

冷却原子の量子状態を制御し新たな「流れ」を実現

—「原子回路」で電子の流れをシミュレーションする—

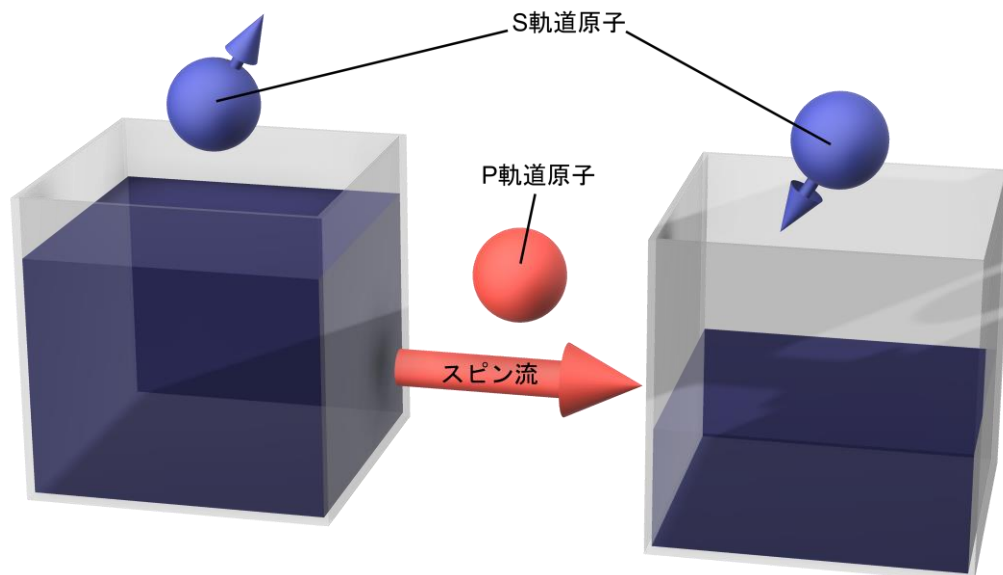
概要

固体物質中の電子輸送のしくみを量子力学によって理解し制御することは、電子デバイスを開発する上で重要であると同時に、また、一般に固体物質の特性は電子の伝導度に反映されるので、基礎研究においても非常に重要です。

一方、近年のレーザー技術の発展により実現可能となった、数十ナノケルビンまで冷却された原子集団は、量子状態を高精度に制御できる系として注目されています。この冷却原子を用いて、量子輸送を研究する可能性が近年大変注目され、アトム（原子）とエレクトロニクス（電子工学）を合わせてアトムトロニクスと呼ばれ、盛んに研究されています。

京都大学院理学研究科 小野滉貴 同博士課程学生（研究当時、現：同特定研究員）、高橋義朗 同教授、東京工業大学 西田祐介 准教授らのグループは、冷却原子を用いた新奇な量子輸送系を確立しました。本研究はアトムトロニクスの新たなプラットフォームを確立し、今後の研究で輸送現象に関するさらなる理解が期待されます。

本成果は、2021年11月18日に英国の国際学術誌「Nature Communications」にオンライン掲載されました。



実験の概念図。電子軌道 S の原子と P の原子を用意する。P 軌道原子によって S 軌道原子のスピンと呼ばれる原子の内部状態が変化するのが仮想空間上の「流れ」とみなすのが本研究のアイデアである。

1. 背景

私たちの身の回りには電子機器があふれており、電子の流れについて深く理解し高精度に制御することは新たな技術革新につながります。特に微細加工技術の発展により、量子ポイントコンタクト^{注1}と呼ばれるナノスケールの隙間を有する伝導体が作製可能となり、電子の量子性が顕著に現れる様々な現象が観測されています。

近年、量子ポイントコンタクト系での輸送現象を極低温に冷却した原子集団を用いて、電子の動きを「シミュレーション」する研究が盛んに行われています。冷却原子は真空槽に捕獲され、外界との相互作用がないので、量子状態を長時間維持し高精度に制御することが可能です。この高い制御性を活用し、冷却原子系で量子輸送現象を研究する分野はアトムトロニクスと呼ばれます。

2. 研究手法・成果

本研究では、従来の手法とは全く異なる「人工次元」というアイデアを用いて、新しいアトムトロニクスのプラットフォームを確立しました。人工次元とは、図1左のように、スピンと呼ばれる原子の内部自由度（アップスピン・ダウンスピン）を電子系（図1右）の空間自由度（左側・右側）に対応付ける考え方のことです。したがってこのシステムでは、スピン状態の時間変化は左側から右側への輸送とみなすことができます。これが本研究のアイデアの核です。

このような、電流ならぬ「スピン流」は局在する別の電子軌道をもつ原子によって誘起されます。以下ではスピンをもつ原子をS軌道原子、スピン流を誘起する原子をP軌道原子と呼ぶことにします。S軌道原子のスピン状態を量子力学的な重ね合わせ状態で用意した場合、局在P軌道原子と衝突すると、別のスピン状態に変化します。つまり、P軌道原子はスピン流を生成するので「量子ポイントコンタクトの原子バージョン」と呼ぶことができます。本研究ではS軌道原子、P軌道原子を2種類の光格子^{注2}を用いて閉じ込めます（図2）。こうすることでS軌道原子は1次元空間を自由に動き回り、P軌道原子は3次元的に局在するようなシステムが実現できます。

上記の実験条件のもとで、P軌道原子によるS軌道原子のスピン状態の時間変化を観測することに成功しました（図3）。この測定結果からスピン流はオームの法則に従っていることが分かり、この人工次元系での輸送現象の基本的な特性を明らかにしました。また、P軌道原子数、磁場の大きさ、スピン状態を変えることでスピン流が制御できることを実証しました。さらに、本実験で使用しているイッテルビウム原子の高いスピン自由度を活用することで、上記の2スピン状態間量子輸送系から拡張して3スピン状態間量子輸送系の実現に成功しました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、人工次元を活用した新しい量子輸送系を実現し、アトムトロニクスという分野に新たなプラットフォームを提供したという点で意義があります。今後は、人工次元を駆使することで、従来の方法では実現の困難なエキゾチックな量子輸送現象が観測できると期待しています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科学研究費助成事業（JP17H06138、JP18H05405、JP18H05228、JP19J11413、JP21K03436）、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR1673）、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP、No. JPMXS0118069021）、内閣府 革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）、および松尾学術振興財団の助成を受けました。

<用語解説>

注1 量子ポイントコンタクト：半導体中2次元電子系に微細加工を施して作られるナノスケールの隙間。この隙間は電子の波長と同程度なので量子性が顕著に現れる輸送現象が観測される。

注2 光格子：対向するレーザー光の干渉によって形成される定在波のことで、電場の振幅が強め合う場所に原子は捕獲される。本研究では波長 759 nm の光格子と波長 651 nm の光格子を組み合わせ、図2のような光格子トラップを構成している。

<研究者のコメント>

本研究の一部はコロナ禍で活動が制限されている中で行われたものでしたが、こうしてまとめた成果を上げることができて非常に嬉しく思います。昨今、量子コンピュータに関するニュースが世間を賑やかにしていますが、本記事を読んで量子制御を活用した基礎研究にも興味を持っていただけると幸いです。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Observation of spin-space quantum transport induced by an atomic quantum point contact（原子量子ポイントコンタクトが誘起するスピン空間量子輸送の観測）

著者：Koki Ono, Toshiya Higomoto, Yugo Saito, Shun Uchino, Yusuke Nishida, and Yoshiro Takahashi

掲載誌：Nature Communications DOI：10.1038/s41467-021-27011-2

<参考図表>

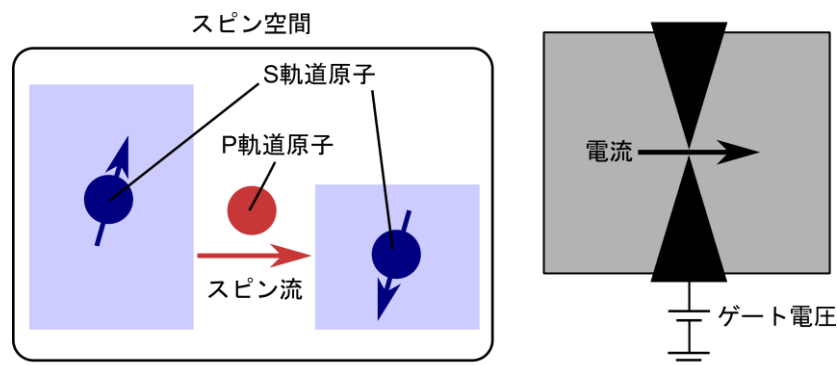


図1（左）：冷却原子を用いた人工次元系。P軌道原子との相互作用によりスピン流が生成される。（右）：電子系。量子ポイントコンタクト（黒三角）に電圧を印可することで電流を制御する。

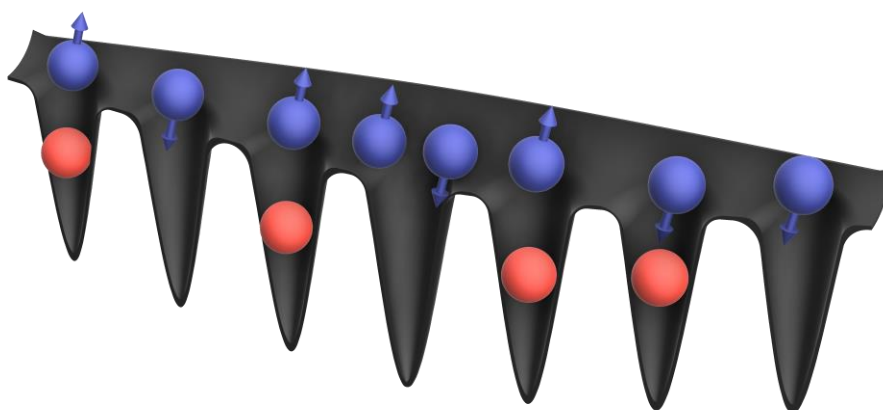


図 2 : 光格子トラップの模式図。青丸が S 軌道原子、赤丸が P 軌道原子を表す。

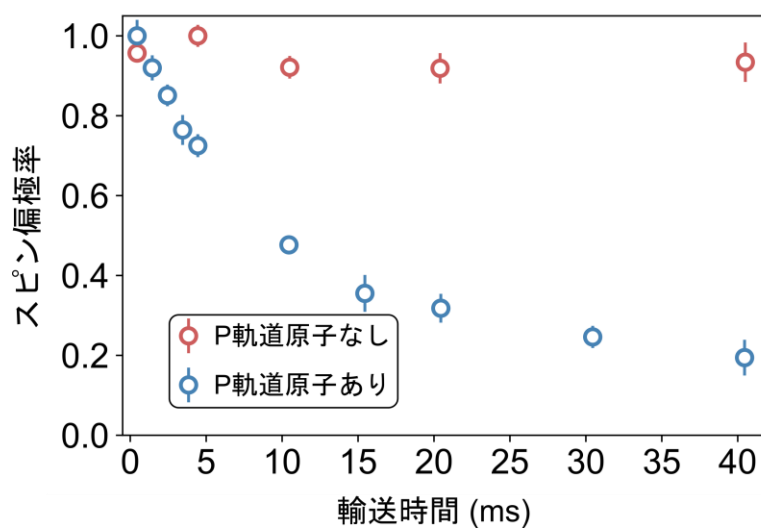


図 3 : S 軌道原子のスピン状態の時間変化。P 軌道原子がない場合ではスピン状態に変化がないのに対して、ある場合だと別のスピン状態に変化し偏極率が減少しているのが分かる。