

モット転移と高温超伝導体の電子状態 —ハバードモデルからの新展開



河野 昌仙

物質・材料研究機構国際ナノ
アーキテクトニクス研究拠点
KOHNO.Masanori@nims.go.jp

電気を抵抗なく流す超伝導状態を常温・常圧で実現することができれば、我々の生活が一変するだろうと言われている。現在得られている超伝導体の中で、常圧で最も高い温度で超伝導状態になるものは、銅酸化物の高温超伝導体である。通常、絶対零度（ -273.15°C ）近くまで冷やさなければ超伝導状態にはならないが、銅酸化物の高温超伝導体では約 -140°C で超伝導状態になるものもある。このことから、常温超伝導の実現に向けて、銅酸化物の高温超伝導のメカニズム解明が強く望まれている。しかし、そこには物性物理学の古くからの難題が立ちはだかっているのである。

高温超伝導のメカニズムを探る上で重要となるのは、高温超伝導の舞台となる超伝導相周辺の電子状態である。興味深いことに銅酸化物高温超伝導体では、電気を抵抗なく流す超伝導状態が、電気を流さない反強磁性的絶縁体（モット絶縁体）から電子密度を少し変えることによって得られるのである。このことから、銅酸化物の高温超伝導はモット絶縁体近傍の特異な電子状態と関係しているのではないかと考えられるようになった。つまり、高温超伝導の問題は、モット絶縁体に近づくにつれて電子状態がどのように変化するかという問題とかわっている。この問題こそ、銅酸化物高温超伝導体が発見されるずっと以前から物性物理学の中心的課題の一つとして論争的になってきたモット転移の問題なのである。

モット転移の問題は、相互作用する電子の根本的な見方にかかわる量子多体効果の問題である。通常、モット絶縁体から十分に離れた金属状態では、伝導を担う電子は

粒子のように動き回る。即ち、電荷 $-e$ とスピン $\hbar/2$ を運ぶ電子が系の性質を特徴づけている。しかし、モット絶縁体では、電気（電荷）を流さずに磁気（スピン）を動かすことができる。直感的には、電子の電荷はクーロン反発力で退け合うために安定な電荷配置から動かすことができないが、電子のスピンを回転させることにより、小さなエネルギーで磁気的な揺らぎを伝えることができる。即ち、モット絶縁体の低エネルギー領域では、電荷とスピンの自由度が分離している。モット転移の問題は、電荷とスピンを運ぶ粒子のように振る舞っていた金属中の電子が、どのようにしてモット絶縁体の電荷とスピンの自由度が分離した状態へと変化するのかという問題である。銅酸化物の高温超伝導は、まさにこの電子状態の描像が移り変わるモット転移の近傍で観測されているのである。

本稿では、モット転移の問題に関して、最近著者が行った理論研究の結果に基づいて解説を行う。前半では、モット転移は電子の動きをスピン自由度に残したまま電荷自由度が凍結する現象として特徴づけられることを述べる。そして後半では、銅酸化物高温超伝導体で観測されている電子状態の様々な異常な振る舞いを、モット転移の観点から統一的に説明する。

本稿では高温超伝導のメカニズムの解明には至らないが、その舞台となるモット転移近傍の電子状態と、長年の課題であるモット転移の本質に対して、明快な描像を与えることを目的としている。この描像によって、モット転移や高温超伝導体の理解が一層深められれば幸いである。

—Keywords—

銅酸化物高温超伝導体：

1986年にベドノルツとミュラーがランタンとバリウムを含む銅酸化物で超伝導転移温度(T_c)が30 Kを超えることを見出し、ほどなくイットリウムとバリウムを含む、 $T_c > 90$ Kの銅酸化物が見つかった。それまで超伝導状態を記述するのに有効と考えられてきたBCS理論では、電子格子相互作用を起源とする超伝導の転移温度は高くてもせいぜい40 Kであると考えられていたため、この結果は驚くべきものであった。30年を経た現在でもなお様々な実験結果を矛盾なく説明する理論があるとはいえず、様々なアプローチが試みられている。これらの物質群に共通する特徴として、1.結晶構造に銅と酸素からなる2次元面(CuO_2 面)を有し、元素置換等によってこの面にキャリアを導入することにより超伝導が発現する、2.キャリアの導入されない物質は反強磁性絶縁体となる、などが挙げられる。

モット絶縁体：

通常的自由電子的描像では本来金属となるべき物質において、電子間の強いクーロン相互作用のために絶縁体となる物質が存在する。このような物質をモット絶縁体と呼ぶ。多くのモット絶縁体では、電子のスピン間相互作用によって反強磁性秩序が生じる。

