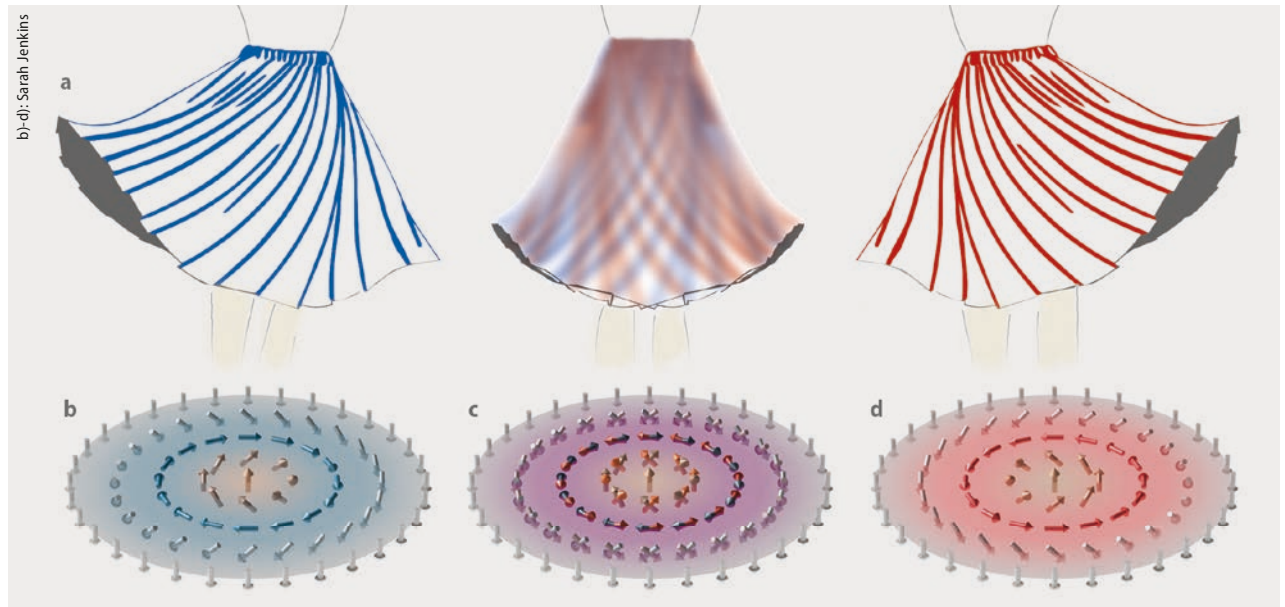


Der Quanten-Twist

Modellrechnungen haben gezeigt, dass sich kleine magnetische Skyrmionen als Qubit eignen.

Sebastián A. Díaz und Karin Everschor-Sitte



Wenn beim Tanzen die Röcke fliegen (a), verhalten sich die Falten ähnlich wie die Magnetisierung in einem Skyrmion. Deren Helizität lässt sich als Qubit benutzen: Neben den reinen Messzuständen (b, d) braucht es dazu die quantenmechanische Überlagerung (c).

Beim Twist fliegen die Röcke der Tänzerinnen und beim Wechsel der Drehrichtung verschwimmen für kurze Zeit die Konturen des Rockes. Denn die Rockfalten zeigen nicht nur gerade nach außen, sondern verdrehen sich ineinander (Abb. 1a). Ähnlich verdrehte Strukturen gibt es auch beim Magnetismus. Konkurrieren in magnetischen Systemen verschiedene Wechselwirkungen, die unterschiedliche Ausrichtungen der Magnetisierung bevorzugen, können topologische magnetische Wirbel entstehen, sogenannte Skyrmionen [1]. Diese besitzen einen teilchenartigen Charakter, sodass sie diverse Anwendungen in der Spintronik finden könnten, zum Beispiel als Speichereinheit. Dann repräsentiert beispielsweise die Anwesenheit bzw. Abwesenheit eines Skyrmions ein Bit mit den Zuständen 1 und 0.

Charakteristisch für Skyrmionen ist ihre besondere Magnetisierung: Im Zentrum und am Rand zeigt sie in entgegengesetzte Richtungen (Abb. 1b – 1d); der mittlere Bereich in-terpoliert dazwischen. Daraus ergibt

sich ein Freiheitsgrad für die Drehrichtung der Magnetisierung in der Ebene. Diese Helizität lässt sich – ähnlich wie die Ausrichtung der Falten bei den fliegenden Röcken – durch einen Winkel beschreiben.

Christina Psaroudaki vom Caltech (Pasadena, USA) und Christos Panagopoulos von der Nanyang Technological University (Singapur) haben ein solches magnetisches System betrachtet, bei dem jede der Drehrichtungen gleich wahrscheinlich ist. Sie sagen theoretisch vorher, dass diese Skyrmionen nicht nur als klassisches Bit arbeiten können. Vielmehr lässt sich mit der Helizität im Quantenregime die kleinste Einheit eines Quantencomputers realisieren [2]. Da jedes beliebige quantenmechanische Zweizustandssystem ein solches Qubit darstellen kann, existieren bereits viele Qubit-Systeme, zum Beispiel basierend auf Supraleitung, auf gefangenen Atomen, Quantenpunkten und Photonen [3].

Die beiden Forschenden haben nun hergeleitet, wie ein makrosko-

pischer magnetischer Wirbel als Qubit fungieren kann. Startend von einem klassischen Skyrmion in einem kontinuierlichen magnetischen System nähern sie sich der Physik der Quantenmechanik. Dies ist ein anderer Ansatz als direkt mit einem quantenmechanischen Modell zu starten und so Quanten-Skyrmionen als stabile gebundene Zustände zu erhalten, deren Eigenschaften im klassischen Grenzfall mit denen von klassischen Skyrmionen übereinstimmen [4].

Konkret betrachten Psaroudaki und Panagopoulos einen frustrierten Magneten. Dessen Spins können sich aufgrund der Wechselwirkungen untereinander nicht rein ferro- bzw. antiferromagnetisch anordnen. Aus dieser Frustration heraus entstehen verdrehte Strukturen: Die magnetischen Skyrmionen bilden sich mit verschiedenen Helizitäten [5]. Diese sind typischerweise nur wenige Nanometer groß, sodass im Vergleich zu den größeren Skyrmionen in chiralen Magneten Quanteneffekte verstärkt auftauchen können. Die nun theo-

retisch vorgeschlagenen Skyrmion-basierten Qubits könnte es in einem Material geben, das zum einen kleine Skyrmionen bei tiefen Temperaturen besitzt und zum anderen erlaubt, die Helizität der Skyrmionen und damit die Energieniveaus des Qubits zu manipulieren. Konkret käme Gd_2PdSi_3 infrage. In diesem Material wurden vor Kurzem kleine Skyrmionen entdeckt [6], in denen Quanteneffekte relevant sein könnten.

Ausgehend von dem klassischen kontinuierlichen frustrierten antiferromagnetischen Modellsystem quantisieren Psaroudaki und Panagopoulos die niedrigste Anregungsmode des Skyrmions. Hierbei führt der Helizitätsoperator $\hat{\phi}_0$ mit dem zugehörigen kanonischen Spindrehimpuls \hat{S}_z zu einem Hamilton-Operator. Dies eröffnet zwei Möglichkeiten, ein Qubit in diesem System zu definieren. Die erste basiert auf \hat{S}_z , die zweite auf der Helizität. Für die Helizität lassen sich die beiden energieärmsten Eigenzustände des Systems grafisch darstellen (Abb. 1b, d) und entsprechen im Wesentlichen den beiden gezeigten Drehrichtungen. Ohne Messung sind im System beide Zustände überlagert (Abb. 1c).

Für einen Quantencomputer muss das Qubit aber weitere Eigenschaften besitzen, als nur ein Zweizustandssystem zu sein. Einerseits muss jedes einzelne Qubit leicht „schreibbar“ und „auslesbar“ sein. Das bedeutet in der Quantenmechanik, dass es sich in

einem gewünschten Zustand initialisieren lässt und eine Qubit-spezifische Messung gut durchführbar ist. Andererseits soll ein Qubitsystem skalierbar sein: So wie ein Baum noch keinen Wald macht, ergibt ein einzelnes Qubit noch keinen Quantencomputer. Insbesondere muss es möglich sein, Qubits miteinander zu verknüpfen, sodass sie einen universellen Satz von Quantengattern bilden und damit prinzipiell jede mögliche Rechenoperation erlauben. Zudem muss das gesamte quantenmechanische System stabil gegenüber äußeren Einflüssen sein, um die quantenmechanischen Zustände zu erhalten, also eine lange Dekohärenzzeit besitzen [7].

Christina Psaroudaki und Christos Panagopoulos zeigen, dass die vorgeschlagenen Skyrmion-Qubits mittels elektrischer und magnetischer Felder gezielt zu steuern und in einem gewünschten Zustand zu präparieren sind. Für das Auslesen der Qubits kommen diverse moderne experimentelle Messmethoden infrage, die auf Information zugreifen, die entweder auf \hat{S}_z oder auf der Helizität basiert. Für Materialien mit kleiner Dämpfung sind sehr hohe Dekohärenzzeiten zu erwarten. Ein wichtiger Aspekt ist sicherlich, dass die vorgeschlagenen Qubits weniger Kühlung erfordern als beispielsweise supraleitende Qubits. Skyrmion-basierte Qubits könnten bei wenigen Kelvin arbeiten, die derzeit führenden dagegen bei etwa 0,1 K.

Um die Skyrmion-Qubits zu koppeln, schlagen Psaroudaki und Panagopoulos vor, die Skyrmionen in Nanoscheiben unterzubringen, diese vertikal zu stapeln und mit nichtmagnetischen Abstandshaltern zu trennen. So könnten äußere elektrische Felder die logischen Zustände der Skyrmion-Qubits steuern. In Zukunft gilt es, das theoretische Modell in die Praxis umzusetzen. Neben der Größe der Materialscheiben besteht hier eine große experimentelle Herausforderung darin, das Konzept von zwei auf mehr Qubits zu erweitern, um einen skalierbaren Skyrmion-basierten Quantencomputer zu bauen.

Aus welchen Qubits zukünftige Quantencomputer bestehen und welche Twists sich gegebenenfalls noch ergeben, bleibt abzuwarten.

- [1] C. Back et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53**, 363001 (2020)
- [2] C. Psaroudaki und C. Panagopoulos, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 067201 (2021)
- [3] T. D. Ladd et al., *Nature* **464**, 45 (2010)
- [4] V. Lohani et al., *Phys. Rev. X* **9**, 041063 (2019)
- [5] A. O. Leonov und M. Mostovoy, *Nat. Commun.* **6**, 8275 (2015)
- [6] T. Kurumaji et al., *Science* **365**, 914 (2019)
- [7] D. P. DiVincenzo, *Fortschr. Phys.* **48**, 771 (2000)

Die Autor:innen

Dr. Sebastián A. Díaz und **Prof. Dr. Karin Everschor-Sitte**, Fakultät für Physik, Universität Duisburg-Essen, Lotharstraße 1, 47057 Duisburg

Kurzgefasst

Anzeichen einer Geburt

Mit Radiodaten des ALMA-Observatoriums und einem vereinfachten Modell konnten Astronom:innen die Masse der protoplanetaren Scheibe um den Stern GM Aurigae bestimmen. Die Masse ist ein wichtiger Parameter, um die Frage zu beantworten, ob eine protoplanetare Scheibe instabil ist und sich gerade Planeten bilden könnten. Die Beobachtungen deuten an, dass der Kollaps in einer Region innerhalb der Scheibe begonnen hat und dort ein riesiger Gasplanet entstehen dürfte. Die Ergebnisse zeigen eindrucksvoll die Fortschritte bei der direkten Erforschung der Planetenentstehung.

K. Schwarz et al., *ApJS* (2021), accepted, arXiv:2109.06228

Empfindliches Protein

Forschende der Uni Kassel zeigten in einer Computersimulation, dass elektrische Felder das Spike-Protein von Corona-Viren inaktivieren können, sodass diese nicht mehr an der Oberfläche menschlicher Zellen andocken können. Die Untersuchungen belegten, dass bereits moderate bis schwache elektrische Impulse das Spike-Protein dazu zwingen, seine Struktur auf atomarer Ebene dauerhaft zu ändern. Nun gilt es, diese Erkenntnisse in die Praxis umzusetzen und Verfahren zu entwickeln, die zum Beispiel in Luftfilteranlagen Anwendung finden können.

C. A. Arbeitman et al., *Nat. Commun.* **12**, 5407 (2021)

Präzise Einblicke

Ein Team der Universität Freiburg hat die kohärente, mehrdimensionale Spektroskopie mit der Photoelektronen-Spektroskopie kombiniert, um damit ultraschnelle Prozesse in Materie zu untersuchen. Bei diesem neuen Verfahren wird der Stoff ionisiert und die Energie ausgelöster Elektronen gemessen. Dies liefert Informationen über die Energiestruktur und die räumliche Wahrscheinlichkeitsverteilung der Elektronen in der Materie. In Kombination mit Röntgenlichtquellen sind präzise Messungen mit atomarer Selektion möglich. Hiermit lassen sich fundamentale molekulare Prozesse genauer verstehen.

D. Uhl et al., *Optica* **8**, 1316 (2021)