



佐藤憲昭教授

*佐藤憲昭 教授 Noriaki Sato, Prof.
 出口和彦 講師 Kazuhiko Deguchi, Lecturer
 井村敬一郎 助教 Keiichiro Imura, Assist. Prof.

電子の不思議な性質「遍歴・局在デュアリティー」

電場に対する応答（電気伝導）の観点から地球上の物質（結晶）を分類すると、金属と絶縁体（半導体）に分けられます。金属の特徴である「電気を流す性質」は、その中を動き回っている伝導電子の存在によります。この伝導電子を量子力学的に表すと「平面波（ブロッホ波）」となります。つまり、「物質の端から端まで遍歴する電子」は、波の性質を持っていることとなります。一方、磁場に対する応答の仕方でも物質を分類すると、磁石に代表される磁性体と、殆ど磁場に応答しない非磁性体に分けられます。磁性体の起源は、「ある原子上に局在した電子」が持つスピンおよび軌道角運動量です。このような局在電子は、1個2個…と数えられ、粒子的な性質を持つと言えます。

希土類元素やアクチノイド元素に含まれるf電子は、その原子上に局在しているのですが、量子力学の特徴であるトンネル効果（原子間に存在するポテンシャル障壁を通り抜けること）により、僅かながら隣接原子に移動することができます。その結果、f電子は局在性（粒子の性質）と遍歴性（波の性質）を併せ持つようになり、遍歴・局在デュアリティー（2重性）を獲得します。大きなクーロン斥力のため互いに避けあいながら動き回るf電子の状

況は、「大きな有効質量」という概念を用いて表現されず、有効質量の大きな**重い電子（heavy fermion）**から成る系は、以下に紹介するような面白い磁石や半導体を創り出し、「**量子臨界点**と呼ばれるブラックホールのような特異点」などの不思議な性質を示します。

世にも奇妙な磁石

重い電子系の中には、低温に冷やしたとき、電子が“固化”して磁性体になるものや、液体状態（フェルミ液体）のまま絶対零度まで安定に存在するものがあります。いずれの場合にも、クーロン斥力が重要な役割を果たしています。一方、超伝導のクーパー対の形成には引力が必要です。では、重い電子系は超伝導を示し得ないのでしょうか？答えはノーで、重い電子系（強い斥力の系）でありながら超伝導になる物質がこの自然界には存在します。もっと不思議なのは、「磁気秩序と超伝導の共存」を示す**磁性超伝導体**が存在することです（図1参照）。従来の固体物理学の常識では、磁気秩序は超伝導を壊すことはあっても作り出すことはないだろうと考えられていました。しかし、私たちは、反強磁性状態にあるからこそ超伝導が生じること（UPd₂Al₃における**磁気励起子が媒介する超伝導**）を実験的に証明しました。先のデュアリティーとの関連で言えば、f電子の局在成分が磁気秩序を生みだし、遍歴成分が超伝導電流を選びます。

超伝導体と磁石は磁場に対して全く異なる応答を示します。このマイスナー効果（超伝導リニアモーターカーの原理に関連）と呼ばれる物理法則に矛盾する物質、即ち「超伝導になる磁石」（超伝導磁石とは異なります）が21世紀に入り相次いで発見されました。その典型例のUCoGeに対し、私たちは他大学との共同研究により、その超伝導メカニズム（**量子臨界点近傍の磁気揺らぎが媒介する超伝導**）を解き明かしました。

UPd₂Al₃やUCoGeは神様が私たちに与えた「練習問題」に過ぎないかもしれません。さらに大きな難問（UGe₂の超伝導メカニズム）が私たちの挑戦を待っています。

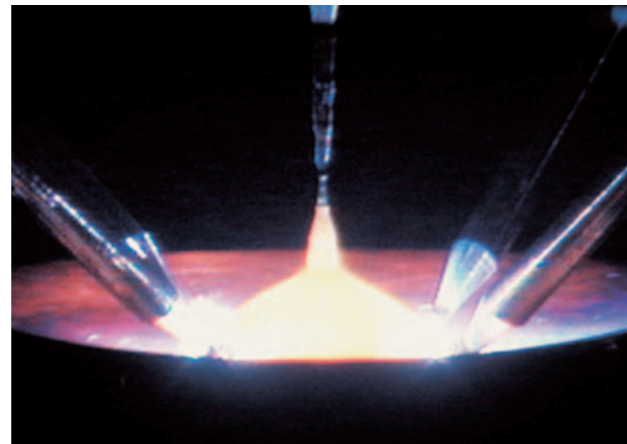


図1：テトラアーク炉による磁性超伝導体の単結晶育成

半導体の中に潜むボース凝縮

強い斥力を感じながら動きまわる「重い電子」がクーパー対を形成するのは至難の業です。これに対し、半導体中の電子は、その抜け穴として生じた「正の電荷を持ったホール（正孔）」と、エキシトンと呼ばれる対を容易に形成します。このエキシトンはボース粒子ですが、クーパー対と同じように、ボース凝縮を起こすのでしょうか？理論的には可能ですが、実験的には未だ確立されていません。

価数揺動半導体として知られるSmSは大気圧では黒色ですが、圧力を加えると（たとえばピンセットなどで表面をひっかくと）金色に転移します（図2参照）。この不思議な物質の内部では、電子とホールが弱く結合したフェルミ統計の世界と、エキシトンの従うボース統計の世界が、圧力によって入れ替わる（クロスオーバーする）ように見え、後者の圧力領域では、**エキシトンのボース凝縮**が期待されます。これが立証されれば、面白い物質世界へ通ずる道が切り開かれるでしょう。

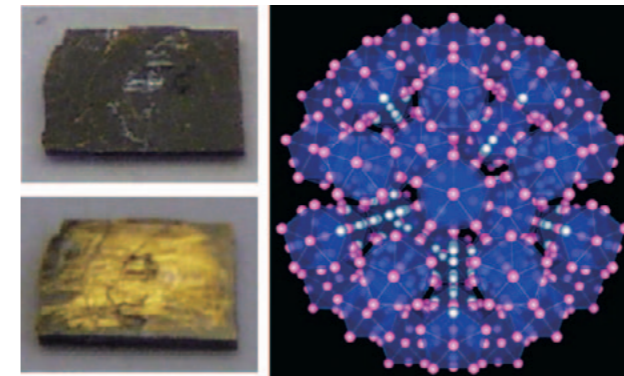


図2：SmSの単結晶（左図）と準結晶の構造模型（右図）



M研のメンバー

結晶を越えて：準結晶における量子臨界性

磁石や超伝導体あるいは半導体の基礎概念は、「結晶の持つ周期性」に立脚しています（例えばブロッホの定理）。この根底を揺さぶったのが1980年代に発見された準結晶（2011年にノーベル化学賞が授与）です（図2参照）。この「第3の固体」の発見以来、幾何学的あるいは数学的理解（黄金律やフィボナッチ数列、ペンローズ・タイリング、フラクタルなど）は大きく進みましたが、電子状態の量子力学的理解は全くと言っていいほど進んでいません。この困難な状況を打開するのではないかと期待されているのが、私たちの「**価数揺動準結晶Au-Al-Yb**における奇妙な量子臨界現象の発見」です。この謎に満ちた物質を調べていくことにより、ブロッホの定理に代わる新しい原理の発見に至るかもしれません。

大学院生の研究活動

大学院生は一人一人個別の研究テーマをもち、独立した研究者として研究を進めています。とはいえ、研究対象の物理（重い電子や価数揺動）は共通しており、また同じ実験装置を使用することになるので、互いに協力し合いながら実験を進めています。主な実験手法は、単結晶育成と物質開発（図1及び2を参照）、および多重極限（極低温かつ高圧）における物性測定のみです。勿論、私たちだけでできる実験は限られており、国内外の大学や研究所との共同研究を積極的に進めています。また、その研究成果は、国内の

学術雑誌だけでなく、海外の著名な雑誌（Physical Review Letters や Natureなど）にも掲載されております。

学部を卒業した学生の多くは修士課程に進学し、修士を修了した学生は、多種多様な民間企業や官庁などに就職しております。博士課程に進学・修了した学生は、民間企業の開発研究者や、国立大学の准教授・助教として活躍しております。皆さんも私達と一緒に世界の最先端で研究をしてみませんか。

<http://emuken.jimdo.com/>

*連絡先 kensho@cc.nagoya-u.ac.jp FAX 052-789-2890

教授：1 / 准教授：0 / 講師：1 / 助教：1 / DC：1 / MC：5