

理学博士近藤淳君の「極低温における稀薄磁性合金の電

気抵抗の極小に関する研究」に対する授賞審査要旨

物性物理学は、物質の物理的性質を原子的観点から理解しようとするものであるが、量子物理学の出現以来急速な発展を遂げた。例えば一九一一年オランダのライデン低温研究所で K. H. Onnes に依つて発見された超電気伝導もほぼ半世紀を経た一九五七年に J. Bardeen, L. Cooper, J. Schrieffer に依つて説明せられた。しかし、例えば金、銅等が微量の磁性原子 Fe, Mn 等を含んだ場合その電気抵抗は温度の減少と共に減少するが、一〇〜二〇度 K 附近の温度で極小を示し、それ以下の温度から増加するという現象、即ち稀薄磁性合金の電気抵抗極小と名付けられる現象は約三〇年以前から実験的によく知られていたが、この理論的説明には誰も成功していなかった。

近藤淳君の業績は一九六四年に *Progress of Theoretical Physics* 誌に発表されたもので、前記の極小の問題を一事に解明したものであり、低温度における合金内の磁性原子の挙動の本質に関する問題として世界の学界に大きな反響を与え、現在、"近藤効果"と呼ばれてこの分野の研究の中心課題の一つとして注目を集めている。

金属の電気伝導は、この金属を構成する原子の外側にある、電子によつて行われる。この導電電子は、金属原子の作っている結晶格子の中を自由に飛び廻っているが、その電子個々の状態は、その運動量とスピンとによつて記述される。量子物理学の原則によれば、この結晶内の総ての状態は只一つの電子によつてのみ占拠される。〇度 K の場合

は、これ等の状態はエネルギーの小さいものから順を追って電子によって占拠されるが、あるエネルギー値を最高として、それ以上のエネルギーの状態は空位となる。この場合の最高エネルギーをフェルミ・エネルギーと呼んでゐる。温度が T の場合には導電電子は熱エネルギーによって励起されるので、フェルミ・エネルギーの周りに拡がりをもつようになる。このエネルギーの拡りは平均として kT である。ここに k はボルツマン定数である。

外部から電場を加えると、この導電電子は電場の方向に加速され、その方向と平行な運動量の状態に移つてゆく。この場合、ゾンマーフェルトに依れば電気伝導度 σ は

$$\sigma = \frac{ne^2\langle v \rangle}{m}$$

によつて与えられる。ここに m と e は電子の質量と荷電を、また n はその密度を示す。 $\langle v \rangle$ は緩和時間と呼ばれ、電子がある状態にあつた時に、結晶格子内で熱的振動をする原子、又は不純物原子と衝突して、異なつた運動量の状態に散乱されてしまふまでの時間を表わす。不純物原子の存在しない場合には、温度の降下と共にこの熱的振動は小さくなり、 $\langle v \rangle$ は大きくなるので電気抵抗は減少する。

この結晶に不純物原子として磁性原子が入つてくると、電子のほかに磁性の原因である d 電子をも考慮しなくてはならない。この不純物原子の導入は導電電子の状態を乱すばかりでなく、 d 電子の状態にも変化を起す筈である。 d 電子の状態は一原子あたり、そのスピンをも考慮に入れて一〇個ある。この原子が局在磁気エネルギーを持つことは、(H)スピンの状態はフェルミ・エネルギー以下にあって満され、(I)スピンの状態はその以上にある為空位となつてゐること

を意味する。

一般に、不純物原子を導入した影響を解くためには、不純物原子の導入による d 電子と s 電子との相互作用を摂動項として s 電子の散乱される確率を求めなければならぬ。従来この問題を解くために費された努力は第一近似を求めただけであったため、電気抵抗の極小を説明することに成功しなかった。近藤君は第二近似を求め、これを用いて電気抵抗の注目すべき温度依存性を見出したのである。

量子力学によれば、金属の s 電子と不純物原子の d 電子との相互作用の表式が定まった上で、 s 電子が初めの状態(これを運動量 l の状態とする)から終りの状態(これを運動量 l' の状態とする)へ散乱される確率を求めることができ、第二次の効果とは、運動量 l の状態から一旦運動量 l' の状態に散乱され、更にもう一回散乱を受けて運動量 l の状態に達する過程、およびもう一つの s 電子が運動量 q の状態から q' の状態に励起されて運動量 q の空孔ができ、つぎにはじめの運動量 l の電子がこの空孔に散乱されてそれをうめるといふ過程を考え、状態 l' および状態 q としてそれぞれ空いている状態および満されている状態の可能性すべてをとりそれからの寄与の総和を求めることである。この際、量子力学の不確定性原理によれば、状態 l' のエネルギーが最初の状態 l のエネルギーと大きく異なっていれば、 l' 状態に長く留まっていることはできないので、そのような過程の寄与は小さい。状態 q のエネルギーが状態 l のエネルギーと大きく異なる場合も同様である。したがって、最初の状態 l のエネルギー(これは又最終の状態 l' のエネルギーに等しい)がフェルミ・エネルギーの上限に極めて近い場合に、散乱確率への寄与が極めて大きくなる。しかし、中間状態が q である過程と q' である過程とは逆の符号で利くので、 d 電子の状態が変化を受けない場合にはそ

れらが相殺して、全体として散乱確率にフェルミ・エネルギーの上限附近で異常は生じない。

以上では s 電子だけに注目したが、 s d 相互作用によって中間状態または終りの状態で、 s 電子の状態変化とともに d 電子のスピン状態が変化している過程が可能である。計算によれば、このような過程については上に述べた相殺が不完全になり、とくに低温ではこの相殺はほとんど行われなくなる。さらに s 電子と d 電子との相互作用を表わす交換エネルギーの符号が (-) であるとすれば、磁気的不純物原子による電気抵抗は温度が下るとともに $\log T$ に比例して増大することが見出された。

純金属の電気抵抗は一般に結晶格子を作っている原子の熱振動に起因するもので、これは温度とともに増大する。磁気的不純物原子を含んで金属ではこれに上記の異常抵抗が加わるので、低温で電気抵抗の極小が現われるのである。この考えで導かれた式は実験結果と定量的にもよく一致することが示された。近藤理論が発表されるや、この“近藤効果”に関連した実験的並びに理論的研究が盛んに行われるようになった。また従来の実験的結果はこの近藤理論の立場から見直されるに到った。実験的には母金属と不純物元素の組合わせや、測定の温度範囲を変えた場合にその実験結果を極めて統一的に理解することが可能になった。又電気抵抗が温度と共に減少する場合も発見されたがこれは $s-d$ 間の交換エネルギーが (+) の場合として理解される。

この近藤理論の波紋は只単に電気抵抗に止まらず、金属中におかれた磁気能率を持つ原子の物理的性質という観点から、熱起電率、帯磁率、比熱といった物理量にもこの高次の効果が重要な寄与をすることが見出された。

この“近藤効果”は現在物性物理学の中心課題の一つとして世界中の理論物理学者によって取り上げられている。

その理由は、近藤温度以下の低温にあっては摂動計算における高次の項が非常に大きな寄与をなし、そのために物理量が発散してしまうことが知られているからである。この困難を取除くには、多体問題を取扱う高度に数学的な手法を用いて、重要な寄与をするあらゆる高次の項を考慮にいれる必要があるが、多くの研究者の努力にもかかわらず、問題はまだ完全に解決していない。要するに、近藤理論は不純物原子の d 電子を介して金属電子系が本質的意味での多体問題として見直されるいとぐちを作ったものと言えよう。

以上を総合するに近藤君の業績は次のようになる。

- (一) 三〇年来の謎であった稀薄磁性合金の抵抗極小の問題を $s-d$ 交換相互作用の立場から解決したこと。
 - (二) 同時に稀薄合金における多体効果の重要性を指摘したこと。
 - (三) 非磁性金属合金中の不純物の磁気能率発生の機構を示唆したこと。
 - (四) 稀薄合金だけでなく、稀薄ではない合金及びより一般の遷移金属の磁気的性質を考へるとき、近藤理論の指摘したスピンのゆらぎの効果を充分に考慮する必要があることを明らかにしたこと。
 - (五) $s-d$ 交換相互作用の立場より、金属の磁性全般の理論的研究が今後進められると考へられること。
- 以上、近藤君の業績は、物性物理学の進歩に重要な寄与をなしたものと認められる。

一、主要な論文目録

1. J. Kondo: Superexchange interaction of MnO. Prog. Theor. Phys., **22**, 41 (1959).
2. J. Kondo: Superexchange interaction—the four electron model. Prog. Theor. Phys., **22**, 819 (1959).

3. J. Kondo: Electrical resistivity of ferromagnetic metals. *Jour. Phys. Soc. Japan*, **17**, Supplement B-1, 55 (1962).
4. J. Kondo: Resistance minimum in dilute magnetic alloys. *Prog. Theor. Phys.*, **32**, 37 (1964).
5. J. Kondo: Anomalous density of states in dilute magnetic alloys. *Prog. Theor. Phys.*, **33**, 575 (1965).
6. J. Kondo: Giant thermo-electric power of dilute magnetic alloys. *Prog. Theor. Phys.*, **34**, 372 (1965).
7. J. Kondo: Free energy shift of conduction electrons due to the s-d exchange interaction. *Prog. Theor. Phys.*, **40**, 683 (1968).
8. J. Kondo: Theory of Schwarz-Horo effect. *Jour. Appl. Phys.*, **42**, 4458 (1971).
9. J. Kondo and K. Yamaji: Green's function formalism of the one-dimensional Heisenberg spin system. *Prog. Theor. Phys.*, **47**, 807 (1972).
10. J. Kondo: Theory of dilute magnetic alloys. *Solid States Physics*, **23**, 184-283 (1969).