

> système sont trop séparés les uns des autres pour permettre un échange d'énergie avec le dispositif d'entraînement. Le système est alors piégé dans un état hors équilibre qui oscille. C'est bien cet état nouveau de la matière qu'on nomme cristal temporel.

Comme pour les cristaux spatiaux, ces nouveaux cristaux temporels présentent une importante rigidité et une grande stabilité de leurs motifs. Cela signifie qu'une petite variation dans la période du dispositif d'entraînement ou la présence d'une autre perturbation n'altère pas la période des oscillations des cristaux temporels, qui reste parfaitement régulière.

Cette caractéristique offre un moyen de diviser le temps très précisément, et la perspective de fabriquer de futures horloges de grande précision. Les horloges atomiques modernes sont déjà des merveilles de précision, mais il leur manque la garantie de stabilité à long terme des cristaux temporels. Des horloges plus précises et moins encombrantes fondées sur ces états de la matière rendraient possibles d'excellentes mesures de distance et de temps, avec des applications pour des systèmes de géolocalisation améliorés. Ces horloges seraient aussi très sensibles à des variations du champ gravitationnel (qui influe sur l'écoulement du temps, d'après les lois de la relativité générale) : elles pourraient donc détecter des anomalies gravitationnelles locales correspondant à des grottes souterraines ou à des gisements de minerais. Il est aussi possible d'imaginer des détecteurs d'ondes gravitationnelles.

UN CRISTAL TEMPOREL COSMOLOGIQUE

Les cristaux temporels et la brisure spontanée de τ constituent un sujet encore jeune, qui soulève de nombreuses questions. Et, à l'instar des cristaux ordinaires dont l'étude a permis la découverte des semi-conducteurs et l'avènement de l'électronique moderne, quelles surprises nous réservent les cristaux temporels ? Ont-ils un effet particulier sur les photons ou les électrons qui les traversent ? Il est encore trop tôt pour le dire.

Les cristaux ordinaires ont aussi conduit à l'idée de quasi-cristaux (des matériaux très ordonnés mais dont les motifs ne se répètent pas). Serait-il possible aussi de concevoir des quasi-cristaux temporels ? De la même façon, on peut s'interroger sur la possibilité de concevoir des liquides temporels (matériaux dans lesquels la densité des événements dans le temps est constante, mais pas la période), des verres temporels (qui ont un motif apparemment parfaitement rigide, mais avec en réalité de petites déviations). Les chercheurs explorent activement ces possibilités et d'autres encore. Et, effectivement, des formes

de quasi-cristaux temporels et une sorte de liquide temporel ont déjà été identifiés.

Jusqu'à présent, nous avons considéré la symétrie τ uniquement dans les phases de la matière. Il est possible de pousser cette idée dans des domaines plus spéculatifs, en réfléchissant au rôle de τ en cosmologie et dans les trous noirs. Actuellement, la théorie qui décrit le mieux l'histoire de l'Univers d'après les



Les cristaux temporels constituent un nouvel état de la matière

observations est celle du Big Bang : l'Univers serait né d'une singularité de densité infinie. Par conséquent, la symétrie τ ne s'appliquerait pas à l'Univers. Mais certains cosmologistes ont aussi suggéré que l'Univers serait cyclique, ou qu'il a peut-être connu une phase d'oscillation rapide. Ces hypothèses très spéculatives nous rapprocheraient du cercle d'idées entourant les cristaux temporels.

Enfin, les équations de la relativité générale incarnent notre meilleure compréhension actuelle de l'espace-temps. Mais on sait que cette théorie n'est plus valide dans les conditions extrêmes d'au moins deux situations : quand nous extrapolons la cosmologie du Big Bang à l'instant initial et à l'intérieur des trous noirs. Dans les autres champs de la physique, les limites de validité des équations qui décrivent un état donné de la matière sont souvent le signal annonciateur d'une transition de phase du système. Se pourrait-il que l'espace-temps lui-même, dans des conditions extrêmes de haute pression, de haute température ou de changement rapide, brise τ ?

Si ces dernières idées sont très spéculatives, le concept de cristal temporel laisse entrevoir des possibilités de progrès à la fois théoriques (en termes de compréhension de la cosmologie et des trous noirs avec une perspective différente) et pratiques. Les formes nouvelles de cristaux temporels qui seront sans doute développées dans les années à venir devraient nous rapprocher d'horloges plus précises, et présenteront peut-être d'autres propriétés utiles. Et dans tous les cas, ils sauront nous surprendre en nous offrant l'occasion d'élargir nos idées sur les façons dont la matière peut s'organiser. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Y. Yao et C. Nayak, **Time crystals in periodically driven systems**, *Physics Today*, vol. 71(9), pp. 40-47, 2018.

J. Zhang et al., **Observation of a discrete time crystal**, *Nature*, vol. 543, pp. 217-220, 2017.

Soonwon Choi et al., **Observation of discrete time-crystalline order in a disordered dipolar many-body system**, *Nature*, vol. 543, pp. 221-225, 2017.

F. Wilczek, **Quantum time crystals**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109(16), art. 160401, 2012.

A. Shapere et F. Wilczek, **Classical time crystals**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109(16), art. 160402, 2012.

DU VENT DANS LES SYNAPSES

DANIEL FIÉVET
15H / 17H LE SAMEDI

DES SCIENCES
DE LA CURIOSITÉ
DE L'AVENTURE



ABONNEZ-VOUS AU PODCAST  DE L'ÉMISSION

Dans les entrailles des momies

Les Égyptiens anciens ont développé des techniques d'embaumement de pointe. Pour percer leurs secrets, les chercheurs s'appuient aujourd'hui sur la scanographie. Fascinant.

MARIE ZAWISZA, journaliste

Elles semblaient muettes. Pourtant, deux conservateurs du British Museum, l'anthropologue Daniel Antoine et l'égyptologue Marie Vandenberg, ont réussi à les faire parler. Leur arme? Le scanner. Cet outil médical non invasif leur a permis d'observer virtuellement l'intérieur de momies, sans les abîmer. Ces recherches s'inscrivent dans un vaste programme mené par le British Museum, qui possède des antiquités égyptiennes, depuis sa fondation en 1753. À cette époque, on débandelettait les corps embaumés pour les étudier. Mais déjà l'institution londonienne se refusait à le faire. Au cours du ^{xx}e siècle, la maîtrise des rayons X a révélé, sans les détruire, quelques images – fort imprécises – de l'intérieur de ces vénérables dépouilles. Depuis quelques années, les progrès de l'imagerie ont permis aux chercheurs de visualiser même les couches les plus molles de ces corps et les plus infimes détails – comme des incisions sur des plaques de métal. Pour l'instant, le British Museum a ainsi étudié une vingtaine des quatre-vingts momies égyptiennes de sa collection. Six d'entre elles se dévoilent aux visiteurs de l'exposition « Momies égyptiennes: passé retrouvé, mystères dévoilés », au Musée des beaux-arts de Montréal. ■

DERRIÈRE LE MASQUE D'IRTHORROU

Inhumé vers 600 avant notre ère dans un cercueil finement décoré, avec un masque doré placé sur la tête, Irthorrou, grand prêtre du temple d'Akhmim, à 200 kilomètres de Louxor, appartenait à l'élite locale. Les inscriptions sur ce cercueil devaient assurer la conservation de son nom et de son identité, afin de rendre possible son voyage vers les portes du ciel. Le programme de recherche du British Museum révèle aujourd'hui, dissimulé sous son masque délicat et ses textiles de lin, le squelette d'un adulte décédé entre 35 et 49 ans. Derrière son masque souriant apparaissent d'importantes lésions dentaires : Irthorrou avait perdu non seulement deux incisives et une canine sur la mâchoire inférieure, mais aussi une partie de l'os de la mâchoire. Ces abcès ont-ils entraîné sa mort ? Ce n'est pas exclu.

