

副格子を鍵とする超伝導パリティ転移と磁性の実証

北川 俊作[†] 〈京都大学大学院理学研究科 kitagawa.shunsaku.8u@kyoto-u.ac.jp〉

尾方 司 貴 〈東京科学大学理学院 ogata.s.1029@m.isct.ac.jp〉

石田 憲 二 〈京都大学大学院理学研究科 kishida@scphys.kyoto-u.ac.jp〉

結晶の対称性は、固体中の電子が示す量子現象を決定づける最も基本的な要素である。特に超伝導においては、結晶構造の空間反転対称性が、超伝導波動関数の性質を分類する基準となってきた。空間反転対称性がある系では、波動関数の偶奇性（パリティ）が良い量子数となる。その結果、超伝導対は「偶パリティ・スピンー重項」または「奇パリティ・スピン三重項」のいずれかに分類される。ほとんどの超伝導体は前者に分類される一方、近年ウラン化合物などでスピン三重項超伝導の実現が議論されている。これに対して、結晶全体として空間反転対称性がない系では、2つの状態は分離できず、パリティ混成状態になる。

近年、この教科書的な枠組みに収まらない新しい超伝導状態が理論的に提案され、大きな注目を集めている。その舞台は、結晶全体では空間反転対称性を保ちつつ、超伝導を担っている原子位置では**局所的に反転対称性が破れている**系である。このような系では**副格子**の自由度によって、従来の枠組みでは不可能だった「奇パリティ・スピンー重項」というエキゾチックな超伝導状態が許容されることが理論提案された。理論によれば、この状態はスピンー重項でありながら、奇パリティであることから、スピン三重項超伝導のように、**パウリ対破壊効果**が抑制され、磁場に対して極めて強固な性質を持つと予測されている。そのため、低磁場では偶パリティ・スピンー重項状態であったものが、高磁場で奇パリティ・スピンー重項状態に転移する「超伝導パリティ転移」が予言された。

最近、理論的な予言にとどまっていたこの特異な超伝導状態が、 CeRh_2As_2 において実現していることが実験的に示された。この物質は、超伝導転移温度が極めて低い

にもかかわらず、その50倍以上のエネルギーに相当する極めて高い磁場を印加しても超伝導が壊れないという常識外れの性質を示す。さらに、磁場中で超伝導相が別の超伝導相へ切り替わる多重超伝導転移が観測された。得られた相図は理論予測と酷似しており、高磁場相で「奇パリティ・スピンー重項」が実現している可能性が高い。

我々はこの多重超伝導相の起源を解明するため、核磁気共鳴（NMR）および核四重極共鳴（NQR）測定を行った。NMRは物質内の微小な内部磁場の変化を高精度に捉える手法であり、特に超伝導に対しては、超伝導対のスピン状態を直接決定できる。5 TまでのNMR測定の結果、低磁場と高磁場の2つの超伝導相はともにスピン磁化率が減少するスピンー重項であることを明らかにした。これは CeRh_2As_2 において超伝導パリティ転移を実験的に示唆する結果である。さらに、Ceを含まない参照物質 LaRh_2As_2 が通常のs波超伝導であることを確認し、 CeRh_2As_2 の新奇な超伝導発現には局所的な空間反転対称性の破れに加え、f電子による強い電子相関も重要であることも示した。

CeRh_2As_2 には、超伝導パリティ転移以外にも興味深い秩序相が存在する。超伝導転移温度の直上には、未だ詳細が不明な秩序相（Phase I）が存在している。また、超伝導転移温度より低温で、反強磁性転移があることも発見されている。この物質は、副格子の自由度と電子相関が合わさることで現れる、多彩な秩序相の交差点に位置していると言える。局所的な対称性の破れがもたらす新奇物性には未解明な課題も多く、多重自由度が織りなす量子現象の全貌解明に向けた、今後のさらなる実験的アプローチの展開が期待される。

——用語解説——

スピンー（三）重項：

超伝導を担う電子ペア（クーパー対）の分類。2つの電子の合成スピン $S=0$ のものを「一重項」、 $S=1$ のものを「三重項」と呼ぶ。

局所的な反転対称性の破れ：

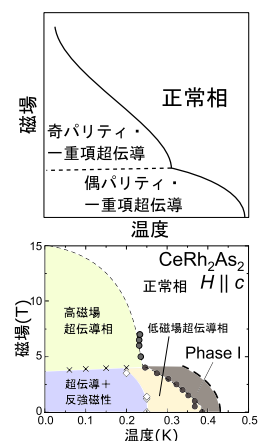
ある特定の原子を中心に空間反転操作（ $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$ ）した状態と、元の状態が一致しないこと。任意の位置で空間反転操作前後が一致しない場合は結晶全体で空間反転対称性が破れている。

副格子：

結晶の最小単位（単位格子）の中に、化学的・物理的に対等だが位置の異なる複数の同種原子が存在する場合、それらの部分的な格子のこと。

パウリ対破壊効果：

超伝導凝縮エネルギーより外部磁場によるゼーマンエネルギーの利得の方が大きくなることで、逆向きスピンで構成される一重項ペアの結合が壊される効果。



副格子自由度を持つ超伝導体の理論相図（上）と CeRh_2As_2 の温度-磁場相図（下）。

[†] 著者が編集委員の場合、会誌編集委員会では別の委員を担当編集委員に選び、記事の審査の公正さを保つという方針に従っております。