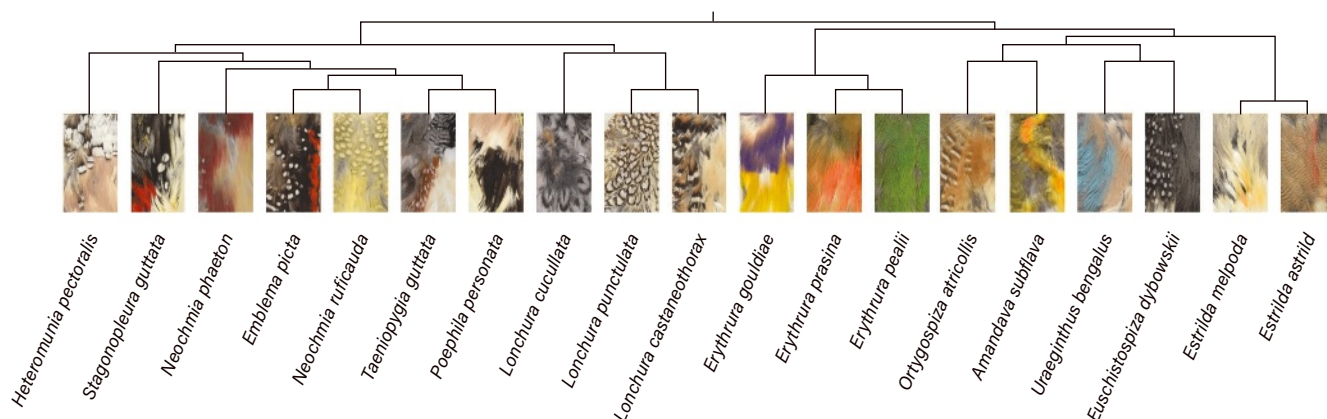




En examinant les domaines colorés de 38 espèces (ici seules 19 sont représentées) d'une famille de passereaux, les Estrildidés, Marie Manceau et son équipe ont montré que, malgré une extrême diversité visuelle, ces domaines (ici sur le ventre) présentent des régions conservées d'une espèce à l'autre, produites par instruction et dont la combinaison suffit à expliquer tous les motifs observés.

à celles de la caille donneuse? Oui, mais uniquement lorsque des somites étaient greffés. En d'autres termes, tout comme pour les précurseurs de plumes, dans le cas des motifs pigmentaires, les somites procurent une instruction, cette dernière contrôlant l'expression du gène *Agouti*.

Restait à comprendre quel mécanisme détermine la largeur et l'espacement des rayures. Nos expériences de gain et perte de fonction du gène *Agouti* ont montré l'effet de ce gène sur la largeur des bandes: le niveau d'expression de ce gène contrôle la largeur des bandes. Puis, en 2019, l'équipe de Cheng-Ming Chuong a mis en évidence une possible autoorganisation: en étudiant plus spécifiquement le rôle des mélanocytes, elle a montré que sous le contrôle du gène *Agouti*, ces cellules communiquent entre elles *via* leurs jonctions cellulaires, et que ce mécanisme crée une frontière plus ou moins nette entre chaque rayure. Les rayures des poussins de volaille sont donc également produites par une combinaison d'instruction précoce et d'autoorganisation locale.

DES FONDATIONS COMMUNES DOTÉES D'UNE FLEXIBILITÉ PLUS TARDIVE

Cette étape franchie, il était enfin possible d'explorer la combinaison de l'instruction et de l'autoorganisation chez différentes espèces d'oiseaux afin de comprendre comment elle influence l'évolution des motifs cutanés. C'est ce que nous avons fait au laboratoire. Nous avons comparé les rayures chez dix espèces de volaille et montré que leur position est conservée, ce qui s'explique par le fait que leur installation résulte d'une instruction précoce, tandis que leur espacement et leur largeur sont propres à chaque espèce, traduisant peut-être des différences d'autoorganisation locale des mélanocytes.

L'instruction pourrait donc construire des fondations communes qui contraignent le

motif, tandis que l'autoorganisation, plus tardive, procurerait une flexibilité produisant des différences. De même, dans des simulations numériques d'autoorganisation qui produisent des pois ressemblant à la géométrie des follicules, si l'on ajoute des conditions initiales plus strictes comme une direction antéropostérieure ou un ajustement des simulations à la taille de la zone à plumes, on reproduit alors à l'identique les géométries propres à chaque espèce.

Il est possible que la plupart des motifs naturels soient régis de cette façon – une hypothèse qui ouvre de nouvelles pistes de recherche. Ainsi, au laboratoire, nous documentons la variation pour en trouver les points communs et donc les origines conservées. Récemment, nous avons également décrit le motif pigmentaire d'une quarantaine de passereaux de la famille des Estrildidés et, malgré leur apparente diversité, identifié des domaines communs dont la position est constante (voir la figure ci-dessus). Par des analyses comparatives d'expression des gènes et de génomique, nous avons créé une carte moléculaire permettant de visualiser les régions de la peau embryonnaire qui précèdent chaque domaine de couleur. Les résultats montrent que la peau est comme un tableau de peinture au numéro: l'évolution colore différemment chaque domaine, mais est contrainte par leur position.

Par ailleurs, les signaux moléculaires ne sont pas les seuls modeleurs du paysage de variation des motifs: en effet, nous avons montré que la forme des cellules de la peau – en particulier leur élongation selon certains axes – contribue à contraindre la régularité des géométries de follicules. Il s'agit maintenant de comprendre comment signaux moléculaires et cellulaires interagissent, et d'étendre ces observations à une échelle de diversité plus grande. Et si nous n'étions tous que des variations sur un même thème? ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Hidalgo et al., **A conserved paint box underlies color pattern diversity in Estrildid finches**, prépublication *Biorxiv*, 2021.

C. Curantz et al., **Cell shape anisotropy and motility constrain self-organised feather pattern fidelity in birds**, prépublication *Biorxiv*, 2021.

R. Bailleul et al., **Symmetry breaking in the embryonic skin triggers directional and sequential plumage patterning**, *Plos Biology*, vol. 17(10), article e3000448, 2019.

M. Inaba et al., **Instructive role of melanocytes during pigment pattern formation of the avian skin**, *PNAS*, vol. 116(14), pp. 6884-6890, 2019.

N. Haupeix et al., **The periodic coloration in birds forms through a prepattern of somite origin**, *Science*, vol. 361, article eaar4777, 2018.

L'ESSENTIEL

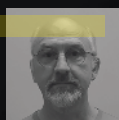
> Lors de la collision de galaxies, les trous noirs supermassifs qui en occupent les centres se rapprochent inexorablement et finissent par fusionner.

> Dans la phase qui précède la fusion, le couple de trous noirs émet des ondes gravitationnelles de très basse fréquence, que les interféromètres *Ligo* et *Virgo* ne sont pas en mesure de détecter.

> Le suivi de réseaux de pulsars pourrait mettre en évidence de telles ondes. Ces astres compacts émettent des ondes radio de façon très régulière. Des perturbations dans ces signaux témoigneraient du passage d'une onde gravitationnelle.

> Trois équipes internationales viennent d'annoncer de premiers indices de détection très prometteurs.

LES AUTEURS



GILLES THEUREAU
astronome au LPC2E (CNRS-Orléans) et à la station de radioastronomie de Nançay (observatoire de Paris)



SIYUAN CHEN
chercheur postdoctorant au LPC2E et à la station de radioastronomie de Nançay



ANTOINE PETITEAU
enseignant-chercheur au laboratoire Astroparticule et cosmologie (APC), à l'université Paris-Diderot

Des pulsars pour traquer les ondes gravitationnelles

En mesurant avec précision les signaux radio périodiques reçus de plusieurs dizaines de pulsars, les astrophysiciens comptent détecter les ondes gravitationnelles émises par des paires de trous noirs supermassifs. Cette démarche vient de livrer ses premiers résultats encourageants.

Lorsque votre réveil s'allume le matin, il met en mouvement l'air ambiant sous la forme d'ondes acoustiques qui font vibrer vos tympans et vous incitent à sortir du lit. En appuyant sur l'interrupteur de votre lampe de chevet, ce sont des ondes électromagnétiques qui stimulent les récepteurs de la rétine. Notre quotidien est en permanence confronté à de telles ondes dont on étudie les propriétés depuis le XIX^e siècle. Les ondes acoustiques correspondent par exemple à des vibrations d'un support matériel (l'air, l'eau, etc.).

En développant la théorie de la relativité générale en 1915, Albert Einstein a montré que l'espace-temps lui-même pouvait vibrer, parcouru par un nouveau type d'ondes : les ondes gravitationnelles. Ces dernières ont été mises

en évidence pour la première fois le 14 septembre 2015 grâce à des détecteurs géants, les interféromètres laser de la collaboration *Ligo-Virgo*.

Cette découverte a donné naissance à une nouvelle discipline : l'astronomie des ondes gravitationnelles. Le signal détecté en septembre 2015 avait été émis lors de la fusion de deux trous noirs de quelques dizaines de fois la masse du Soleil. Depuis, de nombreux autres événements du même type ont été détectés.

Le principe est simple. Lorsque les deux astres tournent l'un autour de l'autre, le système perd de l'énergie en faisant vibrer l'espace-temps. Les deux trous noirs se rapprochent en émettant des ondes gravitationnelles. Ces dernières contractent et dilatent l'espace-temps de façon alternée dans le plan perpendiculaire à sa direction de propagation. Ainsi, quand une



Sur cette vue d'artiste, deux galaxies entrent en collision. Les trous noirs supermassifs qui occupaient leur centre vont former un système binaire qui émet des ondes gravitationnelles. Celles-ci peuvent être détectées en étudiant les signaux très réguliers d'un ensemble de pulsars.

telle vibration traverse un interféromètre, les deux bras perpendiculaires de plusieurs kilomètres voient leur taille varier d'une longueur infime (de l'ordre du milliardième de la taille d'un atome). Ce changement est détectable par l'instrument.

Ces coalescences de paires de trous noirs de masse stellaire sont caractérisées par des ondes gravitationnelles dont la fréquence d'oscillation est de l'ordre de la centaine de hertz. Celle-ci est liée à la taille du système binaire et au nombre de révolutions qui s'opèrent par seconde. Il existe d'autres sources d'ondes gravitationnelles, par exemple la fusion de deux trous noirs supermassifs au centre de galaxies entrées en collision (voir l'image page 37). Mais pour mesurer l'émission gravitationnelle pendant la phase stable qui précède la fusion de telles paires d'objets, il faut chercher des signaux de très basse fréquence, car ces systèmes sont lents. Or, de la même façon que l'oreille est sensible à des ondes acoustiques de fréquences comprises en général entre 20 et 20000 hertz, les interféromètres laser comme ceux de *Ligo* et *Virgo* opèrent dans une gamme limitée de fréquences centrée sur environ 100 hertz, compatible avec les trous noirs de masse stellaire.

Pour traquer les autres sources d'ondes gravitationnelles, il faut se tourner vers des dispositifs différents. Différentes techniques sont à l'étude, tels les interféromètres à ondes de matière (à l'image du prototype français *Miga*, qui fonctionne entre 0,1 et 10 hertz) ou les interféromètres laser spatiaux (comme la

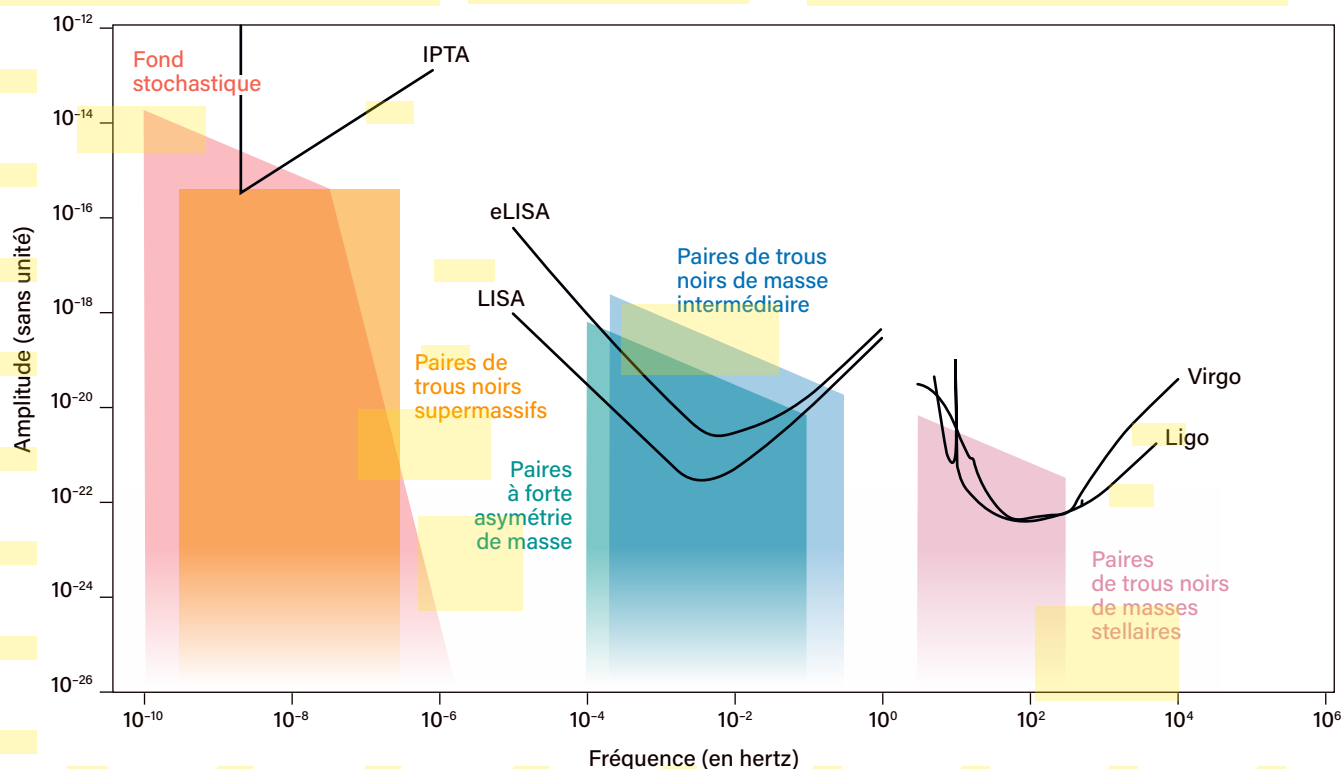
Selon le type de source d'ondes gravitationnelles, ces dernières n'ont pas les mêmes fréquences ou les mêmes amplitudes. Les interféromètres laser terrestres (*Ligo*, *Virgo*, *Kagra*, etc.), dont les bras font quelques kilomètres, sont sensibles aux coalescences de trous noirs de masses stellaires. Le futur interféromètre spatial *Lisa*, dont les bras ont une longueur de 2,5 millions de kilomètres, détectera les couples d'objets compacts dans la phase orbitale spirale qui précède leur coalescence, ou l'instant exact de la fusion de trous noirs très massifs (au-delà de quelques millions de masses solaires). Enfin, pour détecter les couples de trous noirs supermassifs (plusieurs milliards de masses solaires), on fait appel à des réseaux de pulsars répartis dans la Voie lactée.

future constellation *Lisa*, entre 10^{-5} et 10^{-1} hertz). Enfin, une idée étonnante consiste à exploiter un type particulier d'étoiles qui se comportent comme des horloges naturelles: les pulsars. En étudiant un ensemble de pulsars de la Voie lactée, il est possible d'obtenir un détecteur galactique sensible à une gamme de fréquences comprises entre 10^{-9} et 10^{-6} hertz. Les techniques dans ce dernier domaine ont progressé depuis vingt ans. Et trois grandes collaborations internationales ont, de façon indépendante, présenté en 2021 des indices très encourageants dans la traque des ondes gravitationnelles provenant de trous noirs supermassifs binaires.

À L'ÉCOUTE DE LA GALAXIE

L'élément clé de cette approche est le pulsar. De quoi s'agit-il? Lorsqu'une étoile massive (8 à 10 fois la masse du Soleil) arrive en fin de vie, elle explose et son cœur s'effondre en formant une étoile à neutrons, un objet très compact de 1,5 à 2 masses solaires et tenant dans une sphère de 12 kilomètres de rayon.

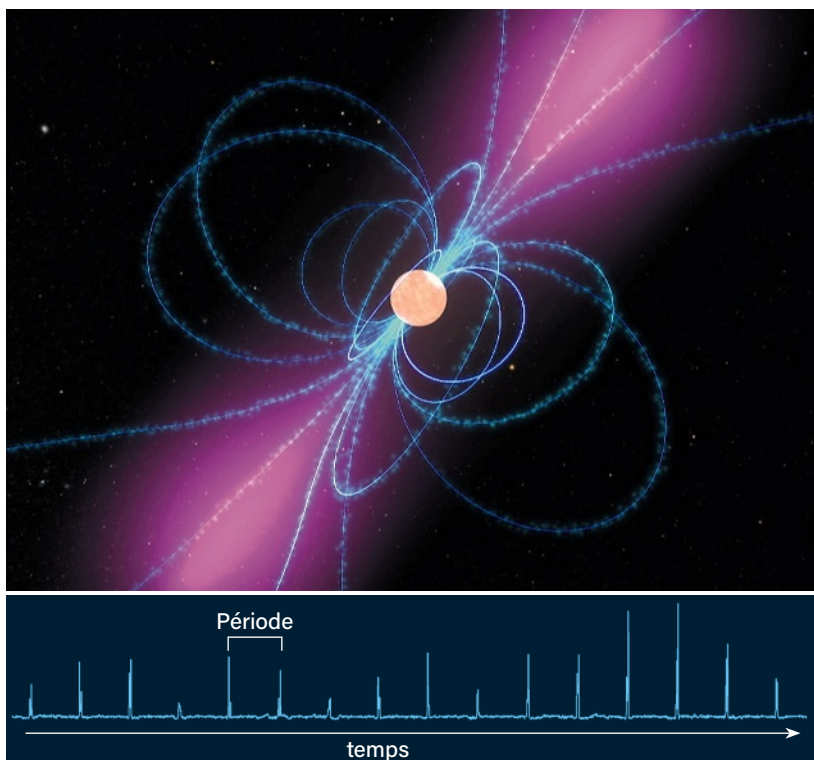
Selon les conditions de sa naissance, l'étoile à neutrons peut présenter une rotation extrêmement stable et rapide, de l'ordre de plusieurs centaines de tours par seconde. Elle crée un fort champ magnétique qui accélère des particules chargées. Ces dernières émettent un rayonnement intense au-dessus des pôles magnétiques de l'astre sous la forme de faisceaux non alignés avec l'axe de rotation. L'étoile à neutrons se comporte alors comme



un phare dont les faisceaux balayent l'espace avec une grande régularité, d'où le nom de pulsar. Un observateur sur Terre peut alors chronométrer les impulsions radio du pulsar avec une très grande précision.

Si une onde gravitationnelle passe entre nous et un pulsar, elle va induire une avance ou un retard sur les «bips» émis par l'étoile qui nous arrivent, habituellement, de façon très régulière. La mesure de ces fluctuations permet de détecter et caractériser l'onde gravitationnelle. Cependant, comme le signal est soumis à d'importantes perturbations et qu'il n'existe pas une source unique, mais un grand nombre d'émetteurs d'ondes gravitationnelles, l'idée est de suivre quelques dizaines de pulsars pour corrélérer leurs signaux et identifier une signature caractéristique à basse fréquence, commune à toutes ces étoiles (quoique modulée d'un pulsar à l'autre en fonction de leurs positions spatiales relatives).

En 1978, Mikhail Sazhin, de l'institut astronomique Sternberg, à Moscou, a été le premier à proposer d'utiliser ainsi les pulsars pour détecter des ondes gravitationnelles de basse fréquence. En 1979, Steven Detweiler, de l'université Yale, aux États-Unis, a estimé que la précision chronométrique obtenue sur la mesure de la période de rotation d'un pulsar permettait d'atteindre une limite de 10^{-11} sur l'amplitude de l'onde gravitationnelle (il s'agit d'une valeur relative, donc d'un nombre sans dimension: le passage de l'onde produirait une variation d'un cent-milliardième de la période apparente du pulsar, ou une variation d'un cent-milliardième de toute mesure d'une longueur étalon sur Terre). Conjugée aux progrès des techniques de chronométrie et des capacités de calcul en temps réel, la découverte (en 1982) des pulsars «millisecondes», plus rapides mais surtout à la rotation cent mille fois plus stable que la moyenne des pulsars normaux, a permis de gagner cinq ordres de grandeur sur cette limite de détection, qui est aujourd'hui voisine de quelque 10^{-16} (voir la figure page 43). Cela revient à détecter une contraction ou une dilatation des longueurs avec une précision de



Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide. Il présente un champ magnétique intense qui conduit à la formation d'un rayonnement radio émis suivant un faisceau très étroit au niveau des pôles magnétiques. Comme l'axe de rotation diffère de l'axe magnétique, le faisceau balaie l'espace comme celui d'un phare marin, et un radiotélescope en reçoit des «bips» réguliers. Ainsi, la séquence de 22 secondes en provenance du pulsar PSR B0301+19 (en bas) a une période de 1,38 seconde. On note que chaque pic est un peu différent, ce qui induit des perturbations lors du chronométrage effectué pour traquer des ondes gravitationnelles.

l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur la distance Terre-Soleil.

Le radiotélescope décimétrique de Nançay (voir la photo page 40), deuxième antenne européenne par sa taille, est équipé d'une instrumentation dédiée qui permet de dater avec précision des impulsions de pulsars à seulement quelques dizaines de nanosecondes près. Depuis 2004, l'équipe française qui opère sur ce radiotélescope observe plusieurs dizaines de pulsars très stables. Ces observations contribuent à près de 60% aux données du projet européen de réseau de chronométrie de pulsars (EPTA, pour *European pulsar timing array*) et donnent lieu à une participation active dans la collaboration mondiale de l'*International pulsar timing array* (IPTA), qui regroupe aussi une équipe américaine et une autre australienne.

La mesure est évidemment très difficile à réaliser et requiert une modélisation complète du système Terre-pulsar dans toute sa complexité. La première étape concerne le pulsar, une horloge pas aussi parfaite que nous le laissons penser. L'ensemble des particules accélérées dans la magnétosphère de l'étoile à neutrons produit une émission relativement stable, mais qui change malgré tout un peu d'un «bip» à l'autre (voir la figure ci-dessus). Il en résulte un «bruit» qui varie de quelques nanosecondes à quelques dizaines de nanosecondes selon le pulsar.

À cela s'ajoute un second phénomène perturbateur. Le pulsar perd de l'énergie par rayonnement et ralentit par conséquent au cours du temps. Ce ralentissement de la

Nous datons un signal de pulsar avec une incertitude de quelques nanosecondes