

エキゾチック近藤効果が生み出す新奇な電子秩序

物質中で相互作用する電子の集団は超伝導に代表される興味深い協力現象を発現する。電子相関の重要性の認識は金属中の磁性不純物の問題である近藤効果に端を発し、その後、銅酸化物高温超伝導体や重い電子系化合物などを中心として精力的に研究が行われてきた。強相関電子系は電子の持つ自由度が絡み合い、従来の概念では理解不能な新しい基底状態の可能性を秘めている。

局在性の強い f 電子を含むランタノイドやアクチノイド化合物は電子相関に起因する多様な現象を示す典型的物質群である。この系を分類する指標として、一原子あたりの f 電子数の偶奇性がある。 f 電子数が奇数のとき（例： Ce^{3+} 、 Yb^{3+} ）、クラマースの定理により時間反転対称性に基づくスピン自由度が必ず残る。こうして生じた磁気的な自由度を、結晶中を自由に動き回る伝導電子が遮蔽する。これが通常近藤効果である。他方、一原子あたりの f 電子数が偶数のときは（例： Pr^{3+} 、 U^{4+} ）、時間反転対称性とは関係のない軌道自由度が生じる場合がある。 f 電子と結合する伝導電子の自由度は軌道とスピンの両方があるので f 電子よりも多くなる。伝導電子のみが持つ自由度はスピンを一般化してチャンネルと呼ばれ、両者の相互作用系は2チャンネル近藤系と呼ばれる（図1左）。伝導電子の持つ二つのチャンネルは時間反転対称性により必ず等価になる（図1で $J_1=J_2$ ）。

Pr^{3+} や U^{4+} が伝導電子の海の中に一つだけある不純物2チャンネル近藤系を考えよう。通常の場合と同様に、伝導電子は f 電子の持つ自由度を近藤効果によって遮蔽しようとするが、 f 電子はどちらのチャンネルに遮蔽されるか迷ってしまう。その結果 f 電子の持つ自由度 $S=\ln 2$ のちょうど半分だけ遮蔽され、 $S=\ln\sqrt{2}$ という奇妙なエントロピーが残る。興味深いことに、遮蔽されずに残った自由度は局在したマヨラナ粒子という、粒子と反粒子（ホール）が同等な粒子によって記述されることが知られている。この一風変わった近藤効果を繰り込み群で考えると、図1右の $J_1=J_2$ の線上の流れに対応する($S=\ln 2 \rightarrow \ln\sqrt{2}$)。

一方で実際の化合物では f 電子は周期的に配列しており、この状況を記述するモデルは2チャンネル近藤格子と呼ばれる。十分低温では、系は f 電子間の相互作用によって残留エントロピーを何とか解消するはずである。東北大学理学研究科物理学専攻の研究グループは、2チャンネル近藤格

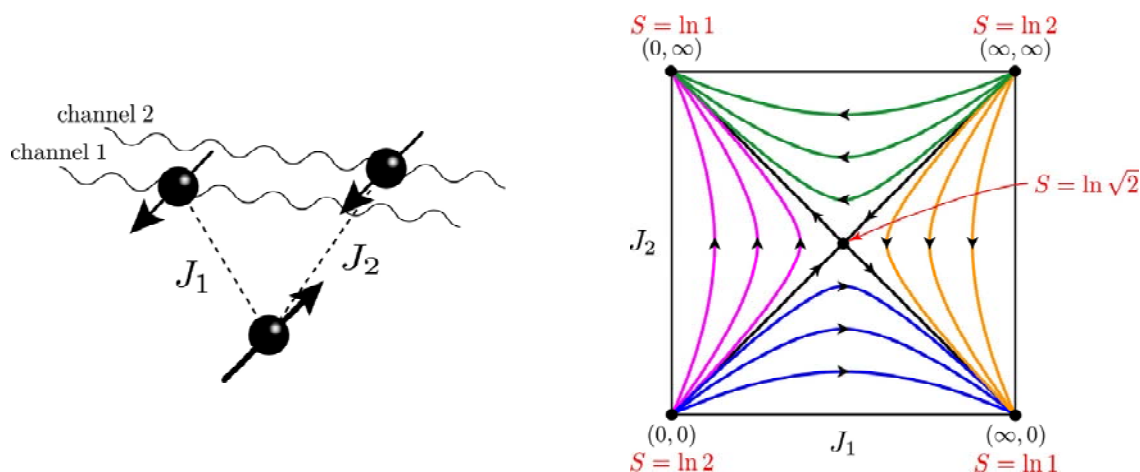


図1. 2チャンネル近藤モデルにおける（左）相互作用の模式図と（右）繰り込みの流れ図。左図で矢印は軌道自由度に対応する擬スピンを表す。

子に対して動的平均場理論と連続時間量子モンテカルロ法を適用し、低温で生じる秩序相が複合体という2体の量によって特徴づけられる特異な状態であることを明らかにした。さらにエントロピーの計算によって、秩序化により一原子あたり $\ln 2$ の半分である $\ln \sqrt{2}$ の自由度が消失していることを示し、マヨラナ粒子の秩序化という新しい物理的描像を提案した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2013 年 3 月号に掲載された。

この奇妙な秩序について詳しくみてみよう。もし伝導電子による f 電子の遮蔽が起こらない場合、 f 電子自由度を表す局在擬スピンの平均場によって分極する通常の秩序化が起こる。これは擬スピンの元来持っているエントロピー $\ln 2$ の秩序化による解消とみなせる。一方で2チャンネル近藤格子では近藤効果によって局在擬スピンのエントロピーを半分だけ消す。それでも尚残った自由度を、系は二つのチャンネルの等価性を自発的に破ることによって解消する。ここでチャンネルの対称性を破る平均場は f 電子と伝導電子が結合した量（複合体）であることは注目に値する。この過程は図1右において、直線 $J_1=J_2$ 上の固定点から J_1 と J_2 が非等価となって流れ出ることに対応する ($S=\ln \sqrt{2} \rightarrow \ln 1$)。前述したように $\ln \sqrt{2}$ のエントロピーは局在したマヨラナ粒子と解釈できるので、この秩序化は局在マヨラナ粒子が消失して通常のフェルミ粒子に変化する過程とみなすことができる。

本研究で得られた秩序は Pr や U 元素を含む化合物で実現する可能性がある。その可能性として、著者らは URu_2Si_2 の隠れた秩序との関連を指摘した。この物質では比熱や帯磁率に相転移を示す明確な異常が現れるが、その秩序相を特徴づける量（秩序変数）は発見から四半世紀経っても同定できていない。2チャンネル近藤効果は f 電子が不純物として入っている系 $\text{U}_x\text{Th}_{1-x}\text{Ru}_2\text{Si}_2$ ($x<0.07$) での実現が提案されている。ゆえに f 電子が周期的に配列した URu_2Si_2 は近似的に2チャンネル近藤格子として振舞うことが考えられる。本研究で見出された複合体秩序変数を現実の系に拡張することにより、 URu_2Si_2 の隠れた秩序変数の同定に近づくことが期待される。

原論文

[Resolution of Entropy \$\ln \sqrt{2}\$ by Ordering in Two-Channel Kondo Lattice](#)

[Sintaro Hoshino, Junya Otsuki, and Yoshio Kuramoto: J. Phys. Soc. Jpn. 82 \(2013\) 044707](#)

問合せ先：星野晋太郎（東北大学大学院理学研究科）

倉本義夫（東北大学大学院理学研究科）