

## 重い電子の不思議な性質を探る

大学院理学研究院・大学院理学院  
(理学部物理学科)

あみつか ひろし  
教授 網塚 浩



出身高校:北海道札幌東高校  
最終学歴:北海道大学大学院理学研究科

専門分野: 物性物理学

研究のキーワード: 重い電子, 極低温, 磁性, 超伝導, 隠れた秩序

HP アドレス: <http://phys.sci.hokudai.ac.jp/LABS/kyokutei/vlt/>

### 重い電子って何ですか？

金属中の電子の集団に生じる状態のひとつです。**重い電子**といっても、金属の下の方に電子が重くなって溜まっているわけではありません。力を作用させたときに加速されにくい、つまり、動きにくい電子という意味です。このような電子の状態は、主にレアアースやアクチノイド元素を含む化合物で生じます。これらの元素は、f 軌道と呼ばれる電子軌道を持ちます。f 軌道を占める電子は、通常は原子内に強く束縛されているのですが、絶対零度近くまで温度を下げると、トンネル効果という量子論の性質が現れて固体中を動き出すようになります。このとき電子同士が互いの運動を強いクーロン斥力で抑え合うため、見かけの質量（有効質量）が大きくなります。このような物質は今では数多く見つかっていて、重い電子の有効質量は、自由な電子の質量に比べて、おおよそ100から1000倍にも達します。1000倍というと、陽子の質量にも匹敵する重さです。

### 重い電子の何を研究しているのですか？

重い電子が生じる詳しいしくみ、そして、重い電子の集団が温度や圧力、磁場などの変化に対して性質を変える現象（相転移）について調べています。例えば、陽子ほどに重くなっているにもかかわらず電気を抵抗なく運ぶ**超伝導**になる、また、複雑な**磁性**状態が超伝導と共存して現れるなど、重い電子は多彩な相転移現象を示します。しかも絶対零度の近くで起こるため、相転移の境界付近の電子状態には量子効果のゆらぎ（不確定性）が強く効き、これまでの理解を超えた金属状態が生じることが知られています。

### どんな装置を使ってどんな実験をしているのですか？

重い電子の状態を調べるには絶対零度近くの**極低温**（きょくていおん）まで物質を冷やす必要があります。そのため液体ヘリウムを使った色々な冷凍機を使います。私が学生の頃には、自分で旋盤加工や溶接作業をして手作りしましたが、今は性能の良い市販の冷凍機があるの

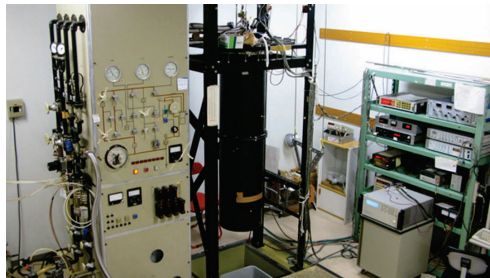


図1 極低温生成装置（<sup>3</sup>He-<sup>4</sup>He 希釈冷凍機）の外観

で、それらをベースに必要な部分のみ工作し、改良して使っています。原子番号2、質量数4のヘリウム ( $^4\text{He}$ ) は、1気圧で沸点が4.2 K。つまり液体ヘリウムに試料をひたせば4.2 Kまで冷やすことができます。さらに液体ヘリウムを減圧すると、沸点が下がり約1 Kまで冷やせます。ここまで冷やした上でさらに $^4\text{He}$ の同位体 $^3\text{He}$ を $^4\text{He}$ に混ぜた混合液体をうまく使うと、量子効果の作用で約0.02 Kの極低温を実験室で実現することができます。このようにして物質を冷却し、比熱や磁化、電気抵抗、熱膨張、弾性定数などの様々な物理量を測定し、物質の性質を調べます。ちなみに、 $^4\text{He}$ は全て海外からの輸入に頼っていて非常に高価です。そのため北大キャンパスの地下には $^4\text{He}$ 回収用の配管が敷き巡らされていて、各施設で使った $^4\text{He}$ をリサイクルしています。北大には全国的にみても数少ない大容量のヘリウム再液化設備があり、極低温での実験を行う環境が整っています。

## 重い電子を持つ物質はどうやって手に入れるのですか？

調べたい物質はほとんど自分たちで作ります。必要な元素を目的の組成で組み合わせ、アルゴンガス中でプラズマ流を発生させて2000℃程度まで加熱し、反応させます。こうしてできた高温溶融状態の金属に、この温度でも溶けないタングステンなどの細い棒をつけて徐々に引き上げていくと、きれいな結晶が成長します。この他、飽和食塩水を冷やして塩の結晶を作るのと同じ原理で、溶けたアルミニウムや亜鉛の中に、必要な元素を溶かし込んで徐々に冷やして結晶化する方法で作ることもあります。炉の中で元素同士が反応して様々な色の光を発しながら新たな物質に生まれ変わる瞬間は、何度見ても飽きない光景です。

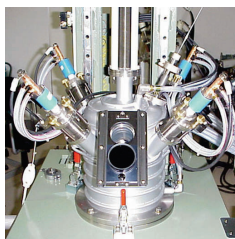


図2 単結晶作成装置

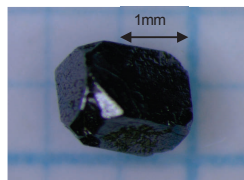


図3 重い電子系単結晶の例

## 次に何を目標しますか？

私がこれまで特に力を入れて取り組んできたのは、**隠れた秩序**と呼ばれる特異な相転移の問題です。比熱や磁化などの巨視的な物理量には相転移の異常がはっきりと見られるのですが、重い電子の集団がマイクロにどの様に変化したのかが、なぜか実験で検知できません。この分野の研究者を四半世紀に渡って悩ませ続けている問題で、様々な新しい電子状態の可能性が議論されています。理論研究者とも協力しながら新しい実験を工夫して、何とかこの問題を解明したいと思っています。また、重い電子を生み出す新しいしくみや、新型の超伝導の発現機構の解明にも取り組んでいます。さらに、レアアースやアクチノイド化合物の物性の基礎的な理解は、新しい磁性・超伝導材料の開発につながる、という応用面での期待もあります。原理追究型の基礎研究の中に潜んでいる応用の芽に気づく心の余裕も忘れないようにしたいと思っています。