

論文の内容の要旨

Unconventional Quantum Criticality

Induced by Proximity of First-Order Phase Transitions

(一次相転移の近接効果によってもたらされる非従来型の量子臨界性)

氏名 三澤 貴宏

(本文) 固体中の電子がバンド幅に匹敵するほどの大きなクーロン斥力で相互作用しあう系は強相関電子系と呼ばれ、近年の固体物理学の中心的な研究対象である。この強相関電子系においては、電子間に働く強い相互作用の結果、様々な秩序が競合しあっていることが知られている。そのため、制御パラメーター（磁場、組成比、圧力など）の値のわずかな変化によって相転移（磁気転移、電荷秩序転移、金属-絶縁体転移など）の臨界温度が絶対零度にまで下がり、量子臨界点が出現する。このことから、量子臨界点は強相関電子系において普遍的な存在であるといえる。

この量子臨界点近傍では、低温での物理量（比熱、抵抗率、帯磁率など）の温度依存性は通常の金属相を普遍的に記述すると考えられているランダウのフェルミ液体論に従わず、いわゆる非フェルミ液体的挙動が現れることが理論・実験の両方から指摘されている。これは量子臨界点近傍では、強い量子揺らぎのために通常の金属の性質が劇的に変化していることを示している。さらに、この非フェルミ液体的挙動が現れる量子臨界点近傍で異方的超伝導などの強相関電子系特有の新奇な現象が発現している。これは、量子臨界点の性質が強相関電子系特有の新奇な現象と密接に関わっていることを示唆しており、その本質を明らかにする研究が注目を集めている。

量子臨界点近傍での非フェルミ液体的挙動を説明する従来の理論としては、守谷・Hertz・Millis らによって提唱されている、スピン揺らぎ理論がある。この理論の枠組みでは、量子臨界点近傍で増大する磁氣的な秩序変数の揺らぎ（スピン揺らぎ）が電子状態の変化をもたらし、その結果、非フェルミ液体的挙動が現れる。この理論は多くの物質で見られている非フェルミ液体的挙動を説明する上で最も基礎的な理論と考えられており、幅広く用いられている。

しかし、近年の実験で、この従来の理論では説明できない非従来型の量子臨界性が多くの物質で見られている。たとえば、遍歴強磁性体である ZrZn_2 では非フェルミ液体的挙動が従来の理論の予測よりもはるかに広い領域で現れることが指摘されている。同様の振舞いは MnSi や NiS_2 でも観測されている。また、 YbRh_2Si_2 では反強磁性の量子臨界点近傍で同様帯磁率が発散的に増大するといった、不可解な振舞いが観測されている。これらの実験事実は、量子臨界現象の統一的な理解には従来の枠組みを超えた新しい視点が必要であることを示している。

この博士論文では、これらの物質で観測されている非従来型の量子臨界性を説明するひとつの視点として、一次相転移の近接効果を提案した。実際に、上にあげた物質の多くでは、一次相転移が近傍に存在することが指摘されている。また一般に、一次相転移に近づくことで、連続相転移の場合よりも大きな電子状態の変化が起きることが期待され、その大きな変化が非従来型の量子臨界性をもたらすと考えられる。

この博士論文では、まず従来の並進対称性を破る相転移の場合に、一次相転移の近接効果によって非従来型の量子臨界性が現れることを明らかにした。従来の量子臨界点は絶対零度で連続相転移が起きる点であるが、この連続相転移が一次相転移に切り替わるところで量子三重臨界点という非従来型の量子臨界点が現れる。この量子三重臨界点の性質を従来のスピン揺らぎ理論を拡張することで明らかにして、非従来型の非フェルミ液体的挙動が現れることを示した。そして、この量子三重臨界性が、重い電子系の典型物質である YbRh_2Si_2 の反強磁性量子臨界点近傍で観測されている非従来型の量子臨界性をよく説明することを示した。

また、並進対称性の破れを伴わない相転移の典型例である金属-絶縁体転移にも、一次相転移の近接効果によって、非従来型の量子臨界性が現れることを明らかにした。具体的には、金属-絶縁体転移を記述する最も基礎的なモデルであるハバード模型にたいして、平均場近似を行い、金属-絶縁体転移の臨界性を系統的に調べた。その結果、絶対零度では、ある領域においてフェルミ面の有無で特徴づけられる金属-絶縁体間の連続相転移が生じることがわかった。さらに、この連続相転移が電子間の相互作用やフラストレーションの効果によって一次相転移に切り替わるところで「限界量子臨界点」という非従来型の量子臨界点が現れることを見出した。この限界量子臨界点では、フェルミ面のトポロジーの変化のために、従来の臨界現象とは全く異なる普遍性クラスが現れることを明らかにした。さらに、この限界量子臨界点の臨界性が有機導体 $\kappa\text{-(ET)Cu[N(CN)}_2\text{]Cl}$ において観測されている金属-絶縁体転移の非従来型の臨界性をよく説明することを示した。

今回の博士論文の研究で明らかにした、これら二つの非従来型の量子臨界点の臨界性は量子臨界現象の研究に新しい視点を加えるだけでなく、強相関電子系の未解明の問題である、高温超伝導などの特異な現象を解明する上で重要な役割を果たすことが期待される。