



LA CHRONIQUE DE
VIRGINIE TOURNAY

UNE ASSIETTE SANS FOIE NI LOI

**Le contenu de notre assiette reflète nos croyances,
nos opinions, l'économie du pays où nous vivons, etc.
Autant de fronts où la défiance sociale guette.**



La cuisine est-elle une affaire d'État? La municipalité de New York vient d'interdire la commercialisation et la détention du foie gras à compter de 2022, sous la pression de militants de la cause animale opposés au gavage des oies et des canards. Elle rejoint la décision de la Cour suprême des États-Unis validant l'interdiction du foie gras en Californie. L'intervention du registre public dans les préoccupations gastronomiques résulte donc d'un rapport de force. Elle peine à faire consensus dans la population, tant les pratiques alimentaires échappent au cartésianisme.

Enjeu de morale publique, le rapport entre État et nourriture interroge la place de l'espèce humaine dans le monde vivant. On le voit avec la montée en puissance de mouvements s'opposant à la consommation de produits animaux ou avec les revendications antispécistes radicales, qui vont jusqu'à exiger le respect de la vie des moustiques. La confiance collective est loin d'être acquise, puisque la façon dont nous nous nourrissons renvoie à notre rapport à la

nature et à la façon dont nous envisageons la cohésion sociale.

Être végétarien devient un acte politique qui invite à relativiser la place de l'homme au sein des espèces animales. Quand elle est couplée à une vision idyllique de la nature sauvage, la consommation de pâtés végétaux, substituts de foie gras, fait de nous des écologistes. Mais la nourriture ne constitue pas seulement un

La cuisine et les manières de table ne relèvent pas que de la sphère privée

marqueur identitaire, régional ou religieux. Elle renvoie aussi, à travers la production des aliments, à la force des communautés nationales.

Là encore, le foie gras, symbole phare de la gastronomie française, l'illustre. Quand le salon Anuga, à Cologne, lui ferme sa porte en 2011, c'est Bruno Le

Maire, alors ministre de l'Agriculture, qui menace de boycotter l'inauguration de cette foire alimentaire internationale. Sur un plan diplomatique, la mise à l'écart du foie gras constitue un désaveu de l'État français, premier producteur du monde de cette spécialité.

À la production alimentaire sont associées d'autres lignes de défiance, comme l'importance de la grande distribution dans la consommation de masse, régulièrement montrée du doigt, ou la montée en puissance des enjeux de santé – alors que, paradoxalement, la qualité sanitaire des aliments produits n'a jamais été aussi bonne.

Par ailleurs, comme l'a montré le sociologue allemand Norbert Elias, les procédés culinaires et les manières de table sont loin d'être du seul ressort de la sphère privée. Ainsi, la présentation occidentale des plats les uns après les autres, censée refléter la combinaison optimale des saveurs et souligner l'originalité de la préparation, contraste avec la cuisine orientale, où chacun mélange les plats à sa guise. Les mets orientaux, simultanément offerts au regard, s'appuient sur des recettes connues et laissent peu de place à l'imprévu.

De telles différences culturelles dans les repas partagés, qu'il s'agisse de cérémonies familiales ou d'agapes républicaines, éclairent la structure de l'économie d'un État et les manières dont il se constitue en communauté politique. Ainsi, les banquets publics sont l'expression la plus nette du rituel de représentation politique, où les disparités sociales sont symboliquement gommées.

Faut-il en déduire qu'un repas n'est consacré qu'une fois les passions collectives maîtrisées? À moins qu'il n'en soit le déclencheur, comme le rappelle le film italien *Amore*, où la femme d'un riche industriel milanais, enfermée dans son sens du devoir, sort du sommeil des sens après avoir goûté les mets préparés par un jeune cuisinier surdoué... Joyeuses fêtes de fin d'année! ■

VIRGINIE TOURNAY biologiste de formation, est politologue et directrice de recherche du CNRS au Cevipof, à Sciences Po, à Paris.

L'ESSENTIEL

> Les cristaux sont des états ordonnés de la matière, où les atomes se disposent selon des motifs qui se répètent dans l'espace. Dans le langage de la physique, ils se caractérisent par une brisure spontanée de symétrie spatiale.

> Des états de la matière dont les motifs se répètent dans le temps, plutôt que dans l'espace, ne semblent pas être une idée nouvelle. Cependant,

s'ils mettent en jeu une brisure spontanée de la symétrie temporelle, ce sont des cristaux temporels, un concept nouveau.

> Imaginés en 2012, des cristaux temporels ont été réalisés en laboratoire en 2017. Ces matériaux sont une piste pour concevoir des horloges ultraprécises.

L'AUTEUR

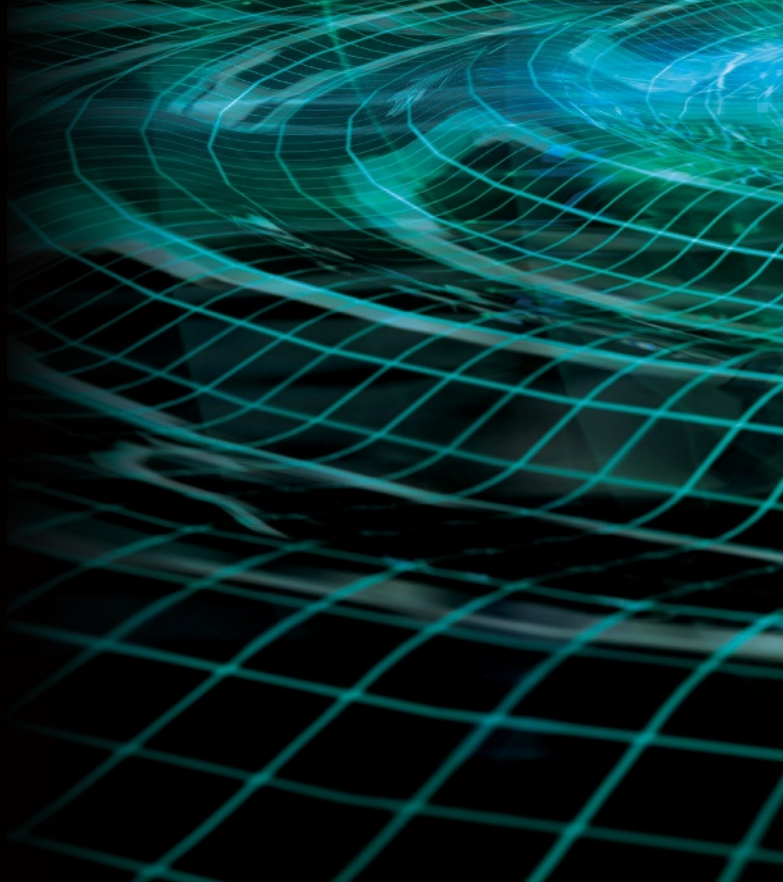


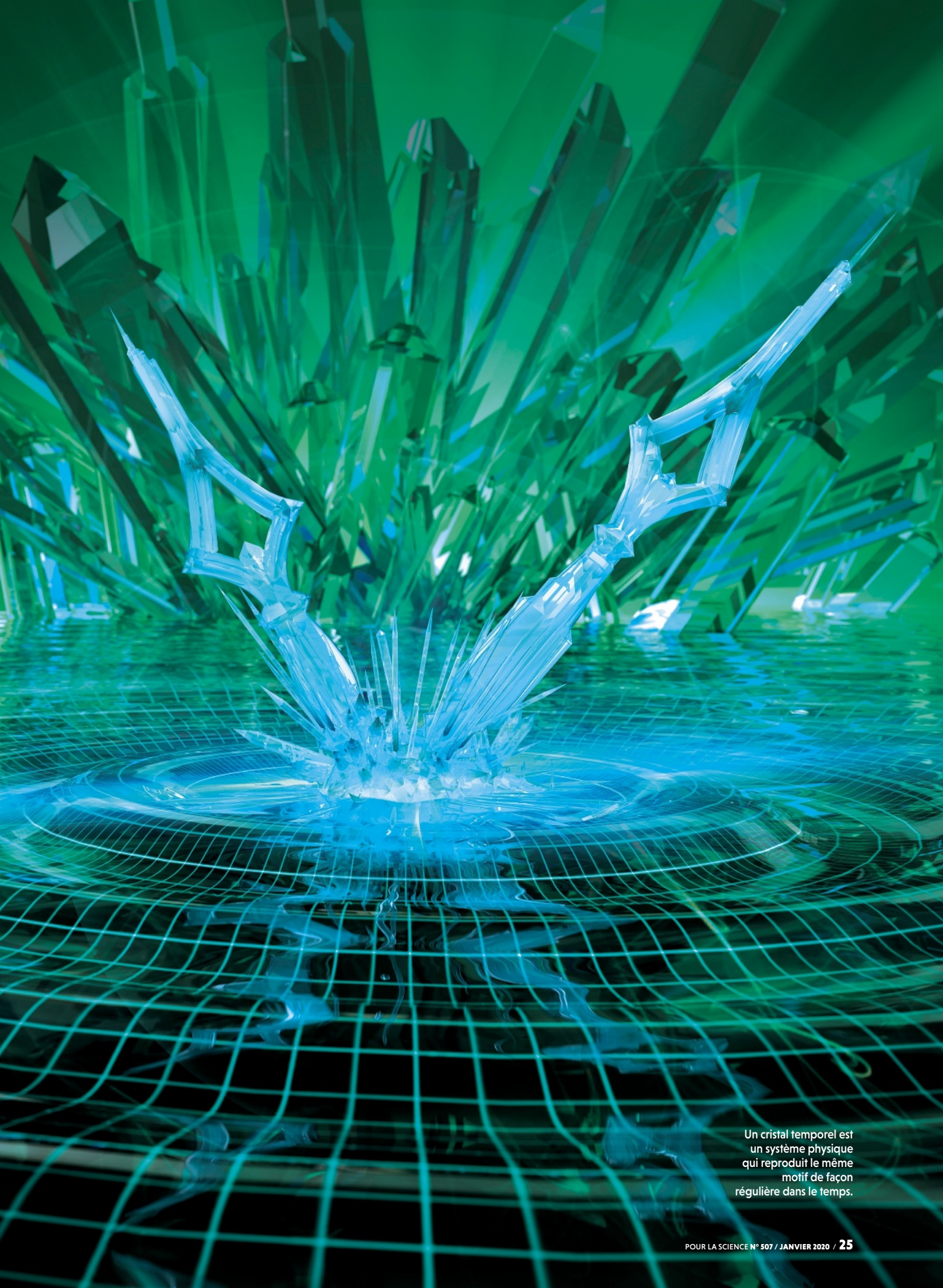
FRANK WILCZEK
physicien théoricien
au MIT, aux États-Unis,
et lauréat du prix Nobel
de physique en 2004 pour
ses travaux sur la théorie
de l'interaction forte

À l'heure des cristaux temporels

En imaginant des cristaux présentant un motif répété dans le temps plutôt que dans l'espace, les physiciens créent de nouveaux états de la matière aux propriétés surprenantes. Une piste pour concevoir des horloges ultraprécises.

Depuis longtemps, l'homme est fasciné par l'aspect esthétique des cristaux et notamment des pierres précieuses. À partir du XIX^e siècle, les scientifiques ont commencé à classer les différentes formes de cristaux, qui sont les matériaux les plus ordonnés de la nature : en leur sein, atomes et molécules sont arrangés selon des structures qui se répètent dans l'espace de façon régulière. Il en résulte des solides stables, rigides, aux propriétés électriques, optiques, etc., souvent intéressantes. Ces travaux ont suscité des progrès importants en mathématiques et en physique. Par exemple, au XX^e siècle, l'étude du comportement quantique des électrons dans les cristaux a directement conduit à la découverte des semi-conducteurs et au développement de l'électronique moderne, omniprésente dans nos smartphones et nos ordinateurs.





Un cristal temporel est
un système physique
qui reproduit le même
motif de façon
régulière dans le temps.

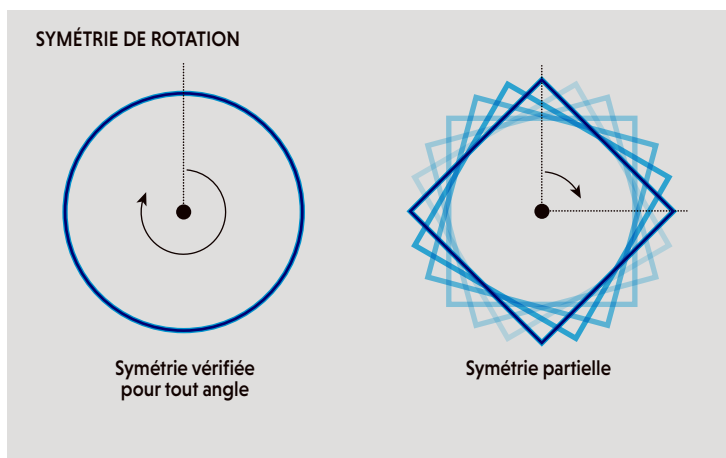
> Depuis quelques années, une nouvelle facette des cristaux se dessine. Elle prend sa source dans les principes de la théorie de la relativité d'Albert Einstein: l'espace et le temps sont intimement liés et, au bout du compte, sont à considérer sur un pied d'égalité. Il est donc naturel de se demander si certains objets présentent des propriétés temporelles qui seraient analogues à celles des cristaux ordinaires habituellement définis dans l'espace. En explorant cette question, les physiciens ont découvert les «cristaux temporels». Ce concept inédit, qui a donné naissance à toute une classe de matériaux nouveaux, a livré des éclairages passionnants sur la physique. Il offre aussi des perspectives d'applications innovantes, en particulier des horloges plus précises que toutes celles qui existent actuellement.

UNE QUESTION DE SYMÉTRIE

Avant d'expliquer en détail cette idée récente, je dois clarifier ce qu'on entend exactement par le terme de cristal. La définition la plus utile à des fins scientifiques fait intervenir deux notions fondamentales: la symétrie et la brisure spontanée de symétrie.

Dans le langage courant, le terme de «symétrie» est utilisé dans de nombreuses situations et véhicule une idée d'équilibre, d'harmonie ou même de justice. En physique et en mathématiques, sa définition est plus précise. On dit qu'un objet est symétrique ou possède une symétrie s'il existe des transformations qui, quand on les applique à cet objet, conduisent à un résultat identique à la situation initiale.

Pour illustrer cette définition, prenons l'exemple du cercle. Quand on fait tourner un cercle autour de son centre, d'un angle quelconque, il reste visuellement identique, même si chaque point du cercle s'est déplacé: la figure géométrique possède une symétrie de rotation. Un carré présente aussi des symétries de rotation, mais pas autant qu'un cercle, car il faut faire tourner le carré de 90 degrés pour qu'il retrouve son apparence de départ.



Le concept de symétrie est généralisable. Il est possible d'adapter l'idée de telle sorte qu'elle s'applique aux lois de la physique. Nous disons qu'une loi est symétrique si nous pouvons changer le contexte dans lequel elle s'applique sans changer la loi elle-même. Par exemple, l'axiome fondamental de la relativité restreinte est que les mêmes lois physiques s'appliquent dans deux référentiels différents qui se déplacent à vitesse constante (en grandeur et en direction) l'un par rapport à l'autre. Ainsi, la relativité exige que les équations qui décrivent les lois de la physique doivent être inchangées quand on applique certaines transformations représentant un tel changement de référentiel.

Une classe différente de transformations est importante pour les cristaux, y compris les cristaux temporels. Ce sont des transformations très simples et néanmoins d'une importance capitale: les «translations». La symétrie de translation garantit que les lois physiques s'appliquent de la même façon en deux endroits différents. Si vous déménagez (ou «translatez») votre laboratoire d'une ville à une autre, vous constaterez que les mêmes lois sont encore valables au nouvel emplacement. En d'autres termes, la symétrie de translation spatiale affirme que les lois que nous découvrons quelque part s'appliquent partout à l'identique.

La symétrie de translation temporelle exprime une idée similaire, l'espace étant remplacé par le temps. Elle dit que les mêmes lois qui nous gouvernent maintenant s'appliquent aussi aux observateurs dans le passé et dans le futur. En d'autres termes, les lois que nous découvrons à un moment s'appliquent tout le temps. Étant donné son importance majeure dans ce récit, je noterai τ (la lettre grecque «tau») la symétrie de translation temporelle.

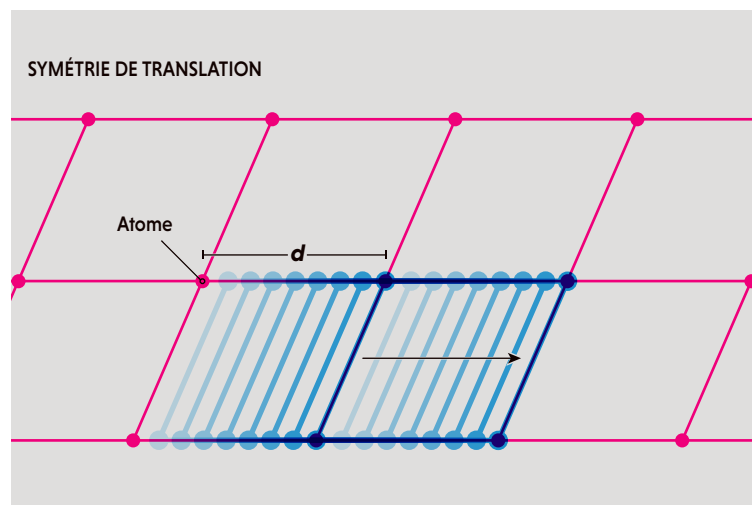
Sans symétrie de translation spatiale et temporelle, les expériences réalisées en des lieux différents ou à des moments différents ne seraient pas reproductibles. La science telle que nous la connaissons serait alors impensable. Jusqu'à présent, toutes les observations indiquent que les règles de la physique valides ici et maintenant sont les mêmes que celles qui régissent des galaxies lointaines, situées aux confins de l'Univers et vues par nous telles qu'elles étaient dans un passé reculé. Il est donc raisonnable d'admettre la validité de ces symétries.

BRISURE DE SYMÉTRIE

Paradoxalement, si les symétries sont à l'origine du caractère esthétique des cristaux, c'est le manque de symétrie au sens mathématique de ces objets qui les définissent aux yeux des physiciens.

Pour l'illustrer, considérons d'abord une droite. Toute translation laisse cet objet inchangé. Maintenant, imaginons un cristal

idéalisé et unidimensionnel : des atomes disposés à intervalles réguliers (séparés d'une distance d) sur une droite. Si nous translatons ce cristal un peu vers la droite, nous ne verrons plus la même chose. C'est seulement si nous translatons le cristal de la distance d exactement que nous verrons le même cristal. Ainsi, le cristal idéalisé a un degré réduit de symétrie de translation spatiale, de la même façon qu'un carré a un degré réduit de symétrie de rotation en comparaison avec le cercle.



Les physiciens disent que dans un cristal, la symétrie de translation est « brisée ». Les symétries résiduelles (la translation de longueur d) définissent notre cristal. En effet, si nous savons que la symétrie d'un cristal fait intervenir des translations par multiples de la distance d , alors nous savons où se placent tous les atomes les uns par rapport aux autres.

En deux ou trois dimensions, les motifs cristallins sont beaucoup plus riches que dans le cas unidimensionnel. Il en existe une grande variété, et dans certains cas, ces motifs sont construits en associant des symétries de rotation et de translation. Au xiv^e siècle, les artistes qui ont décoré le palais de l'Alhambra, à Grenade, en Espagne, ont représenté de nombreux motifs possibles de cristaux bidimensionnels. Il existe 17 types de symétries dans un plan bidimensionnel, et les mathématiciens du xix^e siècle ont établi une classification des formes possibles pour les cristaux tridimensionnels.

À l'été 2011, je me préparais à enseigner ce chapitre des mathématiques dans le cadre d'un cours sur l'utilisation des symétries en physique. J'essaie toujours de jeter un regard neuf sur les sujets que je vais présenter et, si possible, y apporter quelque chose de nouveau. Il m'est venu à l'esprit que l'on pourrait étendre la classification des motifs cristallins possibles dans l'espace tridimensionnel à des formes

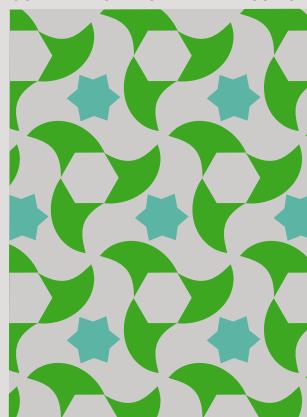
cristallines dans l'espace-temps quadridimensionnel en incluant donc le temps.

Quand j'ai fait part de cette idée à mon collègue Alfred Shapere, aujourd'hui à l'université du Kentucky, il m'a vivement conseillé de considérer deux questions : ces cristaux d'espace-temps décrivent-ils des systèmes concrets ? Conduisent-ils à des états particuliers de la matière ? Ces questions m'ont lancé dans une aventure scientifique étonnante.

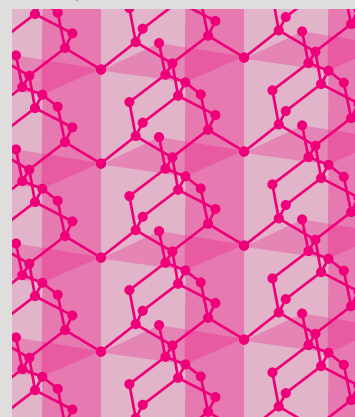
La réponse à la première question vient assez simplement. Alors que les cristaux ordinaires sont des arrangements ordonnés d'objets dans l'espace, les cristaux spatiotemporels sont des arrangements ordonnés d'événements dans l'espace-temps. Reprenons le cas d'un cristal unidimensionnel, où sa seule dimension serait celle du temps. Cela revient donc à chercher des systèmes dont l'état global se répète dans le temps à intervalles réguliers. En fait, de telles configurations nous sont très familières. Par exemple, la Terre retrouve son orientation dans l'espace toutes les 24 heures environ. L'homme a aussi construit des systèmes qui reproduisent un arrangement donné à des intervalles réguliers pour indiquer le temps qui passe : des horloges à pendule, à ressort, à cristaux piézoélectriques ou atomiques.

Certains systèmes concrets familiers constituent également des cristaux spatiotemporels de plus grande dimension. Par exemple, une onde sonore plane (voir la figure page 28) présente un motif périodique, où la hauteur de la surface représente la surpression en fonction de la position et du temps. Des motifs de cristaux spatiotemporels plus complexes sont peut-être difficiles à trouver dans la nature, mais ces idées seraient intéressantes à explorer pour des artistes ou des ingénieurs – imaginez un palais de l'Alhambra dynamique et dopé aux amphétamines !

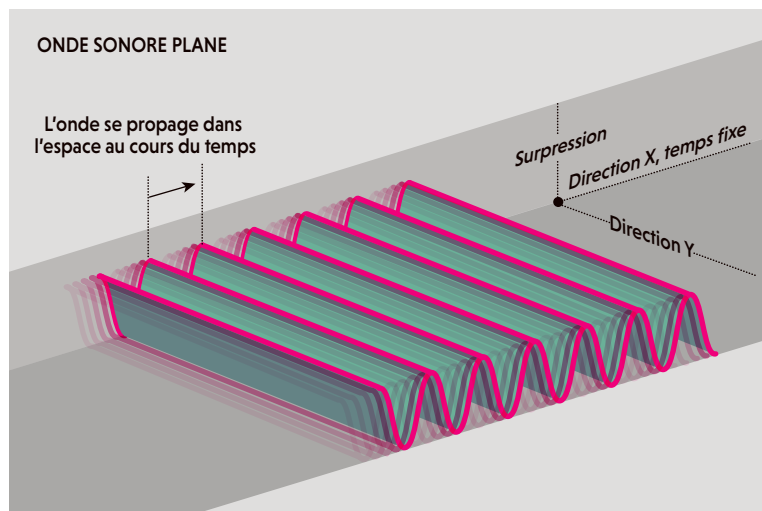
EXEMPLES DE MOTIFS CRISTALLINS COMPLEXES PRÉSENTANT PLUSIEURS SYMÉTRIES



À deux dimensions (comme on en voit au palais de l'Alhambra)



À trois dimensions (structure cristalline du diamant)



> Les cristaux spatiotemporels que nous venons d'évoquer ne font que rassembler sous une nouvelle étiquette des phénomènes déjà connus et n'ont donc rien d'étonnant. Mais si nous nous penchons sérieusement sur la seconde question d'Alfred Shapere, nous entrons dans un domaine physique vraiment nouveau. Pour ce faire, nous devons introduire la notion de brisure « spontanée » de symétrie.

BRISURE « SPONTANÉE » DE SYMÉTRIE

Quand un liquide ou un gaz se refroidit en formant un cristal, quelque chose de fondamentalement remarquable se produit : la solution, obtenue à partir des lois physiques, qui décrit le cristal affiche moins de symétrie que les lois elles-mêmes. Cette diminution de symétrie étant le résultat de la seule baisse de température, sans intervention extérieure particulière, on dit que le matériau brise « spontanément » la symétrie, en l'occurrence la symétrie de translation spatiale dans le cas du cristal.

Une caractéristique importante de la cristallisation est qu'elle s'accompagne d'un changement brutal du comportement du système. Au-dessus d'une certaine température critique (qui dépend de la composition chimique du système et de la pression ambiante), on a un liquide ; au-dessous, on a un cristal, aux propriétés très différentes. C'est ce qui se passe quand l'eau gèle et forme de la glace. La transition se produit de façon prévisible, et elle s'accompagne d'une libération d'énergie (sous forme de chaleur). Lors de cette transition de phase, un changement minime de conditions suffit pour provoquer une réorganisation profonde du liquide en un matériau qualitativement distinct.

La rigidité est une autre de ces propriétés émergentes qui distinguent les cristaux des liquides et des gaz. D'un point de vue microscopique, la rigidité apparaît parce que le motif

organisé des atomes dans un cristal s'étend sur de longues distances et que les atomes du cristal résistent aux tentatives de perturbation de ce motif.

Le principe sous-jacent à la cristallisation est celui de la minimisation de l'énergie du système. Pour certaines conditions de température et de pression, la configuration optimale est atteinte seulement si les atomes s'organisent de façon régulière (ce qui conduit à une réduction de la symétrie du système). La transition est brutale et s'étend au matériau en entier.

Comme la brisure spontanée de symétrie a un rôle très important dans le concept de cristal, j'ai pensé qu'il était important d'explorer la possibilité que la symétrie τ puisse être brisée spontanément. Tandis que je couchais cette idée sur le papier, je l'expliquais à ma femme, Betsy Devine, une journaliste scientifique : « C'est comme un cristal, mais dans le temps. » Son intérêt piqué par mon enthousiasme, elle m'a demandé quel nom je donnais au phénomène. « Brisure spontanée de la symétrie de translation temporelle », lui ai-je répondu. « C'est trop long et trop compliqué, ça ne va pas du tout, » a-t-elle répliqué, « tu devrais plutôt les nommer des « cristaux temporels ». » Et bien évidemment, c'est ce que j'ai fait. En 2012, j'ai publié deux articles, dont un coécrit avec Alfred Shapere, qui introduisent cette idée. Un cristal temporel est ainsi un système dans lequel τ est spontanément brisée.

UN PROBLÈME D'ÉNERGIE

Pourquoi a-t-il fallu autant de temps pour que les concepts de τ et de brisure spontanée de symétrie se rejoignent, étant donné que, séparément, ils sont compris depuis de nombreuses années ? C'est parce que τ diffère des autres symétries par un aspect crucial qui rend beaucoup plus subtile la question de sa possible brisure spontanée. Cette différence résulte d'un théorème fondamental que la mathématicienne allemande Emmy Noether a prouvé en 1915. Le théorème de Noether établit un lien entre les principes de symétrie et les lois de conservation : il montre qu'à chaque type de symétrie correspond une quantité conservée. Dans l'application qui nous concerne ici, le théorème de Noether affirme que τ est essentiellement équivalent à la conservation de l'énergie. Inversement, quand un système brise τ , l'énergie n'est pas conservée et cesse d'être une caractéristique utile à la description de ce système.

Or l'argument habituellement avancé pour expliquer pourquoi un système subit une brisure spontanée de symétrie est que cela est favorable énergétiquement (le nouvel état est d'énergie inférieure). Si l'état de plus basse énergie brise la symétrie spatiale et que l'énergie du système est conservée, alors l'état de

BRISURE SPONTANÉE DE SYMÉTRIE POUR LES CRISTAUX SPATIAUX ET TEMPORELS

La brisure spontanée de symétrie est un concept essentiel dans la compréhension des transitions de phase et donc dans la formation des cristaux, spatiaux et temporels. En général, un système physique adopte une configuration stable, nommée état fondamental, où l'énergie du système est minimale. Mais quand un paramètre du système varie (par exemple l'interaction entre les particules, du fait d'une baisse de température ou autre), cette configuration devient parfois instable

et il s'opère une transition de phase qui peut engendrer une brisure spontanée de symétrie, comme dans le cas de la brisure de symétrie par translation spatiale. La configuration qui correspondait au minimum de la phase invariante par translation devient un point d'équilibre instable. On parle de point-selle : deux minima globaux brisant la symétrie par translation se forment autour de ce point-selle.

Pour un système classique, une infime perturbation des paramètres du système fera choisir l'un des deux minima globaux, un peu comme lorsqu'on pousse légèrement une bille du haut d'une colline, qui roulera vers la vallée à gauche ou celle à droite. La situation est un peu différente dans le cas d'un système quantique. En effet, dans ce cas, l'état fondamental $|\Psi\rangle$ qui décrit le système est une superposition des deux états

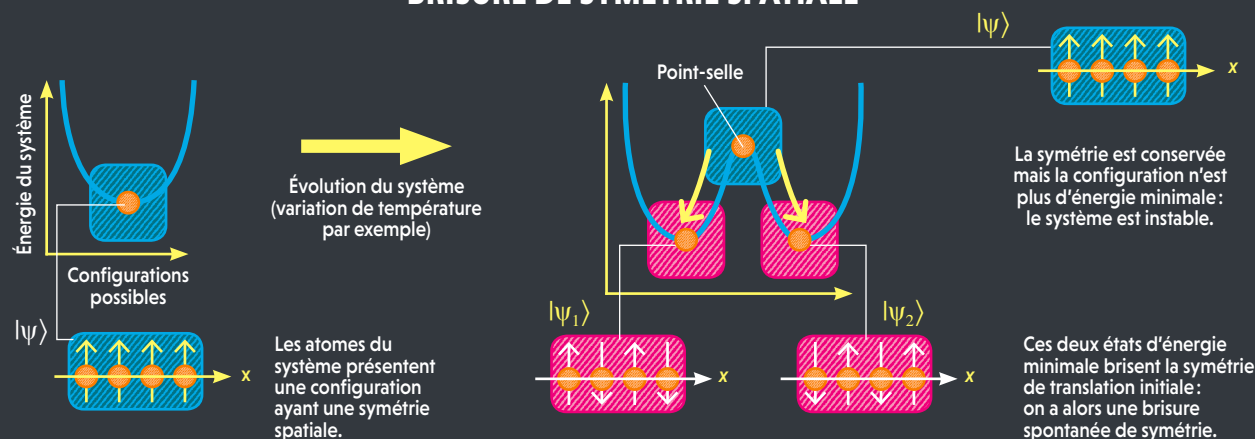
correspondant aux deux minima de l'énergie : $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle)$, de la même façon que le chat de Schrödinger dans la boîte est une superposition des états « vivant » et « mort ». Bien que les états $|\Psi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$ brisent chacun la symétrie initiale, l'état $|\Psi\rangle$ préserve cette symétrie. Cependant, cette situation est très sensible aux paramètres du système et une petite perturbation de ceux-ci favorise $|\Psi_1\rangle$ ou $|\Psi_2\rangle$. Lors d'une expérience, seul l'état $|\Psi_1\rangle$ ou $|\Psi_2\rangle$ est observé, mettant ainsi en évidence la brisure spontanée de symétrie.

Dans le cas des cristaux temporels, les interactions au sein du système brisent l'invariance temporelle. La façon typique d'obtenir ce genre de phénomène est de construire un système présentant une évolution périodique dans le temps, de période T , et tel que

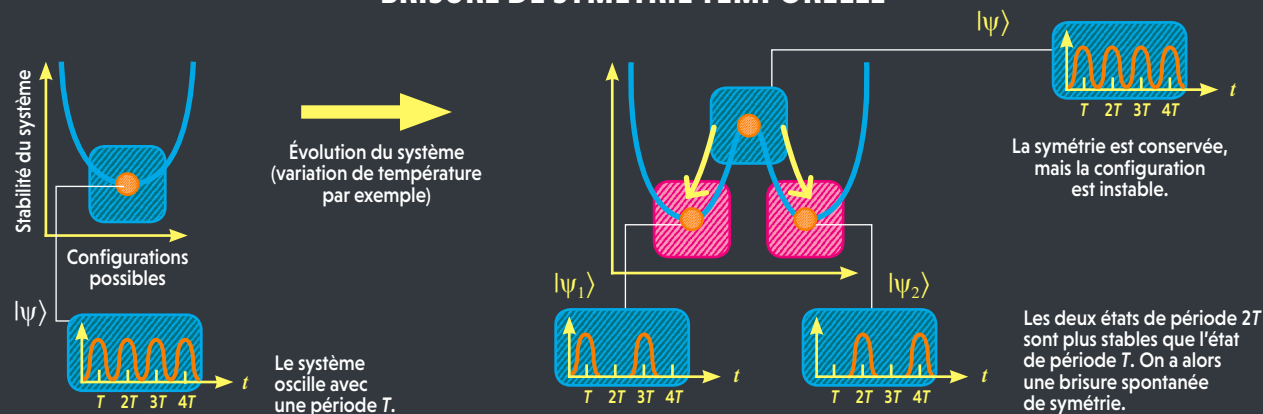
les interactions au sein du système induisent une brisure spontanée de symétrie vers, par exemple, une période $2T$. Dans cette situation, les deux états $|\Psi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$ ont chacun une période $2T$, mais leurs évolutions sont décalées de telle sorte que l'état fondamental $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle)$ a bien une période T . Dans un système idéal, nous n'observerions pas la période $2T$, mais comme dans le cas du système spatial, ce système est très sensible aux perturbations et la brisure spontanée de symétrie peut être mise en évidence par un petit changement des paramètres du modèle, ce qui est le cas dans les expériences. C'est ainsi que les cristaux temporels peuvent être observés.

ALEXANDRE DAUPHIN
Institut des sciences photoniques (ICFO), Barcelone

BRISURE DE SYMÉTRIE SPATIALE



BRISURE DE SYMÉTRIE TEMPORELLE



> 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 .

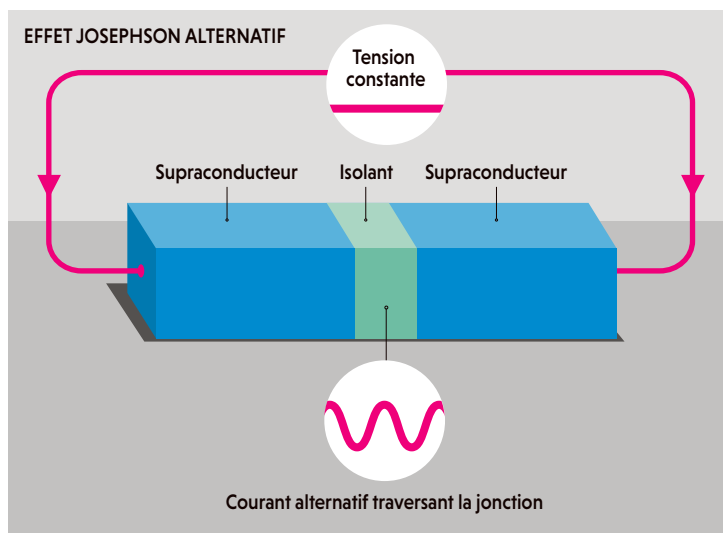
Plutôt que de se réorganiser spontanément en un état de plus basse énergie, un matériau peut se réorganiser en un état qui est plus stable pour d'autres raisons. Par exemple, des motifs ordonnés qui s'étendent sur de longues portions d'espace ou de temps et qui impliquent de nombreuses particules sont 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

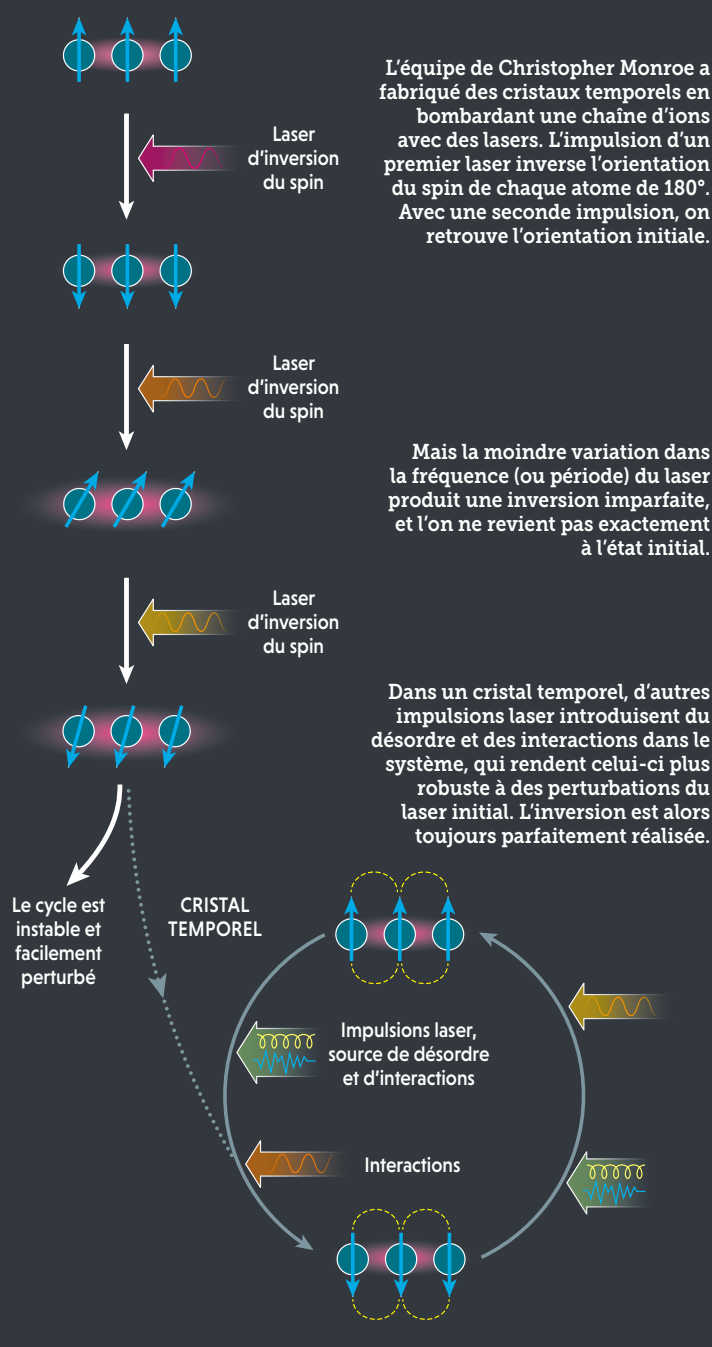
Certains physiciens ont souligné que des réponses dont la période est égale à un multiple des périodes d'excitation – des «réponses sous-harmoniques» ne sont pas des phénomènes nouveaux. Ainsi, dès 1831, Michael Faraday avait remarqué que lorsqu'il secouait verticalement du mercure liquide avec une période 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.



> 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