

Anderson-Higgs 機構と超伝導

中村研究室 小澤 佑太

凝集系物理において、対称性の破れの概念はいたるところに登場する。例えば、強磁性体は転移温度 T_c 以下で特定の方向に磁化が生じるが、これは回転対称性が自発的に破れることによる相転移現象である。また、超伝導体は転移温度 T_c 以下でゲージ対称性が破れると言われている。しかし、ゲージ対称性とはゲージの任意性に関する自由度であり、それが破れるというのは非物理的である。

本発表では、超伝導現象においてゲージ対称性が破れていないことを、ゲージ対称性から超伝導の現象を説明することによって示し、ゲージ場に質量を与える Anderson-Higgs 機構と超伝導の関係を明らかにする [1]。また、超伝導における Higgs モードの観測実験 [2] について紹介する。

まず、ゲージ対称性から超伝導の現象を説明するために、ハミルトニアン、ラグランジアン、あるいは自由エネルギーなどを有効作用 $\mathcal{F}[\Delta, \Delta^*, \partial_\mu \Delta, \partial_\mu \Delta^*, A_\mu]$ で書き下す。ゲージ不変性の制約から \mathcal{F} は、 $\mathcal{F}[\Delta, \partial_\mu \phi - 2eA_\mu]$ となる。ここで $\Delta(\mathbf{x}, t)$ は秩序変数場であり、常伝導相でゼロ、超伝導相で有限値となる。 ϕ は Δ の位相、 A_μ はゲージ場を表し、 $A_\mu = (\varphi, -\mathbf{A})$ である。 $|\Delta| \neq 0$ のとき、 \mathcal{F} の最小値を考えることで、無限大の伝導率と磁束の量子化を説明できる。

また、Anderson-Higgs 機構と超伝導の関係を Abelian-Higgs モデルのラグランジアン密度

$$\mathcal{L} = (D^\mu \Delta)^* D_\mu \Delta - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

を用いて議論する。ここで D_μ はゲージ共変微分 ($D_\mu \equiv \partial_\mu - 2ieA_\mu$)、 $F_{\mu\nu}$ は電磁場テンソル ($F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$) である。超伝導状態における Euler-Lagrange 方程式より、ゲージ場に対する Klein-Gordon 方程式

$$(\partial_\mu \partial^\mu + m^2) \tilde{A}_\nu = 0$$

が得られる。ここで、 \tilde{A}_μ はベクトル場 ($\tilde{A}_\mu \equiv A_\mu - (1/2e)\partial_\mu \phi$)、 m は質量 ($m^2 \equiv (2e)^2 |\Delta|^2$) である。静的な場を考えると、この方程式から得られる内部磁場は指数関数型の減衰 $\mathbf{B} \sim e^{-mr}$ を示すが、これは Ginzburg-Landau 方程式から得られる指数型の減衰 $\mathbf{B} \sim e^{-x/\lambda}$ (λ は London の侵入深さ、 x は磁性体表面からの距離) と同じものである。つまり超伝導状態において Anderson-Higgs 機構はゲージ場が質量を得ることにより Meissner 効果を与えることが説明できる。これは電弱統一理論におけるゲージ場の質量獲得と同様のしくみである。

さらに、超伝導状態における Higgs モードは実験により観測できることを議論する。秩序変数を $\Delta = [\Delta_0 + H(r)]e^{i\phi}$ として Ginzburg-Landau 方程式に代入すると以下ようになる。

$$F = -2aH^2 + \frac{1}{2m^*} (\nabla H)^2 - \frac{e^{*2} \Delta_0^2}{2m^*} \mathbf{A}^2 - \frac{e^{*2} \Delta_0}{m^*} \mathbf{A}^2 H + \dots$$

ここで、振幅 (Higgs) モード $H(r)$ 、位相 (南部-Goldstone) モード $e^{i\phi}$ 、 $a = a_0(T - T_c)$ であり、 a_0, b は定数である。この式の $\mathbf{A}^2 H$ の項から Higgs モードと電磁場が結合しているため、高強度のテラヘルツ波を用いて、s 波金属超伝導体 NbN 薄膜に当てることによって非断熱励起における Higgs モードの振動を観測することができる。

[1] N. R. Poniatowski, *Superconductivity, Broken Gauge Symmetry, and the Higgs Mechanism*, American Journal of Physics 87(6):436-443 (2019)

[2] 島野 亮, 森本 剛志, 岡本 博 (2019) 「固体物理. : 高強度テラヘルツ 赤外パルスが拓く非平衡物性」『アグネ技術センター』, 11, p83-96