

## ■ Auf der Suche nach der kristallisierten Zeit

Zwei Experimente demonstrieren die Existenz von „Zeitkristallen“, die robuste und phasenkohärente Oszillationen zeigen.

Am Anfang stand eine provokante Idee des Physik-Nobelpreisträgers Frank Wilczek [1]: Er argumentierte, dass ein inhomogenes System in seinem Grundzustand spontan rotieren kann, was zu periodisch oszillierenden Observablen führt und die Zeittranslationsinvarianz bricht. Später stellte sich zwar heraus, dass dieser exotische Zustand der Quantenmaterie im thermodynamischen Gleichgewicht nicht existiert [2]. Das befeuerte die Suche nach diesen so genannten Zeitkristallen aber umso mehr. Vor kurzem zeigte sich, dass sie weit weg vom thermischen Gleichgewicht – in ungeordneten, periodisch getriebenen Systemen – tatsächlich auftreten können [3]. So gelang es in zwei Experimenten, Zeitkristalle zu erzeugen [4, 5].

Kristalline Festkörper wie Gold sind typische Beispiele für spontane Symmetriebrechung. Die quantenmechanische Beschreibung der Materie ist unter räumlicher Verschiebung invariant: Jeder Platz im Raum ist physikalisch gleichwertig. Kühlt man Materie ab, ordnen sich die Atome jedoch periodisch zu einem kristallinen Zustand an, der die Symmetrie der Translationsinvarianz spontan bricht.

Ähnlich einem kristallinen Festkörper besitzen periodisch getriebene Systeme eine diskrete Translationssymmetrie in der Zeit. Wird diese spontan gebrochen, entsteht ein Zeitkristall. Ein klassisches Analogon wäre beispielsweise ein Kugelschreiber, bei dem die Schreibspitze nur nach jedem zweiten Klick aus dem Gehäuse kommt. Im Unterschied zu den klassischen Systemen ist die Oszillationsfrequenz des Zeitkristalls robust und hängt nicht von der Frequenz der externen treibenden Kraft ab.

Ein Zeitkristall definiert eine robuste Quantenphase. Ein kanonisches theoretisches Modell, in dem Zeitkristalle auftreten, besteht aus magnetischen Momenten (Spins). Die Spins werden zu

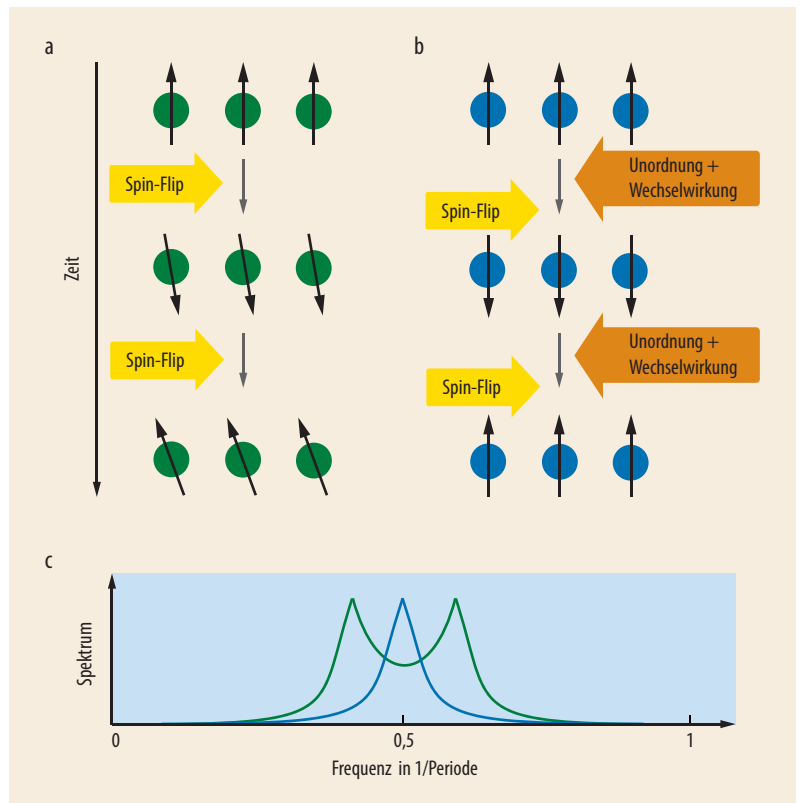


Abb. 1 Im instabilen Zyklus rotiert ein Laser die Orientierung der Spins um etwa 180°. Die kleinen Abweichungen führen dazu, dass die Spins ihre Ausgangsorientierung nach zwei Perioden nicht mehr erreichen (a). Zusätzliche Felder erzeugen eine Wechselwirkung zwischen den Spins und Unordnung, die einen Zeitkristall stabilisieren: Nach zwei Perioden zeigen die Spins in ihre Ausgangs-

richtung (b). Die fortlaufende Oszillation der Spinpolarisation des Systems bricht so die diskrete Zeittranslationssymmetrie. Die Abweichung von der 180°-Rotation führt beim instabilen Zyklus zu einer Schwebung in der Spinpolarisation: Im Fourier-Spektrum ergeben sich zwei Spitzen (c, grün). Beim Zeitkristall stabilisieren die Oszillationen an der halben Treibfrequenz in einer Spitze (blau).

Beginn polarisiert und anschließend periodisch getrieben (Abb. 1): Zunächst wechselwirken die Spins über eine ferromagnetische Kopplung und spüren ein örtlich ungeordnetes Magnetfeld, das ihre Quantisierungsachse definiert. Danach wird ein Magnetfeld senkrecht zur Quantisierungsachse angelegt, in dem die Spins um etwa 180° rotieren. Diese Drehung kann von 180° abweichen. Das abwechselnde Wiederholen der beiden Schritte treibt das System periodisch. Bei sehr schwacher ferromagnetischer Wechselwirkung folgt der Spin direkt dem magnetischen Feld: Falls er sich nicht um exakt 180° dreht, zeigt er nach zwei Perioden in eine

andere Richtung als zu Beginn des Zyklus (Abb. 1a). Ist die Wechselwirkung jedoch stark genug, kommen die Spins nach zwei Perioden zu ihrem Ausgangszustand zurück, was die diskrete Zeittranslationsinvarianz bricht (Abb. 1b). Die Wechselwirkung stabilisiert folglich die zeitkristalline Phase, die sich im Fourier-Spektrum in Form einer robusten Spitze bei der halben Treibfrequenz zeigt (Abb. 1c). Physikalisch betrachtet propagiert der Zeitentwicklungsoperator das System über eine Periode. Für den Zeitkristall treten die Eigenzustände dieses Operators in Paaren von Schrödingerschen „Katzenzuständen“ auf, d.h. kohärenten

Superpositionen zweier Zustände. Die Phasen der komplexen Eigenenergien der beiden Zustände unterscheiden sich um die halbe Treibfrequenz, was zu den Oszillationen der Spinpolarisation führt.

### Treiben ohne Aufzuheizen

Allerdings heizen sich periodisch getriebene Quantensysteme kontinuierlich auf. Das zerstört jede Form von Ordnung in den Quantenzuständen. Das Aufheizen gilt es zu vermeiden, um Zeitkristalle zu realisieren. Dazu gibt es verschiedene Ansätze: Beispielsweise lassen sich Quantenzustände durch ungeordnete Potentiale lokalisieren – ein Phänomen, das als Vielteilchenlokalisierung bekannt ist. Die Gruppe von Immanuel Bloch in München zeigte experimentell, dass sich ein solches ungeordnetes System unter periodischem Treiben nicht aufheizt [6]. Auch eine nicht allzu große effektive Wechselwirkung, durch die ein langlebiger, quasi-stationärer Zustand („präthermaler Zustand“) entsteht, hilft dabei, das Aufheizen zu vermeiden [7, 8].

Das nutzte kürzlich die Gruppe von Christopher Monroe an der University of Maryland, um einen Zeitkristall mit einer Kette aus zehn Ytterbium-Ionen zu erzeugen [4]. Alternierende Sequenzen von Laserpulsen treiben Spin-Flips, generieren lokal ungeordnete Magnetfelder und die Wechsel-

wirkung zwischen den Spins. Die Bewegungsgleichungen der zehn Spins lassen sich in numerischen Berechnungen simulieren. In Übereinstimmung mit den Rechnungen zeigten sich Oszillationen in der Magnetisierung, die bei einer ausreichend starken Wechselwirkung mit der doppelten Treibperiode synchronisiert sind: der Nachweis für einen Zeitkristall.

Die Wissenschaftler um Mikhail Lukin von der Harvard University untersuchten ein Ensemble von einer Million Stickstoff-Fehlstellen-Zentren, die zufällig auf einem Diamantgitter verteilt waren [5]. Mithilfe einer periodischen Pulssequenz, die auf die effektiven Spin-Freiheitsgrade der Stickstoff-Fehlstellen-Zentren wirkt, findet sich auch in diesem System ein Zeitkristall. Vom aktuellen theoretischen Standpunkt aus ist das überraschend, weil diese Systeme weder lokalisiert noch präthermal sind. Die experimentellen Daten zeigen jedoch, dass das getriebene System über lange Zeit stabil bleibt und nur langsam aufheizt. Außerdem lässt sich die kritische Wechselwirkungsstärke bestimmen, unter welcher der Zeitkristall in einen die Symmetrie erhaltenden Zustand schmilzt.

Beide Experimente liefern ähnliche Ergebnisse, obwohl die physikalischen Realisierungen höchst unterschiedlich sind. Zeitkristalle

sind also eine robuste exotische Phase. Damit wird bestätigt, dass universelle Vielteilchenphänomene auch weit entfernt vom Gleichgewicht entstehen können. Das volle Potenzial von Zeitkristallen ist noch nicht absehbar, zumal sie ganz neue Forschungsrichtungen anregen. So ist zu erwarten, dass Zeitkristalle neuartige Phasen mit topologischer Ordnung ermöglichen, die im thermischen Gleichgewicht nicht existieren. Außerdem könnten solche exotischen Zustände von Quantenmaterie in Zukunft dazu dienen, fragile kohärente Quantensuperpositionen zu stabilisieren. Dies würde zu Anwendungen in der Quantenmetrologie und Quanteninformationstechnologie führen.

Michael Knap

- [1] F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. **109**, 160401 (2012)
- [2] P. Bruno, Phys. Rev. Lett. **111**, 070402 (2013); Ph. Nozières, Europhys. Lett. **103**, 57008 (2013); H. Watanabe und M. Oshikawa, Phys. Rev. Lett. **114**, 251603 (2015)
- [3] V. Khemani et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 250401 (2016); D. V. Else et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 090402 (2016); C. W. von Keyserlingk et al., Phys. Rev. B **94**, 085112 (2016)
- [4] J. Zhang et al., Nature **543**, 217 (2017)
- [5] S. Choi et al., Nature **543**, 221 (2017)
- [6] P. Bordia et al. Nat. Phys. **13**, 460 (2017)
- [7] D. V. Else et al., Phys. Rev. X **7**, 011026 (2017)
- [8] S. A. Weidinger und M. Knap, Sci. Rep. **7**, 45382 (2017)

Prof. Dr. Michael Knap, Physik Department und Institute for Advanced Study, Technische Universität München, 85748 Garching

## GIGANTISCHE WALZEN

Bei der Beobachtung des Perseus-Galaxienhaufens und anderen ähnlichen Galaxienclustern mit dem Röntgenteleskop Chandra hat sich gezeigt, dass es in der Nähe des Zentrums (gelb) zu Einbuchtungen im Medium zwischen den Galaxien kommt (unten links). Gängige Modelle, in denen das Medium mit aktiven galaktischen Kernen rückkoppelt, können diese Strukturen nicht erklären. Ein internationales Team versuchte, die Beobachtungen mit Simulationen eines Hin- und Herschwappens des Mediums („gas sloshing“) zu verstehen. Dabei ergaben sich für Größe, Ort und thermische Struktur der Einbuchtungen Daten, die an eine Walze erinnern, wie sie durch Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten entsteht. Diese verursachen auch das Kräuseln dünner Rauchfahnen in unbewegter Luft. Allerdings handelt es sich bei der Struktur im Perseus-Cluster um eine Walze gigantischen Ausmaßes, in die unsere Milchstraße passen würde. Die Forscher betonen, dass ihr Ansatz auch die in den Clustern Centaurus und Abell 1795 beobachteten Strukturen erklärt. S. A. Walker et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. **468**, 2506 (2017)

