

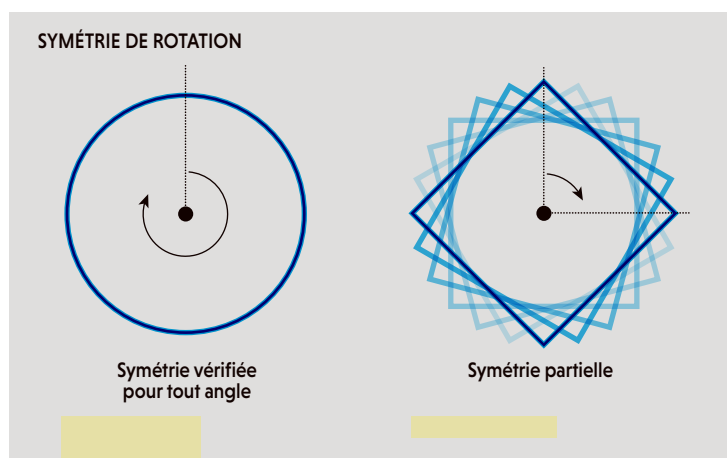
> Depuis quelques années, une nouvelle facette des cristaux se dessine. Elle prend sa source dans les principes de la théorie de la relativité d'Albert Einstein: l'espace et le temps sont intimement liés et, au bout du compte, sont à considérer sur un pied d'égalité. Il est donc naturel de se demander 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.

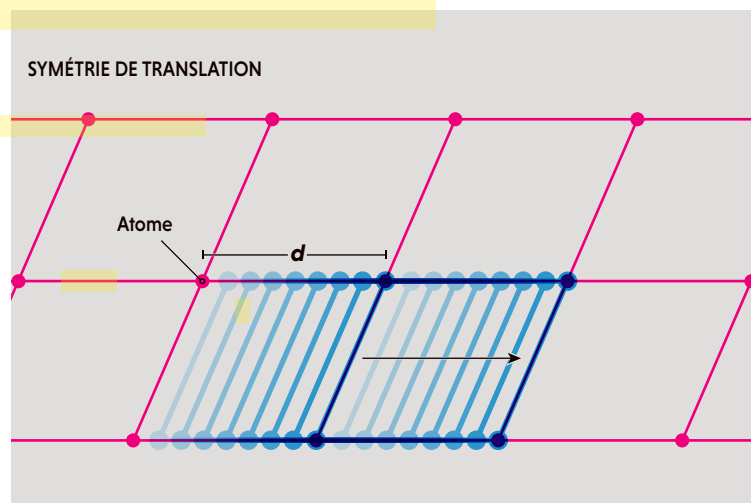
Sans symétrie de translation spatiale et temporelle, les expériences réalisées en des lieux différents ou à des moments différents ne seraient pas reproductibles. La science telle que nous la connaissons serait alors impensable. Jusqu'à présent, toutes les observations indiquent que les règles de la 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

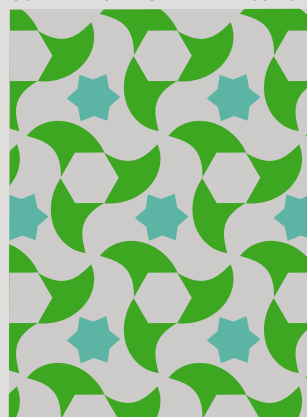
cristallines dans l'espace-temps quadridimensionnel en incluant donc le temps.

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.

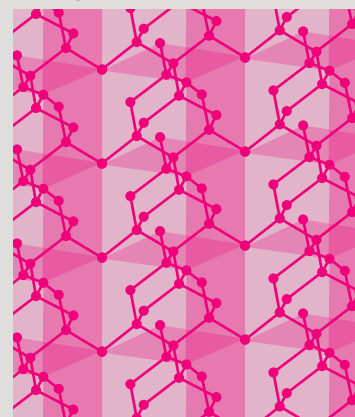
La réponse à la première question vient assez simplement. Alors que les cristaux ordinaires sont des arrangements ordonnés d'objets dans l'espace, les cristaux spatiotemporels sont des arrangements ordonnés d'événements dans l'espace-temps. Reprenons le cas d'un cristal unidimensionnel, où sa seule dimension 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)