

多様性の中の美しさ

理論と実験の研究に働く相互作用



理学系研究科
物理学専攻
教授 青木秀夫
あおき ひでお

Aoki Hideo

1973年東京工業大学理学部物理学科卒業、
78年東京大学大学院
理学系研究科物理学専攻博士課程修了、理学博士。
同年東京大学理学部助手。
80年英国ケンブリッジ大学・
キャベンディッシュ研究所客員研究員、
84年筑波大学物質工学系講師、
86年東京大学理学部助教授、
98年より現職

物理学の研究分野は、大きく素粒子物理と物性物理に分かれる。前者は素粒子や原子核などの極微の世界を対象として扱うが、後者は手に取れる大きさの対象を扱う。「超伝導は、いわば両者の境界にある巨視的量子現象。とりわけ高温超伝導は、今最も面白いトピックスの一つだと個人的には思う」と青木は語る。

超伝導とは、金属の電気抵抗がある温度以下で突然ゼロになる現象を指す。電気抵抗が徐々にゼロに近づくのではなく、水が氷になるように急に性質が変わる相転移現象である。「BCS理論」では、この現象を素粒子物理学の基礎となっている「場の量子論」を用いて説明する。

冷却された金属中の電子は、普通は、結晶格子を組んだ原子の振動(格子振動)を介した引力によって、他の電子と対(ついで)を形成する。クーバーペアと呼ばれるこの電子対が無数に集まって、ボーズIIアインシュタイン凝縮、すなわち結晶全体での最低エネルギー状態に落ち込むことにより、場の量子論の言葉ではゲージ対称性が破れた状態として、超伝導状態が実現される。最初の発見以来いくつかの超伝導体が見つかったが、1986年には、遷移金属酸化物の超伝導体が発見され、比較的高温での超伝導が話題となった。酸化物のよつにもととは絶縁

photograph by 佐藤 久
text by 板垣朝子

体になりやすい化合物が超伝導体になるのであれば、新たな可能性が広がる。

理論に基づく新たな物質を設計

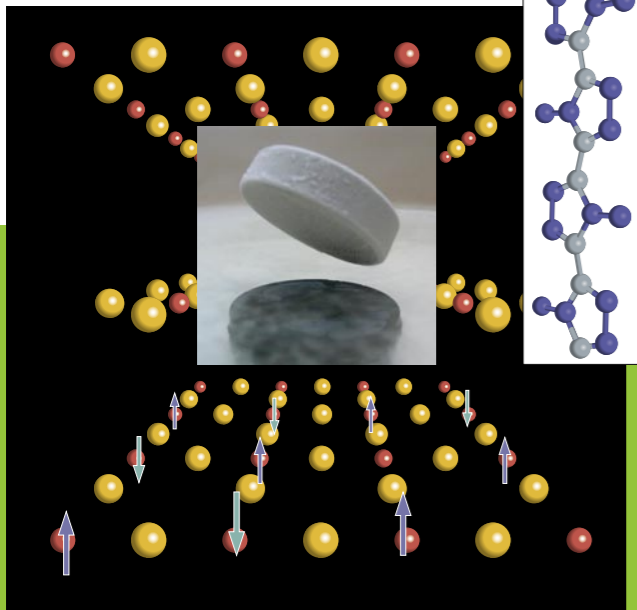
新たな超伝導体の発見に欠かせないのが、基礎理論と実験をつなぐ物質設計であると青木は見る。理論に基づく新たな物質を提案し、それに沿って物質を合成性質を調べ理論にフィードバックというサイクルが働いて初めて効率良く新たな超伝導体を発見することができる。物質設計にはコンピュータを利用した計算が欠かせない。物質を構成する元素と構造のみから電子状態を求める「第一原理計算」が出発点となる。

現在発見されている超伝導体は、主に層状構造をした様々な化合物で、「コバルト化合物やハフニウム化合物の超伝導体」を発見したのは日本の科学者だった。これらも層状化合物だ。これ以外にも、炭素からなるサッカーボール状分子(フラーレン)の間に金属が入ったものや、金属を取り囲む形をした包接化合物、有機物など、様々な超伝導体がある。

「結晶構造を工夫することで、常温超伝導が実現できれば、基礎科学として面白いだけでなく、応用可能性は飛躍的に高まる」と青木は語る。

BCS理論が説明するメカニズムの超伝導では、相転移温度は20K程度が限度となると昔は思われていたが、高温超伝導体では、格子振動の代わりに、電子間の強いクーロン斥力のためにペアが作られていると考えられている。ボーズII

強相関電子系と物質設計



銅酸化物高温超伝導体(結晶構造を示す)に代表される強相関電子系では、スピン(矢印)が重要な役割を果たす。これによる超伝導の機構(実際の超伝導体が磁気浮上している写真を中央に示す)や、物質設計された構造(右上の構造図)での強磁性などが考えられている

アインシュタイン凝縮をしていることには変わりないが、その機構はまったく異なっている。

ここで興味深いのが、「植村プロット」と呼ばれる、超伝導化合物における金属電子のエネルギーと温度の関係を表したプロットだ。様々な物質について、超伝導転移する温度は、電子の持っているエネルギーより2桁も小さいオーダーである。この理由を説明すれば、現在とは比較にならない高温で超伝導体が発現できるかもしれない。青木らは「2桁の壁」を乗り越える提案をしている。

ここまでは超伝導に焦点をあててきたが、その背後には電子間の強い斥力相互作用によって生じる「電子相関」という効果がある。磁性(物質がなぜ磁石にな

るか)や、半導体で発現する「少数量子ホール効果」も、電子相関に深くかかわる性質だ。

統一した原理の存在

磁石というのは不思議な現象だ。ミクロに見れば電子のスピンが揃う現象だが、金属で磁石になるものがなぜ鉄やニッケルなど特定の金属だけなのか、その理由として、遷移金属原子の電子軌道の性質と結晶構造の両方が電子相関効果に影響するためであることを、青木らは解明しつつある。磁性も高温超伝導と背後に共通する原理を持つので、超伝導設計だけでなく、通常は磁性を持たない非磁性元素固体や有機物を磁石にできるかもしれない。

青木らは、五員環をつないだポリマー「polyvinotriazole」が強磁性を持つと予測した。その物質は、理学系研究科化学専攻の西原寛研究室で合成中だ。普通は分子軌道には上下向きスピンがセツトで収納されるのに対して孤立したスピ(ラジカルと呼ばれる)の光吸収を観察できるところまできている。青木は、「既存の物質の性質を理解する一方で新しい物質を設計し、実現する。理論を机上の空論にしないためには、理論と設計は車の両輪でなくてはならない」と語る。

学生時代の青木は、場の量子論と固体物理学に興味を持っていた。量子ホール効果理論をテーマとして研究していた86年、高温超伝導体の発見という画期的な出来事がきっかけで開拓された「電子相関の物理学」の世界に飛び込んだ。

「素粒子を研究している人は、物性物理学は多様でごちゃごちゃしていると言いますが、多様性の中に統一した原理が存在するのが美しい。一つの原理からまた様々な現象を提案し、物質を設計できるのも面白い」と青木はその魅力を語る。

現在、青木の研究室には、強相関電子系における非平衡・非線形現象を研究する、素粒子理論の研究から移ってきた助教もいる。

「かつて電子立国だった日本も曲がり角に来ているが、イノベーションを起こす力の元となる基礎科学が大事。若い研究者には、高温超伝導や量子ホール効果のような、まったく新しいものを見つけたい」と青木は期待している。