

Neuartige Quantenkontrolle über ein Drei-Zustands-Spin-System

08/08/2018 Universität Basel

Wissenschaftler konnten erstmals die Quanteninterferenzen in einem quantenmechanischen Drei-Zustands-System untersuchen und damit das Verhalten einzelner Elektronenspins steuern. Sie verwendeten dafür eine neuartige Nanostruktur, bei der ein Quantensystem in einen nanoskaligen, mechanischen Schwingbalken integriert ist. «Nature Physics» hat die Studie von Wissenschaftlern der Universität Basel und des Swiss Nanoscience Institute veröffentlicht.

Der Elektronenspin ist eine fundamentale quantenmechanische Eigenschaft, die jedem Elektron innewohnt. In der Quantenmechanik beschreibt der Elektronenspin die Drehrichtung des Elektrons um die eigene Achse und kann deswegen zwei Zustände annehmen, die gemeinhin als «up» und «down» bezeichnet werden. Die Quanteneigenschaften dieser Spins bieten interessante Perspektiven für zukünftige Technologien, zum Beispiel in Form von hochpräzisen Quantensensoren.

Kontrolle von drei Quantenzuständen

Die Wissenschaftler um Professor Patrick Maletinsky und den Doktoranden Arne Barfuss vom Swiss Nanoscience Institute an der Universität Basel berichten in «Nature Physics» von einer neuen Methode, mit der sich erstmals die Quantenzustände von Elektronenspins durch ein mechanisches System auf eine neuartige Weise kontrollieren lassen.

Für ihre experimentelle Studie kombinierten sie ein solches Quantensystem mit einem mechanischen Oszillator. Konkret betteten die Forscher Elektronenspins in sogenannte Stickstoffvakanzzentren in winzige mechanische Resonatoren aus einkristallinen Diamanten ein, die sich in Schwingung versetzen lassen.

Quantenverhalten steuern

Die Spins der Elektronen in den Stickstoffvakanzzentren zeichnen sich dabei durch eine besondere Eigenschaft aus: Ihr Gesamtspin besitzt nicht nur zwei, sondern drei Basiszustände, die man mit «up», «down» und «zero» bezeichnen kann. Durch die Kopplung des mechanischen Oszillators an den Spin erreichten sie erstmals eine vollständige Quantenkontrolle über ein solches dreistufiges System, wie sie bisher nicht möglich war.

Der Oszillator ermöglichte es den Forschern insbesondere, erstmals alle drei möglichen Übergänge zwischen den Spinzuständen gezielt anzusteuern und zu untersuchen, wie sich die Zustandsänderungen gegenseitig beeinflussen.

Dieses als «Closed Contour Driving» bezeichnete Szenario wurde bisher noch nie untersucht, eröffnet aber interessante fundamentale und praktische Perspektiven. Das Experiment erlaubte zum Beispiel ein Brechen der Zeitumkehrsymmetrie, was bedeutet, dass die Eigenschaften des Systems in zeitlich umgekehrter Richtung prinzipiell anders ausschauen als ohne Zeitumkehr. Dabei bestimmte die Phase des mechanischen Oszillators, ob der Spin im «Uhrzeigersinn» (Drehrichtung up, down, zero, up) oder gegen den Uhrzeigersinn kreiste.

Verlängerung der Kohärenz

Dieses abstrakte Konzept hat praktische Konsequenzen für die fragilen Quantenzustände. Ähnlich wie Schrödingers Katze können sich Spins nämlich für einen bestimmten Zeitraum - der sogenannten Kohärenzzeit - gleichzeitig in einer Überlagerung von zwei oder drei der genannten Basiszustände befinden.

Werden die drei Spinzustände in der hier entdeckten Weise in einem geschlossenen Kreis zueinander gekoppelt, verlängert sich die Kohärenzzeit deutlich, wie die Forscher zeigen konnten. Im Vergleich zu Systemen, bei denen nur zwei der drei möglichen Übergänge vorhanden sind, nahm sie fast um das Hundertfache zu.

Der Erhalt der Kohärenz bildet ein Schlüsselement für zukünftige Quantentechnologien und ein weiteres Hauptergebnis dieser Arbeit.

Praktischer Nutzen für Sensorik

Die hier beschriebene Arbeit birgt hohes Potenzial für zukünftige Anwendungen. Denkbar ist, dass das hybride Resonator-Spin-System zur präzisen Erfassung zeitabhängiger Signale mit Frequenzen im Gigahertz-Bereich verwendet werden kann - zum Beispiel für Präzisionsmessungen und die Quanteninformationsverarbeitung. Diese Aufgaben sind für nanomechanische Oszillatoren bisher nicht einfach zu lösen. Hier könnte die Kopplung von Spin und einem schwingenden System gerade auch wegen dem demonstrierten Erhalt der Spinkohärenz Abhilfe schaffen.

Full bibliographic information

Arne Barfuss, Johannes Kölbl, Lucas Thiel, Jean Teissier, Mark Kasperczyk, and Patrick Maletinsky

Phase-controlled coherent dynamics of a single spin under closed-contour interaction

Nature Physics (2018), doi: 10.1038/s41567-018-0231-8

Attached files



Der schwingende Federbalken beeinflusst den Spin der Elektronen in den Stickstoffvakanzzentren (rote Pfeile). Dabei bestimmt die Phase des Oszillators, in welcher Drehrichtung (mit oder entgegen dem Uhrzeigersinn) der Spin rotiert. (Bild: Universität Basel / Swiss Nanoscience Institute)