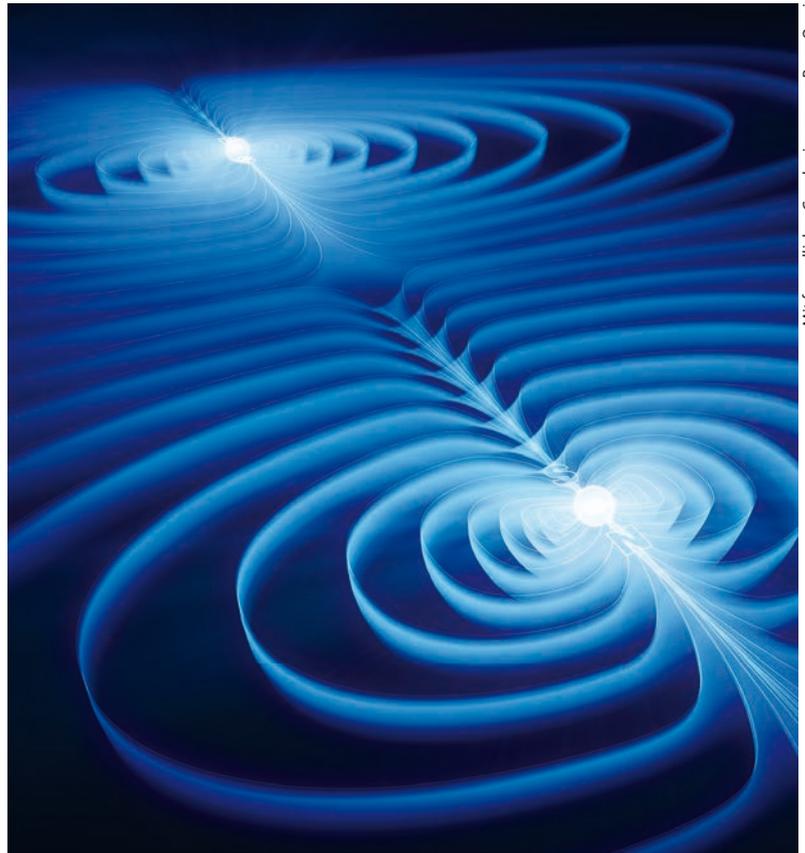


Langsamer Elektronenwalzer

Erstmals gelang es, die magnetische Wechselwirkung zweier Elektronen, die wenige Mikrometer voneinander entfernt sind, zu messen.

Kalte Ionen in linearen Paul-Fallen sind ein Paradebeispiel für ein hervorragend kontrollierbares Quantensystem. Hier gab es in den letzten Jahren viele spannende Entwicklungen in Richtung Quantensimulation, Quantencomputer, Quantenkryptographie und -metrologie, wo es um Messungen höchster Präzision und Empfindlichkeit geht (z. B. [1], [2]). Mit immer feineren Methoden lassen sich die Wechselwirkungen eines Ionen-Ensembles mit seiner Umgebung und vor allem auch mit sich selbst untersuchen. Neben der elektrostatischen und der Van-der-Waals-Kraft zwischen den Ionen existiert eine magnetische Wechselwirkung, falls die Ionen einen nichtverschwindenden Drehimpuls besitzen. Mit diesem Drehimpuls ist nämlich ein magnetisches Dipolmoment $\vec{\mu}$ verknüpft, welches das Ion in einen winzigen Stabmagneten verwandelt. Die magnetische Wechselwirkungsstärke zwischen zwei Stabmagneten, die mit der Entfernung wie $1/r^3$ abnimmt, ist bei typischen Teilchenabständen von einigen Mikrometern in der Paul-Falle jedoch so gering, dass sie sich bisher nicht nachweisen ließ. Dies ist nun erstmals der Gruppe um Roee Ozeri am Weizmann-Institut in Israel gelungen [3].

Die Wissenschaftler speicherten zwei lasergekühlte Strontium-Ionen ($^{88}\text{Sr}^+$) in einer Paul-Falle in einem Abstand r von $2,4 \mu\text{m}$. Weil Kernspin und Bahndrehimpuls von $^{88}\text{Sr}^+$ verschwinden, trägt allein der Spin $1/2$ des Valenzelektrons den Drehimpuls des Ions. Die magnetische Wechselwirkung ist so zu verstehen, dass einer der atomaren Magnete ein Magnetfeld \vec{B} erzeugt, in dem sich der zweite Magnet mit Dipolmoment $\vec{\mu}$ befindet. Die Wechselwirkungsenergie W beträgt $-\vec{\mu} \cdot \vec{B}$. Bei einem Abstand von $2,4 \mu\text{m}$ ergibt sich ein mittleres Feld B von etwa $10^{-7} \mu\text{T}$. Dies ist $5 \cdot 10^8$ -mal kleiner als das Erdmagnetfeld in Europa und rund eine Million



Mit freundlicher Genehmigung von Roee Ozeri

Magnetfelder zweier magnetischer Dipole. Aufgrund der Rotationsymmetrie

verschmelzen gleichwertige Magnetfeldlinien in der Abbildung zu Oberflächen.

Mal kleiner als typische Magnetfeldfluktuationen im Labor! Die magnetische Wechselwirkungsenergie zwischen den beiden Ionen (bzw. den Elektronenspins) ist so gering, dass sie ihre atomaren Niveaus nur um etwa 2 mHz verschiebt, was – um einen Vergleich zu haben – eine halbe Milliarde Mal geringer ist als die bekanntermaßen schwache Lamb-Verschiebung der $2S_{1/2}$ - und $2P_{1/2}$ -Niveaus des Wasserstoffs.

Prinzipiell ließe sich diese winzige Verschiebung vielleicht mit Hochpräzisionsspektroskopie messen. Kotler et al. entschieden sich jedoch für einen anderen, raffinierten Weg [3]. Sie präparierten die beiden Ionen in einem Quantenzustand $\Psi(t=0)$, bei dem der Elektronenspin des ersten Ions die Magnetquantenzahl $+1/2 \equiv \uparrow$ trägt, der des zweiten Ions $-1/2 \equiv \downarrow$, also $\Psi(t=0) = |\uparrow, \downarrow\rangle$. Unter der magnetischen Wechselwirkung be-

schreibt die Wellenfunktion $\Psi(t) = \cos(\omega t) |\uparrow, \downarrow\rangle + i \sin(\omega t) |\downarrow, \uparrow\rangle$ die kohärente Evolution des Zustands, in diesem Fall besteht sie aus einer gemeinsamen Drehung der beiden Elektronenspins mit der Frequenz ω . Bei dem genannten Abstand von $2,4 \mu\text{m}$ brauchen die Spins die stattliche Zeit von 250 s für eine komplette Drehung (abgesehen von einer globalen Phase von π) – ein wahrlich langsamer Walzer! Bemerkenswert ist weiterhin, dass die Drehungen der beiden Teilchen in höchstem Maße miteinander korreliert sind. Dies lässt sich direkt aus der Wellenfunktion $\Psi(t)$ ablesen: Ergibt sich in einer Messung in der Basis \uparrow, \downarrow , dass ein Elektron seinen Spin umgeklappt hat, dann tat dies auch das andere Elektron. Aufgrund dieses korrelierten Umklappens baut $\Psi(t)$ mit der Zeit eine quantenmechanische Verschränkung auf, die bei

$t = \pi/4\omega$ maximal wird und für längere Zeiten periodisch schwankt. Moderne quantentomographische Methoden – teilweise Entwicklungen der letzten Jahre – erlaubten es, den kohärenten Tanz der Elektronen 15 Sekunden lang nachzuweisen. Heizeffekte, welche die zustandsaufgelöste Detektion der Ionen beeinträchtigen, verhinderten bisher längere Beobachtungszeiten.

Dass Kotler et al. überhaupt so weit kamen, liegt im Wesentlichen an zwei Tricks: Der erste basiert darauf, in einem sog. dekohärenzfreien Hilbert-Subraum zu arbeiten. Im Experiment tritt beim Zustand $\Psi(t)$ immer nur die gemischte Kombination eines Spins \uparrow mit einem Spin \downarrow auf, aber niemals $\uparrow\uparrow$ oder $\downarrow\downarrow$. Dies unterdrückt den störenden Einfluss zeitlich variierender, homogener Streumagnetfelder (z. B. das Erdmagnetfeld) auf die Zeitentwicklung der Spins. Die Zeeman-Effekte beider Spins in der Kombination $\uparrow\downarrow$ bzw. $\downarrow\uparrow$ kompensieren sich nämlich, sodass die Energie des Gesamtsystems unverändert bleibt. Der zweite Trick basiert auf der zusätzlichen Unterdrückung von Magnetfeld-Inhomogenitäten. Selbst bei geringer Größe sind diese problematisch, da sie zu einer Dephasierung des Zustands $\Psi(t)$ führen. Neben einer Kompensation des Magnetfeldgradienten auf $3,6 \cdot 10^{-1} \mu\text{T/m}$ kam eine Spin-Echo-Methode zum Einsatz, bei der kurze Radiofrequenzpulse im 2-Hz-Takt den Spin jedes Elektrons präzise flippten. Dies kompensierte effizient den Einfluss des residualen Magnetfeldgradienten, ohne die Zeitentwicklung aufgrund der magnetischen Spin-Spin-Wechselwirkung zu stören. Auf diese Weise waren Kohärenzzeiten von fast einer Minute möglich. Das Experiment wurde bei verschiedenen Abständen r zwischen den Ionen durchgeführt, wobei sich die $1/r^3$ -Skalierung bestätigte.

Die Empfindlichkeit der Messmethode bis hinunter in den mHz-Bereich ist beeindruckend. Zum Vergleich: Kürzlich erreichten Wissenschaftler in einem hochauflösenden Experiment, in dem zwei 25 nm entfernte Spins in einer Fest-

körpermatrix bei Raumtemperatur wechselwirkten, eine Auflösung von 50 Hz [4]. Diese geringere Auflösung rührt vermutlich vor allem daher, dass die Festkörperspins bei Raumtemperatur eine kürzere Kohärenzzeit (≈ 1 ms) zeigen und dass (noch) nicht mit einem dekohärenzfreien Zustand gearbeitet wurde. Bei tiefen Temperaturen sollte die Auflösung deutlich höher sein. Auch bei den kalten Ionen ist das Ende der Fahnenstange wohl noch nicht erreicht. So ist zu erwarten, dass Quanten-Fehler-Korrektur-Verfahren [5] das Feld weiter vorantreiben dürften.

Offensichtlich hat das Experiment von Kotler et al. nützliche Anwendungen in der Sensorik, um schwache Kopplungsstärken zu messen. Die vorgestellte Technik lässt sich direkt auf alle Systeme übertragen, die durch das verallgemeinerte, quantenmechanische Heisenberg-Modell beschrieben werden. Neben gefangenen Ionen und ultrakalten Atomen kommen auch Festkörpersysteme infrage. Spinwechselwirkungen über Entfernungen von mehr als einem Mikrometer messen zu können, ist ein weiterer interessanter Aspekt, besonders für Festkörpersysteme, da dann konventionelle Lichtmikroskop-Optiken die Spins manipulieren und detektieren können. Diese könnten aufwändigere Abbildungsmethoden jenseits der Beugungsgrenze ablösen [6].

Johannes Hecker Denschlag

- [1] D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe und D. Wineland, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 281 (2003)
- [2] C. F. Roos, M. Chwalla, K. Kim, M. Riebe und R. Blatt, *Nature* **443**, 316 (2006)
- [3] S. Kotler, N. Akerman, N. Navon, Y. Glickman und R. Ozeri, *Nature* **510**, 376 (2014)
- [4] F. Dolde et al., *Nat. Phys.* **9**, 139 (2013)
- [5] G. Arrad, Y. Vinkler, D. Aharonov und A. Retzker, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 150802 (2014)
- [6] S. W. Hell und J. Wichmann, *Optics Letters* **19**, 780 (1994)