

laser». Il est composé de deux interféromètres, l'un en Louisiane, l'autre dans l'État de Washington. Un puissant faisceau laser y est divisé en deux pinces lumineuses perpendiculaires qui, après s'être réfléchies sur des miroirs distants de 4 kilomètres, reviennent se combiner sur un détecteur de photons. Leur sensibilité à toute variation de la distance parcourue par les faisceaux est si grande qu'un déplacement d'un centième de la taille d'un proton est détectable.

Depuis que les interféromètres de *Ligo* ont atteint la sensibilité requise pour détecter les signaux gravitationnels, et que celui de *Virgo* les a rejoints, une nouvelle page de l'astronomie s'est ouverte, dont on attend une moisson de nouveaux résultats.

Un trou noir est de la gravitation à l'état pur. Une solution *a priori* déconcertante des équations d'Einstein (les équations de la relativité générale) nous avait prédit leur existence avant leur découverte. Leur surface est immatérielle : on ne s'y pose pas, on la traverse, sans possibilité de retour. D'où son nom d'« horizon », et celui de « trou noir » donné à l'astre, puisqu'aucune lumière ne peut en échapper.

Les trous noirs sont omniprésents dans l'Univers. Certains sont très massifs, tel celui qui se situe au centre de la Voie lactée, dont on infère les propriétés en observant le ballet d'une douzaine d'étoiles en orbite autour de lui. Par ailleurs, l'existence dans notre galaxie d'une vingtaine de trous noirs membres de systèmes doubles est prouvée par leurs masses supérieures à celle que peut atteindre une étoile compacte. Leurs masses valent une dizaine de fois celle du Soleil et leurs horizons n'ont que quelques dizaines de kilomètres de rayon. On les détecte grâce au rayonnement X de la matière en provenance de l'autre étoile, chauffée au cours de sa chute vers l'horizon du trou noir, au-delà duquel elle disparaît à jamais.

L'existence des ondes gravitationnelles avait été établie indirectement, grâce à l'observation de quatre « pulsars binaires » – des systèmes doubles formés d'objets compacts, dont un au moins est une étoile à neutrons munie d'un gyrophare radio. L'analyse fine des temps d'arrivée sur Terre des impulsions montre un rétrécissement de leurs orbites relatives (quelques millimètres par révolution pour une orbite de plusieurs centaines de milliers de kilomètres), imputé à la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles.

Ces mesures sont en tout point conformes à la prédiction faite par Einstein en 1918, mais qui n'est apparue comme solide que beaucoup plus tard. Il a en effet fallu comprendre comment les ondes gravitationnelles peuvent transporter au loin de l'énergie et de l'information sur leur source.

Cependant, avant le 14 septembre 2015, on n'avait jamais observé de systèmes à deux trous

LES AUTEURS



NATHALIE DERUELLE
directrice de recherche
au CNRS, laboratoire
APC (AstroParticule
et Cosmologie),
université Paris-Diderot



JEAN-PIERRE LASOTA
directeur de recherche
émérite à l'IAP (Institut
d'astrophysique de
Paris) et professeur
au Centre d'astronomie
Nicolas Copernic,
à Varsovie (Pologne)

noirs et il manquait la détection directe d'une onde gravitationnelle.

Chacun des quatre signaux gravitationnels détectés jusqu'ici a été émis après que deux trous noirs, en spiralant l'un vers l'autre, ont fini par approcher la vitesse de la lumière, puis ont fusionné en une fraction de seconde en un seul trou noir, laissant derrière eux quelques brefs soubresauts de l'espace-temps.

Le défi posé par leur détection a d'abord été expérimental. Sous l'impulsion d'Alain Brillet (Médaille d'or du CNRS en 2017), la France y a apporté une contribution importante : le revêtement des miroirs, qui réfléchissent 99,9999% de la lumière, a été élaboré à Lyon, au Laboratoire des matériaux avancés fondé par Jean-Marie Mackowski. Le défi a aussi été théorique, car il fallait chercher des signaux extraordinairement faibles dans la botte de foin du bruit expérimental. Cela impliquait de les prédire avec une extrême précision. L'école menée par Thibault Damour (aussi Médaille d'or du CNRS en 2017) s'est particulièrement illustrée dans ce domaine.

Le défi a été relevé et, à chaque détection, la comparaison de centaines de milliers de formes théoriques d'ondes avec les signaux recueillis a permis d'extraire les caractéristiques des

Les ondes détectées à ce jour correspondent à la chute de deux trous noirs l'un sur l'autre

BIBLIOGRAPHIE

S. Bailly, La détection des ondes gravitationnelles, une nouvelle fenêtre sur l'Univers, Pour la Science, n° 462, pp. 26-37, 2016.

N. Deruelle, De Pythagore à Einstein, tout est nombre, Belin, 2015.

J.-P. Lasota, La science des trous noirs, Odile Jacob, 2010.

systèmes émetteurs. Par exemple, les deux trous noirs initiaux liés au signal GW150914 pesaient 36 et 29 masses solaires, tandis que le trou noir résultant de leur fusion est de 62 masses solaires.

L'astronomie des ondes gravitationnelles est devenue une réalité. Elle nous a déjà appris que la surface des trous noirs est bien un horizon immatériel ; bientôt, on devrait enregistrer des fusions d'étoiles à neutrons, qui s'accompagnent *a priori* de flashes électromagnétiques. Gageons que d'ici quelques années, avec la mise en service d'autres détecteurs en projet au Japon et en Inde, et plus tard la mise en orbite de l'interféromètre spatial européen *eLisa*, l'astronomie gravitationnelle fera partie du quotidien des chercheurs. ■

2016

Apprentissage profond

pour intelligences artificielles

Après des décennies de trop lents progrès, les recherches en intelligence artificielle ont franchi un pas décisif, qui explique l'effervescence actuelle autour des réseaux neuronaux profonds.

En 2016, un ordinateur a battu Lee Sedol, champion professionnel du jeu de go, grâce à un logiciel conçu par la société Google DeepMind. Cet exploit remarquable est le fruit de grands et récents progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle. Mais est-on pour autant proche de l'intelligence humaine? Non, car le logiciel de DeepMind ne sait rien faire d'autre que jouer au go. Comment en est-on arrivé là et comment envisage-t-on de progresser?

L'intelligence se démontre à travers une compétence dans des domaines particuliers, ce qui nécessite de bonnes connaissances dans les domaines en question. Pour rendre les ordinateurs aussi intelligents que les humains, il faut donc faire en sorte que les ordinateurs aient au moins autant de connaissances qu'un humain ordinaire. Plusieurs décennies durant, l'approche dominante dans les recherches sur l'intelligence artificielle a ainsi consisté à fournir directement à la machine des connaissances.

Il s'agissait alors de formaliser nos connaissances, c'est-à-dire de les mettre sous une forme claire et compréhensible par l'ordinateur. Mais beaucoup de nos connaissances sont intuitives et ne nous sont pas consciemment accessibles.

L'intuition est ce qui permet au joueur de go de bien choisir son prochain coup, au bon conducteur d'éviter un accident, au médecin d'allier ses connaissances livresques à la psychologie du patient; et surtout, cela implique presque toutes nos capacités perceptives, que l'on ne sait pas décrire précisément, mais qui sont essentielles à notre compréhension du monde.

Pour l'intelligence artificielle, la solution qui s'est révélée fonctionner à merveille est que l'ordinateur acquière lui-même ses connaissances, en apprenant à partir d'exemples. Le domaine scientifique relatif à cet «apprentissage automatique» a connu plusieurs vagues de progrès, et l'on y a exploré de nombreux algorithmes et formalismes mathématiques. Une bonne partie d'entre eux sont regroupés derrière l'idée des «réseaux de neurones», qui consiste à s'inspirer du cerveau pour effectuer des formes de calcul différentes de celles de l'ordinateur classique.

Dans cette approche, des neurones artificiels (des éléments logiciels ou matériels) reçoivent des signaux provenant d'autres neurones, font un calcul relativement simple pour combiner ces signaux et renvoient le résultat à d'autres neurones (voir l'encadré page 102). Les réseaux neuronaux artificiels sont souvent organisés en couches successives, les résultats calculés par une couche étant envoyés aux couches suivantes.

L'AUTEUR



YOSHUA BENGIO
professeur
au département
d'informatique
et recherche
opérationnelle
de l'université
de Montréal