

分裂するスピン

Keyword: キタエフ模型

この世界は何でできているのか？ われわれの身の回りにある物質の基本構成要素は何だろうか？ こうした問いは、人類が抱き続けてきた根本的な好奇心のひとつである。たゆみない先人たちの努力によって、物質が原子核と電子で構成されていること、原子核は陽子と中性子、それらはさらに種々のクォークによって構成されていることが解き明かされてきた。

こうした要素還元的な研究を通じて、物質が示す電気的・磁気的特性といった基本的な性質のほとんどは、物質中にアボガドロ数程度存在する電子に起因することが明らかとなってきた。電子は、電荷 $-e$ (e は素電荷)、スピン $S=1/2$ をもち、フェルミ統計に従う素粒子である。素粒子であるため、電子をそれ以上細かく分割することはできない。しかしながら、驚くべきことに、電子同士が強く相互作用しあう物質中(強相関電子系)では、電子があたかも新しい素粒子に分裂したかのように振る舞うことがある。

ここでは、電子のもつ電荷とスピンの自由度が独立に振る舞うスピン電荷分離現象から話を始め、電荷が分数化する分数量子ホール効果に簡単に触れたのち、近年急速に研究が展開しているスピンの分裂現象を概観する。スピンの分裂によって、幻の素粒子とされてきたマヨラナ粒子が現れ、分裂に伴う量子的な絡み合いを巧みに操ることで量子コンピュータ実現の鍵を握る量子計算が可能となる。

1. スピン電荷分離

1次元的な構造をもつ物質中では、電子の運動が制限されて、相対的に電子間相互作用が強まる。こうした系では、電子の基本的な自由度である電荷とスピンの自由度が、あたかも独立な粒子であるかのように振る舞う。これをスピン電荷分

離という。

スピン電荷分離が生じるわかりやすい例として、1次元反強磁性体を考えてみよう。図1に示すような、反強磁性状態から電子をひとつ取り除いた状態(ひとつ正孔を導入した状態)を考えると、正孔の移動によって隣り合うスピンの平行に揃った状態が取り残される。これらの平行スピンはスピン $1/2$ をもつドメイン壁とみなすことができ、スピン間の交換相互作用を通じて図のように移動することができる。したがってこの状態では、正孔がもつ電荷 $+e$ とドメイン壁がもつスピン $1/2$ が独立に運動する。このスピン電荷分離現象は、実際に SrCuO_2 といった擬1次元反強磁性体で観測されている。

2. 電荷の分数化

さらに奇妙な現象として、電子の電荷が分裂したかのように振る舞う現象が見出されている。今度は電子を2次元的な物質中に閉じ込めて、低温・強磁場の環境に置く。強い磁場のもとで電子のスピンは全て同じ方向に揃うため、スピンの自由度は凍結してしまい、電荷の自由度だけが残る。さらに、強いローレンツ力によって電子の並進運動が妨げられる。こうした環境下では、ホール係数が h/e^2 の整数倍の値をとる量子ホール効果が現れる(h はプランク定数)。さらに注意深く観測すると、ホール係数が h/e^2 の有理数倍の値をとる分数量子ホール効果が現れる。この分数量子ホール状態は、強い電子間相互作用のもとで電子と磁束量子が結合した複合粒子が形成され、それらが凝縮した状態と考えられている(図2)。この凝縮体における素励起として、電荷が $-e$ の分数値をもつように見える新しい粒子(準粒子)が現れる。こうした準粒子は、フェルミ統計にもボース統計にも従わない特異な性質をもつ粒子としてエニオンと呼ばれている。これらの量子ホール状態は、現在物性物理の分野で花盛りとなっているトポロジカル物性のはしりである。

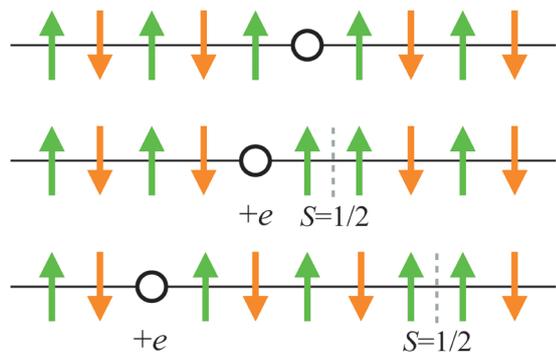


図1 1次元反強磁性状態に正孔をひとつ導入した際に生じるスピン電荷分離の模式図。



図2 (左) 分数量子ホール状態における複合粒子の概念図。ひとつの電子に3つの磁束量子 Φ が結合する例。(右) 複合粒子の凝縮体中に現れる分数電荷 $-e/3$ をもつ準粒子の概念図。

3. スピンの分裂

それではスピンの分裂することはあるだろうか。強い電子相関によって電子の運動が妨げられた絶縁体では、電荷の自由度が凍結し、スピンの自由度だけが生き残る（モット絶縁体）。そうした磁性体では、通常、温度の低下に伴ってスピンの向きが揃い、ある臨界温度以下で強磁性や反強磁性といった磁気秩序が現れる。しかし、ある種の磁性体では、いくら温度を下げて、強い量子揺らぎのために磁気秩序が現れない場合がある。こうして実現する新しい量子状態は量子スピン液体と呼ばれる。この量子スピン液体が、スピン分裂の舞台である。

量子スピン液体は、1973年に P. W. Anderson によって理論的に提案された。¹⁾ Anderson が提案した量子スピン液体は、スピン一重項状態の量子力学的な重ね合わせで与えられる resonating valence bond (RVB) 状態である。この RVB 状態では、スピンの2種類の新しい粒子 ($S=1/2$ のスピノンと $S=0$ のパイゾン、ともに電荷中性) に分裂することが理論的に予言され、量子スピン液体の候補物質において実験的な観測が試みられている。

最近になって、このスピンの分裂現象に新しい研究の潮流が生まれている。その端緒となったのは、2006年の A. Kitaev による Kitaev 模型の提案である。Kitaev 模型は、スピン $1/2$ を2次元蜂の巣構造上に並べたもので、スピンの相互作用は3種類あるボンド上でスピン成分が異なるイジング型をもつ (図3)。この模型の最大の特徴は、基底状態が厳密に求まり、それが量子スピン液体となる点にある。2次元以上の量子多体系の厳密解は珍しく、しかも基底状態が量子スピン液体となるものは稀有である。さらに重要な点として、この模型がある種の磁性体の良い記述となることが挙げられる。³⁾ これらにより、この10年ほどの間に、Kitaev 模型を通じた量子スピン液体研究が理論と実験の両面で急展開している。

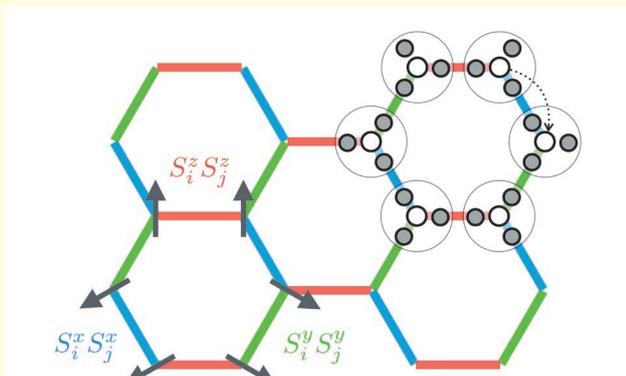


図3 2次元蜂の巣構造上のKitaev模型の模式図。矢印はスピン、円で囲まれた4つの丸印はスピンが分裂して生じるマヨラナ粒子を表す(白は遍歴的、グレーは局所的なマヨラナ粒子)。

Kitaev 模型では、厳密解を求める過程でスピンの分裂が自然な形で現れる。そこでは、図3に示すように、スピン $1/2$ が2種類のマヨラナ粒子に分裂する (RVB 状態という、遍歴的なものがスピノン、局所的なものがパイゾンに対応)。マヨラナ粒子とは、粒子と反粒子が同一な電荷中性のフェルミ粒子である。素粒子物理学の分野では、ニュートリノがマヨラナ粒子の候補と考えられているが、未だに決着がついておらず、マヨラナ粒子はいわば幻の粒子であった。近年になって、トポロジカル超伝導体中でマヨラナ粒子が現れる可能性が指摘され、実験的にも観測例が報告されたため、物性物理においてマヨラナ粒子が大きな注目を集めている。そうした中で、Kitaev 模型における量子スピン液体は、トポロジカル超伝導に並ぶマヨラナ粒子実現の舞台を提供している。

現在、このスピン分裂の直接観測とマヨラナ粒子による新しい物性の開拓へ向けた研究が精力的に行われている。2種類のマヨラナ粒子は大きく異なるエネルギースケールをもつため、様々な物理量の温度・エネルギー依存性にその痕跡が現れることが理論的に示され、Ir や Ru を含む候補物質を筆頭に熾烈な研究競争が巻き起こっている。また、マヨラナ粒子への分裂に伴う量子的な絡み合いを用いると量子コンピュータの実現に必要な量子計算が可能となることから、Kitaev 模型におけるスピン分裂は、物性物理だけでなく、量子情報の分野からも熱い視線を集めている。さらに、このマヨラナ粒子描像は格子ゲージ理論と深い関係にあることから、素粒子物理や原子核物理といった分野への波及効果も大きい。

4. 新しい“真空”を創出する強相関電子系

ここで見てきたスピン電荷分離、および電荷やスピンの分裂現象は、いずれも強相関電子系が新しい“真空”を創り出したと考えることができる。例えば、スピンの分裂現象は、量子スピン液体という新しい“真空”状態ができて、その素励起としてマヨラナ粒子が創発したと見ることができる。Anderson の “More is different”⁴⁾ という有名な言葉に象徴されるように、多くの電子が絡み合う強相関電子系は、まったく新しい“素粒子”を生み出す“宇宙”を物質中に創造する驚くべき研究対象であり続けている。

参考文献

- 1) P. W. Anderson, Mater. Res. Bull. **8**, 153 (1973).
- 2) A. Kitaev, Ann. Phys. **321**, 2 (2006).
- 3) G. Jackeli and G. Khaliullin, Phys. Rev. Lett. **102**, 1017205 (2009).
- 4) P. W. Anderson, Science **177**, 393 (1972).

求 幸年 (東京大学大学院工学系研究科 motome@ap.t.u-tokyo.ac.jp)
 (2017年9月6日原稿受付)