

近藤淳博士の業績  
－ 2020 年度文化勲章 －

産業技術総合研究所 柳澤孝

1911年にカマリン・オネスにより超伝導が発見された。オネスは温度を下げていくと電気抵抗はどうなるだろうかと考えて測定を行い、電気抵抗がゼロになるという驚くべき現象を発見した。それからおよそ20年ほど過ぎた1933年にある種の合金において、温度を下げていくと電気抵抗が増大するという奇妙な現象が発見された。この現象は電気抵抗に極小が存在することから、抵抗極小とよばれるようになった(図参照)。そして、超伝導とともに未解決問題として機構の解明が物理学者達に宿題として残されることになった。超伝導は1957年にバーディーン、クーパーおよびシュリーファアの三人により見事に解決され、彼らの理論はBCS理論とよばれている。抵抗極小は、1964年に近藤淳博士により発表された論文によりその機構が明らかにされた。

それでは、近藤博士による一連の研究を振り返ってみよう。電流とは電子の流れのことであるが、金属中の原子の振動や不純物などにより電子の流れが妨げられ電気抵抗が生じる。原子の振動の強さは温度が下がるとともに弱くなるため、普通は、電気抵抗は温度が下がるとともに減少する。ところが、金属に不純物を混ぜた合金において温度を下げていくと逆に電気抵抗が増大するという現象が発見された。この抵抗極小の原因は長い間不明であり、チャレンジすべき問題として残されていた。

この問題を解明したのが、1964年の近藤博士による論文であった。近藤博士は、金属に混ぜた不純物が持つスピンの抵抗極小の原因ではないかと考えた。不純物上に存在するスピンは位置が固定されているため、局在スピンと呼ばれる。近藤博士は量子力学に基づいた計算により、電子のスピンによる散乱確率を計算し、電気抵抗に温度について対数的に増大する項が現れるという驚くべき発見をした。式で表すと抵抗に、 $-\text{Alog} T$ により表される項が加わることになる。ここで、 $T$ は温度を表し、 $A$ は定数を表している。すなわち、抵抗極小の原因は局在スピンの相互作用により現れる対数項であることが明らかになった。これにより、電子とスピンの相互作用により対数項が現れる一連の現象は近藤効果と呼ばれるようになった。

抵抗極小は $-\log T$ 項により説明できることがわかったが、新たな重要な問題が生じた。その問題とは、 $\log T$ 項は絶対零度ではどうなるであろうかという問題である。単純に温度 $T$ を0にすると発散してしまうが、実験ではそんなことはないからである。これは「近藤問題」と呼ばれ、近藤論文以後10年以上に渡って物理学の中心問題となった。量子力学にはいろいろな計算方法があり、近藤博士は摂動論という方法を使って対数項が現れることを示した。しかし、単純な摂動論では絶対零度においてどうしても発散してしまい、計算が破綻してしまうことが明らかになった。それでは、どのような方法により近藤問題は解決されたのであろうか。

近藤問題を解決に導いたのは、くりこみ群理論であった。くりこみ理論とは、朝永振一郎博士らにより構築された理論であり、朝永博士らは量子電気力学における発散の問題を解決するために、「くりこみ」の手法を考え出した。量子電気力学とは電子と光との相互作用に関する理論体系であり、朝永博士、シュウインガー、ファインマンらにより完成された。ご存知のようにその功績により三人にノーベル賞が授与された。その方法を近藤問題における発散の問題に応用してみようという訳である。くりこみとは一つの操作であり、一つの変換と考えてよいもので、その変換はくり返すことができる。すなわち群をなす（より正確には半群であるが）ものであり、「くりこみ群」を考えることができるわけである。

くりこみ群理論においては、ベータ関数と呼ばれるくりこみ群方程式を計算する。計算結果は、低温（低エネルギー）において相互作用が強くなり、高温（高エネルギー）において相互作用が弱くなることを示していた。朝永博士の量子電気力学においては全く逆であり、低エネルギーにおいて相互作用が弱くなり、高エネルギーにおいて強くなるのである。近藤問題の特徴がここに現れており、この性質は漸近自由性と呼ばれている。温度が低くなるほど相互作用が強くなるということは、計算がそれだけ難しくなることを示しており、そのため低温での計算が難しかったわけである。絶対零度までの計算を最初に成功させたのは、K. G. ウィルソンであった。彼はくりこみ群方程式の解を数値的に求めることにより、見事に絶対零度までの計算をやってみせた。1975年のことである。ウィルソンはウィルソンくりこみ群と呼ばれる方法を考え出し、くりこみ群に関する業績によりノーベル賞を受賞した。

近藤問題における漸近自由性は非常に重要な性質であり、物理学の歴史において近藤モデルにおいて初めて示されたものである。よく知られているように、

クォークの力学である量子色力学 (QCD) も同じ性質を示す。クォークは陽子、中性子や湯川秀樹博士が提唱した中間子を構成する粒子としてゲルマンおよびツヴァイクにより導入されたものである。小林誠博士、益川敏英博士によりクォークは 6 種類あることが予言され、実際に実験により確かめられている。その業績により両博士はノーベル賞を受賞された。その量子色力学が近藤問題と同じ漸近自由性を示すのである。すなわち、クォーク達は近づくと、すなわち高エネルギー領域において、相互作用が弱くなりあたかも自由粒子のように振る舞う。逆に、クォーク達が離れた低エネルギー領域においては強い相互作用が働き、クォーク達は離れることができないのである。これがクォークの閉じ込めである。近藤問題はクォークの力学とも深く関係しているのである。

抵抗極小現象から始まった研究は、近藤博士の論文により新局面を迎え、近藤問題として世界的な問題となった。低温において電子とスピンの相互作用が非常に大きくなる強結合状態が実現していることが明らかにされ、近藤問題の物理が明らかになった。この状態はフェルミ液体と呼ばれる状態である。近藤効果の研究はその後も現在まで発展が続いている。希土類元素は大きなスピンを持っているため、希土類元素を含む化合物はしばしば近藤効果を示す。希土類元素はスマートフォンなどにおいて必須の元素であるが、そこにおいては近藤効果が起きていると考えてよいのである。量子ドットと呼ばれる人工元素も現在非常に注目を集めている。量子ドットにおいては電子が狭い領域に閉じ込められており局在スピンのように振る舞う。すなわち近藤効果が起きており、量子ドットの現象が近藤理論に基づいて解析されている。量子ドットにより量子コンピューターが実現される可能性があり、非常に期待されている半導体技術である。量子色力学においても近藤効果が応用されており、QCD 近藤効果と呼ばれている。最近、チャーン数などの位相不変量を持つ物質が発見され、トポロジカル物質として活発に研究されている。トポロジカル近藤物質も重要なトピックとなっている。トポロジカル物質の性質は、素粒子論における重力・ゲージ理論対応と深い関係があり、数学におけるアティヤ・シンガーの指数定理とも関係している。このように近藤効果は科学の広い分野において非常に大きな影響を及ぼしている。このような大発展は、図に示すような一見平凡に見える電気抵抗の温度依存性から始まったのである。

(『現代化学』2021年1月号)

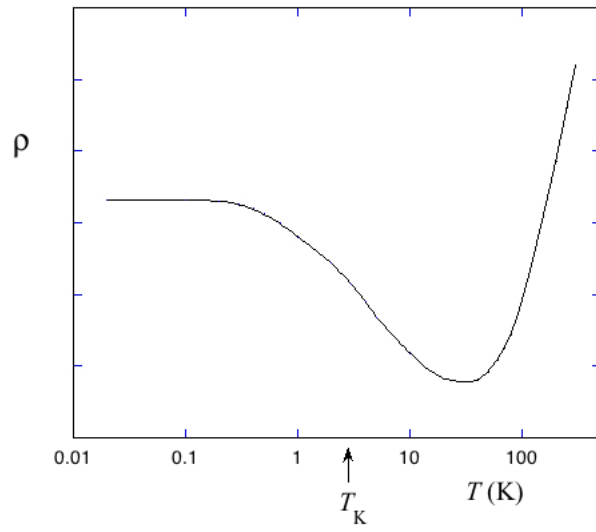


図. 抵抗極小現象における電気抵抗 $\rho$ の温度依存性の例。横軸は絶対温度 $T$ を示し、対数スケールで示されている。抵抗は極小を示した後、対数依存性を示す。対数依存性を示す温度は近藤温度と呼ばれ、 $T_K$ と書かれる。