

## Neutral geladen

Durch geschickte Kopplung ihrer internen Zustände und Bewegungszustände verhalten sich neutrale ultrakalte Atome wie geladene Teilchen in einem elektrischen Feld.

Die Elektrodynamik ist das einfachste Beispiel einer Eichtheorie. Elektrische und magnetische Felder lassen sich durch ein Skalar- und ein Vektorpotential ausdrücken, die nur bis auf die Wahl einer Eichbedingung festgelegt sind. In der klassischen Physik ist die Wahl einer Eichung nur zum Vereinfachen der Rechnungen von Bedeutung: In die Bewegungsgleichungen gehen nur die Felder ein. Komplizierter ist es in der Quantenmechanik. Zwar sind auch hier verschiedene Eichungen äquivalent, in den Hamilton-Operator gehen aber nicht die Felder, sondern direkt die Potentiale ein, was zu völlig neuen Effekten führt, wie Aharonov und Bohm 1959 erstmals festgestellt haben [1]. Die kinetische Energie eines Teilchens der Masse  $M$  und Ladung  $q$  ist dann

$$E_{\text{kin}} = \frac{(\vec{p}_{\text{kan}} - q\vec{A})^2}{2M},$$

wobei  $\vec{p}_{\text{kan}}$  der kanonische und  $M\vec{v} = \vec{p}_{\text{kan}} - q\vec{A}$  der mechanische Impuls ist. Wird bei konstantem Skalarpotential das Vektorpotential um  $d\vec{A}$  verändert, bleibt der kanonische Impuls gleich, während sich der mechanische Impuls um  $d(M\vec{v}) = -qd\vec{A}$  verändert, es wirkt also eine Kraft auf das Teilchen. Dabei entspricht das zugehörige Kraftfeld genau dem zweiten Term aus der Darstellung des elektrischen Feldes als  $\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi - \partial_t\vec{A}$ , die Kraft folgt also bereits aus der bloßen Anwesenheit eines Vektorpotentials! Ein einfaches Beispiel für diese Situation sind die elektrischen

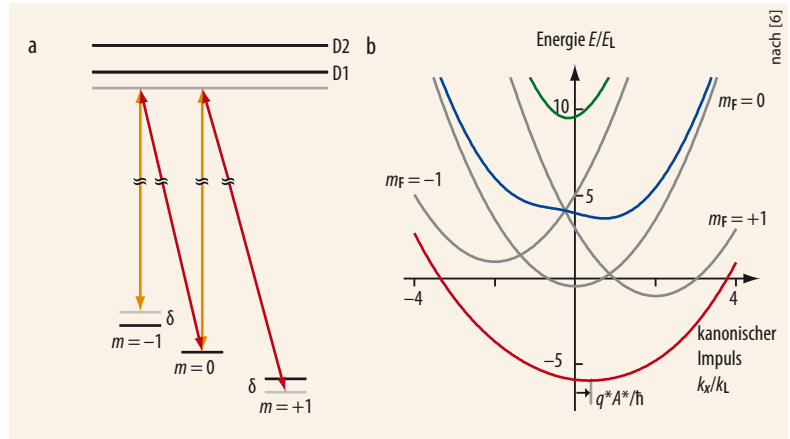


Abb. 1 Mithilfe von Laserstrahlen lassen sich Spin- und Bewegungszustände in Rubidium-Atomen koppeln (a: Niveauschema, b: ungekoppelte (grau) und gekoppelte Niveaus (farbig)). Die Physik spielt sich im untersten gekoppelten Niveau ab, dessen Minimum sich bei  $\vec{k}_{\text{min}} = q^* \vec{A}^* / \hbar$  befindet.

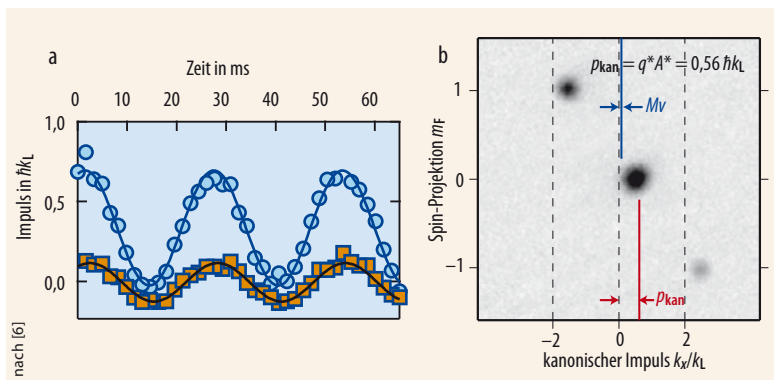
Wirbelfelder, die außerhalb einer langen Spule auftreten, wenn sich der Strom darin ändert.

Die Ladung der Elektronen und die daraus resultierende Kopplung an ein Vektorpotential führt in der Festkörperphysik zu zahlreichen Effekten wie dem Aharonov-Bohm- und dem Quanten-Hall-Effekt. Ultrakalte Atome, die sich in den letzten zehn Jahren zu vielseitigen Modellsystemen für Vielteilcheneffekte entwickelt haben [2], sind jedoch neutral, sodass diese Effekte nur auftreten, wenn durch einen Kniff ein künstliches Vektorpotential erzeugt wird. Eine Möglichkeit ist, das Gas in Rotation zu versetzen: Im mitrotierenden Bezugssystem spielt die Rotationsfrequenz die Rolle eines effektiven Vektorpotentials. Gleichzeitig entsteht allerdings eine Zentrifugalkraft, die bei einer kritischen Rotationsfre-

quenz die einschließende Atomfalle kompensiert, sodass das System instabil wird. Viele interessante Effekte treten aber gerade nahe dieser kritischen Frequenz auf [2]. Große Aufmerksamkeit erhielt daher der Vorschlag, künstliche Vektorpotentiale durch Laserlicht zu erzeugen, was eine sehr gute Kontrolle über die Parameter verspricht und im Gegensatz zu Rotationen auch für Atome in optischen Gittern möglich ist [3, 4].

Zur experimentellen Umsetzung dieser Idee haben Yu-Ju Lin und Kollegen vom National Institute of Standards and Technology (NIST) in Gaithersburg (Maryland) bereits 2009 ein künstliches Magnetfeld erzeugt, das sich durch quantisierte Wirbel in einem superfluiden Bose-Einstein-Kondensat (BEC) nachweisen ließ [5]. Kürzlich haben die Forscher nun das künstliche elektrische Feld untersucht, das sich durch die zeitliche Änderung des Vektorpotentials ergibt [6]. Ausgangspunkt der Experimente war ein BEC von  $^{87}\text{Rb}$ -Atomen mit Spin 1. Ein Magnetfeld hob die Entartung der Spinzustände  $m=0, \pm 1$  auf, dann brachten zwei Laserstrahlen die drei Spinzustände in Wechselwirkung (Abb. 1a). Dabei nahm ein Atom beim Übergang in einen benachbarten Spinzustand einen Impuls von  $2\hbar k_L$  auf, wobei

Abb. 2 (a) Bei dem Experiment oszillieren kanonischer (Kreise) und mechanischer Impuls (Quadrate) um verschiedene Mittelwerte und mit unterschiedlichen Amplituden. (b) Die beiden Impulse lassen sich mit Flugzeit-aufnahmen bestimmen.



$k_L$  die Wellenzahl des Lasers ist. Dadurch koppeln Spin- und Bewegungszustände zu drei neuen Eigenzuständen (**Abb. 1b**). Die Atome blieben dabei stets im untersten gekoppelten Zustand, dessen Energie-Impuls-Relation die Form  $\hbar^2(\vec{k} - \vec{k}_{\min})^2/2M^*$  hat mit der effektiven Masse  $M^* > M$ . Somit lässt sich  $\hbar\vec{k}$  als kanonischer Impuls ansehen und  $\vec{k}_{\min} = q^*\vec{A}^*/\hbar$  spielt die Rolle eines räumlich konstanten Vektorpotentials, das sich durch Verstimmung der Laserfrequenz variieren lässt.<sup>+)</sup>

Diese Freiheit nutzten Lin und Kollegen aus, um einen Kraftstoß auf die Atome auszuüben. Während eine optische Falle die Atome festhielt, änderten sie die Verstimmung und damit das Vektorpotential innerhalb von weniger als einer Millisekunde. Dadurch wirkte für die Dauer der Änderung ein künstliches elektrisches Feld  $\vec{E}^* = -\partial_t \vec{A}^*$ , das die Atome mechanisch beschleunigte bei konstantem kanonischen Impuls  $\hbar\vec{k}$ . Anschließend führten die Atome Schwingungen

in der Falle aus, wobei sich klar der Unterschied zwischen den beiden Impulsen zeigte: Während der mechanische Impuls um Null oszilliert, oszilliert der kanonische Impuls um das endliche Vektorpotential (**Abb. 2a**). Als Nachweismethode benutzte die NIST-Gruppe die bei kalten Atomen übliche Flugzeitmessung. Dazu wurden am Ende einer Sequenz sämtliche Potentiale abrupt abgeschaltet, wodurch die gekoppelten Zustände der Atome auf die ungekoppelten projiziert werden [2]. Da diese sich im Impuls um je  $2\hbar k_L$  unterscheiden, trennen sie sich nach kurzer Zeit. Ein Magnetfeld ermöglicht gleichzeitig, die Spinkomponenten nach dem Stern-Gerlach-Prinzip zu identifizieren. Der kanonische Impuls ist dann gerade der Impuls der  $m = 0$ -Komponente, der mechanische Impuls der mit der jeweiligen Atomzahl gewichtete Durchschnitt der drei Impulse (**Abb. 2b**).

Nachdem nunmehr die grundlegenden Eigenschaften künstlicher Vektorpotentiale charakterisiert

sind, stehen weitere Fragen an, z. B. ob diese Methode im Bereich nahe der Instabilität (die auch hier auftritt) tatsächlich eine bessere Kontrolle erlaubt als die Rotation des Gases. Sollte sich diese Hoffnung bewahrheiten, verspricht dies neue Einblicke in die Physik des untersten Landau-Niveaus beim Quanten-Hall-Effekt: Bei kleinen Atomzahlen könnte hier – wenn auch mit beträchtlichem experimentellen Aufwand – die Vielteilchenwellenfunktion direkt gemessen werden [7]. Offenbar lässt sich mit neutralen Atomen noch vieles über geladene Teilchen lernen.

**Steffen Patrick Rath**

- [1] Y. Aharonov und D. Bohm, Phys. Rev. **115**, 485 (1959)
- [2] I. Bloch, J. Dalibard und W. Zwerger, Rev. Mod. Phys. **80**, 885 (2008)
- [3] D. Jaksch und P. Zoller, New J. Phys. **5**, 56 (2003)
- [4] G. Juzeliūnas et al., Phys. Rev. A **73**, 025602 (2006)
- [5] Y.-J. Lin et al., Nature **462**, 628 (2009)
- [6] Y.-J. Lin et al., Nature Physics, DOI: 10.1038/NPHYS1954 (2011)
- [7] N. R. Cooper, Adv. Phys. **57**, 539 (2008)

<sup>+)  $q^*$  wird dabei nur in Analogie zur Elektrodynamik eingeführt und lässt sich gleich eins setzen.</sup>

**Dr. Steffen Patrick Rath**, TU München, Physik Department T34, James-Frank-Straße, 85747 Garching