

Zur Ordnung getrieben

In zwei aktuellen Experimenten ist es gelungen, einen Zeitkristall zu realisieren.

Achilleas Lazarides und Francesco Piazza

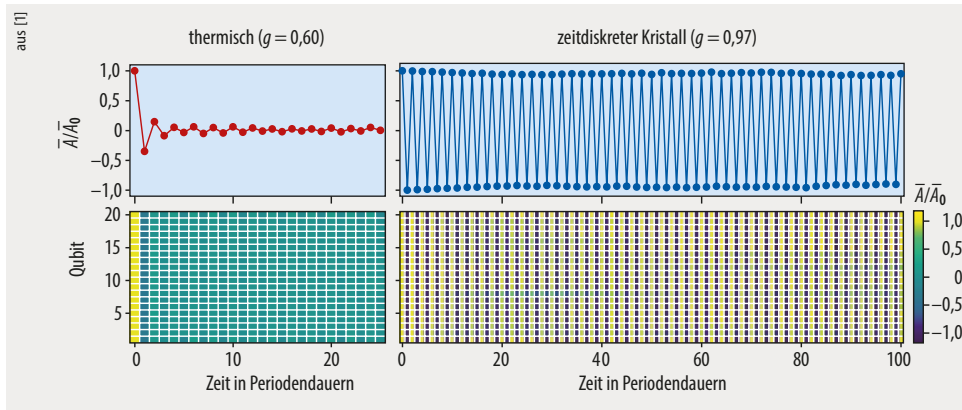


Abb. 1 Die Diagramme oben zeigen die Spin-Oszillation, gemittelt über das gesamte System: abklingende (links) und über die Zeit anhaltende Oszillationen (rechts), je nach den experimentellen Parametern. Für jedes Qubit (unten) illustriert die relative Amplitude \bar{A}/\bar{A}_0 den Zerfall (links) und das Fortbestehen (rechts), bei dem die Spins jede zweite Periode in ihre Ausgangskonfiguration zurückkehren.

In der Physik kondensierter Materie bildeten in den letzten Jahrzehnten die Ordnungsphänomene bei tiefen Temperaturen von Quanten-Vielteilchensystemen einen Schwerpunkt. Die bekannten Gleichgewichtsphasen der Materie weisen meist eine langreichweitige Ordnung und oft auch Symmetriebrechungen in Niedrigenergiezustände auf. Ein Beispiel ist ein Stabmagnet als Ferromagnet mit bevorzugter Achse, bei dem die Spins in beide Richtungen entlang einer Achse zeigen können. In Zuständen mit niedriger Energie ziehen die Spins spontan eine Richtung der anderen vor.

In den letzten Jahren richtete sich die Aufmerksamkeit auf Situationen, in denen das System aus dem Gleichgewicht gebracht wird, oft durch externes Treiben. Hierbei treten exotische Phänomene auf, die im Gleichgewicht nicht möglich sind. So gelang es in zwei kürzlich durchgeführten Experimenten, einen zeitdiskreten Kristall zu realisieren [1]. Eines davon erfolgte mit dem Google-Sycamore-Prozessor mit 20 Qubits, das andere nutzte neun kontrollierbare Kernspins in Diamant. Bei einem Zeitkristall handelt es sich um eine neue Phase der Materie, bei der die zeitliche Translationssym-

metrie spontan gebrochen wird – nicht anders als bei einem normalen Kristall, der die räumliche Translationssymmetrie bricht.

Ein Kristall entsteht, wenn eine *kontinuierliche räumliche* Translationsinvarianz in eine *diskrete* Translationsinvarianz umgewandelt wird. Übertragen auf die Zeit bedeutet dies, dass ein System mit einem zeitunabhängigen Hamilton-Operator einen Grundzustand besitzt, der nicht stationär ist, sondern periodisch in der Zeit variiert. Ein solches makroskopisches System bricht die zeitliche Translationsinvarianz. Obwohl dies verdächtig nach einem Pendel klingt, ist es das nicht. Denn es bleibt nie stehen, während Entropie ein Pendel immer zum Stillstand bringt.

Ausgehend von einem Vorschlag zur Konstruktion eines Grundzustands-Zeitkristalls [2] zeigten verschiedene Gruppen [3, 4], dass ein Zeitkristall in Vielteilchen-Quantensystemen mit statischem Hamilton-Operator und lokalen Wechselwirkungen unmöglich ist. Der Beweis beruht auf dem Fluktuations-Dissipations-Theorem – einer Eigenschaft von Systemen im Gleichgewicht [5]. In beiden aktuellen Experimenten

trat ein zeitdiskreter Kristall auf Basis einer eigenzustandsgeordneten Phase in einem Floquet-System auf. In solchen Phasen herrscht in jedem einzelnen Eigenzustand Ordnung – als ob unser Stabmagnet in jedem Eigenzustand in eine andere Richtung zeigen würde, anstatt für alle Zustände bei tiefen Temperaturen in dieselbe Richtung.

Wie die zeitkristalline Ordnung in solchen Systemen entsteht, illustriert ebenfalls ein Stabmagnet. Er lässt sich als ferromagnetisches System mit einer bevorzugten Achse modellieren, beschrieben durch das Ising-Modell. Die Gesetze, die das System über seinen Hamilton-Operator steuern, hängen nicht von der Richtung der bevorzugten Achse ab, in welche die Spins zeigen. Diese Symmetrie des Systems bricht in der ferromagnetischen Phase spontan, wenn das System eine langreichweitige Ordnung aufweist. Hierbei wählen die Spins bei niedriger Energie eine gemeinsame Richtung zwar zufällig, aber in korrelierter Weise.

Die höhere Entropie durch das Treiben des Systems zerstört die langreichweitige Ordnung. Das ist intuitiv klar: In einer Schachtel mit sorgfältig angeordneten Murmeln zerstört Schütteln diese Ordnung und erhöht die Entropie. In dem Modell, auf dem die aktuellen Experimente beruhen, verhindert dies das Einbeziehen von Unordnung – d. h. zufällige, räumliche Variationen des lokalen Magnetfelds oder der Wechselwirkungsstärke zwischen benachbarten Spins. Unter diesen Bedingungen wird das System „vierteilchenlokalisiert“. Das heißt, wenn es angetrieben wird, erwärmt es sich nicht mehr, sondern geht in einen Zustand über, in dem die Spins in dieselbe Konfiguration zurückkehren [6]. Das ist so, als würden die Murmeln in der geschüttelten Kiste immer wieder in ihre ursprüngliche Position zurückkehren!

Die Unordnung schützt das System nicht nur vor Erwärmung, sondern führt auch dazu, dass die langreichweitige Ordnung in *allen* Eigenzuständen vorhanden ist. Technisch gesehen handelt es sich dabei um die Eigenzustände des Floquet-Operators, der den Zustand zeitlich um eine einzige Periode vorwärts entwickelt. Er spielt eine ähnliche Rolle wie die Exponentialfunktion eines Hamilton-Operators in statischen Systemen. Diese Eigenzustandsordnung tritt auf, wenn – ähnlich wie bei der ferromagnetischen Phase – die Symmetrie der bevorzugten Achse spontan gebrochen wird. Doch die Konfiguration ist komplexer als beim Ferromagneten, weil die Spinorientierung vom Eigenzustand und der räumlichen Position abhängt. Im Gegensatz zu einer paramagnetischen Phase bleiben die Spin-Spin-Korrelationen bei unendlichen Abständen bestehen, sodass es eine (räumliche) langreichweitige Ordnung gibt – die Spin-Glas-Ordnung.

Ein periodischer Puls, der jeden Spin um $\pi \cdot g$ dreht, treibt ein solches ungeordnetes System mit bevorzugter Achse und Eigenzustandsordnung an. Im Fall $g = 1$ kehrt jede Spin-Konfiguration nach zwei Perioden in ihren Ausgangszustand zurück: Das System reagiert subharmonisch, mit einer geringeren zeitlichen Symmetrie als der Antrieb. Bei einem einzelnen Spin würde jedes von 1 abweichende g dazu führen, dass die Ordnung nach ein paar Perioden verloren geht. Die starken Ising-Spin-Spin-Wechselwirkungen machen die Periodenverdopplung robust. In der Murmelkiste würden die sorgfältig angeordneten Murmeln nach einer Periode eine andere Anordnung bilden, um nach einer weiteren Periode zum Ausgangszustand zurückzukehren. Die langreichweitige Ordnung tritt in Raum und Zeit auf, was der Definition eines zeitdiskreten Kristalls entspricht.

Beide Experimente implementieren ein Floquet-Modell eines Ferromagneten mit einer bevorzugten Achse und untersuchen seine subharmonische Reaktion unter Verwendung zufälliger Anfangszustände mit bestimmten Spin-Konfigurationen. Mit der Zeitentwicklung der Zustände und der Ausrichtung der Spins

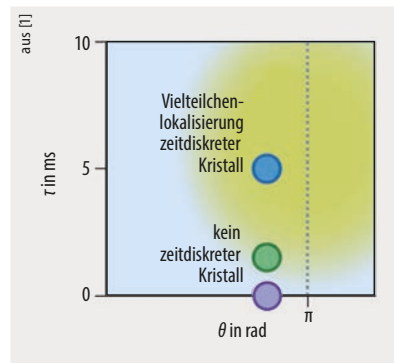


Abb. 2 Die vertikale Achse dieses Phasendiagramms zeigt die Periode des Treibens, die horizontale den Winkel, um den die Spins gedreht werden. Die zeitkristalline Phase (gelb) ist gegenüber einer Änderung der experimentellen Parameter robust.

konnten die Teams das Vorhandensein einer subharmonischen Phase eines Zeitkristalls für die intrinsische Dynamik des Systems (und nicht nur für bestimmte anfängliche Spin-Konfigurationen) bestätigen (**Abb. 1, 2**). Zudem zeigten die Experimente, dass jegliches Abklingen der Oszillationen mit der Zeit extrinsisch ist, also aus einer unvollkommenen Entkopplung des Experiments von der äußeren Umgebung resultiert, und nicht intrinsisch aufgrund des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Dazu wurde die Hamiltonsche Zeitentwicklung umgekehrt und die Abweichung vom Ausgangszustand gemessen. Jede Abweichung muss auf der äußeren Umgebung basieren und darf nicht durch die Hamiltonsche Entwicklung bedingt sein. Ohne Unordnung verschwindet die subharmonische Reaktion.

An diesem Punkt stellt sich die Frage, ob es sich bei der Beobachtung um ein Pendel handelt. Ein Pendel in einer Vakuumkammer und mit einem gut geölten Scharnier bringen zwei Klassen von Effekten zum Stillstand: Restreibung und Luftwiderstand oder interner Entropieanstieg. Die erste Klasse ist wenig problematisch: Wir können das System besser von der Umgebung isolieren, das Scharnier ölen und die Luft aus dem Behälter pumpen, um uns dem Idealfall zu nähern. Der zweite Fall ist jedoch in makroskopischen Systemen unvermeidlich: Solche Effekte sind Ausdruck des zweiten Hauptsatzes der

Thermodynamik. Die Energie, die anfangs in die Bewegung des Massenschwerpunkts fließt, überträgt sich schließlich auf die internen Freiheitsgrade, wodurch sich die Entropie erhöht. Dies führt zum Stillstand des Pendels, selbst ohne Reibung oder Verluste an die äußere Umgebung. In den Experimenten zeigte eine Echemessung, dass die abklingende Amplitude der Bewegung ausschließlich auf eine unvollkommene Isolierung von der Umgebung und nicht auf eine Zunahme der internen Entropie zurückzuführen ist.

Bislang scheinen praktische Anwendungen dieser Arbeiten noch in weiter Ferne zu sein. Allerdings loten sie die Grenzen der Quantenmechanik aus: Zeitkristalle gibt es in der Natur nicht, aber das heißt nicht, dass es sie nicht geben kann: Wir haben gerade ein Beispiel geschaffen.

- [1] J. Randall et al., *Science* **374**, 1474 (2021) und X. Mi et al., *Nature* **601**, 531 (2021)
- [2] F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 160401 (2012) und A. Shapere und F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 160402 (2012)
- [3] P. Bruno, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 070402 (2013)
- [4] H. Watanabe und M. Oshikawa, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 251603 (2015)
- [5] V. Khemani et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, 250401 (2016) und M. Ippoliti et al., *PRX Quantum* **2**, 030346 (2021)
- [6] A. Lazarides, A. Das und R. Moessner *Phys. Rev. Lett.* **115**, 030402 (2015) und P. Ponte et al., *Phys. Rev. Lett.* **114**, 140401 (2015)

Die Autoren

Dr. Achilles Lazarides, Mathematical Sciences, Schofield Building, Loughborough University, Epinal Way, Loughborough, Leicestershire, LE11 3TU, Großbritannien, und **Dr. Francesco Piazza**, Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Nöthnitzer Straße 38, 01187 Dresden