

Les Ondes Gravitationnelles : Une Nouvelle Astronomie

[Dans “Où en est-on avec la Relativité ?”, Éd. Ph. Brax, E. Klein & P. Vanhove (2018).]

Luc BLANCHET*

*Institut d’Astrophysique de Paris, UMR 7095 du CNRS,
Sorbonne Universités & UPMC Université Paris 6,
98^{bis} boulevard Arago, 75014 Paris, France*

(Dated: 22 mai 2018)

L’astronomie contemporaine est en train de vivre une révolution, peut-être plus importante encore que celle qui eu lieu avec l’avènement de la radioastronomie dans les années 1960, puis l’ouverture du ciel aux observations dans les autres longueurs d’onde électromagnétiques. Les détecteurs d’ondes gravitationnelles de la collaboration LIGO/Virgo ont observé depuis 2015 les signaux émis lors de la collision et la fusion de systèmes binaires de trous noirs massifs à grande distance astronomique. Cette découverte majeure ouvre la voie à la nouvelle astronomie des ondes gravitationnelles, radicalement différente de l’astronomie traditionnelle basée sur les ondes électromagnétiques. Plus récemment, en 2017, la détection d’ondes gravitationnelles émises par la fusion d’un système binaire d’étoiles à neutrons a été suivie de signaux électromagnétiques observés par les satellites γ et X, et par les observatoires en optique. Une moisson de découvertes a été possible grâce à l’astronomie “multi-messagère”, qui combine les informations issues de l’onde gravitationnelle avec celles provenant du rayonnement électromagnétique. Un autre aspect important de la nouvelle astronomie gravitationnelle concerne la physique fondamentale, avec les tests de la relativité générale et des théories alternatives de la gravitation, ainsi que du modèle standard de la cosmologie.

Bien écouter, c’est presque répondre
Marivaux

I. ÉCOUTER LA SYMPHONIE DE L’UNIVERS

Depuis les temps immémoriaux — l’Astronomie est probablement la plus ancienne science humaine — les hommes ont observé le ciel et étudié les astres grâce à la lumière, c’est-à-dire, dans le langage moderne, les ondes électromagnétiques et leur particule associée, le photon [1]. Les astronomes analysent cette lumière avec des instruments toujours plus performants, et l’étudient dans toute la gamme des fréquences électromagnétiques, depuis les photons les plus énergétiques γ et X, presque exclusivement observables depuis l’espace, en passant par les infrarouges, le visible et l’ultra-violet, jusqu’aux ondes radio de grandes longueurs d’onde. Nous négligeons ici les autres porteurs d’information en astronomie que sont les particules de matière qui forment le rayonnement cosmique, et les neutrinos, qui furent détectés par exemple en 1987 lors de la fameuse explosion de supernova dans le grand nuage de Magellan (qui est une petite galaxie satellite de la Voie Lactée).

À chaque fois que les astronomes ont ouvert une “fenêtre” d’observation, en explorant une nouvelle bande de fréquences électromagnétiques, une moisson de découvertes eu lieu. Par exemple, la découverte des émissions radio en provenance du centre de notre Galaxie dans les années 1930, puis dans les années 1960 la découverte de sources très énergétiques émettant des rayons γ et l’explication de la nature des quasars grâce à la radioastronomie, puis, plus tard, la découverte des pulsars.

Mais, c’est une évidence, si les astronomes ont des yeux (ou plutôt, des détecteurs photométriques très sophistiqués) ils sont “sourds”, car il n’y a pas de milieu matériel remplissant l’espace intersidéral dans lequel pourraient se propager des ondes sonores. Jusqu’à présent, les astronomes étaient comme des explorateurs de la jungle qui observent les arbres de la forêt et les animaux qui passent à proximité, mais ne peuvent pas entendre le bruit du ruissellement de l’eau dans une cascade au loin, ou le rugissement d’un tigre encore plus loin.

La révolution de l’astronomie qui est en train de se produire est que dorénavant les astronomes peuvent écouter les objets et les phénomènes lointains dans l’Univers grâce aux ondes gravitationnelles ! En effet celles-ci possèdent une analogie profonde avec les ondes sonores. Ainsi, comme les ondes sonores elles sont produites par un mouvement cohérent d’ensemble de la matière ; au contraire, les ondes électromagnétiques résultent en général de la superpo-

*Electronic address: luc.blanchet@iap.fr

sition des émissions individuelles des atomes et molécules qui composent la source [2]. La conséquence est que la longueur d'onde des ondes gravitationnelles est beaucoup plus grande que la taille de la source qui les émet. Cette différence essentielle avec les ondes électromagnétiques rend l'astronomie des ondes gravitationnelles très différente — et complémentaire — de l'astronomie traditionnelle basée sur la lumière.

II. LES VIBRATIONS DE L'ESPACE-TEMPS

Et pourtant, les ondes gravitationnelles se déplacent dans le vide ! Quel est donc ce milieu qui jouerait un rôle analogue à celui du milieu matériel dans lequel se propagent les ondes sonores ? La réponse, révolutionnaire, fut apportée par la relativité générale d'Einstein de 1915 : c'est l'espace-temps lui-même, qui se courbe au voisinage des masses, et dont les vibrations constituent les ondes gravitationnelles. En relativité générale l'espace-temps n'a pas de caractère absolu et immuable, comme l'espace en avait un en théorie de Newton. C'est une entité dynamique, qui généralise l'espace-temps "plat" de Minkowski, à la base de la relativité restreinte formulée en 1905 par Einstein, Lorentz et Poincaré. En relativité générale, la sensation familière du champ gravitationnel est interprétée comme l'effet de la déformation de l'espace-temps, courbé au sens de la courbure riemannienne inventée par Riemann en 1854. Cette conception du rôle de l'espace-temps vient des fondements mêmes de la relativité générale ; c'est la conséquence du principe d'équivalence, traduction moderne du fait que tous les corps, indépendamment de leur structure et composition interne, sont accélérés de la même façon dans un champ de gravitation [3].

La relativité générale englobant les principes de la relativité restreinte, les vibrations de l'espace-temps ou ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière. De plus elles suivent les mêmes trajectoires que les ondes électromagnétiques dans l'espace-temps ; elles sont déviées, comme la lumière, par les champs gravitationnels, produits par exemple par les amas de galaxies et les grandes structures dans l'Univers. Par contre, elles interagissent extrêmement faiblement avec la matière, et peuvent donc se propager sans impunité sur des très grandes distances. Notons à ce propos qu'il est impossible d'"enfermer" une onde gravitationnelle dans une boîte, comme on pourrait le faire avec une onde électromagnétique, qui peut subir des réflexions multiples dans une boîte garnie intérieurement de miroirs. En effet il n'existe aucun écran à une onde gravitationnelle, car les masses, qui engendrent les champs gravitationnels, sont toujours positives en relativité générale : on ne peut pas annuler le champ gravitationnel. On s'attend donc à ce que les ondes gravitationnelles nous livrent un trésor d'informations en astronomie, à des très grandes distances et des époques reculées dans le passé, probablement jusque juste après le Big-Bang.

III. LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ÉTAIT CORRECTE !

La relativité générale est une théorie célèbre non seulement pour l'élégance de ses équations, mais pour son caractère incroyablement prédictif. Toutes les prédictions de cette théorie se sont avérées correctes, c'est-à-dire vérifiées par des observations ou bien expérimentalement : déviation de la lumière par le Soleil, lentilles et arcs gravitationnels en astronomie, le retard gravitationnel de la lumière ou effet Shapiro (mesuré en 1964), le décalage gravitationnel des fréquences ou effet Einstein qui joue un rôle important pour la précision du système GPS [3]. Seul l'effet de précession anormale du mouvement de la planète Mercure, qui avait été mis en évidence par Le Verrier en 1859, a plutôt été une "post-diction" de la théorie. Quant aux ondes gravitationnelles, leur existence a d'abord été établie par des travaux théoriques en relativité générale avant d'être confirmée par les observations !

Mais établir la réalité physique des ondes gravitationnelles ne fut pas une mince affaire. Dans son article de 1916 [4], Einstein montra que la métrique de l'espace-temps obéit à une équation des ondes dans un système de coordonnées particulier. Mais quelle est la signification des ondes gravitationnelles si leur description dépend d'un système de coordonnées, qu'un observateur est libre de choisir de façon arbitraire ? De nos jours on résout le problème en montrant que la courbure de l'espace-temps se propage et a bien, elle, une signification physique intrinsèque, indépendante d'un observateur. Une autre question a été de savoir si les ondes gravitationnelles transportent de l'énergie, qui serait extraite de sa source et peut être déposée sur un détecteur ? Enfin, les effets de réaction à l'émission des ondes gravitationnelles qui s'exercent dans la source (par exemple le recul de la source résultant d'une émission anisotrope d'ondes gravitationnelles) sont-ils cohérents avec les flux d'ondes mesurés à grandes distances de la source ? La réponse à toutes ces questions est "oui", comme établi dans les années 1960 par de nombreux travaux théoriques et des expériences de pensée [5-7].

La gravitation étant de loin la plus faible des quatre forces fondamentales connues, aucune source terrestre d'ondes gravitationnelles n'est assez puissante pour générer un signal observable. Il faut se tourner vers des sources cosmiques : dès les années 1960 une classe de systèmes binaires d'étoiles dans notre Galaxie avaient déjà donné certaines indications sur l'existence du rayonnement gravitationnel. Dans ces systèmes, dits "cataclysmiques", l'une des étoiles, qui est en fin d'évolution stellaire, remplit son lobe de Roche et déverse de la matière pour former un disque d'accrétion autour

de son compagnon, qui est une étoile compacte plus massive appelée naine blanche (voir la figure 1). On observe la binaire par l'émission UV et X produite par la matière chauffée par le fort champ gravitationnel de la naine blanche. 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 par émission d'ondes gravitationnelles (voir la figure 2) [8–10]. Ainsi, les astronomes ont très tôt utilisé le rayonnement gravitationnel pour expliquer l'existence de certains systèmes astrophysiques !

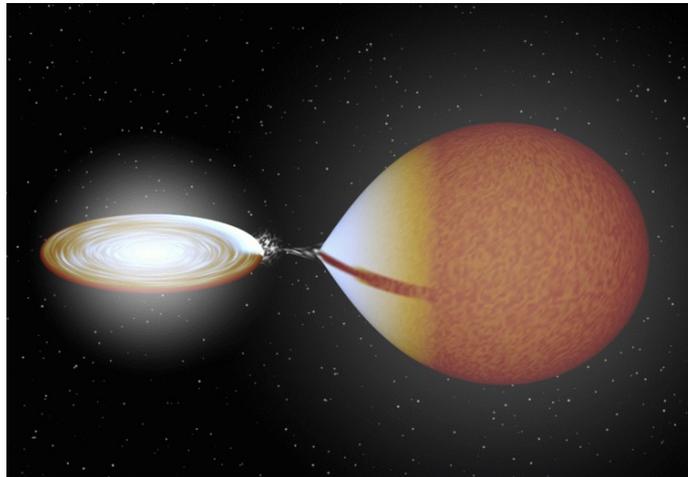


FIGURE 1: Une binaire “cataclysmique”. L'étoile en fin d'évolution stellaire déverse de la matière sur un disque d'accrétion entourant une naine blanche. Les émissions X et UV venant du disque d'accrétion permettent d'étudier la dynamique de ces systèmes et notamment de mesurer le transfert de masse entre les deux étoiles.

Mais c'est bien sûr grâce au pulsar binaire, découvert par Hulse et Taylor en 1974 [11], que la première mise en évidence précise des ondes gravitationnelles eu lieu. Le pulsar, qui est une étoile à neutrons fortement magnétisée en rotation rapide sur elle-même (ici avec une période de 56 ms), envoie à chaque rotation un pulse de rayonnement électromagnétique radio en direction de la Terre. L'analyse des instants d'arrivée des pulses montre, grâce à l'effet Doppler, que le pulsar est en orbite autour d'une autre étoile, probablement aussi une étoile à neutrons. En 1979, après plusieurs années d'observations, était détectée une diminution séculaire de la période orbitale du système binaire — variation qui s'explique parfaitement avec la relativité générale, par la perte d'énergie liée à l'émission du rayonnement gravitationnel, voir la figure 3.

En fait la prédiction de la relativité générale n'est pas “exacte”, car il est impossible d'obtenir une solution exacte des équations d'Einstein (qui sont très “non-linéaires”) pour le problème à deux corps [13]. On utilise donc une méthode d'approximation, qui consiste à développer la théorie selon une série en puissances d'un petit paramètre, qui est le rapport entre la vitesse des corps sur leur orbite et la vitesse de la lumière. C'est ce qu'on appelle le développement “post-newtonien”. Le rapport v/c est réellement petit dans le cas du pulsar binaire, de l'ordre de un millièrme, donc l'approximation post-newtonienne va être très bonne. À l'ordre dominant, l'onde gravitationnelle a une forme quadrupolaire (alors que l'onde électromagnétique est en général dipolaire), et est décrite par la formule du quadrupôle d'Einstein de 1918 [14]. Celle-ci donne entre autres l'énergie totale émise par le système binaire sous forme d'ondes gravitationnelles, et est donc très bien testée par la décroissance orbitale du pulsar binaire.

IV. LES SYSTÈMES BINAIRES COMPACTS SPIRALANTS

Lorsqu'à la fin de sa vie, dans environ 350 millions d'années, le pulsar binaire et son compagnon auront émis toute leur énergie gravitationnelle, ils deviendront ce qu'on appelle une binaire compacte “spiralante”. Dans un tel système, formé soit d'étoiles à neutrons soit de trous noirs, les deux corps compacts suivent une orbite rapprochée, dans les derniers instants précédant leur fusion finale, qui est une spirale rentrante à cause de la perte d'énergie liée à l'émission des ondes gravitationnelles. La fréquence orbitale et l'amplitude du signal augmentent au cours du temps, jusqu'à ce que le système atteigne la dernière orbite circulaire stable, après laquelle les deux corps entrent en collision et fusionnent rapidement pour former un trou noir. Celui-ci est initialement déformé et hautement dynamique à cause de la collision, mais il finit par atteindre, par émission en ondes gravitationnelles de ses modes dynamiques, un régime

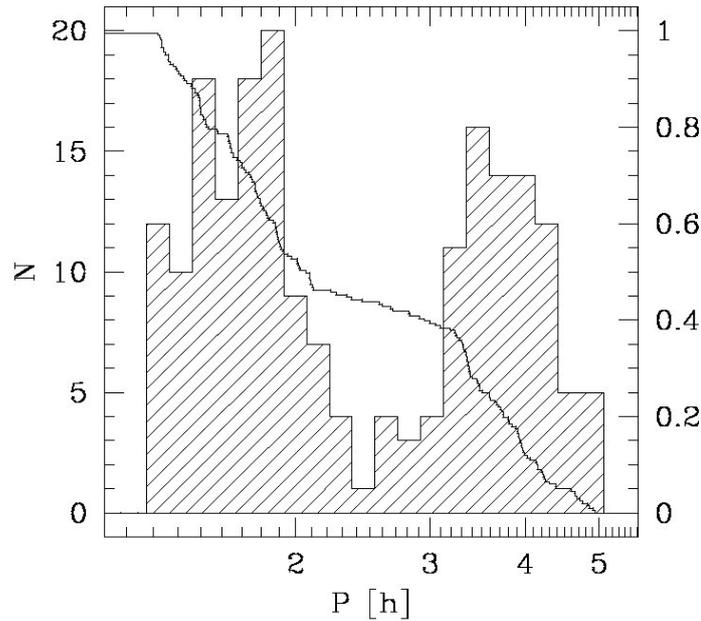


FIGURE 2: Histogramme des binaires cataclysmiques en fonction de la période orbitale. La présence du pic pour des périodes orbitales inférieures à 2 heures s’explique par un mécanisme dans lequel le rayonnement gravitationnel émis par le système joue un rôle.

stationnaire décrit par la solution du trou noir de Kerr. Cette solution des équations d’Einstein, découverte par Kerr en 1963 [15], représente le trou noir le plus général non chargé et en rotation — ici la rotation provient du mouvement orbital des deux corps avant la collision, et de la loi de conservation du moment cinétique.

L’observation de l’onde gravitationnelle dans la phase spiraleante permet de mesurer les masses séparées des deux objets compacts et leur rotation intrinsèque ou spin. En particulier, une certaine combinaison des deux masses, appelée masse de “gazouillement” (ou masse “chirp”), est très bien déterminée car elle intervient dans la formule du quadrupôle, c’est-à-dire à l’ordre dominant. La figure 4 montre le signal gravitationnel produit lors de la phase spiraleante de deux objets compacts.

Pendant la phase spiraleante, l’onde gravitationnelle est calculée grâce à l’approximation post-newtonienne de la relativité générale (développement quand v/c est petit) [17]. Dans le cas de deux étoiles à neutrons, cette approximation est excellente, mais elle doit avoir été développée à un ordre élevé, pour pouvoir suivre avec grande précision les milliers de cycles du signal dans la bande de fréquence des détecteurs. Au moment de la fusion l’approximation post-newtonienne n’est plus valable et est remplacée par un calcul numérique des équations d’Einstein. Le problème du calcul numérique a représenté un défi pendant de longues années mais a maintenant été résolu [18–20]. D’autre part, des méthodes effectives telles que “effective-one-body” (EOB) permettent d’interpoler de façon analytique entre la phase post-newtonienne et le calcul numérique [21]. Finalement la phase finale, pendant laquelle le trou noir formé se “relaxe” vers la solution de Kerr, est analysée par une méthode de perturbation de trou noir. La figure 5 montre les phases successives de la coalescence, ainsi que les méthodes théoriques utilisées pour les décrire.

V. LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Le premier détecteur d’ondes gravitationnelles fut conçu par Weber dans les années 1960. Il s’agissait d’un cylindre métallique résonant, sur laquelle l’onde gravitationnelle dépose de l’énergie, et dont les oscillations mécaniques sont converties en signal électrique par un transducteur. Des “barres de Weber” ont été en service jusque dans les années 2000 mais ont été abandonnées à cause de leur sensibilité trop faible et, surtout, de leur bande de fréquence étroite, limitée essentiellement à la fréquence de résonance de la barre.

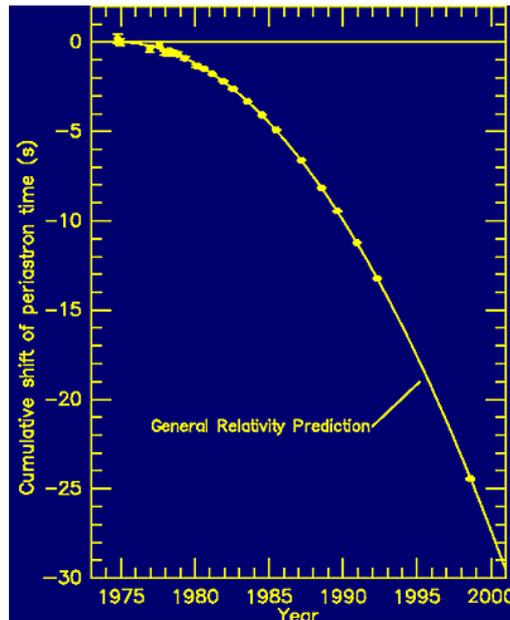


FIGURE 3: La décroissance de la phase orbitale du pulsar binaire, en parfait accord avec la prédiction de la relativité générale et de la formule du quadrupôle d’Einstein pour l’émission de rayonnement gravitationnel [12].

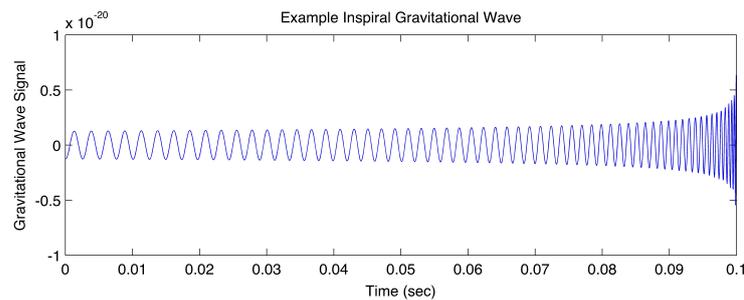


FIGURE 4: Le signal gravitationnel produit par un système binaire d’étoiles compactes dans la phase spiralante précédant la coalescence finale. Pendant cette phase le signal est “universel” : il ne dépend que de la masse des corps mais pas de leur nature, que ce soient des étoiles à neutrons, des trous noirs ou peut-être, des objets plus “exotiques” tels que les étoiles bosoniques [16].

Les détecteurs actuels sont des interféromètres à laser de type Michelson-Morley, dont les bras ont plusieurs kilomètres de long, et sont constitués de cavités laser résonantes de Fabry-Perot. La lame séparatrice, qui sépare le faisceau laser incident en deux faisceaux dirigés vers les deux bras, et les miroirs d’entrée/sortie et en bout de cavités, sont suspendus à un système pendulaire qui permet de s’affranchir des vibrations sismiques terrestres aux fréquences basses. L’onde gravitationnelle est détectée par la variation de la différence de chemin optique entre les deux bras. Outre le bruit sismique, les principales sources de bruit dans l’interféromètre sont le bruit thermique des miroirs et le “bruit de photon” des lasers. Le grand intérêt de l’interféromètre laser est sa large bande de fréquence, depuis environ 30 Hz jusqu’à quelques milliers de Hz. Voir la figure 6.

Le 14 septembre 2015 les détecteurs d’ondes gravitationnelles LIGO ont observé le signal de la coalescence de deux trous noirs stellaires de masses 36 et 29 fois la masse du Soleil, à une distance de environ 400 Mpc [22]. L’événement a duré une fraction de seconde, durant laquelle les deux trous noirs ont parcouru les quelques derniers cycles orbitaux à une vitesse proche de la lumière avant de fusionner. Le signal a été détecté avec un fort signal-à-bruit de 23 et un taux de fausse alarme équivalent à un niveau de confiance de 5,1 s. Le signal est arrivé dans les deux détecteurs LIGO,

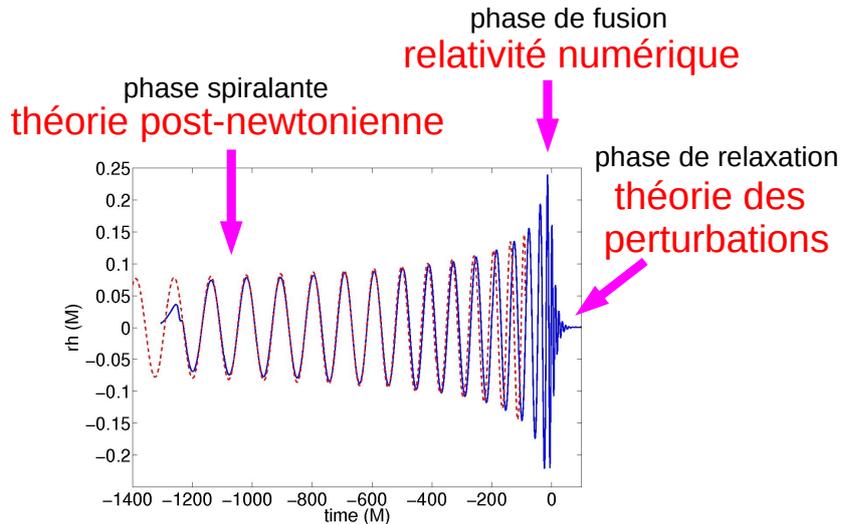


FIGURE 5: L’onde gravitationnelle dans les trois phases de la coalescence d’un système de deux trous noirs. Dans la phase spirale le signal est calculé par des méthodes post-newtoniennes en relativité générale (pointillés rouges). Le calcul post-newtonien se raccorde avec le calcul numérique valable dans les phases de fusion et de relaxation (trait bleu).

situés sur les côtes Ouest et Est américaines, avec un écart de 6,5 millisecondes. Cette différence des temps d’arrivée, compatible avec la distance lumière entre les deux détecteurs (10 millisecondes), fournit une indication sur la direction de l’événement, qui a été localisé dans une portion d’arc de cercle dans le ciel d’environ 600 degrés carrés. A l’époque, le détecteur européen Virgo n’était malheureusement pas en fonctionnement, et la précision sur la localisation de la source avec seulement deux détecteurs n’était pas très bonne. Depuis, plusieurs autres événements de coalescences de trous noirs ont été observés, voir la figure 7. Le 14 août 2017 un événement de trous noirs était observé mais cette fois avec les trois détecteurs LIGO et Virgo simultanément. La boîte d’erreur sur la localisation dans le ciel a donc été drastiquement réduite, à environ 30 degrés carrés. L’astronomie gravitationnelle était née !

Une surprise est que les masses mesurées des trous noirs sont très élevées, en général bien supérieures à celles auxquelles les astronomes étaient habitués, pour les trous noirs connus dans notre galaxie par l’émission X du disque d’accrétion de matière provenant d’une étoile compagnon. Expliquer la formation de trous noirs aussi massifs par l’explosion d’une étoile en fin d’évolution stellaire, puis trouver un mécanisme qui induit une binaire de deux de ces trous noirs assez serrée pour évoluer par rayonnement gravitationnel dans moins d’un temps de Hubble, représentent des défis pour l’astrophysique non encore résolus actuellement.

Lors de la fusion des deux trous noirs, une fraction de la masse-énergie du système binaire, prise sur l’énergie de liaison gravitationnelle, est transférée à l’onde gravitationnelle. Lors du premier événement (appelé “GW150914”), trois masses solaires ont ainsi été émises sous forme d’onde gravitationnelle en une fraction de seconde, ce qui en fait l’événement le plus puissant jamais observé, avec une puissance d’environ 10^{49} watts ! Par contre, les systèmes de trous noirs n’émettent aucune autre forme d’énergie, car le trou noir est une solution purement gravitationnelle des équations d’Einstein. Dans l’astronomie gravitationnelle on peut entendre les collisions de trous noirs mais on ne les voit pas !

VI. L’ASTRONOMIE MULTI-MESSAGERS

Le 17 août 2017, survenait un autre type d’événement, peut-être encore plus fantastique : la coalescence d’un système binaire de deux étoiles à neutrons [23]. En effet, les masses mesurées sont beaucoup plus faibles, la masse “chirp” étant d’environ 1,2 masse solaire, cohérente avec les masses attendues pour des étoiles à neutrons. Malgré les masses plus faibles, le signal-à-bruit, de l’ordre de 32, est encore plus fort que les détections de trous noirs, car la distance de l’événement est beaucoup plus proche : 40 Mpc. La figure 8 donne le signal observé pour GW170817 dans le plan “temps-fréquence”, montrant la montée en fréquence caractéristique du chirp gravitationnel.

Dans les dernières rotations orbitales, les deux étoiles à neutrons sont déformées à cause des forces de marées. L’observation de l’onde gravitationnelle a déjà permis de placer une contrainte sur le taux de déformation ce qui est

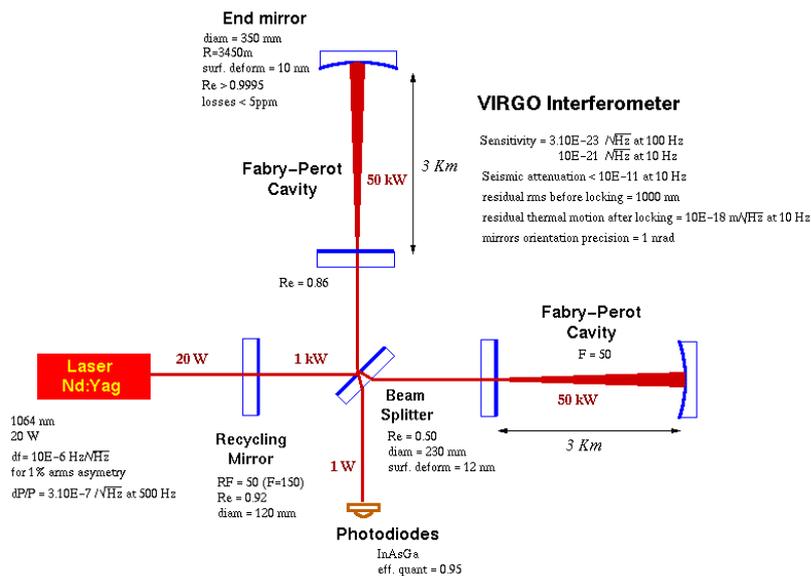


FIGURE 6: Principe de l'interféromètre à laser pour la détection du rayonnement gravitationnel. Les deux bras sont des cavités résonantes Fabry-Perot qui emmagasinent la puissance électromagnétique. La séparatrice et les miroirs sont suspendus à un isolateur sismique. Un miroir à l'entrée permet de recycler la lumière vers l'interféromètre.

très intéressant car l'effet dépend des détails de la structure interne des étoiles à neutrons, en particulier de l'équation d'état qui règne au coeur des étoiles à neutrons. On obtient donc pour la première fois une information sur l'état de la matière nucléaire dans les étoiles à neutrons.

Environ 1,7 seconde après la fusion des deux étoiles à neutrons, était détecté un sursaut électromagnétique γ par les satellites Fermi et Integral. L'astronomie multi-messagers était née [24] ! Voir la figure 9.

Cette différence de 1,7s entre les temps d'arrivée de l'onde gravitationnelle et du sursaut γ , est hautement significative. Elle est due très probablement à la différence des instants d'émission des deux types d'ondes au niveau de la source. Elle s'interprète dans le cadre d'un modèle de sursaut γ , comme le temps mis par l'énergie électromagnétique pour s'échapper, à partir d'un jet de matière relativiste, émis perpendiculairement au plan orbital de la collision. Dans un modèle particulier dit du "cocon", le jet relativiste lui-même doit percer, tel une foreuse, les couches de matière dense issues des débris de l'explosion, avant d'engendrer le sursaut γ . De nombreuses études sont en cours pour préciser les paramètres et la géométrie de l'explosion. Dans l'événement GW170817 le sursaut γ a probablement été vu sous un angle d'environ 30 degrés par rapport à l'axe du jet relativiste.

Peut-être la découverte la plus importante fut l'identification, grâce à un grand nombre de télescopes observant notamment en optique, et mobilisant une grande partie de la communauté astronomique, de la source des ondes gravitationnelles et du sursaut γ . En effet, dans les heures et jours qui suivirent l'événement, était identifié dans la boîte d'erreur indiquée par les détecteurs gravitationnels, un objet transitoire en association avec la galaxie NGC 4993. Cet objet, vu en optique, infrarouge, radio et rayons X, n'était pas présent lors de campagnes d'observations précédentes. La galaxie NGC 4993 est bien située à une distance d'environ 40 Mpc, en accord avec l'estimation des détecteurs gravitationnels. L'objet transitoire a rapidement été identifié à ce qu'on appelle une "kilonova".

À l'origine, la kilonova était un modèle théorique décrivant l'explosion résultant de la coalescence de deux étoiles à neutrons [25]. Bien que l'étoile à neutrons soit constituée essentiellement de neutrons, sa croûte contient des empilements de noyaux lourds comme le fer ou le nickel, se répartissant selon leur densité en une structure cristalline. Certains de ces noyaux lourds ont été synthétisés lors de l'explosion en supernova qui a donné lieu à la formation de l'étoile à neutrons. Lors de la fusion des deux étoiles la majeure partie de la masse s'effondre pour former le trou noir. Mais une petite fraction des neutrons sont éjectés et se combinent alors avec les noyaux lourds existants pour former des noyaux beaucoup plus lourds, très riches en neutrons et instables. Ceux-ci se désintègrent alors rapidement, et peuvent former des noyaux moins lourds mais stables, en général bien au-delà du fer. C'est un processus de nucléosynthèse connu, dit " γ " pour rapide, qui se produit dans un environnement riche en neutrons. Dans la kilonova, l'énergie émise provient

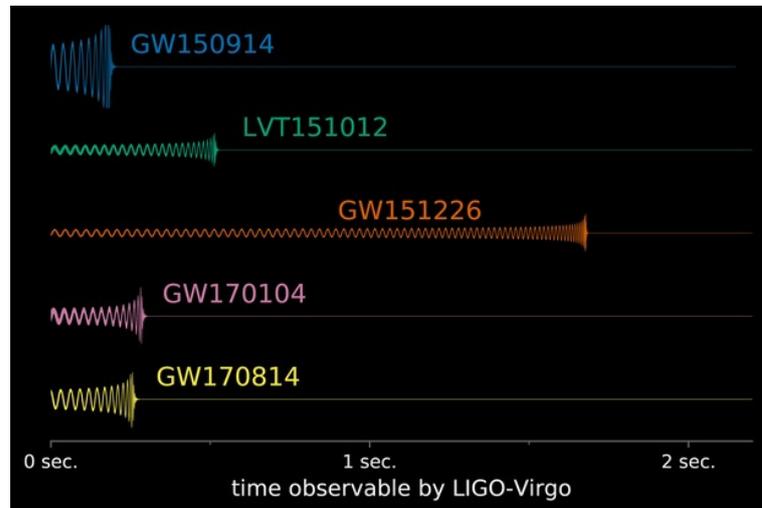


FIGURE 7: Les ondes gravitationnelles issues de coalescences de trous noirs observées jusqu'à présent par la collaboration LIGO-Virgo. Les événements sont désignés par "Gravitational Wave" (GW) suivi de la date. Ainsi, le 1er événement, du 14 septembre 2015, est appelé GW150914. Le second événement, du 12 octobre 2015, était beaucoup plus incertain, car, s'il était réel, beaucoup plus loin, et est appelé "LIGO-Virgo Trigger" (LVT). L'événement GW170814 a été vu par les trois détecteurs du réseau LIGO-Virgo.

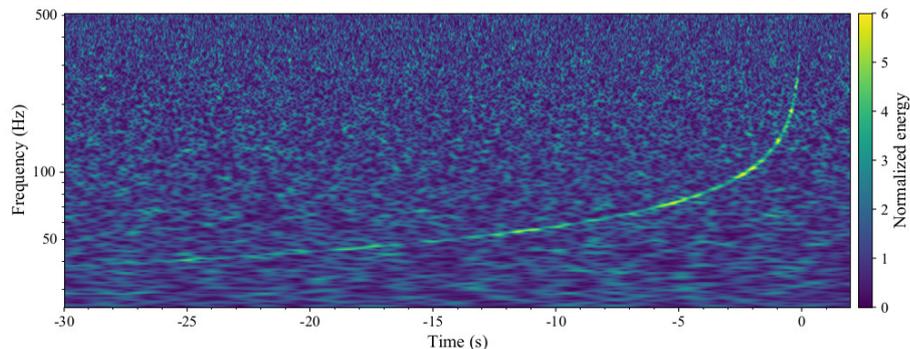


FIGURE 8: L'augmentation en fréquence du train d'ondes gravitationnelles avec le temps, produite alors que les deux étoiles à neutrons se rapprochent en spiralant l'une autour de l'autre. Le signal se termine par la fusion proprement dite, qui intervient à haute fréquence, en dehors de la bande de sensibilité des détecteurs actuels.

de la désintégration radioactive des noyaux, et est environ 1000 fois supérieure à celle d'une nova (d'où son nom). Il est admirable de voir que ce modèle a maintenant été confronté avec succès aux observations. L'analyse du spectre de la kilonova met en évidence des raies d'absorption caractéristiques des éléments lourds produits par le processus r , voir la figure 10.

La kilonova synthétise donc des noyaux très lourds, dont on avait du mal auparavant à expliquer l'origine. C'est donc une découverte majeure et la réponse à une question vieille de plus de 50 ans : les coalescences d'étoiles à neutrons et l'explosion cataclysmique associée constituent un site important de production d'éléments tels que l'or, le platine, l'uranium. La modélisation détaillée des réactions nucléaires dans la kilonova et la confrontation aux observations permet de valider ce modèle, et d'étudier les proportions d'éléments lourds qui sont synthétisés lors des coalescences d'étoiles à neutrons. Voir la figure 11.

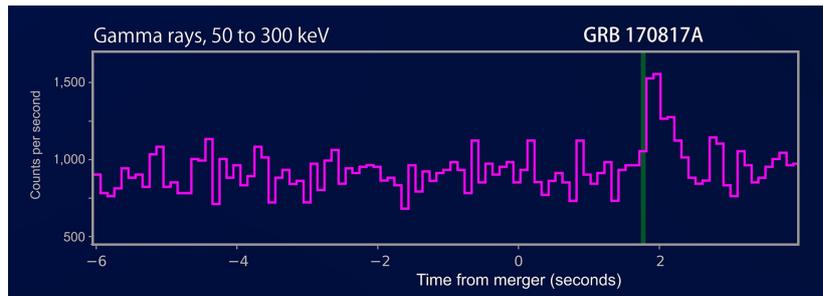


FIGURE 9: Le sursaut γ vu par le satellite Fermi 1,7 seconde après la fin du signal gravitationnel. Le sursaut γ est très énergétique et provient d'un jet de matière relativiste très focalisé. Dans le cas présent il a une relativement faible luminosité ce qui suggère qu'il a été vu "de côté" par rapport à l'axe du jet relativiste (qui est perpendiculaire au plan orbital des deux étoiles à neutrons).

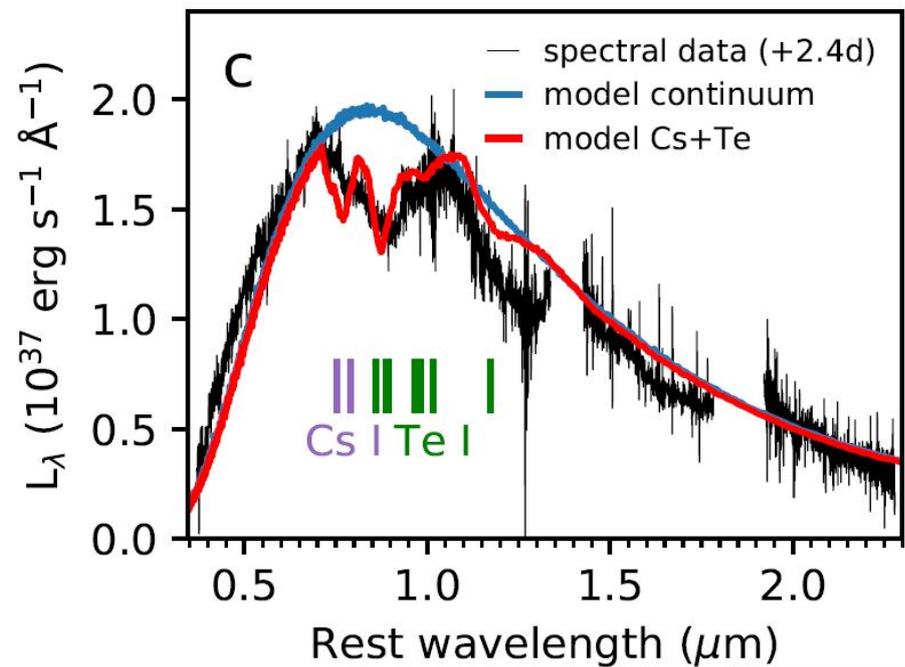


FIGURE 10: Le spectre de la kilonova. C'est essentiellement un spectre de corps noir, avec une température de l'ordre de 6000 degrés, mais avec des raies d'absorption dues au Tellure et au Césium, deux éléments lourds (numéros atomique 52 et 55) dont la formation est difficile à expliquer dans les explosions de supernovas. Les raies sont élargies par effet Doppler dû à la vitesse d'éjection d'environ 60 000 km/s.

VII. TESTS DE PHYSIQUE FONDAMENTALE

L'événement de fusion d'étoiles à neutrons GW170817 a démontré que la vitesse de propagation des ondes gravitationnelle est égale à celle de la lumière, à moins que 10^{-15} près. Ce simple fait est intéressant car il permet d'éliminer certaines théories de la gravitation, autres que la relativité générale. En particulier, des théories qui ont été proposées comme alternatives à l'énergie noire, c'est-à-dire pouvant expliquer l'accélération observée de l'expansion de l'Univers sans invoquer la constante cosmologique. Ces théories évitent donc le fameux problème de la constante cosmologique, dont la valeur minuscule observée est difficilement explicable dans le cadre du modèle standard de la cosmologie et de la théorie quantique des champs [26]. Ainsi, la classe de théories "tenseur-scalaire" dite de Horndeski [27], dans lesquelles un degré de liberté scalaire est couplé de façon générale au champ gravitationnel tensoriel de la relativité

FIGURE 11: La table des éléments avec leur origine probable. Les éléments les plus légers tels que l’hélium sont synthétisés dans le Big-Bang. Pour beaucoup d’éléments plus lourds comme le fer, on invoque divers mécanismes d’explosions de supernovas. La formation des éléments les plus lourds comme le césium, l’or, les lanthanides, l’uranium, etc. est maintenant expliquée par les coalescences d’étoiles à neutrons (*cf.* le code-couleur violet).

générale, a-t-elle été récemment fortement contrainte [28].

La coïncidence des temps d’arrivée des signaux gravitationnel et électromagnétique (après un voyage de 130 millions d’années), donne aussi un test du principe d’équivalence. En effet la trajectoire parcourue par les deux types de signaux dans l’Univers est la même. Or cette trajectoire est déviée par les grandes structures de l’Univers — amas de galaxies, le super-amas local, le grand attracteur, *etc.*, ce qui démontre que différentes formes d’énergies, électromagnétique et gravitationnelle, acquièrent la même accélération dans un champ gravitationnel. C’est exactement ce que l’on entend par principe d’équivalence. De plus, puisque l’une de ces énergies est l’énergie gravitationnelle, on a testé la version dite “forte” du principe d’équivalence.

Une autre avancée importante concerne la mesure de paramètres cosmologiques. Cette possibilité vient d’une propriété remarquable des ondes gravitationnelles : elles contiennent en elles-mêmes l’information sur la distance de la source, ici 40 Mpc. La mesure de cette distance, combinée avec celle du décalage spectral (le “redshift” cosmologique) obtenue grâce à la contrepartie électromagnétique, conduit à une estimation directe du paramètre de Hubble H_0 , qui détermine le taux local d’expansion de l’Univers [29]. Dans le cas présent, avec une vitesse de récession de la galaxie NGC4993 de environ 3000 km/s, on obtient une valeur de H_0 de environ 70 km/s/Mpc, en accord avec d’autres estimations disponibles.

Pour finir, mentionnons un autre test intéressant, concernant la masse de la particule associée au champ de gravitation : le graviton. Cette masse est nulle en relativité générale, mais elle a été contrainte par les observations d’ondes gravitationnelles à être inférieure à 10^{-22} eV [30] ! L’idée est que si le graviton est massif, sa vitesse dépend de son énergie qui est elle-même proportionnelle à la fréquence, selon la fameuse formule de Planck $E = h\nu$. Or la fréquence n’est rien d’autre, à un facteur 2 près, que la fréquence orbitale du système binaire, qui varie au cours du temps puisque c’est le chirp ! On prévoit donc dans le cas d’un graviton massif une distorsion du signal par rapport à la prédiction de la relativité générale [31]. Aucune distorsion n’ayant été observée on en déduit une valeur supérieure pour la masse du graviton.

-
- [1] P. Léna, *Les Sciences du Ciel* (Flammarion, Paris, 1996).
 - [2] K. Thorne, *Gravitational Radiation* (Cambridge University Press, 1987), pp. 330–458.
 - [3] C. M. Will, *Theory and experiment in gravitational physics* (Cambridge University Press, 1993).
 - [4] A. Einstein, Sitzber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin **1**, 688 (1916).
 - [5] H. Bondi, Rev. Mod. Phys. **29**, 423 (1957).
 - [6] H. Bondi, M. van der Burg, and A. Metzner, Proc. R. Soc. London, Ser. A **269**, 21 (1962).
 - [7] J. Ehlers, A. Rosenblum, J. Goldberg, and P. Havas, Astrophys. J. **208**, L77 (1976).
 - [8] R. Kraft, J. Mathews, and J. Greenstein, Astrophys. J. **136**, 312 (1962).
 - [9] B. Paczynski, Acta Astron. **17**, 287 (1967).
 - [10] J. Faulkner, Astrophys. J. **170**, L99 (1971).

- [11] R. Hulse and J. Taylor, *Astrophys. J.* **195**, L51 (1975).
- [12] J. Taylor and J. Weisberg, *Astrophys. J.* **253**, 908 (1982).
- [13] C. Misner, K. Thorne, and J. Wheeler, *Gravitation* (Freeman, San Francisco, 1973).
- [14] A. Einstein, *Sitzber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin* **1**, 154 (1918).
- [15] R. Kerr, *Phys. Rev. Lett.* **11**, 237 (1963).
- [16] R. Ruffini and S. Bonazzola, *Phys. Rev.* **187**, 1767 (1969).
- [17] L. Blanchet, *Living Rev. Rel.* **17**, 2 (2014), arXiv :1310.1528 [gr-qc].
- [18] F. Pretorius, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 121101 (2005), gr-qc/0507014.
- [19] J. G. Baker, J. Centrella, D.-I. Choi, M. Koppitz, and J. van Meter, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 111102 (2006), gr-qc/0511103.
- [20] M. Campanelli, C. O. Lousto, P. Marronetti, and Y. Zlochower, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 111101 (2006), gr-qc/0511048.
- [21] A. Buonanno and T. Damour, *Phys. Rev. D* **59**, 084006 (1999), gr-qc/9811091.
- [22] B. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016), arXiv :1602.03837 [gr-qc].
- [23] B. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **119**, 161101 (2017), arXiv :1710.05832 [gr-qc].
- [24] B. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration), *Astrophys. J. Lett.* **848**, L12 (2017), arXiv :1710.05833 [gr-qc].
- [25] B. Metzger, G. Martinez-Pinedo, S. Darbha, E. Quataert, A. Arcones, D. Kasen, R. Thomas, P. Nugent, I. Panov, and N. Zinner, *Monthly Not. R. Astron. Soc.* **406**, 2650 (2010), arXiv :1001.5029 [astro-ph].
- [26] J. Martin, *Comptes Rendus Physique* **13**, 6 (2012), arXiv :1205.3365 [astro-ph].
- [27] G. Horndeski, *J. Theor. Phys.* **10**, 363 (1974).
- [28] P. Creminelli and P. Vernizzi, *Phys. Rev. Lett.* **119**, 251302 (2017), arXiv :1710.05877 [gr-qc].
- [29] B. Schutz, *Nature* **323**, 310 (1986).
- [30] B. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and VIRGO Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 221101 (2016), arXiv :1602.03841 [gr-qc].
- [31] C. Will, *Phys. Rev. D* **57**, 2061 (1998), arXiv :gr-qc/9709011.