

【領域番号】 重い電子の秩序化

【領域略称名】 2001

【領域代表者（所属）】 上田和夫（東京大学・物性研究所・教授）

研究の学術的背景

我が国における磁性研究の歴史は古く、本多光太郎による KS 鋼磁石の発明をはじめ、戦前から世界的な水準に到達していた。戦後は理論研究を中心に発展し、永宮の反強磁性共鳴理論、金森の強磁性理論、糟谷・芳田の RKKY (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida) 相互作用、久保の線形応答理論、守谷の弱強磁性および SCR 理論、そして近藤効果など、日本発の概念に枚挙の暇がない。

物質科学の進展には、新物質探索、物性測定、理論の三つの要素が不可欠であるが、我が国の磁性研究は、そのいずれを取っても世界最先端の水準にある。この分野における現代の焦点として「重い電子系」がある。以下に詳しく述べるように、「重い電子系」の問題には物質科学の本質的課題が凝縮された形で存在し、本新学術領域研究の目的とする**重い電子系の形成と秩序化**の解明は磁性研究にとどまらず、物質科学全般にとって重要な意義を持っている。

重い電子系の源となった近藤効果は、磁性不純物を含む金属の抵抗極小現象に端を発する問題であったが、その本質は局在磁気モーメントが伝導電子と混成して生じる非磁性基底状態の形成過程における異常である。その全貌の解明にも日本の研究者が大きく貢献し、現在では金属中の孤立磁性原子の振る舞い（不純物近藤効果）はほぼ完全に理解されたとと言える。

一方、希土類あるいはアクチノイドが結晶格子を形成している場合の磁気モーメントの振る舞いは、遙かに複雑である。まず、伝導電子のスピンの分極を介した RKKY 相互作用によって磁気モーメントは秩序化しようとする。しかし、同時に伝導電子との混成は、近藤効果による局在モーメントの遮蔽を引き起こす。Ce や U を含む金属間化合物では、混成強度の増大とともに後者の作用が優勢になって、基底状態は磁気秩序状態から非磁性のフェルミ液体状態へと移り変わる、すなわち、量子相転移することがわかっている。このとき、RKKY 相互作用と近藤効果とが拮抗する量子臨界点付近において、有効質量の極めて大きいフェルミ液体状態が実現することが知られており、「重い電子系」と呼ばれている。重い電子系では、遍歴と局在の狭間で顕在化する量子臨界揺らぎが非フェルミ液体状態や非 s 波の異方的超伝導などの概念的に新しい現象を生み出すと考えられている。

このような重い電子系の研究は、約 30 年前、ドイツの Steglich らによる CeCu_2Si_2 の超伝導転移の発見に遡ることができる。そこで初めて、大きな低温電子比熱の起源が重いフェルミ準粒子であることが実証された。以来、重い電子系研究は着実な進歩を遂げてきたと言えるが、未知の物質を開発し、その物性を明らかにしつつ新機能の発現を探索するという現代物質科学の潮流の中で最近著しい進展があり、新たな発展期を迎えつつある。まず、重い電子系最大の特徴であるバラエティーに富んだ異方的超伝導体は、現在、30 を越えるものが見つかっているが、その半数以上は今世紀になって発見されたものであり、そのうち日本人研究者によって発見された「国産」の重い電子超伝導体は 8 個に上る。その新奇超伝導体探索のフロンティアは現在、超ウランにまで拡大しており、研究対象は格段に広がってきている。また、様々な新奇物質が見つかる中で、従来の磁気秩序や軌道秩序では理解できない新しい秩序相が存在することが次第に明らかになってきた。これらの中には、強いスピン軌道相互作用のもとで発現するスピンと軌道の複合自由度である「多極子」が秩序化したもの、すなわち、八極子や十六極子などの高次多極子の自発的秩序状態が我が国の研究者によって明らかにされてきた。

一方、重い電子形成のメカニズムとして従来の電子間相互作用とは別の、「ラットリング」と呼ばれる非調和性局所フォノンに由来するものの存在が、最近改めて注目されている。「重い」という言葉は電子の有効質量の増大を意味しているが、その原因としては、当初から、電子格子相互作用と電子間相互作用の二つが考えられていた。しかし、強相関電子系という言葉に端的に表れているように、これまで後者が強調され、前者は副次的位置に止められることが多かった。重い電子系の形成と秩序化の問題では、再び両者をとともに考える必要が明らかになりつつある。

このような新しい重い電子状態や多様な秩序相を理解するには、従来の f 電子の遍歴・局在（磁気秩序）の対立という二元論的描像だけでは不十分であり、電荷とスピンの f 電子の軌道や格子の自由度（フォノン）も絡み合った多自由度性が重要な要素であることがわかってきた。すなわち、遍歴・局在という伝統的な横系に、複合多自由度性という新たな縦系が絡まりあって、重い電子系の新現象、新機能が発現すると考えられるのである。

さらに、測定技術の面でも近年、著しい進歩があった。まず、我が国の研究者の努力によって光電子分光の分解能は飛躍的に向上し、現在 $100\mu\text{eV}$ （温度換算で約 1K）に迫りつつある。これは、まさに重い電子状態の直接観測が可能になりつつあることを意味している。また、角度分解の磁場中熱伝導度測定や磁場中比熱測定による異方的超伝導のギャップ構造を探る実験、多極子秩序構造を探る測定技術にも格段の進歩があり、これまで以上に重い電子系の秩序状態に対する微視的・定量的議論が可能になりつつあった。

以上が、本新学術領域研究に応募した 2008 年時点の状況であった。

研究の目的

本領域で解明を目指している重い電子系の物理は、f 電子の遍歴・局在という従来の重い電子描像に、軌道（多極子）や格子振動に由来する複合多自由度が絡み合った未知の体系であり、その解明には、結晶育成と様々な手法による高度な実験、および理論的解釈の密接な連携が必要である。一方、重い電子系各分野における最近の進展の多くは我が国の研究者の成果によるものであり、本領域研究を推進することによって格段の進展が期待される。したがって本領域は「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究等の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」に該当する。

また、重い電子系の物理はそれ自体、物性物理学における基本的な重要課題であるばかりでなく、超伝導や磁性、金属絶縁体転移、あるいは格子物性をもカバーする、物性物理のあらゆる重要な基本要素を含んでいる。そして、その解明には、実験技術や理論的解析手法ともにチャレンジングな研究が要求される。したがって、その成果や研究手法は、物性物理学、ひいては物質科学全般の基礎研究の一層の進展に寄与することが期待される。

これらを念頭において、本新学術領域研究では、重点的に推進する研究項目として次の 4 つを設定した。

（1）重い電子形成の直接観測：反強磁性量子臨界点近傍の重い電子状態について、純良単結晶育成および圧力による磁気秩序温度の制御により、反強磁性から遍歴状態に至るフェルミ面の変化を高分解能光電子分光（レーザー光源や放射光源）・ドハース実験・バンド構造計算の密接な協力体制のもとに解明し、併せて超伝導発現との関係を明らかにする。この目的の遂行のために **A01 フェルミオロジー班**を組織し、A01-001「純良単結晶育成とドハース・ファンアルフェン効果によるフェルミ面の研究」（研究代表者：播磨尚朝）と A01-002「先端光電子分光による f 電子系化合物の高精度バルクフェルミオロジー」（研究代表者：横谷尚陸）の 2 つの計画班を設置した。

（2）ラットリングによる新奇物性：ゲストイオンを内包する比較的軽い元素から成るカゴ状構造をもつ物質において、ラットリング（非調和性局所フォノン）の重要性が指摘されている。新しいラットリング物質を創製し、ラットリングと電子自由度の複合化による重い電子系の形成の可能性、さらには非調和性フォノンに媒介される“高温”超伝導の可能性も追求する。この目的の遂行のために **A02 ラットリング班**を組織し、A02-001「ラットリング物質の探索・創製と電子・格子物性の研究」（研究代表者：高島敏郎）と A02-002「巨大振幅原子振動がもたらす新しい電子相の動的分光法による研究」（研究代表者：藤秀樹）の 2 つの計画班を設置した。

（3）重い電子系の新奇凝縮相の探索と理解：Pr や Yb などを含む新たな物質開発や加圧効果、人工格子技術を利用して新しい f 電子系超伝導体を創製し、電子輸送現象測定、熱測定、磁気測定、高周波測

定、核磁気共鳴およびトンネル顕微鏡測定を通してエキゾチックな超伝導状態を解明する。また、スピンと軌道の複合自由度である多極子の新しい秩序状態や多極子の量子臨界現象、多極子近藤効果などの発見と解明を目指す。さらに多極子由来の新たな重い電子形成機構や超伝導機構の可能性を探る。この目的の遂行のために **A03 秩序相班** を組織し、A03-001「新奇超伝導相の発見と解明」（研究代表者：石田憲二）と A03-002「多極子自由度に由来する秩序と揺らぎの研究」（研究代表者：榊原俊郎）を設置した。

(4) 重い電子系の理論：以上の実験を理論的にサポートすると共に、重い電子系の超伝導および磁性に関する新概念の確立を目指す。領域内のバンド計算研究者と協力して構築した多体 f 電子モデルを、場の量子論的手法や計算物理的手法を駆使して解析し、磁性や超伝導現象、量子輸送現象の研究を行うとともに、新しい理論計算手法の開発も行う。この目的の遂行のため、**A04 理論班**「f 電子の多自由度性に創出する新奇な量子秩序と超伝導の理論」（研究代表者：堀田貴嗣）を設置した。