

カイラル電荷 -URu₂Si₂における隠れた秩序の候補-

[1] 要旨

物質科学の魅力の一つに多彩な秩序相の存在がある。磁性体や誘電体といった相は代表例であり、その微視的な起源が磁気双極子や電気双極子の整列である事はよく知られている。一方、1985年にURu₂Si₂で発見された明確な比熱異常を伴う秩序相は、長年の膨大な研究にも関わらず、その微視的な起源や秩序変数が未だ不明であり、隠れた秩序と呼ばれている。本論文は、URu₂Si₂の隠れた秩序が結晶中の電子運動に付随する「カイラル電荷」の交替的整列であることを指摘したものであり、その存在を検証するための新しい実験手法も提案されている。本成果により、長年の謎である隠れた秩序状態の解明に向けた新たな展開が期待される。

[2] 本文

物質の多彩な物性は、電子のもつ内部自由度の整列による対称性の変化により現れる。例えば、電子スピンの整列すると時間反転対称性が失われて磁性が現れ、軌道自由度が整列すると離散回転対称性が一部失われて歪みが現れる。これらの微視的な整列を観測する実験手法は長年の研究によ

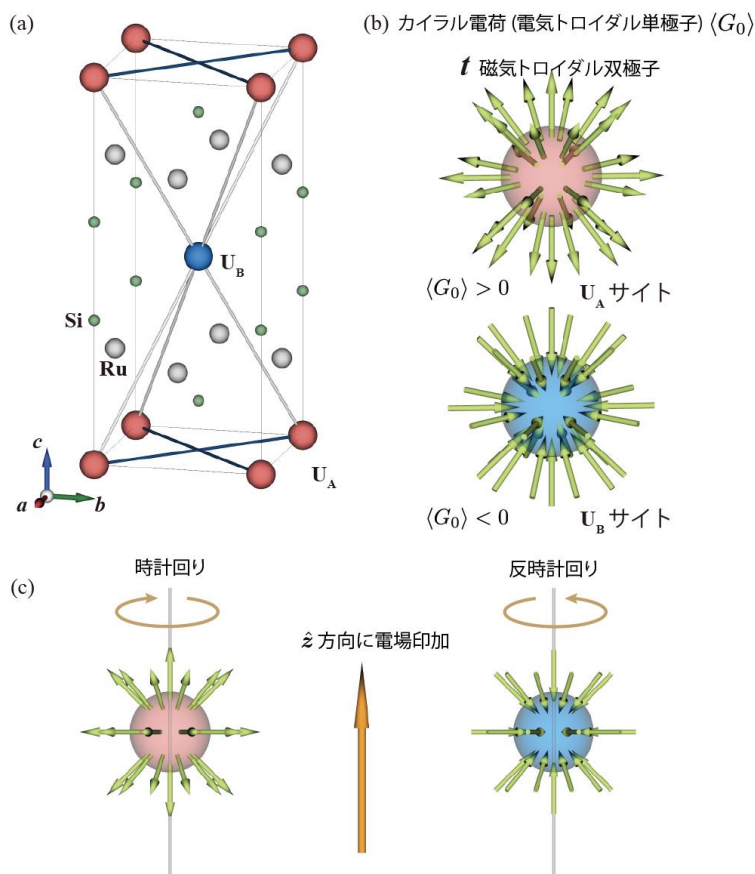


図 1。(a) URu₂Si₂ の結晶構造。(b) スピン空間における磁気トロイダル双極子 \mathbf{t} の湧き出し・吸い込みによって表現されるカイラル電荷(電気トロイダル単極子 G_0)。 (c) 電場下で生じる回転歪み。

って確立し、物性の理解とその精緻化に貢献してきた。

一方、比熱測定によって明確な相転移が観測されているにも関わらず、微視的な起源やその秩序変数が明らかにされていない秩序が存在し、しばしば「隠れた秩序」と呼ばれる。その代表的な例が、本論文の対象である f 電子系化合物 URu_2Si_2 である。この物質はありふれた結晶構造[図 1(a)]をもち、比熱測定により 17.5K で明確な相転移が観測されている。しかしながら、その秩序変数は、様々な理論提案および実験的検証が行われたにも関わらず、1985 年の発見以来 35 年以上経た現在においても未だ明らかになっていない。こうした隠れた秩序の起源の候補を絞るためには結晶構造の対称性を正確に定める必要があるが、超高精度の X 線回折実験や精緻な NMR 測定によって、U, Ru, Si 各サイトの局所的な回転対称性が秩序の有無によらず保たれていることが明らかになっている。

北海道大学大学院理学研究院と明治大学理工学部の共同研究グループは、電子の内部自由度のうちカイラル電荷が、こうした実験結果を満たすことを理論的に示した。さらに、理論モデル解析により、カイラル電荷の交替的な整列を観測・検証するための複数の実験手法も提案されている。この成果は、JPSJ の 2023 年 11 月号に掲載された。

本論文で提案されたカイラル電荷は、電子のスピンと角運動量の異なる軌道間の混成から構成される複合自由度であり、擬スカラーの単極子(モノポール)とみなすことができる。このため、局所的な回転対称性を壊さない秩序を形成することができる[図 1(b)]。この擬スカラーの単極子は、電荷や磁荷とは質的に異なる電子自由度であり、従来の実験手法で検出するのは困難である。それゆえに現在まで観測されなかったと推察される。本論文では、外部電場印加のもとでの局所的な回転歪み応答の観測[図 1(c)]によるカイラル電荷の検出実験が提案されている。さらに、カイラル電荷秩序の表面状態やドメイン壁において、空間反転対称性の局所的な破れが生じることも指摘されている。これらの提案は、最先端の分光および共鳴測定実験により検証可能なものである。

本論文の解析結果から、従来の理論・実験研究において全く考慮されてこなかったカイラル電荷という新しい電子自由度が、 URu_2Si_2 における隠れた秩序の秩序変数である可能性が提案された。カイラル電荷の概念は本化合物に限られたものではなく普遍的なものである。このような新自由度を探求することにより、未知の相転移現象に関する理論基盤が整備され、さらなる新物性の探索へとつながることが期待される。

原論文 (2023 年 10 月 30 日公開済)

Chiral Charge as Hidden Order Parameter in URu_2Si_2

S. Hayami and H. Kusunose, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, (2023) 113704.

< 情報提供 : 速水賢 (北海道大学大学院理学研究院) >