

► symétrie brisée, une fois acquis, persistera. C'est ainsi que les scientifiques expliquent, par exemple, la cristallisation ordinaire.

Mais cette explication fondée sur l'énergie n'est pas applicable dans le cas de la brisure de τ , parce qu'il n'est alors pas possible de définir une énergie pour le système. Dans ces conditions, le concept de cristal temporel semble dépourvu de sens. Il existe cependant une voie plus générale conduisant à une brisure spontanée de symétrie, qui s'applique aussi à la brisure de τ .

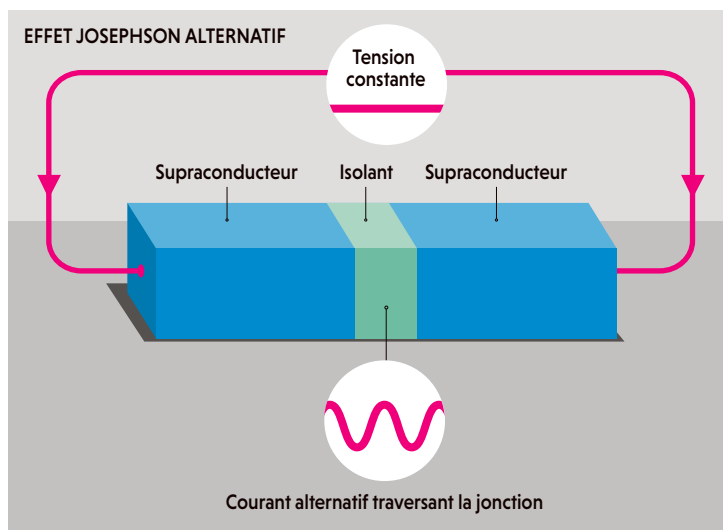
Plutôt que de se réorganiser spontanément en un état de plus basse énergie, un matériau peut se réorganiser en un état qui est plus stable pour d'autres raisons. Par exemple, des motifs ordonnés qui s'étendent sur de longues portions d'espace ou de temps et qui impliquent de nombreuses particules sont plus difficiles à défaire parce que la plupart des forces de perturbation agissent localement, à petite échelle. Ainsi, un matériau gagnera une plus grande stabilité en adoptant un nouveau motif qui se réalise sur une échelle plus vaste que dans son état précédent.

Au bout du compte, évidemment, aucun état ordinaire de la matière ne peut se maintenir en résistant à toutes les perturbations. Par exemple, les diamants ne sont pas un état stable du carbone aux températures et pression atmosphérique ordinaires : ils ne sont pas « éternels » ! Ils sont créés à des température et pression très élevées et, une fois formés, se maintiennent longtemps même à pression ordinaire. Mais si vous attendez assez, votre diamant finira par se transformer en graphite. En pratique, ce que nous entendons par « état de la matière » (comme le diamant) est une organisation d'une substance qui possède un degré utile de stabilité le protégeant d'un éventail non négligeable de changements extérieurs.

CRISTAUX TEMPORELS ANCIENS ET NOUVEAUX

Forts de ces ingrédients théoriques, les physiciens ont commencé à concevoir de vrais cristaux temporels. Pour y parvenir, ils se sont d'abord intéressés à l'effet Josephson alternatif qui a servi de base pour une grande famille de cristaux temporels. Cet effet se produit quand on applique une tension électrique constante V à une jonction où deux matériaux supraconducteurs sont séparés par une couche mince d'isolant (on parle de jonction Josephson, du nom du physicien britannique Brian Josephson). Dans cette situation, un courant alternatif traverse la jonction par effet tunnel (un phénomène quantique) et sa fréquence vaut $2eV/\hbar$, où e est la charge d'un électron et $\hbar$ la constante de Planck réduite, une grandeur caractéristique des phénomènes quantiques.

Ici, bien que le dispositif physique ne varie pas dans le temps (en d'autres termes, il respecte τ), le comportement résultant varie dans le temps. La symétrie de translation temporelle globale du système a été réduite aux seules symétries de translation temporelle multiples de la période $\hbar/(2eV)$. Ainsi, l'effet Josephson alternatif incarne le concept le plus basique de cristal temporel. Mais à certains égards, il n'est pas idéal. Les jonctions Josephson ne sont pas aussi stables que l'on voudrait : les circuits où passe un courant alternatif dissipent de la chaleur et émettent des ondes électromagnétiques.



Depuis, les cristaux temporels fondés sur les jonctions Josephson ont été améliorés pour réduire leurs défauts et d'autres approches ont été imaginées. Néanmoins, tous ces dispositifs partagent une idée physique qui était déjà implicite dans les travaux de Josephson, qui datent de 1962. Il semble donc approprié de parler, dans ce cas, de cristaux temporels « à l'ancienne ».

Les « nouveaux » cristaux temporels sont arrivés en 2017. Les premiers ont été conçus par deux équipes indépendantes. Dans la première expérience, le groupe de Christopher Monroe, de l'université du Maryland à College Park, a créé un cristal temporel dans un système artificiel constitué d'une chaîne de dix ions ytterbium. Dans l'autre expérience, Mikhail Lukin, de l'université Harvard, et ses collègues ont réalisé un cristal temporel dans un système constitué de milliers de défauts cristallins dans un diamant.

Dans les deux systèmes, la direction du spin (le moment cinétique quantique) des « atomes » (les ions ytterbium ou les défauts du diamant) change de façon régulière, et les atomes reviennent périodiquement à leur configuration de départ.

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

Les 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.

