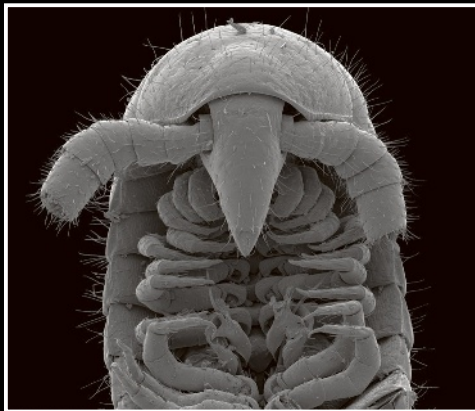
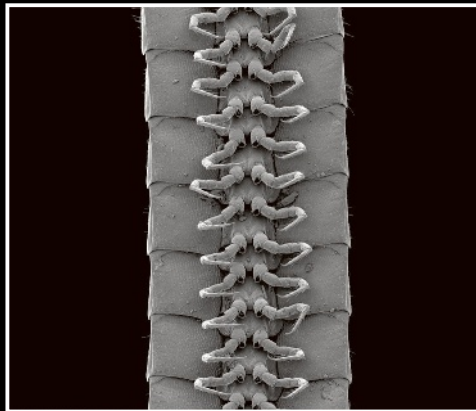




500 μm



500 μm

Spécimen femelle d'*Eumillipes persephone*,
un myriapode avec 1 306 pattes.
Il mesure près de 9,6 centimètres de longueur.

PHYSIQUE QUANTIQUE

LES NOMBRES COMPLEXES SONT INCONTOURNABLES...

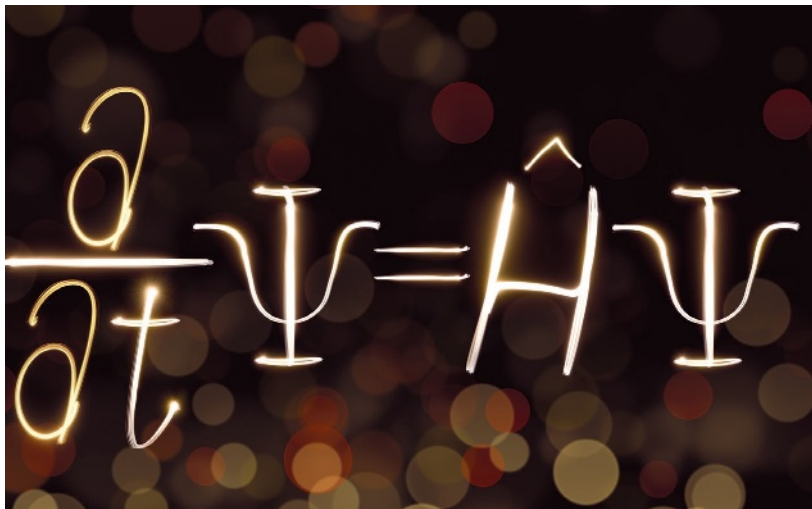
... pour le formalisme standard de la physique quantique. Certaines expériences ne peuvent être décrites avec les seuls nombres réels.

Si l'on multiplie un nombre par lui-même, qu'il soit positif ou négatif, le résultat est toujours positif. Mais en inventant de façon *ad hoc* le nombre imaginaire i , défini par $i^2 = -1$, les mathématiciens ont ouvert de vastes horizons en algèbre, en géométrie, etc. Ce nombre et sa généralisation, les nombres complexes, ont vite trouvé leur utilité en physique aussi. Ils servent surtout à simplifier certains calculs notamment pour décrire les systèmes oscillants, mais ils ne sont donc pas indispensables. Or, Marc-Olivier Renou, de l'Institut des sciences photoniques, à Barcelone, et ses collègues ont montré que les nombres complexes sont nécessaires au formalisme standard de la physique quantique.

En physique quantique, les nombres complexes jouent déjà un rôle prépondérant. Dans la formulation standard de la théorie quantique, les objets (les photons, les électrons, etc.) sont décrits dans un espace abstrait, dit «de Hilbert», défini avec des nombres complexes. Cet espace (à ne pas confondre avec l'espace tridimensionnel dans lequel nous vivons) permet de décrire les solutions de l'équation de Schrödinger et l'évolution du système quantique. Mais pourrait-on décrire toutes les expériences quantiques avec un espace de Hilbert réel? Certains ont cherché à le montrer.

Ainsi, en 2008, Károly Pál et Tamás Vértesi, de l'Académie hongroise des sciences, ont étudié une expérience de Bell avec une source émettant deux particules vers deux observateurs situés dans deux laboratoires différents et éloignés. Ces particules ont une spécificité, elles sont dites «intriquées» car leurs propriétés (par exemple l'orientation de leur spin) sont corrélées d'une façon inexplicable pour la physique classique. Les chercheurs ont montré qu'ils pouvaient décrire ce système avec un espace de Hilbert réel en doublant le nombre de dimensions (il faut deux nombres réels pour décrire un nombre complexe). Est-il possible de s'affranchir des nombres complexes dans d'autres expériences?

Pour tester cette idée, Marc-Olivier Renou et ses collègues ont étudié un système comprenant deux sources indépendantes (S1 et S2) de paires de particules intriquées et trois observateurs



L'équation de Schrödinger contient explicitement le nombre imaginaire i . Elle décrit l'évolution d'un système quantique au cours du temps. Les nombres complexes sont-ils indispensables en physique quantique? Dans le cas du formalisme standard de la théorie, la réponse est oui.

(Alice, Bob et Charlie). Alice reçoit une particule de S1, Charlie une particule de S2 et Bob reçoit une particule de chaque source. Lorsque Bob réalise une mesure de Bell sur les particules qu'il reçoit, l'intrication qui existait entre les particules d'Alice et Bob d'une part et entre celles de Bob et Charlie d'autre part se transpose à une intrication entre les particules d'Alice et de Charlie. Dans ce cas, les chercheurs ont montré que les corrélations observées entre Alice, Bob et Charlie ne peuvent pas être décrites avec la théorie standard de la physique quantique, lorsque celle-ci est restreinte aux nombres réels, et peu importe le nombre de dimensions de l'espace de Hilbert réel.

«Cela ne signifie pas pour autant qu'il n'est pas possible de décrire la physique quantique sans les nombres complexes», insiste Marc-Olivier Renou. En effet, il existe d'autres formalismes qui reposent uniquement sur les nombres réels, mais ils ne s'appuient pas sur des espaces de Hilbert et le produit tensoriel. Le défi maintenant, c'est de comprendre ce qui fait l'importance de ce formalisme standard par rapport aux autres. ■

S. B.

M. O. Renou et al., *Nature*, 2021

BIOLOGIE

MICROBIOTE, ENTRE STRESS ET MÉMOIRE

Le stress chronique est connu pour affaiblir la mémoire, mais par quels mécanismes? Pour tester un éventuel rôle du microbiote, Christine Leterrier, de l'Inrae, et ses collègues ont prélevé celui de cailles du Japon (*Coturnix japonica*) soumises à des situations stressantes et l'ont transféré à des cailleteaux «apaisés». Résultat? Ces oiseaux ont montré tous les effets du stress: peur, taux d'hormone du stress modifié et mémoire perturbée. Le microbiote jouerait un rôle d'intermédiaire en ce qu'une perturbation de sa composition maintiendrait les symptômes associés à l'état de stress et, ce faisant, nuirait à la mémoire. ■

Gaïa Jouanna

N. Kraimi et al., *Psychoneuroendocrinology*, 2021

PHYSIQUE

UNE ANALOGIE PAS SI MAUVAISE

D'après la relativité générale, la matière courbe l'espace-temps dans son voisinage. Pour illustrer cette idée, on utilise souvent l'image d'une toile bidimensionnelle tendue sur laquelle on pose une boule de pétanque. Celle-ci est parfois considérée comme problématique, car elle peut conduire à de mauvaises interprétations. Cependant, Stefan Catheline, de l'Inserm, et ses collègues ont montré que l'analogie fonctionne mieux que prévu. Lorsqu'une onde plane se propage sur une membrane tendue dont la région centrale est courbée, la partie de l'onde qui passe dans cette zone parcourt géométriquement un chemin plus long et accuse donc du retard sur le reste de l'onde. Cela s'interprète comme un changement d'angle de propagation. Les physiciens ont constaté que les équations de la relativité générale adaptées à leur système décrivaient très bien cette déviation. ■

S. B.

S. Catheline et al., *American Journal of Physics*, 2021

PRÉHISTOIRE

DES POINTILLÉS VIEUX DE 41 500 ANS



En ivoire de mammouth, le pendentif de la grotte de Stajnia, en Pologne, est incisé d'au moins 50 petites dépressions.

Ce pendentif préhistorique orné de pointillés était réputé néandertalien, mais cette interprétation tombe. Sur les fragments de ce bijou en ivoire de mammouth à deux œillets de suspension mis au jour entre 2006 et 2010 dans la grotte de Stajnia, en Pologne, 50 petites dépressions ponctuelles dessinent une ligne et un lobe. Comme le pendentif provenait d'une strate perturbée par le gel et les activités humaines, mais riches en outils du Micoquien – une culture matérielle d'*Homo neanderthalensis* –, ses découvreurs l'avaient attribué à notre espèce cousine... non sans jeter un trouble puisque tous les pointillés anciens connus étaient *sapiens*. C'est pourquoi, autour de Sahrá Talamo, de l'université de Bologne, une grande équipe internationale s'est constituée pour dater par la spectroscopie de masse par accélérateur du carbone 14 le collagène encore contenu dans l'ivoire du bijou, et ont trouvé un âge de 41 500 ans avant le présent, soit après la disparition d'*H. neanderthalensis*. Le pendentif doit donc avoir été façonné par des chasseurs-cueilleurs *sapiens*.

Sa datation en fait le plus ancien de tous les objets ponctués du Paléolithique supérieur, tous âgés de moins de 41 000 ans et répartis de la France à la Sibérie. Certains préhistoriens ont proposé que ce type de pointillés traduit le comptage de proies, de lunaisons, ou autre, à moins qu'ils n'aient eu un rôle purement esthétique. Quoi qu'il en soit, la convention graphique consistant à représenter des formes à l'aide de points – sortes de pixels avant l'heure! – est un trait culturel de notre espèce, arrivée en Eurasie à cette époque. ■

François Savatier

S. Talamo et al., *Scientific Reports*, 2021