

## Diner débat X77 sur les Ondes Gravitationnelles.

Présentation de Luc Blanchet, le 25 novembre 2025

### A/ Résumé de la soirée

#### Introduction : Une Rencontre entre Science et Camaraderie

Ce séminaire, donné par Luc Blanchet (Directeur de recherche émérite au CNRS et médaillé Einstein 2023), s'est tenu dans une atmosphère empreinte d'une forte camaraderie, caractéristique des retrouvailles de la promotion X77. L'événement, organisé dans un format hybride (présentiel à la Maison des Polytechniciens et visioconférence), a mêlé rigueur intellectuelle et convivialité, se prolongeant par un dîner propice aux échanges informels.

L'auditoire a manifesté une grande curiosité scientifique couplée à une certaine humilité face à la complexité du sujet, témoignant d'une admiration partagée pour le parcours de l'intervenant.

La séance a débuté par un hommage à la mémoire du professeur Jean-Louis Basdevant.

#### 1. Des Fondements Théoriques à la Preuve Indirecte

L'exposé a débuté par une analogie sensorielle : si l'astronomie traditionnelle permet de « voir » l'univers (comme explorer une forêt silencieuse), l'astronomie gravitationnelle permet désormais de l'« écouter », révélant des événements invisibles par les moyens optiques.

Luc Blanchet a rappelé les piliers théoriques nécessaires à cette écoute :

- **Le Principe d'équivalence** : Base de la Relativité Générale (RG), il stipule que tous les corps tombent avec la même accélération. Ce principe a été validé avec une précision de  $10^{-15}$  par la mission satellite MICROSCOPE.
- **La Formule du Quadrupôle** : Dérivée par Einstein, elle prédit que l'émission d'ondes gravitationnelles est liée à la variation du moment quadripolaire de la source.
- **La Preuve Indirecte** : Avant les détecteurs modernes, la perte d'énergie orbitale du pulsar binaire de Hulse-Taylor (découvert en 1974) avait déjà confirmé cette formule et l'existence des ondes gravitationnelles avec une précision remarquable.

#### 2. La Révolution des Détections Directes (LIGO/Virgo)

L'entrée en opération des interféromètres géants a transformé la physique théorique en astronomie observationnelle :

- **Trous Noirs Binaires (GW150914)** : La première détection directe en 2015 a révélé la fusion de deux trous noirs, un événement d'une puissance inouïe mais très bref (quelques dixièmes de seconde). Ces observations ont mis en évidence l'existence de trous noirs stellaires beaucoup plus massifs (jusqu'à 160 masses solaires) que ceux connus précédemment dans notre galaxie.
- **L'astronomie multimessager (GW170817)** : La fusion de deux étoiles à neutrons en 2017 a été observée à la fois par les détecteurs d'ondes gravitationnelles et par des télescopes (sursaut gamma, kilonova). Cela a permis de confirmer que les ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière (écart  $< 10^{-15}$ ) et que ces cataclysmes sont les usines cosmiques produisant les éléments lourds comme l'or et le platine.

### 3. Le Défi du Problème à Deux Corps

L'analyse de ces signaux requiert une précision théorique extrême pour modéliser le mouvement des sources :

- **Approche Hybride** : Comme il n'existe pas de solution exacte en RG pour deux corps, les physiciens combinent des calculs analytiques « post-newtoniens » (pour la longue phase de spiralement) avec des simulations numériques (pour la fusion finale).
- **Développement Post-Newtonien (PN)** : Luc Blanchet a détaillé la complexité de ces calculs, poussés jusqu'à l'ordre 4.5PN ( $v/c^9$ ). Ces corrections incluent des effets subtils comme le « tail » (rétrodiffusion de l'onde sur la courbure de l'espace-temps) et sont essentiels pour extraire les paramètres physiques des sources.

### 4. Perspectives Cosmologiques et Discussion

La session de questions-réponses a permis d'approfondir les implications de ces découvertes :

- **Expansion de l'Univers** : Les ondes gravitationnelles servent de « sirènes standards » pour mesurer la [constante de Hubble](#) ( $H_0$ ) de manière indépendante, offrant un espoir de résoudre la tension actuelle entre les mesures cosmologiques et locales.
- **Théorème de l'Aire** : L'observation récente d'un signal à très haut rapport signal/bruit a permis de vérifier le [théorème de Hawking](#) : l'aire totale de l'horizon des trous noirs augmente lors d'une fusion, validant une analogie thermodynamique fondamentale.
- **Limites et Avenir** : Bien que la matière noire et l'énergie noire restent des mystères majeurs composant 95% de l'univers, la Relativité Générale reste solide. L'avenir passera par le détecteur spatial [LISA](#) (prévu pour 2035), qui pourra observer des trous noirs supermassifs et potentiellement le fond diffus gravitationnel du Big Bang.

## B/ Transcription complète

Olivier Martin

Après une année d'interruption, on reprend notre cycle. Ça doit être la huitième à peu près de mémoire et on aborde pour la première fois un sujet qui aurait été normalement naturel pour nous, un sujet très scientifique, la recherche scientifique fondamentale. Vous allez voir le sujet. Je tiens d'abord à en profiter pour saluer la mémoire de l'un de nos professeurs récemment disparus et qui, un hommage lui sera fait ce jeudi à l'école. Je parle de Jean-Louis Basdevant. Par contre, nous sommes professeurs de physique. Nous aborderons ce soir un domaine, l'astrophysique, grâce à notre camarade Luc. Préalablement, je tiens à vous présenter Luc. Je ne vais pas reprendre trois heures, parce que son CV dure trois heures, mais je vais comprendre qu'il y a quelques éléments néanmoins intéressants. Tu as fait l'X, ça tout le monde le sait.

Olivier Martin

Après, tu as fait un DEA en astrophysique, puis en physique théorique, avant un doctorat en 1984. Déjà, je commence par les termes. « Sur la structure des champs gravitationnels radiatifs et leur couplage avec les sources matérielles ». Quelqu'un peut m'expliquer tout de suite ce que ça veut dire ? Voilà le premier thème. Puis une thèse d'habilitation en 1990 sur la contribution à l'étude du rayonnement gravitationnel émis par un système isolé. Le système isolé, je sais ce que c'est, mais en l'occurrence, je ne suis pas sûr. À part une année, tu as quand même fait une année dans l'industrie. À l'époque, c'était la SEP.

Olivier Martin

Comme ingénieur en R&D, tu étais en détaché du CNES, tu as consacré toute ta carrière, Luc, à la recherche scientifique au sein du CNRS, à l'Observatoire de Paris-Meudon tout d'abord, de 1990 à 1999, puis à l'Institut d'astrophysique de Paris depuis 1999, où tu exerces aujourd'hui en tant que directeur de recherche émérite. Émérite, ça veut dire très bien, ça veut dire aussi qu'on a atteint un certain âge. Durant ta carrière, tu as encadré 13 doctorants, dont un certain, je l'avais noté, François Larrourou, neveu de notre camarade. Tu as également une activité impressionnante dans le domaine de l'enseignement, en France, bien entendu, mais aussi en Italie, en Allemagne, en Espagne, en Belgique, au Brésil, au Mexique, au Japon, en Inde. Bizarrement, pas aux États-Unis. En tout cas, je ne l'ai pas vu dans ta fiche.

Olivier Martin

Tu as publié pas moins de 123 articles dans des revues internationales, avec comité de lecture, Tu fus membre de neuf groupes d'expertise scientifique et tu es appartenue à deux sociétés scientifiques, dont le Bureau des longitudes. Je ne sais pas bien le rapport entre les longitudes et l'astrophysique, mais tu nous l'expliqueras. Dont tu présideras en 2026, parce que c'est marqué en 2026. Donc, tu devrais présider bientôt, mais pas encore maintenant. Donc, si j'en crois ta bio. Enfin, et je vais terminer par-là, tu es honoré de cinq distinctions majeures que j'avoue, j'ai le plaisir de citer parce que je ne sais pas souvent. Le prix Langevin de physique de l'Académie des sciences, en 2002. Le prix spécial pour une découverte...

Olivier Martin

C'est en anglais, je vous l'ai traduit en français, pour une découverte majeure, le breakthrough, en physique fondamentale, sur la détection des ondes gravitationnelles en 2016, un siècle après leur prédiction par un dénommé Albert, que vous connaissez. Le prix Astrophysique et Sciences Spatiales de l'Académie des sciences, en 2018. C'est un prix un peu marrant. Le prix Jean Ricard, Je ne savais pas que le pastis menait à cela. Le prix Jean Ricard de la Société française de physique en 2020. Et enfin, respect, soyons sérieux quand même, la médaille Einstein de la Société Albert Einstein de Berne en 2023. Excusez du peu, comme l'on dit. Donc ce soir, notre conférence a pour thème l'astronomie des ondes gravitationnelles. Tu as souhaité, c'est la première fois que nous le faisons dans le cadre de nos conférences, nous faire un exposé que, par avance, je vais qualifier de magistral.

Olivier Martin

Donc tu vas nous présenter ton exposé et nous passerons aux questions, priorité aux questions de nos camarades en distance. Et après, pendant le dîner, vous aurez tout loisir à poser vos questions. Luc, je t'invite.

Olivier Martin

notre camarade Luc Blanchet avait bien voulu accepter que l'on enregistre cette conférence. Elle sera diffusée avec son accord aux membres de la promotion. Une synthèse chat-gépétienne sera réalisée par notre camarade Tristan et on verra si cette formule peut resservir plus tard. En tout cas, on va tester cette formule. Ça ne vous empêche pas d'écouter et de poser des questions intelligentes.

Philippe Charaix

Cela vous oblige à poser des questions intelligentes.

Olivier Martin

C'est pour ça que je vous préviens à l'avance Vous allez être enregistré.

Luc Blanchet

Merci beaucoup pour l'invitation et un grand merci pour nos caissiers Olivier et Philippe pour cette invitation et je suis très content d'être là avec vous ce soir. Donc, comme l'a dit Olivier, c'est un exposé qui sera purement scientifique sur l'astronomie gravitationnelle ou l'astronomie des ondes gravitationnelles qui a démarré il y a dix ans. Le 14 septembre 2015, par la détection d'une onde gravitationnelle, par un détecteur, par des expériences sur Terre, qui a été émise par la coalescence, plus exactement le mouvement orbital, puis la coalescence d'un système de deux trous noirs qui a formé un trou noir plus massif. Et de cet événement date une nouvelle astronomie, l'astronomie des ondes gravitationnelles, qui est très différente, distincte et complémentaire de l'astronomie traditionnelle, qui est basée sur la lumière essentiellement, les photons.

Luc Blanchet

Et cette astronomie, je vais donner une image qui a une certaine part de vérité pour essayer de vous montrer combien cette astronomie nouvelle est importante pour l'astronomie. Jusqu'à cette détection, les astronomes qui observaient le ciel en lumière étaient un peu comme des explorateurs qui explorent une forêt ou qui explorent la jungle, par exemple, et qui voient les objets, les feuilles, les arbres, les animaux alentours, mais qui n'entendent pas. Après la détection des ondes gravitationnelles, les astronomes explorateurs sont capables d'écouter les bruits qui se passent dans l'univers, qui sont en fait les ondes gravitationnelles, qui ont une analogie très forte avec les ondes sonores. Par exemple, ils sont capables d'entendre un lion qui va rugir à très grande distance, mais ils ne le verront pas. Par contre, ils l'entendront, ils pourront déduire que c'est un lion, etc.

Luc Blanchet

Maintenant, on peut, en astronomie, voir les étoiles, les galaxies, etc., en lumière, et puis aussi on peut écouter les ondes gravitationnelles. L'analogie très forte entre les ondes gravitationnelles et les ondes sonores, c'est que la longueur d'onde des ondes gravitationnelles est typiquement très grande par rapport à la taille de la source. Exactement comme le sont les ondes sonores. Au contraire, des ondes électromagnétiques qui sont produites par des émissions individuelles d'atomes dans la source et dont la longueur d'onde des ondes est à ce moment-là très petite par rapport à la taille de la source. C'est la différence fondamentale entre les deux et qui est l'intérêt, évidemment, d'avoir les deux astronomies en même temps.

Luc Blanchet

Donc, devant cette audience, j'ai pensé que je ne l'allais pas faire à un exposé complètement grand public, mais on va essayer de donner quelques détails, un peu quand même. Donc, on va commencer par quelques rappels de relativité d'ondes gravitationnelles. Il y aura quelques équations. Mais après, j'ai essayé de vous faire un panorama sur les avancées de l'astronomie gravitationnelle. Qui sera plus général et qui sera peut-être plus illustré. Après, on va essayer de revenir sur un problème théorique avec le problème à deux corps en relativité générale, c'est-à-dire le problème du mouvement et des ondes gravitationnelles émises par un système deux trous noirs en relativité générale. Alors, juste commençons par le commencement.

Luc Blanchet

La propriété la plus importante de l'interaction gravitationnelle, c'est ce qu'on appelle l'universalité de la chute libre, le fait que tous les corps dans un champ de gravitation acquièrent la même accélération dans ce champ, indépendamment de leur masse et de leur structure et composition interne. Ça, c'est un fait qui a été remarqué depuis très longtemps, depuis l'empire byzantin au 5e siècle, et puis tous les grands scientifiques ont cherché à tester ce fait qui est, qui était et qui reste mystérieux. Galilée avec

l'expérience apocryphe de la tour de Pise, Newton avec des pendules, Laplace avec le mouvement de la lune, etc. Cette universalité de la chute libre se traduit par l'égalité deux coefficients de masse :

- La masse inertielle, qui rentre dans la loi de Newton, dans la loi de la dynamique de Newton. Un corps soumis à une force  $F$  va acquérir une accélération  $A$  et le coefficient de proportionnalité c'est la masse inertielle ou l'inverse de la masse inertielle.

- Et puis le deuxième type de masse qui a priori est complètement différent, qui est l'analogie de la charge, c'est-à-dire la masse gravitationnelle. Un corps placé dans un champ  $G$  va être soumis à une force d'origine gravitationnelle proportionnelle à ce champ  $G$ .

Il y a eu des expériences récentes, des expériences modernes pour tester cette égalité de la chute des corps.

Luc Blanchet

On remonte à l'expérience d'Eötvös qui a utilisé un pendule de torsion où ils considèrent deux corps de nature différente qui vont réagir différemment au champ gravitationnel de la Terre et au champ inertielle dû à la rotation de la Terre. Et si jamais il y a une différence entre les rapports masse gravitationnelle sur masse inerte de ces deux corps, par exemple entre le bois et le platine, il va y avoir une torsion qui s'exerce sur le fil de torsion mesurable et d'où une limite de l'ordre de  $10^{-9}$  au principe d'équivalence, ce qu'on appelle maintenant le principe d'équivalence.

Luc Blanchet

Le meilleur test que l'on ait de ce principe a été fait par le satellite microscope qui a été développé par le CNES et l'ONERA, qui consiste à embarquer dans un satellite autour de la Terre deux cylindres emboîtés, coaxiaux, deux natures différentes, l'un en platine et l'autre en titane, et puis de mesurer l'accélération relative de ces cylindres dans le champ de la Terre, en fonction de la rotation du satellite autour de la Terre, et d'essayer de trouver une différence d'accélération qui signalerait une violation du principe d'équivalence. Et avec ça, c'est le meilleur résultat qu'on ait actuellement là-dessus, c'est  $10^{-15}$  comme égalité du principe d'équivalence. La relativité générale est basée sur le principe d'équivalence et aussi sur la relativité restreinte.

Luc Blanchet

On connaît tous la révolution de la relativité restreinte en 1905, qui a été motivée par des expériences célèbres au XIXe siècle, notamment l'expérience de Fizeau en 1851, qui a montré que la loi d'addition galiléenne des vitesses ne s'applique pas à la lumière. Et bien sûr les expériences de Michelson et Morley qui ont vérifié, qui ont montré l'impossibilité par une expérience d'interférométrie, pas laser mais d'interférométrie électromagnétique, qui ont montré la possibilité de la mesure de la vitesse absolue de la Terre par rapport à un éther hypothétique dans lequel les équations de Maxwell seraient valables, qui régissent le mouvement de la lumière. La nécessité de remplacer la relativité galiléenne par une nouvelle relativité qui est basée sur un groupe de transformation, le groupe de Lorentz.

Luc Blanchet

Et il y a eu une reformulation après par Minkowski de cette nouvelle relativité avec la structure de l'espace-temps, qui est une structure Minkowskienne, avec la fameuse signature « moins 1, plus 1, plus 1 » pour l'intervalle dans l'espace-temps, qui est une forme quadratique invariante dans l'espace-temps. L'invariance avait été montrée par Poincaré quelques années avant. Et qui donc apprend la structure Minkowskienne avec une signature  $(-1, 1, 1, 1)$ , une forme quadratique qui est non définie positive. L'autre élément extrêmement important pour mettre en place le principe d'équivalence dans une théorie relativiste a été la géométrie Riemannienne.

Luc Blanchet

En 1827, Gauss montre que la courbure intrinsèque d'une surface à deux dimensions plongée dans l'espace ordinaire à trois dimensions vous pouvez définir les deux courbures principales, les directions principales au voisinage d'un point de la surface, définir les deux courbures principales et Gauss montre que la courbure mesurable par des petits insectes pris dans la surface, sans référence à l'espace ambiant à trois dimensions, est en fait donnée par le produit des deux courbures principales. Après, c'est généralisé par Riemann qui était un étudiant de Gauss, Dans la géométrie Riemannienne, il montre que l'espace-temps, l'intervalle d'espace-temps doit être une forme quadratique non définie positive dans le cas de la relativité d'Einstein, non définie positive, quadratique des différences infinitésimales des coordonnées, et introduit le tenseur de Riemann comme la mesure de la courbure intrinsèque, c'est-à-dire mesurable, dans un espace-temps quelconque, ou un espace de dimension  $L$ .

Luc Blanchet

Grâce à cela, Einstein reformule le principe d'équivalence dans ce qu'on appelle le principe d'équivalence d'Einstein aujourd'hui. Il rajoute au principe d'équivalence faible, égalité, masse inertielle et masse gravitationnelle pour tous les corps, le fait que si tous les corps tombent avec la même accélération, dans les référentiels qui sont en chute libre et qui accompagnent les corps dans leurs mouvements et donc dans lesquels les corps libres sont en état d'apesanteur, il suppose que la relativité restante est valable et donc toute la physique non-gravitationnelle que l'on connaît, on va la retrouver inchangée dans le référentiel en chute libre de tous les corps et ça conduit immédiatement au fait que toute la matière, les champs non gravitationnels, tout ce qui n'est pas la gravitation doit se coupler de façon universelle à la métrique de l'espace-temps. Et ça abrite la théorie parfaite, la relativité générale.

Luc Blanchet

C'est suite à des discussions d'Einstein et de Grossman dans les années 1912, où Grossman avait indiqué à Einstein que pour décrire le principe d'équivalence, il y avait un formalisme qui existait déjà, c'était la géométrie Riemannienne. À l'été 1915, Einstein avait eu des conversations avec le mathématicien Hilbert qui lui avait suggéré que pour une bonne théorie, il fallait une action.

Luc Blanchet

Et qu'un bon candidat pour l'action c'était le scalaire de courbure qui est une contraction du tenseur de Riemann et finalement ça a conduit à la version définitive en novembre 1915 de la théorie qui est basée sur une action qui a une partie gravitationnelle qui est donc simplement le scalaire de courbure défini à partir du tenseur de Riemann et puis le principe d'équivalence d'Einstein, tous les champs de matière sont couplés à la métrique. Si vous variez ces équations par rapport à la métrique, vous obtenez les équations d'Einstein qui contiennent en elles-mêmes les équations du mouvement de la matière sous forme d'une conservation du tenseur énergie impulsion de la matière. Et dans la limite non-relativiste, vous retrouvez la théorie de Newton.

Luc Blanchet

Einstein, depuis l'article avec Grossman, avait compris que s'il utilisait la géométrie Riemannienne, il allait être capable, dans une nouvelle théorie, de garder dans une limite post-newtonienne, disons, non-relativiste, les équations de Newton. Et donc tous les succès de la mécanique newtonienne, la physique du XIXe siècle, la découverte de Neptune par le calcul, le problème des trois corps, etc. Et tout ça c'était clair déjà pour lui de façon physique dans son esprit. Alors, il s'est attaqué au problème des ondes gravitationnelles assez rapidement dans deux papiers de 1916 et de 1918. Il idéalise les équations d'Einstein autour de la métrique plate de Minkowski qui correspond à la relativité restreinte.

Luc Blanchet

Il obtient assez rapidement, après quelques erreurs qu'il a dû corriger dans un deuxième papier, une équation d'onde, après avoir imposé une certaine condition de jauge, analogue à la condition de Lorentz de l'électromagnétisme, et la matière est décrite par le tenseur énergie-impulsion, et puis on a à résoudre une équation d'onde, c'est-à-dire une équation d'Alembertien, le carré c'est l'opérateur d'Alembertien, l'opérateur des ondes, et il calcule le flux total émis sous forme d'ondes gravitationnelles par un système isolé, décrit par cette distribution de matière  $T$ , et il trouve la formule du quadrupôle, que cette émission d'ondes, ce flux d'énergie dû aux ondes gravitationnelles est proportionnel à une dérivée troisième du quadrupôle du système de la source. C'est une formule qui est analogue à la formule de Larmor pour l'électromagnétisme, sauf que c'est le quadrupôle et pas le dipôle. En fait, c'est lié au principe d'équivalence.

Luc Blanchet

Les dipôles ne rayonnent pas, ne varient pas à cause du principe d'équivalence. C'est le quadrupôle qui est le rayonnement dominant en relativité générale. Et puis vous avez une force de réaction de rayonnement, le système émet du rayonnement et donc sa dynamique va être perturbée et il y a un petit effet qu'on appelle dissipatif ou un effet qu'on appelle de réaction de rayonnement qui est un effet tout petit  $2.5 \text{ PN V sur } c$  puissance 5 au-delà du terme de Newton et une nomenclature introduite par Chandrasekhar. Donc c'est a priori un tout petit effet mais comme on le voit un petit effet qui est observable. La formule du quadrupôle d'Einstein avait été dérivée par Einstein dans un cas particulier où le système qui émet des ondes gravitationnelles a une dynamique qui génère les ondes gravitationnelles, mais cette dynamique est non gravitationnelle.

Luc Blanchet

Dans le livre de « théorie des champs » de Landau-Lipschitz, ce livre que j'avais eu le plaisir quand Alex avec Vincent Pasquier, on apprenait par cœur ce livre qui vaut le coup toujours d'être lu même par des experts après dans le professionnel. Dans le livre de de Landau-Lipschitz, il y a une démonstration de la formule du quadrupôle qui est valable pour des systèmes autogravitants et donc pour un système deux étoiles dont le mouvement c'est la loi de Newton gravitationnelle. La démonstration de Landau-Lipschitz est très intéressante et très utile dans le domaine. Il réécrit les équations d'Einstein. En introduisant dans le membre de droite des équations d'Einstein le terme de matière et puis aussi un terme qui correspondra à l'énergie impulsion du champ de gravitation lui-même.

Luc Blanchet

Dans le membre de droite, il y a un opérateur qui agit sur une certaine métrique qu'on appelle la métrique gothique dans le jargon. Et cet opérateur-là, quand vous en prenez la divergence à cause des symétries, ça donne immédiatement que le membre de droite est conservé. C'est absolument général. Après, quand vous intégrez cette équation, vous pouvez redériver la formule du quadrupôle qui est valable maintenant pour un système autogravitational. C'est une très jolie démonstration de l'avidité de ces ondes gravitationnelles et de la formule du quadrupôle. Cette formule du quadrupôle a été testée en astrophysique déjà par la dynamique de pulsar binaire de Hulse-Taylor, découverte en 1974.

Luc Blanchet

C'est un pulsar, donc une étoile à neutrons, qui est fortement magnétisée, en rotation rapide, qui émet des ondes radios à chaque rotation de l'étoile, parce que les ondes radios sont émises le long d'un axe qui est l'axe du dipôle magnétique et qui diffère de l'axe de rotation de l'étoile à neutron. Et ce système-là, c'était la première fois qu'on observait ça, cet étoile à neutrons n'est pas seule, elle est en orbite autour d'une étoile compagnon qui est probablement, très probablement, une autre étoile à neutrons. En analysant les instants d'arrivée successive des pulses radios émis par le pulsar sur Terre, vous arrivez à reconstituer l'orbite très précisément du pulsar. A ce moment-là, vous obtenez que c'est une orbite képlérienne, mais qu'il y a des corrections relativistes 1PN, 2PN, etc.

Luc Blanchet

Vous mesurez les corrections 1PN et puis à l'ordre d'après, 2,5 PN, vous avez l'effet dû à l'émission de rayonnement gravitationnel par le système, donc il y a une perte d'énergie. Liées à l'émission d'ondes gravitationnelles, les deux étoiles à neutrons vont se rapprocher l'une de l'autre, la période orbitale va diminuer, la fréquence orbitale va augmenter, et puis vous pouvez appliquer la formule du quadrupôle et obtenir une formule qui est donnée par ça, qui vous donne la prédiction pour la décroissance de période du pulsar binaire et qui est totalement en accord avec les observations. Donc c'est une vérification de la formule du quadrupôle, mais on peut faire aussi un calcul d'équations du mouvement du pulsar binaire jusqu'à l'ordre 2.5 PN de réaction de rayonnement qui est exactement ça.

Luc Blanchet

Ça a été fait par Damour et Deruelle, et Thibault Damour était mon directeur de thèse dans les années 80. Et le résultat confirme totalement la formule du quadrupôle et les observations qui ont été menées par Taylor et collaborateurs. Maintenant, on a le réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles. C'est un réseau international qui comprend les détecteurs américains LIGO et Virgo qui sont sur la côte est et la côte ouest américaine. Il y a le détecteur franco-italien Virgo qui est situé à Pise en Italie. Et puis, il y a d'autres détecteurs comme le détecteur japonais KAGRA et peut-être un détecteur en Inde aussi et d'autres petits détecteurs. Ce sont des détecteurs qui sont des interféromètres lasers, simplement comme des Michelson, sauf que les bras des interféromètres sont très grands, plusieurs kilomètres. Et que ces bras ont des cavités de Fabry-Pérot.

Luc Blanchet

Quand une onde gravitationnelle passe au travers de ces détecteurs, il y a un mouvement relatif de la distance entre les miroirs qui est mesuré par interférométrie, en mesurant la différence de chemin optique dans les deux bras de l'expérience. On étudie la figure des franges d'interférence à la sortie de l'instrument pour détecter l'onde gravitationnelle. Alors que les détecteurs étaient à peine encore en phase opérationnelle, en 2015, le 14 septembre, il y a eu un événement, le premier événement de trou noir qui a été observé et je vous donne là les résultats qui ont été mesurés. Pour la forme d'onde dans

le premier détecteur américain LIGO qui était à Livingston (Louisiane) et puis dans le deuxième qui correspond à l'autre détecteur de l'autre côté du continent américain.

Luc Blanchet

Et le signal qui est observé est à cette forme-là, donc sinon il y a pas mal de bruit encore à l'époque. Il consiste en une oscillation qui correspond à deux probablement trous noirs qui ont un mouvement orbital. La fréquence des ondes gravitationnelles va être donnée par la fréquence orbitale du système, c'est deux fois la fréquence orbitale du système.

Luc Blanchet

Et puis au fur et à mesure qu'il y a des ondes émises, la distance entre les deux trous noirs augmente, la fréquence orbitale et donc la fréquence de l'onde gravitationnelle augmente, et puis à un moment, il y a la fusion des deux étoiles, et puis il y a un pic maximum de l'amplitude, et puis après, formation d'un trou noir unique, qui va encore vibrer à cause de la dynamique de la collision avant, qui va encore émettre des ondes gravitationnelles pour arriver sur un état stationnaire qui n'émet plus de rayonnement gravitationnel et qui va être décrit par un trou noir en rotation. En relativité générale, c'est un trou noir de Kerr. Si vous superposez les deux signaux, il y a un écart de quelques millisecondes entre les deux signaux, vous allez obtenir un accord parfait. Et les deux signaux, comme vous voyez, sont extrêmement clairs.

Luc Blanchet

On n'a pas l'habitude de ça dans l'astronomie traditionnelle. C'est une des propriétés de l'astronomie gravitationnelle, c'est une astronomie de précision. Avec ce signal très précis, vous pouvez faire des tests de physique fondamentale. La relativité générale, c'est une théorie qu'on croit être fondamentale, qui est probablement valable à toutes les échelles, jusqu'à peut-être l'échelle de Planck. Et vous pouvez tester par exemple la solution du problème des deux trous noirs en relativité générale directement à l'aide en comparaison avec le signal observé.

Luc Blanchet

Cette année, en janvier dernier, il y a eu un signal deux trous noirs qui est à peu près comparable au premier d'il y a dix ans sauf que les détecteurs ont fait énormément de progrès en dix ans et le signal qui a été observé est extrêmement clair avec un signal sur bruit de 80 qui est absolument gigantesque alors que c'était de 20 il y a dix ans donc la détection est totalement unambiguë, les prédictions théoriques sont totalement en accord, comme on va le voir tout à l'heure avec ces signaux qui sont observés. Je vous montre aussi ces deux graphes, c'est le signal dans le plan qu'on appelle le temps-fréquence, je pense que vous êtes tous familiers de la méthode d'analyse du signal temps-fréquence, où on représente le signal en fonction du temps et puis la fréquence en fonction du temps.

Luc Blanchet

Le signal gravitationnel se caractérise par cette montée en fréquence et cette montée aussi en amplitude, qui est donnée par le code de couleur qui est là, le fait que la fréquence augmente au cours du temps, ça traduit le fait que la masse totale du système décroît, parce qu'il y a l'émission d'ondes gravitationnelles. L'onde gravitationnelle emporte de la masse au système, qui est en fait prise sur l'énergie gravitationnelle de liaison entre les deux corps, et pour que l'on se ramène à des choses familiales, Pourquoi la fréquence augmente-t-elle si la masse décroît ? Prenez la loi de Kepler. Tout ça, c'est de la gravitation. La troisième loi de Kepler,  $GM = \omega^2 a^3$  avec  $G$ =constante de gravitation, où  $M$ , c'est la masse,  $\omega$ , c'est la fréquence orbitale et  $a$ , c'est le demi-grand axe de l'orbite.

Luc Blanchet

On applique la loi de Kepler pour un système compact, c'est-à-dire les deux étoiles sont très proches l'une de l'autre, La distance entre les deux étoiles est en fait donnée par la masse elle-même. En unité relativiste, le demi-grand axe est essentiellement  $GM$  sur  $c^2$  Et si vous injectez ça dans la loi de Kepler, vous voyez que la fréquence doit être inversement proportionnelle à la masse. Donc là, le système perd de la masse, sa fréquence augmente, c'est le chirp gravitationnel. On l'appelle le chirp parce que c'est l'analogie avec des ondes sonores. Un chirp, quand on a traduit en ondes sonores, ce ressemble au gazouillis d'un oiseau.



Luc Blanchet

Les masses sont calculées en comparant avec par exemple la formule du quadropôle, mais avec la formule du quadropôle ce n'est pas très précis donc le résultat ne sera pas très bon. Les masses sont mesurées par la comparaison avec la prédiction théorique et la distance est mesurée directement dans le signal. La forme de l'amplitude qui est là du signal et l'évolution de la fréquence au cours du temps vous donne la distance de la source, en l'occurrence 400 Mpc. C'est l'analogue de ce qu'on appelle les chandelles standards dans l'astronomie traditionnelle. Sauf que là, c'est plutôt comme des ondes sonores, donc on les appelle plutôt des sirènes standards. C'est-à-dire que ce sont des sources dans lesquelles on peut mesurer la distance directement à partir de la propriété de la source. Donc ça, c'est très important pour l'astronomie gravitationnelle.

Luc Blanchet

Alors il y a 200 signaux de trous noirs qui ont été détectés et validés jusqu'à présent à peu près. Les détecteurs sont essentiellement sensibles dans la dernière région qui concerne la dernière phase du signal qui concerne la fusion des deux trous noirs. Il y a un éventail de masse important jusqu'à 240 masses solaires. L'événement le plus puissant, le plus massif de ce point de vue-là s'est produit en 2023. Il y a un trou noir avec un objet dont on ne sait pas ce que c'est. Il n'a que 2,5 masses solaires. Ce serait soit l'étoile à neutrons la plus massive connue, soit le trou noir le plus léger connu. Mais en fait, rien ne marche très bien. On ne sait pas très bien ce que c'est que cet objet.

Luc Blanchet

Il y a deux candidats où il y a une coalescence entre une étoile à neutrons et un trou noir. Et puis, encore une fois, les signaux sont parfaitement en accord avec la prédiction de la relativité. Alors, les masses qui sont détectées de tous ces trous noirs, détectées par onde gravitationnelle, par la fusion, d'abord le spiralement et la fusion des deux étoiles, c'est des masses qui sont très importantes. Donc ça a été une surprise quand il y a eu les détections, avec des masses de l'ordre de 30 à 50 masses solaires, voire 80 masses solaires qui vont former un trou noir de 160 masses solaires, et le record c'est 240 masses solaires actuellement.

Luc Blanchet

Et vous voyez qu'il y a deux familles de trous noirs qui sont les trous noirs observés par ondes gravitationnelles, très massifs, et il y a une autre famille qui sont aussi les trous noirs connus dans notre galaxie. Qu'on mesure parce que ce sont des trous noirs qui sont en orbite autour d'une étoile normale. Il y a un transfert de masse de l'étoile normale aux trous noirs, formation d'un disque d'accrétion autour du trou noir, la matière est chauffée et émet en rayon X. C'est comme ça qu'on détecte des trous noirs dans notre galaxie. Il y a un certain nombre de trous noirs connus dans notre galaxie qui ont des masses beaucoup plus faibles, entre 5 et 15 au mieux masses solaires. Et donc ça posait un problème. On s'est demandé pourquoi tous ces trous noirs observés par VIRGO sont-ils si massifs ?

Luc Blanchet

Pourquoi il n'y en aurait-il pas dans les galaxies proches qui seraient loin de la phase de coalescence ou qui seraient peut-être en orbite autour d'étoiles normales ?

Luc Blanchet

Et c'était un mystère jusqu'à ce que récemment, le satellite Gaia, qui est un satellite d'astrométrie, un satellite européen d'astrométrie, détecte qu'en fait il y a un trou noir qui est en orbite autour d'une étoile normale, qui est donc détecté par le transfert de matière de l'étoile normale jusqu'au trou noir, et c'est un trou noir qui a une masse de 32 masses solaires, et qui donc réconcilie un petit peu ces deux populations un peu distinctes, des trous noirs très massifs que l'on voit très loin par le rayonnement gravitationnel, de trous noirs qui sont beaucoup moins massifs mais qui sont plus près et qui sont loin de coalescer et d'ailleurs qui forment un système binaire uniquement avec des étoiles normales ou peut-être des étoiles à neutrons.

Luc Blanchet

Les étoiles à neutrons ont été observées aussi par les détecteurs et notamment, là ce sont toutes les étoiles à neutrons connues dans notre galaxie, mais il y a aussi un système d'étoiles à neutrons qui a formé un trou noir et ça a été le deuxième événement extrêmement important pour la détection d'ondes gravitationnelles et l'astronomie gravitationnelle. C'est l'événement de collision d'étoiles à neutrons qui a survécu en août 2017, et le signal d'étoiles à neutrons, donc les masses vont être beaucoup plus faibles que pour les trous noirs. Une étoile à neutrons, ça a une masse de l'ordre de 1,4 masse solaire.

Le signal, à cause de cette masse qui est beaucoup plus faible, la fréquence va être beaucoup plus élevée, et on observe cette fréquence de 30 Hertz jusqu'à à peu près 1000 Hertz.

Luc Blanchet

Et le signal dans le temps-fréquence a une forme très différente des trous noirs binaires. Il va y avoir la longue phase de spiralement dans laquelle il y a des milliers de cycles avant la coalescence finale. Le signal va durer plusieurs minutes au lieu de quelques dixièmes de seconde. Il y a un signal sur bruit très important aussi. On mesure de façon très précise les masses. La distance aussi par les mêmes techniques que tout à l'heure pour les trous noirs binaires et la chose importante c'est que là vous avez des milliers de cycles à observer et il vous faut suivre le signal pendant des milliers de cycles jusqu'à la coalescence pour avoir un très bon signal sur bruit et pour avoir une très bonne mesure des paramètres de la source.

Luc Blanchet

Alors la coalescence dans le cas des étoiles à neutrons se passe à très haute fréquence en fait c'est à plusieurs milliers de Hertz donc le signal va jusqu'à plusieurs milliers de Hertz et les détecteurs ne sont pas très précis à quelques kHz. Donc on ne peut pas mesurer malheureusement la coalescence elle-même deux étoiles à neutrons. C'est dommage parce qu'il se passe des choses très intéressantes pour la coalescence deux étoiles à neutrons. D'abord, la phase dite spiralante reste la même que pour des trous noirs. Ça ne dépend que de la masse des deux corps compacts et éventuellement de leur spin, leur rotation.

Luc Blanchet

Au moment de la coalescence, dans le cas des étoiles à neutrons, ça devient beaucoup plus compliqué parce que le signal dépend des détails de la structure interne dans les étoiles à neutrons, notamment l'équation d'état de la matière nucléaire au centre de l'étoile à neutrons et d'autres propriétés de l'étoile à neutrons comme l'intérieur superfluide, la croûte, etc. Il y a énormément de physique qu'on pourrait faire en observant cette phase de fusion d'étoiles à neutrons et en la comparant à des calculs numériques comme celui qui est représenté ici. Néanmoins, les détecteurs sont sensibles dans les dernières orbites avant la coalescence deux étoiles à neutrons aux effets de marée qui devraient exister entre les deux étoiles à neutrons. Il va y avoir une déformation due aux effets de marée. Les étoiles à neutrons vont acquérir un quadrupôle de déformation.

Luc Blanchet

Ce quadrupôle, on peut mettre des bornes supérieures sur l'existence de ce quadrupôle et contraindre la physique à l'intérieur de l'étoile à neutrons, notamment contraindre l'équation d'état de l'étoile à neutrons dans le centre. C'est ce qui a été fait dans le cas de l'événement de 2017. Vous pouvez montrer qu'il y a un paramètre pour chaque étoile à neutron, vous pouvez introduire un paramètre de déformabilité ou de polarisabilité qui va décrire la façon dont l'étoile à neutron réagit à un champ de marée. Ce paramètre est décrit à l'aide d'un nombre de Love, c'est une vieille notion du début du XXe siècle.

Luc Blanchet

Ce paramètre de déformation, il va y en avoir un pour chacun des corps et puis en fonction d'une certaine combinaison des deux paramètres de déformation pour les deux étoiles, vous allez voir que votre signal va être un petit peu différent de ce que vous attendez pour des corps ponctuels. Vous avez une incidence de la structure interne des deux étoiles à neutrons qui se cache dans tous ces paramètres qui servent, notamment le rapport du rayon à la masse de l'étoile à neutrons qui dépend de tous les paramètres à l'intérieur. En utilisant les observations de Ligo-Virgo, vous pouvez contraindre les équations d'état, là vous avez une série d'équations d'état, les équations d'état permises, ce sont les équations d'état les plus douces pour lesquelles l'étoile à neutrons sera la plus douce.

Luc Blanchet

Qui vont résister mieux à l'effondrement gravitationnel et pour lesquels l'étoile à neutrons sera la plus grosse. Et d'ailleurs, je me suis encore trompé. Il faut que l'étoile à neutrons soit la plus... Le rayon soit le plus petit possible pour passer. Et donc, ça doit être l'équation d'état la plus douce qui est permise. Et avec ce test, on a accès à de la physique nucléaire à l'intérieur des étoiles à neutrons. La chose aussi cruciale pour l'astronomie gravitationnelle, ça a été l'émergence de l'astronomie multi-messagère avec l'observation simultanée avec la coalescence d'un sursaut gamma qui a été observé par les satellites Fermi et Intégrale. Voilà la coalescence, l'instant zéro c'est la coalescence mesurée par le

signal d'onde gravitationnelle. Quelque chose comme 1,7 seconde après la fusion, il y a eu un sursaut gamma qui a été observé.

Luc Blanchet

C'est un sursaut gamma extrêmement proche qui est probablement vu de côté par rapport à un G relativiste. Dans un sursaut gamma, c'est produit par un G relativiste. Par le système et le sursaut gamma a été détecté un peu après la coalescence, probablement dû à des mécanismes physiques qui se passent au niveau de la source lors de la coalescence, mais néanmoins cette différence de 1,7 seconde au niveau de la source entre les temps d'arrivée de l'onde gravitationnelle sur Terre et le sursaut gamma, l'onde électromagnétique, vous donne que la vitesse des ondes gravitationnelles est égale à la vitesse de la lumière à 10-15 près. Donc un test qui a, malheureusement ou heureusement, je ne sais pas, invalidé plein de théories alternatives de la gravitation, notamment des théories motivées par la cosmologie, l'énergie noire, des alternatives à l'énergie noire, etc.

Luc Blanchet

Qui sont éliminées par le test sur les ondes gravitationnelles. Dans ces théories, les ondes gravitationnelles sont prévues de se déplacer à des vitesses différentes de celles de la lumière. Le jour ou le soir même de la détection, les détecteurs LIGO et Virgo avaient indiqué une région dans le ciel dans laquelle la coalescence avait eu lieu. D'abord, les détecteurs ont mesuré la distance de la coalescence, 40 mégaparsecs. Et puis, en prenant l'intersection entre la prédiction Virgo et la prédiction LIGO, il y a une petite bande du ciel dans laquelle la coalescence devait avoir lieu.

Luc Blanchet

Dans cette bande du ciel, il y avait une cinquantaine de galaxies et immédiatement tous les télescopes optiques sur Terre se sont jetés sur observer ces cinquante galaxies et ils ont très rapidement déterminé qu'il y a une galaxie qui ne payait pas de mine jusqu'à présent et pour laquelle il y a eu un nouveau transitoire qui a été observé, qui n'était pas là quelques jours avant et qui est la source de l'onde gravitationnelle. Et plus exactement, cette source de l'onde gravitationnelle, c'est une explosion qui a eu lieu, qu'on appelle une kilonova, qui est à peu près 1000 fois plus puissante qu'une nova, mais aussi 1000 fois moins puissante qu'une supernova. C'est une explosion qui a lieu parce que les deux étoiles à neutrons collisionnent et il y a des vitesses d'éjection extrêmement importantes.

Luc Blanchet

La plupart des neutrons dans les deux étoiles à neutrons vont s'effondrer gravitationnellement pour former un trou noir. Mais tous les neutrons se mélangent avec des éléments plus lourds qui étaient présents déjà dans les étoiles de la neutron pour former des éléments encore plus lourds. Donc il y a une synthèse d'éléments extrêmement lourds qui généralement sont instables, qui vont se désintégrer par des intégrations radioactives et finalement pour former certains éléments au-delà du fer, comme le césium et le téllure, qui sont mesurés dans les spectres de la kilonova. Là vous voyez un spectre qui a été pris de la kilonova lors de cet événement de 2017. Vous avez essentiellement la forme d'un corps noir à une température de l'ordre de 4000 degrés.

Luc Blanchet

En noir, c'est le spectre qui est observé et vous voyez qu'il y a une indication qu'il y a des raies qui ont été observés. En l'occurrence, ce sont des raies d'absorption dus au césium et téllure qui sont des éléments très lourds et qui ont été synthétisés lors de la kilonova. Ce qui est intéressant, c'est que les raies sont élargies à cause de la vitesse d'éjection très importante, 60 000 km par seconde dans la kilonova. Ce qui est intéressant, c'est que tous ces éléments lourds, au-delà du fer, césium, téllure, le lanthanide, le platine, l'or, l'uranium, etc., sont très difficiles à produire dans les supernovas. Maintenant, on explique la plupart de la présence de ces éléments lourds, notamment sur Terre, par des collisions d'étoiles à neutrons. Ils ont été synthétisés, ces éléments lourds, dans les collisions d'étoiles à neutrons. Ça a été une avancée majeure de l'astronomie multi-messages.

Luc Blanchet

Alors j'ai combien de temps encore ? Je vais passer la mesure de la constante de Hubble, je pourrais y revenir s'il y a une question dessus, et ce que je vais faire c'est terminer par quelques retours à la théorie pour le problème des deux corps en relativité générale.

Déjà, il n'y a pas de solution exacte en relativité générale pour le problème des deux corps, donc il faut recourir à des approximations. Et l'une des approximations les plus célèbres, c'est le développement post-newtonien qui va considérer le mouvement deux corps de masse  $m_1$  et  $m_2$  à l'approximation

newtonienne, donc on reconnaît la loi de Newton ici, et puis on va y mettre des tas de corrections relativistes qui sont prédites, calculées en relativité générale.

Luc Blanchet

La première correction 1PN, c'est-à-dire 1 sur  $c^2$ , est connue depuis les premiers temps de la Relativité Générale par [Lorentz](#) et [Droste](#) et il y a un article fameux de [Einstein-Infeld-Hoffmann](#) des années 1938. On continue le développement et on connaît ce développement jusqu'à des ordres très élevés. Il va y avoir des termes conservatifs qui maintiennent l'énergie totale du système. Comme je le disais tout à l'heure, il y a des termes de réacteurs de rayonnement qui apparaissent à des ordres impairs, 2.5 PN, 3.5 PN, etc. Il y a des termes non linéaires qui sont donnés par des intégrales qui s'étendent sur tout le passé du système binaire et qui sont dus à des problèmes de diffusion non linéaire du rayonnement quand il est émis et qui revient pour modifier la dynamique de la source.

Luc Blanchet

Et puis l'état de l'art, c'est que tout ça c'est connu jusqu'à quatrième et récemment on a même calculé le coefficient d'après qui est encore un coefficient dissipatif mais qui contient certaines subtilités liées au recul du système par émission d'ondes gravitationnelles. Il y a un recul du centre de masse du système lié à l'émission d'ondes gravitationnelles, et ça se traduit par des termes dans ces équations. Et puis là, vous voyez la précession orbitale qui est donnée par, qui est prédite par le terme 1PN. C'est exactement la même précession que dans le cas de la planète Mercure, qui a une précession orbitale qui a été expliquée par la relativité générale.

Luc Blanchet

Alors juste pour passer rapidement si j'ai plus trop de temps, les méthodes pour calculer les équations du mouvement, donc il y a un pléthore de méthodes, il y a des méthodes traditionnelles en relativité générale classique, et on utilise le [formalisme Hamiltonien](#), on utilise une action qu'on appelle [l'action de Fokker](#), et puis plus récemment il y a eu des méthodes qui sont inspirées par la théorie quantique des champs, la théorie effective des champs et des développements diagrammatiques en développement de [diagrammes de Feynman](#). Dans toutes ces méthodes, il y a un outil qui est très important. Pour aller à des ordres très élevés, dont on a besoin pour les détecteurs, il y a des [régularisations](#) qui sont nécessaires. Notamment, on modélise les corps compacts par des particules ponctuelles, donc des distributions de Dirac, des fonctions delta de Dirac.

Luc Blanchet

Et ça, c'est possible, mais le prix à payer, c'est qu'il y a des divergences qui apparaissent qu'il faut régulariser et ensuite renormaliser. On utilise la [régularisation dimensionnelle](#) qui a été introduite pour la théorie quantique des champs et qu'on a importée dans la théorie classique de la relativité générale pour le mouvement classique en post-Newtonien. Cela permet de résoudre ce problème des divergences ultraviolettes et on a aussi des problèmes de divergences infrarouges qui apparaissent à des ordres très élevés. La méthode que nous utilisons dans notre groupe, c'est ce qu'on appelle l'action de Fokker. On repart de ce que je vous avais montré tout à l'heure, [l'action d'Einstein, Einstein-Hilbert](#). Il faut fixer la jauge, donc il y a un terme qui fixe la jauge dans cette action, il y a le terme qui correspond à des particules ponctuelles.

Luc Blanchet

Ce qu'on fait, c'est qu'on insère dans [l'action d'Einstein-Hilbert](#) une solution des équations des équations de champ qui donnent la métrique en fonction des paramètres de la source pour un système de  $n$  particules et après injection dans l'action, on obtient ce qu'on appelle l'action de Fokker et les équations du mouvement de la matière sont données par exactement la variation de cette action de Fokker. C'est une méthode très efficace. Comme je le disais, il y a aussi des méthodes de théorie effective des champs, des développements diagrammatiques, mais on peut montrer que ces développements sont totalement équivalents aux développements post-newtoniens.

Luc Blanchet

Vous allez avoir un diagramme qui correspond à la formule du quadrupôle, c'est à dire l'émission par une source quadripolaire. Vous allez avoir des effets non linéaires qui vont être donnés par des effets de tails qui apparaissent à un certain ordre post-newtonien, qui sont décrits par des diagrammes un peu plus compliqués. Et puis, comme ça, il y a des séries de diagrammes que vous pouvez calculer. Et le développement post-newtonien est équivalent à [l'effective Field theory](#) pour les diagrammes en arbre, c'est évidemment classique, vous devez négliger les boucles quantiques dans les diagrammes,

c'est purement classique, mais dans la limite classique de la théorie effective des champs, vous retrouvez le développement post-newtonien.

Luc Blanchet

Ces calculs post-newtoniens ont été motivés par une série de papiers dans les débuts des années 90 où il était montré qu'à l'époque on ne disposait que de la formule du quadrupôle et dans ces papiers, notamment le papier du groupe de Caltech avec Kip Thorne et ses collaborateurs. Ces papiers montraient qu'en fait la formule du quadrupôle n'allait pas permettre de faire les détections et de mesurer les paramètres des signaux précis, etc. Et qu'il fallait développer le développement post-newtonien au-delà de la formule du quadrupôle jusqu'à des ordres très élevés. Vous avez une estimation de l'évolution de la phase orbitale de ces binaires en fonction, au-delà de la formule du quadrupôle. Dans ce papier, il montrait qu'il fallait aller jusqu'à des ordres comme 3PN, peut-être voir 4PN, 3PN à l'époque, de façon à extraire toute l'information contenue dans les signaux d'ondes gravitationnelles.

Luc Blanchet

Tout cela s'est obtenu par la technique du filtrage adapté, le filtrage optimal, le filtre de Wiener. La prédiction théorique pour la forme d'onde est la suivante. Vous allez avoir toute la phase spiraleante initiale du système des deux corps. Qui va osciller pendant des milliers de cycles dans le cas des étoiles binaires d'étoiles à neutrons et puis qui va osciller pendant peut-être une cinquantaine de cycles ou une vingtaine de cycles dans le cas des binaires de trous noirs. Et ça, c'est décrit analytiquement par le post-newtoniens jusqu'à un ordre très élevé, 4.5 PN par exemple en ce moment, au-delà de la formule du quadrupôle, pour la phase spiraleante. Et ça, c'est relié à une simulation numérique de la phase de fusion qui a été obtenu après des années de développement des méthodes numériques en 2005, qui donne la phase de fusion.

Luc Blanchet

Il faut donc connecter les deux, la partie analytique du signal, qui ne permet pas de recréer la phase de fusion mais qui par contre a une précision extraordinaire très loin avant la fusion et par contre a la phase numérique qui est très précise pour la fusion mais qui par contre ne sait pas calculer beaucoup de cycles avant. Il y a des méthodes très sophistiquées pour le raccord du post-newtoniens au résultat numérique. Et pour terminer, c'est mon dernier transparent, Est-ce que réellement tous ces paramètres post-newtoniens, par exemple, ont un rôle dans les observations LIGO-VIRGO ? Voilà une estimation, on mesure ces paramètres post-newtoniens jusqu'à des ordres 3,5 PN, par exemple,  $\phi_7$ , ça c'est l'ordre newtonien, 1PN, etc.

Luc Blanchet

Et vous voyez que là, ce sont les mesures de ces paramètres avec les détecteurs actuels et les 200 détections qui ont eu lieu, et on voit que ces paramètres sont mesurés à peu près à 100% près pour les plus élevés. Et puis là, c'est à peu près  $10^{-1}$  et quelques fois ça va jusqu'à  $10^{-2}$ . Mais pour les futurs détecteurs comme Einstein Telescope, qui est le futur détecteur d'ondes gravitationnelles européen, vous détectez, vous allez mesurer ces paramètres avec une très grande précision, d'où des tests de la relativité générale. Et puis je termine, je ne résiste pas à vous montrer quelques formules pour ces coefficients post-newtoniens. Par exemple, ici il y a le coefficient 1,5 PN qui est celui-là, qui devrait être testé à  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$ .

Luc Blanchet

Qui est  $4\pi$ , juste, donc avec les ondes gravitationnelles vous pouvez mesurer la valeur de  $\pi$ , et qui est due à cet effet non linéaire, « Tail », et puis voilà un coefficient 3PN, et puis encore on sonnait les coefficients jusque-là, qui sont alors là, ça dépend des polynômes dans le rapport des maths, et puis là vous avez  $\pi$  carré qui intervient, la constante de l'air, etc. Et puis je vais terminer là en laissant pour la lecture le résumé des quelques avancées de l'astronomie gravitationnelle qu'on a.

Olivier Martin

Merci beaucoup. Merci, j'espère que vous m'entendez. Imaginez que j'ai demandé un exposé grand public. J'imagine ce qu'aurait été si j'avais demandé scientifique !

Olivier Martin

Parmi les quatre personnes à distance, avez-vous des questions ?  
Posez-en parce qu'on vous coupera la parole pendant le dîner.

Philippe Étienne Zermizoglou

Bravo. Super intéressant, super impressionnant, je ne veux pas dire que je n'ai rien compris, mais en tout cas j'ai compris la beauté, donc ça c'est déjà bien.

Moi j'ai deux questions, une première réaction au tout début de l'exposé, j'ai cru voir dans les échelles de temps sur la fusion des deux trous noirs, qu'en gros, le signal final montrait qu'en fait cette phase finale de fusion était d'environ un dixième de seconde, c'est ça ? Les deux trous noirs fusionnent en un dixième de seconde ?

Luc Blanchet

Oui, alors un dixième de seconde, ça comprend 4 ou 5 orbites avant la fusion. Les vitesses des trous noirs orbitales, c'est de l'ordre 0,7 fois la vitesse de la lumière. Donc c'est extrêmement relativiste, extrêmement rapide, et en 5 cycles, vous avez 5 cycles orbitaux, c'est quelques dixièmes de seconde. Mais alors tout ça dépend des masses. Là c'est vrai pour des masses importantes. Si vous avez des masses beaucoup plus faibles, comme par exemple des binaires d'étoiles à neutrons, alors là ce n'est pas un dixième de seconde, c'est quelques minutes.

Luc Blanchet

Encore une fois, c'est le fait que la bande de fréquence des détecteurs est fixée, et que plus le signal est massif, plus la source est massive et plus la fréquence est basse et à ce moment-là vous sortez de la bande de fréquence des détecteurs et vous détectez très rapidement que vous n'avez pas accès à une longue partie du signal.

Christophe de Dreuille

D'accord et puis j'avais une deuxième question d'un ordre différent donc j'ai bien compris que tu insistais sur dans ton exposé sur la précision des vérifications qui permettent de valider en fait à plusieurs reprises la théorie relativiste et donc ma question c'est est-ce que c'est d'un poids important dans ce que j'appelle la lutte entre la relativité et la théorie quantique puisque moi j'avais compris jusqu'à présent qu'il y avait un peu plus de véracité de la théorie quantique versus la théorie relativiste. Je ne sais pas si ma question a un sens.

Luc Blanchet

Tout ça, c'est classique. C'est-à-dire que les tests de la relativité qui sont faits, c'est pour déterminer s'il y aurait, par exemple, des extensions de la relativité, où vous auriez la relativité générale plus, par exemple, un champ supplémentaire, comme un champ scalaire, par exemple. Et tout ça, c'est des théories qui seraient utilisées de façon classique. Elles permettraient d'avoir, par exemple, des modifications des paramètres post-newtoniens, que je montre à la fin, mais c'est purement classique, c'est pas du tout quantique. De plus, ces théories alternatives, elles sont motivées par la cosmologie en grande partie, c'est-à-dire par exemple l'énergie noire, qui est une constante cosmologique mais qu'on pense que peut-être pourrait varier et être un champ scalaire qui se rajoute à la relativité générale. Et là aussi, c'est des déductions purement classiques pour les effets de ces théories alternatives.

Luc Blanchet

Donc il y a assez peu de travaux avec les ondes gravitationnelles sur une connexion éventuelle à la mécanique quantique, et aussi loin que je le connaisse, il n'y a aucun... Enfin disons, ce n'est absolument pas pertinent pour l'instant avec les ondes gravitationnelles, même la théorie quantique.

Christophe de Dreuille

Merci. Petite question, bonjour Luc, c'est Christophe de Dreuille.

Christophe de Dreuille

Je vais très vite. Ma question, c'était par rapport à la mesure qui est faite. Je comprends qu'on estime la distance des trous noirs. Est-ce qu'on peut aussi estimer leur localisation en utilisant plusieurs détecteurs simultanément, en faisant une sorte de triangulation ?

Luc Blanchet

Oui, exactement. Alors, il faut plusieurs détecteurs. Il faut au moins trois détecteurs. A ce moment-là, si vous avez trois détecteurs, vous pouvez voir la localisation. C'est la localisation de la binaire d'étoile à neutrons. Essentiellement, quand vous avez deux détecteurs, vous pouvez localiser votre source

dans un grand arc de cercle autour de la détection et puis il vous faut un troisième détecteur pour localiser où, sur cette grand arc de cercle, dans le ciel, se trouve la source. Donc c'est purement géométrique. C'est les temps d'arrivée des ondes sur trois détecteurs qui déterminent par triangulation, en fait, la localisation de la source.

Félix Debierre  
Comme le GPS.

Luc Blanchet  
Comme le GPS, oui. Félix ?

Félix Debierre  
Oui, écoute, bravo Luc, félicitations. De toute façon, je me joins à mes camarades pour dire que je n'ai pas compris grand-chose. Mais ce que je crois comprendre quand même, c'est que tous tes travaux mènent quand même dans la direction d'une validation de la relativité générale. Et en fait, ce qui m'intriguait un petit peu, c'était peut-être en rapport avec la partie où tu avais censuré, c'est en quoi toutes tes découvertes ou tous tes travaux permettent un peu de faire le tri dans les différents modèles cosmologiques, ceux qui peuvent être validés et ceux qui, en l'occurrence, sont dès aujourd'hui déjà éliminés. Tu avais fait brièvement référence aux mesures de Constant Double, etc. C'est un peu cet aspect-là qui m'intéresserait.

Félix Debierre  
Au-delà de dire bravo, simplement, je voulais finir en disant que merci de nous montrer que tous ces beaux espaces infinis que tu nous fais découvrir ne sont pas si silencieux que ça. Merci pour ta réponse, Luc.

Luc Blanchet  
Merci, Félix. Alors, peut-être que je peux répondre à ta question en rappelant un petit peu ce qui a été fait avec la constante de [Hubble-Lemaître](#). En fait, actuellement en cosmologie, il y a une tension importante sur la valeur de la constante de Hubble.

Luc Blanchet  
Il y a d'une part les cosmologistes qui mesurent le fond diffus cosmologique, le fond de rayonnement cosmologique à 3°K, et qui mesurent les perturbations du fond diffus cosmologique, et les perturbations sont ajustées dans un cadre standard qu'on appelle  $\Lambda$  cold dark matter dans lequel c'est la relativité générale plus une constante cosmologique constante  $\Lambda$  plus matière noire froide et avec ce modèle qui est paramétrisé par une dizaine de paramètres dont la constante de Hubble  $H_0$  que l'on doit mesurer à  $Z$  égale 0, le rate heat égale 0, c'est-à-dire ici sur Terre l'ajustement des fluctuations du CMB permet de déterminer tous ces paramètres, notamment le  $\omega$  matière, le  $\omega$  dark energy, c'est-à-dire les contributions de la constante cosmologique, etc. Et parmi ces paramètres, il y a  $H_0$  qui est mesuré en cosmologie.

Luc Blanchet  
Et la mesure donne à peu près 67 km par seconde et par méga parsec. Il y a un autre type de mesure qui est faite localement, directement dans des observatoires sur Terre, qui consiste à mesurer des tas de supernovas. Il y a certains types de supernovas dont, quand on mesure la luminosité de ces supernovas, on connaît la distance. Ce sont les chandelles standards que j'ai mentionnées tout à l'heure. Cette deuxième approche, la mesure directe locale sur Terre à  $Z$  égal 0 presque, donne une valeur qui est un peu en désaccord pour la constante cosmologique. 73 plutôt que 68 pour la constante cosmologique. Les ondes gravitationnelles devraient permettre de résoudre cette tension qui est en fait très importante. Il y a énormément de gens qui travaillent sur cette tension actuellement. Les ondes gravitationnelles permettent de mesurer la constante de Hubble-Lemaître.

Luc Blanchet  
Parce que, par exemple, dans le cas de l'événement de l'étoile à neutrons de 2017, vous observez le signe du rayonnement gravitationnel. L'onde gravitationnelle vous permet de donner la distance de l'onde gravitationnelle de la source, 40 mégaparsecs. Puis d'un autre côté, vous avez détecté la galaxie dans laquelle s'est produit la coalescence. Vous pouvez mesurer son [redshift](#) et donc vous pouvez en déduire la valeur de  $H_0$ . Malheureusement, pour l'instant, les mesures ne sont pas assez précises. Le

pic de la distribution qui est observé pour  $H_0$  est entre les valeurs dues au CMB, la cosmologie, et les valeurs locales. Mais on espère que ce type de test permettrait de lever la tension sur ces paramètres.

Pascal Debu

Je voulais poser une question, si je peux vous faire une remarque. D'abord, merci, Luc, pour cet exposé extrêmement précis et détaillé. C'était vraiment très impressionnant, tous ces travaux.

Pascal Debu

Oui, donc je voulais faire un commentaire. Tu as montré qu'effectivement, récemment, il y a eu un événement qui ressemblait beaucoup au premier événement qui a été mesuré, découvert. Et tu as mentionné que typiquement, le rapport, s'il te plaît, était un meilleur d'un facteur 4. Et je me suis laissé dire que grâce à ça, on pouvait justement faire des tests beaucoup plus précis, peut-être même faire un pont avec justement de la physique non classique. Je me suis laissé dire que vous pouvez mesurer la surface des trous noirs avant et après et vérifier un petit peu une prédiction de Hawking. Tu pourras me dire quelques mots ?

Luc Blanchet

Oui, tout à fait. Alors effectivement, il y a eu un papier récent qui a été publié après ce signal, comme ils avaient beaucoup plus de signal sur bruit, comme tu le dis. On peut tester le théorème de l'augmentation de l'aire totale des trous noirs en mesurant l'aire avant la coalescence. Lorsqu'il y a deux trous noirs isolés, l'aire totale va être simplement la somme des deux aires des deux trous noirs. L'aire et l'aire du trou noir c'est l'aire de l'horizon du trou noir. Et puis, après la coalescence, on a un trou noir de Kerr qui est formé, il est décrit par sa masse et, de façon cruciale, aussi par son spin.

Luc Blanchet

En général, et ce n'était pas tout à fait le cas dans ce cas-là, mais en général, les trous noirs initiaux ont des spins très faibles et, bien sûr, le trou noir formé après la coalescence, lui, il a un spin important qui vient, bien sûr, du moment cinétique orbital des deux trous noirs avant la coalescence. C'est la mesure qui a été faite. On a la somme des deux surfaces, des deux trous noirs, des horizons des deux trous noirs avant la coalescence, que l'on compare avec la surface du trou noir de Kerr qui est formée et qui est une fonction non-triviale de la masse et du spin du trou noir, et on vérifie que cette surface finale du trou noir formé est effectivement supérieure à la somme des aires des surfaces des deux trous noirs initiaux.

Luc Blanchet

Donc ça ce n'est pas quelque chose de tout à fait trivial, le fait que l'air d'un système de trous noirs augmente toujours, c'est lié au fait que l'air de la surface d'un trou noir c'est associé à l'entropie d'un trou noir, comme l'avait montré Bekenstein et Hawking. On connaît même le rapport entre l'entropie et l'eau. Et l'aire du trou noir. C'est une propriété très importante des systèmes du trou noir, il y a une analogie incroyable entre la dynamique des trous noirs et la thermodynamique comme je le sais. Le test a été vérifié à l'occasion de cette coalescence. Ce n'est pas évident non plus parce que dans la coalescence, il y a des zones gravitationnelles qui sont émises, qui emportent aussi de la masse du trou noir et qui ont tendance à diminuer la surface totale. Néanmoins, le théorème est validé, la surface augmente.

Luc Blanchet

Ce test avait été fait, je cite là quand même, il y a déjà 5-6 ans sur un autre événement et qui avait montré aussi que c'était valable. Donc, ce n'était pas tout à fait quelque chose de tout à fait nouveau. Mais enfin, c'est sorti avec cet événement.

Pascal Debu

D'accord, merci.

Luc Blanchet

Je t'en prie.

Olivier Martin

Autre question ?



Olivier Martin  
Mais attention parce que sinon, on va commencer le dîner.

Pascal Debu  
On va peut-être vous laisser manger, alors.

Intervenant  
Merci beaucoup, à très bientôt.

Félix Debierre  
Bon appétit à tous.

Christophe de Dreuille  
Bonne soirée.

### **Questions Réponses pendant le dîner**

Luc Blanchet  
Dans une galaxie comme la nôtre, il y a à peu près une supernova tous les cinquante ans. Il y en a eu en 1997, il y en a eu une qui a explosé dans une petite galaxie satellite de la nôtre. Donc, on peut espérer que d'ici vingt, trente ans, on aurait une supernova dans notre galaxie.

**Question** : Par exemple, la lune qui tourne autour de la Terre, ça n'émet pas d'onde ?

Luc Blanchet  
Si, ça émet, mais extrêmement faible, c'est totalement négligeable. Tous les mouvements produisent des ondes gravitationnelles. Mais c'est extrêmement faible. Il faut des masses énormes et des vitesses relativistes, de l'ordre de  $c/4$ . Il y a l'attraction elle-même, qui est la partie conservative de la force. Et puis, il y a l'émission d'ondes. Ce sont deux aspects différents.

Luc Blanchet  
La communauté des ondes gravitationnelles est assez énorme. Il y a tous les détecteurs, il y a plein de gens. Je dirais près de mille personnes. Ne serait-ce que les articles publiés sur la découverte des ondes gravitationnelles, c'est mille cinq cents personnes.

**Question** : Quelle est la répartition par pays ? Combien aux États-Unis ? Combien en Europe ?

Luc Blanchet  
Il y en a beaucoup aux États-Unis, à peu près autant en Europe, moins en Asie. Les Chinois essayent de mettre en place un détecteur pour aller dans l'espace, qui sera concurrent du détecteur européen LISA, qui va être lancé en 2035. Mais je pense que LISA n'aura pas de concurrents. Il faut voir que c'est quarante ans de développement. L'idée du détecteur basé sur l'interférométrie a été conçue dans les années soixante. Dans les années soixante-dix, il y a eu un premier projet qui a mené après à LIGO et Virgo. Ça a démarré dans les années soixante-dix pour la détection en 2015.

**Question** : Mais tu as des évolutions technologiques qui permettent aujourd'hui d'avoir des choses que tu ne pouvais pas avoir il y a trente ans.

Luc Blanchet  
Oui, mais ce n'est pas seulement ça. Pendant des années, la sensibilité était très mauvaise. Au cours du développement, il y a eu des méthodes nouvelles dites de squeezing qui permettent d'augmenter la sensibilité du détecteur. Ça a été développé et installé, ce qui a permis une énorme amélioration.

Luc Blanchet  
La durée de développement de systèmes très complexes est de dix, quinze ans maximum. À quarante ans, l'écart est énorme. Mais on est dans un monde scientifique contrôlé, connu. Dans la recherche

fondamentale, on ne sait pas ce qu'on cherche, on ne sait pas comment mesurer vraiment. On teste des trucs, ça ne marche pas.

Luc Blanchet

Moi, je voulais faire de la mécanique céleste. On a eu un prof à l'X qui m'a dit : « Ne faites pas ça parce que c'est une science du dix-neuvième siècle, c'est complètement périmé ». En fait, même en théorie newtonienne, il y a encore trop de choses qui sont faites. Tout le XXe siècle, avec les développements des systèmes chaotiques, a été un énorme temps de développement.

**Question :** J'ai noté qu'il y a eu sur un événement un décalage de 1,7 seconde entre la détection d'un trou noir et le sursaut gamma. Est-ce qu'il y a d'autres données analogues sur ces différentes formes de propagation ?

Luc Blanchet

Non, malheureusement, il n'y a eu qu'un test qui a été fait. Il y a eu juste un événement avec une contrepartie électromagnétique.

**Question :** Trois questions. Quand est-ce qu'a commencé cette aventure de la mise en place des détecteurs ? Est-ce que tu peux expliquer les ordres de grandeur 1PN, 2PN, etc. ? Et techniquement, qu'est-ce qui fait réagir les miroirs ?

Luc Blanchet

Historiquement, ça remonte aux années 60 avec Weber qui a construit le premier détecteur (une barre métallique). Il pouvait détecter des ondes de l'ordre de  $10^{-14}$  ou  $10^{-15}$ , alors que celles qu'on observe sont de  $10^{-21}$ ,  $10^{-23}$ . Petit à petit, les gens ont réalisé qu'avec les barres, on allait plafonner. Des études ont montré que la seule façon de détecter était l'interférométrie avec des très grands bras (4 km pour LIGO, 3 km pour Virgo).

Luc Blanchet

Pour 1PN, 2PN : 1PN c'est la première correction à la loi de Newton ( $v/c^2$ ). 2PN c'est  $v/c^4$ . C'est la notation de Chandrasekhar. Il n'y a que pour le rayonnement gravitationnel qu'on a besoin de ces précisions-là. Dans le système solaire, il y a un effet 1PN mesuré (précession de Mercure, déviation de la lumière). Pour avoir plus de précision, il faut aller aux pulsars binaires qui permettent de mesurer 1PN et partiellement 2PN, mais surtout 2,5PN (rayonnement gravitationnel).

Luc Blanchet

Techniquement, ce sont des miroirs d'une vingtaine ou trentaine de kilos, suspendus par des pendules pour amortir les vibrations sismiques. Le mouvement des miroirs est libre le long de la direction des cavités. Les fils de suspension sont dans le même matériau que les miroirs (silicate) pour améliorer le facteur de qualité Q. Un laser puissant est injecté et stocké dans les cavités Fabry-Pérot.

**Question :** Tu disais que le mouvement qu'on vérifie, c'est à peu près  $10^{-21}$ .

Luc Blanchet

Oui, l'amplitude de l'onde gravitationnelle est  $10^{-21}$ . Pour un détecteur, c'est aussi  $(\Delta L)/L$ . Pour Virgo/LIGO ( $L = 3-4$  km), ça fait une variation de  $10^{-18}$  mètres (un millième de la taille d'un proton). Ce chiffre impressionne, mais en fait, il y a  $n$  détecteurs avec  $n$  atomes du miroir, donc un facteur racine carré de  $n$  améliore la détection.

**Question :** J'ai cru comprendre qu'il y avait un lien entre l'augmentation de l'entropie et l'augmentation de la surface. Est-ce que tu peux nous expliquer ça ? Et pourquoi la masse finale est inférieure à la masse des deux trous noirs, compensée par le spin ?

Luc Blanchet

La surface du trou noir, c'est essentiellement le carré de la masse lorsque les spins sont négligeables. On prend la masse de chacun des trous noirs initiaux et la somme des carrés de ces masses donne la surface totale initiale. Pour un trou noir avec un spin, la surface est une fonction non linéaire de la masse et du spin. En mesurant le spin et la masse finale, on teste le théorème de Hawking (la surface

doit toujours augmenter). Bekenstein a poussé l'analogie entre l'aire du trou noir et l'entropie. Il a déterminé que l'entropie devait être proportionnelle à la surface de l'horizon. Hawking a ensuite découvert le rayonnement de Hawking, réconciliant cette notion avec la thermodynamique.