

いま、凝縮系物理学のここがおもしろい

物理学では、我々が生きている自然のすべてが研究対象です。この膨大な研究範囲は、必然的に、特徴的な長さ(大きさ)やエネルギーのスケールで分類され、すこし細分化されて、宇宙物理学、地球物理学、原子核物理学といった専門性の高い名前で区別されています。このなかで凝縮系物理学というのは、原子や分子の大きさから我々が感覚的に捉えられる大きさまで、原子・分子が密に”凝縮”した物質全般を研究対象としています。学生さんの多くは、天体や宇宙といった巨大な極限や、素粒子など究極的に小さい極限には興味をもちやすく、それに比べると凝縮系物理学の人気はいつもいまひとつのようです。かく云う私自身、かつては物質に潜む物理の面白さに気付きませんでした。そこでこの拙文では、私の主観に基づいて、凝縮系物理学におけるホットな話題に触れ、この分野の面白さをご紹介します。

物質は原子や分子が配列してできています。ここで物質の性質を決める主役のひとつは、原子がもつ電子です。物質の中を自由に動き回れる電子の数と、電子と原子の配列(格子と呼びます)の関係から、その物質が金属なのか半導体なのか、はたまた絶縁体なのかを知ることができます。これがバンド理論です。一方、やはり電子と格子との相互作用により、一部の物質には非常に低い温度で超伝導という現象が現れます。超伝導の性質として一番有名なのは電気抵抗がゼロになるという効果でしょう。この効果ゆえに、超伝導には応用的な興味を持たれることが多いのですが、物理学の視点では、2個の電子が格子の力を借りて対を組み、さらにはすべての電子対が量子力学的に同じ状態になった状態であると理解できます。量子的世界が我々の感覚に捉えられる大きさで現れる非常に興味深い状態です。超伝導の機構を解明した理論は、BCS理論と呼ばれています。バンド理論やBCS理論は、物質という複雑な多体系の性質を、極めて簡潔に表現することに成功した美しい理論です。ところがもう20年近くも前になりますが、なんとセラミックスで、当時の常識では考えられない高い転移温度の超伝導体が発見されたのです。この発見は物理学のみならず、化学・工学・一般社会をも巻き込んだ大ブームを起し、高温超伝導フィーバーと呼ばれました。何よりも驚いたことには、この高温超伝導、BCS理論では説明がつかないのです。以来今日まで、高温超伝導の研究が続いています。ただ、たくさんの研究者による長い年月にわたる研究から、今日では、高温超伝導体やその仲間の物質群には他にもたくさんの不思議が潜むことも分かってきました。実は、こうした物質群はもともと絶縁体です。絶縁体を構成する一部の元素イオンを、価数の異なる元素イオンで置き換えることで、物質全体の電気的中性の条件から、物質内に動き回れる(そして超伝導を引き起こす)電子を作っているのです。そしてさらに複雑なことに、この絶縁体の方はバンド理論での説明がつかいません。バンド理論で説明できない絶縁体の正体は、電子間の強いクーロン反発力による、モット絶縁体と呼ばれるものです。ある高名な先生の言葉を借りると、モット絶縁体とは、河原に佇むカップルのようなもので、お互いに至近距離には近づかないように配慮して(物理的に云うと、斥力相互作用が働いて)、みんなほぼ等間隔に座り、流動性のない状態(絶縁体)で落ち着いているわけです。ですから、そこに新たなカップルが現れたり、ひと組がいなくなったりすると、動揺が生じます。電子間に相互作用が大きく作用する環境(強相関電子系と呼びます)に電子を置くと、ちょうどそのような具合に複雑な相互作用を感じ取り、制約された動きを示すことが予想されます。高温超伝導体の場合は、電子(正しくは電子の穴)の数を増やしていくと、反強磁性という磁性を伴ったモット絶縁体が、風変わりな金属状態(高温超伝導の前駆状態という見方もある正体不明の状態 - 専門的には擬ギャップという現象で特徴付けられる)を経て、高温超伝導体へと転移します。このとき、具体的にどんな力がどのように働いて、BCS理論では説明できない超伝導が現れるのかは未解決のままです。ただ最近の研究から、高温超伝導が現れる過程では複数の拮抗した力が共存・競合し、綱引きの結果、複数の秩序が、なんとナノ・スケールで同一物質中に同居すると考えられるようになってきました。これを電子の自己組織化と呼ぶこともあります。つまり、とくに微細加工をしなくても、電子が自分た

ちで、ナノ構造をつくってくれるというわけです。電子の自己組織化は、高温超伝導に端を発した研究以外でもその重要性が主張され、いまや凝縮系物理学の主要なキーワードとなりつつあります。

よく物理学はらせん状に発展すると言われます。ある問題の理解が進むと、以前判らなかつた別の問題に道が開けたり、一見異なる分野が統一的なテーマとなったり。その意味で、現在の凝縮系物理学は大きな転換点にあると私は考えています。自己組織化という認識や微細加工の技術により、これまで現象論的に(我々が感覚的に捉えられる大きさの物理として)理解してきた物質の仕組みについても、改めて微視的に見直す必要が生まれ、そこに新たな物理が構築される可能性が生まれているからです。凝縮系研究室ではこうした壮大な目標に向かって日々研究活動を行っています。この拙文で、凝縮系物理学に興味を持たれた学生さんは、どうぞ研究室を訪ねてきてみてください。