



2. L'ARMURE DES AMMONITES, des céphalopodes fossiles cousins du Nautilé, présentait des cloisons intérieures qui permettaient vraisemblablement à l'animal de résister à la pression régnant aux grandes profondeurs.

peuvent aussi protéger le corps en formant un seul bloc. La stratégie de la « formation de la tortue » était d'ailleurs pratiquée par des légionnaires romains qui se regroupaient sous leurs boucliers. En science-fiction, le crâne de Predator présente une sorte de casque ressemblant à une carapace de tortue. Dans *l'Heroic Fantasy*, les meilleures armures et boucliers sont faits d'écailles de dragon qui ressemblent à des ostéodermes.

En termes de résistance aux chocs et autres agressions extérieures (jet d'acides, chute de pierres, etc.), les plantes supplantent les animaux. La coque de certains fruits ou graines est composée de lignine, autre polymère ultrarésistant : broyée, elle est utilisée comme abrasif en aéronautique et entre même dans la composition de résines ignifuges qui protègent les navettes spatiales. Mieux encore, spores et pollens, transportés sur de très longues distances, ainsi que certaines algues, sont dotés d'une paroi de sporopollénine : ce composé organique (un corps gras dont on ignore encore la composition exacte) résiste à la chaleur, au froid, à la pression et à la plupart des attaques chimiques ! La carapace d'Alien, qui contient un « sang » jaunâtre hypercorrosif, est-elle faite de sporopollénine ?

En matière de dureté (mais aussi de fragilité), la silice (qui compose le verre)

est utilisée, tant chez les éponges pour leur squelette interne (des aiguilles nommées spicules) que chez des algues (les diatomées), pour leur paroi externe. Si la nature et la composition des armures varient selon les espèces et les milieux, les techniques de construction sont elles aussi hétéroclites : secrétées par l'organisme ou « maçonnées » (les larves des phryganes, des insectes, construisent de petits fourreaux de boue dans lesquels elles se métamorphosent), certaines protections sont extraites de l'environnement (plusieurs ethnies africaines ont utilisé de la peau de rhinocéros pour en faire des boucliers).

Résister à la pression, au chaud, au froid... à tout !

Une solution pour se protéger consiste aussi à changer de forme. C'est ce que font de nombreux champignons, animaux et plantes qui s'enkystent : lorsque les conditions de vie deviennent trop difficiles, ces organismes s'entourent d'une coque résistante, leurs fonctions vitales s'arrêtent et ils entrent dans un état de dormance – la cryptobiose. C'est le cas des tardigrades, de microscopiques « oursons d'eau » cousins des arthropodes, qui sont capables de supporter des conditions

extrêmes de température, de pression, de rayonnement ou de toxicité. Ils survivent même à une exposition au vide spatial ! Les artémies sont des crustacés également connus pour leurs kystes, capables de résister à ces conditions extrêmes pendant plusieurs années. Quand les conditions de vie redeviennent favorables, ces arthropodes se transforment en petites larves et reviennent à la vie.

Ainsi, totale, partielle ou temporaire, l'armure idéale consiste en un compromis entre poids, résistance et souplesse. La combinaison de Spiderman intègre-t-elle de la soie d'araignée élastique et robuste ? Celle de Batman est-elle, comme les gilets pare-balles, formée d'une couche de céramique enveloppant un tissage de fibres synthétiques de type kevlar ? Cette couche externe très résistante ralentit les balles qui finissent leur course dans la toile de fibres imbriquées, le poids ne dépassant pas huit kilogrammes. Encore plus efficace que l'armure d'Iron Man ! ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.

Retrouvez les articles de J.-S. Steyer et R. Lehoucq sur www.pourlascience.fr



ART & SCIENCE

L'art quantique se tisse

Comment rendre compte de l'étrange réalité du monde quantique ? Un physicien devenu sculpteur répond avec plusieurs œuvres, notamment une série illustrant le spin des particules.

Loïc MANGIN

En 1999, l'équipe d'Anton Zeilinger, de l'Université de Vienne, met en évidence des figures d'interférences obtenues avec de grosses molécules, des fullerènes C_{60} . C'est, à cette époque, le plus gros objet présentant une dualité onde-corpuscule, propriété initialement attribuée aux photons, puis étendue à la matière par Louis de Broglie. Jusqu'aux travaux du groupe autrichien, seuls les électrons, les atomes d'hydrogène et de toutes petites molécules avaient montré ce comportement quantique. Le record est détenu depuis 2012 par la molécule $C_{48}H_{26}F_{24}N_8O_8$, un dérivé de la phtalocyanine (un colorant bleu-vert synthétique).

Julian Voss-Andreae était l'un des auteurs de cette percée. Il a depuis quitté les laboratoires pour se tourner vers la sculpture et s'est installé aux États-Unis. Il est aujourd'hui sollicité par de nombreuses institutions. Par exemple, deux projets sont en cours, l'un pour le nouveau bâtiment de physique et de nanotechnologie de l'Université du Minnesota, à Minneapolis, l'autre à l'Université Rutgers, dans le New Jersey.

En 2009, il a organisé l'exposition *Quantum objects* au Centre américain pour la physique, à College Park, dans le Maryland. L'idée sous-jacente était que « l'art est plus approprié que la science pour donner à voir certaines facettes de la réalité. » On pouvait notamment y voir *Quantum Corral*, une sculpture en bois représentant la densité d'électrons autour d'un anneau d'atomes de fer déposés sur une surface en cuivre.

Attardons-nous sur une œuvre, la série *Spin family* (voir la figure a).

Ces objets ont été conçus pour illustrer la notion de spin, une propriété quantique des particules. Le spin a été proposé en 1924 par Wolfgang Pauli, à propos de l'électron, pour expliquer un résultat expérimental, l'effet Zeeman anomal, qui décrit l'influence des champs magnétiques sur la lumière émise par les atomes.

Le spin correspond au moment cinétique intrinsèque d'une particule. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une rotation : le spin est une propriété purement quantique qui n'a pas d'équivalent en physique classique.

Les sculptures de *Spin family* illustrent les deux grandes familles de particules élémentaires, les fermions et les bosons, qui se distinguent par les valeurs du spin. J. Voss-Andreae met en parallèle cette distinction avec celle qui sépare les deux genres (masculin et féminin) en utilisant deux couleurs.

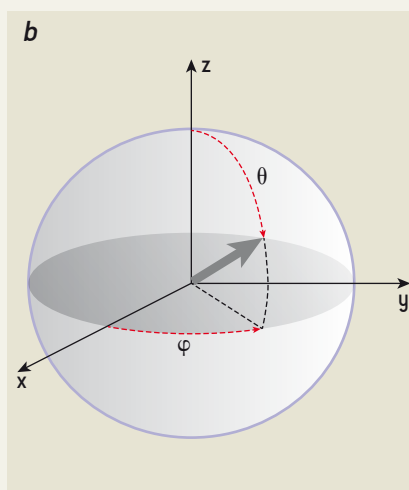
Les fermions, en bleu, sont les constituants de la matière : ce sont les leptons (l'électron, le muon, le neutrino...), ainsi que les six quarks (u, d, s, c, b et t). Seuls les seconds sont soumis à l'interaction forte, l'une des quatre forces fondamentales de la nature. Les fermions ont un spin demi-entier ($1/2, 3/2, 5/2$), par exemple $1/2$ pour l'électron.

Les bosons, en rose, sont les vecteurs des forces fondamentales. On connaît le photon, les gluons, les bosons Z , W^- et W^+ ainsi que le boson de Higgs, dont l'existence a été confirmée en juillet 2012. Le spin d'un



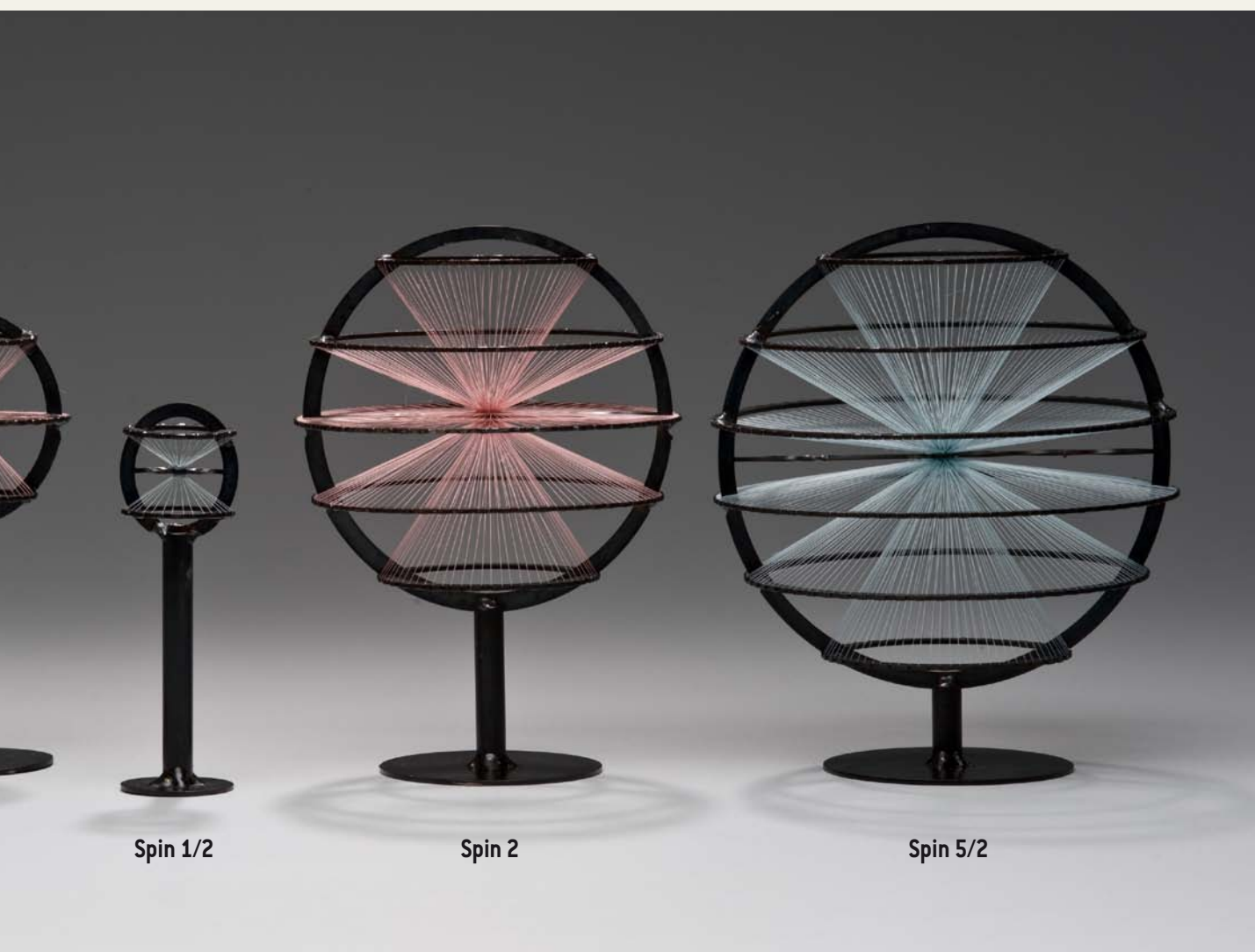
boson est un entier (0, 1, 2,...). Par exemple, le boson de Higgs a un spin égal à zéro.

Comment représenter un spin ? En projection sur un axe donné, un spin J ne peut prendre que les $2J + 1$ valeurs $-J, -J + 1, \dots, J - 1, J$. Cela correspond à certaines orientations, que l'on peut figurer sur une sphère dite de Bloch (voir la figure b, où les angles θ et φ définissent l'orientation). S'en inspirant, J. Voss-Andreae a tissé un fil de soie bleu ou rose sur une structure à cercles. Les cônes ainsi formés illustrent les états possibles d'un spin donné. Les objets roses (les bosons) ont un disque plan, qui correspond à une projection de spin égale à zéro, alors que les objets bleus (les fermions) en sont dépourvus.



Qu'en est-il de l'attribution des sexes ? Deux fermions identiques ne peuvent coexister dans le même état quantique, car ils sont soumis au principe d'exclusion de Pauli. Ces particules, « rivales pour une même place », seraient donc masculines. La distinction entre deux sexes serait-elle d'origine quantique ? ■

Les paradoxes de la matière,
Dossier Pour la Science, n° 79, avril-juin 2013.
 J. Voss-Andreae, *Quantum sculpture : art inspired by the deeper nature of reality*, *Leonardo*, vol. 44(1), pp. 14-20, 2011.
 P. Ball, *Quantum objects on show*, *Nature*, vol. 426, p. 416, 2009.
 M. Arndt et al., *Wave-particle duality of C₆₀ molecules*, *Nature*, vol. 401, pp. 680-682, 1999.
www.JulianVossAndreae.com



Dan Kivik

IDÉES DE PHYSIQUE

Des bateaux qui décollent

Pour faire gagner de la vitesse à un bateau, il suffit de faire sortir sa coque hors de l'eau : c'est le rôle des hydrofoils.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Quel est le point commun des voiliers titulaires de records de vitesse comme l'*Hydroptère* (95 kilomètres par heure) ou le *Vestas Sailrocket 2* (109 kilomètres par heure) ? À pleine vitesse, l'essentiel de leur coque est hors de l'eau !

Les concepteurs de bateaux rapides se sont en effet rendu compte que si la coque est, au repos, indispensable pour flotter (grâce à la poussée d'Archimède), elle devient une gêne à grande vitesse à cause de sa traînée hydrodynamique. S'inspirant alors des techniques aéronautiques, ils ont conçu des bateaux qui se soulèvent hors de l'eau en gagnant de la vitesse, sustentés par des sortes d'ailes immergées : les hydrofoils.

L'étrave d'un navire qui avance déplace de l'eau et crée des vagues. En s'éloignant, ces dernières emportent avec elles de l'énergie fournie par le navire et, finalement, la dissipent dans le vaste océan. Elles constituent la première source de freinage.

L'origine de la vague principale créée par le bateau est visible le long de la coque : à l'avant du navire, l'eau, chassée par l'étrave, s'élève plus haut que la surface libre (voir la figure 1a). Cette surélévation se prolonge ensuite en ondulations successives le long de la coque du bateau.

Avancer dans l'eau plutôt que sur l'eau

Plus le bateau avance vite, plus cette vague grossit en amplitude (sa hauteur) et en longueur d'onde (la distance entre deux crêtes consécutives). On s'aperçoit que cette vague devient un obstacle presque infranchissable lorsque sa longueur d'onde est comparable à la taille du bateau : ce dernier atteint alors sa vitesse limite.

Comment voguer plus vite ? En réduisant le freinage par les vagues. C'est possible avec une coque très effilée, qui fend l'eau, comme celle des bateaux conçus pour les courses d'aviron. Cette coque est instable

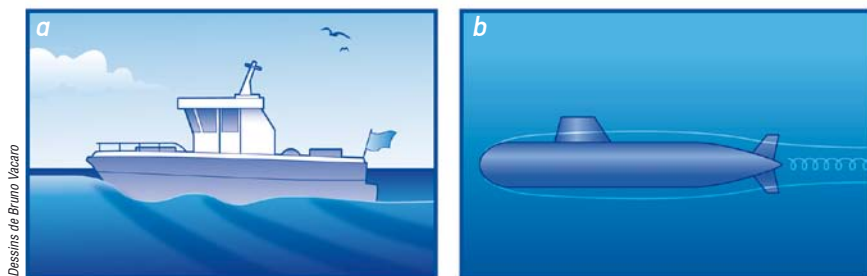
latéralement, mais en reliant deux coques de ce type, on réalise un catamaran, structure stable bien adaptée à la voile. Malgré cela, le volume immergé de l'étrave reste important, car il faut bien compenser par la poussée d'Archimède le poids toujours considérable du voilier et de son équipage.

On peut aussi tenter d'éviter la création d'une vague. Pour cela, il faut aller sous l'eau. Un sous-marin en plongée, par exemple, ne crée pas de vagues : la résistance au mouvement provient des turbulences qu'il produit et des frottements visqueux le long de sa surface (voir la figure 1b).

Comme cette résistance n'a pas le caractère infranchissable du « mur de la vague », on a tout intérêt à placer sous l'eau, et non à sa surface, les structures nécessaires à la sustentation du navire. Et plutôt que d'immerger de gros flotteurs qui engendrent la poussée d'Archimède adéquate, utilisons la force de portance s'exerçant sur des sortes d'ailerons immergés et convenablement orientés. Autrement dit, au lieu d'un dirigeable, choisissons l'avion ! C'est l'idée des hydrofoils, inventés et testés par l'ingénieur italien Enrico Forlanini en 1906 sur le lac Majeur (68 kilomètres par heure tout de même).

Des foils immergés en T...

On ajoute ainsi sous le bateau des appendices verticaux qui se terminent par les foils, éléments plats ayant la forme et le profil d'une aile d'avion. À l'arrêt, rien ne distingue un tel bateau d'un autre : il flotte grâce à sa coque. En revanche, dès qu'il gagne de la



1. L'AVANCÉE D'UN BATEAU SUR L'EAU CRÉE DES VAGUES, notamment une à l'avant qu'il doit continuellement « gravir » (a). Ces vagues emportent de l'énergie et freinent le bateau. Pour un sous-marin en plongée (b), il n'y a pas de vagues ; ce sont les turbulences créées à l'arrière et les frottements visqueux entre le liquide et la surface du vaisseau qui freinent ce dernier.

Dessins de Bruno Vacaro