



極低温 静かな世界は大騒がせ

大熊研究室 ~ 極低温システム研究センター



大熊 哲 助教授

熱振動がほとんどなくなる、とても静かな世界極低温。さて、極低温と聞いてどういったものを思い浮かべるだろうか？ 電気抵抗が0になる超伝導や、粘性が消失し数年間流れ続けたヘリウムの超流動などを聞いたことがあると思う。

これらの不思議な現象は「熱」というベールに覆い隠されていたものである。熱の影響がほとんどなくなる極低温では、物質の隠された姿が暴き出されている。そこには今までの物理では説明のつかない新たな物理が広がっているのだ。

大熊研では、そんな世界の探求を行っている。



磁束が融ける!? ~ 超伝導に現れる抵抗 ~

ここ大熊研では極低温で見られる面白い物理現象があれば、できる限り研究テーマとして取り上げている。そこで本稿では、現在特に力を入れて取り組んでいる超伝導体の磁束に関する研究を中心に紹介しよう。その前にまず、超伝導体の初歩的な性質について説明する。

超伝導体とは温度を下げていくとある温度で急に電気抵抗が0になってしまう物質のことである。その超伝導体の代表的な性質としてマイスナー効果と呼ばれるものがある。これは、超伝導状態になっている試料には磁束が侵入しない、というものである。図1の上段にあるような図を見たことがある人もいるだろう(a,b,c)。しかし、外部の磁束密度を大きくしていくと、ある大きさ（臨界磁場と呼ばれる）でマイスナー効果は破れて試料の内部に磁束が侵入してしまう(d,e)。すなわち、試料内部の磁束密度は、臨界磁場を境に不連続に変化するのである。マイスナー効果が破れたということは、もはや超伝導としての性質をなくしてしまったことを意味している（電気抵抗が存在する）。このように内部の磁束密度が不連続に変化する超伝導体を「第一種超伝導体」と呼ぶ。

だが、超伝導体には「第二種超伝導体」という、少し違った振る舞いを見せるものがある。第二種超伝導体は、ある程度外部の磁束密度を大きくすると試料の内部に磁束が少しだけ侵入してし

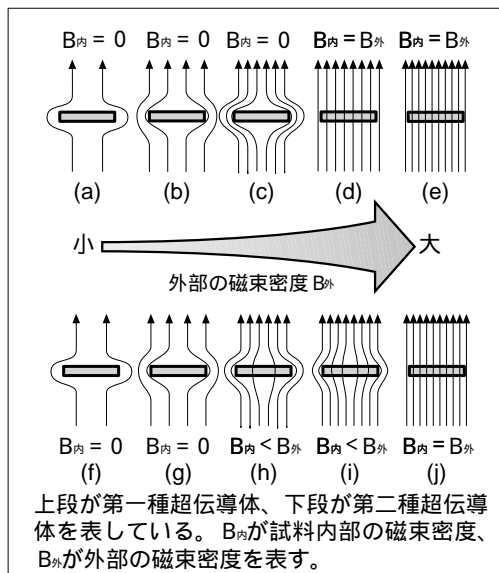


図1 マイスナー効果

まう(h,i)。「少し」というのがポイントである。第一種超伝導体ではマイスナー効果が破れて磁束が侵入したとき、試料内部の磁束密度と外部の磁束密度は等しい(d,eを参照)。だが、第二種超伝導体に少しだけ磁束が侵入した状態では、試料内部の磁束密度は外部の磁束密度よりも小さいのである(h,iを参照)。しかも、この時点では超伝導としての性質（電気抵抗が0など）は失っていないと考えられている。当然、更に強い磁場をかけていけば、あるところで第二種超伝導体の超伝導状態は壊れてしまう(j)。(j)の、磁束が少しだけ侵入するというのが第二種超伝導体の最大の特徴である。

さて、この磁束が少しだけ侵入するという現象、一体どんなことを引き起こすのだろうか？

侵入しているこれらの磁束は全て外部の磁場と同じ方向を向いている(h,i)。同じ向きを向いている磁束は、互いに斥力を及ぼす。磁石は同じ向き同士では反発するのと同じ理由である。互いに斥力を働かせているとき、安定した状態になるためには等間隔の格子を組めばいい。そうすれば、斥力同士が釣り合うからだ。これらの磁束の場合は図2-aのような三角格子になっている。

さて、固体も格子を組んでいることは知っていることだと思う。例えば身近な固体である氷は、水の分子が規則正しい格子を組んだものだ。水の分子は格子を組んでいるときでも決して止まっているわけではなく、温度に比例した大きさの運動エネルギーで振動している。温度が上昇し運動が激しくなると、熱振動の振幅が大きくなり、格子を組んでいられなくなって液体になる。じつは、全く同じことがこの磁束格子でも起こるのだ。

磁束は、温度が上昇すると激しくなった熱振動によって格子を振り切ってしまう。これは磁束が

格子を組んだ「固体」から自由に動く「液体」へと相転移したことを示しているのである(図2-b)。ここで「なぜ磁束がさも粒子であるかのように熱振動をするのか」と疑問に思った人もいるだろう。そのことについての説明は次ページにある「磁束量子について」のコラムを参照してほしい。

さらに、この磁束が液体状態となったものに電流を流すと面白いことが起こる。磁束は、フレミングの左手の法則により電流から力を受けて動いてしまう。磁束が動くと、電磁誘導の法則より、電流の向きに起電力が発生する。すなわち、電流が流れることによって、電位降下が発生するのである(図2-c)。さて、電流を流したときに電位降下が発生するというのを、オームの法則に当てはめてみよう。V=RIより抵抗が発生しているように見えるのである！

これまで述べた通り、磁束が少ししか侵入していない状態では、超伝導としての性質は保っている。電子は邪魔されことなく流れているからだ。この現象は超伝導体でありながら抵抗が発生するという、大変不思議で興味深い現象である。

このように磁束が融解し、磁束が液体で存在するという事は熱の影響が現れやすい高温超伝導体で最初に見つかった。高温超伝導体そのものがまだ発見されてから10年ちょっとしか経過していないため、このような磁束の状態の研究はまだ始まったばかりの新しい研究分野である。大熊研ではこの磁束が融けるという現象が、転移温度の低い従来型の超伝導体でも、乱れた磁束固体については存在することを初めて発見した。つまり、この現象が高温超伝導体に限らない、すべての第二種超伝導体に見られる相転移であることを明らかにしたのである。

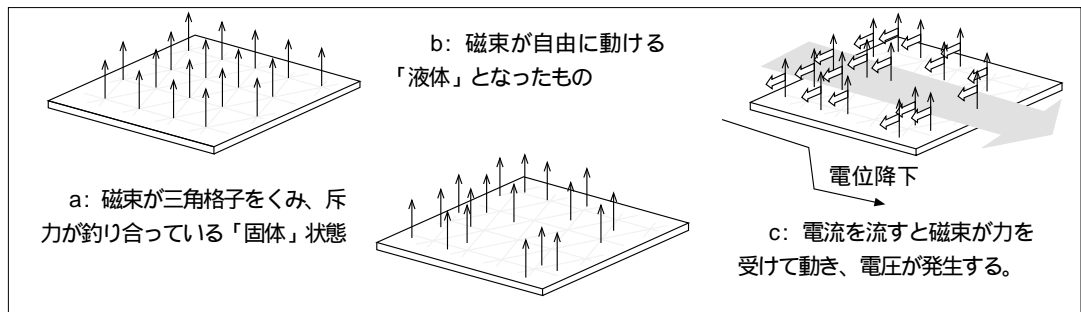


図2 磁束が侵入するに伴う現象



熱はなくとも、量子力学が融かす

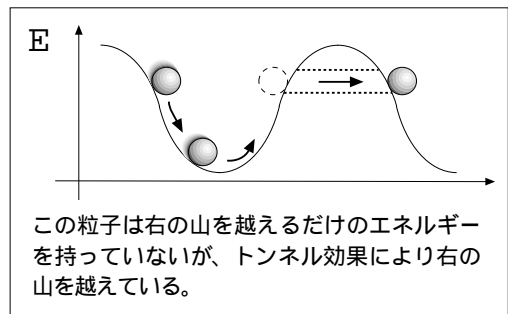
前節で「熱によって融けた磁束」の説明をしたが、大熊研ではさらに絶対零度でも磁束は融けるのではないかと、ということについても研究をしている。絶対零度では熱振動が完全に停止しているので融けるはずはない。にもかかわらず液体状態として存在するというのなら、熱振動以外の何か別な振動がなくては説明ができない。なぜなら、液体になるには格子を振り切るだけの振動がなくてはならないからだ。

磁束の液体状態がなぜ絶対零度でも存在しているのか、ということに類似した問題がある。ヘリウムは常圧では絶対零度にしても液体で存在する、というような話を聞いたことがあるかもしれない。「磁束がなぜ絶対零度で液体状態にあるか」という問題は「ヘリウムがなぜ絶対零度でも液体であるのか」と似ていると考えられている。その鍵を握っているのは量子力学だ。

ヘリウムは単原子分子で、かつ質量の小さい原子である。また希ガス元素のため、非常に原子間の相互作用が小さい。詳しい説明は省略するが、こういった粒子は量子力学によって導かれる効果が無視できなくなるのである。ヘリウムは不確定性原理によって導かれる零点振動と呼ばれる効果により絶対零度でも振動が止まらない。この零点振動により、ヘリウムは絶対零度でも液体状態として存在するのである。ヘリウムは量子力学による効果で液体状態のままになっていることから量子液体とも呼ばれている。

ところで、隣の空いている位置に原子を移動させるためにはあるエネルギーの山を越える必要がある。熱エネルギーのなくなる絶対零度ではこのような原子の移動は起こりえないように見える。しかし、ここで量子力学によって導かれる「トンネル効果」を考えると、移動することが可能になるのだ。トンネル効果とは、エネルギーの山を熱エネルギーをもらって乗り越えるのではなく、まさにエネルギーの山にトンネルを掘ったかのようにして粒子が移動してしまう現象である(図3)。したがってこのような場合には、熱エネルギーはなくてもトンネル効果によって原子の位置がふらふらと変わる。このため液体状態が出現すると考えられることもできる。

さて、ここで話を第二種超伝導体に侵入した磁束の問題に戻そう。超伝導体を貫く磁束は、試料の厚さを薄くすることでふらふらと動きやすい状



この粒子は右の山を越えるだけのエネルギーを持っていないが、トンネル効果により右の山を越えている。

図3 トンネル効果

磁束量子について

第二種超伝導体に少しだけ磁束が侵入している状態では、これらの磁束はある特別な性質を持っているのである。磁束は、この状態では「磁束量子」と呼ばれている、これ以上分割できない磁束の最小単位として侵入している。これは原子の周りをまわっている電子が、とびとびの運動状態しか取れないこととよく似ている。超伝導体の大きな特徴は、巨視的な量の電子がこのような状態になっていることにある。

なぜ粒子ではない磁束が、融解したり量子力

学に従う粒子としての振る舞いを見せるのだろうか？ その理由は、磁束量子の運動は粒子と同じような運動方程式で表されることにある。これが物理学の面白いところなのだが、同じような式で表される物理現象は、同じような原理に従うのだ。例えば、バネの単振動の運動方程式と、コイルとコンデンサーで作られる回路の方程式が本質的には同じものであるため、実際によく似た振動現象が観測されるのと同じことである。

態にすることができるのである。そうすれば絶対零度でも磁束の格子が量子力学的に融けた状態が実現できるのではないだろうか？ このような物理学的な予想と期待の下、大熊研では超伝導体試料の厚さを原子層レベルまで薄くした系を準備し、交流電磁応答や微小電圧ノイズ測定をはじめとするさまざまな測定手法を用いて、この現象の解明を行っている。最近、この量子力学的な効果による磁束の融解を示していると思われる現象が

0.1K以下の極低温域で見つかったという事だ。これは「多数の粒子のトンネル現象」という量子力学の基本的な問題とも関わる重要な現象である。現在はより強い確証を得るため、異なる測定方法を用いて更なる研究を進行させている。ところで、なぜ磁束に量子力学が適用されるのかと疑問に感じた人は前のページにある「磁束量子について」というコラムを参照して欲しい。



「面白い」それが研究動機

大熊研で行っている研究の中から、超伝導体の磁束に関する研究を例にとり、ここまで説明してきた。大熊研では基礎的な研究を中心に行っていることが伝わったことと思う。基礎的な研究とは「多様な物質の中にどんな共通した性質があるのか、またどんな物理が潜んでいるのか」といったことを探る研究である。これはまさにできるだけ広く通用する法則を見つけだそうとする物理学の立場に立っている。「より使える物質」を目指す工学系の超伝導研究とは趣が異なっていると言えるだろう。ここ大熊研は、現象の面白さを第一の研究動機としているのである。

極低温の世界はとても静かな世界であるから、それだけに扱っても難しい。通常環境では観測されないような微弱な信号を試料から検出し、更にそれらの情報の中から本質的な情報を得なくてはならないのである。外からくるノイズはもちろんのこと、測定を行うことにより測定対象の状態を乱してしまう恐れさえある。したがって、得られる信号がノイズに隠れてしまわないようノイズを極限までカットしたり、優れた精度を持つ計測システムを作ることが重要で、このためにかかなりの精力を費やしている。新しい物理計測の方法を考えることも重要な研究テーマになっているのだ。

一方、基礎的なデータを得るにはあまり複雑な

系を用いることは好ましくない。したがって、測定対象とする物質は、できるだけ理想的な系を準備することが必要なのである。たとえば、理想的な2次元に近い超薄膜や超微粒子からなる薄膜の作成などだ。測定環境としては、温度を下げることはもちろんのこと、極端に強い磁場をかけたたり、速い周波数の電流を流したりして物質の「隠れた姿」を探ることを目指している。一つの試料を1年かけて調べることもあるということだ。このあたりからも応用を目指した研究とは違った方向の研究であることが窺えるだろう。



大熊研究室内の測定装置



極低温システム研究センター

最後に、この研究室が所属している極低温システム研究センターの紹介をしておこう。南地区に行く途中、本館の裏側に白い建物を見かけたことがあるだろう。その建物が極低温システム研究セ

ンターである。その、特に他と変わりが無い外見とは裏腹に、中には最新鋭の設備が複数存在する。これらの設備はセンターだけではなく、多くの研究室に有効に共同利用されているのである。

極低温の実験のためには液体ヘリウムや液体窒素の供給が欠かせない。その安定した供給は、このセンターの重要な役割である。また、ヘリウムは輸入に頼っている希少な資源であるから、再利用をして使う必要がある。そのための再利用設備も整っているのだ。本館の中を歩くと、天井にパイプが走っているのを見たことがあるだろう。あの中には各研究室で使われた後の気化したヘリウムが通っているのである。パイプを通ってきた使用済みヘリウムはこのセンターで液化され、再び実験に使われる。こういった設備があるおかげで、業者から購入する場合と比べて5分の1程のコストで液体ヘリウムの利用が可能になっているのである。

このセンターにはもう一つの役割があり、それは極低温環境における実験技術の開発研究である。すでに述べたように極低温の世界はとて



センターにある実験装置の一つ
0.01Kの極低温、17テスラの強磁場を作り出す



ヘリウムの液化装置

いが難しい。あまりに低い温度になると、温度の計測ひとつとっても困難になる。しかしながら、極低温環境での実験に対する需要は高まってきているのである。そのことは液体ヘリウムの利用量がこのセンター発足の8年前に比べ7倍にも増えているという事実からも窺えるだろう。そのため、このセンターでは、世界でもトップクラスの技術レベルを維持し、最新の極低温技術の情報提供者になることを目指している。このような組織と設備を持っている東工大は、大変恵まれた環境であるといえるだろう。

極低温の物理に興味のない人は「冷やして何が
あるのか」というかもしれない。人類史上最も液化が困難であったヘリウムが液化されたときもそういわれたということだ。気体を冷やせば液体になるのは当たり前だ、更に冷やせば固体になる、と。抵抗についても絶対零度では不純物による自由電子の散乱で決まる一定値に近づくだけとされていた。これらは熱力学から予想でき、いちいち冷やしてみるまでもないと思われていたのだ。

しかし、現実はどうだろうか。ヘリウムのように固体になるところか超流動と呼ばれる状態に変化してしまう物質があったり、とつぜん電気抵抗が0になってしまうものの存在が確認されたりし

た。そう、何かがあったのである。私たちにとっては超伝導も超流動もすでに発見されていることだから、特に驚きも感じないかもしれない。だが、当時の人々が予想とまったく異なる結果に対して、どれだけ驚いたかを想像することは難しくないだろう。極低温の世界ではそういった常識を覆すような発見が今でも多々起こっている。この自然界はそう簡単にその姿を見せてはくれなかった。まさに大騒がせ、といったところだ。

こうした複雑な世界のことをとても丁寧に説明して下さった大熊先生には大変感謝しています。そして、これからの研究のますますのご発展をお祈りいたします。
(松下 友一)