

【隔月連載記事】

もっとやさしい「超電導」のおはなし (その1)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性研究部
特別研究員 中尾公一

1. はじめに

この稿では、できるだけやさしく超電導体や超電導現象について説明することを目標としています。超電導に関する予備知識は前提としていません。電磁気学や固体物理に関する知識も前提にしない予定です。超電導を専門としていない人でも、新聞記事や雑誌の解説などで超電導に関する情報に触れる機会は多いと思います。マイスナー効果であるとか、量子化磁束、ピン止め、ペアリング、交流損失などの専門用語に触れたとき、よく聞く言葉なので何となくわかるような気がするけれど、改めて考えてみると何のことか理解していない、筆者が想定しているのはそういう方々です。

実は 2003 年に村上雅人氏による「やさしい超電導のお話」という解説が連載されています。しかし、かのフラインマン教授も言っていたように、本当に理解するということは、いく通りもの言い方で説明できる事だそうですから、今回勇気をふるって、少し違った観点から「もっとやさしい超電導のお話」というタイトルで、解説を書かせていただくことにしました。またごく最近話題になっているいくつかのトピックスについても触れたいと思います。

始めですから思い切り楽観的に考えて、筆者の思惑が成功したとすると、この連載におつきあいいただいた読者は、たとえば親戚の小学生に、超電導って何のこと、と聞かれたときに、ごまかさずに相手がそれなりに納得するように説明できるようになるはずです。

2. 超電導とはなにか

念のため超電導現象とは何かを復習しておきます。超電導状態では電気抵抗がゼロになり、エネルギーの損失なしで電流を流せるようになります。電気抵抗がないということが代表的な超電導現象です。但しこの現象はかなり低温でしか起こらず、最高でも摂氏マイナス 100 度以下でなければおこりません。超電導の世界では温度を絶対温度で表現することが多いのですが（絶対温度の零度は摂氏では約マイナス 273 度となります）、超電導現象は絶対温度で言っても 160 度以下の世界のお話です。十分冷却したときに超電導状態になる物質を、超電導物質と呼びますが、実際に超電導状態になる温度は超電導物質ごとに違います。現在までに発見されている超電導物質はいずれも何らかの方法で冷却しなければなりません。もし常温以上で超電導性を示す超電導物質が発見されれば、冷却が不要になり、もっと容易に超電導現象を利用できるわけですから、大変素晴らしいことです。しかしこれはまだ夢の段階にとどまっています。

電気抵抗がゼロであるという性質を完全導体と表現することもあります。超電導現象はもっと奥の深い物です。完全導体であることは超電導体の一つの性質であり、超電導体には他にも面白い性質があるのですが、それについてはおいおいお話することになると思います。

超電導現象についてまず理解していただきたいのは、超電導状態は固体が取りうる一つの「相」であるということです。「相」という字は一つの物事がいろいろと違った見かけをもって現れるときに、その見かけのことをいいます。例えば「人相」や「様相」という言葉の中の「相」がその意味

でしょう。よく例に引かれるのが、水が水蒸気になったり氷になったりする現象です。同じ水でありながら、いわゆる水は液体相、氷は固体相、水蒸気は気体相とよばれます。超電導も超電導物質が取りうる一つの相です。同じ物質が高温では常電導状態（超電導でない普通の状態のこと）になり、低温では超電導状態になるわけです。異なる相の間を（例えば温度変化に従って）移り変わることを相転移とよびます。超電導物質が温度低下に従って常伝導状態から超電導状態に移ることを超電導転移と呼びます。水が水蒸気になったり氷になったりするのも相転移ですが、超電導と比べるのには、いろいろな都合から強磁性転移を取り上げる方がいいのです。強磁性転移とは鉄やニッケルのような物質が高温の常磁性状態（永久磁石にならない普通の状態）から、低温の強磁性状態（永久磁石の状態）に転移する現象です。すべての永久磁石（強磁性体）はそれぞれ特有の転移温度を持っており、それ以上の温度では常磁性状態になります。筆者は子供の頃、「永久磁石の磁力^{注1)}はある温度以上で消滅する」と本で読んだ時に思ったものです。磁石の力が高温で弱くなるのは直感的にも分かる気がするが、ある温度以上で消滅するというのは言葉のあやで、本当は磁力がだんだん弱くなって、しまいには測れないぐらいに小さくなるということだろうと。その後、それは相転移というものであり、どこまで小さな値を測れるかというような技術的な問題と無関係だということを理解したときには、新鮮な喜びを覚えたものです。同じように、超電導状態というのも、物質の電気抵抗が冷却とともに次第に減少して、ついには測れないぐらい小さくなった状態、と理解してはいけません。

このように超電導状態も強磁性状態（永久磁石の状態）も、ある種の物質がある特定の温度以下で取りうる一つの相ということでは共通です。強磁性状態が超電導の場合と違うのは、図1に示す通り、超電導状態は常温より遥かに低い温度でしか実現されないのに対し、強磁性状態はいくつかの物質においては、常温においても実現しているということです。そのため強磁性状態（永久磁石）は身の回りに存在するため、超電導状態に比べて、身近な存在になっています。

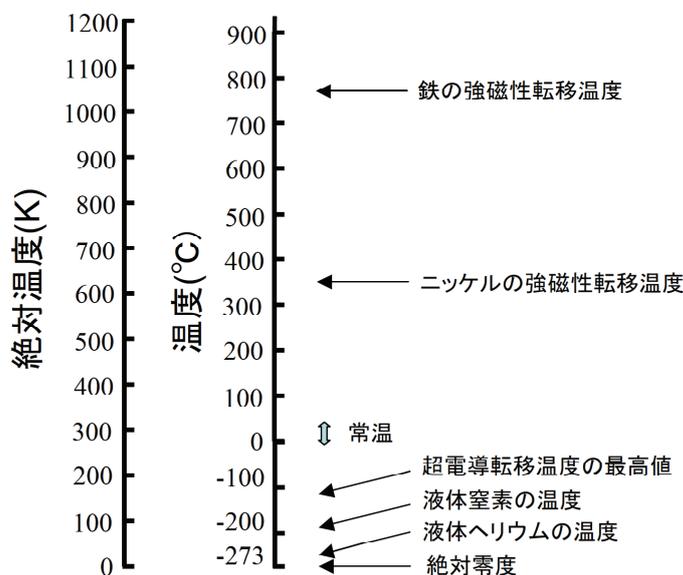


図1

さて、超電導物質が高温で常電導状態に、低温で超電導状態になるのはどうしてでしょうか。それは超電導状態の方がエネルギーが小さいからです。一般に物質はそのエネルギーが小さいほど安定します。安定するというのはここでは変化しないという意味です。エネルギーが大きいと、余ったエネルギーを何らかの形で放出して、自分はより低いエネルギーの状態に変化する可能性があります。

ます。しかし持っているエネルギーが小さければ、そのような変化が起こる余地がないという理屈です。例えば、棚の上の荷物は落ちるかもしれないが、床に落ちてしまえばそれ以上落ちることはなく安定するというのと同じことです。物質のある状態が安定して実現するというを理論的に主張するためには、その状態が低いエネルギーを持つということを示す必要があります。従って物理屋さんはエネルギーが小さいことを、「エネルギー的に得している」という言い方をすることがあります。例えば「超電導状態は常電導状態に比べて、運動エネルギーは損をしているが、ポテンシャルエネルギーで得をしている」という様な言い方です。これは運動エネルギーは大きい、ポテンシャルエネルギーは小さいという意味です。エネルギーが小さいことを得していると表現するわけですから、ずいぶん「エコ」な人たちですね。

ところで上のパラグラフの説明は片手落ちです。というのはある状態が変化するにはエネルギーを放出する以外に、逆にまわりからエネルギーを受け取ることにより別の状態に変化する可能性もあるからです。従って、エネルギーが小さいからといって必ず安定で変化しないわけではありません。特に周囲の温度が高いときにはそういう可能性が高くなります。そういう環境にあるときには最もエネルギーの低い状態ではなく、むしろ少しエネルギーの高い状態が実現するのです^{注2)}。これがつまり低温では超電導状態が、高温では常電導状態が実現する理由です。この辺の事情をより手短かに表現するために、エネルギーに温度の影響を取り入れた自由エネルギー^{注3)}という物理量が定義されています。この言葉を使えば、絶対零度でも有限温度^{注4)}のときでも単に自由エネルギーのより低い状態が安定に実現すると言えることになって便利です。

注1) 「磁力」という言葉は厳密には定義されていません。せいぜい「人間力」や「老人力」程度の厳密性しかありません。この文脈では「自発磁化」という言葉に置き換えるのが適切かと思われます。「磁力」を磁石同士が引き合う力、と定義することも可能でしょうが、自発磁化から磁石同士が引き合う力を求めるためにはほかにいくつものパラメタの値を特定する必要があり、ほとんど役に立つ定義にはならないと思います。

注2) このあたりの状況をもっと厳密に議論しようとする、エントロピーという概念を導入する必要があります。エントロピーというのは誰もが聞いたことはあるが、ほとんど理解されていないという悪名高い概念なので、ここでは深入りしないことにしたいと思います。

注3) 自由エネルギーの自由という言葉は、全エネルギーのうち(有用な形で)「自由に取り出せる部分」という意味です。この言葉を最初に使った人たちの関心は、上に述べた物理屋さんの立場とは異なり、ある物理系(例えば蒸気機関)からどれだけのエネルギーを有用な形で(熱でなく力学的な形で)取り出せるかということにあったので、取り出せる部分を自由エネルギーと命名したもののようです。

注4) 普通「有限」という言葉は、「無限」の反対の意味で使いますが、ここでは「有限の」という言葉を、無限でもなければゼロでもないという意味で使っています。特にこの文脈ではゼロでないという意味です。今後「有限温度」という言い方が出てくると思いますが、超電導を論ずるときには無限の高温というものは元々関係がありませんから、「有限温度」というのは絶対零度でなく少し高温という意味で使います。しかしたいていの場合常温よりは遥かに低温を想定しています。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

もっとやさしい「超電導」のおはなし (その2)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性研究部
特別研究員 中尾公一

前回は、超電導状態とは超電導物質が取りうる一つの相であり、低温では超電導相の方が常電導相よりも自由エネルギーが小さいために超電導状態が実現していることをお話しました。今回は超電導相と常電導相の違いを、より微視的な観点から理解したいと思います。

1. 量子力学

超電導状態を理解するには、量子力学と呼ばれる理論体系を知る必要があります。

電気伝導は物質中の電子の流れによって担われています。^{注1)}従って、超電導状態と常電導状態の違いは固体中の電子の振る舞いの違いです。超電導状態を理解するためには固体中の電子の状態を理解し、特に常電導状態との違いを理解する必要があります。そのためには量子力学と呼ばれる理論体系に従う必要があるのです。量子力学はミクロな世界で起こる非常に変わった、直感的に理解しがたい現象を記述する物理理論です。量子力学の奇妙さについては様々にいわれています。「量子力学が理解できたと思うのは、理解できていない証拠だ」といわれる事もあります。「量子力学を理解することは不可能で、慣れることができるだけだ」といわれる事もあります。アインシュタインは最後まで量子力学に慣れることを拒んだ人でした。彼は量子力学が間違っていることを確信し、そのことを証明するために多大の努力を費やしました。しかしこのことに関してだけはアインシュタインが間違っていました。量子力学は誰にも理解されていないかもしれませんが、しかし正しいと信じられています。

2. 常電導状態

さて、まず順番として常電導状態にある固体中の電子の挙動を量子力学的に理解する必要があります。

2.1 固体の成り立ち

固体は多数の原子からなっており、それぞれの原子は正の電荷を持った原子核とその周りの(複数個の)電子からなっています。原子が集まって固体を形成したとき、電子の一部がもともと所属していた原子を離れて固体全体を動き回るようになることがあります。そのような電子を伝導電子と呼びますが、伝導電子を持つ固体が電気を良く通す導体となります。低温になった時に超電導現象をもたらすものはこの伝導電子ですから、伝導電子の挙動が重要です。

2.2 パウリの原理

固体中で伝導電子になっていない電子は特定の原子に所属していますから、その電子の「状態」^{注2)}を表現する時に、どの原子に所属するかを考えればいいことになります。しかし伝導電子の場合は特定の原子に所属しないで動き回っていますから、その電子がどこにいるかということより、どのような速度で動いているかに注目する方が適当です。基本的には速い速度の電子程大きなエネルギーを持っています。さて物理系はそのエネルギーが小さければ小さい程安定するわけですから、総ての伝導電子が最も遅い共通の速度を持つ状態が固体全体として最も安定な状態でしょうか。ところが量子力学の世界ではそうはならないのです。量子力学では2個以上の電子が同じ「状態」を

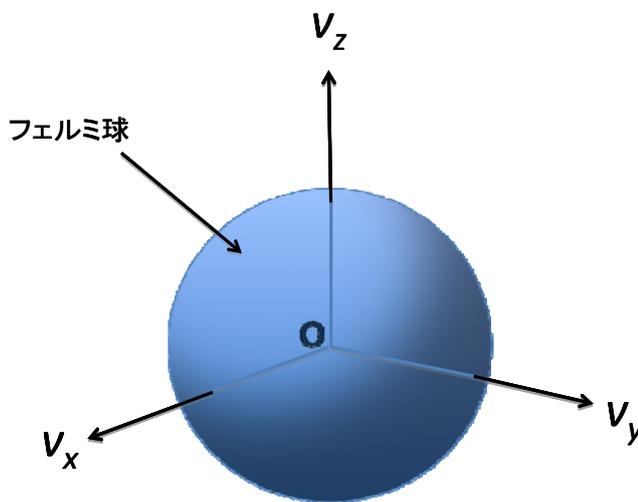
とすることは出来ないという決まりがあるのです。これを「パウリの原理」といいます。「パウリの定理」や「パウリの法則」と呼ばないところが大事で、これはあくまで原理であって、量子力学の中で導きだされる様なものでなく、むしろ量子力学がその上に建設されている土台の様なものなのです。したがって自然はそうなっているとして黙って受け入れるしかありません。

パウリの原理を受け入れた上で、伝導電子全体として最もエネルギーの低い状態はどのようなものか考えてみます。まず最も遅い速度を持った「状態」に1個の電子はいられるわけですから1個目の電子はその「状態」に入ります。2個目の電子は最も遅い「状態」には入れませんので、その次に遅い「状態」に入ります^{注3)}。3番目は更にその次、という風に順番にすべての電子を、パウリの原理に抵触しない範囲で最も小さなエネルギーを持つ「状態」に割り振った状態が、全体としても最も小さなエネルギーを与える状態です。ある「状態」を持つ電子が存在しているとき、その「状態」が電子によって占められている、という言い方をします。劇場の座席が占められているか、空席かという様なことです。なお速度はベクトル量なので、ベクトルとして異なる速度を持った「状態」が同じ運動エネルギーを持つこともあり得ます。

マクロな物体^{注4)}の中には多数の電子が存在しています。例えば 1 cm^3 の金属中には 10^{24} 乗個もの伝導電子が含まれています。したがって全体として最も低いエネルギーを持つと言っても、そのなかで一番速い速度を持つ電子はかなり速い速度で動いていなければなりません。その速度をフェルミ速度と呼びますが、毎秒 1000 km にも達する高速になります。

2.3 仮想的な運動量空間

このように伝導電子系を考察する時には各電子がどの位置にあるかよりも、各電子がどのような速度で動いているかが問題になりますので、電子の「状態」を表現する舞台としては位置座標によって表される通常の3次元空間よりも、運動量^{注5)}座標で表した、仮想的な運動量空間を思い描いた方が便利です。速度は方向と大きさを持ったベクトル量ですから3次元空間で原点から引いた矢印の終点として表現することが出来ます。これが仮想的な運動量空間です。運動量空間においては一つの点が特定の速度、あるいはその速度で運動している電子を表すこと



になります。運動量空間で原点に近い点は比較的遅い速度を持つ「状態」、原点から遠い点は速い速度を持つ「状態」です。従って全体として最もエネルギーの小さい状態は、原点を中心として球状に分布した「状態」が電子によって占められていて（満席になっている）、その外側の「状態」は総て占められていない（空席になっている）様な状態です。この球のことをフェルミ球、球の表面のことをフェルミ面と呼びます。超電導にならない物質の絶対零度における常電導状態はこの様なものと理解して下さい。

有限の温度（その1）で説明した通り、絶対零度よりちょっと高い温度を想定しています）ではどうなるでしょうか。温度の影響で一部の電子はより高いエネルギーを持つ「状態」に移る可能性があります。但しパウリの原理がありますから、既に占められている「状態」に移ることは出来ません。従って、元々運動量空間の原点に近いところにいた電子は少し位高温になっても、上の「状

態」が総てふさがっていますから、別の「状態」に移ることが出来ません。原点に近いところにいた電子がフェルミ面の上の空席まで一気に飛び移るには数万度もの高温が必要です。しかしそのような高温ではそもそも固体は存在し得ませんから、そのような現象は決して起こりません。ただしもともとフェルミ面の少し下にいた電子にとっては、わずかなエネルギーをもらえばフェルミ面の上の空席に飛び移ることが出来ますから、比較的低温でもそのような飛び移りがおこるはずで。いったんそのような飛び移りがおこれば、今度はフェルミ面の下に空席が出来ますから、より高いエネルギーを持っていた「状態」からべつの電子が飛び移ってくることもあります。有限の温度ではこのような動きが常におこっています。フェルミ球の原点近くでは電子の飛び移りが無く総ての電子がじっとしていますが、フェルミ面の近くでは常に電子の入れ替わりがおこっています。ちょうど水深 4000 メートルの太平洋の海底は静かでも海面では嵐が吹き荒れている様なものです。実際にフェルミ球をフェルミの海と表現することもあります。

もし映画「ミクロの決死圏」に出てくる様な乗り物に乗って運動量空間の中を探検できたらどのように見えるでしょうか。運動量空間内の総ての速度に対応する位置に発光ダイオードのようなものがおかれていて、その「状態」が電子によって占められている時には点灯し、占められていない時には消灯するものとします。するとフェルミ球の奥深くにある発光ダイオードは常に点灯しています。またフェルミ面より遥かに高いところにある発光ダイオードは常に消灯しています。フェルミ面付近にあるものだけがひっきりなしに点灯と消灯を繰り返しています。常電導状態の運動量空間を探検することが出来たら、そのような光景が見られるはずで。

3. 超電導状態

さて、以上は常電導状態のお話でした。それでは超電導状態ではどうでしょうか。超電導状態も運動量空間を使って表現されます。超電導状態の運動量空間を探検したら常電導状態と異なるどのような光景が見られるのでしょうか。やはりフェルミ面付近の発光ダイオードだけが点滅を繰り返しています。一見したところ常電導状態の場合とかわらないように見えます。しかし常電導状態とは何かが違うはずで。点滅の様子を慎重に観察してみましょう。すると重大な違いに気がつきます。いくつもの発光ダイオードがランダムに点滅しているように見えたのですが、実はそこにある種の規則性があるのです。この点が発光している時にはあの点も必ず同時に発光しているという様な相関があるのです。

さて今回は字数がつかまりました。

今回は超電導の電気伝導を理解するために、おもに常電導状態の電子の振る舞いについて説明しました。次回はいよいよ超電導の本質に迫りたいと思います。

注 1) 電気には正負の区別があり、電子は負の電荷を持っています。電子の電荷を正と定義するか負と定義するかは純粋に便宜的、歴史的なもので、電子の電荷が正と定義されていたとしても特に不都合はなかったのです。しかし歴史的偶然によって負と定められたために、電流の向きと実際に電線の中で電子が移動している向きとが逆になってしまいました。このことを悔しがっている人がいますがものは考えようです。電子の電荷が負と定義されたために原子の中心に存在し、電子と反対の電荷を持つ粒子を陽子と命名することができました。太陽のまわりをいくつもの惑星が公転している太陽系モデルで原子をイメージすることがありますが、その場合中心に存在している粒子が「陽子」であることはごく自然ではないでしょうか。

注 2) 状態という言葉は日常でもよく使われる言葉ですが、量子力学では単独の粒子や粒子の集合体に対して厳密に定義された専門用語です。意味は日常用語の状態とほぼ同じです。ここでは仮に量子力学の専門用語としての「状態」を括弧付きで表すことにします。「状態」についての計算を行

うためには「状態」を数学的に表現する必要がありますが、そのための一つの方法が波動関数と呼ばれるものです。

注 3) いったいどれくらい速度が違えば別の新しい「状態」と見なされるのかという疑問がおこるかもしれませんが、その辺はうまく出来ているとだけ言っておきます。

注 4) マクロな物体というのは大きい物体という意味ですが、ここでは原子サイズより遥かに大きいという意味です。従って、例えば1ミクロン(1000分の1mm)ぐらいの大きさがあれば十分マクロな物体と言えます。

注 5) 習慣上「運動量」という言葉を使いますが、ここでは「速度」と同等のものだと思って下さい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

もっとやさしい「超電導」のおはなし (その3)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性研究部
特別研究員 中尾公一

前回は、導体の中の電子の状態を表現するための運動量空間や、その中で定義されるフェルミ面を紹介し、運動量空間を使って常電導状態がどのように表現されるかというお話をしました。有限温度の常電導状態ではフェルミ面の近くの「状態」が、ランダムに占められたり空席になったりを繰り返しています。一方超電導状態ではどうでしょうか。前回の最後でも述べましたが、一見したところ常電導状態とあまり区別が付きません。しかし詳しく見てみると「状態」が占められたり空席だったりするその移り変わりがランダムではなく、ある種の規則性を持っているのです。今回は（規則性をもつ）超電導状態の本質についてお話します。

1. 電子同士の相互作用

前回紹介した常電導状態の描像では、運動量空間で各電子が（パウリの原理による制限をのぞけば）互いに影響されず、それぞれ無関係に飛び回っていると考えています。しかしこの見方はもちろん厳密には正しくなく、近似的に考えているのです。この近似法ではまず電子一個の運動を考え、後は単にそのような電子がお互いに無関係にたくさん集まっているだけと考えるので、一電子近似と呼ばれます。実際には電子は互いに相互作用しますから、これはかなり乱暴な近似に見えますが、それでも常電導状態の性質はかなりよく説明できるのです。しかし一電子近似ではあくまで各電子の運動を独立と考えますから、前回紹介した、規則性をもっている超電導状態の本質は説明しようがありません。ではどうすればいいのでしょうか。

ここで思い出してほしいのですが、超電導状態は常電導状態と異なる一つの相であり、冷却に伴って起こる常電導状態から超電導状態への変化は相転移と呼ばれる現象であることを以前にお話ししました。相転移というのは簡単に言ってしまうと、ある物質の性質が急に変わることです。多くの特性は温度変化に伴い徐々に変化します。しかし相転移はそれと異なり、ある決まった温度で急に起こる現象なのです。なぜそのようなことが起こるかということ、そこに協力現象というものがあるからです。

協力現象は人間社会においてもみられます。例えばファッションでも流行語でも生活習慣でも、何か新しいものが出現したときには必ず少数派です。しかしやがて多くの人に受け入れられるようになり、ある程度まで達すると急に社会全体に普及します。このようにある流行がある時点で急に広がることは相転移に似ています。どうしてこのようなことが起こるかということ、社会を構成する個々人が多少とも互いに影響し合う、つまり流行していること自体がさらに流行を推進するという現象があるからです。これは協力現象の一例と言えます。電子系についても同じで、相転移が起こるためには個々の電子が他の電子から何らかの影響を受ける、つまり協力現象が起きる必要があります。従って相転移によって起きる超電導状態を理解するためには一電子近似を離れ、電子同士の相互作用をしっかりと考慮する必要があることとなります。

以上述べたような事情で、超電導現象の解明にはどうしても電子同士の相互作用を考慮した多電子問題を扱う必要があるわけです。

2. 電子間相互作用 と BCS 理論

それでは、実際に超電導状態に起きている電子間の相互作用とは何でしょうか？

電子はすべて負の電荷を持っていますから、電子同士にはクーロン反発力が働きます。しかし電子同士の相互作用としては直接のクーロン反発力以外に磁気的なものや間接的なものもありますから、それらを総合すると物質によっては実効的に電子間に反発力でなく引力が働いていると見なしてよい場合があります。結論から先に言えば、この実効的な引力が超電導状態出現の原因なのです（注1）。補足ですが、物質によって電子間の引力の有無や大小は異なり、その違いが超電導状態になる物質とならない物質の違いの一因になっているのです。

運動量空間内の点で表される状態はあくまで一つの電子がとりうる状態を表していますから、一電子状態です。電子間の相互作用（引力）が重要な超電導状態を説明するにはこれでは不十分です。ここで一電子状態に対して、運動量空間全体で表される、すべての電子を同時に考慮した状態を仮に「全電子状態」と呼ぶことにします。全電子の数を仮に N 個とします。 N は 10 の 20 乗というぐらいの大きな数です。運動量空間内の点のうちから、 N 個を選んでそれらの点が電子によって占められて、他は全て空席だとすると、それが一つの「全電子状態」に対応します。この「全電子状態」は、すべての電子を考慮しているとは言っても、 N 個の一電子状態を単に寄せ集めただけですから特に『単純な「全電子状態」』と呼ぶことにします。 N が元々巨大な数であるうえに、その組み合わせになりますから、『単純な「全電子状態」』の数はほとんど無限大になります。しかし考慮しなければならないのはこのような『単純な「全電子状態」』だけではないのです。実は量子力学における「状態」はいくつか重ね合わせて新しい「状態」を作ることができるという性質をもっています。これを「状態」の重ね合わせと呼びます。重ね合わせは一電子状態についても、全電子状態についても可能です。「状態」の重ね合わせは、ちょうど昔学校で習ったベクトルの合成のようなものです。実際「状態」のことを状態ベクトルと呼ぶ事もあります。

量子力学的な「状態」の重ね合わせについて、ベクトルの合成のようなものだという説明に納得しすぎた人は、たとえば x 方向に運動している一電子状態と y 方向に運動している一電子状態を重ね合わせると、 x 軸と y 軸の間の 45 度の方向に運動している状態が出来上がると考えるかもしれませんが、それは違います。実際に出来上がるのはどちら向きに動いているともいえない新しい状態です。その様子は 2 つの異なる方向に進行する波が干渉して出来上がるパターンに似ています。「状態」の重ね合わせはベクトルの合成にも似ていますが、波の干渉にも似ています。

超電導状態とは、上で考えたような、運動量空間内の点のうち N 個を選んで作った『単純な「全電子状態」』ではなく、それらを重ね合わせて作られた『複雑な「全電子状態」』なのです。（しかしそれを運動量空間の中の図で表すことはちょっと難しくなります。）超電導状態が、ほとんど無数にある『単純な「全電子状態」』のうちどれをどのように重ね合わせた『複雑な「全電子状態」』からできているかが問題です。

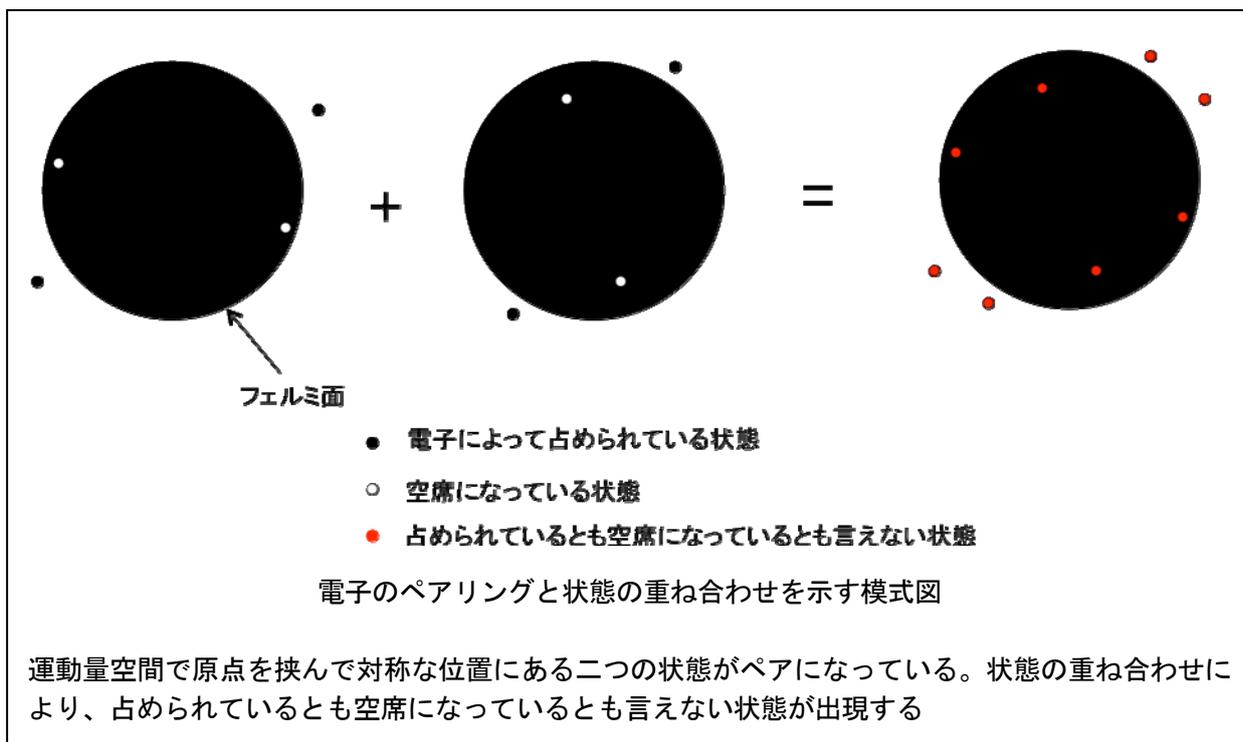
1957 年にアメリカの 3 人の物理学者が、この問題に取り組みました。その時点で知られていたいくつかのヒントに基づき、彼らは運動量空間で、原点をはさんでちょうど反対側にある全ての一対の「一電子状態」をまずペアにしました。ペアにするという意味は原点を挟んで対称の位置にある二つの点は常に両方占められているか、または両方空席になっているということです。そして超電導状態を実現するためにはすべての『単純な「全電子状態」』の内、そのような性質を持っているものだけを重ね合わせればよいと仮定しました。その重ね合わせ方は、全体のエネルギーが最も小さくなるように決めました（注2）。そして彼らはもし実際にそのような状態があったとするとその

物質はどのような性質を示すかを計算することができました。その結果当時実験的に知られていた超電導体のほとんどの性質がうまく説明されることが分かったのです。そのため電子がペアを作った『単純な「全電子状態」』を重ね合わせた『複雑な「全電子状態」』が超電導状態であり、超電導現象の本質が、電子がペアを作ることにより、それが様々な超電導体の性質を生み出す要因であることが疑う余地もなくなったのです。この理論を3人の物理学者の頭文字をとってBCS理論と呼びます。この功績により、三人の物理学者はノーベル賞を受賞しました。

(http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1972/index.html)

3. 超電導状態についてのまとめ

超電導状態における「全電子状態」は、運動量空間の各点が占められているか空席になっているかで表されている多数の『単純な「全電子状態」』を重ね合わせた新しい「全電子状態」です。この最終的な「全電子状態」を、出発点に戻って運動量空間の各点が占められているか空席になっているかという観点で見るとどうでしょうか。フェルミ面より遥かに深いところの点はほぼ確実に占められています。またフェルミ面より遥かに高い所にある点はほぼ確実に空席です。ところがフェルミ面付近の点は、占められている「状態」と、空席になっている「状態」の重ね合わせになっており、その「状態」が占められているとも空席になっているともいえない不思議な状況です。そのような「状態」が許されることは直感的には受け入れがたいですが、量子力学の世界ではそうなっているのです(注3)。



超電導状態ではフェルミ面以上の「状態」も部分的に占められていますから、運動エネルギーに限って言えば、超電導状態は常電導状態より大きなエネルギーを持ってしまふこととなります。なぜそのような運動エネルギーの大きな状態が実現するかというと、その方が(運動量空間の図では表しにくいですが)電子間の引力からくるポテンシャルエネルギーが小さくなるからです。電子間の引力からくるポテンシャルエネルギーの減少を最も有効に利用するためには電子がペアを作っている「全電子状態」だけから最終的な重ね合わせを作る必要があったのです。

以上お話しした通りに超電導現象は量子力学を使わなければ説明できない、典型的な量子現象です。量子力学は前回紹介した通り、本当は誰も理解していないと言われる、奇妙な理論体系です。とは言うものの量子力学が成立したと言われるのが 1927 年ですから、BCS 理論により超電導現象が解明されるまで 30 年を要しています。量子力学が成立したときには既に超電導現象自体は発見されていましたので、量子力学を建設した物理学のいわば巨人たちも超電導現象の解明を試みたのです。しかし実際に解明されたのは 30 年後の次の世代によってでした。この事実にも超電導現象を理解することが（この解説のタイトルに反して）いかに難しいかが表れています。

次回は電気抵抗の消滅や磁束の量子化等、超電導体の持つ特殊な性質についてお話ししたいと思います。

（注 1）引力の原因としては、いくつかの機構が提案されており、特定の超電導体における超電導発現機構としてはほぼ確定したケースも議論中のケースもあります。

（注 2）超電導の対称性が s 波であるとか d 波であるとか言われることがありますが、それを決めるのはこの重ね合わせ方です。

（注 3）量子コンピュータや量子通信では、量子力学の持つそのような性質を積極的に利用しようとしています。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

もっとやさしい「超電導」のおはなし (その4)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性研究部
特別研究員 中尾公一

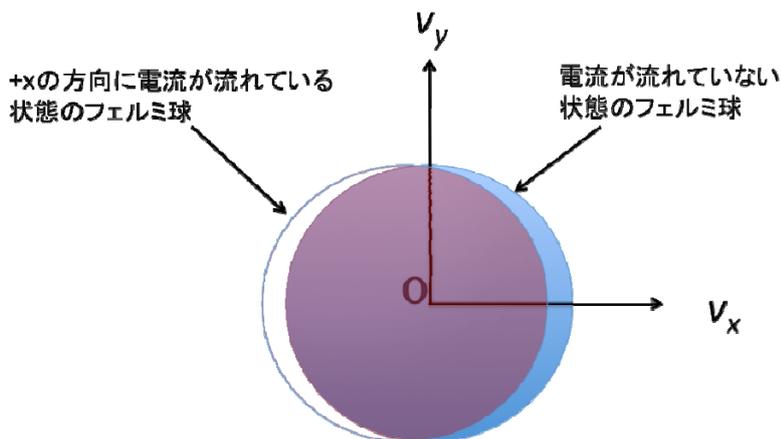
前回は、超電導状態では運動量空間で原点を中心にして対称の位置にある一電子状態同士がペアを組み、さらにそれらの状態がある規則性を持って量子力学的な意味で重ね合わされていること。その理由はそのような状態をとることによって、電子間に引力が働くときには全体のエネルギーが最も小さくなるから、ということの説明をしました。超電導状態でそのような特殊な電子の状態が実現しているのは、あくまでその状態で全体のエネルギーが最も小さくなるという理由によるのですが、その結果として超電導状態はいくつかの特異な性質を持つことになります。今回はそれらについてお話ししたいと思います。

1. 電気抵抗の消滅

超電導体における最も特徴的な性質はなんと言っても電気抵抗の消滅、即ち電圧をかけなくても電流が流せるようになることです。超電導という名前の由来がこの現象から来ていますし、超電導体の有用性の多くがこの性質によっています。従って、超電導体ではなぜ電気抵抗がゼロになるのですかという質問を受けることがよくあるのですが、この当然な質問は答えるのが意外に難しいのです。そのためにはまず、常電導状態ではなぜ電気抵抗があるのかという問題から出発する必要があります。(注1)

1.1 常電導体における電気抵抗の機構

常電導状態の性質は運動量空間を使うとよく説明されるのでした。運動量空間内のそれぞれの点はある速度を持って運動している一電子の状態を表しています。原点を中心とする球内の状態が占められており、外部の状態が空席になっている状態（中心が原点にあるフェルミ球）では、すべての電子の運動がそれぞれ相殺し合って全体としては電子の流れ、即ち電流はありません。ただし個々の電子はかなりの高速で動いています。この状態にたとえばx方向に電場を印加するとどういふ変化が起こるのでしょうか。電子は負の電荷を持っていますから電場の方向と逆向きに力を受けます。そのために個々の電子の運動の方向が-xの方向に変化しようとしています。このことを運動量空間で説明すると、全体として運動量空間内のフェルミ球が少し-x方向に移動することになります。すると電子の運動が全体として相殺されず、その分だけ-x方向の運動が残ります。即ち+x



の方向に電流が流れることとなります。そのとき全運動量エネルギーは多少大きくなります

さて電子は真空中を動いているわけではなく、伝導電子を失って差し引き正の電荷を持つことになった原子が並んでできている固体の中を動いています。従って、すぐにも原子にぶつかりそうです。しかし実は量子力学の世界では電子は波のような性質も持っており、原子が規則正しく並んでいる限りは、原子に邪魔されずに、あたかも真空中を進むかのように運動することができるのです。しかしこれはあくまで原子が規則正しく並んでいる時の話です。実際には原子は多少振動しています。そのため原子の配置の規則正しさが失われ、電子の運動も乱され、真空中を進むかのように運動することができなくなります。運動量空間の各点は一定の速度で動いている状態に対応していますから、電子は運動量空間の一点に長時間とどまることはできず、別の点で表される状態に飛び移ることになります(注2)。電子の状態間の飛び移りはパウリの原理を破らない範囲でランダムに起こりますが、確率的にはエネルギーの高い状態から低い状態への変化が起こりやすいので、上で考えた、フェルミ球が少しシフトした状態は電場を印加し続けられない限り、やがて元の中心の位置に戻ってしまいます。つまり電場を加え続けられない限り、一定の電流は維持できないのです。言い換えると電気抵抗があることとなります。それでは超電導体では何が違ってくるのでしょうか。

1.2 超電導状態におけるエネルギーギャップの存在

超電導現象においては「エネルギーギャップ」という言葉が重要なキーワードになっています。この節ではエネルギーギャップの意味を少し丁寧に説明したいと思います。エネルギーギャップは常電導状態では存在しません。ギャップがないということは連続的だと言うことです。そこでまず、常電導状態においてエネルギーが連続的であるということの意味を説明します。

常電導状態での性質は運動量空間を使ってうまく説明できるということは、何度もお話ししました。運動量空間の各点はそれぞれ異なる一電子の状態を表しています。運動量空間ではたくさんの点が密集しています。したがって隣り合った点が表す状態のエネルギーの大きさの差はわずかです。今、常電導状態でも最もエネルギーの低い状態、つまりフェルミ面の内側の状態がすべて占められており、フェルミ面の外側がすべて空席になっている状態を考えます。フェルミ面のすぐ下にある電子をフェルミ面のすぐ上の空席の状態に移動させてみます。今考えた二つの一電子状態は近接していますからそれぞれのエネルギーはほとんど同じです。従って移動の前後で全電子状態のエネルギーもほとんど同じです。このように、常電導状態の全電子エネルギーは最も低い値から始まって、遥かに高い値まで、事実上すべての値を連続的にとる事ができるのです。このことをエネルギーギャップがないと表現します。これは極めて自然なことと思われませんが、超電導状態では以上の議論が成立しないのです。

超電導状態では電子間に引力があり、全電子がある規則性を持った状態をとることにより、この引力によるポテンシャルエネルギーの大幅な低下を実現し、運動量エネルギーに関しては多少大きくなるにもかかわらず、全エネルギーの減少が実現されているのです。またこの現象は協力現象であり、すべての電子がすべての電子の影響を受けて全エネルギーの低下が実現しているのです。この状況は運動量空間では表しにくいのですが、強いて描写すれば、運動量空間の点滅に規則性があり、特に原点を中心に対称な位置にある二つの点は常に同時に点滅しているのです。ここでどれか一つの電子をこの規則的な点滅から逸脱させ、別の点に移したとします。超電導状態ではフェルミ球の外側の状態も一部確率的に占められており、内側の状態も一部確率的に空席になっていたことを考えると、運動量エネルギーだけに関しては、この操作により大きくなるどころかむしろ小さくすることも可能です。しかしポテンシャルエネルギーに関してはどうでしょうか。問題は超電導状態におけるポテンシャルエネルギーの低下はあくまで協力現象であることです。そのため一個の電子が規則的な点滅から逸脱したことは、その一個の電子のエネルギーが増加することを意味するだけではなく、他のすべての電子のエネルギーにも影響を与えるのです。わずか一個の電子を超電

導状態から逸脱させることにより、その影響が全電子に及び、全体のエネルギーとしてはかなり大きな増大が起きてしまうのです。そのため超電導状態を一部壊そうとするときいきなりエネルギーが大きくなってしまいます。この事情を超電導状態にはエネルギーギャップがあると表現しています。

1.3 超電導状態における電気抵抗の消滅

いよいよ超電導状態でなぜ電気抵抗がないかの説明に取りかかることができます。まず超電導電流が流れている状態はどのようなものでしょうか。常電導状態で電流が流れている状態はフェルミ球が全体としてシフトしたような状態だという話をしました。これは超電導状態についても同じです。全体が規則的に点滅している状態を全体として運動量空間の中でシフトさせると超電導電流が流れている状態が実現されます。その状態では原点を中心として対称な位置にある点が同時に点滅するのではなく、原点から少しシフトした点を中心として対称な位置にある点が同時に点滅することになります。全体としては運動量エネルギーが少し大きくなりますが、それでも立派な超電導状態なのです。

常電導状態の場合フェルミ球がシフトした状態は電場をかけ続けないと、電子の散乱のためにやがてもとの電流が流れていない状態に戻ってしまうのでした。超電導体の場合も潜在的には電子を散乱させる機構はあります。しかし電子を散乱させることは、その電子を超電導状態の規則性から逸脱させることになります。その結果エネルギーがエネルギーギャップの分だけ大きくなってしまいます。エネルギーは全体として保存されなければなりませんから、その分のエネルギーはどこからか注入する必要があります。そのエネルギー源がない場合は超電導電流が流れている状態は変化したくとも変化のしようがなく、その状態にとどまり続けるしかないのです。つまり電流は流れ続け、電気抵抗はないことになります。

超電導電流が流れている状態（原点からずれた点を中心とする超電導状態）は電流が流れていない状態（原点を中心とする超電導状態）より全体として大きなエネルギーを持っています。それなら後者の方がより安定なので、前者が自然と後者に移り変わるといっておこなないでしょうか。これは原理的にはあり得ます。ただしこの変化が、固体を作っている原子の振動による電子の散乱によって起こる可能性はほとんどゼロです。その変化を起こすためにはすべての電子を同時に都合良く散乱させる必要があり、そんなことは確率的にあり得ないからです。

超電導状態といっても無限に大きな電流を流せるわけではありません。流れている電流があまりに大きいときは運動エネルギーの増加が大きすぎ、ポテンシャルエネルギーの低下の効果が及ばなくなるため超電導状態は壊れてしまいます。そのため超電導体が抵抗ゼロで流すことのできる電流値には限界があります。この電流値を対破壊電流と呼んでいます。

（注 1）常電導状態ではなぜ電気抵抗があるのかという質問を受けることはほとんどありません。あるいは導体中で電子が動くときには摩擦力のようなものが働くので常に力（電場）をかけていないと一定の電流を保てないのです、というような説明で簡単に納得してもらえます。これは日常生活で、動いている物体は力を加え続けられない限り、スケートリンクのような滑りやすい場所でさえ、いずれ摩擦のために止まってしまう、という事実を経験しているので納得しやすいのだと思います。かといって、それではなぜ摩擦があるのですかという質問に答えられる人は少ないとおもいます。納得できるかできないかの違いは、単に慣れているかどうかにかすぎないのかもしれない。

（注 2）電子が散乱されないで自由に運動できる時間は温度に大きく依存しますが、室温では 10 のマイナス 14 乗秒程度の、通常の感覚で言うと非常に短い時間です。

【隔月連載記事】

もっとやさしい「超電導」のおはなし (その5)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性研究部
特別研究員 中尾公一

前回は、超電導状態で電気抵抗が消滅する理由について説明しました。その理由は一言で言うと、常電導状態において電気抵抗をもたらしている機構が、超電導状態ではエネルギーギャップの存在により、働かなくなるからでした。とは言え、書かれていることの一つ一つは理解できるが、全体としてどうしても腑に落ちないという方も多いと思います。電気抵抗の消滅は超電導現象の最も代表的な性質ですし、超電導体の応用の多くがその性質に基づいていますので、もう少しその話を続けたいと思います。

超電導体における電気抵抗の消滅の説明が受け入れられにくいことの原因の一つは、電気抵抗という現象がこの世界であまりにもありふれていることです。仮にすべての金属が超電導状態であるパラレルワールドがあったとします（そのような世界を仮定しても、自然の基本法則を破ることにほならないと思います）。もしその世界で電気抵抗を持つ物質が発見されたとすると、その物質は電気エネルギーを熱に簡便に変換できる新機能材料として珍重されるのではないでしょうか。そしてその世界の物理学者は電気抵抗が発生するメカニズムを熱心に研究することでしょう。

さらに超電導体における電気抵抗の消滅を分かりやすく説明しにくいことの原因の一つは、それが一種の「不在証明」になっていることです。「不在証明」とは何かが存在しないことを証明することです。何かが存在することを証明するには現物の一つを見つければいわけですが、何かが存在しないことを証明するのは普通大変難しく、いくら探してもないのだからないのだろうという言い方しかできない場合もあります。電気抵抗の消滅についても、結局のところ電気抵抗が発生するメカニズムがないのだから、電気抵抗がないのだとしか言えなくなって、それでは納得できないと、拒否されてしまうわけです。

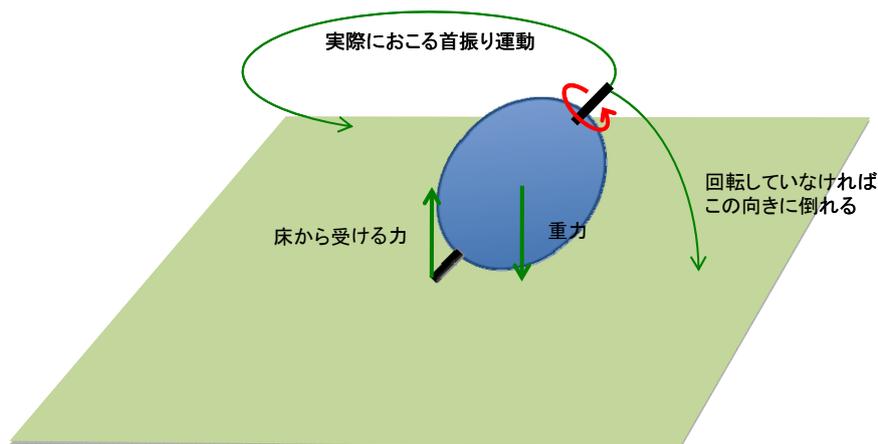
そこで今回は前回のような正攻法の説明でなく、一つの試みとして、別の切り口からの説明を試みようと思います。

1. 回転しているコマはなぜ倒れないか

回転しているコマは倒れません。回転しながら傾いているコマは首振り運動をしますが、なかなか倒れません。直立して回転しているコマが倒れないのはともかく、傾いているコマがそのまま倒れないのはとても不思議です。不思議ですが、あまりに見慣れているために、腑に落ちないとして悩む人はあまりいないようです。

床の上で回転しているコマを考えます。コマ全体が重力を受けています。全体が受ける重力はその重心に集中していると考えられます。コマはまた床からも力を受けていますが、その力を受けるのは軸の末端です。そのためコマが直立していない限り床から受ける力は重力を打ち消すことができません。従って、コマは図に示した向きに倒れてしまいそうに思えます。コマが回転していなければ実際そのように倒れてしまうでしょう。ところがコマは首振り運動をするだけで倒れません。回転しているコマは角運動量をもっています。平行移動している物体が運動量を持っているのと同じで、回転している物体は角運動量を持っています。慣性の法則は力を加えない限り運動量が保存され、変化しないという法則ですが、同じように偶力を加えない限り角運動量は保存され、

変化しません。回転しているコマがそのまま倒れる過程はこの角運動の保存則を破ってしまうのです。従って、コマは倒れたくても倒れることができないのです。コマには不思議な能力があつて倒れないのではなく、倒れるという過程が成立し得ないために倒れたくても倒れることができないのです。皿回しの皿がなかなか落ちないのも、車輪が回転している（走っている）自転車がなかなか倒れないのも、同じ理由によります。



2. ニュートリノはなぜ地球をも透過するか

小柴教授のノーベル賞受賞によってニュートリノと言う素粒子が一般にもよく知られるようになりました。この粒子は地球ほどの巨大な物体でも容易に通り抜けると言われています。この並外れた“透過力”はどこからくるのでしょうか。

光や粒子が、他の物体によって吸収されたり散乱されたりすることもやはり物理的過程です。光や粒子が物体と何らかの相互作用をするためにそのような物理過程が起こります。何らかの相互作用とはたとえば電磁気的な相互作用です。もしそのような相互作用がなかったらどうなるでしょうか。実際にニュートリノは他の物質とほとんど相互作用をしないのです。従ってニュートリノは物体に吸収されたり、散乱されたくてもできないのです。他の物質からほとんど影響を受けないので、ニュートリノは宇宙空間を飛び続けるしかないのです。決して並外れた“透過力”などというものがあるのではなく、言うなれば吸収されたり散乱されたりする能力が欠如しているのです^{注1)}。

3. 電気抵抗の消滅の別の見方

以上、回転しているコマやニュートリノという、直接には超電導とは関係のない現象をお話ししましたが、同じような見方で超電導体における電気抵抗の消滅を見ることはできないでしょうか。回転しているコマが倒れないのは、倒れないための特別な能力があるのではなく、単に倒れるという物理過程が自然法則に反するので許されないためでした。ニュートリノが地球を透過するのは、ものすごい“透過力”があるのではなく、他の物質と相互作用する能力が欠如しているからでした。同じように、超電導体が電気抵抗を持たないのは超電導体の中で、電流を散乱させる機構が欠如しているからです。電気抵抗がないということは人間にとって大変に有用なので、“そんなうまい話があるのか、あるとすればどんな不思議な理由があるのか”という風に考えがちですが、自然法則には良い悪いという価値観はありません。電流を運んでいる電子を散乱させる機構があれば電気抵抗が発生するし、そのような機構がなければ電流は流れ続けるしかないのです。

古代ギリシャの時代から中世まで、物体は静止しているのが本来の状態、動くためには力を加え続ける必要があると人々は信じていました。しかしそれは多くの場合摩擦などの相互作用がある

ため、本当にまわりから力を受けなければ物体は同じ運動をし続けるはずだということにガリレオ・ガリレイが気付きました。超電導体中の電流もほかからの力を受けることができないために、流れ続けるしかないのです。

そのような見方をしたとしても、もちろんその次には、電流が真空中を流れているのならともかく、固体中では電子と原子の衝突がひっきりなしに起こっているはずなのになぜ超電導電流は固体を作っている原子の集まりから力を受けないのかという疑問が起こります。その問いに答えようとしたのが、前回の説明でした。超電導電子の状態にはエネルギーギャップがあるために、ちょうど回転しているコマが倒れることができないように、エネルギーや運動量の保存則と言う基本的な条件を満たしながら、原子の集まりから散乱され、エネルギーを渡すという過程が成立し得ないので、その間の事情を説明したのが BCS 理論でした。

常電導体においても超電導体においても、電流が流れている状態は電流が流れていない状態よりも高いエネルギーを持っています。したがってその電流が減衰し、電流のエネルギーが熱に変わるという過程はエネルギーの保存則やエントロピー増大の法則を破りませんので、自然に起こってもよいように思われます。現に常電導体ではそれが起こります。超電導体でも原理的には起こってよいということは前回もお話ししました。しかしその確率はとんでもなく低く、猿がでたらめにタイプライターをたたいて「ハムレット」を書き上げる確率より小さいぐらいなのです。それは、常電導体においては各電子がいわばバラバラに運動しているので個別に散乱されることができて、電流がすこしづつ減衰するということが可能ですが、超電導体においてはすべての電子がいわば一体となって運動しているために、個々の電子が独立に散乱されることができず、全体が同時にしかるべく散乱されなければならない、その確率が天文学的に低いのだという言い方もできるでしょう。

今回は最終回となりますが、最後に超電導物質の応用に関するお話をする予定です。

(注 1) ニュートリノはそれでもわずかながら他の物質と相互作用をするので、なんとか検出できるわけですが、仮に他の物質とまったく相互作用しない素粒子があったらどうなるのでしょうか。そのようなものは存在しません。他の物質とまったく相互作用しないならどんな検出器でも検出することができません。それなら存在しないのと同じです。存在しないと同じであれば、存在しないと言ってもいいはずですが。まあこれは存在という言葉の定義の問題でもあります。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

もっとやさしい「超電導」のおはなし (その6)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性研究部
特別研究員 中尾公一

この解説も今回が最終回です。これまで超電導現象がなぜ起こるか、超電導状態ではなぜ電気抵抗が消失するかなど、ごく基本的な内容について説明してきましたが、最終回では実際に超電導体を応用するときの問題になってくる、いくつかの注意点と、実際に使われている、または近い将来使われるはずの超電導体についてお話したいと思います。

1. 超電導性が維持される範囲

超電導現象が発現するのは、ある決まった臨界温度以下であることは繰り返し説明しました。従って温度の上昇が超電導性を失わせることは言うまでもありません。それ以外にも大きすぎる磁場によっても超電導性は破壊されます。さらに、超電導体といえども無限に大きな電流が流せるわけではなく、大きすぎる電流によっても超電導性は破壊されます。超電導性が維持される最大の磁場及び電流密度を臨界磁場、臨界電流と呼びます。したがって超電導体を用いた装置を設計するときには臨界電流密度以下の電流しか流れないように、かつ臨界磁場以下の磁場しか加わらないようにしなければいけません。臨界磁場及び臨界電流の値は温度に依存し、特殊な例外を除けば低温ほど大きな値を持ちます。超電導体の特性を表現するのに、図1に示すような温度、磁場、電流密度の3次元空間における臨界面を用いることもあります。

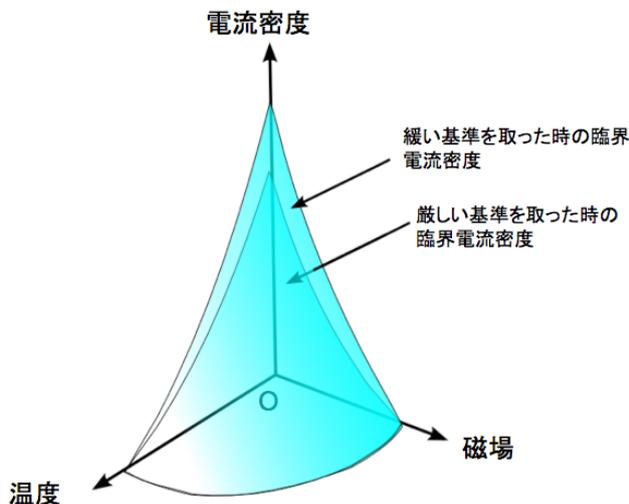


図1

もし超電導体の使用中に何らかの原因により温度、磁場、電流密度のいずれかが臨界値を超えたら何がおこるでしょうか。超電導状態が破壊されます。すると電気抵抗が発生しますから、もし電流密度がすぐにゼロにならないとすると大きな発熱が起こります。すると超電導体の温度はますます上昇し、ますます発熱が大きくなります。このように連鎖的に温度が上昇する事故が起こりえて、これはクエンチ現象と呼ばれます。この現象は場合によっては深刻な被害をもたらすので、装置を設計する場合には、クエンチが起こらないようにするか、少なくとも起こった場合でも破局に至らずに収拾できるように配慮しておく必要があります。

超電導状態が維持されるかどうかは温度、磁場、電流密度の三つのパラメータで決定されると言いましたが、物理的にはこの三つのパラメータはかなり異なる性質を持っています。まず臨界温度は超電導体の種類が決まるとほぼ決まってしまう。それだけに高い臨界温度を持った新しい超電導体が発見されることは重大な意味を持つわけです。一方臨界電流の値は超電導体の種類が決ま

っても一意的には決まらず、様々な要因によって変わります。したがって、より高い臨界電流値を実現することは材料開発者の腕の見せ所になります。面白いのは、超電導体の純度や結晶学的完全性を上げすぎると臨界電流値は却って小さくなることで、臨界電流値を大きくするために適当な不純物や結晶欠陥をわざと導入することもあります。製造プロセスによって改善できるかどうかという点に関して、臨界磁場の場合は臨界温度と臨界電流値の中間位で、基本的には物質が決まると決まっていますが、多少はいろいろな外部要因によっても変わります。

超電導体に電流を流した場合、電流が臨界電流値より小さければ電圧はゼロです。電流が臨界電流値を超えると電圧が発生してしまいます。その時の電流と電圧の関係は通常、図2に示すような形になります。電圧が初めてゼロでなくなったときの電流値の値が厳密な意味での臨界電流値です。しかし発生している電圧が厳密にゼロなのか小さいけれど有限の値を持っているのかを実験的に区別することは不可能です。電気抵抗が厳密にゼロであるのか、それとも測定できないくらい小さいだけなのかは物理学的には峻別されるべきですが、実験的に、または応用上からは電気抵抗が無視できるくらい小さいのか、無視できない位大きいのか問題になります。実用上は例えば1cmあたり1マイクロボルトの電圧であれば十分小さいとみなし、この電圧に対応する電流密度を臨界電流密度と見なす事が普通です。もちろん応用の目的によってはこれよりはるかに厳しい基準が要請される事もあり、そのときには図1に示した超電導性が維持される範囲が少し小さくなるわけです。

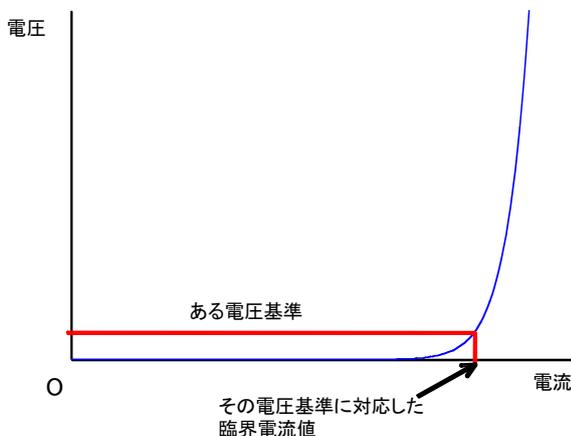


図2

物性としての超電導性がそのまま実用材料に反映されない原因は他にもいろいろありますが、その一つが結晶粒界の問題です。世の中のほとんどの物質は結晶からなっています。ただし実際には目に見えないほどの小さな結晶がランダムな向きで集まった多結晶体からできています。水晶やダイヤモンドなどは一つの結晶が巨大な大きさまで成長した例ですが、実用材料はほとんどが多結晶体です。そのため至る所に結晶粒同士の境界（結晶粒界）があります。これまで運動量空間やフェルミ面という概念を使って超電導現象を説明してきました。フェルミ面は等しいエネルギーを持つ一電子状態を表す点の集まりでした。これまで簡単のため電子が何もない自由な空間を飛び回っているかのように近似して球面状のフェルミ面を仮定していました。しかし実際には、電子は原子が規則正しく配列した結晶の中を原子の影響を受けながら運動しています。そのため電子の運動の様子は、たとえば原子の配列を基盤の目の様なものだと縦または横方向に運動する場合と対角線の方向に運動している場合では一般に異なるのです。このことを異方性があるという言い方をします。従って、フェルミ面は一般には球面ではなく、その物質の結晶構造と同じ対称性をもった独特の曲面になります（フェルミ面が球面に決まっていたら、わざわざフェルミ面などという専門用語をつくる必要もなかったことでしょう。フェルミ面の実際の形状を実験的にまたは計算から求めることは物性物理学の中の一つの大きな分野をなしています）。フェルミ面が球面でなくても超電導現象に関するこれまでの説明はほぼそのまま有効です。また前にも言った通り、それぞれの結晶が目に見えないくらい小さくても、十分マクロな大きさと言えるので、結晶粒内部ではこれまでの説明が有効です。しかし結晶粒と結晶粒の境界では何がおこるのでしょうか。その近くでは原子の配列の向きが変化していますから、一つの運動量空間やフェルミ面では話がすまなくなります。それでも異方性が小さく、フェルミ面が元々球面に近い場合は影響が小さいですが、結晶のタイプにより異

方性が大きい物質の場合は結晶粒界の影響が甚大になります。現在最も高い臨界温度を持ち、実用化の研究開発が盛んに行われている酸化物高温超電導体はあいにく異方性が大きく、これが重大な問題になっています。

2. 実際に使われている超電導体

これまでに数えきれないほどの超電導体が発見されており、今でも超電導体の数は増え続けています。但し、臨界温度の低い超電導体は応用上の見地からはあまり有用でないので専門の研究者以外からはあまり注目されません。現在のところ最も高い臨界温度を有するのは20数年前に発見された酸化物高温超電導体の一群です。その中で応用のための研究開発が進んでいるのはビスマス系（臨界温度約110 K）と、イットリウム系（臨界温度約90 K）と呼ばれる2種類です。臨界温度の点だけからはもっと高い物質がありますが、応用上は総合的にこの2種類が有利と判断されているのです。特にイットリウム系は臨界温度もそうですが、臨界磁場が大きいことが特徴です。臨界電流についてはすでに述べた通り、物性だけでなく材料の製造プロセスに大きく依存しますので、それが開発研究の主要な課題になっています。特にこの物質は前節で述べたように異方性が大きいので結晶粒界があるとその影響で臨界電流値が小さくなってしまいます。そのため多結晶体ではあっても結晶粒の向きをできるだけ揃え、結晶粒界の悪影響を極力抑制することが必要で、そのために大変高度な技術が使われています。

既に超電導産業として成立しきっている分野に限れば、使われている超電導体は事実上 NbTi（臨界温度約10 K）、Nb₃Sn（臨界温度約18 K）、及びエレクトロニクス分野での Nb 単体（臨界温度約9 K）に限られています。これらは高温超電導体に対して低温超電導体、または金属系超電導体と呼ばれています。しかしこれらはいずれも冷却のために液体ヘリウムまたはそれに代わる大型の冷凍機を必要とします。その点で安価かつ冷却効果の大きな液体窒素の使える酸化物高温超電導体の産業応用が待たれています。酸化物高温超電導体は、従来からある低温超電導体の応用分野における置き換えとしてだけでなく、従来超電導体が使われていなかった分野においても期待されています。たとえば送電ケーブルへの応用は現在盛んに研究が行われているテーマですが、これは液体ヘリウムを必要とする低温超電導体では事実上不可能だった分野です。

酸化物高温超電導体と低温超電導体以外では、ちょうどその中間に位置する MgB₂（臨界温度約39 K）についても応用研究が進められています。また2年前に発見された鉄系超電導体についても研究が盛んに行われており、基礎研究の分野に限れば現在最も注目されている物質系です。ただし現在までのところ臨界温度が液体窒素による冷却可能温度（77 K）を超えていないこともあり、その将来性について判断するのは時期尚早と思われます。

なお最後に述べた MgB₂ と鉄系超電導体はいずれも日本において発見された超電導体であることを付記しておきます。

3. おわりに

この連載解説を始めるときには、超電導に関して一通りのことは触れるつもりでしたが、実際には触れるべきで触れられなかったことがいくつも残ってしまいました。キーワードだけ並べておくと、第1種および第2種の超電導、磁束の量子化、磁束のピン止め、不可逆磁場、ジョセフソン効果、などです。これらについて興味ある読者は、このウェブマガジンをはじめ現代ではたくさんの情報源があるので、調べてみてください。また編集部あてに質問をお寄せいただければ、できるだけお答えしたいと思います。

始めて超電導現象が発見されたのは1911年のことですから、来年（2011年）はちょうど超電導の生誕100年にあたります。そこで、

超電導初霜おける白寿かな

と詠んだ人がいます。現在知られている超電導体は酸化物高温超電導体といえども冷却が必要で、そのまま空気中に出すとあっという間に霜で真っ白になってしまいます。超電導第2世紀においては霜のつかない超電導（室温超電導）が見つかるといいですね。

[超電導 Web21 トップページ](#)