générale), la formule du quadrupôle nous paraît suffisante pour être convaincus de la réalité physique des ondes gravitationnelles. Mais un débat, apparaissant maintenant comme quelque peu surréaliste, a longtemps fait rage concernant leur existence. Eddington était connu pour être très sceptique (notamment dans son livre de 1922), et Einstein lui-même douta par deux fois du rayonnement gravitationnel avant de se rétracter. Il n'a en tout cas jamais envisagé la détection directe des ondes gravitationnelles, et il ne croyait pas non plus que les trous noirs existent réellement. Ainsi, dans son travail de 1937 avec Rosen, il conclut que « les ondes gravitationnelles n'existent pas, quoiqu'elles ont été considérées comme une certitude en première approximation » ;

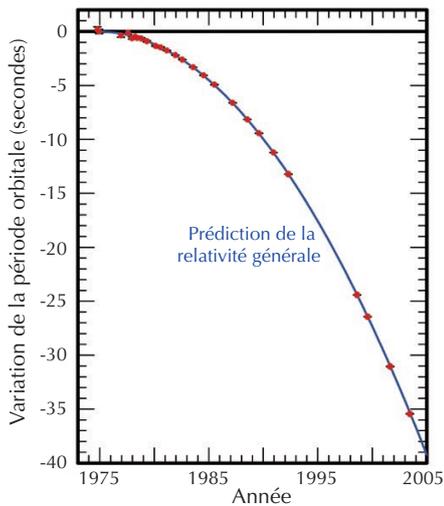
mais ce travail était entaché d'une erreur, comme l'a fait remarquer le rapporteur de son article dans la *Physical Review*^(b). Finalement, dans les années 1960, des travaux de Bondi, Sachs et Penrose sur la structure du champ gravitationnel loin de la source, ont établi dans un cadre rigoureux que les ondes gravitationnelles transportent de l'énergie, extraite de la masse de la source et qui peut être déposée sur un détecteur. En principe, le débat était clos ! Mais même dans les années 1970, la confusion régnait encore sur le problème de la « réaction de rayonnement », à savoir quel est l'impact de l'émission du rayonnement gravitationnel sur le mouvement de la source.

La première mise en évidence des ondes gravitationnelles remonte à la fin des années 1960 avec des observations de systèmes d'étoiles binaires dits « cataclysmiques », constitués d'une étoile normale en fin de vie, en orbite autour d'une étoile compacte, en l'occurrence une naine blanche. L'étoile normale déverse de la matière sur l'étoile compacte, qui forme un disque d'accrétion où cette matière est chauffée par son mouvement dans le fort champ gravitationnel. On observe ces systèmes grâce aux rayonnements UV et X émis par le disque d'accrétion. Il se trouve que dans certains cas, pour des périodes orbitales très courtes, ces systèmes binaires ne sont stables que si l'on invoque une perte de moment cinétique orbital, et que seule l'émission d'ondes gravitationnelles permet d'emporter du moment cinétique et d'expliquer la stabilité observée. Il est assez ironique de penser que cette vérification fut faite par les astronomes (qui ne mettent pas en doute les ondes gravitationnelles) à une époque où certains physiciens relativistes étaient empêtrés dans leurs controverses !

La première preuve quantitativement précise des ondes gravitationnelles fut obtenue grâce au pulsar binaire découvert par Hulse et Taylor en 1974 [2]. Un pulsar est une étoile à neutrons fortement magnétisée et en rotation rapide, que l'on observe par les pulses radio émis le long de l'axe magnétique à chaque rotation en direction de la Terre. Ce pulsar est en orbite rapprochée autour d'une autre étoile à neutrons (mais qui est invisible). L'étude des instants successifs d'arrivée des pulses radio a permis de prouver que la période orbitale du pulsar autour de son compagnon décroît très légèrement au cours du temps, et que

La première preuve quantitativement précise des ondes gravitationnelles fut obtenue grâce au pulsar binaire découvert par Hulse et Taylor en 1974 [2]. Un pulsar est une étoile à neutrons fortement magnétisée et en rotation rapide, que l'on observe par les pulses radio émis le long de l'axe magnétique à chaque rotation en direction de la Terre. Ce pulsar est en orbite rapprochée autour d'une autre étoile à neutrons (mais qui est invisible). L'étude des instants successifs d'arrivée des pulses radio a permis de prouver que la période orbitale du pulsar autour de son compagnon décroît très légèrement au cours du temps, et que

»»»



1. Décroissance de la période orbitale du pulsar binaire PSR B1913+16 entre 1975 et 2005 [3].

Les observations (points rouges) sont parfaitement conformes à la prédiction de la relativité générale (ligne bleue) et de la formule du quadrupôle d'Einstein. Hulse et Taylor ont reçu le prix Nobel en 1993 « pour la découverte d'un nouveau type de pulsar, une découverte qui a ouvert de nouvelles possibilités pour l'étude de la gravitation ».



cet effet est dû à l'émission du rayonnement gravitationnel (fig. 1). Plusieurs autres pulsars binaires ont été découverts depuis, notamment un système pour lequel les deux étoiles à neutrons sont simultanément vues comme pulsars, et qui fournit maintenant le test le plus précis sur les ondes gravitationnelles. Mais, à ce jour, le Graal des observations de pulsars, qui serait un pulsar en orbite autour d'un trou noir, et permettrait des tests très intéressants de la relativité générale, n'a pas encore été découvert.

La détection directe des ondes gravitationnelles sur Terre

Le 14 septembre 2015, les détecteurs de la collaboration LIGO-Virgo (voir l'article expérimental associé, p. 14) observèrent le signal d'une onde gravitationnelle produite lors de la collision et la fusion de deux trous noirs [4]. L'onde arriva avec un écart d'environ 7 millisecondes sur les deux détecteurs (Hanford et Livingston aux États-Unis), qui sont séparés de 3000 km soit environ 10 millisecondes-lumière, ce qui donne une information sur la direction de la source du signal gravitationnel. Cet événement, appelé GW150914 (pour "Gravitational Wave" suivi de la date), s'est

produit à une distance d'environ 400 Mpc^(c), soit 1,3 milliards d'années-lumière. Donc l'onde gravitationnelle s'est propagée pendant 1,3 milliards d'années jusqu'à nous, où elle a provoqué sur Terre une infime vibration de l'espace-temps mise en évidence par les détecteurs. Le 26 décembre 2015 était détecté un autre événement de fusion de deux trous noirs (appelé GW151226), situé à une distance comparable, mais moins puissant car les trous noirs ont des masses plus faibles. Un troisième événement est suspecté, mais étant beaucoup plus faible n'a pas pu être confirmé ; il est appelé plus modestement LVT151012 (pour "LIGO-Virgo trigger"). La prouesse expérimentale de cette détection est expliquée dans l'article de N. Arnaud, p. 14. La figure 2 montre le signal observé de l'événement GW150914.

La première constatation que l'on peut faire sur l'interprétation physique du signal comme dû à une coalescence est que la formule du quadrupôle d'Einstein de 1918 marche ! D'après cette formule, l'évolution de la fréquence de l'onde gravitationnelle en fonction du temps dans la phase précédant la coalescence des deux trous noirs dépend d'une combinaison de leurs masses m_1 et m_2 , dite masse de "chirp" ou de « gazouillement », qui est donnée par $\mathcal{M} = \mu^{3/5} M^{2/5}$ où $M = m_1 + m_2$ est la masse totale et $\mu = m_1 m_2 / M$ est la masse réduite. Cette appellation imagée illustre le fait que la fréquence du signal, qui est égale à deux fois la fréquence orbitale, augmente au cours du temps (à cause de la perte d'énergie liée à l'émission de l'onde gravitationnelle), ce qui fait que le signal traduit en onde sonore ressemble au gazouillement d'un oiseau.

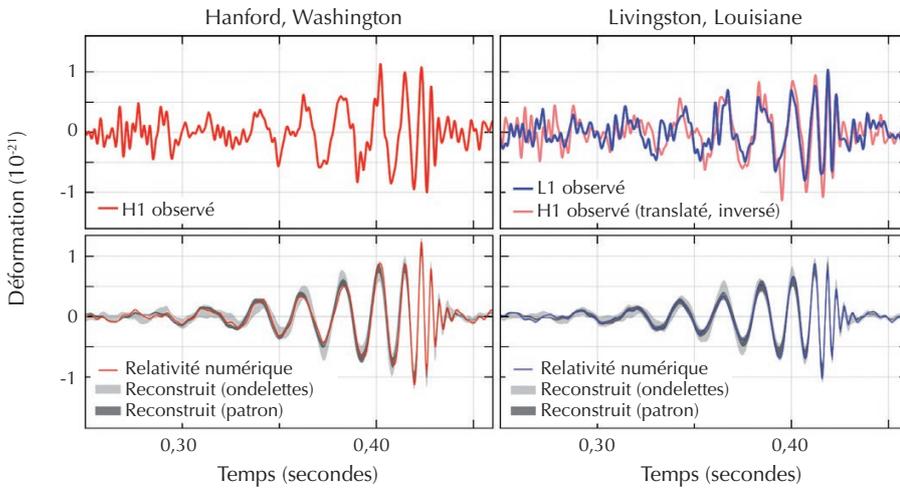
Avec la fréquence observée f et sa variation df/dt , on peut donc mesurer \mathcal{M} par la formule du quadrupôle et on trouve environ 30 fois la masse du soleil M_{sol} dans le cas de GW150914, ce qui implique que la masse totale M doit être de l'ordre de ou supérieure à 70 M_{sol} ! Avec une analyse plus fine du signal, utilisant une formule postnewtonienne qui permet de mesurer les deux masses séparément, on trouve $m_1 = 36 M_{\text{sol}}$ et $m_2 = 29 M_{\text{sol}}$. On est donc en présence de deux trous noirs très massifs. D'autre part, la masse du trou noir final formé par la coalescence est mesurée à $M_f = 62 M_{\text{sol}}$, grâce à une comparaison avec un calcul numérique.

La masse de gazouillement \mathcal{M} étant connue, on peut alors mesurer avec l'amplitude du signal la distance à laquelle a eu

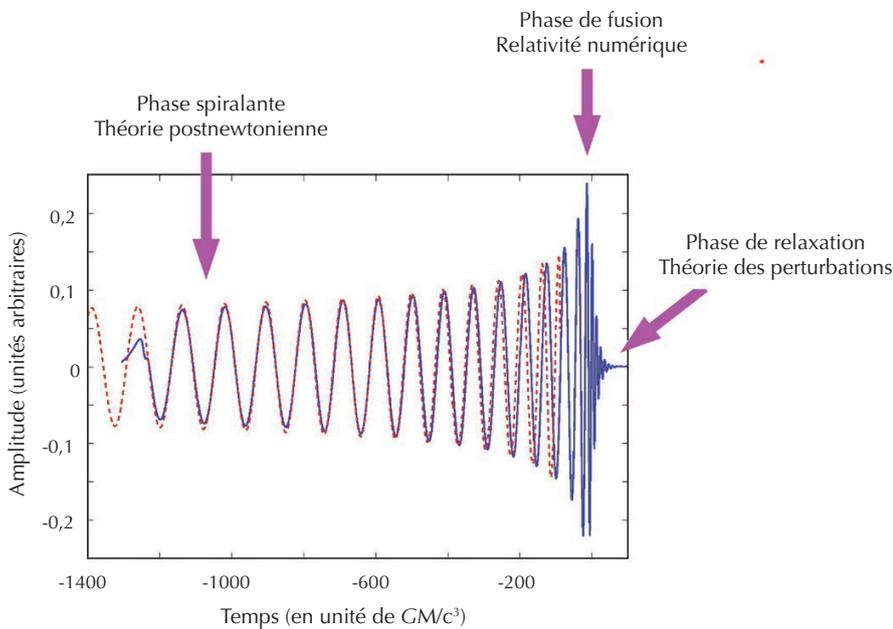
lieu la coalescence, soit $\mathcal{D} = 400$ Mpc pour GW150914. Une telle distance correspond à l'échelle des grandes structures dans l'Univers, dont on sait depuis une vingtaine d'années qu'elles forment une gigantesque « toile d'araignée » avec un réseau de filaments composés de milliers de galaxies, et joints entre eux par des superamas de galaxies et de gaz chaud intergalactique. Mais, d'un point de vue cosmologique, cette distance se situe dans l'Univers proche, car le *redshift*^(d) cosmologique associé est faible, de l'ordre de $z = 0,1$.

L'énergie émise par la coalescence sous forme d'ondes gravitationnelles peut aussi être grossièrement estimée par la formule du quadrupôle. Dans le cas de GW150914, cette énergie correspond à la conversion de 3 M_{sol} en énergie gravitationnelle, puisque c'est la différence entre la masse initiale $m_1 + m_2 = 65 M_{\text{sol}}$ et la masse finale $M_f = 62 M_{\text{sol}}$. L'énergie gravitationnelle est égale à celle qui serait émise en rayonnement électromagnétique par plusieurs milliers de supernovas, et, de plus, cette énergie est émise en quelques dixièmes de secondes, ce qui correspond à une puissance colossale d'environ 10^{49} W ! Néanmoins, cette puissance est faible si on la compare à la puissance maximale à laquelle on s'attend dans une théorie de gravitation relativiste. Celle-ci correspond à la limite d'une source ultra-compacte et ultra-relativiste, et qui émettrait le rayonnement avec un rendement maximal. Elle est formée uniquement des constantes fondamentales, soit c la vitesse de la lumière et G la constante de Newton, et vaut $\mathcal{P}_{\text{max}} = c^5 / G$ (ce qui n'est autre que l'unité de Planck pour une puissance, qui se trouve ne pas dépendre de la constante de Planck \hbar). En effet, $\mathcal{P}_{\text{max}} = 3,63 \cdot 10^{52}$ W et on pourrait imaginer découvrir d'autres types de sources encore plus puissantes que la coalescence des systèmes binaires de trous noirs (l'astronomie gravitationnelle pourrait nous surprendre) !

D'où proviennent ces 3 M_{sol} converties en énergie gravitationnelle ? En relativité générale, la masse-énergie totale associée à un espace-temps est une constante, qu'on appelle la masse ADM (pour « Arnowitt-Deser-Misner »). Dans le cas de GW150914, cette masse se compose de la somme des masses des deux trous noirs ($M = m_1 + m_2$), plus l'énergie de liaison associée à leur interaction gravitationnelle, soit $-Gm_1 m_2 / 2r$ (dans un modèle newtonien simple où l'on suppose une orbite circulaire), plus l'énergie



2. L'événement GW150914 observé le 14 septembre 2015 [4]. En haut, les signaux observés par les détecteurs LIGO situés à Hanford (en rouge) et Livingston (en bleu), où l'ordonnée représente l'amplitude de la déformation induite par l'onde gravitationnelle, en unité de 10^{-21} . Les deux signaux se superposent parfaitement après une translation en temps de 7 millisecondes. En bas, les meilleurs ajustements des signaux observés par les résultats de calculs numériques en relativité générale, et par une forme d'onde basée sur une superposition d'ondelettes (mais non physique, car ne provenant pas d'un modèle physique).



3. L'onde gravitationnelle dans les trois phases de la coalescence d'un système binaire d'objets compacts, avec les méthodes utilisées pour la déterminer. Le calcul analytique postnewtonien, valable dans la phase spirante, est représenté en pointillés rouges. Il se raccorde avec le calcul numérique valable dans les phases de fusion et de relaxation, représenté par un trait bleu. La théorie des perturbations de trous noirs est aussi utilisée pour caractériser les modes de vibrations du trou noir final. La durée relative des trois phases, telles que vues dans la bande de fréquence d'un détecteur donné, dépend de la valeur des masses. La prédiction théorique s'appelle le « patron » d'onde gravitationnelle ("template" en anglais).

dans le champ d'ondes gravitationnelles qui est égale à l'intégrale de $-\infty$ dans le passé jusqu'à l'instant présent du flux d'énergie. En première approximation, le flux d'énergie est donné par la formule du quadrupôle. Par conservation de l'énergie ADM, on voit que l'énergie dans le champ d'ondes gravitationnelles est égale à l'énergie de liaison gravitationnelle des trous noirs au moment de la fusion, donc pour une séparation r de l'ordre de $2GM/c^2$. C'est donc cette énergie de liaison qui a été prise sur le système binaire et emportée par l'onde gravitationnelle.

Patrons d'ondes gravitationnelles et problème des deux corps en relativité générale

Avec un fort rapport signal-sur-bruit et une fréquence au moment de la fusion proche du maximum de sensibilité des détecteurs, GW150914 est un événement magnifique qui permet de tester la relativité générale dans un régime de champ gravitationnel fort et rapidement variable. Le deuxième événement GW151226 est aussi très intéressant car, étant donné que les masses sont plus faibles, il donne accès à la phase précédant immédiatement la fusion finale, pendant laquelle les deux trous noirs décrivent une orbite « spirante », avec une cinquantaine de cycles orbitaux mesurés dans le cas de GW151226.

Pour l'interprétation des signaux observés, le problème théorique à résoudre est celui du mouvement et du rayonnement des deux corps sous l'action de forces purement gravitationnelles. En effet, on peut montrer que dans le cas d'objets compacts comme les trous noirs ou les étoiles à neutrons, les effets non gravitationnels, tels que la présence d'un disque de matière autour des étoiles, ou les effets du milieu interstellaire et des champs magnétiques, ou même les effets de structure interne dans le cas d'étoiles à neutrons, jouent un rôle négligeable. Essentiellement, la dynamique des deux corps compacts et les ondes gravitationnelles émises dépendent uniquement de leurs masses m_1 et m_2 , et, éventuellement, de leurs spins S_1 et S_2 . Par contre, la modélisation de l'onde gravitationnelle va bien entendu requérir et dépendre d'une théorie de la gravitation, qui sera soit la relativité générale soit une théorie alternative. De nos jours on dispose de tout un arsenal de théories alternatives de la gravitation, qui vont pouvoir être testées avec les ondes gravitationnelles.





On distingue généralement trois phases successives dans le processus de coalescence de deux trous noirs en relativité générale (fig. 3) :

- La phase spiraleante initiale, pendant laquelle la fréquence orbitale et l'amplitude du signal croissent de façon adiabatique à cause de la perte d'énergie liée à l'émission du rayonnement gravitationnel. Dans cette phase, la binaire compacte est modélisée avec grande précision par un système de deux masses ponctuelles m_1 et m_2 (avec spins S_1 et S_2), grâce à l'approximation postnewtonienne (PN) de la relativité générale, qui est un développement lorsque la vitesse des corps est faible par rapport à la vitesse de la lumière, donc quand le rapport v/c tend formellement vers zéro [5]. La forme de l'onde dans la phase spiraleante est actuellement connue, grâce à des travaux ayant débuté dans les années 1980, jusqu'à l'ordre postnewtonien très élevé dit 3,5PN, correspondant à des corrections relativistes d'ordre $(v/c)^7$ au-delà de la formule du quadrupôle d'Einstein^(e).
- La phase de fusion, où les horizons des deux trous noirs entrent en contact et forment un trou noir unique. La méthode postnewtonienne n'est plus valable dans cette phase, qui doit être traitée par une intégration numérique des équations d'Einstein. Pendant longtemps le calcul numérique a constitué un défi pour la communauté (on l'appelait le "binary black hole challenge") ; mais il a finalement abouti en 2005 [6], et nous disposons donc maintenant de la solution « exacte » (quoique numérique) pour la phase de fusion. Cette solution est raccordée avec grande précision à la solution postnewtonienne dans la phase précédente.
- La phase finale est dite de relaxation. Le trou noir engendré par la fusion est initialement déformé à cause de la dynamique de la collision. Il émet des ondes gravitationnelles correspondant à ses modes dits « quasinormaux », qui sont les modes de vibration intrinsèques du trou noir, pour finalement se relaxer vers un régime stationnaire, qui n'émet donc plus de rayonnement et est décrit par le trou noir de Kerr. Cette phase est très intéressante pour tester des théorèmes sur les trous noirs : le trou noir formé est-il bien donné par la solution du trou noir en rotation de Kerr en relativité générale, caractérisé uniquement par sa masse et son spin ?

Outre les méthodes « fondamentales » que sont l'approximation postnewtonienne et la relativité numérique, des méthodes analytiques « effectives » ont aussi été développées, avec l'ambition de décrire en une seule fois les trois phases de la coalescence.

Une de ces méthodes consiste à partir du problème physique réel à deux corps décrit par la solution postnewtonienne, et à le transformer en un problème plus simple dit « effectif à un corps » ("effective-one-body" ou EOB) [7]. L'analyse des données dans les détecteurs LIGO-Virgo exploite ce type de solution effective, très utile en pratique car elle permet de rechercher les signaux en temps réel dans une grande région de l'espace des paramètres (masses et spins des trous noirs).

Les ondes gravitationnelles découvertes par la collaboration LIGO-Virgo sont parfaitement en accord avec la prédiction de la relativité générale dans les trois phases successives de la coalescence, c'est-à-dire que les oscillations observées dans la figure 2 sont bien compatibles avec celles prédites dans la figure 3 ! Aucune déviation par rapport à la relativité générale n'a été mise en évidence au niveau de la précision de la mesure, et la cohérence des signaux observés avec la relativité générale est remarquable.

Par exemple, les paramètres postnewtoniens prévus par la relativité générale (et qui représentent des corrections relativistes à la formule du quadrupôle) sont déjà testés avec les observations de LIGO-Virgo, surtout grâce à l'événement GW151226 qui donne accès à une certaine portion de la phase spiraleante (fig. 4). Ces paramètres sont importants, car ils sondent la structure non linéaire de la relativité générale.

Ainsi, à partir de l'ordre 1,5PN ou $(v/c)^3$ dans le développement postnewtonien, apparaissent les « sillages » d'ondes gravitationnelles ("tails" en anglais), qui sont des effets non linéaires dus physiquement au fait que les ondes se propagent dans un espace-temps qui est lui-même déformé par la présence de la source. La mesure effectuée du paramètre 1,5PN (à environ 10 % près, voir la figure 4) est une vérification de la présence de cet effet dans le champ d'ondes gravitationnelles. C'est un test fin de la relativité générale qu'il est impossible de réaliser dans le système solaire, ni même avec les pulsars binaires !

Quelques réflexions sur l'astronomie gravitationnelle

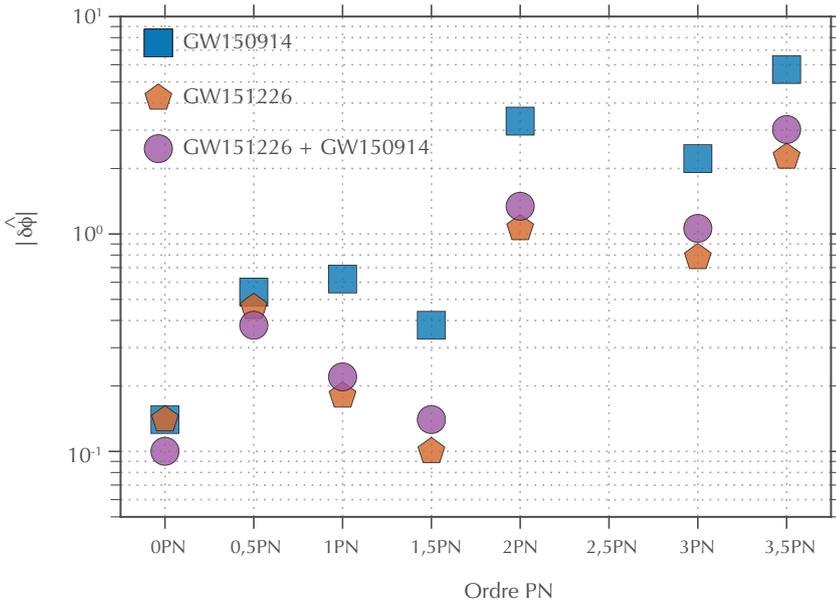
L'astronomie gravitationnelle qui démarre avec cette détection nous laisse entrevoir d'énormes avancées, tant en astrophysique qu'en physique fondamentale. On s'attend par exemple à ce que les ondes gravitationnelles se révèlent être une mine d'informations sur l'état de l'Univers à de très grandes distances, et donc à des moments très reculés dans le passé, jusqu'aux premiers instants juste après le Big Bang.

Les astronomes sont maintenant des explorateurs qui peuvent non seulement voir l'Univers mais aussi l'« écouter » ! L'astronomie gravitationnelle est donc très complémentaire de l'astronomie électromagnétique, en permettant d'écouter des événements violents survenant dans l'Univers, et qui sont en général invisibles dans toute autre forme de rayonnement.

Mais, pour certaines sources, on s'attend à la détection concomitante avec les ondes gravitationnelles de signaux électromagnétiques ou de particules énergétiques comme les neutrinos. Cette astronomie « multi-messagère » devrait constituer un élément essentiel de l'exploration de l'Univers gravitationnel et va aussi enrichir les secteurs de l'astronomie traditionnelle. Par exemple, la détection de l'onde gravitationnelle en provenance de la coalescence de deux étoiles à neutrons pourrait s'accompagner de l'observation d'un sursaut électromagnétique γ « court » (par opposition aux sursauts « longs » qui ont probablement une autre origine), car le meilleur modèle actuel pour le « moteur central » de la production des sursauts γ courts est la coalescence de deux objets compacts.

Comme en témoigne la mesure des paramètres postnewtoniens (fig. 4), l'astronomie gravitationnelle va être une astronomie de précision. Elle nous a déjà apporté, outre le fait que la relativité générale reste correcte dans un régime de champs gravitationnels forts, et que les méthodes d'approximation « marchent », la première preuve expérimentale directe de l'existence des trous noirs ! Mais déjà de nombreuses questions se posent.

Par exemple, les masses des trous noirs en jeu dans l'événement GW150914 sont très supérieures à celles des trous noirs connus d'origine stellaire dans notre galaxie (fig. 5). Comment de tels trous noirs très massifs ont-ils pu se former ?

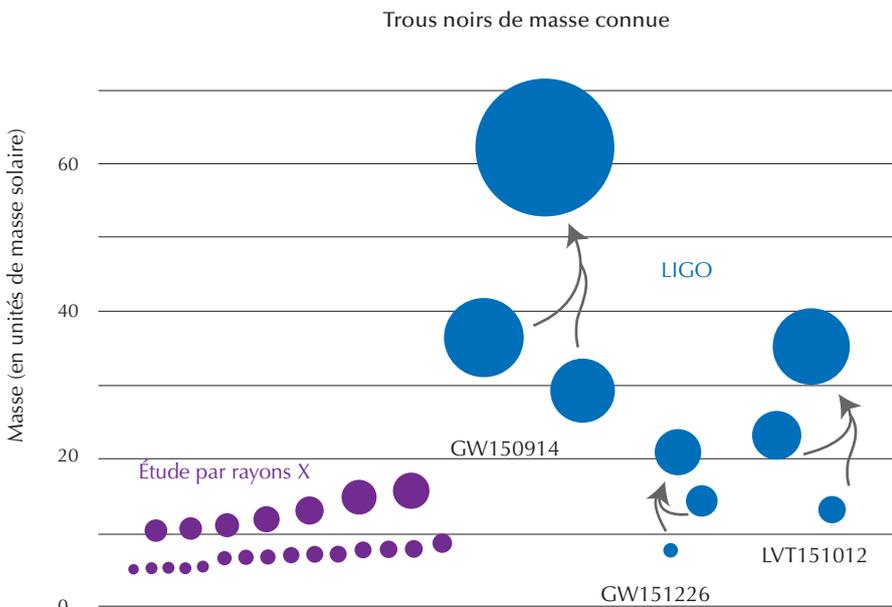


4. Limites supérieures sur les déviations à la prédiction de la relativité générale pour les paramètres postnewtoniens (qui sont connus jusqu'à l'ordre 3,5PN), en utilisant les observations combinées de GW150914 et GW151226 [8].

La masse d'un trou noir issu de l'explosion en supernova d'une étoile massive dépend d'un certain nombre de paramètres. L'un des plus importants est la « métallicité » de l'étoile progénitrice⁽⁴⁾, qui détermine en particulier l'opacité des couches externes de l'étoile. Plus la métallicité est élevée, plus l'étoile est opaque à la radiation en provenance du cœur de la supernova, et plus les couches externes vont être soufflées par la pression de radiation, produisant un important vent stellaire qui échappera à l'effondrement gravitationnel, réduisant d'autant la masse du trou noir. Pour former des trous noirs massifs par explosions de supernovas, on a donc besoin d'une métallicité faible.

Un scénario intéressant est de supposer que les trous noirs massifs ont été formés dans l'Univers jeune non encore enrichi par les explosions de supernovas, et donc de métallicité faible. C'est l'époque dite de la « réionisation », où les premières étoiles apparaissent et réionisent les atomes à des *redshifts* $z = 10$ à 15 , juste après l'« âge sombre » de la cosmologie. On imagine que des systèmes binaires d'étoiles très massives évoluent et explosent en supernovas, menant à la formation d'une binaire serrée de deux trous noirs massifs. Dans un tel scénario, on a besoin d'invoquer une phase dans l'évolution du système binaire pendant laquelle les deux trous noirs se retrouvent entourés d'une enveloppe commune provenant des matériaux expulsés par la deuxième explosion de supernova [9]. L'enveloppe commune agit par friction dynamique sur l'orbite des trous noirs et permet de les rapprocher considérablement, ce qui conduit à une binaire de trous noirs assez serrée et qui pourra ensuite évoluer par rayonnement gravitationnel.

Le taux de coalescences de systèmes binaires de trous noirs d'origine stellaire (c'est-à-dire issus de l'explosion de supernovas) est maintenant approximativement connu grâce à GW150914 et GW151226, et se situe entre une dizaine et une centaine d'événements par an et par Gpc^3 . Ce taux implique un ciel gravitationnel très « sonore », non seulement aux fréquences observées par les détecteurs au sol LIGO-Virgo, mais aussi à des fréquences plus basses accessibles par les futurs observatoires gravitationnels dans l'espace tels que eLISA ("evolved Laser Interferometer Space Antenna"). On s'attend ainsi à ce que des milliers de trous noirs binaires d'origine stellaire soient détectables par



5. Masses de trous noirs, en unités de masse solaire. Les masses des trous noirs connus dans notre galaxie et d'origine stellaire (c'est-à-dire issus de l'explosion d'une supernova), observés grâce aux rayons X provenant d'un disque d'accrétion de matière déversée par un compagnon, sont ici comparées aux masses des trous noirs mesurées dans les trois événements d'ondes gravitationnelles.

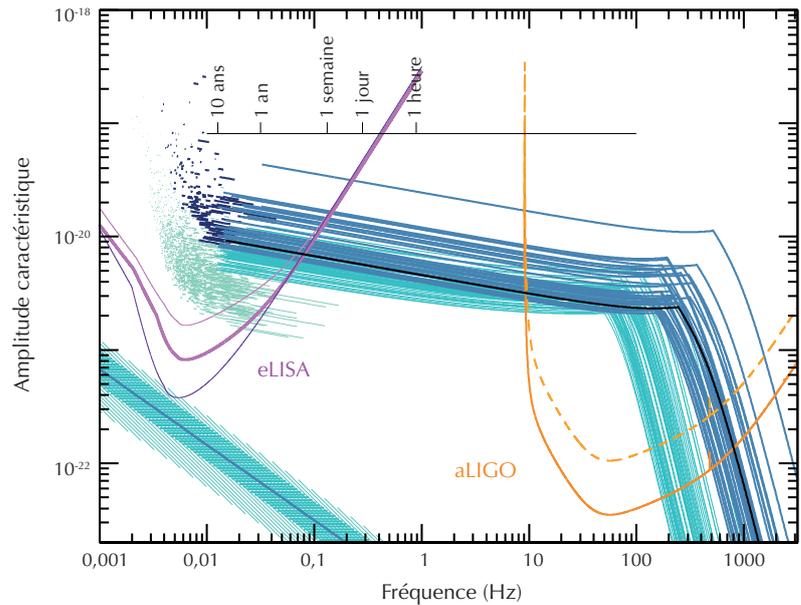


eLISA et, parmi eux, des centaines qui fusionneront plusieurs années après leur détection par eLISA à basse fréquence, et seront alors observables à haute fréquence par les détecteurs au sol (fig. 6). De plus, il devrait exister un fond stochastique d'ondes gravitationnelles provenant de systèmes binaires de trous noirs stellaires non résolus, qui est indiqué en bleu dans la partie inférieure gauche de la figure 6.

Conclusion

La découverte des ondes gravitationnelles par la collaboration LIGO-Virgo marque le démarrage d'une nouvelle ère de l'astronomie moderne, celle de l'exploration de l'Univers gravitationnel, radicalement différente et complémentaire de l'astronomie traditionnelle. L'analyse des détections indique que cette exploration conduira à une nouvelle compréhension de la structure de l'Univers, notamment à l'élucidation des mécanismes de formation des trous noirs et de leur rôle dans l'évolution de l'Univers. L'astronomie gravitationnelle va sonder les grandes échelles de distances cosmologiques et les premiers instants proches du Big Bang. Elle pourrait se révéler très riche en nouvelles découvertes, peut-être en synergie avec les méthodes optiques, et peut-être complètement inattendues !

Par ailleurs, cette exploration nous autorise à envisager des tests inédits sur la gravitation et la relativité générale en tant que théorie « classique », ouvrant la voie à une meilleure connaissance du statut de l'interaction gravitationnelle, avec des conséquences sur une éventuelle description quantique de cette interaction, et de son unification avec les autres interactions fondamentales. ■



6. **l'astronomie multilongueur d'ondes entre les basses fréquences détectées dans l'espace par eLISA et les hautes fréquences détectées au sol par aLIGO** (« advanced » LIGO-Virgo). Les lignes orange indiquent les seuils de sensibilité actuels (tirets) et futurs (ligne continue) de aLIGO. Les lignes violettes indiquent ceux de trois configurations de eLISA. Les lignes bleues sont les amplitudes des ondes gravitationnelles de systèmes de trous noirs binaires. L'événement GW150914, indiqué en trait plein noir par rapport aux seuils de sensibilités des détecteurs au sol et dans l'espace, aurait été détecté environ dix années plus tôt par les détecteurs dans l'espace s'il y en avait eu alors [10].

- (a) Einstein commet dans cet article une fameuse erreur de calcul : son résultat est faux par un facteur 2 !
- (b) L'article d'Einstein fut rejeté par la *Physical Review* et publié plus tard (avec la rétractation d'Einstein) dans une revue plus obscure. Le nom du rapporteur est longtemps resté inconnu, mais les historiens des sciences ont déterminé qu'il s'agissait de Robertson, le cosmologiste de la métrique de « Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker ».
- (c) Le parsec (pc) est la distance à laquelle l'unité astronomique (UA, distance de la Terre au Soleil) sous-tend un angle d'une seconde d'arc, et vaut 3,26 années-lumière (al).
- (d) Le *redshift* z d'une galaxie ou d'une supernova est une mesure de distance définie par le décalage spectral relatif (vers le rouge) entre les longueurs d'onde reçue et émise, conséquence directe de l'expansion de l'Univers.
- (e) La terminologie post-newtonienne a été introduite par Chandrasekhar dans les années 1960. Un terme n PN (où n est entier ou demi-entier) est par définition d'ordre $(v/c)^{2n}$, de sorte que l'on appelle 1PN la première correction post-newtonienne qui est d'ordre $(v/c)^2$.
- (f) Pour simplifier, on appelle « métal » tout élément dans l'étoile qui est plus lourd que l'hélium.

Références

- 1• A. Einstein, "Über Gravitationswellen", *Sitzber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin* (1918) 154-167.
- 2• R. Hulse et J. Taylor, "Discovery of a pulsar in a binary system", *Astrophys. J.* **195** (1975) L51.
- 3• J.M. Weisberg et J.H. Taylor, "Relativistic binary pulsar B1913+16: Thirty years of observation and analysis", dans *Binary radio pulsars*, Proc. Aspen Conference, ASP Conf. Series (2005).
- 4• B.P. Abbott *et al.*, LIGO-Virgo scientific collaboration, "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger", *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 061102.
- 5• L. Blanchet, "Gravitational radiation from post-Newtonian sources and inspiralling compact binaries", *Living Rev. Rel.* **17** (2014) 2.
- 6• F. Pretorius, "Evolution of binary black hole spacetimes", *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 121101.
- 7• A. Buonanno et T. Damour, "Effective one-body approach to general relativistic two-body dynamics", *Phys. Rev. D* **59** (1999) 084006.
- 8• B.P. Abbott *et al.*, LIGO-Virgo scientific collaboration, "Tests of general relativity with GW150914", *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 221101 ; "Binary black hole mergers in the first advanced LIGO observing round", *Phys. Rev. X* **6** (2016) 041015.
- 9• M. Dominik *et al.*, "Double compact objects. I. The significance of the common envelope on merger rates", *Astrophys. J.* **759** (2012) 52.
- 10• A. Sesana, "The promise of multi-band gravitational wave astronomy", *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 231102.