

Les vagues de l'espace-temps

Matteo Barsuglia

Les vagues de l'espace-temps

La révolution des ondes gravitationnelles

DUNOD

Crédits iconographiques

P. 13 – © NASA; p. 21 – © NASA; p. 30 – © T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab; p. 58 (haut) – © Virgo Collaboration; p. 58 (bas) – © Caltech/MIT/LIGO Lab; p. 69 – © LIGO/T. Pyle; p. 90 – d’après B.P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», *Phys. Rev. Lett.*; p. 105 – d’après © LIGO/Virgo/Northwestern Univ./Frank Elavsky; p. 109 – © NSF/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet; p. 116 – © NASA and ESA; p. 136 – © ESA/Planck Collaboration; p. 163 – d’après © Caltech/MIT/LIGO Lab; p. 164 – © Einstein Telescope project.

Création du principe de
couverture: Grégory Bricout

Illustrations: Rachid Marai

© Dunod, 2019
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-078159-1

Le Code de la propriété intellectuelle n’autorisant, aux termes de l’article L. 122-5, 2° et 3° a), d’une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l’usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d’autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d’exemple et d’illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l’auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

À Caterina et Santiago

Prologue

Le 12 février 2016, après plusieurs mois de fuites et de rumeurs, la nouvelle est officielle: les ondes gravitationnelles ont été détectées pour la première fois. L'événement s'est produit cinq mois plus tôt, le 14 septembre 2015 à 10 h 50, heure de Paris. Des petites ondulations de la géométrie de l'espace-temps ont traversé la Terre après un voyage de plus d'un milliard d'années. Leur passage a été enregistré par LIGO, un détecteur installé aux États-Unis¹.

C'est Dave Reitze, le chef du projet LIGO, qui en fait l'annonce lors d'une conférence de presse de la National Science Foundation américaine, avec un ton direct et teinté d'émotion: « *We did it! We have detected gravitational waves.* » (« Nous l'avons fait ! Nous avons détecté les ondes gravitationnelles. »)²

C'est le début d'une révolution. Dorénavant, l'astronomie utilisera aussi les vibrations de la gravité, et la puissance de ce nouveau messager est immédiatement évidente et incontestable: pour la première fois, des trous noirs avec des caractéristiques jamais observées auparavant sont détectés. Pour la première fois, on démontre que les trous noirs peuvent être liés dans des systèmes binaires, où ils orbitent l'un autour de

l'autre et peuvent fusionner. Pour la première fois, la théorie de la relativité générale d'Einstein, la grande infrastructure théorique de l'astrophysique et de la cosmologie, est mise à l'épreuve dans un contexte complètement nouveau : celui des champs gravitationnels extrêmes des trous noirs.

Les deux détecteurs LIGO aux États-Unis ont enregistré, au milieu du brouhaha de la planète, une variation de distance d'un milliardième de milliardième de mètre entre deux miroirs éloignés de quatre kilomètres. Un gazouillement qui témoigne sans ambiguïté des derniers instants avant la fusion de deux trous noirs tournant à la moitié de la vitesse de la lumière.

Après ce mémorable 14 septembre, les détections d'ondes gravitationnelles continuent : il s'agit d'autres couples de trous noirs qui fusionnent, certains plus grands, d'autres plus petits. Chaque signal est un triomphe de la théorie d'Einstein et la démonstration que désormais le ciel n'est plus seulement fait de petits points lumineux, mais aussi de points noirs, qui émettent seulement des ondes de gravité.

Alors que les deux détecteurs LIGO poursuivent leurs observations, l'expérience européenne Virgo³ entre en fonction en août 2017. Le 17 août, des ondes de gravité sont détectées en coïncidence avec la lumière. Il s'agit de la fusion de deux étoiles à neutrons, la première jamais « observée » par des télescopes et « sentie » par les détecteurs des vibrations de la gravité. Ce jour-là, d'anciennes énigmes de l'astronomie sont résolues, comme l'origine d'une partie des éléments chimiques lourds, tels l'or et le platine. C'est aussi le banc d'essai d'une nouvelle façon de faire de la cosmologie : l'expansion de l'Univers est mesurée d'une façon complètement nouvelle. Ce jour-là, l'astronomie entre pleinement dans son ère « multi-messenger ». La

révolution est accomplie et il ne sera plus possible de revenir en arrière.

Tandis que j'écris, je suis dans la salle de contrôle du détecteur Virgo, à Pise. Autour de moi, des grands moniteurs accrochés aux parois montrent les faisceaux laser qui parcourent les deux bras en « L » de trois kilomètres du dispositif. Des écrans d'ordinateur me confirment que tout fonctionne et que nous pouvons observer des sources d'ondes gravitationnelles jusqu'à 75 millions d'années-lumière, soit cinq mille milliards de fois la distance Terre-Soleil⁴. Dehors, la campagne toscane déploie ses couleurs automnales. Les champs de blé sont balayés par le vent. Les drapeaux français et italien, principaux financeurs du projet, ainsi que le drapeau européen, flottent fièrement sur le parvis.

J'ai passé des centaines d'heures dans cette salle, en observant sur les moniteurs les signaux de contrôle de cette machine ultra-sensible qui est le fruit, au même titre que les deux détecteurs LIGO, de cinquante ans d'acharnement de centaines de physiciens et d'ingénieurs. Une épopée scientifique pleine d'incertitudes. Un symbole d'audace et de persévérance.

Cela fait plus de vingt ans que je travaille sur les ondes gravitationnelles, depuis le jour où je suis tombé sur l'annonce d'une offre de stage sur le projet Virgo. Depuis, j'ai consacré plus de la moitié de ma vie et toute ma carrière, comme chercheur au CNRS, à la détection de ces imperceptibles ondes de gravité, dont l'existence fut prédite par Albert Einstein en 1916.

Après le 14 septembre 2015, des dizaines de journaux en ont fait leur une : « Einstein avait raison : les ondes gravitationnelles existent. » Pourtant, dans une certaine mesure, il avait aussi tort : en marge de son article de 1916, il avait écrit

que dans tous les cas imaginables, la puissance des ondes gravitationnelles est pratiquement nulle⁵.

Malgré cette prédiction du père de la relativité, nous voilà devenus les nouveaux astronomes des astres noirs, capables de voir des choses invisibles pour les autres et aussi d'indiquer aux télescopes de toute la planète où regarder: «Attention, des choses formidables sont en train de se produire dans cette région du ciel, allez tout de suite y pointer vos instruments!»

C'est déjà arrivé le 17 août 2017 avec la fusion de deux étoiles à neutrons et cela se reproduira quand quelque chose d'extrêmement violent secouera encore les profondeurs de l'Univers.

En effet, contrairement aux télescopes optiques, qui n'observent qu'une petite partie du ciel et fonctionnent seulement la nuit par temps clair, LIGO et Virgo peuvent observer la totalité du ciel en même temps et sans interruption. Les ondes gravitationnelles ne se soucient pas des nuages et elles traversent la Terre tranquillement, comme si elle était transparente.

J'ai passé des jours et des nuits, avec mes collègues, dans cette salle de contrôle de Virgo à me battre avec les bruits⁶ de l'instrument, en cherchant à les identifier et à les réduire. Nous avons parcouru des kilomètres en arpentant les tunnels de Virgo, discutant de la meilleure façon d'améliorer la sensibilité de l'instrument. Nous avons mangé des dizaines de pizzas dans des cartons et bu des centaines de cafés en regardant osciller les miroirs d'un millionième de degré et en alignant d'énormes faisceaux laser. Nous avons piégé de la lumière dans des cavités optiques de trois kilomètres et vu, avec émotion, la sensibilité de l'instrument qui s'améliorait de plus en plus.

Prologue

J'ai eu parfois de nouvelles idées et me suis précipité là-bas, avec ma Twingo, pour les tester. Depuis cette salle, j'ai maintes fois vu l'aube et, après une nuit de grands progrès, je suis aussi monté au sommet de la tour de Pise, en hommage au père de tous les prospecteurs de la gravitation, Galileo Galilei.

Pendant toutes ces années, j'ai rencontré des personnes extraordinaires, des chercheurs visionnaires et géniaux, dotés d'une confiance inébranlable en la mission que nous étions en train d'accomplir. Moi, par contre, j'ai douté. Après des années sans avoir détecté aucune onde gravitationnelle, j'ai songé à changer de voie, sans y parvenir.

J'ai enfin vu le premier signal de LIGO. J'ai partagé les doutes, le scepticisme et puis l'excitation d'une communauté d'un millier de personnes. Je me suis forcé à rester prudent avant de me laisser envahir par l'enthousiasme. C'est ainsi qu'un soir, après que la détection eut été confirmée, j'ai traversé Paris à vélo en hurlant d'émotion, et j'ai versé quelques larmes quand Dave Reitze a prononcé la phrase : « *We did it!* ».

J'ai été très heureux de ce premier signal et en même temps j'ai souffert, car Virgo, mon détecteur, ne fonctionnait pas encore et avait donc manqué à jamais cette « première fois ».

J'ai enfin éprouvé une joie absolue le 14 août 2017, assis sous le soleil aveuglant de la petite place d'un village italien. Virgo venait de détecter sa première onde gravitationnelle. Mon histoire avec ces perturbations de l'espace-temps, commencée vingt ans auparavant, se terminait avec l'onde qui venait de traverser l'instrument que j'avais contribué à construire. Je tournais enfin une page.

En octobre 2017, j'ai vu trois des pères du projet LIGO recevoir un prix Nobel de physique mérité⁴⁷, mais qui était aussi le fruit d'une immense aventure collective : des instruments développés et des résultats obtenus par plus de mille personnes, qui avaient travaillé ensemble pendant des dizaines d'années.

Ce livre est le récit de cette aventure, de la plume d'Einstein à la salle de contrôle du détecteur Virgo. D'une simple équation aux découvertes astronomiques qu'elle a engendrées. Je raconterai surtout l'aventure scientifique et technique, mais aussi l'aventure humaine, en utilisant parfois mon propre vécu. Je décrirai la nature de ces vibrations de l'espace-temps et je raconterai la raison pour laquelle les ondes gravitationnelles ont été détectées seulement un siècle après leur prédiction, après bien des hésitations et des doutes « existentiels », y compris de la part d'Einstein lui-même.

Je parlerai d'espaces courbes et d'objets monstrueux : les trous noirs et les étoiles à neutrons. Je raconterai comment l'ingéniosité humaine s'est exprimée dans la construction d'instruments capables de mesurer l'infiniment petit, en heurtant les limites des lois de la physique, pour comprendre l'infiniment grand.

J'expliquerai pourquoi les ondes gravitationnelles sont en train de révolutionner notre vision de l'Univers, de dessiner un nouveau ciel et de nouvelles cartes géographiques cosmiques. Pour finir, je raconterai pourquoi les prochaines années seront passionnantes, quand, grâce à des instruments toujours plus sensibles, les sources d'ondes gravitationnelles seront devenues toujours plus nombreuses et leurs signaux de gravité plus clairs.

1

Des miettes cosmiques

« Ogni anno luce vale cento anni d'ombra. »

(Chaque année-lumière vaut cent années d'ombre.)

Alda Merini (1931-2009)

On pourrait définir l'astronomie comme une tentative héroïque et désespérée de recueillir chaque petite miette d'information qui nous parvient du ciel pour en extraire le plus de connaissances possible sur l'Univers.

Les premiers astronomes ont recueilli des miettes de lumière – la lumière de la Lune, celle du Soleil et des étoiles les plus brillantes –, tout d'abord avec les yeux et ensuite, à partir du ^{xvii}^e siècle, avec des instruments d'optique de plus en plus puissants, permettant de voir toujours plus loin et de distinguer plus de détails. Ensuite, au ^{xix}^e siècle, on a compris qu'il y avait aussi une lumière invisible pour les yeux humains : le rayonnement infrarouge. Finalement, au ^{xx}^e siècle, on a commencé à faire de l'astronomie avec toutes les longueurs d'onde du spectre électromagnétique et réalisé que le ciel pouvait nous envoyer des miettes de nature complètement différente : les rayons cosmiques, les neutrinos et les ondes gravitationnelles.

Chaque fois qu'une nouvelle miette parvient sur Terre, notre compréhension de l'Univers s'enrichit et évolue.

Des êtres microscopiques et éphémères

Le 20 juillet 1969, un homme a marché sur la Lune. Deux écrivains italiens¹ confièrent en 2003 que, au-delà de l'admiration pour cet accomplissement de l'espèce humaine, ils avaient ressenti une énorme tristesse. Cette première conquête d'un corps céleste représentait en réalité la fin d'une époque : celle de l'enthousiasme pour les voyages spatiaux, car ce premier voyage nous obligeait à nous confronter à leur difficulté. En effet, nous ne sommes pas allés beaucoup plus loin depuis et, à moins d'une idée géniale, il faudra que se succèdent des générations entières avant qu'un être humain puisse sortir du Système solaire.

Le problème est que l'Univers est immense et que nous sommes des êtres infiniment petits et éphémères. Certes, par l'imagination nous pouvons voyager partout, mais quand il s'agit de se déplacer physiquement (donc de transporter de la matière

ou de l'énergie d'un point de l'espace à un autre), les choses deviennent plus compliquées. Dans la meilleure des hypothèses nous pouvons voyager à la vitesse de la lumière, une limite cosmique indépassable, à laquelle s'ajoute un petit détail embarrassant : après une centaine d'années au mieux nous mourons.

La sonde *Voyager*, l'objet de fabrication humaine le plus lointain de la Terre, après quarante ans de voyage, a atteint « seulement » les confins du Système solaire. Alpha du Centaure, l'étoile la plus proche de nous, se situe à 40 000 milliards de kilomètres de la Terre.

Le kilomètre, unité de mesure parfaite pour les autoroutes terrestres, n'est d'ailleurs pas très adapté pour l'Univers. La distance des étoiles et des galaxies est donc mesurée en « années-lumière », unité de longueur malgré tout un peu trompeuse, car elle s'apparente à une durée : c'est la distance parcourue par la lumière en un an, soit environ 9 000 milliards de kilomètres².

Si nous savions voyager à une vitesse proche de celle de la lumière, nous atteindrions donc Alpha du Centaure en quatre ans. Pour la même raison, la lumière d'Alpha du Centaure que nous observons a été émise il y a quatre ans. Regarder loin, c'est donc regarder dans le passé.

Ces distances sont encore très petites par rapport à notre galaxie, la Voie lactée, d'un diamètre de cent mille années-lumière, ou par rapport à la distance de l'amas de galaxies de la Vierge, à 60 millions d'années-lumière. Même en utilisant des unités de mesure astronomiques, ces nombres restent... astronomiques.

Ainsi, nous ne pouvons pas être trop arrogants avec les étoiles et les étudier comme les plantes, les particules élémentaires, les organismes microscopiques ou les minéraux. Nous