

Astrophysique

Le prix Nobel de physique 2020 honore des travaux sur les trous noirs

Le Britannique Roger Penrose est récompensé pour ses travaux théoriques sur les trous noirs. L'Allemand Reinhard Genzel et l'Américaine Andrea Ghez sont distingués pour leur découverte du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée.

SEAN BAILLY | 06 octobre 2020 | 9MN



Les trois lauréats du prix Nobel 2020 de physique : Roger Penrose (à gauche, ici en 2005), Andrea Ghez (au centre) et Reinhard Genzel (à droite en 2012).

© À gauche : Wikimedia Commons/Festival della Scienza (CC BY-SA 2.0) ; au centre : Elena Zhukova ; à droite : Wikimedia Commons/MPE (CC BY-SA 3.0)

Cette année, le prix Nobel de physique porte sur les objets parmi les plus exotiques de l'Univers, les trous noirs. Pendant longtemps, les physiciens se sont demandé si les trous noirs étaient réels, s'ils pouvaient se former dans le cosmos ou s'ils n'étaient que des artefacts des équations de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein.

En 1965, Roger Penrose a démontré que les trous noirs pouvaient se former dans des conditions réalistes et les a décrits en détail. En particulier, les trous noirs

cachent en leur cœur une singularité de densité infinie où les lois de la relativité générale cessent de s'appliquer.

À partir du début des années 1990, Reinhard Genzel et Andrea Ghez ont dirigé indépendamment deux études observationnelles des étoiles évoluant au plus près du centre de la Voie lactée, dans une région nommée Sagittarius A*. Leur dynamique a montré qu'elles étaient en orbite autour d'un objet très massif d'environ 4 millions de masses solaires dans un volume plus petit que le Système solaire. Ils ont ainsi apporté une preuve indirecte de l'existence d'une classe particulière de trous noirs : les trous noirs supermassifs nichés au centre des galaxies.

L'histoire des trous noirs commence cependant bien plus tôt, dès la fin du xviii^e siècle. En étudiant les conséquences de la mécanique newtonienne appliquée à des objets très massifs, les savants John Michell et Pierre-Simon Laplace ont remarqué (indépendamment, en 1783 pour le premier et 1796 pour le second), qu'on peut concevoir des objets gigantesques (par exemple 500 fois plus grand que le Soleil avec la même densité) dont le champ gravitationnel est si fort, et donc la vitesse de libération si élevée, que même la lumière ne pourrait s'échapper de l'astre. Ce seraient alors des « objets noirs ». Michell s'était même demandé comment détecter de tels objets : « Si des objets lumineux évoluaient autour d'eux alors peut-être qu'à partir du mouvement de ces corps en orbite nous pourrions inférer l'existence des objets au centre avec une certaine probabilité. » C'est cette même idée qui sera utilisée, deux cents ans plus tard, par Reinhard Genzel et Andrea Ghez pour mettre en évidence la présence du trou noir supermassif au centre de la Voie lactée.

Le concept d'objet noir de Michell et Laplace avait cependant l'inconvénient d'être le résultat d'une réflexion dans le cadre de la mécanique newtonienne. Or, en novembre 1915, Albert Einstein a montré que cette dernière n'était qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale, la relativité générale. Le physicien allemand a conclu que la masse et l'énergie déformaient le tissu de l'espace-temps. La courbure de ce dernier, en déviant la trajectoire des objets qui s'y déplacent, correspond à ce que l'on nomme la force gravitationnelle.

Malgré la complexité mathématique de cette théorie, en quelques mois, l'astronome allemand Karl Schwarzschild a proposé une solution aux équations d'Einstein, dans le cas d'un objet massif sphérique et sans rotation. La solution

de Schwarzschild avait cependant deux problèmes : elle prend une valeur infinie au centre, et pour un rayon $r = 2GM/c^2$ (où G est la constante gravitationnelle, M la masse de l'objet et c la vitesse de la lumière), depuis nommé rayon de Schwarzschild. Comment interpréter ce résultat ?

Si le problème du centre a été assez vite interprété comme une vraie singularité, indiquant que la théorie de la relativité générale ne décrit plus correctement la physique en ce point, le rayon de Schwarzschild a été difficile à comprendre. Après plusieurs décennies, les chercheurs ont montré que cette singularité était juste un problème de choix du système de coordonnées. Mais pas seulement...

En 1939, les Américains Robert Oppenheimer et Hartland Snyder ont étudié comment un nuage de matière s'effondre sur lui-même. Ils ont alors compris le sens physique du rayon de Schwarzschild. Ce dernier définit un « horizon » dont tout objet qui pénètre à l'intérieur ne peut plus s'échapper, pas même la lumière. On a alors un « trou noir » (le nom ne sera inventé que dans les années 1960). Ainsi, une étoile très massive qui s'effondre sur elle-même pourrait former un trou noir. L'astre se « couperait » alors du reste de l'Univers et ne peut plus émettre d'information vers un observateur lointain. Seul son champ gravitationnel persisterait.

Cette idée a cependant été accueillie avec scepticisme. Une hypothèse centrale du calcul d'Oppenheimer et Snyder était que le système devait présenter une symétrie sphérique. Or dans la nature, rien n'est parfaitement symétrique. Une étoile qui s'effondre finirait-elle réellement dans cet état si étrange qu'est un trou noir, ou rebondirait-elle sur son cœur en explosant et en dispersant sa matière dans le milieu interstellaire ?

L'idée de trou noir a été relancée dans les années 1960 avec l'observation des quasars. En particulier, en 1963, Maarten Schmidt a montré que le quasar QSO 3C 273 était situé à 760 mégaparsecs (2,4 milliards d'années-lumière). Mais vu sa distance, il devait être 1 000 fois plus brillant que toute la Voie lactée ! En 1964, Edwin Salpeter et Yakov Zeldovitch ont suggéré que les quasars sont des galaxies dont le centre est occupé par un trou noir supermassif qui engloutit des quantités colossales de matière. Cette dernière s'échauffe en tombant et rayonne intensément.

Restait à résoudre la question de la formation d'un trou noir dans des conditions

réalistes. Le mathématicien Roger Penrose s'est penché sur le problème dès 1964. Il a considéré le problème sans faire l'hypothèse de symétrie sphérique. Pour parvenir à une solution, il a développé des outils mathématiques inspirés de la topologie. Il a ainsi montré que, sous des conditions très générales (sans symétrie particulière), l'effondrement de matière conduit à la formation d'une singularité et d'un horizon, c'est-à-dire d'un trou noir.

Les trous noirs ne sont donc pas seulement un artefact mathématique des équations de la relativité générale. Ils peuvent se former lors de l'effondrement du cœur d'une étoile massive. La découverte des quasars a également amené le Britannique Donald Lynden-Bell, en 1969, à suggérer que la plupart des galaxies hébergent un trou noir supermassif en leur centre, dont la masse pourrait atteindre un million voire un milliard de fois celle du Soleil. Deux ans plus tard, avec son compatriote Martin Rees, ils ont suggéré que c'était aussi probablement le cas dans la Voie lactée.

Mais les instruments de l'époque avaient une résolution trop faible pour scruter le centre galactique, identifié par Harlow Shapley il y a près de cent ans, dans la direction de la constellation du Sagittaire. À la fin des années 1960, la source radio Sagittarius A* avait été clairement identifiée comme étant le centre de la Voie lactée. Cependant, cette région est riche en gaz, en poussière (ce qui la rend particulièrement opaque à la lumière visible) et en étoiles tournant sur des orbites serrées.

À partir des années 1990, la résolution des télescopes géants dans le proche infrarouge est devenue suffisante pour observer le centre galactique. L'équipe de Reinhard Genzel a d'abord utilisé le *NTT* (*New technology telescope*) à la Silla, au Chili, puis le *VLT* (*Very large telescope*), au Paranal, également au Chili. L'équipe d'Andrea Ghez a pour sa part utilisé l'observatoire *Keck*, à Hawaï.

L'étude du centre galactique nécessite un suivi sur une longue durée, ce qui exclut l'utilisation des télescopes spatiaux. Mais les observatoires au sol ont l'inconvénient d'être soumis aux turbulences atmosphériques, qui altèrent la qualité des images. Pour compenser cette perturbation, les deux équipes ont d'abord utilisé une technique nommée *speckle imaging*, mais celle-ci ne permettait de suivre que les étoiles les plus brillantes. À partir des années 2000, les deux équipes ont utilisé une nouvelle technique, l'optique adaptative. Elle consiste à créer une étoile artificielle à côté de la zone observée avec un laser qui

excite les atomes de sodium de l'atmosphère. Les déformations dues aux turbulences atmosphériques sont alors analysées en direct et corrigées grâce à un miroir secondaire déformable.

Les deux équipes ont ainsi suivi, grâce à des données toujours plus précises, les étoiles les plus proches du centre galactique. Elles ont notamment suivi la trajectoire de l'étoile S2, dont la période de révolution est de seulement seize ans (le Soleil effectue un tour de la Galaxie en deux cents millions d'années). Les deux équipes sont arrivées à la même conclusion : la course elliptique de l'étoile S2 suggère qu'elle évolue autour d'un objet de près de 4 millions de masses solaires, compatible avec un trou noir supermassif.

Les résultats de Roger Penrose, Reinhard Genzel et Andrea Ghez ont été le point de départ de nombreux travaux aussi bien théoriques qu'observationnels sur les trous noirs, l'astrophysique en général et la cosmologie. Par exemple, Roger Penrose et Stephen Hawking ont utilisé les mêmes outils pour montrer qu'une singularité passée est inévitable dans le modèle du Big Bang. Ces travaux ont aussi amené au phénomène du rayonnement de Hawking et de l'évaporation des trous noirs. Aujourd'hui, le défi pour les théoriciens est de comprendre comment concilier la mécanique quantique et la relativité générale pour décrire plus précisément ce qui se passe au niveau de la singularité.

Des observations sur les trous noirs pourraient apporter des indices. C'est notamment le cas du consortium Gravity qui continue d'observer Sagittarius A*, ou encore du télescope *Event Horizon*, qui a réalisé en 2019 la première image d'un trou noir supermassif au centre de la galaxie M87. Les interféromètres lasers géants *Ligo* et *Virgo* traquent également les ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence de deux trous noirs.