

時空間反転対称性に守られた重い電子状態

[1] 要旨

CeMnSi は、Ce と Mn という、タイプが異なる 2 種類の磁性原子を含む。温度を下げると、まず室温付近で Mn が反強磁性秩序を示し、系の時間反転対称性が破られる。これにより、結晶元来の空間反転対称性が破られる一方、時間と空間の複合操作である時空間反転対称性は保たれる。この特異な状況下で、Ce に由来した重い電子状態の可能性が指摘された。伝導電子が磁気秩序を起こした中での重い電子状態は、おそらく他に例が無い。時空間反転対称性に守られたスピン自由度が、この現象のカギを握る。

[2] 本文

自然を理解する営為の中、我々人類は、古くから対称性を拠り所にしてきた。その 1 つに、惑星運動における「円の魔力」が挙げられよう。それは後に膨大な観測データを元に覆され、回転対称性がもたらす角運動量保存則という形で統一的に理解された。一般に、対称性の背後には自然を理解する上で重要な何かがあり、実験に基づく新しい知見は新しい法則を生み出す原動力となる。

さて、結晶とは構成原子が空間的に規則的に配列したもので、結晶は、回転、鏡映、反転など様々な空間対称性を有す。中でも空間反転対称性は最も基本的な 1 つで、素粒子分野でも登場するが、結晶中では常に保たれるわけではない。先天的に破れているものもあれば、電子系の自発的対称性の破れによって後天的に破れるものもある。自発的対称性の破れの身近な例として、電子のスピンがある温度以下で整列する磁気秩序がある。全てのスピンの向きが揃った強磁性状態では、いわゆる磁石の性質が巨視的に現れる。一方、スピンの向きが互い違いに揃った反強磁性状態もあり、その空間配列次第では、結晶元来の空間反転対称性が破られる。この磁気秩序は時間反転対称性の破れに対応する。時間と空間の複合操作である時空間反転対称性も重要である。このように、物性研究において我々は、種々の対称性と出会う。これらを通じて物の性質＝物性を理解し、隠れた性質を引き出すことは、物性研究の醍醐味と言えよう。

一方、物性研究の花形の 1 つは、電子の持つ自由度が如何にして凍結するのかを解明することにある。前出の磁気秩序はその典型で、スピンの整列することでスピン自由度が失われる。磁気秩序には様々な機構がある。希土類元素を含む金属間化合物では、伝導電子を介した RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 相互作用が重要である。これは、伝導電子が磁性原子に局在した電子と適度に相互作用しながら結晶中を駆け巡り、スピンの向きを揃えるものである。ただし、局在電子と伝導電子間の相互作用が強いと、局在電子のスピンは伝導電子にかき消され、非磁性化し、スピン自由度が失われる。このとき、伝導電子は局在的だった電子を引きずって動かねばならず、あたかも質量が増えたかのように振舞う。これが重い電子状態である。磁気秩序と重い電子状態は同じ相互作用に端を発するため、両者は本質的に競合する。これは、粒子性・波動性といった量子力学の根幹に直結した問題で、日本の研究者らが大きな貢献を果たして来た分野の 1 つである。

金属間化合物の CeMnSi は、空間反転対称性のある正方晶の結晶構造をとり (図 1b)、約 240 K で Mn が反強磁性秩序を示すことが知られていた。最近、富山県立大学工学部と室蘭工業大学大学院工学研究科のメンバーを中心とする研究グループは、この Mn の磁気秩序状態では結晶元来の空間反転対称性は破られるが時空間反転対称性が保たれていることに気づき、CeMnSi の単結晶を用

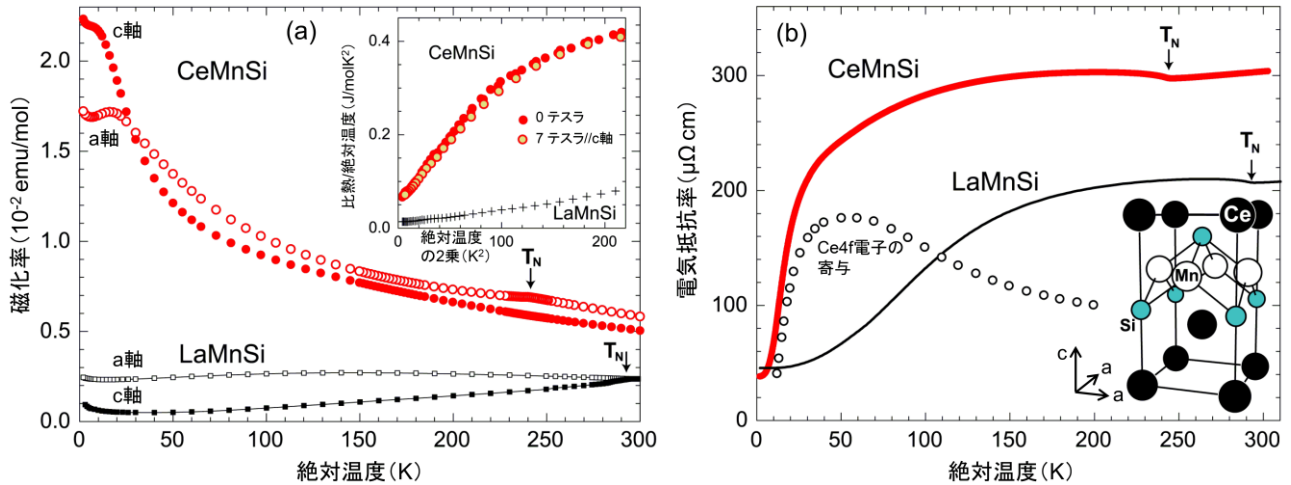


図 1(a) 0.1 テスラの磁場下で測定された CeMnSi の磁化率の温度変化。挿図は比熱を絶対温度で割ったものが絶対温度の二乗に対して示されている。4f 電子を持たない参照物質 LaMnSi の結果も示されている。(b) 電流を結晶の a 軸方向に流して測定した電気抵抗率の温度変化。CeMnSi の結果から LaMnSi の結果を差し引いて評価した Ce4f 電子の寄与も示されている。挿図は CeMnSi の結晶構造 (正方晶 CeFeSi 型、P4/nmm #129)。

いて電気抵抗率、磁化、比熱といった基礎物性を詳しく調べた (図 1)。その結果、局在的な Ce の 4f 電子は如何なる磁気秩序も示さず、低温で重い電子状態が実現している可能性のあることがわかった。この成果は、JPSJ の 2023 年 4 月号に掲載された。伝導電子に磁気秩序がある場合は、通常、重い電子状態は期待できない。しかし CeMnSi では、時空間反転対称性によって守られたスピン自由度により、重い電子状態が実現するのではないかと提案されている。これには、CeMnSi の結晶構造が非共型と呼ばれるグループに分類されることも恐らく関係する。通常とは異なる対称性の下で発達した重い電子状態であり、そこには新しい物理が期待される。そのような新奇な特徴の一端が、近藤温度の推定に垣間見える。

種々の対称性がもたらす新規物性の開拓は、近年のホットな話題の 1 つである。この一連の研究の中でも、CeMnSi は、Ce と Mn というタイプの異なる 2 つの磁性原子を含み、その組み合わせで、通常とは異なる対称性の舞台を巧みに創出した点が新しい。関連物質の開拓を刺激するとともに、対称性のもたらす物性に新たな知見を加え、新規なスピントロニクス材料開発等への原動力となることが期待される。

原論文 (2023 年 3 月 10 日公開済)

[Possible Heavy-Fermion State in \$\mathcal{PT}\$ -Symmetric Antiferromagnet CeMnSi](#)

Hiroshi Tanida, Hiroto Matsuoka, Yukihiro Kawamura, and Keisuke Mitsumoto, J. Phys. Soc. Jpn. **92**, 044703 (2023).

<情報提供：谷田博司 (富山県立大学工学部)
三本啓輔 (富山県立大学工学部) >