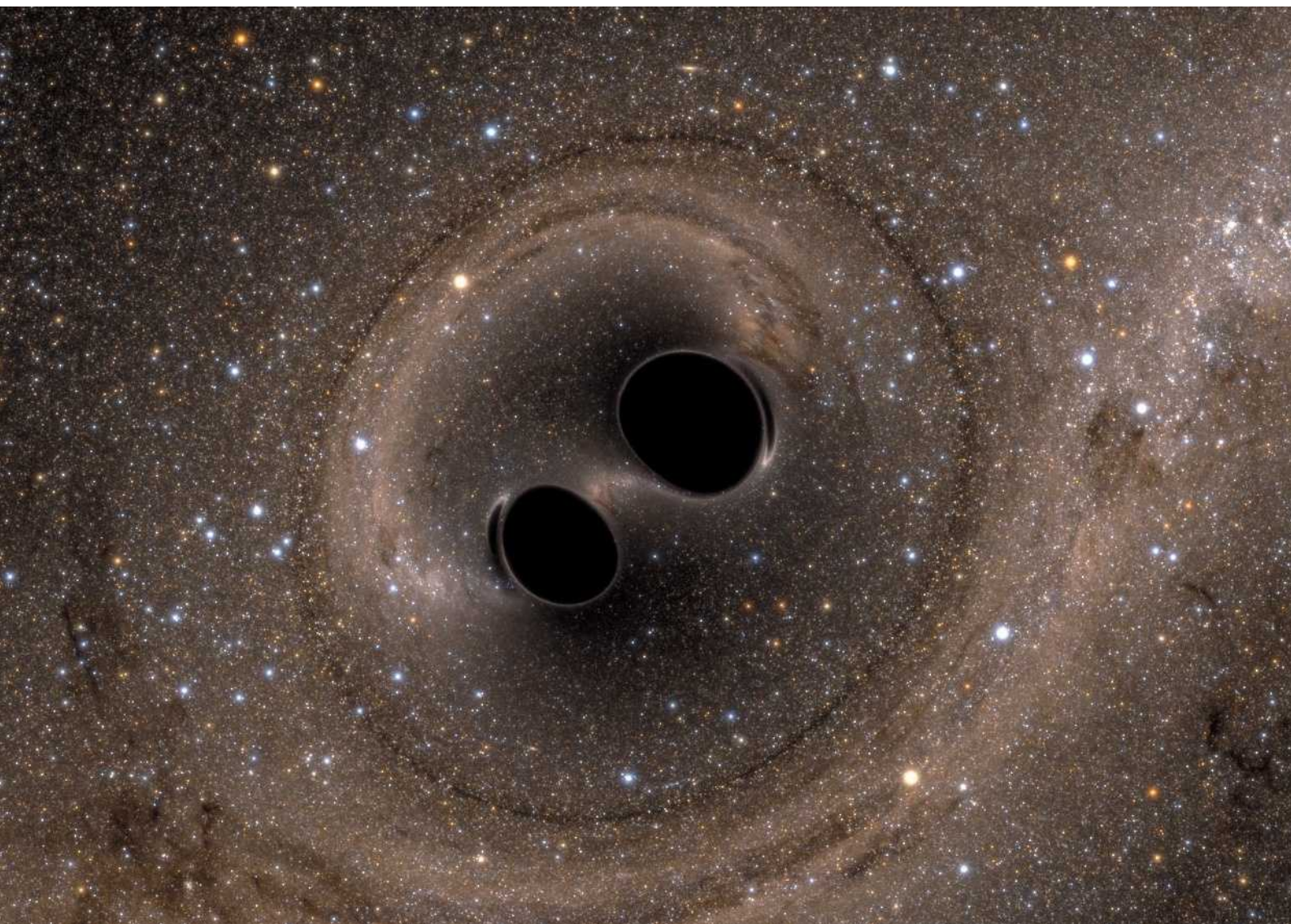




Avant de fusionner, deux trous noirs se rapprochent inexorablement en spiralant. Cette simulation montre ce que nous verrions depuis un hypothétique vaisseau spatial situé à proximité de l'événement. Les images des étoiles environnantes sont déformées par la gravité des trous noirs.

nulle, puisque l'on ne s'attend pas qu'un trou noir accrete uniquement de la matière chargée positivement (ou négativement). Deux nombres suffiraient donc à caractériser ces astres. C'est remarquable!

QUAND DEUX CHAUVES SE RENCONTRENT

Une telle simplicité ne se trouve le plus souvent que dans le monde microscopique et idéalisé des particules élémentaires, telles que les électrons, mais certainement pas dans le monde des objets macroscopiques. L'origine de la métaphore capillaire est ici: elle signifie en quelque sorte que rien à la surface des trous noirs ne complexifie leur nature fondamentalement simple. Un nouveau moyen de le vérifier, et de pousser la relativité générale dans ses retranchements, s'est récemment offert aux astronomes: l'étude des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs.

Lorsque deux trous noirs fusionnent, naît un nouveau trou noir plus massif que chacun des deux trous noirs originels, mais un peu moins massif que la somme des deux masses initiales, car une partie de l'énergie est libérée sous forme d'ondes gravitationnelles en vertu de la célèbre formule $E = mc^2$. Pendant un bref instant, le trou noir nouvellement formé émet de telles ondes, avant de retrouver un état d'équilibre. Ces ondes gravitationnelles consistent en des oscillations amorties dont les fréquences particulières, c'est-à-dire le spectre, dépendent exclusivement de la masse et du moment angulaire du trou noir final, si ce dernier est bel et bien chauve comme le prédit la relativité d'Einstein *via* le théorème de calvitie. De manière générale, même hors contexte gravitationnel, ces oscillations amorties sont nommées «modes quasi normaux». Elles sont typiques d'objets qui, soumis à une perturbation, dissipent l'énergie introduite par ➤

- > cette perturbation en retournant à l'équilibre, comme un diapason.

En conséquence, de la même manière que la spectroscopie atomique identifie des éléments par l'observation de la lumière émise à certaines fréquences spécifiques (les raies spectrales), la spectroscopie des trous noirs renseigne sur ces derniers par l'observation d'ondes gravitationnelles à des fréquences typiques. En somme, par l'étude du spectre des ondes gravitationnelles émises après la fusion de deux trous noirs, on est potentiellement capable de déduire la masse et le moment angulaire du trou noir final. Comme il est possible d'estimer par ailleurs ses paramètres à partir des propriétés observées des trous noirs initiaux, il est possible de confirmer qu'il est bien chauve. À l'inverse, l'observation d'une violation de cette propriété signifierait que la théorie sous-jacente n'est pas la relativité générale. Ce serait alors une porte ouverte vers une nouvelle physique.

Une subtilité semblait toutefois devoir contrarier ces analyses spectroscopiques. En effet, la relativité générale est une théorie non linéaire dont le comportement lors de la fusion de deux trous noirs ne peut s'approcher qu'au moyen de simulations numériques. Pour avoir des modes quasi normaux, les effets non linéaires doivent être négligeables. Mais on supposait qu'ils étaient importants dans le système durant un certain temps très bref avant et après la fusion. Le trou noir se comporterait donc bien comme une sorte de diapason et se prêterait à l'étude spectroscopique seulement au bout d'un certain temps, bref mais *a priori* inconnu, après la fusion.

Ainsi, les équipes de la collaboration *Ligo-Virgo* ont réalisé un début d'analyse spectroscopique à partir du signal (noté GW150914) des premières ondes gravitationnelles détectées

L'ÉTUDE DU SPECTRE

DES TROUS NOIRS POURRAIT

ÊTRE UTILISÉE POUR TESTER

CERTAINS ASPECTS

DE LA GRAVITATION QUANTIQUE

en 2015, mais en éliminant la première partie par peur des effets non linéaires potentiellement cachés et risquant de biaiser les résultats. L'idée était de maximiser les chances de validité de l'approximation en termes de modes quasi normaux. Cette méthode autorise bien une analyse conduisant à une valeur de la masse du trou noir final, mais elle reste peu précise.

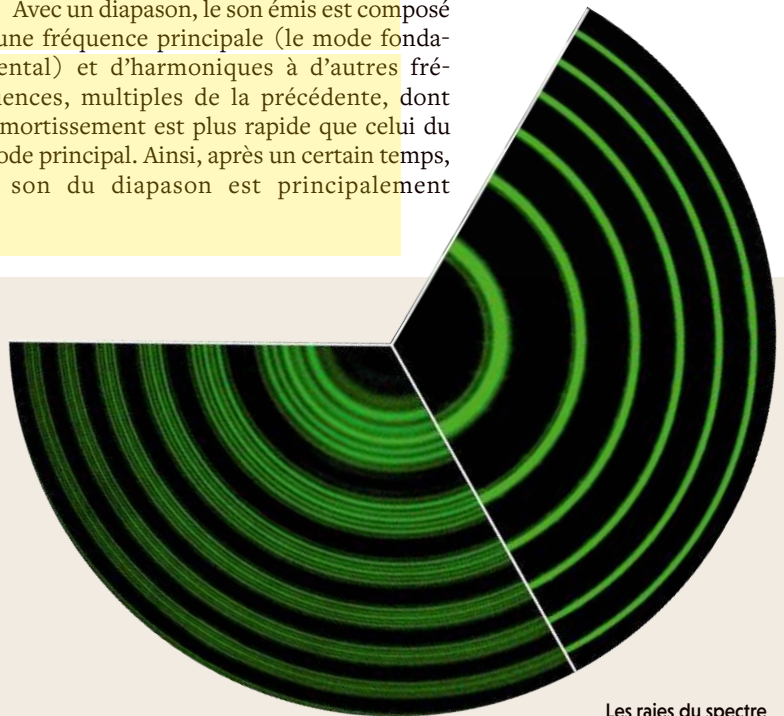
LE PROBLÈME DES EFFETS NON LINÉAIRES

Les travaux de Matthew Giesler, doctorant à l'institut de technologie de Californie (Caltech), et de ses collègues, ont changé la donne. Ils ont montré, à partir de simulations numériques, que le signal dès la fusion pouvait être décrit par des modes quasi normaux, dès lors que l'on ajoute des harmoniques au mode fondamental. En quoi consistent ces harmoniques ?

Avec un diapason, le son émis est composé d'une fréquence principale (le mode fondamental) et d'harmoniques à d'autres fréquences, multiples de la précédente, dont l'amortissement est plus rapide que celui du mode principal. Ainsi, après un certain temps, le son du diapason est principalement

L'EFFET ZEEMAN

En spectroscopie atomique, lorsqu'un atome est soumis à un champ magnétique, de nouvelles raies spectrales apparaissent autour des raies d'émission déjà présentes pour un atome non soumis à un champ extérieur. Les raies spectrales de l'atome sont en quelque sorte démultipliées. Il s'agit de l'effet Zeeman, qui a valu à son découvreur l'obtention du prix Nobel en 1902. L'effet est similaire pour un trou noir chauve, et donc en rotation, par rapport à un trou noir sans rotation. Les modes fondamentaux sont démultipliés, conduisant à un nouveau spectre particulier qui dépend de l'amplitude de la rotation.



Les raies du spectre du mercure (à droite) sont démultipliées en présence d'un champ magnétique (à gauche).

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.

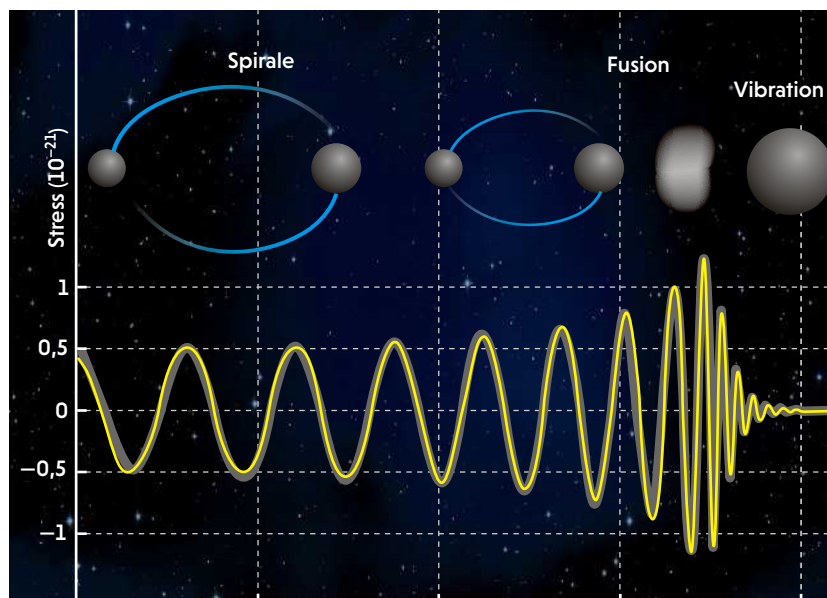
L'équipe de Matthew Giesler a notamment simulé le signal lié à la vibration du trou noir final en y ajoutant le type de bruit qui est attendu pour un signal réel, tel qu'il serait détecté par les interféromètres *Ligo* et *Virgo*. Ils ont ensuite appliqué leur méthode pour déduire du signal la masse 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.