

Als theoretische Festkörperphysiker untersuchen meine Gruppe und ich die Quanteneigenschaften von Materialien. Besonders fasziniert uns die Frage, wie neuartige Phänomene aus der Wechselwirkung von sehr vielen Teilchen entstehen.

Viele unserer Projekte sind durch eine enge Zusammenarbeit mit experimentellen Gruppen geprägt, die einerseits unsere Arbeit inspirieren und andererseits unsere Ideen umsetzen.

Das Spektrum an Forschungsthemen meiner Gruppe ist relativ breit und reicht von Nanostrukturen bis zu den Quanteneigenschaften neuer Materialien. Im Folgenden möchte ich kurz drei aktuelle Beispiele unserer Forschungsarbeiten beschreiben, die exemplarisch für unsere Forschungsschwerpunkte stehen.

Magnetische Wirbel

Gemeinsam mit der Gruppe von Christian Pfleiderer (Technische Universität München) entdeckten wir, dass in bestimmten „chiralen Magneten“ magnetische Wirbel stabilisiert werden können. Chirale Magnete zeichnen sich dadurch aus, dass sich die atomare Konfiguration von ihrem Spiegelbild unterscheidet. Dies führt dazu, dass sich deren magnetische Struktur gerne verdreht. In einem kleinen Magnetfeld kann man ein Gitter aus magnetischen Wirbeln – sogenannte Skyrmionen – stabilisieren. Ein solches Skyrmion wird in der Figur schematisch gezeigt.

Skyrmionen zeichnen sich durch eine besondere „topologische“ Stabilität aus. Ähnlich wie ein Knoten in einem Seil, können sie nicht durch kleine lokale Deformationen der Magnetisierung erzeugt oder vernichtet werden. Die charakteristische Windung der Magnetisierung bestimmt dabei die physikalischen Eigenschaften der Skyrmionen. Wenn Elektronen durch ein solches Material fliegen, passen sie ihr magnetisches Moment der magnetischen Textur an. Dadurch werden auf effiziente Art und Weise Kräfte von den Elektronen auf die Skyrmionen übertragen.

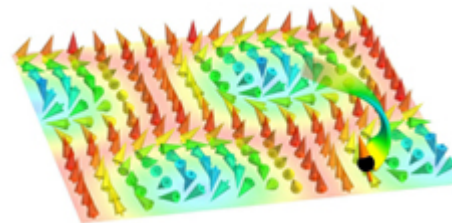


Fig. 1: Ein Elektron (schwarzer Punkt), das durch ein Gitter aus magnetischen Wirbeln fliegt, passt sein magnetisches Moment der magnetischen Textur an.

Die Gruppe von Christian Pfleiderer konnte experimentell zeigen, dass deswegen schon extrem kleine Stromdichten ausreichen, eine Bewegung der Skyrmionen zu induzieren. Die dafür notwendigen Ströme sind mehr als 100 000 Mal kleiner als die Ströme, die normalerweise erforderlich sind, um magnetische Strukturen zu manipulieren.

Theoretisch elegant kann man die Kräfte der Skyrmionen auf die Elektronen durch künstliche magnetische und elektrische Felder beschreiben, die man experimentell direkt messen kann, da die daraus resultierenden Verschiebungen der Elektronenladung als Spannungsabfall

messbar ist. Die Kombination aus topologischer Stabilität, leichter Manipulierbarkeit und einer gut verstandenen theoretischen Beschreibung macht aus Skyrmionengitter ideale Modellsysteme, um die Kopplung von Magnetismus und elektrischen Strömen zu studieren.

Transport durch Nanostrukturen

Welche Eigenschaften haben Transistoren oder Drähte, wenn sie immer kleiner und dünner und somit Quanteneigenschaften immer wichtiger werden? Welche Rolle spielt dabei die Wechselwirkung der Elektronen miteinander?

Oft findet man bei der Untersuchung dieser Fragen überraschende Ergebnisse. In einer kürzlich erschienen Arbeit haben wir beispielsweise untersucht, welche Spannung man an einer beliebigen Stelle eines ultradünnen, perfekten Drahtes messen kann, wenn man ihn an eine Spannungsquelle koppelt. Durch quantenmechanische Effekte ist die Bewegung der Elektronen in solch einem Draht exakt eindimensional. Besonders interessant wird das Verhalten des Systems, wenn man die Leitung durch den Draht ausschaltet, indem man die Dichte der Elektronen mehr und mehr reduziert. Ein perfekter Quantendraht hat eigentlich eine unendlich hohe Leitfähigkeit, daher erwartet man eigentlich, dass sich die Spannung nur direkt an den Kontakten zur Spannungsquelle ändert. Im Gegensatz dazu fanden wir, dass sich bei kleinen Spannungen im Inneren des Drahtes (trotz der unendlichen Leitfähigkeit) ein elektrisches Feld aufbaut, während bei höheren Spannungen sich die Spannungsänderung auf einen der beiden Kontakte konzentriert.

Ultrakalte Atome

In den letzten Jahren ist es Quantenoptikern gelungen, immer bessere Methoden zu entwickeln, um Atome abzukühlen und zu manipulieren. Eines der Ziele ist der Versuch, mit Atomen die Eigenschaften von Materialien zu simulieren. Dazu fängt man Atome in den stehenden Wellen eines Lasers ein. Die Atome simulieren dabei die Eigenschaften von Elektronen, während die stehende Welle des Lasers, ein sogenanntes optisches Gitter, die Rolle der im Festkörper periodisch angeordneten Atome übernimmt. Im Vergleich zu den Elektronen haben die Atome dabei den Vorteil, dass man ihre Eigenschaften viel einfacher und flexibler manipulieren kann.

In Zusammenarbeit mit der Gruppe von Immanuel Bloch (Ludwig-Maximilians-Universität München und Max-Planck-Institut für Quantenoptik) haben wir zum Beispiel untersucht, wie man exotische Isolatoren realisieren oder die Ausbreitung atomarer Wolken in optischen Gittern verstehen kann.

Faszinierenderweise kann man relativ einfach auch ganz neue Zustände der Materie realisieren. Ein besonders einfaches und zugleich besonders dramatisches Beispiel hierfür ist unser Vorschlag, wie man negative absolute Temperaturen erzeugen kann. Misst man Temperaturen in Kelvin ist die Temperatur immer positiv; 0 Grad Kelvin ist die Temperatur des absoluten Nullpunkts, sie ist die tiefstmögliche Temperatur (ca. -273,15 Grad Celsius). Trotzdem kann man auch in der Kelvin-Skala negative Temperaturen realisieren: Diese beschreiben aber nicht einen Zustand, der kälter als 0 Grad Kelvin ist, sondern paradoxerweise einen Zustand, der noch heißer ist, also mehr Energie beinhaltet als ein unendlich heißes

System. Mit einem normalen Gas kann man einen solchen Zustand nicht realisieren, da man unendlich viel Energie bräuchte, um eine unendlich hohe Temperatur zu realisieren. Mit ultrakalten Atomen in optischen Gittern kann man jedoch eine Situation schaffen, in der die Atome effektiv nur eine bestimmte maximale Energie aufnehmen können. Bei unendlich hoher Temperatur sind dabei alle Energiezustände gleich wahrscheinlich, bei negativen Temperaturen sind Zustände höherer Energie mit größerer Wahrscheinlichkeit besetzt als Zustände niedriger Energie.

Dies führt zu vielen scheinbar paradoxen Ergebnissen. So wirken Kräfte effektiv in die umgekehrte Richtung und man kann Wärmemaschinen bauen, die Energie gleichzeitig aus einem Reservoir mit positiver und einem Reservoir mit negativer Temperatur ziehen können.

Eine Arbeit der Gruppe um Immanuel Bloch in München, die, basierend auf unserem Vorschlag, experimentell Atome auf negative Temperaturen gekühlt hat, ist im Januar 2013 veröffentlicht worden.

Weitere aktuelle Forschungsschwerpunkte meiner Gruppe sind zum Beispiel die Theorie von Quantenphasenübergängen, die Beschreibung von Systemen fern des thermischen Gleichgewichts und die Theorie topologischer Isolatoren.

Die oben beschriebenen Beispiele sind in wesentlichen Teilen Forschungsergebnisse meiner Mitarbeiter. Für die oben beschriebenen Arbeiten an Skyrmionen sind besonders die Beiträge von Benedikt Binz, Karin Everschor und Markus Garst hervorzuheben, bei den kalten Atomen die Arbeiten von Stefan Mandt und Akos Rapp, bei den Quantenphasenübergängen die Arbeiten von Markus Garst und Tobias Meng, bei den Nanostrukturen die Arbeiten von Tobias Micklitz.