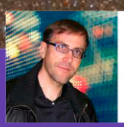
Trous noirs : enfin la preuve de leur existence grâce aux ondes gravitationnelles ?

ACTUALITÉ | *Classé sous :* TROUS NOIRS , GRAVASTAR , RELATIVITÉ GÉNÉRALE



Laurent Sacco
Journaliste

Publié le 18/09/2019

Les trous noirs peuvent vibrer en émettant des ondes gravitationnelles avec un spectre caractéristique comme des atomes émettant de la lumière à la suite d'un choc. Ce spectre des trous noirs est caractérisé par ce que l'on appelle des modes quasi-normaux et que l'on sait calculer. Ces modes commencent à pointer le bout de leur nez dans les signaux détectés par Ligo, ce qui ouvre la porte à l'obtention prochaine d'une preuve très convaincante de l'existence des trous noirs comme nous l'explique Olivier Minazzoli, membre de la collaboration Virgo et travaillant au centre scientifique de Monaco et à l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA).



Ondes gravitationnelles : leur détection expliquée en une minute **Ça y est, des ondes gravitationnelles ont été détectées. Ces fluctuations de l'espace-temps proviennent de la fusion de deux trous noirs d'environ 30 fois la masse de notre Soleil. Découvrez dans cette vidéo comment les scientifiques de Ligo ont pu effectuer ces premières mesures.**

Ondes gravitationnelles : leur détection expliquée en une minute **Ça y est, des ondes gravitationnelles ont été détectées. Ces fluctuations de l'espace-temps proviennent de la fusion de deux trous noirs d'environ 30 fois la masse de notre Soleil. Découvrez dans cette vidéo comment les scientifiques de Ligo ont pu effectuer ces premières mesures.**

Le Britannique John Michell (1783) et le Français Pierre-Simon de Laplace (1796) ont pressenti le concept de trou noir dès la fin du XVIII^{e} siècle en réfléchissant à la vitesse de libération limite d'un corps d'une masse et d'un rayon donnés. La question était naturelle car, à cette époque, c'est le modèle corpusculaire qui dominait la conception de la lumière et l'on suspectait également que la matière était faite de particules. Si la vitesse de libération d'un tel corps dépassait la vitesse de la lumière, il devait donc être nécessairement et parfaitement noir car aucun rayonnement ne pouvait s'en échapper.

L'idée ne reprendra vie qu'au cours de la seconde moitié du XX^{e} siècle, avec la découverte de la théorie de la relativité générale et celle de la fameuse solution de Schwarzschild dont la nature physique, aussi bien que la structure mathématique, n'ont commencé à être comprises qu'au cours des années 1950 et 1960. L'avènement de la théorie ondulatoire moderne de la lumière, suite aux travaux de Young, Fresnel et bien sûr, Maxwell au XIX^{e} siècle, n'impliquait en effet aucune action de la gravitation sur la lumière, contrairement aux particules de lumière de Newton décrivant des trajectoires sous forme de rayons lumineux selon des lois analogues à celles des particules matérielles.

Comme Einstein et d'autres, le physicien John Wheeler était initialement sceptique quant à l'existence de ce qu'il a lui-même appelé un trou noir en 1967 et qui était impliqué par la solution de Schwarzschild. Il changea d'avis au début des années 1960 et avec ses collaborateurs, il se joignit à l'école britannique menée par un ancien thésard de Paul Dirac, Denis Sciama, et ses élèves (Roger Penrose et Stephen Hawking), ainsi qu'à l'école russe menée par Yakov Zeldovitch et Igor Novikov, pour explorer la théorie des trous noirs pendant la période allant de 1963 à 1973 environ, période appelée depuis l'âge d'or de la théorie des trous noirs. On peut la faire débuter avec la découverte de la solution de Kerr décrivant un trou noir en rotation et la faire finir avec la découverte du rayonnement des trous noirs par Hawking.



Tullio Regge (1931-2014) est un physicien théoricien italien. On lui doit des travaux importants en physique des particules élémentaires (pôles de Regge) et en relativité générale. Il a été l'un des pionniers d'une approche quantique de la gravitation (Calcul de Regge) qui se retrouvera plus tard en relation avec la théorie de la gravitation quantique à boucles. Avec John Wheeler, il a posé les bases de la théorie des perturbations des trous noirs de Schwarzschild qui mènera à la découverte de leurs modes quasi-normaux. © *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*

Des trous noirs qui vibrent quand ils entrent en collision

Les physiciens et mathématiciens relativistes vont alors définir les trous noirs uniquement comme des objets occupant une région fermée de l'espace-temps dont rien ne peut sortir du fait du caractère fini de la vitesse de la lumière : l'horizon des événements -- c'est la présence d'un tel horizon, et rien d'autre, qui définit un trou noir, pas même la présence d'une singularité avec densité et courbure infinie de l'espace-temps en son centre qui est, de plus, douteuse à cause des effets quantiques. Ils vont montrer qu'il n'existe alors qu'une famille de solutions nécessairement rigoureusement exactes des équations d'Einstein décrivant un trou noir. Cette famille ne dépend uniquement que de la masse, du moment cinétique et, éventuellement, des charges électriques, voire magnétiques des particules absorbées et de rien d'autre. C'est le théorème de l'unicité des trous noirs, plus souvent connu comme le théorème de la calvitie pour les trous noirs, en anglais le célèbre « *no-hair theorem* ».

Concrètement, dans le royaume de l'astrophysique où les étoiles tournent toutes et où l'on s'attend naturellement à la formation de trous noirs, les plus simples sont sans rotation et possèdent uniquement une masse, les trous noirs de Schwarzschild ; et les plus réalistes sont aussi en rotation, les trous noirs de Kerr.

En théorie, ils ne gardent pas la mémoire des caractéristiques différentes d'objets de même masse et de même moment cinétique qui tomberaient dans ces régions particulières de l'espace-temps. Ils oublient en particulier des nombres quantiques normalement conservés associés aux baryons et aux leptons -- ce qui joue peut-être un rôle encore mystérieux dans la solution de l'énigme de l'absence d'antimatière en cosmologie.

La surface de l'horizon des événements d'un trou noir, de Schwarzschild ou de Kerr, est parfaitement lisse, sphérique (d'où le lien avec le terme de calvitie) mais elle se déforme temporairement en devenant bosselée lorsqu'un trou noir absorbe un objet, par exemple un astéroïde, ou lors d'une collision avec un autre trou noir.



Le travail le plus célèbre du physicien indien, C.V. Vishveshwara (1938-2017), est la découverte des modes quasi-normaux des trous noirs. En 1970, il a montré qu'un trou noir de Schwarzschild perturbé par une impulsion de rayonnement gravitationnel reprendra son état d'origine en émettant des ondes gravitationnelles d'une forme caractéristique déterminée par ce qui est appelé des modes quasi-normaux. Les fréquences (complexes) de ces modes quasi-normaux pour des trous noirs de Schwarzschild sont indépendantes de la forme de cette perturbation et sont entièrement caractérisées par la masse du trou noir. Plus tard, ce résultat a été généralisé au cas des trous noirs de Kerr en rotation. Les modes quasi-normaux sont alors des fonctions de la masse et du moment angulaire propre, le spin, du trou noir. L'observation des modes quasi-normaux est considérée comme un moyen d'établir l'existence des trous noirs. © *International Centre for Theoretical Sciences*, Bengaluru

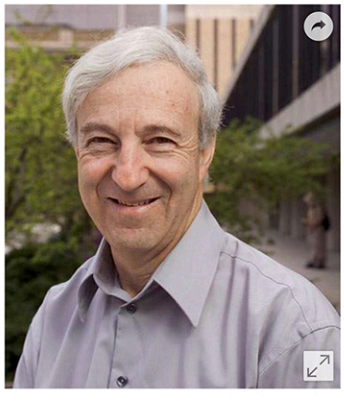
Des modes quasi-normaux caractéristiques des trous noirs

Cette dernière situation est très intéressante car la collision et la fusion de deux trous noirs en forment un autre. Ce trou noir nouvellement formé, là non plus, n'a pas un horizon régulier des événements. Les équations d'Einstein sont alors formelles, cela ne peut durer et, très rapidement, la surface de l'horizon vibre comme le ferait une cloche sous l'effet d'un coup. Il existe alors, ce que l'on appelle d'ailleurs dans les deux cas, des modes quasi-normaux pour ces vibrations qui vont s'amortir, sous l'effet de l'émission d'ondes gravitationnelles dans les premiers cas, et avec des émissions sonores pour une cloche. L'effet d'amortissement va faire prendre au trou noir, après une fusion, la forme exacte décrite par la fameuse métrique de Kerr pour un trou noir sans charges en rotation.

Comme ces modes quasi-normaux ont des fréquences déterminées par la théorie des trous noirs, fixés par la masse et le spin du trou noir final, faire leur découverte dans le spectre des ondes gravitationnelles serait une preuve très convaincante de l'existence d'un horizon des événements et donc, de l'existence des trous noirs... mais à condition que les fréquences trouvées (d'autres astres compacts avec des modes quasi-normaux sans horizon des événements sont possibles) soient précisément celles déduites des solutions perturbées décrivant des trous noirs.

Rappelons pour la suite de cet article que les équations de la théorie de la relativité générale sont non-linaires. Elles sont donc beaucoup plus difficiles à résoudre que dans le cas des équations linéaires et nécessitent parfois l'usage de simulations numériques sur ordinateur. Ce n'est pas un cas unique, les équations de Navier-Stokes en mécanique des fluides, non-linéaires elles aussi, peuvent par exemple être utilisées analytiquement pour décrire le mouvement de petites vagues à la surface de l'eau. Peut alors s'appliquer ce que l'on appelle la méthode des perturbations, méthode que l'on a aussi appliquée en régime linéaire pour décrire la façon dont les trous noirs se comportent lorsqu'ils subissent des effets de faibles intensités. Mais dans d'autres situations, l'usage de l'ordinateur devient nécessaire.

L'étude des modes quasi-normaux est un sujet de recherche important car, comme le rappelait Futura dans le précédent article publié ci-dessous avec une interview de Jean-Pierre Luminet, des alternatives aux trous noirs, comme les gravastars, ont été proposées pour rendre compte des objets observés en astrophysique, comme Sgr A* ou M 87*, qui semblent jusqu'à un certain point se comporter comme des trous noirs.



Saul A. Teukolsky (1947-) est un astrophysicien relativiste d'origine sud-africaine spécialisé dans la résolution numérique des équations d'Einstein appliquée à la physique des trous noirs et des étoiles à neutrons, notamment avec le phénomène d'émission des ondes gravitationnelles dont il modélise les formes pour la détection avec des instruments comme Ligo et Virgo. Il est aussi connu pour ses travaux sur les perturbations de la solution de Kerr pour les trous noirs en rotation, alors qu'il passait sa thèse sous la direction du prix Nobel de physique Kip Thorne. © 2019 *Cornell University*

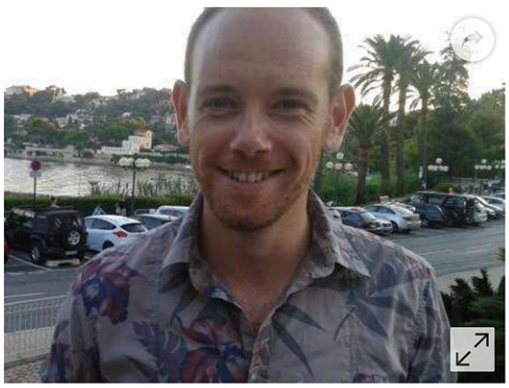
C'est précisément, en partie, pour tenter de mettre fin au débat quant à l'existence réelle des trous noirs que les projets de détecteurs d'ondes gravitationnelles que sont Ligo, Virgo et eLisa ont été conçus et lancés.

La découverte de la première source d'ondes gravitationnelles qui a frappé la Terre le 14 septembre 2015 a donc fait grand bruit. GW150914 correspondait à une collision suivie d'une fusion de deux trous noirs stellaires ayant dégagé en moins d'une seconde 50 fois plus d'énergie que toutes les étoiles de l'univers observable, fût-elle sous forme électromagnétique, elle aurait paru dans notre ciel plus lumineuse que la pleine Lune bien que cette source soit distante de 1,3 milliard d'années-lumière environ.

Depuis lors, plusieurs dizaines de sources d'ondes gravitationnelles avaient été identifiées et les physiciens avaient bon espoir qu'avec l'essor de l'astronomie gravitationnelle et la montée en sensibilité des instruments, on finirait par identifier, puis mesurer de plus en plus finement les modes quasi-normaux des trous noirs.

Une bombe potentielle vient justement d'éclater à ce sujet et c'est une surprise puisqu'elle concerne une nouvelle analyse des données enregistrées concernant GW150914, le signal qui est, à ce jour, le plus clair avec un rapport signal/bruit étant le plus élevé comme disent les astrophysiciens dans leur jargon.

Deux articles au sujet des modes quasi-normaux probablement détectés ont été déposés sur arXiv, cosignés par Matthew Giesler, Maximiliano Isi, Mark Scheel et le célèbre astrophysicien relativiste Saul Teukolsky, bien connu pour ses simulations numériques sur ordinateurs concernant la physique des trous noirs et sa découverte technique d'une méthode de séparation des variables pour résoudre analytiquement des équations décrivant des perturbations de la métrique de l'espace-temps des trous noirs de Kerr.



Chercheur en astrophysique relativiste, Olivier Minazzoli a notamment travaillé pour la Nasa au JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), à Pasadena, en Californie, aux États-Unis. © Olivier Minazzoli

Pour en savoir davantage, nous avons demandé une fois de plus au physicien Olivier Minazzoli, membre de la collaboration Virgo et travaillant au centre scientifique de Monaco et à l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), de nous donner quelques explications supplémentaires.

Futura-sciences : la première détection de l'émission d'ondes gravitationnelles par Ligo a été réalisée il y a maintenant 4 ans, le 14 septembre 2015 précisément. Son annonce a été faite le 11 février 2016 par les laboratoires Ligo et Virgo dont les équipes ont conjointement analysé le signal détecté. Peut-on vraiment dire maintenant que l'on commence à trouver les modes quasi-normaux tant recherchés ?

Olivier Minazzoli : on ne peut pas encore parler de découverte des modes quasi-normaux à proprement parler. Les indices vont dans le bon sens, mais ne sont pas encore suffisamment fiables. Il va falloir probablement attendre de nouvelles détections avec un meilleur rapport signal à bruit pour pouvoir réellement parler de détection. D'ailleurs, des premiers indices de la présence de ces modes avaient déjà été donnés par la collaboration Ligo-Virgo. Mais ce qui est nouveau avec ces nouvelles études, est la mise au jour de la présence potentielle de modes au-delà du mode fondamental.

Futura-sciences : comment ces études ont-elles mis cela en évidence?

Olivier Minazzoli : il y avait des incertitudes théoriques sur la façon d'analyser la forme du signal accompagnant la fusion de deux trous noirs. Cette fusion est suivie d'une phase où le trou noir nouvellement formé a une surface de l'horizon des événements qui vibre. Ces vibrations s'amortissent rapidement du fait de l'émission d'ondes gravitationnelles.

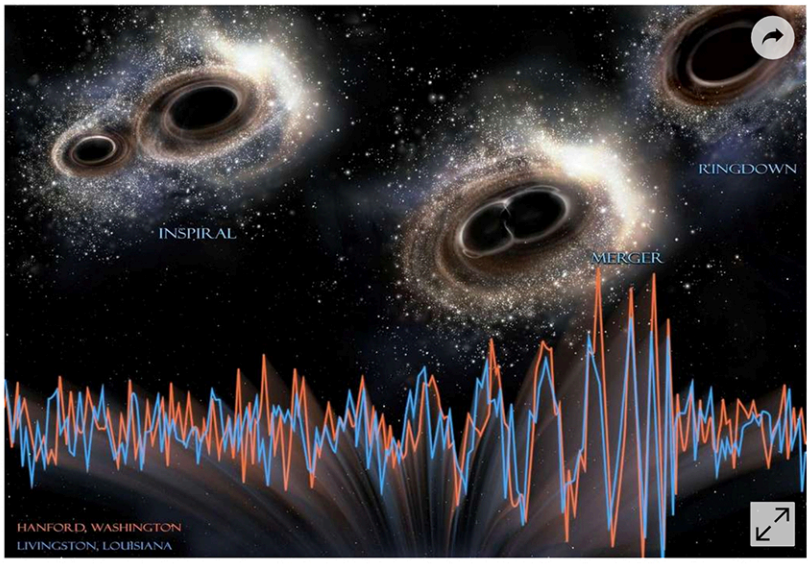
Les vibrations d'un trou noir sont décrites par une série de fréquences fondamentales avec des temps d'amortissement différents que l'on appelle des modes quasi-normaux. L'ensemble de ces fréquences particulières, autrement appelées le spectre, caractérise un trou noir, un peu comme le ferait celui associé à une cloche que l'on frappe et qui vibre en réponse.

Dans le cas d'un instrument de musique, on peut trouver une série de fréquences qui sont des multiples entiers des fréquences fondamentales qui caractérisent cet instrument. On les qualifie d'harmoniques en français, et d'« *overtones* » en anglais. Dans le spectre d'un trou noir dans sa phase de vibration (« *ringdown* » comme disent les anglo-saxons), il existe aussi des sortes d'harmoniques analogues, également appelées « *overtones* ». Beaucoup pensait jusqu'alors que leurs contributions étaient négligeables à la forme du signal.

Une complication supplémentaire était qu'il existait une incertitude sur le moment précis du début de cette phase de vibration. En effet, les équations de la théorie de la relativité générale sont non-linaires, et il était donc raisonnable de penser que des non-linéarités pouvaient impacter le signal proche de son maximum. Or, ces non-linéarités en général ne peuvent être décrites que par des simulations numériques. Tout donc portait à croire que le signal proche de son maximum ne pouvait pas être bien décrit par une simple vibration amortie, c'est à dire le fameux ringdown.

L'hypothèse de travail qui était adoptée jusqu'à présent était donc que l'on ne pouvait pas dire grand chose autour du maximum du signal, lors de la fusion en cours de deux trous noirs (« merging » en anglais), et qu'il fallait imposer aux analyses du ringdown de ne considérer le signal qu'après un certain délai suivant ce maximum. C'est ce que faisait notamment la collaboration Ligo-Virgo, qui mettait en évidence des résultats plus ou moins cohérents en fonction du délai considéré.

Gielser & co. montrent dans leur premier papier qu'en fait, il est possible d'analyser le ringdown depuis le pic du signal, à condition de prendre en compte des modes d'ordres plus élevés : les fameux overtones.



Inspiral, merger, ringdown **: ce sont les noms anglais des trois étapes qui ont conduit deux trous noirs à se rapprocher en décrivant une spirale à la suite des pertes d'énergies sous forme d'ondes gravitationnelles, puis à entrer en collision pour finalement donner un seul trou noir. L'horizon des évènements de l'objet compact final a vibré, telle une cloche frappée, en émettant des ondes gravitationnelles. L'évènement a duré moins d'une seconde. Les courbes montrent les signaux détectés par les deux interféromètres Ligo, à Handford, et à Livingston, aux États-Unis, le 14 septembre 2015 et elles sont en correspondance avec la chronologie des événements. © Ligo, NSF, Aurore Simonnet**

Futura-sciences : c'est donc la prise en compte des overtones par Matthew Giesler, Maximiliano Isi, Mark Scheel et Saul Teukolsky qui a tout changé ?

Olivier Minazzoli : en effet ! En se basant sur des résultats d'expériences avec des simulations numériques, pour lesquelles on connaissait donc les masses et les moments cinétiques des trous noirs avant fusion et celles du trou noir final après fusion, ils ont montré que la prise en compte des overtones, de façon surprenante, permettait d'étendre le régime d'application des méthodes de perturbation linéaire décrivant la phase de vibration jusqu'au pic des émissions (au moment de la fusion), et d'en décrire la forme.

La contribution de ces overtones n'est donc pas du tout négligeable. Mieux, ils ont montré que leur prise en compte permettait même d'améliorer l'analyse du signal produit par le ringdown, permettant d'en tirer une meilleure estimation des valeurs de la masse et du moment cinétique du trou noir final. Dès lors, on pouvait dire que certains des overtones proches des modes quasi-normaux fondamentaux semblaient pouvoir devenir accessibles à la mesure.

Futura-sciences : on est donc passé ensuite de la théorie à la pratique ?

Olivier Minazzoli : exactement, Maximiliano Isi, Matthew Giesler, Mark Scheel et Saul Teukolsky ont donc publié un article dans la revue *Physical Review Letters*, avec leur collègue Will M. Farr, dans lequel ils exposent les résultats obtenus avec GW150914. Ils pensent avoir mis en évidence la présence potentielle du mode fondamental quasi-normal et d'au moins un de ses overtones, tous deux associés au mode angulaire dominant ($\ell = m = 2$) lié à ce que les physiciens appellent dans leur jargon des harmoniques sphériques.

Le résultat n'est encore qu'à 3.6 sigma mais il est remarquable que les modes mesurés conduisent à des estimations de la masse et du moment cinétique du trou noir final qui sont cohérents avec ce que l'on peut déduire notamment de la phase où les trous noirs orbitent l'un autour de l'autre.

Du travail reste encore à faire mais l'hypothèse que l'on est bien en présence de trous noirs de Kerr décrits par les équations de la relativité générale en sort renforcée. C'est de très bon augure pour la suite, avec les détections à venir. Et notamment, pourquoi pas, pour un jour, peut-être, être en mesure de tester certains aspects de gravitation quantique, tel que le propose par exemple Aurélien Barrau et ses collègues.

CE QU'IL FAUT RETENIR

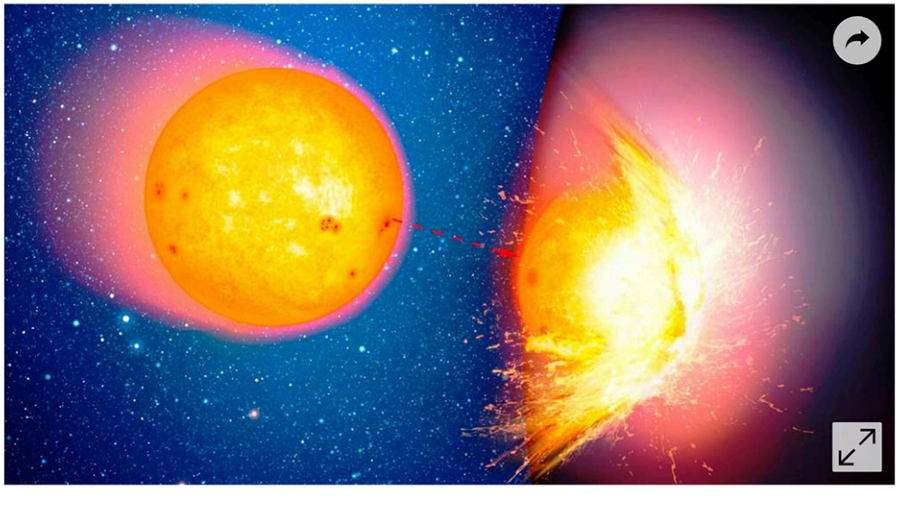
Les trous noirs sont définis par la formation d'un horizon des évènements, c'est-à-dire une région fermée de l'espace d'où rien ne peut s'échapper lors de l'effondrement gravitationnel d'un système physique. Cet horizon apparaît lorsqu'un corps devient suffisamment dense.

Il existe des alternatives à la théorie des trous noirs, notamment l'hypothèse des gravastars.

L'existence des trous noirs est très probable et l'une des stratégies pour le démontrer est de détecter, dans les ondes gravitationnelles produites par la fusion de deux trous noirs, la signature de ce que l'on appelle les modes quasi-normaux des trous noirs.

Ces modes sont caractéristiques des trous noirs qui vibrent sous l'effet d'une collision.

Ils commenceraient à être vus dans les données fournies par le détecteur Ligo.



Vue d'artiste de la collision d'étoiles avec la surface d'un gravastar, que l'on prenait à tort pour un trou noir supermassif. © Mark A. Garlick, CfA