

CT-1-1

超伝導 その現象と物理、新物質と材料からジョセフソン効果まで Superconductivity, Its Phenomena and Physics, from New Superconducting Substances and Materials to the Josephson Effect

鈴木 実
Minoru Suzuki

京都大学 工学研究科
Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University

1. 超伝導の発見

今年 Heike Kamerlingh Onnes が超伝導を発見してちょうど 100 年になる。超伝導発見の 3 年前, Kamerlingh Onnes の研究グループはヘリウムの液化に初めて成功し 500 cc の液体ヘリウムを得た。1908 年 7 月 10 日に朝 5 時 45 分から実験を始めて夜の 7 時 40 分に液化が観察され、実験が終わったのは 9 時 40 分という。当時のヘリウムガスは monazite と呼ばれる鉱物に 1 g あたり 1-3cc 含まれていたものを取り出して使用していた。この液体ヘリウムを使用して Kamerlingh Onnes は本来の研究目的である金属の低温電気抵抗の実験に取りかかった。なぜ金属の低温電気抵抗を測定しようとしたのかその理由も興味深いものがある。その結果、1911 年 4 月 8 日 Hg で超伝導を発見した。「超伝導」"superconductivity"という名前も Kamerlingh Onnes の命名である。発表してすぐには画期的な現象であると理解されなかったようだ。電気抵抗が 0 になるのを最初に観察したのは学生の Gilles Holst だった。この時も朝 7 時に実験を開始して超伝導現象を発見したのは午後 4 時と長丁場の実験だった。

2. 超伝導の現象と物理

超伝導は現象としては完全導電性と完全反磁性で特徴づけられる。完全導電性は厳密には直流でのみで、交流では周波数の 2 乗に比例する電気抵抗（表面抵抗）が現れる。しかし、少なくとも 100 GHz 程度までは 77K に冷却した Cu よりも抵抗ははるかに小さい。

磁場が弱いとき、磁束は超伝導体から排除される。正確には表面約 45-150 nm にのみ侵入する。これを磁場侵入長という。したがって超伝導電流もこの厚さの表面にしか流れない。

臨界磁場を越えると超伝導は消滅する。第 II 種超伝導体は下部臨界磁場 H_{c1} と上部臨界磁場 H_{c2} があって、 H_{c1} を越えると磁束が $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb に量子化されて超伝導体中に渦糸のように侵入する。これは A. A. Abrikosov によって理論的に予言されたので Abrikosov 磁束量子と呼ばれる。 Φ_0 は自然に存在する最も小さいエネルギー量子と言われ基礎的な物性から応用まで重要な働きをする。

超伝導はボーズ粒子の量子凝縮状態である。金属中の電子系が量子凝縮状態になると巨視的量子効果が現れ種々の超伝導に特有の現象が現れる。

超伝導は 2 個の電子が電子間引力相互作用により対を形成して Bose 粒子となり Bose 凝縮が起こったところで現れる。これまでの金属超伝導体は電子フォノン相互作用が引力となっている。電子対は中心力場にある 2 個の電子として記述される。2 個の電子の合成角運動量 L は $\hbar$ を単位に

量子化される。合成角運動量子数 L が偶数の時に 2 個の電子のスピンは反平行 (singlet) になり奇数の時に平行 (triplet) になる。前者を singlet 超伝導、後者を triplet 超伝導という。 $L=0$ の時を s 波、 $L=1$ の時 p 波、 $L=2$ の時 d 波などという。 s 波超伝導と d 波超伝導は singlet 超伝導であり、 p 波超伝導は triplet 超伝導体である。後者はスピンの自由度が残り複雑な振る舞いを示す。

3. 新超伝導物質

超伝導物質は大きく分類すると、(1) 元素金属超伝導体、(2) 合金超伝導体、(3) 金属間化合物超伝導体、(4) 酸化物超伝導体、(5) 有機超伝導体、(6) 銅酸化物高温超伝導体、(7) 硼化物超伝導体、(8) 鉄ヒ素系超伝導体、(9) 酸化ルテニウム系超伝導体と重フェルミ粒子超伝導体となる。

このうち(6)が d 波超伝導体で 1986 年に Bednorz と Muller により発見され、(7)が 2 超伝導ギャップ、(8)が細野らによって発見された高温超伝導物質、(9)が p 波超伝導体という特徴がある。(6)から(9)まで新しい超伝導体であり発見機構はまだ十分明らかではない。

4. 超伝導材料

特に高温超伝導物質を主な対象として、CuO フラックス単結晶育成法、浮遊溶融帯法などの結晶育成法や off-axis スパッタ法、off-center スパッタ法、PLD 法 (Pulsed Laser Deposition) などの薄膜成長法が開発された。

Bi 系高温超伝導体からは熱間加圧法などで臨界電流が 250A 程度の多芯超伝導線材も作られている。

5. ジョセフソン効果

超伝導状態は巨視的な量子効果が現れた状態であり、位相が重要な役割を果たしている。量子力学では位相 θ は作用を S として $\theta = S/\hbar$ である。作用はラグランジアン L の時間積分で与えられ、電磁場があるとき $L = T - V + \mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$ であるからこれを積分すると右辺第 3 項から

$$\theta = \int \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}}{\hbar} dt = \int \frac{\mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}}{\hbar} = \int \frac{\text{rot } \mathbf{A}}{\hbar} dS = \int \frac{\mathbf{B}}{\hbar} dS = \frac{\Phi}{\hbar}$$

となり、 $\hbar = 1.054 \times 10^{-34}$ Js と極めて小さいために僅かな磁束でも大きな位相変化が生じる。しかしながら、超伝導では、レーザーなどの光学と違って、位相を検知あるいは制御できる効果がない。たった一つの例外がジョセフソン効果である。1962 年、大学院生の B. D. Josephson が理論的に予言した $I = I_c \sin \theta$ と $d\theta/dt = 2eV/\hbar$ という関係式から超伝導の位相差が電気信号に変換される。一旦電気信号にさえ変換できれば現在のエレクトロニクスを用いて顕著な性能を有するデバイスにすることができる。ジョセフソン効果の意義はまさにそこにある。