

ドハース・ファンアルフェン効果で見た鉄系高温超伝導体の電子状態

2008年に東京工業大学の神原、細野らによって報告された、鉄とヒ素を含む化合物における新たな高温超伝導の発見は、瞬く間に世界中を巻き込んだ研究・開発競争を引き起こし、現在では最も高い超伝導転移温度 T_c は 55 K 近くに達している。これは 2001 年にやはり日本で報告された MgB_2 の $T_c = 39$ K を抜き銅酸化物高温超伝導体以外では最高である。

超伝導は固体中で電子同士がペアを組むことにより起こる現象なので、鉄系超伝導体中の電子状態を知ることは、鉄系超伝導体の高温超伝導の起源を解明するのに重要であり、また銅酸化物高温超伝導体の電子状態との類似と差異を知ることは、室温超伝導を目指してさらに新たな高温超伝導体を探索する指針を得るためにも重要であろう。

最近、物質・材料研究機構、産業技術総合研究所、千葉大学、神戸大学、JST 超伝導研究特別プロジェクトの共同研究グループは、ドハース・ファンアルフェン (dHvA) 振動の測定を行い鉄系超伝導体の電子状態について詳細に調べた。その結果は、日本物理学会発行の英文学術誌 *Journal of the Physical Society of Japan* 誌の 2010 年 5 月号に掲載された。

鉄系超伝導体の一種 $(Ba_{1-x}K_x)Fe_2As_2$ は、 $x \sim 0.4$ で $T_c = 38$ K の超伝導転移温度を示すが、研究グループは、超伝導転移温度が $T_c \sim 3$ K と低く実験に都合の良い KFe_2As_2 を測定した。

測定を行った dHvA 振動とは、金属のフェルミ面を決定するための手法である。フェルミ面とは k 空間 (波数空間) において電子が存在する領域と存在しない領域を隔てる境目となっている面であり、フェルミ面の形状と、フェルミ面の近傍にいる電子の性質が金属の多くの性質を決定づける。dHvA 振動は、絶対零度に近い超低温で、強い磁場を加えると、金属の磁化が磁場の逆数の関数として周期的に振動する現象で、それを解析することにより磁場に垂直なフェルミ面の切り口の極大または極小の大きさを知ることができる。また、振動強度の温度変化からフェルミ面上の電子の有効質量を決めることができる。金属中で電子は原子核や他の電子と相互作用しながら運動しているので、有効質量は自由電子質量とは異なる。測定には強磁場が必要で、研究グループは物質・材料研究機構の強磁場共用ステーションを利用した。

観測された dHvA 振動の一例が図の挿入図に示してある。測定を行った温度は 0.08 K、最大磁

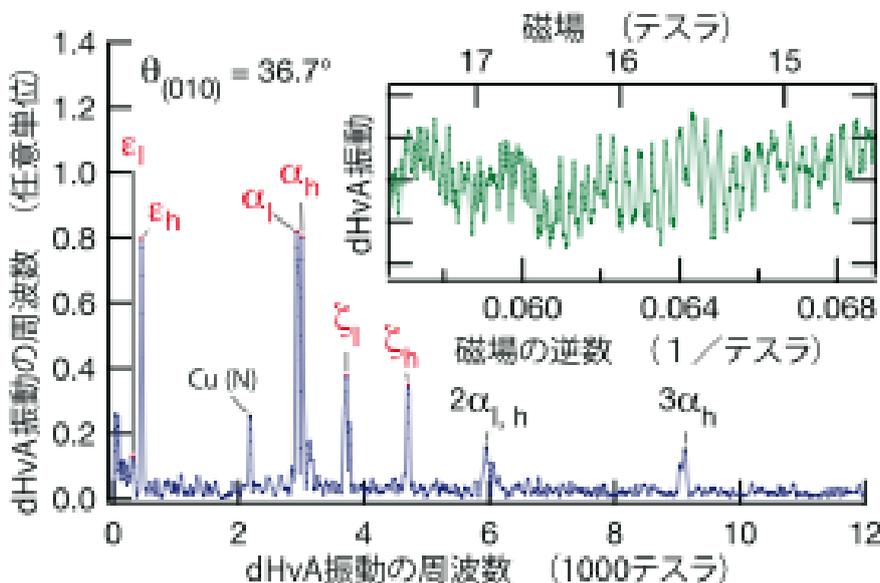


図 鉄系超伝導体 KFe_2As_2 の dHvA 振動 (挿入図) とそのフーリエ変換。測定温度は 0.08 K。
 ϵ 、 α 、 ζ の 3 種類の周波数成分が確認できる。2 α 、3 α などは高調波。また、Cu(N) とマークされているのは検出コイルの銅線から信号で試料と関係ない。

場は約 18 テスラである。磁場に対して磁化が振動的に変化する様子がとらえられている。メインの図に示されているのは、このデータにフーリエ変換を施した結果で、観測された dHvA 振動に ε 、 α 、 ζ と名付けられた 3 種類の周波数成分があることがわかる。研究グループは種々の磁場方位で測定を行い、これら 3 種類の周波数成分が 3 種類の筒状の擬二次元フェルミ面から来ていることを明らかにした。

さらに、研究グループは電子構造計算を行い実験結果と比較した。実験的に観測されたフェルミ面に対応すると思われるフェルミ面は、確かに理論計算の結果にも現れるが、その大きさが実験と理論ではかなり食い違う。現在の電子構造計算は大変精度が高く、今回見られたような実験と理論の食い違いは、通常の物質ではあまりない大きさである。

また、研究グループは、電子の有効質量を見積もり、やはり電子構造計算の予測と比較し、有効質量が電子構造計算の予測よりさらに 3 から 7 倍程度も大きいことを示した。

電子は負の電荷を持ち、金属中の電子同士には反発力が働く。電子構造計算もこの相互作用を平均的なレベルでは考慮しているわけだが（局所密度近似）、フェルミ面の大きさや電子の有効質量が電子構造計算と顕著に食い違う今回の結果は、鉄系超伝導体において電子間相互作用が通常よりも強い、すなわち強相関であることを示している。鉄系超伝導体では、伝導電子が主として鉄原子の $3d$ 軌道という空間的に狭い領域にいて、電子間の反発が強く強相関になっているとの予想は当初からあり、また、これまでもそれを裏付ける実験結果が発表されてきた。今回の結果は、それらをさらに補強するものである。その上で、今回の結果が重要なのは、強い電子相関が超伝導転移温度が低い KFe_2As_2 でも依然として存在することである。高い超伝導転移温度を示す鉄系超伝導体を考える場合、フェルミ面のネスティングという特殊事情があって、スピン揺らぎが増強され、強い電子相関、高い超伝導転移温度が生じるというのがもっとも素朴な考えだが、今回の結果は鉄系超伝導体の電子相関がそれほど単純ではないことを示す。

今回の研究を契機に、鉄系超伝導体の電子状態、電子相関、ひいては高温超伝導の起源がさらに詳細に研究され明らかされていくことが期待される。

論文掲載誌： J. Phys. Soc. Jpn., Vol.79, No.5 p. 053702

電子版：<http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/79/053702/>（4月26日 公開）

<情報提供：寺嶋太一（物材機構）、永崎洋（産総研）、小堀洋（千葉大学）、播磨尚朝（神戸大学）>