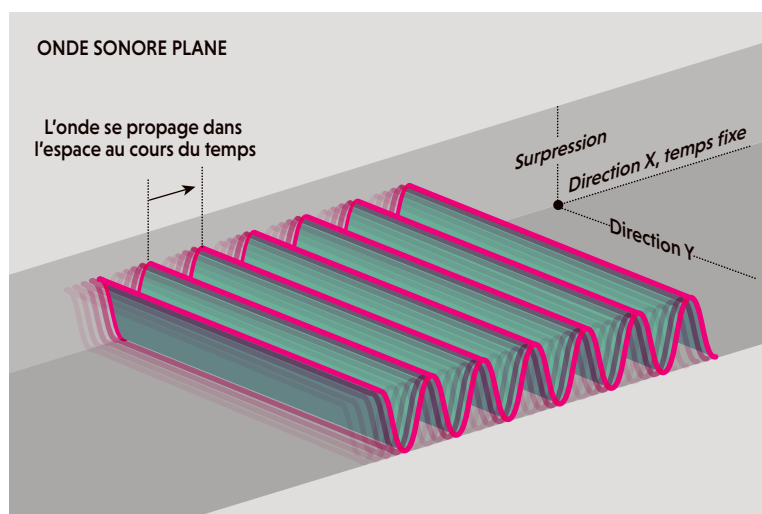




> Les cristaux spatiotemporels que nous venons d'évoquer ne font que rassembler sous une nouvelle étiquette des phénomènes déjà connus et n'ont donc rien d'étonnant. Mais si nous nous penchons sérieusement sur la seconde question d'Alfred Shapere, nous entrons dans un domaine physique vraiment nouveau. 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

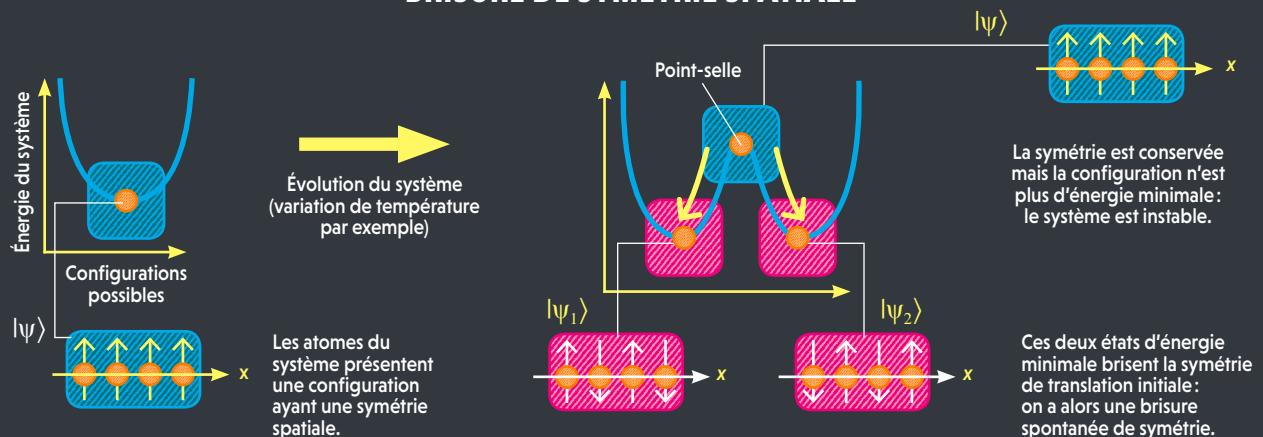
correspondant aux deux minima de l'énergie : $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle)$, de la même façon que le chat de Schrödinger dans la boîte est une superposition des états « vivant » et « mort ». Bien que les états $|\Psi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$ brisent chacun la symétrie 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

