

キタエフ量子スピン液体における マヨラナ・フェルミオンと非可換エニオン

松田 祐司 / 京都大学 大学院理学研究科 教授 (研究分担 A01)

笠原 裕一 / 京都大学 大学院理学研究科 准教授 (連携研究 A01)

キタエフ・スピン液体

トポロジーという現代物理学の最も重要で基本的な概念を含む量子ホール効果は、凝縮系物理学における最も劇的な現象の一つである。特に分数量子ホール効果状態では、分数電荷の粒子や分数統計のエニオンなどの様々なエキゾチックな創発準粒子が現実的に観測される。ここでは、トピックスとしてキタエフ・スピン液体とよばれる絶縁体スピン系を取り上げたい。我々は最近キタエフ・スピン液体の候補物質で、熱ホール効果が電子系の量子ホール効果で観測される値の半分の値に量子化されることを実験で示すことができた。このことは、マヨラナ・フェルミオンと非可換エニオンの存在の直接的な証拠となる。これらの準粒子は、電子スピンの分裂 (Fractionalization) によって生じたもので、分数量子ホール効果状態における電子電荷の分数化現象との類似点と相違点が興味深い。

量子スピン液体とは、量子ゆらぎのためにスピンの絶対零度まで秩序化しない系である。量子スピン液体では、並進対称性などの単純な対称性の破れは起こらず、トポジカル秩序や様々なエキゾチックな準粒子励起が提案されている。量子スピン液体は、以前は理論家の創造物であったが、

ここ 10 年来まだまだ数えるほどであるが現実の物質で発見され、急速にその研究が発展している分野である。ここで議論するキタエフ・スピン液体は、2次元ハニカム格子上で実現されるスピン $1/2$ の系であり、各スピンは x 軸、 y 軸、 z 軸に沿ってボンドに依存したイジング型の相互作用を持つ (図 1a)。このとき各スピンはそれぞれの軸に垂直方向に揃おうとするためにフラストレーションの効果が見れ、絶対零度まで秩序化しない。キタエフは各スピンを 4 つのマヨラナ・フェルミオン (b_x, b_y, b_z, c) で記述することにより、このスピン系の基底状態を厳密に解くことができることを示した (図 1b)。この系の素励起は、遍歴するマヨラナ・フェルミオン (c) と、局在したマヨラナ・フェルミオン (b_x, b_y, b_z) により構成される Z_2 渦 (バイゾン)、の 2 種類で特徴づけられる (図 1c)。 Z_2 渦は有限のギャップを持つため極低温では励起されない。詳しくは [1,2] を参照されたい。

マヨラナ・チャーン絶縁体と非可換エニオン

キタエフ・スピン液体では、ゼロ磁場で遍歴マヨラナ・フェルミオンはディラック型の分散を持ち、極低温では遍歴マヨラナ・フェルミオンが動き回る「マヨラナ半金属」状態が実現する。磁場に対する応答はさらに興味深い。磁場をかけると、

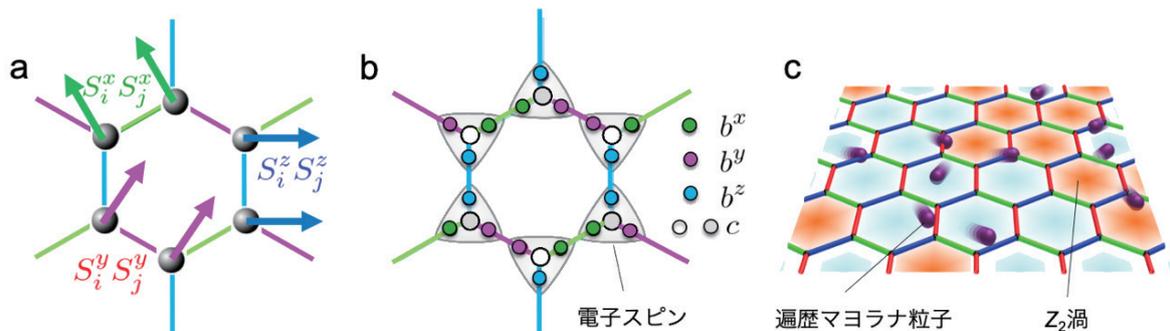


図 1 : a, キタエフ模型の模式図。b, 電子スピンのマヨラナ粒子への分裂の概念図。c, 分数化によって現れる遍歴するマヨラナ・フェルミオンと Z_2 渦の概念図。

TOPICS

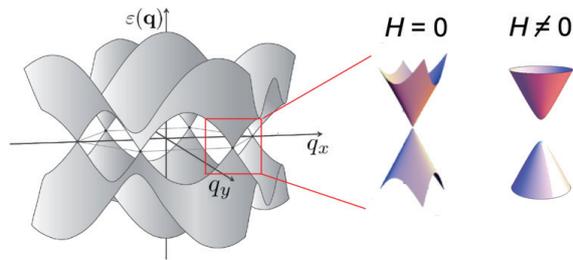


図2：遍歴するマヨラナ・フェルミオンのエネルギー分散。

遍歴マヨラナ・フェルミオンにはギャップが開く(図2)。このときチャーン数は磁場の方向により1か-1となり、トポロジカルに非自明な「マヨラナ・チャーン絶縁体」状態が実現する。この状態では試料の端(エッジ)は、ギャップレスとなり、遍歴マヨラナ・フェルミオンによる無散逸のエッジ熱流(カイラル・マヨラナ・エッジ流)が流れる(図3)。このような、マヨラナ・チャーン絶縁体状態を最も直接検出する方法は、熱ホール効果を測定することである。整数量子ホール状態では、電気ホール伝導度が、 $\sigma_{xy}^{2D} = \nu(e^2/h)$ ($\nu=1,2,3,\dots$) で量子化されるだけでなく、熱ホール伝導度も $k_{xy}^{2D}/T = \nu K$ となり $K = k_B^2/12h$ の単位で量子化されている。キタエフ・スピン液体状態では、熱ホール伝導度は

$$K_{xy}^{2D}/T = \frac{1}{2}K$$

となり、 $\nu=1$ の整数量子ホール効果状態の値のちょうど半分となる。これはマヨラナ・フェルミオンの自由度が従来のフェルミオンの半分であることに由来する。この1/2量子熱ホール効果状態では、試料のバルクに存在する Z_2 渦は、常に遍歴マヨラナ・フェルミオンをトラップし、マヨラナ・ゼロモード状態が生じていることが示されている(図3)。この Z_2 渦とマヨラナ・フェルミオ

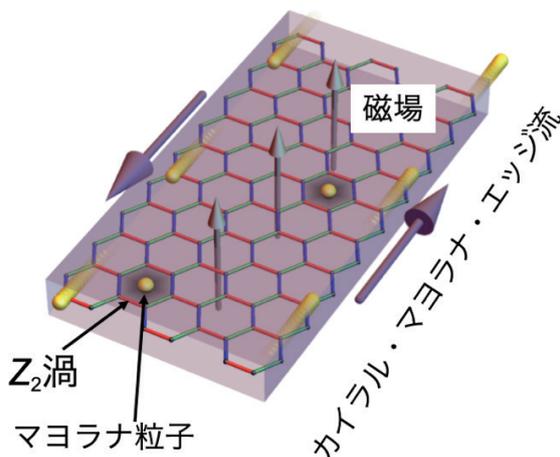


図3：マヨラナ・チャーン絶縁体状態(1/2量子熱ホール効果状態)の概念図。

ンの複合粒子は、非可換統計にしたがうエニオンとなる。つまり、この複合粒子二つを入れ替えても元の状態には戻らない。奇数分母をもつ通常の数量子ホール効果状態では、エニオンは可換統計に従う。なお1/2状態における非可換エニオンの存在は、共形場理論から一般に示されるらしい。逆に言うと、もし1/2量子熱ホール効果を実験で検出すれば、マヨラナ・フェルミオンと非可換エニオンの存在を決定づけるものとなる。

キタエフ物質

キタエフ・スピン液体も当初は理論家の創造物であった。その後、IrやRu原子などのスピン軌道相互作用の強い t_{2g} 電子系で、原子を取り囲む負イオンの八面体が辺共有で結合した蜂の巣格子を形成している時に、超交換相互作用はキタエフ模型に帰着することが示された。特に層状化合物である α -RuCl₃は7Kで反強磁性秩序を示すが、転移温度以上で通常の磁性体で観測されるボゾン励起とは異なるフェルミオンの励起が観測され、キタエフ・スピン液体の特徴をとらえていることが指摘された[2]。さらに α -RuCl₃では、平行磁場により反強磁性秩序が抑制され量子スピン液体状態が実現している可能性も報告されていた。

そこで我々は α -RuCl₃に対し熱ホール効果の測定を行った[3,4]。特に磁気秩序の抑制により現れる量子スピン液体状態で測定を行うため、磁場を面に斜め方向にかけて実験を行った。図4に磁場をc軸から60度傾けて測定した熱ホール効果を示す。低磁場の反強磁性状態(緑)では、熱ホール効果は非常に小さいが、スピン液体状態に入ったとたんに大きな熱ホール効果が観測される。 α -RuCl₃で観測された熱ホール伝導度の値は磁場に対して一定値(プラトー)をとる。この熱ホール伝導度を2次元層あたりの値に直すと、ちょうど量子化単位の半分の値($K/2$)になっている。つまり1/2量子熱ホール効果が観測されている(ピンク)。系は絶縁体であるためこれは中性粒子の応答であり、従来のフェルミオンの示す量子化の半分の値を示すことは、マヨラナ・フェルミオンによる量子化が起こっている決定的な証拠を与えている。さらに磁場をあげると、熱ホール効果

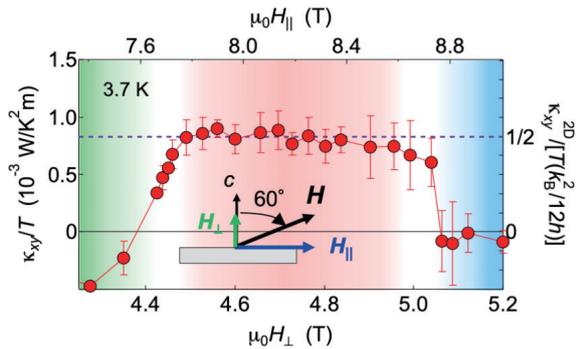


図4： α -RuCl₃における熱ホール伝導度の磁場依存性。

は消失してしまう（青）。これは、トポロジカルに非自明な状態から自明な状態への転移が起こったことを意味する。高磁場相がどのような相であるのか、ほとんどわかっておらずその説明は今後の課題である。

今後の展望

観測された 1/2 量子熱ホール効果を、2次元電子の整数および分数量子ホール効果と比較してみよう。3つの共通点は、言うまでもなくトポロジカルに非自明な状態であり、試料の境界をカイラル・エッジ流が流れるということである。相違点は、整数量子ホール効果は電子のエッジ流により、分数量子ホール効果は電子電荷の分裂による分数電荷のエッジ流により生じる。これに対しKitaev・スピン液体では、電子スピンの分裂により生じた電気的中性のマヨラナ粒子のエッジ流により量子化が起こる。さらに、量子ホール効果では、エッジ流の起源は古典的にはローレンツ力によりエッジに沿って進む電子のススキング運動であったが、絶縁体であるKitaev・スピン液体ではスピンのゼーマン効果がその起源となる。また、整数および通常の奇数分母の分数量子ホール効果の両者では、熱ホール伝導度は K の整数倍 ($K, 2K, 3K, \dots$) になるのに対し、Kitaev・スピン液体では半分 ($K/2$) になる。以上の点で本質的な違いがある。

最後に、

1. 量子スピン液体自体が分数量子ホール効果並みの面白さを持つかもしれない。
2. 非可換エニオンは環境雑音に強いトポロジカル量子計算を可能にすると期待されており、Kitaev・スピン液体の非可換エニオンは、

直接可視化できる可能性がある。

3. Kitaev・スピン液体にキャリアをドーブすれば、非従来型超伝導が生じるかもしれない。という恐ろしく楽観的な展望を述べさせていただきたい。

本研究は、大西隆史、馬斯嘯（京都大学）、杉井かおり、水上雄太、田中桜平、下澤雅明、山下譲、求幸年、芝内孝禎（東京大学）、那須譲治（横浜国立大学）、栗田伸之、田中秀数（東京工業大学）の各氏との共同研究です。この場を借りて深く感謝いたします。

- [1] A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2-111 (2006).
- [2] 求幸年、那須譲治、固体物理 **53**, 305-316 (2018).
- [3] Y. Kasahara, K. Sugii et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 217205 (2018).
- [4] Y. Kasahara et al., Nature **559**, 227-231 (2018).

著者紹介



まつだ ゆうじ
松田 祐司

1987年 東京大学大学院理学研究科物理学専門課程博士号取得、東京大学教養学部基礎科学科助手、1993年プリンストン大学博士研究員、1994年北海道大学理学部物理学教室助教授、1997年東京大学物性研究所助教授、2004より現職。



かさはら ゆういち
笠原 裕一

神奈川県逗子市出身。2003年東京理科大卒。2008年、京都大理学研究科博士課程修了（理学博士）。東北大助教、東京大助教を経て2014年より現職。