

Dans l'expérience de Christopher Monroe, les physiciens ont utilisé deux lasers; le premier servait à inverser le spin des ions et le second à faire interagir les spins les uns avec les autres de façon aléatoire et pour produire un certain désordre. Avec la bonne configuration, le spin des ions oscillait à la moitié de la cadence des impulsions laser.

Dans le projet de Mikhail Lukin, les scientifiques ont utilisé des impulsions microondes pour inverser le spin des défauts du diamant. Ils ont observé des cristaux temporels séparés de deux et trois fois l'intervalle entre impulsions successives. Dans ces deux expériences, les matériaux ont subi une excitation extérieure (des impulsions laser ou microondes), mais ils ont affiché une période différente de celle de l'excitation: en d'autres termes, ils ont spontanément brisé la symétrie temporelle du système.

Ces expériences ont servi de déclencheurs pour de nombreux autres travaux. Ainsi, d'autres matériaux utilisant les mêmes principes généraux (qui ont acquis le nom de «cristaux temporels de Floquet») sont entrés en scène depuis.

## DES RÉPONSES SOUS-HARMONIQUES

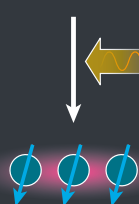
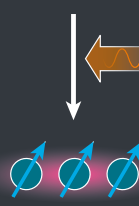
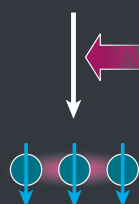
Certains physiciens ont souligné que des réponses dont la période est égale à un multiple des périodes d'excitation – des «réponses sous-harmoniques» ne sont pas des phénomènes nouveaux. Ainsi, dès 1831, Michael Faraday avait remarqué que lorsqu'il secouait verticalement du mercure liquide avec une période  $T$ , l'écoulement présentait souvent une période de  $2T$ .

Mais entre les cristaux temporels de Floquet et les réponses sous-harmoniques, il existe des différences importantes. D'abord, la brisure de symétrie dans le système de Faraday (et ceux du même genre) ne présente pas les caractéristiques d'une brisure spontanée de symétrie. Si le système entier constitué du matériau et du dispositif d'entraînement a simplement moins de symétries que le dispositif d'entraînement pris seul, cela ne suffit pas pour parler de cristal temporel.

D'un point de vue thermodynamique, dans l'expérience de Faraday, le dispositif d'entraînement (en l'occurrence les secousses appliquées) injecte en permanence de l'énergie (ou plutôt de l'entropie) dans le système, qui la dissipe sous forme de chaleur. Dans les systèmes de 2017, après une brève période de mise en place, le système s'établit dans un état où il n'échange plus d'énergie ou d'entropie avec le dispositif d'entraînement (s'il en absorbait, il chaufferait et perdrait ses propriétés de cristal temporel). Cette situation est possible grâce au désordre créé dans le système par les physiciens: en présence de désordre, les états du

## FABRIQUER UN CRISTAL TEMPOREL

**L**es cristaux ordinaires brisent la symétrie de translation spatiale car leurs atomes occupent des positions fixes, et semblent différents lorsqu'on les translate d'une distance quelconque. Ils présentent aussi une rigidité et résistent à toute perturbation de leur structure spatiale. Les cristaux temporels brisent la symétrie de translation temporelle: ils changent d'un moment à un autre, tout en répétant un motif qui est également robuste. En 2017, aux États-Unis, deux équipes, celle de Christopher Monroe, de l'université du Maryland, et celle de Mikhail Lukin, de l'université Harvard, ont produit les premiers cristaux temporels.



Laser d'inversion du spin

Laser d'inversion du spin

Laser d'inversion du spin

L'équipe de Christopher Monroe a fabriqué des cristaux temporels en bombardant une chaîne d'ions avec des lasers. L'impulsion d'un premier laser inverse l'orientation du spin de chaque atome de 180°. Avec une seconde impulsion, on retrouve l'orientation initiale.

Mais la moindre variation dans la fréquence (ou période) du laser produit une inversion imparfaite, et l'on ne revient pas exactement à l'état initial.

Dans un cristal temporel, d'autres impulsions laser introduisent du désordre et des interactions dans le système, qui rendent celui-ci plus robuste à des perturbations du laser initial. L'inversion est alors toujours parfaitement réalisée.

Le cycle est instable et facilement perturbé

CRISTAL TEMPOREL

Impulsions laser, source de désordre et d'interactions

Interactions

> 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  $\tau$  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  $\tau$  uniquement dans les phases de la matière. Il est possible de pousser cette idée dans des domaines plus spéculatifs, en réfléchissant au rôle de  $\tau$  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  $\tau$  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  $\tau$  ?

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.