

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008 ～ 2012

課題番号：20102001

研究課題名（和文） 重い電子系の形成と秩序化の総括

研究課題名（英文） Emergence of Heavy Electrons and Their Ordering

研究代表者

上田 和夫 (UEDA KAZUO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：70114395

研究成果の概要（和文）：

遍歴性の強い伝導電子と局在性の強い電子系の相関が織りなす重い電子系の多様な秩序状態の研究において、長年の謎とされていたウラン化合物 URu_2Si_2 の隠れた秩序、 UPt_3 の超伝導状態の秩序変数の解明に向けて格段の進歩があった。プラセオジムを含むカゴ状構造を持つ重い電子系物質が合成され新しい多極子秩序やそれと関連した超伝導状態が発見された。重い電子系で人工超格子構造の作成に初めて成功し、その超伝導と次元性の相関について新たな知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

The long-standing problems of the so-called hidden order in URu_2Si_2 and characterization of the superconducting order parameter of UPt_3 have been studied extensively in this project. New cage materials including Pr have been synthesized and multi-pole ordering and superconductivity have been discovered. Epitaxial growth of several heavy Fermion materials with super-lattice structures has been made successfully for the first time, which leads to a new avenue to approach the problem of dimensionality of heavy Fermion superconductors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009年度	15,000,000	4,500,000	19,500,000
2010年度	15,500,000	4,650,000	20,150,000
2011年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2012年度	17,200,000	5,160,000	22,360,000
総計	66,200,000	19,860,000	86,060,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：強相関電子系・重い電子系・物性実験・物性理論・磁性

1. 研究開始当初の背景

重い電子系では、遍歴性の強い伝導電子と局在性の強い f 電子が共存している。両者の相互作用からは、f 電子の磁気モーメントを遮蔽しようとする近藤効果とサイト間の相関の発達によって磁気モーメントを安定化しようとする RKKY 相互作用と云う、互いにあい反する二つの効果が生じる。両者が拮抗した点が磁気量子臨界点で、有効質量の増大が見られるほか、通常の BCS 型とは異なる新しい型の超伝導が実現する。一般には様々な秩序相が出現することに対応して、それぞれの相の特徴を反映した量子臨界性を示すことが期待される。重い電子系の新学術領域を申請したころは重い電子系における反強磁性量子臨界性の重要性がほぼ確立し、新しいタイプの量子臨界性の探索が日程に上るころであった。一般に金属における有効質量の増大は電子間の多体相互作用と、電子格子相互作用がその源であるが、その当時までの重い電子系の研究ではもっぱら電子間相互作用が注目され、電子格子相互作用は副次的な位置に留まっていた。特に有効質量の大きな重い電子系の性質を示すカゴ状物質の発見は、両者をともに考慮することの重要性を改めて示唆していた。

2. 研究の目的

当新学術領域研究では、5年間の期間中に進展を目指すべき課題として次の5つを重点として掲げた。

(1) 重い電子形成の直接観察。

重い電子の準粒子状態の温度や圧力による変化を、高分解能光電子分光(レーザー光源および放射光源)、ドハース・ファンアルフェン効果などによって直接観測し、バンド構造計算や動的平均場近似などの理論計算と比較しその特徴を明らかにする。

(2) ラットリングによる新奇物性。

比較的軽い元素からなるカゴ状構造の中にゲストイオンを内包する物質において、ラットリングと呼ばれる非調和性局所フォノンの重要性が認識されている。ラットリング物質を合成し、ラットリングと電子自由度の協働による重い電子形成の可能性を追求する。

(3) 重い電子系超伝導体の新奇超伝導状態の理解。

新奇物質開発や加圧効果、人工超格子作成技術を利用して新しい f 電子系超伝導体を創成し、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などを通して新しい超伝導状態の特徴を解明する。

(4) 新多極子相の探索と理解。

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秩序に伴う量子臨界現象、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奇の重い電子形成の機構や多極子揺らぎ由来の超伝導を探索する。

(5) 重い電子系の理論。

以上のような実験的研究を理論的にサポートすると同時に、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。物質に立脚した発展を追求するために、バンド計算研究者と協力して構築する多体 f 電子モデルを、場の量子論的方法や計算物理的収容を駆使して解析し、強相関電子系の磁性や超伝導現象に関する新たなアプローチを開発する。

3. 研究の方法

物性物理学の進展には、良質の物質合成、低温での精密物性測定、新概念の理論的考察の三者が有機的に結合することが必須である。

この三者と上記の5本の柱を縦糸横糸として
組み合わせる形で、計画研究を

- A01-001 班 フェルミオロジー班
- A01-002 班 高分解能光電子分光班
- A02-001 班 ラットリング物質の創成班
- A02-002 班 ラットリング現象の解明班
- A03-001 班 新超伝導相班
- A03-002 班 新多極子相班
- A04 理論班

と構成した。

重い電子系では、多様な物質群が多様な現象を示すことが大きな特徴であり、その研究の発展には個性豊かな研究者による物質合成、物性測定、理論研究が広範に展開され、それらの研究者間の連携が必要である。このため、公募研究の採択件数の枠を大きくとり上記計画研究との有機的な結合を目指した。

4. 研究成果

当新学術領域研究の成果として、国内での学会、研究会、また国際会議における発表や学術論文として出版された成果については、成果報告書に記載する予定で現在取りまとめ中である。

重い電子系における長年の謎の一つである URu_2Si_2 の隠れた秩序は当新学術領域において集中的に研究がなされ、最終的解決にはまだ時間が必要であるが、格段に研究が進んだ。 UPt_3 の超伝導秩序変数についても重要な進展があった。 $\text{YbCo}_2\text{Zn}_{20}$ は特に有効質量の大きな物質として知られていたが、同じ 1-2-20 構造をもつ Pr の系が合成され多極子秩序と超伝導が発見された。この系に限らず、重い電子系の物質群が従来の Ce, U 化合物から Yb, Pr 化合物に広がったこともこの領域の成果の一つである。重い電子系のエピタキシャル成長はこれまで成功例の報告はなかったが、 $\text{CeIn}_3\text{-LaIn}_3$ や $\text{CeCoIn}_5\text{-YbCoIn}_5$ の人工超格子

の作成にも成功した。

5. 主な発表論文等

[その他]
ホームページ等
「重い電子系の形成と秩序化」
<http://www.heavy-electrons.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 和夫 (UEDA KAZUO)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：70114395

(2) 研究分担者

榊原 俊郎 (SAKAKIBARA TOSHIRO)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号：70162287

堀田 貴嗣 (HOTTA TAKASHI)
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：00262163

(3) 連携研究者

三宅 和正 (MIYAKE KAZUMASA)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：90109265

播磨 尚朝 (HARIMA HISATOMO)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：50211496

横谷 尚睦 (YOKOYA TAKAYOSHI)
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号：90311646

高島 敏郎 (TAKABATAKE TOSHIRO)
広島大学・大学院先端物質科学研究科・教授
研究者番号：40171540

籾 秀樹 (TOU HIDEKI)
神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：60295467

石田 憲二 (ISHIDA KENJI)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：90243196

(4) 評価者

Joe D. Thompson
ロスアラモス米国立研究所・Laboratory
Fellow

秋光 純 (AKIMITSU JUN)
青山学院大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：80013522

斯波 弘行 (SHIBA HIROYUKI)
東京工業大学・名誉教授、東京大学・名誉
教授
研究者番号：30028196

佐藤 英行 (SATO HIDEYUKI)
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：80106608

北岡 良雄 (KITAOKA YOSHIO)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：70110707