

L'étonnante actualité du centenaire de la théorie de la gravitation d'Einstein
*De la chute libre dans un ascenseur, à l'onde gravitationnelle émise par
la coalescence de deux trous noirs*

Le Président de notre Académie avait programmé cette année deux communications pour commémorer le centenaire de la théorie relativiste de la gravitation, publiée en 1916 par Albert Einstein : celle donnée le 9 février par notre confrère Philippe Mikaeloff, intitulée « 1916-2016, Albert Einstein et le mystère de l'espace-temps », et la mienne dont le contenu a été modifié pour tenir compte de l'actualité scientifique. En effet, le 12 février, une publication de la collaboration *LIGO-Virgo* revendiquait la très probable observation, par interférométrie optique, d'un train d'ondes gravitationnelles, ondes dont l'existence avait été prévue cent ans plus tôt par Einstein. Ainsi ma communication décrit cette remarquable découverte expérimentale, après avoir retracé la démarche créative suivie par Einstein pour aboutir à sa révolutionnaire théorie de la gravitation.

En 1907, « l'idée la plus heureuse de sa vie »

Albert Einstein était alors employé au Bureau Fédéral des Brevets de Berne, ville dans laquelle il résidait depuis 1901, lorsqu'il fut troublé par l'incompatibilité qu'il voyait entre la théorie de la relativité restreinte, qu'il avait publiée en 1905, et la théorie de la gravitation en cours, celle de Newton, qui sous-entendait que la répulsion entre deux masses était instantanée, quelle que soit leur distance de séparation. L'action associée à cette « force de Newton » devrait se propager entre les deux masses plus vite que la vitesse de la lumière, en flagrante contradiction avec sa théorie relativiste. Pour résoudre cette énigme, il réalisa une de ses fameuses « expériences de pensée » le transportant dans le champ d'accélération qu'il y aurait dans une cabine d'ascenseur... en chute libre. Il constata que pendant cette chute, s'il avait placé une balance sous ses pieds, son « poids » serait nul (une prédiction qui a depuis été vérifiée avec très grande précision). Ce fut d'après lui « l'idée la plus heureuse de sa vie », car il venait d'établir un rapport d'équivalence entre les notions de gravitation et d'accélération.

Il reviendra plus tard dans sa cabine d'ascenseur en chute libre pour « observer » la courbure des rayons lumineux. Il essaya en effet d'imaginer où serait le point d'impact sur la paroi gauche de sa cabine d'un rayon lumineux pénétrant horizontalement à travers un petit trou de la paroi droite. Cet impact est bien sûr à la même hauteur que le trou d'entrée lorsque la cabine est à l'arrêt. En mode normal de descente de la cabine, à vitesse constante, il voit ce point d'impact se déplacer légèrement vers le haut, car la paroi opposée de la cabine est descendue pendant le temps de propagation du rayon, ce rayon restant par ailleurs parfaitement rectiligne. En revanche, en chute libre, l'accélération déplace l'impact encore plus vers le haut, mais surtout il réalise que la trajectoire du rayon de lumière ne peut plus être rectiligne, elle est courbée. En suivant sa pensée (*gravitation = accélération*, puis *accélération = courbure de la lumière*), Einstein réalisa alors que les « forces de gravitation » n'existaient pas, mais que toute masse induisait dans son environnement une courbure de l'espace-temps. Dans le cadre de ce concept révolutionnaire, la Terre, par exemple, ne tournerait pas autour du Soleil parce que celui-ci l'attire, mais plutôt parce que dans son mouvement orbital elle suit des lignes d'espace (*géodésiques* qui sont courbées par la présence du Soleil).

De 1909 à 1915, la difficile formulation de cette idée

La mise en équation de cette idée se révéla alors très ardue car elle devait décrire la dynamique dans un espace-temps courbe à 4 dimensions, où les vecteurs des espaces plans à 3 dimensions devaient être remplacés par des objets mathématiques nettement plus complexes, des tenseurs. Par ailleurs, la nouvelle théorie devait converger vers la formulation de Newton dans le

cas de champs gravitationnels faibles. La première formulation de la gravitation, dite *équation d'Einstein*, $G_{ij} = 8\pi \mathbf{G} T_{ij}$, était une équation tensorielle différentielle reliant le tenseur G de courbure (de l'espace-temps) au tenseur T de la masse (en fait matière-énergie), à l'aide de la constante fondamentale gravitationnelle \mathbf{G} . Elle exprime le fait qu'en tout point de l'espace-temps la courbure dépend de la contribution de toute la matière-énergie en ce point.

Pour poursuivre son travail sur la gravitation, Einstein réalisa très vite qu'il devait collaborer avec les meilleurs mathématiciens de l'époque. Cette objectif le poussa à revenir à Zurich, alors qu'il avait été nommé professeur à Prague, pour y retrouver son ami le mathématicien Marcel Grossmann, et plus tard à accepter un poste à Berlin pour pouvoir travailler avec David Hilbert.

1915 et 1919, les années de la reconnaissance

Jusqu'alors, les travaux d'Einstein sur la gravitation étaient restés largement méconnus de la plupart des scientifiques, ses concepts étant sans doute trop novateurs et surtout sa formulation mathématique très ardue. C'est l'astronomie qui cette année-là révéla la puissance de cette nouvelle théorie, tout d'abord en permettant l'interprétation et le calcul relativiste très précis de l'avance du périhélie de la planète Mercure (43 secondes d'arc par siècle), une très ancienne et troublante observation qui ne trouvait pas d'interprétation simple dans le formalisme Newtonien (souvenons-nous qu'en 1860, Le Verrier avait été jusqu'à proposer l'existence d'une nouvelle planète, Vulcain, pour justifier l'avance de ce périhélie).

Mais ce fut surtout l'intervention de l'astronome Arthur Eddington, un des premiers scientifiques à entrevoir l'avenir de la notion de courbure de l'espace-temps, qui monta une expédition pour en vérifier une des observables : la déviation de la lumière par la présence d'un objet massif. Etant parti à la rencontre d'une éclipse totale de Soleil, Eddington mesura le 29 mai 1919 une déviation de la lumière de $1,73^\circ$... très exactement la valeur calculée dans le cadre de la théorie d'Einstein. Dès la diffusion de ce résultat, Einstein devint une star planétaire, bien que le nombre de scientifiques capables de comprendre et surtout d'utiliser sa nouvelle théorie soit, cette année-là, encore extrêmement restreint.

Les implications cosmologiques : ondes gravitationnelles et constante cosmologique

Dès 1916, Einstein, après avoir montré que des masses au repos courbaient l'espace-temps, prédit que l'accélération de ces masses devait provoquer l'émission d'*ondes gravitationnelles* (notées OG dans la suite de ce texte) se propageant dans l'univers à la vitesse de la lumière. Il arriva à cette prédiction par analogie avec les ondes électromagnétiques (EM) qui sont émises par l'accélération de charges électriques (comme cela se passe par exemple dans les antennes pour la radiodiffusion). Par ailleurs, la physique quantique, qui venait d'associer un quantum aux ondes EM (le *photon*, particule de masse nulle et de spin 1), permettait de prévoir qu'il y avait aussi un quantum spécifique associé aux OG, le *graviton*, particule hypothétique, de masse également nulle, mais de spin 2 (valeur due à la nature plus complexe, dite tensorielle transverse, de ces ondes). La réalité de ces ondes gravitationnelles supposées sillonner l'univers, restera cachée pendant plus d'un siècle.

Par ailleurs, cette même année, Einstein, en travaillant à l'application de sa nouvelle théorie à l'ensemble de l'univers, constata que cela le conduisait à un cosmos inexorablement destiné à se contracter sur lui-même. Ce résultat le troubla au point de le faire douter de la réalité de l'ensemble de sa théorie, car il violait sa croyance métaphysique en un univers qui ne pouvait être que stable et éternel. Pour ramener de la stabilité dans le système-univers il décida alors d'introduire dans son équation un terme répulsif, par le biais d'une *constante cosmologique* Λ . Il dira plus tard que ce fut "la plus grande erreur de sa vie". En fait, la constante cosmologique d'Einstein est actuellement l'objet d'un regain d'intérêt dans le cadre de l'interprétation de la mystérieuse « *énergie noire* » qui accélère l'expansion de l'univers.

La découverte de Karl Schwarzschild, et les trous noirs

Le premier à s'attaquer à la résolution rigoureuse de l'équation d'Einstein autour d'un objet massif fut Karl Schwarzschild qui se plaça dans le cas géométrique le plus simple, celui d'un objet (un astre) dont toute la masse M serait concentrée en un point, sans aucun mouvement de rotation. Dès 1915, Schwarzschild démontra alors que tout mobile s'approchant de cet astre ponctuel à une distance inférieure à $R_s = 2GM/c^2$, n'avait plus aucune chance d'échapper à son attraction et ne pourrait en particulier plus jamais franchir la sphère de rayon R_s , que l'on appelle aujourd'hui l'*horizon des événements*. Cette notion de voyage sans retour vers cet objet de Schwarzschild (que Kip Thorne appellera dans les années 60 un *trou noir*) inquiéta beaucoup Einstein, dès 1916, car elle révélait que, sur cet horizon, son équation présentait une *singularité* correspondant à une courbure infinie de l'espace-temps. Ce n'était pourtant pas un concept totalement nouveau, puisque, dès le XVIII^e siècle, il avait été envisagé l'existence d'astres dont la masse serait tellement élevée que le calcul de la vitesse de libération, à partir de la surface de l'astre, conduirait à des vitesses supérieures à celle de la lumière.

Aujourd'hui les astrophysiciens considèrent deux classes de trous noirs : les *trous noirs stellaires*, résidus de l'explosion de supernovæ de masses équivalentes à quelques masses solaires et les *trous noirs super-massifs*, tapis au centre des galaxies, dont la masse serait de quelques millions à quelques milliards de masses solaires. L'observation optique directe de ces très petits astres, bien que leur rayon soit proportionnel à leur masse, reste actuellement impossible. En revanche, des observations indirectes, telles que la rotation des étoiles proches, ont levé tous les doutes sur l'existence des trous noirs.

Ce n'est qu'après la mort d'Einstein que des théoriciens, tels que Stephen Hawking, dès 1964, et plus tard Roger Penrose, ont pu s'attaquer à la physique régnant à l'intérieur d'un trou noir. Ils montrèrent en particulier que les trous noirs sont en très grand nombre dans l'Univers, qu'ils devraient avoir la possibilité de rayonner (et *in fine* de s'évaporer) et que deux trous noirs pourraient être reliés entre eux par un hypothétique *trou de ver*... qui devrait permettre de remonter le temps ?

A la recherche des ondes gravitationnelles

La première preuve, bien qu'elle soit indirecte, de l'existence des ondes gravitationnelles fut donnée en 1974 par Russel Hulse et Joseph Taylor, astronomes qui mesuraient la période de rotation orbitale au sein d'un système binaire de deux *étoiles à neutrons*, dont l'une était un *pulsar*. Ils remarquèrent que la période de rotation de ce couple décroissait avec le temps, d'une valeur de 76 microsecondes par an, une valeur très faible... mais qui correspondait exactement au ralentissement calculable à partir de l'énergie emportée par les OG d'Einstein qui sont émises par les deux masses en rotation. Cette découverte leur valut, en 1993, l'attribution du Prix Nobel.

Parallèlement, de multiples tentatives furent lancées pour essayer de mesurer directement sur Terre l'ébranlement de la métrique de l'espace (une déformation de la Terre correspondant à une dilatation des distances dans une direction et à une contraction dans la direction perpendiculaire) au passage aléatoire d'un train d'OG de forte amplitude (issu d'un quelconque cataclysme cosmique). Les développements les plus élaborés furent ceux utilisant l'*interférométrie optique* pour tenter de mesurer, en utilisant la longueur d'onde d'un faisceau laser, l'infime différence de longueur, de l'ordre de l'attomètre (10^{-18} m) qui serait induite simultanément (et dans des sens opposés) dans les deux bras perpendiculaires de l'interféromètre. Au repos (en absence d'OG) les faisceaux de lumière laser qui circulent dans les deux bras sont finement réglés pour être en exacte opposition de phase l'un par rapport à l'autre. Le passage d'une OG doit alors induire un très léger déphasage, qui ne sera bien sûr exploitable que si ce signal émerge du bruit de fond propre de l'installation. Cette méthode est extrêmement sensible car elle est fondée sur la mesure d'un écart au zéro. Au cours des années, des interféromètres optiques géants furent construits. Ils mettent en jeu des bras kilométriques de plus en plus longs, parcourus par des faisceaux lumineux de plus en plus intenses, et des montages de plus en plus sensibles, en particulier au niveau de la planéité, du taux de réflexion optique et de la suspension des miroirs qui sont placés dans les cavités

de l'interféromètre. La détection de l'écart au zéro espéré au passage d'un train d'OG nécessite des filtrages de plus en plus sévères de tous les faux évènements, dus en particulier aux micromouvements sismiques. Ainsi des interféromètres furent construits, ou sont en cours de mise au point, aux USA (*LIGO*), en Italie (*Virgo*), en Allemagne (*GEO*) et au Japon (*KAGRA*). Ce furent des dizaines d'années de perfectionnement, d'observation et de persévérance, sans qu'aucun signal ne soit détecté... jusqu'au 14 septembre 2015, cent ans exactement après la prédiction d'Einstein !

L'évènement GW150914 à *Advanced-LIGO*

En effet, le 14 septembre 2015 à 9h 50mn 45s (temps UTC), les interféromètres américains *LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) furent traversés pendant 0,5 seconde par un train d'ondes qui furent très rapidement qualifiées de gravitationnelles. En fait la collaboration *LIGO*, et c'est sa force, exploite deux interféromètres identiques qui sont éloignés de près de 3000 Km : l'un, *LIGO-Hanford*, est situé sur la côte ouest, l'autre, *LIGO-Livingston*, est en Louisiane. Ces deux instruments détectèrent l'évènement presque simultanément, plus précisément à 7 ms d'intervalle, une valeur très proche du temps que mettrait la lumière (et donc aussi les OG) pour aller d'un site à l'autre. Il pouvait donc s'agir de la détection d'un même train d'OG se déplaçant à la vitesse de la lumière dans une direction assez proche de l'axe Hanford-Livingstone. Les physiciens de la collaboration *LIGO-Virgo*, liant les chercheurs exploitant les interféromètres américains et européens, furent rendus prudents par l'annonce hâtive d'une autre équipe, qui dut être retirée en 2014. Ils s'accordèrent six mois d'analyse et de contrôle avant de proclamer, le 11 février 2016, qu'ils avaient très certainement identifié, avec une probabilité d'erreur extrêmement faible (un sur 5 millions) le passage d'une onde gravitationnelle. Cet évènement historique a pour référence GW150914 (*Gravitational Wave-14 sept. 2015*).

L'analyse de l'évènement et l'identification de sa source

Après élimination des multiples bruits de fond, les formes des trains d'onde observées pendant seulement une fraction de seconde dans les deux spectromètres *LIGO* se révélèrent rigoureusement identiques. Cependant cette forme n'était pas celle que l'on attendait des sources d'OG que l'on croyait alors les plus probables : l'explosion d'une supernova ou le rayonnement dû à la rotation d'un couple d'étoiles à neutrons. En effet la catastrophe cosmique détectée semblait, d'après sa signature temporelle, être plutôt affectable à un évènement jugé très improbable : la coalescence de deux trous noirs. Cette identification a pu être faite grâce à la simulation théorique qui avait été faite de ce type d'évènement, notamment par l'équipe de Thibaud Damour, à l'*Institut des Hautes Etudes Scientifiques* de Bures-sur-Yvette. Ces simulations qui avaient nécessité des moyens de calcul importants, permirent par ajustements successifs avec les signaux observés par les interféromètres, de reconstituer de façon étonnamment précise le scénario de la catastrophe cosmique qui s'était déroulée ... il y a 1,3 milliard d'années ! Ce scénario est le suivant : un couple d'astres, deux trous noirs, étonnamment massifs (de masses respectives, 29 et 36 masses solaires) étaient depuis fort longtemps en rotation l'un autour de l'autre. Au cours des temps, ils se rapprochèrent et leur rotation devint de plus en plus rapide car leur accélération engendrait l'émission d'ondes gravitationnelles de plus en plus énergétiques. A la fin de cette longue histoire, ce sont les sept ultimes rotations de ce couple, avant qu'il ne fusionne, qui émirent dans l'espace un train d'ondes assez énergétique pour franchir, plus d'un milliard d'années plus tard, le 14 septembre 2015, le seuil de sensibilité des détecteurs *LIGO*. La séquence en temps des trains d'ondes permit de reconstituer non seulement le film des dernières fractions de seconde de cette coalescence cataclysmique mais aussi le film des premiers soubresauts et de la relaxation du trou noir qui venait de naître : un astre de masse plus faible que la somme des masses disponibles avant la coalescence (62, au lieu de $29+36 = 65$ masses solaires), la masse manquante M , égale à trois masses solaires, correspondant à l'énergie ($E=Mc^2$) emportée par les OG. C'est une énergie colossale, environ 1000 fois supérieure à celle de l'explosion d'une supernova. Ce scénario catastrophe, publié le 12 février 2016 dans *Physical Review Letters*, est signé par 1009 auteurs, rattachés à 136 centres de recherche de 20 pays.

Les circonstances de cette découverte

Les interféromètres des deux installations américaines, *LIGO-Livingston* et *LIGO-Hanford*, ainsi que celui de l'installation franco-italienne *Virgo* (ainsi nommée car l'appareil est dirigé dans la direction de la constellation de la Vierge) implantée à Cascina près de Pise, sont assez comparables, tant par la taille kilométrique de leurs bras que par la qualité de leurs équipements optiques. Leurs chercheurs ont aussi à peu près la même expérience : dix années d'observation... sans aucun signal. C'est alors que ces chercheurs prirent la décision d'une part de créer la collaboration *LIGO-Virgo* et d'autre part d'améliorer conjointement la sensibilité de leurs interféromètres pour aboutir aux projets *Advanced LIGO* et *Advanced Virgo*. Il se trouve que la détection de l'évènement *GW150914* advint quelques jours seulement après la mise en route d'*Advanced LIGO*. Quant à *Advanced Virgo*, pas encore opérationnel (il ne le sera que fin 2016), il a malheureusement manqué la détection de cet évènement. Néanmoins, tous les chercheurs de la collaboration *LIGO-Virgo* sont coauteurs de la publication. Il est du devoir de notre Académie lyonnaise de souligner que parmi les multiples améliorations apportées dans les versions *Advanced* des interféromètres, l'une des plus décisives fut sans doute l'implantation de miroirs d'ultra-haute qualité, miroirs qui ont tous été réalisés à Lyon dans le *Laboratoire des Matériaux Avancés* (CNRS-Université Lyon 1) qui, depuis des décennies, a acquis une réputation mondiale dans ce domaine.

Conclusion sur l'avenir des observatoires d'ondes gravitationnelles

L'observation pionnière décrite ci-dessus a révélé plusieurs faits très encourageants pour l'avenir :

- Les observatoires d'ondes gravitationnelles ont aujourd'hui atteint l'extrême sensibilité requise pour détecter des ondes gravitationnelles d'origines stellaires.
- La coalescence de deux trous noirs pourrait avoir été assez fréquente dans l'histoire de l'univers ; en effet, en quelques mois, *Advanced LIGO* aurait détecté deux autres trains d'OG, en particulier, le lendemain de Noël, l'évènement *GW151226*, qu'une publication datée du 17 juin 2016 décrit comme une autre coalescence de trous noirs moins massifs (14,2 et 7,5 masses solaires).
- Dès que l'interféromètre franco-italien *Advanced Virgo* sera opérationnel, dans quelques mois sans doute, la probabilité qu'il détecte, dans l'année, le passage d'une OG est donc raisonnablement élevé.
- La multiplication des interféromètres qui vont très prochainement être opérationnels (deux aux USA, deux en Europe et un au Japon) va permettre une mise en réseau mondiale qui devrait permettre de traquer quasi-simultanément la signature de la traversée de la Terre par un même train d'OG.

La mise en réseau de ces différentes installations, qui vont pointer vers différentes directions du cosmos, permettra de déterminer avec précision la localisation spatiale (direction et distance) des sources d'ondes gravitationnelles. On pourra alors saluer l'arrivée d'un nouveau mode d'observation de l'univers, l'**astronomie gravitationnelle**, qui trouvera une place originale parmi les télescopes de plus en plus performants utilisant toutes les longueurs d'ondes du spectre électromagnétique, sans oublier la toute nouvelle astronomie neutrino, en cours de développement auprès de l'installation *IceCube* du glacier antarctique.

