

## 論文の内容の要旨

論文題目     **Quantum Critical Phenomena Induced by Changes in Fermi-Surface Topology**  
                  (フェルミ面トポロジーの変化をもたらす量子臨界現象)

氏     名     山地   洋平

金属中の低エネルギー一粒子励起は、1次元系以外では一般に、波数を良い量子数とする準粒子に基づいたフェルミ液体論で記述される。コヒーレントな準粒子は、波数空間の分布関数に見られる階段関数型の特異点の集合、フェルミ面の存在によって特徴付けられる。しかし、低温の金属が“単一の”フェルミ液体に常に留まる保証は無い。磁場、圧力などの摂動や、電子間相互作用によって、フェルミ面は不安定化し、磁性相などの自発的に対称性が破れた状態へと変化する可能性がある。絶対零度におけるこのような基底状態の変化は量子相転移とよばれ、公汎に研究が行われてきた。特に電子の運動エネルギーと電子間クーロン相互作用が拮抗する強相関電子系に発現する量子臨界点近傍では、波及効果として“非フェルミ液体的振る舞い”や異方的超伝導相など新奇な現象が観測されるため注目を集めてきた。一方、量子臨界点の性質自体は、強相関系で観測されるにもかかわらず、いわゆるガウス固定点によって理解できるシンプルなものであると信じられている。実際、“非フェルミ液体的振る舞い”については、ガウス固定点に基づくHertz-Moriya-Millisによる“標準的”理論が成功をおさめてきた。

では、遍歴電子系における量子臨界現象はすっかり理解されてしまったのだろうか？ 答えは“No”である。実は近年、従来の理論だけでは説明のつかない現象が次々に実験的に観測されている。例えば、この理論の予言に従う典型例と考えられてきた遍歴磁性体ZrZn<sub>2</sub>では、通常の量子臨界点は存在しないことが近年の試料の純良化によって明らかになった。それだけでなく、電気抵抗における非フェルミ液体的挙動が、量子臨界点とは無関係に広い温度、圧力の範囲で観測されている。何故、これまで成功していた理論とくい違う現象が観測されるようになったのだろうか？ ひとつ考えられるのは、試料を純良化したことで不純物によってなまらされていた低エネルギーの“構造”が観測にかかり始めたということだ。例えばそれは、磁性が生じる舞台となったフェルミ面の構造である。標準的理論は、フェルミ面近傍の低エネルギー一粒子励起と臨界点近傍での磁気揺らぎの絡み合いによって“非フェルミ液体的振る舞い”を説明する。しかし、この理論はフェルミ波数の平均値といった粗見化された情報のみで従来の実験をうまく説明してきたために、フェルミ面そのものの幾何学的性質が量子転移によって変化する可能性は考慮されていない。

実際には、対称性の破れとは異なるタイプの量子相転移を起こす可能性に、フェルミ液体は直面しているのである。そのような量子転移の一例として、フェルミ面のつながり方、フェルミ面トポロジーの変化がある。これは自発的対称性の破れとは全く関係のない量子相転移であり、相互作用の無い多体フェルミ粒子系についてI.M.Lifshitzが提案したものである。リフシツツ転移と呼ばれるこの量子相転移は電子間相互作用による相転移ではないため、通常の量子臨界現象を示すことはない。しかしながら、自発的対称性の破れを伴わない量子臨界現象が観測されている強磁性超伝導体UGe<sub>2</sub>、メタ磁性体Sr<sub>3</sub>Ru<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、重い電子

メタ磁性体 $\text{CeRu}_2\text{Si}_2$ 等の幅広い物質で、Hertz-Moriya-Millis理論だけでは説明できない量子臨界現象およびその波及効果が、フェルミ面トポロジーの変化が同時に起こっていることで説明できるとの提案がなされている。メタ磁性転移や新奇な超伝導相、重い電子の形成は、いずれも電子相関が系の物性にrelevantであることを明確に示している。このように、電子相関が重要となる場面での気体-液体相転移とフェルミ面トポロジーの変化が同時に起こることで、その量子臨界現象はいかなる変更を受けるのであろうか？

我々は、気体-液体転移とフェルミ面トポロジーの変化が絡み合うことで、フェルミ面トポロジーが新奇なユニヴァーサルリティをもたらすことを明らかにした。本学位論文では $\text{ZrZn}_2$ のメタ磁性量子臨界現象を例にユニヴァーサルリティの性質を示す。遍歴電子強磁性体 $\text{ZrZn}_2$ は、気液相転移型のメタ磁性を研究するにあたり好適な舞台である。静水圧下で有限温度の磁気転移が不連続に消失し、量子1次転移を示す。1次転移より高压下では磁場を印加することで気液相転移型のメタ磁性的振る舞いとその量子臨界点が観測されている。フェルミ面トポロジーもまた詳細に研究され、圧力等の外部パラメーターについて極めて敏感であることが理論的にも実験的にも指摘されている。我々は、この物質においてフェルミ面トポロジーの変化がメタ磁性の起源となっていること、およびトポロジーという定性的なフェルミ面の性質が、メタ磁性量子臨界点の臨界性を新奇なものに変えてしまうことを平均場理論によって提案した。我々が明らかにしたフェルミ面トポロジーに依存する新奇な量子臨界点の存在は、単に $\text{ZrZn}_2$ の磁性を説明するに留まらず、今後新たな非フェルミ液体挙動を明らかにする出発点を与えることが期待される。

強相関電子系における基底状態の競合や量子臨界現象が関心を集める舞台として、遍歴磁性体に加えて銅酸化物高温超伝導体を忘れることはできない。銅酸化物では、モット絶縁体である母物質に、化学ドーピングによってキャリアを注入することで、高温超伝導相が発現する。ドーピングとともに、スピンの励起や一粒子励起にギャップ的な振る舞いが見られる“擬ギャップ相”から非フェルミ液体的挙動を示す“異常金属相”，フェルミ液体へと変化してゆく。このような金属相の劇的な変化については、異常金属相近傍で最大の転移温度を示す高温超伝導の発現機構との関係をめぐり、詳細な研究が行われてきた。

一方、ドーピングされたモット絶縁体である銅酸化物は、モット絶縁相近傍にあらわれる強相関金属の低エネルギー電子構造を研究する上で典型例の一つであるため、実験・理論の両面から注目を集めてきた。フェルミ面の形状や、波数に強く依存した準粒子線り込みの様子などはとくに活発な研究の対象となっている。中でもドーピングによるフェルミ面トポロジーの推移は、高温超伝導の発見以来、注目を集めてきた。たとえば、Hall係数の測定から、超伝導転移温度が最大となる最適ドーピング付近で、ホール・ドーピング量の増加とともにキャリアの性格がホール的なものから電子的なものへと変化することが知られている。また近年では、角度分解光電子分光や量子振動によって、低ドーピング領域のフェルミ面が、バンド描像から期待されるものとは異なる、小さなポケット状のものである可能性が指摘されている。数値計算による理論的研究や、Luttingerの定理をフェルミ面の無いモット絶縁相内へ拡張しようとする試みからも、低ドーピング側での対称性の破れをとまなわないフェルミ面トポロジーの変化が示唆されている。

銅酸化物で期待されるフェルミ面トポロジーの変化は、平均場理論などの一体近似からは理解できないモット絶縁相近傍の、強相関金属特有の現象である。本学位論文では、この非自明なフェルミ面トポロジーの変化の発生機構を、モット絶縁相や強相関金属を記述する典型的な模型、ハバード模型にもとづいて提案する。ドーピングされたモット絶縁体にお

ける低エネルギー一粒子励起が電荷自由度に支配されていることを出発点に、電荷自由度の揺らぎによって電子の自己エネルギーが発散しフェルミ面トポロジーが変化する様子を、Kotliar-Ruckensteinによるハバード模型のスレイブ・ボゾン平均場理論に電荷揺らぎを取り込み拡張することで表現する。より具体的には、スレイブ・ボゾン形式で導入されたダブロン、ホロンに対応する電荷自由度ボゾンの揺らぎと電子が結合した“複合フェルミオン”が電子と混成することで、電子の自己エネルギーが発散し、一粒子グリーン関数に零点が生じることを示す。フェルミ面トポロジーの変化はグリーン関数の極と零点が再構成を起こすことで起こっている。このようなフェルミ面トポロジーの変化は、自発的に対称性が破れた相およびその相境界を生み出すことなく、絶対零度でのみ定義される量子臨界点を生じる。また、対称性の破れによる量子臨界点の影響が臨界点近傍に留まるのに対し、極と零点の再構成によるフェルミ面トポロジーの変化は、非自明なフェルミ面トポロジーを持つ低ドーブ側の量子相全体に影響する。超伝導の発現にも、臨界点として影響するのではなく、量子相として影響を与えることを提案する。

本研究は、低ドーブ側での小さなポケット状のフェルミ面の存在を示唆する実験結果や数値計算の結果を、解析的かつシンプルな概念で説明するとともに、電荷揺らぎよりもエネルギー・スケールの小さなスピン揺らぎ等の物理を議論する出発点となる電子構造を与えるものである。したがって、トポロジーの変化以外の基底状態の競合や量子臨界現象を含む、銅酸化物高温超伝導体の全体像を理解するための基礎を与えることが期待できる。