

Pressemitteilung

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Thorsten Karbach

04.05.2023

<http://idw-online.de/de/news813679>

Forschungsergebnisse, Wissenschaftliche Publikationen
Physik / Astronomie
überregional



Graphen-Quantenpunkte mit nahezu perfekter Symmetrie

Forschende der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich haben wichtige Eigenschaften von Doppelquantenpunkten in zweilagigem Graphen aufgedeckt. Das Team hat eine nahezu perfekte Elektron-Loch-Symmetrie in den Graphen-Quantenpunkten nachgewiesen, die zu einer effizienteren Verarbeitung von Quanteninformationen führen könnte. Die Studie wurde in Nature veröffentlicht.

Quantenpunkte sind in Halbleitern wie Galliumarsenid, Silizium oder Siliziumgermanium ausgiebig untersucht worden, da sie eine geeignete Festkörperplattform für Quanteninformationsanwendungen darstellen. Die Arbeitsgruppe „2D-Materialien und Quantenbauelemente“ der RWTH Aachen hat nun gezeigt, dass Quantenpunkte in zweilagigem Graphen mehr zu bieten haben als in anderen Materialien: Sie ermöglichen die Realisierung von Systemen mit nahezu perfekter Elektron-Loch-Symmetrie, in denen der Transport über die Erzeugung und Vernichtung einzelner Elektron-Loch-Paare mit entgegengesetzten Quantenzahlen erfolgt. Daraus ergeben sich starke Auswahlregeln, die für hochpräzise Ausleseverfahren von Spin- und Valley-Qubits genutzt werden können. Die Arbeit wurde in der renommierten Fachzeitschrift Nature veröffentlicht.

Antiteilchen - auch bekannt als Löcher

1931 veröffentlichte der britische Physiker Paul Dirac eine Arbeit, in der er die Existenz eines „Antielektrons“ vorhersagte. Dieses Antiteilchen hätte die gleiche Masse wie ein Elektron, aber die entgegengesetzte Ladung und den entgegengesetzten Spin. Ein Teilchen-Antiteilchen-Paar würde sich bei Wechselwirkung vernichten. Die Existenz des Antielektrons, später Positron benannt, wurde ein Jahr später experimentell belegt. Dies war der erste Nachweis eines Antiteilchens. Das Konzept der Antiteilchen spielt eine zentrale Rolle in der Festkörperphysik, wo Antiteilchen üblicherweise als Löcher bezeichnet werden. Beispielsweise ist das Vorhandensein (oder Fehlen) von Symmetrie zwischen Elektron- und Lochzuständen wichtig für die Charakterisierung topologischer Phasen in Festkörpern. Es wird jedoch selten erwartet, dass eine Elektron-Loch-Symmetrie in Halbleitern vorhanden ist. Eine bemerkenswerte Ausnahme ist zweilagiges Graphen bei niedrigen Anregungsenergien.

Quantenpunkte für Elektronen und Löcher

„Zweilagiges Graphen ist ein einzigartiger Halbleiter“, erklärt Christoph Stampfer, Professor für Experimentalphysik an der RWTH Aachen und korrespondierender Autor der Studie. „Es teilt mehrere Eigenschaften mit einlagigem Graphen, wie zum Beispiel eine geringe Spin-Bahn-Kopplung und ein Niedrigenergiespektrum, das eine perfekte Elektron-Loch Symmetrie aufweist. Dies macht es für Quantentechnologien sehr interessant. Darüber hinaus hat es eine Bandlücke, die durch ein externes elektrisches Feld von Null auf etwa 120 Milli-Elektronenvolt eingestellt werden kann.“

Die Bandlücke ermöglicht den Einschluss von Elektronen in Quantenpunkten in zweilagigen Graphen mit Hilfe elektrostatischer Gatter, die denen von Silizium sehr ähnlich sind. Aufgrund der geringen Größe der Bandlücke können diese Quantenpunkte jedoch ambipolar sein, d.h. sie können je nach angelegter Spannung sowohl Elektronen als auch Löcher einfangen. Stampfer und seine Kollegen nutzten diese Eigenschaft um Elektron-Loch-Doppelquantenpunkte zu

erzeugen, bei denen jeder der Quantenpunkte maximal ein Elektron oder ein Loch beherbergt, wodurch der elektrische Transport in den Quantenpunkten kontrolliert wird. In einem solchen System kann elektrischer Transport nur stattfinden, wenn ständig Elektron-Loch-Paare mit entgegengesetzten Quantenzahlen erzeugt oder vernichtet werden können.

Symmetrie nahezu perfekt erhalten

Dies hat zwei bemerkenswerte Konsequenzen. Erstens konnten die Autoren durch eine sorgfältige Analyse des elektrischen Stroms durch die Doppelquantenpunkte erstmals experimentell die Symmetrie zwischen Elektronen- und Lochzuständen in zweilagigem Graphen nachweisen. Sie zeigten, dass die Symmetrie nahezu perfekt erhalten bleibt, selbst wenn Elektronen und Löcher in verschiedenen Quantenpunkten räumlich getrennt sind. Zweitens führt diese Symmetrie zu einem starken und robusten Blockademechanismus für den Transport durch den Doppelquantenpunkt, der ein zuverlässiges Ausleseschema für Spin- und Valley-Qubits bieten kann.

„Das übersteigt das, was in herkömmlichen Halbleitern oder anderen zweidimensionalen Elektronensystemen möglich ist“, sagt Professor Fabian Hassler vom JARA-Institut für Quanteninformation an der RWTH Aachen und Mitautor der Studie. „Die nahezu perfekte Symmetrie, die wir in unserer Arbeit beobachten, und die starken Selektionsregeln, die sich aus dieser Symmetrie ergeben, sind nicht nur für den Betrieb von Qubits, sondern auch für die Realisierung von Einzelteilchen-Terahertz-Detektoren sehr attraktiv. Darüber hinaus bietet es sich an, Quantenpunkte aus zweilagigem Graphen mit Supraleitern zu koppeln - zwei Systeme, in denen die Elektron-Loch-Symmetrie eine wichtige Rolle spielt. Diese hybriden Systeme könnten genutzt werden, um effiziente Quellen für verschränkte Teilchenpaare oder künstliche topologische Systeme zu schaffen und damit der Realisierung topologischer Quantencomputer einen Schritt näher zu kommen.“

Die Forschungsergebnisse wurden in der Fachzeitschrift Nature veröffentlicht. Die Daten, die die Ergebnisse belegen, und die für die Analyse verwendeten Codes sind in einem Zenodo-Repository verfügbar. Gefördert wurde die Forschungsarbeit unter anderem durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union (Graphene Flagship) und durch den Europäischen Forschungsrat (ERC) sowie durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Exzellenzclusters Matter of Light for Quantum Computing (ML4Q).

wissenschaftliche Ansprechpartner:

Professor Christoph Stampfer
Lehrstuhl für Experimentalphysik (Festkörperphysik) und II. Physikalisches Institut der RWTH Aachen
Otto-Blumenthal-Str. 18
52074 Aachen
E-Mail: stampfer@physik.rwth-aachen.de

Originalpublikation:

„Particle-hole symmetry protects spin-valley blockade in graphene quantum dots“
L. Banszerus, S. Möller, K. Hecker, E. Icking, K. Watanabe, T. Taniguchi, F. Hassler, C. Volk, and C. Stampfer, Nature (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05953-5>