

低次元金属・超伝導体の超異方性強磁場効果

—磁場が鋭さを見せるとき—

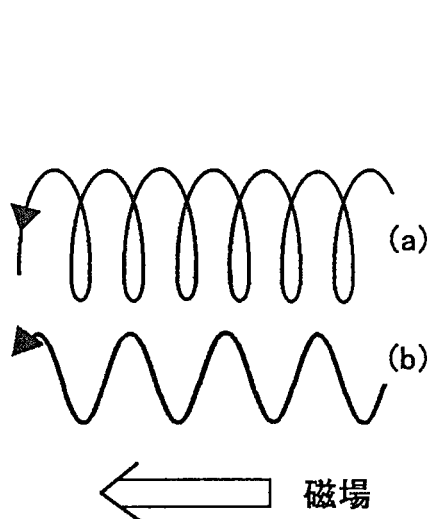
石黒武彦 京都大学大学院理学研究科 教授

強磁場の世界と伝導電子・超伝導電子

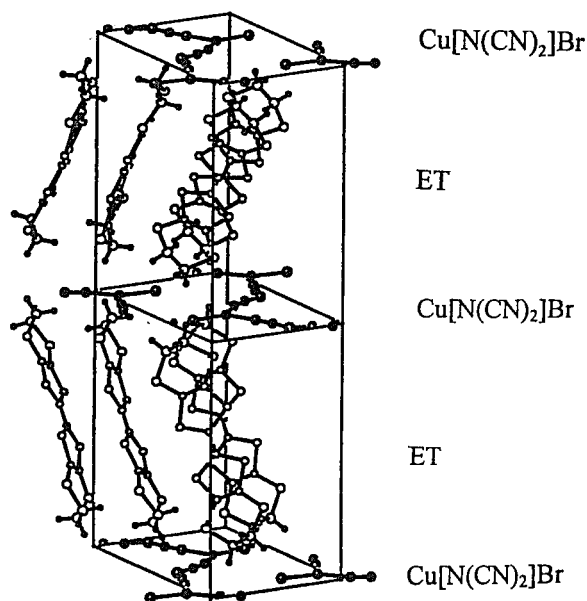
地球は約 0.3 ガウスの磁場に被われていますが、私達の周りには血流に影響を及ぼし治療効果があるとされるボタン状のマグネットからの数 100 ガウスを超える磁場、モータや発電機の中にある数 1000 ガウスを超える磁場があります。近年に至り超伝導が使えるようになって、1 テスラ(10,000 ガウス)を超える強い磁場を得ることが容易になり、身近なところに磁場共鳴イメージング医療診断システムが活用され、磁気浮上式鉄道などが実現されようとするなど、強磁場の利用が進みつつあります。研究用に、実験室的に実現される磁場は 45 テスラを越え、パルスのな磁場では数 100 テスラに及ぶようになってきています。

強磁場下では、導体中の伝導電子は第 1 図に示すように周回(a)あるいは蛇行(b)しながら磁場がかけられた方向に運動しますが、磁場の強さと共にその周回の径や蛇行の幅は小さくなり、電子が自由に運動できるのは磁場の方向に限られるようになります。磁場の方向への速度は制約されないためです。このような様子を電子が 1 次元的な運動をするようになると言います。

磁場は超伝導にも著しい影響を及ぼします。互いに逆向きのスピンを持つ電子が対を組むことによってもたらされる超伝導では、電子対は強磁場下では安定ではなくなり壊され対を組まない普通の伝導電子に変わり、超伝導は持続出来なくなります。このとき、ある磁場領域では、超伝導と磁束とは水と油のように斥けあい棲み分けをしようとし、磁束が最小単位にまで分割されつつ超伝導に侵入する状態が実現され、超伝導とそうでない部分の混合状態が実現されます。



第 1 図 磁場下の伝導電子の運動

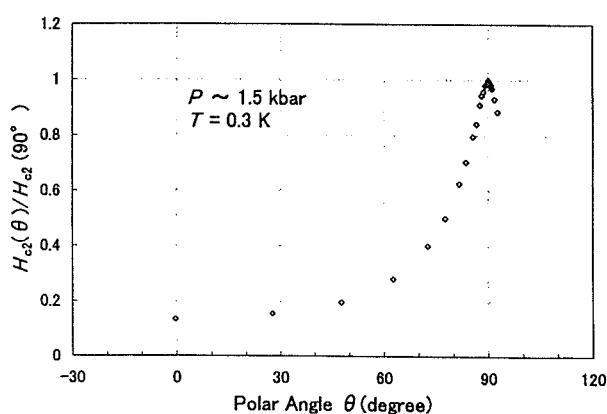


第 2 図 層状有機超伝導体(ET)₂Cu[N(CN)₂]Br

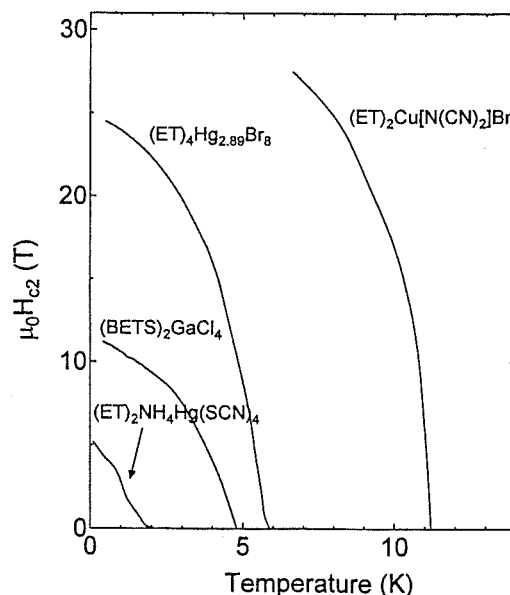
低次元金属・低次元超伝導体

ところで、近年、層状あるいは面内でのみ高い電気伝導性を示す2次元的な電気伝導体が数多く見出されています。高温超伝導体、有機超伝導体など、高い機能性を持つとして注目されつつある導電体がこの範疇に入ります。更に、特定方向にのみ電気を伝える1次元的な導電体もみられ、これら2次元的、1次元的な導電体をまとめて低次元導電体と呼んでいます。このような導電体では、強磁場を掛けた方向によって電子の振る舞いがどのように変化するかを知ることによって、物質中の電子の性質、即ち電子状態が明らかにされます。超伝導体で超伝導と磁場が互いに退け合う関係にあるときには、互いの方位関係によって磁束の性質が著しく変化します。

私達の研究グループでは、低次元構造を持つ超伝導体として、第2図に示すような層状構造を持つ有機超伝導体と酸化物超伝導体 Sr_2RuO_4 ならびに $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ を重点的に取り上げています。層状有機超伝導体では良質の単結晶が得られ異方性に基づく性質を明らかにするのに適した物質となっているからです。 Sr_2RuO_4 は当研究グループのメンバーによって超伝導体であることが見出された物質で、著しい2次元的な性質を有し、1.5Kで超伝導化しますが、最近の研究により、この超伝導は同じ方向を向くスピンの対を形成する大変珍しい三重項超伝導体であることが明らかとなりました。三重項超伝導体の研究には高純度良質の試料必要とされますが、当研究室で造られる試料は T_c の高さから第1級のものだと判断され、世界の50カ所位に送るなどにより協力研究を進めています。また、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ は高温超伝導体として近い将来その電磁的性質が広く利用されようとしています。従来超伝導体に例を見ない著しい2次元性を示すためその性質を明らかにしておくことが求められています。



第3図 $(\text{ET})_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}$ の上部臨界磁場 H_{c2} が磁場方向が超伝導面に平行になるにつれて鋭く増大する様子。



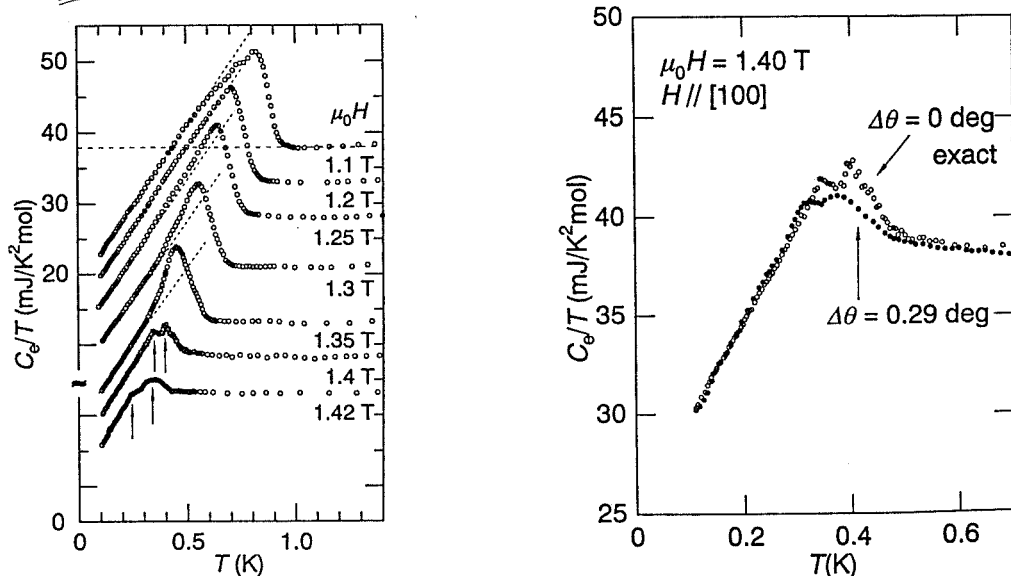
第4図 有機超伝導体の超伝導面に平行に磁場がかけられたときに示す上部臨界磁場 H_{c2} の温度変化。

磁場中の低次元超伝導体

磁場は2つの効果によって超伝導を不安定化させます。その1つは軌道の効果と呼ばれるもので物質の電子構造によって決まる磁場中での電子の運動性が関わります。もう一方はスピンの効果と言われ、互いに逆を向くスピンを持つ電子が対を組んで超伝導電子対となった時に有効になります。多くの場合、軌道の効果が超伝導の磁場上限を決めています。しかし、層状超伝導体に磁場を層面に正確に平行に掛けた時には電子が層の間を移動し難いことが効いて軌道の効果による不安定化をもたらすには著しく高い磁場が必要とされるようになり、実質的に超伝導の上限を決めるのはスピンの効果に変わります。第3図は層状の有機超伝導体(ET)₂Cu[N(CN)₂]Brの磁場上限(上部臨界磁場)が磁場を層面にぴったり平行に掛けたときに鋭いピークを描くことを示しています。このとき磁場上限を決めているのはスピンの効果と考えられます。

しかし第4図に示す層状有機超伝導体に層面に平行に磁場を掛けたときに見られる上部臨界磁場では、通常の超伝導理論を基に予想されている値を遥かに上回るものが少なからず見受けられます。この原因として超伝導状態が空間周期的に変動している可能性が考えられます。これは30年余り前に可能性が指摘されたものの実験ではまだ確認されていない超伝導の状態です。

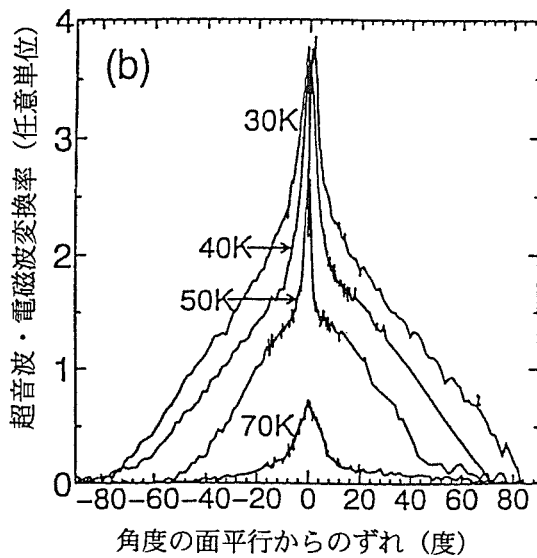
ところで、Sr₂RuO₄が同じ方向をもつスピンを持つ電子が対を組むことにより実現される三重項超伝導である場合には、スピンの効果による不安定化は避けることができます。また、2次元的な構造を持つSr₂RuO₄が三重項超伝導であるときには層面に平行に磁場を掛けたときに限って三重項超伝導特有の状態が現れます。第5図にはこのような状況を電子比熱の観測によって示しています。Sr₂RuO₄の特長は電子構造が明らかにされている数少ない酸化物超伝導体です。このため磁場下で多様な姿を見せる三重項超伝導についても本質を洗い出すことを可能にしています。



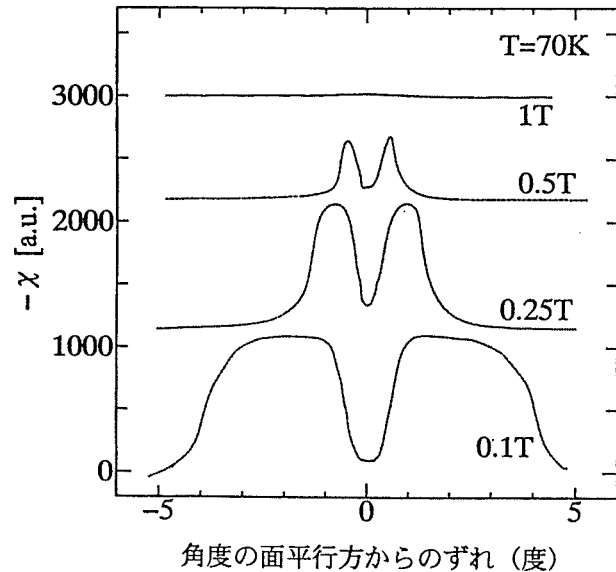
第5図 Sr₂RuO₄の超伝導状態における面平行磁場下の電子比熱 C_e の温度依存性 (左)。超伝導面に平行な磁場下でみる特徴的な温度変化は0.29°傾けただけで消失する方向に変化する(右)。

層状超伝導体中の磁束

層状構造を持つ超伝導体に磁場をかけるとき、層面に垂直な磁場成分があると、磁束は層面を貫いてパンケーキ状の磁束量子を形成し、超伝導体の機能性に著しい影響を及ぼします。これに対し層面に平行に磁場をかけたときには超伝導面に沿って伸びるジョセフソン磁束が形成されます。このジョセフソン磁束は層面を押す方向には強い抵抗を受けて動くことは出来ませんが、層面に沿っては自由に移動することが出来ます。本研究では $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 中の超伝導面に力を掛けるよう電磁力を掛けると力を受けた超伝導面が電磁波の周波数で振動し超音波を発生することを明らかにしました。この超音波発生効率は磁場の方向を超伝導面から傾けると急速に低下することが分かりました(第6図)。磁場を傾けたことにより形成されるパンケーキ磁束の運動性により磁束と超伝導面間に働く反発力が緩和されていくからです。一方、ジョセフソン磁束が超伝導面に沿って自由に動くことが高周波(約2MHz)に対する磁化率の測定から分ります。このとき磁場が傾けられパンケーキ磁束が出来ると磁束の動きを鈍らせ反磁化性を示します(第7図 反磁化は上向きに表示)。しかし更に傾け超伝導面に垂直な磁場成分を増やすとパンケーキ磁束が自由に動き始め磁束は再び自由に動き始めます。



第6図 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ($T_C=88\text{K}$)における電磁波・超音波変換。磁場方向が超伝導面に平行になるあたりで鋭く変化する。



第7図 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ($T_C=88\text{K}$)の70Kにおける高周波磁化率の面平行磁場よりの傾き角度依存性の磁場変化。

本研究は以上のように低次元金属あるいは低次元超伝導体の軸に磁場の軸をぴったりと一致させたときにみられる特徴的な現象をとらえ、それを手掛かりに低次元金属・超伝導体の新しい顔を見出しつつ本性を探ると共に、電磁的応用の基礎を固めようとして進められてきました。今後、強磁場がより広く利用され、低次元性の機能性物質がより身近なものとなったとき、超異方性効果のもたらす結果が科学技術に重要な係わりを示すようになると思われるからです。