

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

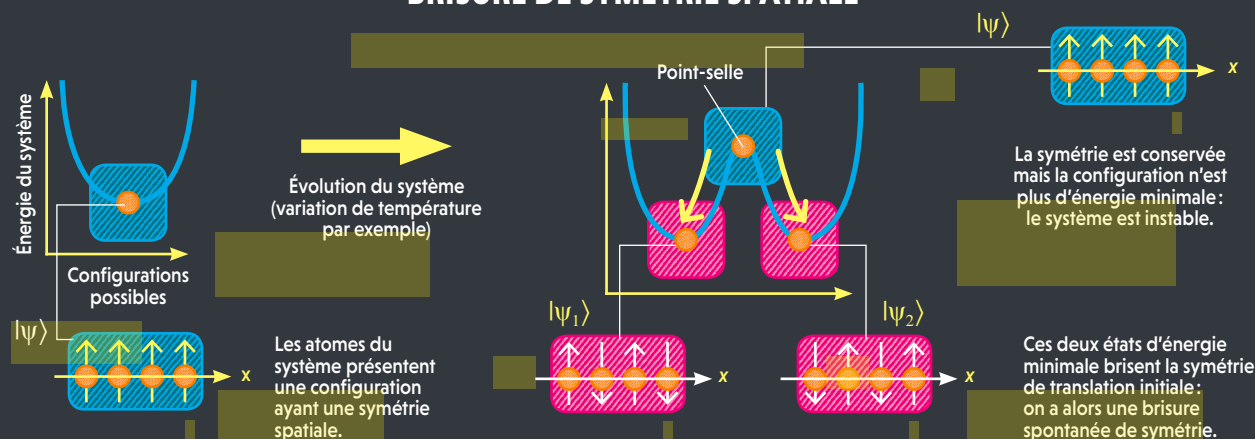
correspondant aux deux minima de l'énergie : $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle)$, de la même façon que le chat de Schrödinger dans la boîte est une superposition des états « vivant » et « mort ». Bien que les états $|\Psi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$ brisent chacun la symétrie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

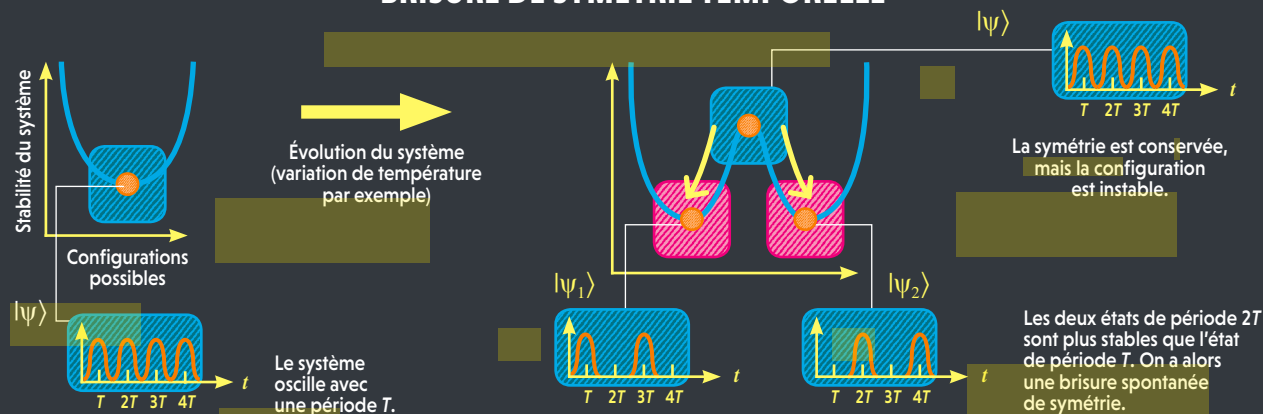
les interactions au sein du système induisent une brisure spontanée de symétrie vers, par exemple, une période $2T$. Dans cette situation, les deux états $|\Psi_1\rangle$ et $|\Psi_2\rangle$ ont chacun une période $2T$, mais leurs évolutions sont décalées de telle sorte que l'état fondamental $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle)$ 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 .

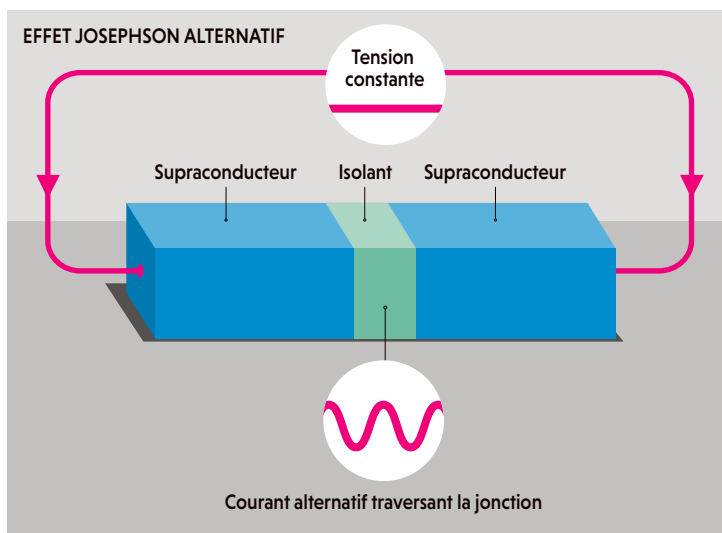
Plutôt que de se réorganiser spontanément en un état de plus basse énergie, un matériau peut se réorganiser en un état qui est plus stable pour d'autres raisons. Par exemple, des motifs ordonnés qui s'étendent sur de longues portions d'espace ou de temps et qui impliquent de nombreuses particules sont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