

自発的対称性の破れとヒッグス機構

中村研究室 山口 和祥

素粒子物理学において、力はゲージ粒子によって媒介されると考えられている。核力の一種である弱い力は、電磁力とは対照的に、到達距離が原子核内に限られる短距離力であり、これは弱い力を媒介するゲージ粒子が質量を持つことを意味する。しかしながら、ゲージ粒子が質量を持つことは自明ではない。なぜなら質量項をラグランジアンに直接導入するとゲージ不変性が破れるからである。同様の問題は物質を構成するフェルミオンについても存在する。本発表では自発的対称性の破れと呼ばれる現象と、それによってゲージ粒子とフェルミオンが質量を獲得する仕組みについて議論する [1]。

自発的対称性の破れとは、強磁性体における磁化の発生のように、物理系が本来持っている対称性を破るように基底状態が選ばれる現象である。場の量子論では、自発的対称性の破れは、場が非ゼロの真空期待値 (VEV) を持つことで起きる。このとき真空の回転対称性より、VEV を持ちうるのはゲージ粒子やフェルミオン場ではなく、スカラー場に限定される。また、複素スカラー場において連続対称性が自発的に破れる場合には、質量を持つヒッグスモードと、質量を持たない南部・ゴールドストーンモードが現れる [2]。

ゲージ場やフェルミオンの質量生成のメカニズムは自発的対称性の破れと密接に関係している。まず、U(1) ゲージ不変性を満たすヒッグスモデルのラグランジアンは

$$\mathcal{L}_H = (D_\mu \varphi)(D^\mu \varphi^*) - \mu^2 \varphi \varphi^* - \frac{1}{4} \lambda (\varphi \varphi^*)^2 - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}, \quad D_\mu \equiv \partial_\mu + iqA_\mu, \quad F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

で与えられる。ここで、自発的対称性の破れを仮定して $\tilde{\varphi}_i \equiv \varphi_i - v\delta_{i1}$ ($i = 1, 2$), $v = \sqrt{-4\mu^2/\lambda}$ と場を取り直すと、 $\tilde{\varphi}_1$ がヒッグスモード、 $\tilde{\varphi}_2$ が南部・ゴールドストーンモードに対応する。この $\tilde{\varphi}_i$ ($i = 1, 2$) とゲージ場 $A'_\mu \equiv A_\mu + \frac{1}{qv} \partial_\mu \tilde{\varphi}_2$ を導入して \mathcal{L}_H を書き直し、ゲージ変換 $\varphi \rightarrow \varphi' = e^{-iq\Lambda} \varphi$, $\Lambda = \arctan \frac{\tilde{\varphi}_2}{v + \tilde{\varphi}_1}$ を行くと、 $\tilde{\varphi}_2$ が \mathcal{L}_H から完全に除去され、

$$\mathcal{L}_H = \frac{1}{2} (\partial_\mu \tilde{\varphi}_1)(\partial^\mu \tilde{\varphi}_1) + \frac{1}{2} q^2 A'_\mu A'^\mu (v + \tilde{\varphi}_1)^2 - \frac{1}{2} \mu^2 (v + \tilde{\varphi}_1)^2 - \frac{1}{16} \lambda (v + \tilde{\varphi}_1)^4 - \frac{1}{4} F'_{\mu\nu} F'^{\mu\nu}$$

となり、ゲージ場 A'_μ に対する質量項 $\frac{1}{2}(qv)^2 A'_\mu A'^\mu$ が現れる。つまり、自発的対称性が破れたときの南部・ゴールドストーンモードをゲージ場が取り込むことによりゲージ場の質量が生じている。この一連のメカニズムをヒッグス機構と呼ぶ [3]。なお、物性物理における超伝導のマイスナー効果もこのヒッグス機構の一例であり、超伝導体内部で電磁場が質量を獲得することで、侵入した磁場が指数関数的に減衰すると解釈できる。

次に、フェルミオン場 $\mathcal{L}_F = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi$ の質量について考える。以下のように場を右手系と左手系で分解すると、質量項はカイラルなゲージ変換 $\psi \rightarrow \psi' = e^{-i\gamma_5 \Lambda} \psi$ に対して不変とならない。

$$\psi = L + R, \quad L \equiv \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)\psi, \quad R \equiv \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\psi$$

したがって、フェルミオンの質量も本来ゼロであり、自発的対称性の破れによって発生するものと考え、そのためにフェルミオン場がスカラー場と結合する湯川型相互作用

$$\mathcal{L}_Y = \bar{L} Y R \varphi + \text{H.c.}$$

を導入する。このとき、 $\mathcal{L} = \mathcal{L}_F + \mathcal{L}_Y + \mathcal{L}_H$ においてスカラー場の自発的対称性の破れを考え、その VEV を v とするとフェルミオン場は質量 Yv を獲得することになる。

[1] D. Bailin and A. Love, *Introduction to Gauge Field Theory*, Taylor & Francis Group (1993)

[2] J. Goldstone, A. Salam, and S. Weinberg, *Broken Symmetries*, Phys. Rev. **127**, 965 (1962)

[3] P. W. Higgs, *Broken symmetries, massless particles and gauge fields*, Phys. Lett. **12**, 132 (1964)