

資料

磁気秩序を持たない1次元量子スピン液体相におけるスピン流の初観測 混沌の中でスピンを整流する新しいスピントロニクス機能 理論構築にも成功

東北大学金属材料研究所の廣部 大地 氏（大学院生）、塩見 雄毅 助教、内田 健一 准教授、井口 亮 助教、齊藤 英治 教授、茨城大学理学部の佐藤 正寛 准教授、日本原子力研究開発機構先端基礎研究センターの前川 禎通 センター長、東北大学応用物理学科の川股 隆行 助教、小池 洋二 教授の研究グループは、擬1次元量子反強磁性体 Sr_2CuO_3 におけるスピンゼーベック効果の実験を実装し、磁気秩序を持たない1次元量子スピン液体相におけるスピン流の観測にはじめて成功しました。このスピン流は量子スピン液体相に特有のスピノンとよばれる分数励起より伝搬する新しいスピン流と考えられます。さらに、このスピノンスピン流輸送を説明する微視的理論の構築にも成功しています。

今回の研究成果は、近年目覚ましい発展を遂げているスピントロニクス分野と、電子スピン間の相互作用が誘導する多様な磁気秩序相に焦点を当てる量子磁性分野とをつなぐ先駆的な研究だといえます。

本研究は JST-ERATO 齋藤スピン量子整流プロジェクトの中で得られた成果であり、雑誌「Nature Physics」のオンライン版に、2016年9月26日に掲載されました。

近年、電子の電荷の流れ（電流）に基づくエレクトロニクス（電子工学）技術に加えて、電子の持つスピン自由度を活用して新しい情報処理方法の構築を目指す「スピントロニクス」と呼ばれる学問分野が急速に発展しています。電流が電子のもつ負電荷の流れであるのに対し、電子の持つスピン角運動量の流れである「スピン流」は、スピントロニクス研究の中心的な概念のひとつです。

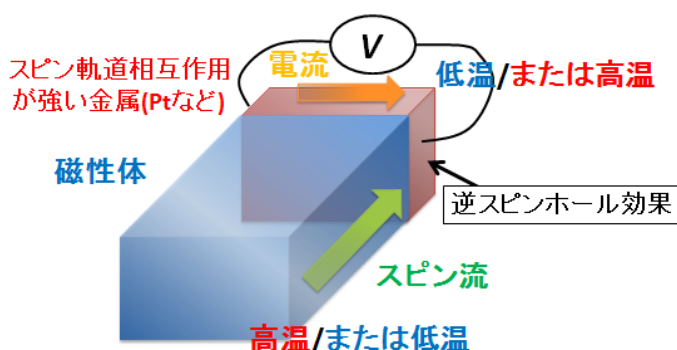
最近、電流を流さない磁性絶縁体においてスピン流が流れ得ることが、スピンゼーベック効果の実験により明らかにされました（図1）。スピン流を運ぶターゲットとして、例えば強磁性絶縁体を用意し、それをスピン軌道相互作用の強い金属と接合します。この接合系に温度勾配を印加すると、強磁性体中で上向きに揃っている電子スピんたちが音波のように波打ち、その波が高温側から低温側に伝搬します。磁氣的粒子という意味を込めてマグノンと呼ばれるこの波がスピンを運ぶことにより、スピン流が流れます。マグノンにより運ばれたスピン流は金属に浸透し、金属内で生じる逆スピンホール効果を介してスピン流が電流に変換され、電圧測定からスピン流を間接的に測定することが出来ます。

磁性絶縁体におけるスピントロニクス研究では、これまで強磁性絶縁体とその磁氣的準粒子であるマグノンを活用したスピントロニクス機能に焦点が当てられてきました。しかしながら、磁性研究の長い歴史の中で、強磁性体の他に多様な磁気秩序や準粒子の存在が明らかにされています。本研究では、強磁性体とは対照的に電子スピんがゆらゆら揺らいでいる量子スピン液体状態が実現する擬1次元 $S=1/2$ 量子反強磁性体 Sr_2CuO_3 に注目しま

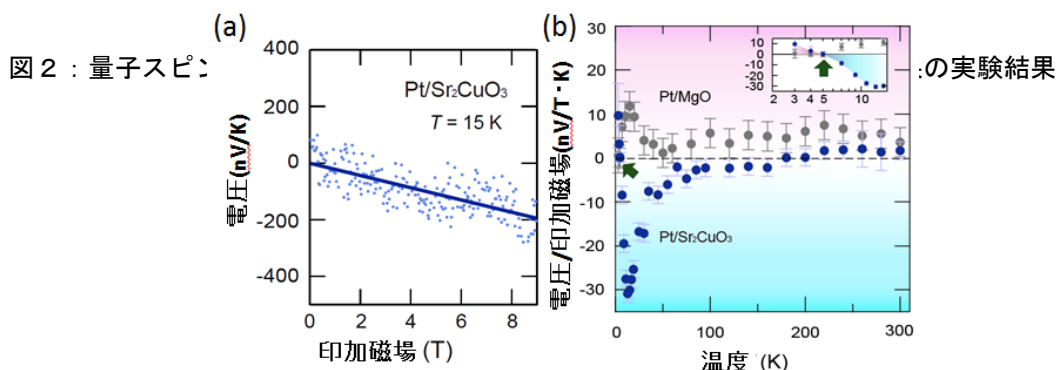
した。この系では、マグノンではなくスピノンと呼ばれる準粒子（マグノンを半分に分割したような粒子）のペアがスピン流を運ぶことが期待されます。スピンの整列した強磁性秩序は、原子スケールのナノデバイスでは熱・量子揺らぎの効果で崩壊しますが、量子スピン液体状態はナノサイズにおいても持続することが理論的に予想されます。この意味で、スピン液体におけるスピントロニクス機能の研究は、理学・工学の両面で重要といえます。

研究グループでは、 Sr_2CuO_3 を用いたスピンゼーベック効果の実験を実現し、スピノンスピン流が誘起する電圧信号を観測することに成功しました。このスピン液体状態のスピン流は、強磁性体のマグノンスピン流と対照的な性質を持ち（図2）、それらを統一的に説明する微視的理論の構築にも成功しています。本研究は、スピンに関わる輸送現象に焦点を当てるスピントロニクス分野と、電子スピン間の相互作用が誘導する（スピン液体を含む）多様な磁気秩序相に焦点を当てる量子磁性分野という二つの分野に架け橋を与える先駆的な研究といえます。

図1: スピンゼーベック効果の実験のイメージ図



磁性体と金属の接合系に温度勾配をかけることで、磁性体中の磁気的準粒子がスピン流を温度勾配に平行方向に運ぶ。磁性体と金属の界面を介してスピン流は金属に注入され、逆スピホール効果によりスピン流が電流に変換されることでスピン流の存在が間接的に確認される。



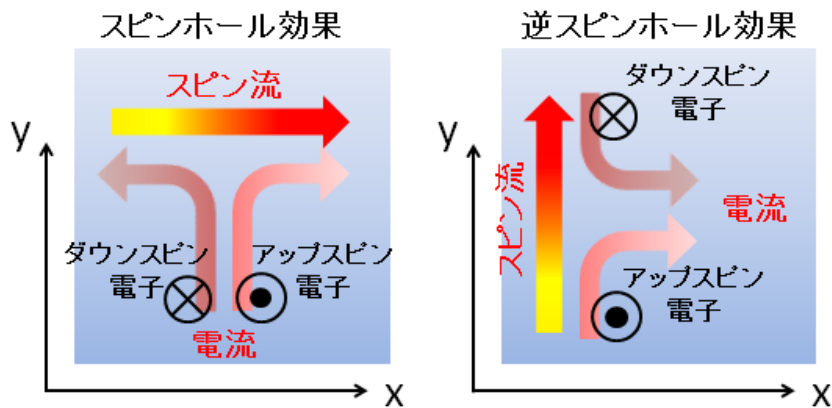
(a) Sr_2CuO_3 のスピントラップ電圧の印加磁場依存性。青点の実験データが実線にデータにフィットした直線。電圧が磁場に比例していることが分かる。(b) Sr_2CuO_3 のスピントラップ電圧の温度依存性。横軸の温度は温度勾配を除いた系の平均温度。青点の量子スピントラップ磁性体 Sr_2CuO_3 と金属 Pt の接合系での実験データ。灰色の点が比較実験として行った非磁性物質 MgO と Pt の接合系のデータ。MgO/Pt 系では、金属 Pt 内で生じるネルンスト効果により正の電圧が生じている。一方、ターゲットの $\text{Sr}_2\text{CuO}_3/\text{Pt}$ 系では、Pt のネルンスト効果に打ち勝って負符号の電圧が発生していることが分かる。(a)(b)の結果から、量子スピントラップのスピントラップ効果の電圧は(i)磁場に比例し(ii)負符号をとる、という特徴が読み取れる。強磁性体のスピントラップ電圧は印加磁場とともに大きさが減少し正符号を取る、ということが良く知られている。すなわち、本研究により、量子スピントラップ相のスピントラップ効果は強磁性体のそれとは対照的な性質を示すことが明らかにされた。研究グループは(i)(ii)の特徴を説明する微視的理論の構築にも成功している。

【解説1】

電子は、電荷の他にスピンという属性を保有している。スピンとは微小な磁石の自由度を意味しており、電子がスピンをもつということは、電子自身が N 極と S 極を持つ小さな磁石であることを意味する。しばしばスピンは S 極から N 極に向かう矢印で表現され、上(下)向き矢印を持つ電子をアップ(ダウン)スピンの電子と表現する。量子力学によれば、アップとダウンの状態を適当な割合で同時に保有する電子も実現可能である。

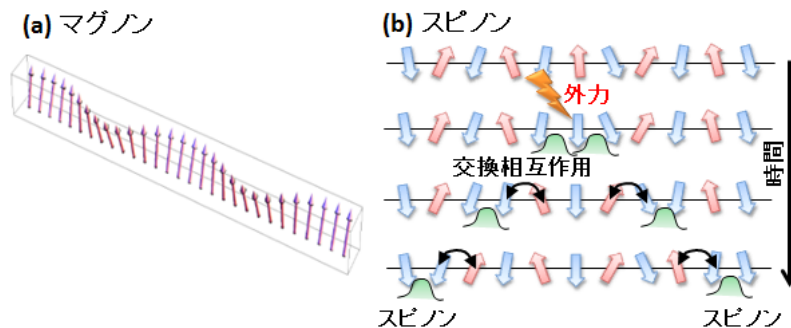
【解説2】

一般に重い原子核から成る固体結晶中の電子には、大きなスピン軌道相互作用が働く。スピン軌道相互作用とは、粒子の持つスピンと粒子自身の回転運動の間の相互作用である。例えば、この相互作用が働く系では、アップ(ダウン)スピンの電子は右(左)回りに回転させられる。従って、例えば、スピン軌道相互作用を持つ金属膜(x-y 面)にアップとダウンスピンの電子を同数含む電流を y 方向流すと、アップスピン電子は+x 方向に曲げられ、ダウンスピン電子は-x 方向に曲げられる。これは x 方向にスピン流が流れていることを意味する。この現象をスピンホール効果と呼ぶ。一方、スピン軌道相互作用を持つ金属に y 方向に平行にスピン流を注入すると、スピン流を担う反対方向に進行しているアップスピン(+y 方向に進行)とダウンスピン(-y 方向に進行)をもつ電子が同じ+x(又は-x)方向に曲げられる。アップスピンとダウンスピンをもつ電子が一つの方向に進行することは電流が流れていることに他ならない。このスピン流が電流に変換される現象を逆スピンホール効果と呼ぶ。



【解説3】

マグノンとスピノンのイメージ図。(a)スピンの一方向に揃った強磁性状態でスピンの波打つ励起がマグノンである。量子力学から、マグノンは1つ2つと数え上げることが出来て、マグノンが1つ存在する状態は完全な強磁性相において1つだけスピンをひっくり返した状態に相当する。(b)一方、スピノンは1次元量子反強磁性体の低エネルギー準粒子である。1次元量子反強磁性体では、一番上のパネルのように、隣接するスピンは反平行に揃おうとしているが、強い量子揺らぎの効果でスピンはゆらゆら揺らいでいる。何らかの外力により1つのスピンの反転すると、その隣接する左右のスピンの関係が反平行から平行に変わる為、2つのスピン間ボンドでエネルギー損失が生じる(図の緑色)。磁性体には交換相互作用と呼ばれる力が内在し、その相互作用の効果で隣接する反平行のスピンはしばしば交換する(黒矢印)。この交換を次々と繰り返すと、隣接スピンの平行に並んでエネルギーを損しているボンドが自由に動き回る。このエネルギー損失部分をスピノン粒子と解釈できる。図(b)から、元々スピンを1つひっくり返して生成したマグノンは2つのスピノンに分裂していくことが読み取れる。



◆ 発表論文の情報

<論文タイトル>

One-dimensional Spinon Spin Currents

<著者名>

Daichi Hirobe, Masahiro Sato, Takayuki Kawamata, Yuki Shiomi, Ken-ichi Uchida, Ryo Iguchi, Yoji Koike, Sadamichi Maekawa, and Eiji Saitoh

<雑誌名>

Nature Physics

<掲載日>

2016年9月26日オンライン掲載