

重い電子の秩序化

ニュースレター



文部科学省科学研究費補助金 新学術領域研究（研究領域提案型）
平成 20 年度～平成 24 年度

重い電子系の形成と秩序化

Vol. 1, No.1（2009 年 3 月）通算第 1 号

目次

新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」発足にあたって	上田和夫	2
新学術領域研究発足に寄せて		
重い電子の行く末	北岡良雄	3
Opportunities of Heavy-Electron Research	Joe D. Thompson	5
研究組織		6
関連情報、今後の予定など		8

新学術領域研究「重い電子系の形成と秩序化」発足にあたって



領域代表 上田和夫
東京大学物性研究所

電気抵抗極小の現象に説明をあたえた近藤効果の原論文が出版されてから今年で45年になる。その後近藤効果の研究は物性物理学の一大潮流となったが、その源流を形作ったRuderman-Kittel-槽谷-芳田の仕事から数えるとすでに半世紀が経過したことになる。局在性が強くクーロン相互作用が重要な電子と、遍歴性が強い伝導電子系が一体となって繰り返される強相関の物理は単一サイトの近藤効果から、局在性の強い電子も格子を形成している重い電子系の研究へとその重点を移した。今年度から5年間の予定で採択された当新学術領域研究は、その課題名からも分かるように、重い電子系の研究に真正面から取り組もうとするものである。

重い電子系を主たる対象とする研究プロジェクトは、それぞれの時期における重要トピックスに焦点を当て、装いを変えつつ展開されてきた。最近の例では、平成11年度から13年度にかけて特定領域研究(B)「軌道の秩序とゆらぎ」が、平成15年度からは特定領域研究「充填スクッテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開」が平成19年度まで推進された。スクッテルダイトでは、希土類金属イオンは12個のプニクトゲンで作られる二十面体構造の中に収容されている。この二十面体は正二十面体から多少歪んでいるもののそれに近い構造を持ち、近似的ではあるが局所的に高い対称性が高次の多極子やラットリングと呼ばれる非調和振動の重要性の背後にあると考えられる。こうした研究の展開によって、これまで議論されてきた磁気量子臨界性による重い電子系の形成に加え、多極子秩序に関連した量子臨界性、さらには非調和格子振動による重い電子系の形成が重要な研究テーマとして浮上している。

放射光源やレーザー光源を用いた光電子分光の最近の発展に典型的に見られるように、近年重い電子状態を観測する実験手段に長足の進歩がみられる。いまやお家芸とも言えるドハース・ファンアルフェン効果などとともに、重い電子状態の形成過程とそこから各種の秩序が形成される様相を実験的に観測することが可能になってきた。

重い電子系の基底状態は、電荷秩序、磁気秩序をふくむ各種の多極子秩序、超伝導状態など多様性に満ちている。最近の研究で特筆されるべきことは、今世紀に入ってから重い電子系の超伝導体が次々と発見されていることであろう。一方では超ウラン元素へと物質の範囲を広げ、他方では反転対称性を満たさない金属における超伝導など超伝導研究に関しても新しい潮流が起き始めている。

重い電子系は典型的な基礎科学であるが、以上で見てきたように新しい物質、新しい現象、新しい概念の宝庫である。オリジナリティーの高い研究を展開して物質科学の最前線を切り開いていく覚悟をもってこの新学術領域研究に取り組みたいと思う。

～新学術領域研究発足に寄せて～

重い電子の行く末



北岡良雄
大阪大学大学院基礎工学研究科

一昨年(2017)の4特定領域合同研究会「超伝導が拓く物性科学の最前線」では、s, p, d, f 電子系などバラエティーに富んだ数多くの超伝導物質を統一的に眺め、あわせて周辺領域の最新成果を俯瞰することが意図されました。異方的超伝導特性についての研究が深化していることが実感されるとともに、横断的な研究の連携と協奏の重要性が注目されます。これらの4特定領域のうち「充填スツテルダイト構造に創出する新しい量子多電子状態の展開」(佐藤特定)および「新しい環境下における分子性導体の特異な機能の探索」(高橋特定)が昨年度に終了し、これら特定領域研究での成果を発展させ、当該領域の研究内容の刷新を目指した【新学術領域研究(研究領域提案型)】「重い電子系の形成と秩序化」(上田新学術)および「分子自由度が拓く新物質科学」(鹿野田新学術)が採択されたことは大変に喜ばしいことです。昨年、継続して開催された6特定領域合同研究会「スピンの拓く物性科学の最前線」では、磁性から超伝導に至るまで本質的な役割を果たしている「スピン」というキーワードのもとに、最新成果を俯瞰すること、また最近応用を含めて多くのめざましい発展が生まれていることに着目し、

6 特定領域:

- 異常量子物質の創製—新しい物理を生む新物質(青山学院大学・秋光 純) H16-20
- スーパークリーン物質で実現する新しい量子相(東京大学・福山 寛) H17-21
- 100 テスラ領域の強磁場スピン科学(東北大学・野尻 浩之) H17-21
- スピン流の創出と制御(東北大学・高梨 弘毅) H19-22
- 配列ナノ空間を利用した新物質科学—ユビキタス元素戦略(東北大学・谷垣 勝己) H19-23
- フラストレーションが創る新しい物性(大阪大学・川村 光) H19-23

が一堂に会し、合同研究会が開催されました。巷では研究領域の「選択と集中」とかまびすしいですが、物質の科学は互い連携・協奏しており、「深い目利きと高い見識」のもとで発展していくものと考えられます。今後の我が国の物質科学研究の健全な発展に多いに期待したいと思います。

さて、小生は、上述した2新学術研究領域および6特定領域の研究対象に大いに関心をもっています。気ままな横断的研究志向のためか?どの特定にも参加できず、評価委員に棚上げされています。評価などは、めっそうもないことですので、まだまだ血気盛んと誤解している小生は、ウィンドショッピングで歩き廻るより、それぞれの名(迷)店に入り込み、掘り出し物がないか目利きをすることを楽しませていただこうと思います。

【新学術領域研究(研究領域提案型)】「重い電子系の形成と秩序化」(上田新学術)では、遍歴・局在という伝統的な横糸と電荷とスピンに軌道や格子の自由度も絡んだ多自由度性という新たな縦糸が織りなす系を舞台に、重い電子形成の直接観測、非調和格子振動による新奇物性の理解、新超伝導相や新多極子相の探索と理解、磁性と超伝導の新概念創出を目標とされています。近年続々

と発見される新しい超伝導や磁性現象を理解するには、遍歴・局在の対立という二元論的な描像は不十分であり、多自由度性が重要となるとの問題意識は、「重い電子の行く末」の重要な道しるべとなると考えられます。一方で、長年の超伝導研究オタクから見た「重い電子の行く末」を考える上で積み残された視点を「偏見」を恐れず、吐露したいと思います。領域名にある「重い」という言葉は、電子の有効質量の増大を意味しますが、その原因としてこれまで、電子間相互作用が注目され、f 電子の遍歴（近藤効果）と局在（RKKY 相互作用）の拮抗に基づく理解が進んできました。f 電子系は多彩で風変わりな超伝導が発現する宝庫です。反強磁性、強磁性、隠れた秩序、f 電子数およびその局在性、および結晶構造が絡み合って実に多様です。最近では、このようなマクロな物性の個性を生み出す背景には、多バンド効果が重要であると認識されています。そのような個別性を超えて、重要な点は、超伝導対の形成を媒介する機構としては、以下のような可能性があるかと思えます。

- 磁気秩序の消失後に発現する強結合超伝導：磁気臨界スピンゆらぎ
- 磁気秩序とは関係なく発現する超伝導：価数（電荷）揺らぎ
- 局所的な四重極自由度が残存する系での強結合超伝導：四重極ゆらぎ
- 磁気秩序と共存する超伝導：磁気モーメントの縦揺らぎ、磁気励起子

電子対の形成を媒介するこのような「ゆらぎ」と多バンドの存在が多様な超伝導を出現させると小生は、考えます。従って、今後の課題は、発現機構をミクロな観点から同定するために、「的を絞った系統的な実験を深化」させていくことであると思えます。結晶反転対称性がない系の圧力誘起超伝導において、非常に大きな上部臨界磁場が出現することが見出されて、もうこれ以上の風変わりな超伝導は出ないかもしれない？ と誤解している小生にとっては、残された道は、多彩な発現機構の同定への地道な研究の積み重ねの方策を探るしかないのかもしれない。

小生が思いめぐらす「重い電子の超伝導研究の行く末」とは？

超伝導転移温度は、如何に上がるかに的を絞って、Ce-115 系および Pu-115 系の重い電子系「高温超伝導」に着目してみましょう。Ce-115 系では、重い電子から形成される準 2 次元的なフェルミ面が反強磁性と超伝導の発現に関与しています。加圧下の相図は、両者の共存相を経て、量子臨界点を超えてから量子臨界的なスピン揺らぎが優勢となった常伝導状態を舞台として、Ce 系では最も高い T_c をもつ強結合超伝導が出現します。驚くべきことに、Pu-115 系では重い電子系では最高の $T_c = 18.5\text{K}$ にまで達します。Ce 系と同様にスピン揺らぎが顕著であることも共通しています。では、Ce 系よりも 1 桁も高い T_c が発現するのはなぜでしょうか？ 状況証拠としては、f 電子数の違いがあります。Ce 系は 4 f 電子数が Ce 原子当たり 1 個であるのに対して、Pu 系では、5 f 電子数が 5 個と多く、また、混成（遍歴性）も大きいことです。さらに、スピン-軌道相互作用が極めて大きいために、「j-j 結合」を仮定すると 6 個の軌道に 5 個 f 電子が占有することになります。この観点からは、高温超伝導体での電子ドープ系（Ce 系）とホールドープ系（Pu 系）との関係を思い出させます。強相関電子で形成される準 2 次元的な電子状態を背景として、反強磁性と超伝導の起源を、同じく磁氣的相互作用とする場合に、高い超伝導転移温度を期待できるのではないかと推測されます。多バンド化に果たす強相関効果とスピン-軌道相互作用の相乗効果は、未だよく理解が進んでいないと思うのですが、定性的には、同一バンドでの強相関効果によって反強磁性と超伝導を協奏させるというのが、今後の新超伝導物質探索の展望のように思われます。

～新学術領域研究発足に寄せて～

Opportunities of Heavy-Electron Research



Joe D. Thompson
Los Alamos National Laboratory

Understanding the heavy-electron state and broken symmetries that emerge from strong electron correlations poses an exciting opportunity to advance the frontier of condensed matter science as well as other fields of physics. Examples of materials that exhibit these behaviors have proliferated during recent years, with many of these discoveries the result of ‘guided serendipity’ -- in the sense that we have developed general ideas of where to look for new materials and phenomena but what we find sometimes is even more interesting than what we originally had in mind. Unconventional superconductivity in skutterudites and PuCoGa_5 as well as multipolar and ‘hidden’ orderings illustrate only a few of the many surprises that have come from the search for new materials and new physics in these systems. With each of these discoveries, we have become more informed but also more appreciative of the remarkable complexity that underlies the heavy-electron state. Bringing clarity to this complexity is a significant challenge that requires coordinated efforts in materials discovery, measurement, and the creation of new theoretical frameworks.

The phase space of problems to be solved is so large that even a coordinated effort cannot solve them all. Of these problems, however, one that stands out as particularly important but also unifying is superconductivity. Arguably, the discovery of superconductivity in CeCu_2Si_2 over 30 years ago marked the beginning of the field of heavy-electron research, and though new examples have been found, we still do not have a microscopic theory of the pairing mechanism or possibly mechanisms. Like CeCu_2Si_2 , superconductivity in several of these new examples develops in proximity to magnetism, suggesting a magnetic pairing mechanism, but superconductivity in others may be related to electron-rattling interactions, a valence instability, fluctuations of multipole order, or perhaps to a hidden order, such as in URu_2Si_2 . Though there often is circumstantial evidence linking some nearby instability to the emergence of superconductivity, it is difficult to prove a causal relationship, if there is one. Certainly, all metals have phonons but not all metals are superconductors, and neither are all heavy-electron systems. Understanding why some superconduct and others do not can be just as important in identifying the pairing mechanism as it is for understanding the nature of the nearby instability and of the correlated state out of which they develop. Of course, the corollary is an essential component of research critical to revealing the emergence of heavy electrons.

In several respects, heavy electrons and their orders have analogs in high-energy physics. One of the many beauties of heavy-electron systems is that we can explore this physics in ways unimaginable for the high-energy community. With a slight stretch of this analogy, it is not unreasonable to consider each heavy-electron material as a nanouniverse created, controlled, and studied in the laboratory. Each compound gives new but also unifying perspectives of ‘cosmic’ organization that can be revealed experimentally and modeled theoretically. These are not simple tasks. A program of discovery science, as envisaged in the project ‘Emergence of Heavy Electrons and Their Ordering’, will enable us to go beyond guided serendipity and prevail in the task. Unveiling the hidden order in URu_2Si_2 , how superconductivity emerges in crystals without inversion symmetry, and the influence of multipole phases and lattice anharmonicity on exotic superconductivity will mark major milestones of progress, possible only with the availability of high quality single crystals of known and new materials and with creative insights from theory.

研究組織（平成20年度）

領域代表：上田和夫（東京大学物性研究所・教授）

総括班

研究課題名：重い電子系の形成と秩序化の総括

研究課題番号：20102001

研究代表者：上田和夫（東京大学物性研究所・教授）領域代表

研究分担者：榊原俊郎（東京大学物性研究所・教授）領域代表補佐・A03-002 班代表

堀田貴嗣（首都大学東京大学院理工学研究科・准教授）事務担当・A04 班代表

連携研究者：三宅和正（大阪大学大学院基礎工学研究科・教授）領域代表補佐

播磨尚朝（神戸大学大学院理学研究科・教授）事務担当補佐・A01-001 班代表

横谷尚睦（岡山大学大学院自然科学研究科・教授）A01-002 班代表

高島敏郎（広島大学大学院先端物質科学研究科・教授）A02-001 班代表

藤 秀樹（神戸大学大学院理学研究科・教授）A02-002 班代表

石田憲二（京都大学大学院理学研究科・教授）A03-001 班代表

評価者

秋光 純（青山学院大学大学院理工学研究科・教授）

北岡良雄（大阪大学大学院基礎工学研究科・教授）

佐藤英行（首都大学東京大学院理工学研究科・教授）

斯波弘行（東京工業大学名誉教授）

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

計画班

A01-001 フェルミオロジー班

研究課題名：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

研究課題番号：20102002

研究代表者：播磨尚朝（神戸大学大学院理学研究科・教授）研究の統括と電子構造計算

研究分担者：大貫惇睦（大阪大学大学院理学研究科・教授）単結晶育成とドハース実験

青木晴善（東北大学大学院理学研究科・教授）単結晶育成とドハース実験

芳賀芳範（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター・研究主幹）単結晶育成とドハース実験

A01-002 フェルミオロジー班

研究課題名：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

研究課題番号：20102003

研究代表者：横谷尚睦（岡山大学大学院自然科学研究科・教授）研究の統括と高分解能光電子分光

研究分担者：山上浩志（京都産業大学大学院理学研究科・教授）5f 電子系軟 X 線光電子分光

関山 明（大阪大学大学院基礎工学研究科・助教）4f 電子系軟 X 線光電子分光

連携研究者：辛 埴（東京大学物性研究所・教授）レーザー光電子分光

A02-001 ラットリング班

研究課題名：ラットリング物質の探索・創製と電子・格子物性の研究

研究課題番号：20102004

研究代表者：高島敏郎（広島大学大学院先端物質科学研究科・教授）研究の総括とラットリング物質の創製

研究分担者：菅原 仁（徳島大学総合科学部・准教授）ラットリング物質の創製と低温物性研究

関根ちひろ（室蘭工業大学工学部・准教授）ラットリング物質の高圧合成と低温物性研究

武田直也（新潟大学工学部・教授）ラットリング物質の創製と重い電子状態の研究

連携研究者：伊賀文俊（広島大学大学院先端物質科学研究科・准教授）ラットリングホウ化物の創製と電子・格子物性の研究

廣井善二（東京大学物性研究所・教授）ラットリング酸化物の創製と超伝導の研究

A02-002 ラットリング班

研究課題名：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

研究課題番号：20102005

研究代表者：藤 秀樹（神戸大学大学院理学研究科・教授）研究の総括と核磁気共鳴実験

研究分担者：鈴木孝至（広島大学大学院先端物質科学研究科・教授）超音波分光測定

宇田川眞行（広島大学大学院総合科学研究科・教授）ラマン散乱測定

岩佐和晃（東北大学大学院理学研究科・准教授）中性子散乱実験

李 哲虎（産業技術総合研究所・主任研究員）中性子非弾性散乱実験

筒井智嗣（高輝度光科学研究センター・副主幹研究員）放射光実験と X 線非弾性散乱実験

連携研究者：アルフレッド バロン（理化学研究所・准主任研究員）高分解能 X 線非弾性散乱実験

宇留賀朋也（高輝度光科学研究センター・副主幹研究員）EXAFS

根本祐一（新潟大学自然科学研究科・准教授）超音波分光測定

A03-001 秩序相班

研究課題名：新奇超伝導相の発見と解明

研究課題番号：20102006

研究代表者：石田憲二（京都大学大学院理学研究科・教授）研究の統括と微視的測定

研究分担者：松田祐司（京都大学大学院理学研究科・教授）輸送現象測定による超伝導状態の研究

神戸振作（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター・研究主幹）超ウラン化合物の核磁気共鳴

佐藤憲昭（名古屋大学大学院理学研究科・教授）試料作成、巨視的測定

井澤公一（東京工業大学大学院理工学研究科・准教授）圧力下の熱測定

古川はづき（お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科・教授）重い電子超伝導体の中性子小角散乱

連携研究者：西田信彦（東京工業大学大学院理工学研究科・教授）異方的超伝導体の STS 実験

A03-002 秩序相班

研究課題名：多極子自由度に由来する秩序と揺らぎの研究

研究課題番号：20102007

研究代表者：榊原俊郎（東京大学物性研究所・教授）研究の統括と極低温磁化測定

研究分担者：吉澤正人（岩手大学大学院工学系研究科・教授）超音波音速測定

徳永 陽（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター・研究副主幹）NMR 実験

連携研究者：上床美也（東京大学物性研究所・准教授）高圧実験

青木勇二（首都大学東京大学院理工学研究科・准教授）試料作成および比熱測定

中辻 知（東京大学物性研究所・准教授）試料作成

A04 理論班

研究課題名：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

研究課題番号：20102008

研究代表者：堀田貴嗣（首都大学東京大学院理工学研究科・准教授）研究の統括と超伝導相の研究

研究分担者：柴田尚和（東北大学大学院理学研究科・准教授）密度行列繰り込み群法による研究

押川正毅（東京大学物性研究所・教授）秩序に関する解析的手法による研究

楠瀬博明（愛媛大学大学院理工学研究科・准教授）多極子相の研究と数値計算手法の開発

連携研究者：倉本義夫（東北大学大学院理学研究科・教授）多極子相の研究

上田和夫（東京大学物性研究所・教授）ラットリングと超伝導の研究

小形正男（東京大学大学院理学系研究科・教授）多軌道系の磁性と超伝導の研究

紺谷 浩（名古屋大学大学院理学研究科・准教授）量子輸送現象の研究

川上則雄（京都大学大学院理学研究科・教授）多軌道系の磁性と超伝導の研究

三宅和正（大阪大学大学院基礎工学研究科・教授）ラットリングと超伝導の研究

ニュースレター編集委員会

委員長：井澤公一

委員：芳賀芳範、関山明、関根ちひろ、岩佐和晃、青木勇二、楠瀬博明

アドバイザー：播磨尚朝 事務担当：堀田貴嗣

領域名称について

日本語：重い電子系の形成と秩序化

日本語略称：重い電子の秩序化

英語：Emergence of Heavy Electrons and Their Ordering

英語略称：Heavy Electrons

領域ホームページについて

平成21年3月末まで、暫定版をご利用ください。

<http://www.comp.tmu.ac.jp/heavy-fermion/>

平成21年4月から、正式版を運用開始予定です。

<http://www.heavy-electrons.jp/>

今後の予定

第1回研究会

平成21年3月9日(月)～11日(水)

東京大学柏キャンパス・柏図書館メディアホール

第2回研究会

平成21年8月18日(火)～20日(木)

広島大学学士会館レセプションホール

第1回重い電子系若手秋の学校

平成21年11月24日(火)～27日(金)

関西セミナーハウス(京都市左京区)

第1回重い電子系国際シンポジウム

平成22年秋

首都大学東京南大沢キャンパス

関連する国際会議

ICM2009：2009年7月26日～7月31日

Karlsruhe, Germany

M²S-IX：2009年9月7日～9月12日

Tokyo, Japan

SCES2010：2010年6月27日～7月2日

Santa Fe, U.S.A.

本新学術領域研究の補助を受けて得られた成果に対する謝辞の例

本新学術領域研究の成果を論文などで出版する際には、次のような謝辞を入れてください。

[欧文例]

This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas

"Heavy Electrons" (No. #####) of The Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology, Japan.

[和文例]

本研究は、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究「重い電子の秩序化」(No. #####)を受けて行われた。

#####には各課題の課題番号が入ります。

JPSJ オープンセレクト費の補助

本新学術領域研究の補助を受けて得られた成果で日本物理学会欧文誌 Journal of The Physical Society of Japan (JPSJ)に投稿したものについて、重要な論文については、オープンセレクトにするための費用を総括班で支出いたします。オープンセレクトにしたいという論文がございましたら、領域事務担当にご連絡ください。総括班において協議の上、オープンセレクトの手続きを行います。なお、JPSJ オープンセレクトについては、JPSJ ホームページをご覧ください。

今後のニュースレター発行予定

年度に2回、9月と3月に発行することを予定しています。創刊号は事務担当者が編集致しましたが、今後は、ニュースレター編集委員会(前頁を参照)で編集を行います。

編集後記

表紙の図は領域の暫定シンボルマークですが、非調和ポテンシャルの上に、衣を着た八極子が浮かんでいます。今後、領域内でシンボルマークのデザインを公募することも検討しておりますので、是非、皆様もお考えください。実験や計算の手を少し休めて、ご自身の研究内容を一つの絵に表すことを考えてみませんか。意外な発見があるかもしれません。(堀田)

重い電子の秩序化ニュースレター

第1巻第1号(通算第1号)

平成21年3月1日発行

発行責任者：上田和夫(東京大学物性研究所)

編集責任者：堀田貴嗣(首都大学東京大学院理工学研究所)

本冊子は、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究(研究領域提案型)「重い電子系の形成と秩序化」の補助を受けて発行されています。