

constitué de la fréquence fondamentale, les harmoniques s'étant évanouies. Transposé aux trous noirs, le comportement est similaire : alors que le mode fondamental perdure, des harmoniques peuvent avoir une contribution non négligeable au début de la phase de vibration du trou noir final, c'est-à-dire juste après la fusion. C'est bien ce qu'ont montré les chercheurs : un signal comportant un mode fondamental et des harmoniques peut tout à fait décrire le signal tel qu'il est prédit par les simulations numériques dès la fusion. En d'autres termes, soit les effets non linéaires sont négligeables, soit ils sont aussi bien décrits par des modes quasi normaux. Quoi qu'il en soit, plus besoin de se donner un laps de temps arbitraire entre la fusion et le début du signal pris en compte dans l'analyse spectroscopique.

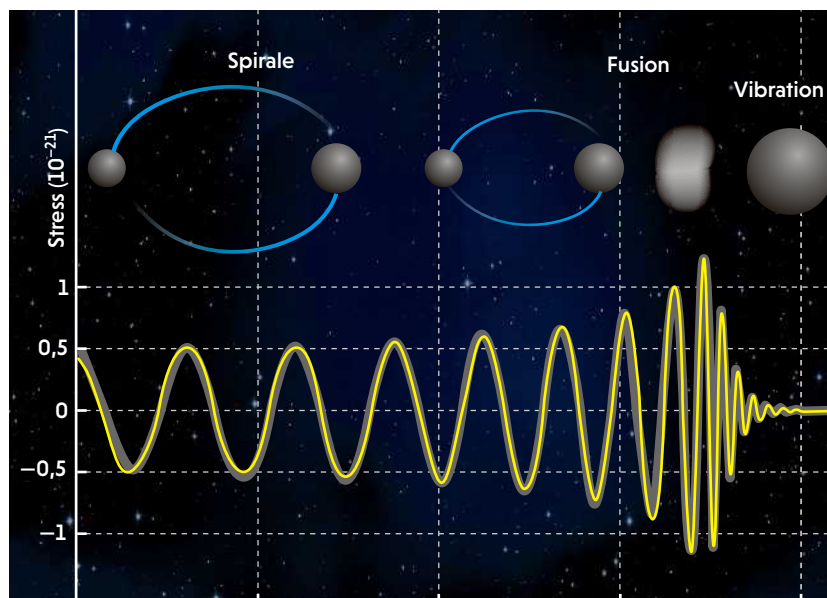
L'équipe de Matthew Giesler a notamment simulé le signal lié à la vibration du trou noir final en y ajoutant le type de bruit qui est attendu pour un signal réel, tel qu'il serait détecté par les interféromètres *Ligo* et *Virgo*. Ils ont ensuite appliqué leur méthode pour déduire du signal la masse et le moment angulaire du trou noir final, et dont la valeur était donnée par ailleurs par leur simulation numérique. Les deux coïncidaient. Il ne restait donc plus qu'à appliquer la méthode à de vraies données.

UN CHEVEU DANS LA SOUPE ?

C'est ce qu'ils ont fait dans une deuxième étude, cette fois coordonnée par Max Isi, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Ils ont appliqué leur méthode au signal du premier événement GW150914 et obtenu des résultats sur les valeurs de la masse et du moment angulaire du trou noir final en accord avec les premières analyses de la collaboration *Ligo-Virgo*, mais avec une incertitude réduite. Ils obtiennent surtout, et pour la première fois, des indices confirmant la présence d'harmoniques du mode fondamental dans le spectre de la phase de vibration de GW150914, ce qui est considéré par beaucoup comme un prérequis pour réellement parler de spectroscopie des trous noirs. En ce sens, leur analyse acterait la première étude spectroscopique d'un trou noir concluante.

Alors, est-il bien chauve ? Dans le cadre de la relativité générale, il est possible d'estimer les paramètres du trou noir final à partir de ceux des trous noirs originels. Or, avant la fusion, lorsque les deux trous noirs orbitent toujours l'un autour de l'autre, le signal gravitationnel détecté renseigne sur les paramètres de ces derniers. On peut alors comparer les estimations des paramètres du trou noir final obtenues à partir soit du signal avant la fusion, soit de celui produit après, lors de la vibration du trou noir final.

Si la théorie de la relativité générale est correcte, les résultats devraient être similaires.



La fusion de deux trous noirs se déroule en trois étapes : la phase spirale, durant laquelle les deux trous noirs originels orbitent l'un autour de l'autre, la phase de fusion et la phase de vibration (ou de désexcitation) du trou noir final. Les ondes gravitationnelles varient au cours de l'événement. Pour la première onde gravitationnelle, nommée GW150914, détectée par les deux interféromètres *Ligo* le 15 septembre 2014, la figure montre un signal reconstruit (en gris) à partir des données comparé à une simulation numérique fondée sur la relativité générale (en jaune).

Plus précisément, puisque l'analyse de la phase de vibration du trou noir final fait l'hypothèse, par construction, que l'objet final est un trou noir « chauve », la cohérence des résultats obtenus séparément à partir des données avant et après la fusion serait une preuve que l'objet final serait, non seulement un trou noir, mais un trou noir chauve. La spectroscopie des trous noirs a donc l'avantage d'offrir aux astronomes un nouveau type de tests de la relativité générale dans des régimes jusque-là inaccessibles.

Les résultats de Max Isi et de ses collègues sur GW150914 sont encore modestes, mais vont dans le bon sens : le spectre du trou noir final est en accord avec l'hypothèse de calvitie à 20% près. Cette valeur, encore assez peu concluante, résulte de la faible intensité du signal pendant la phase de vibration pour l'événement GW150914. Mais ce chiffre devrait s'améliorer avec de nouvelles détections. À moins que la relativité générale ne soit finalement pas la meilleure description de la nature géométrique de l'espace-temps. Par exemple, Aurélien Barrau et ses collègues ont récemment suggéré que l'étude du spectre des trous noirs pourrait, peut-être, un jour être utilisée pour tester certains aspects, pour le moment hypothétiques, de la gravitation quantique. La spectroscopie des trous noirs aidera à trancher. Tout écart à la calvitie des trous noirs serait un indice d'une nouvelle physique, un cheveu dans la soupe du modèle standard. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. ISI ET AL., Testing the no-hair theorem with GW150914, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, art. 111102, 2019.

R. RUFFINI ET J. WHEELER, Introducing the black hole, *Physics Today*, vol. 24(1), pp. 30-41, 1971.

L'ESSENTIEL

● Comme les trous noirs, les trous blancs sont des solutions des équations de la relativité générale. Alors que rien ne s'échappe d'un trou noir, rien ne pénètre dans un trou blanc.

● Selon la théorie de la gravité quantique à boucles, les trous blancs seraient le destin ultime des trous noirs.

● La matière qui s'est effondrée dans un trou noir ressort de l'astre lorsque celui-ci se transforme en trou blanc.

● S'il n'y a pour l'instant aucune preuve de l'existence des trous blancs, différentes pistes sont explorées en lien avec la matière noire et les rayons cosmiques.

L'AUTEUR



CARLO ROVELLI
professeur à l'université
d'Aix-Marseille, chercheur
au Centre de physique
théorique de Luminy

Troublants trous blancs

Les trous blancs ? Des sosies inversés des trous noirs qui expulsent la matière sans jamais en absorber et seraient le destin ultime de ces astres ultracompacts. Leur détection ouvrirait une voie inédite sur la gravitation quantique.

Le 10 avril 2019, l'humanité a admiré pour la première fois une image réelle d'un trou noir : une tache noire entourée d'un anneau brillant. Grâce à ce « cliché » (voir *L'épopée d'une image historique*, par A. Riazuelo, page 16) nous avons maintenant une preuve visible et directe de l'existence de ces objets exotiques et extrêmes.

Si l'existence des trous noirs ne fait aujourd'hui guère de doute, de nombreuses décennies ont été nécessaires pour que les physiciens en soient persuadés. Les trous noirs étaient une sorte de curiosité mathématique, une des solutions possibles des équations de la relativité générale d'Einstein, mais sans

existence réelle dans l'Univers. En 1972, Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, futur Prix Nobel, qualifiait encore ces objets de « très hypothétiques ».

Les indices de leur réalité physique ont cependant fini par s'accumuler. Parmi les derniers, les interféromètres *Ligo* et *Virgo* ont détecté des ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, dont la forme correspond exactement à celle produite quand deux trous noirs tombent l'un sur l'autre en spiralant jusqu'à fusionner.

Cette histoire de la reconnaissance des trous noirs comme constituants de l'Univers pourrait bien se répéter avec d'autres objets tout aussi surprenants et exotiques que les trous noirs : les trous blancs. Comme leurs homologues sombres, ces astres correspondent à certaines solutions des équations de la relativité générale. Pour les décrire simplement, ce sont des trous noirs évoluant à l'envers : des trous noirs dont le film de la vie serait projeté en partant de la fin. Malgré cette différence, pour un observateur extérieur à un tel astre, il est difficile de distinguer un trou blanc d'un trou noir. Les deux sont massifs et dotés d'un champ gravitationnel attractif. Ils peuvent donc >