

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	黄 文凱
論文題目	1. 題 目 Non-Fermi liquid transport properties near the nematic quantum critical point of $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ ( $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$ のネマティック量子臨界点近傍における非フェルミ液体輸送特性)		
(論文内容の要旨)			
<p>電子同士が強く相互作用し合った強相関電子系の解明は、凝縮系物理学における最も重要な課題の一つである。その中でも超伝導の対形成機構が従来の格子振動によるものとは決定的に異なる非従来型超伝導は、その中心的課題としてこれまでに膨大な研究が行われてきた。非従来型超伝導を示す物質群として有名なものは、銅酸化物高温超伝導体、鉄系高温超伝導体、重い電子系超伝導体である。これらの3つの物質群に共通した特徴は、超伝導を起こす温度よりも高い温度にあるノーマル状態の電子状態が、通常の金属の示すいわゆるフェルミ液体的挙動から大きく逸脱した非フェルミ液体的振る舞いを示すことである。この非フェルミ流体的挙動は、最も超伝導転移温度が高い組成や圧力でしばしば観測されるため、超伝導発現機構と密接に関係しており、その解明は極めて重要である。上述した3つの物質群では、反強磁性近傍で非従来型超伝導が出現しており、非フェルミ液体的挙動は反強磁性の消失する量子臨界点近傍で観測されることがよく知られており、反強磁性量子臨界ゆらぎが非フェルミ流体的振る舞いの起源であるとされてきた。非フェルミ液体的振る舞いは、輸送現象の温度変化に最も顕著に現れることが知られている。最も有名な輸送現象の振る舞いに、温度に比例する電気抵抗がある。さらに大きく温度変化をするホール係数と従来の金属の示すコーラー則からのずれも非フェルミ液体的振る舞いとして大きく注目されてきた。</p> <p>黄氏が、今回中心的に行った研究は鉄系高温超伝導体における非フェルミ液体的振る舞いである。鉄系高温超伝導体の特徴の一つは、反強磁性秩序が起こるとほぼ同時に格子系も正方晶から斜方晶構造相転移をすることである。後者は電子系が自発的に回転対称性を破る、ネマティック転移と呼ばれネマティック電子状態は鉄系高温超伝導体において最も大きな注目を浴びている特異な状態である。鉄系高温超伝導体でも、超伝導転移が最も高くなるのは、反強磁性転移の消失点当たりであり、このあたりで非フェルミ液体的振る舞いが観測される、しかしながら最も大きな問題は、この振る舞いや超伝導発現機構に対して反強磁性揺らぎとネマティック揺らぎのどちらが主導的な役割を果たしているのかよくわかっていないことであった。したがってこの未解明問題は鉄系高温超伝導体の最も大きなミステリーの一つであった。</p> <p>このような背景のもと、黄氏が注目したのはFeSe系化合物である。この系の大きな特徴は、反強磁性転移を起こすことなしにネマティック転移を起こし、さらに超伝導に転移することである。したがってネマティック転移が、輸送現象や超伝導発現機構にどのような役割を果たしているかを解明する鍵となる物質であると考えられている。特に<math>\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)</math>系では、反強磁性転移を誘発することなくSドープによりネマティック転移温度を制御することができ、<math>x=0.17</math>近傍でネマティック転移が消失し、ネマティック量子臨界点が現れる。FeSeでは反強磁性秩序は観測されないが、反強磁性揺らぎは少し残っている。しかしながらSドープにより反強磁性揺らぎの成分はさらに抑制されることが知られており、ネマティック量子臨界点近傍では、反強磁性揺らぎは極めて小さいものとなっていることが知られている。黄氏はネマティック量子</p>			

臨界点近傍の純良試料を気相輸送法により作成し、電気抵抗、ホール係数、磁気抵抗の詳細な測定を行った。その結果、電気抵抗はネマティック量子臨界点近傍の広い温度領域で温度に比例した非フェルミ液体的振る舞いを示すことを示した。さらに、ホール係数も大きく温度変化を示し、とくにホール角のコタンジェントが温度の2乗に比例した振る舞い  $\cot \Theta \propto T^2$  が観測された。さらに低磁場における磁気抵抗もホール角でスケールされる振る舞い  $\Delta\rho/\rho \propto \tan^2 \Theta$  が観測され、フェルミ液体から大きく逸脱した修正コーラー則が観測された。ネマティック量子臨界点から離れてゆくとこれらの異常な輸送現象の振る舞いは、観測されず、従来のフェルミ液体的振る舞いが復活する。このことは非フェルミ液体的振る舞いがネマティック臨界揺らぎを起源とするものであることを直接的に示している。

これらの代表的な3つの輸送係数の振る舞いは、高温超伝導体や重い電子系超伝導体の反強磁性量子臨界点で観測されている振る舞いと極めて類似している。このことは、ネマティック量子臨界揺らぎも非フェルミ液体の起源となり得ることを示したものである。これまで反強磁性量子臨界点近傍では、準粒子の電流方向と速度方向が平行からずれるいわゆるバーテックス補正により非フェルミ液体的振る舞いは説明されたが、この場合臨界揺らぎを特徴づける波数  $q$  は、反強磁性ベクトルであり有限の値を持っていた。しかしながら今回のネマティック揺らぎを特徴づける揺らぎの特徴的波数は  $q=0$  であり黄氏の発見は、これまでのバーテックス補正の理論では、輸送現象に現れる非フェルミ液体的振る舞いを単純に説明できないことを示している。

以上のように、黄氏の報告した反強磁性を伴わないネマティック量子臨界点近傍での輸送現象の異常な舞いの発見は、これまで考えられてきた機構では説明できない新しい非フェルミ液体をもたらす機構が存在することを示したという点で重要である。最近の研究で、ネマティック揺らぎにより、異常な超伝導状態も実現していることも様々な実験から報告されつつある。非フェルミ液体機構と異常な超伝導状態との関係は興味深いものであり、これからの大きな研究の進展をもたらす可能性があるものとして高く評価できる。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

電子同士が強く相互作用し合った強相関電子系の解明は、凝縮系物理学における最も重要な課題の一つである。その中でも超伝導の対形成機構が従来型とは異なる非従来型超伝導は、その中心的課題としてこれまでに膨大な研究が行われてきた。非従来型超伝導を示す物質群においては、超伝導を起こす前のノーマル状態の電子状態が、通常の金属の示すいわゆるフェルミ液体的挙動から大きく外れた非フェルミ液体的振る舞いを示すことが知られていた。この非フェルミ液体的挙動は超伝導発現機構と密接に関係しており、これまでの物質群では、反強磁性近傍で非従来型超伝導が出現している。さらに非フェルミ液体的挙動は反強磁性の消失する量子臨界点近傍で観測されることが知られており、反強磁性量子臨界ゆらぎの効果が非フェルミ液体的振る舞いの起源であるとされてきた。

本研究で黄氏は、鉄系高温超伝導体のなかで、 $\text{Fe}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)$ 系に注目した。この系では反強磁性を伴うことなしに、電子系が自発的に結晶の回転対称性を破る電子ネマティック転移を起こす。黄氏はネマティック量子臨界点近傍での、電気抵抗、ホール係数、磁気抵抗などの電子輸送現象の詳細な研究を行った。その結果、これまで反強磁性量子臨界点近傍で報告されている非フェルミ液体的振る舞いが、ネマティック量子臨界点近傍でも観測されることを示した。このことは、非フェルミ液体状態をもたらす新しい機構が存在する可能性を示しており、その学術価値は高く、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、2021年7月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降