

電弱統一理論と素粒子標準模型

中村研究室 向山 裕之

素粒子とは、万物を分割した際の最小単位となる粒子のことである。それらを分類すると、物質を構成するフェルミオン、その間の相互作用を媒介するゲージボソン、また、それらの粒子に質量を与えるヒッグス粒子に分けられる。フェルミオンは、クォークとレプトンに分類され、クォークは核子を構成する粒子で、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用のすべてに関与するのに対し、レプトンは電子とニュートリノの仲間の総称であり、電磁相互作用および弱い相互作用のみに関与する。ゲージボソンはそれぞれの相互作用に対応するゲージ対称性を持ち、強い相互作用を媒介するのはグルーオン、電磁相互作用および弱い相互作用を媒介するのは、光子、Z ボソン、W ボソンである。前者はクォークと共に SU(3) ゲージ対称性に基づく量子色力学 (QCD) によって記述される。後者は SU(2)×U(1) ゲージ対称性のもとで統一的に記述され、ヒッグス粒子の自発的対称性の破れにより質量を獲得する機構を含めて電弱統一理論と呼ばれる。さらに電弱統一理論と量子色力学を合わせた理論体系は素粒子標準模型と呼ばれ、その SU(3)×SU(2)×U(1) ゲージ対称性に基づいて構成されたラグランジアンは以下で与えられる。

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} & (\text{ゲージ場}) \\ & + \bar{E}_{iL}\gamma^\mu D_\mu E_{iL} + \bar{L}_{iR}\gamma^\mu D_\mu L_{iR} & (\text{レプトン}) \\ & + \bar{Q}_{fL}\gamma^\mu D_\mu Q_{fL} + \bar{U}_{fR}\gamma^\mu D_\mu U_{fR} + \bar{D}_{fR}\gamma^\mu D_\mu D_{fR} & (\text{クォーク}) \\ & + (\mathbf{D}_\mu \varphi)^\dagger (\mathbf{D}^\mu \varphi) - \mu^2 \varphi^\dagger \varphi - \frac{1}{4}\lambda(\varphi^\dagger \varphi)^2 & (\text{ヒッグス場}) \\ & + (\bar{E}_{iL} Y_{iL} \varphi_{iR} - \bar{Q}_{fL} X_{fg} \varphi_{fR} D_{gR} - \bar{Q}_{fL} Y_{fg} \psi_{fR} U_{gR} + \text{H.c.}) & (\text{湯川型相互作用})\end{aligned}$$

この第 1 行はゲージ場を表し、 $W_{\mu\nu}^a$ は SU(2) ゲージ場の場の強度テンソル、 $B_{\mu\nu}$ は U(1) ゲージ場の場の強度テンソルであり、電弱相互作用を媒介する光子と Z ボソンおよび W ボソンを記述する。また $G_{\mu\nu}^a$ を含む第 3 項は強い相互作用を媒介するグルーオンを記述する。電弱理論においては、SU(2) ゲージ場 W_μ^a のうち中性成分 W_μ^3 と、U(1) ゲージ場 B_μ が混合し、質量をもつ Z ボソン (Z_μ) と質量をもたない光子 (A_μ) を記述する。この混合はワインバーグ角 θ_W を用いて以下で与えられる。

$$\begin{pmatrix} Z_\mu \\ A_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_W & -\sin \theta_W \\ \sin \theta_W & \cos \theta_W \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_\mu^3 \\ B_\mu \end{pmatrix}$$

ラグランジアン の 2 行目と 3 行目は、それぞれレプトンとクォークを記述する。これらに関連する弱い相互作用はパリティ対称性を破ることが知られており、その事実からフェルミオンの左手系は SU(2) 対称な 2 重項、右手系は U(1) の対称性で記述される。4 行目はヒッグス場であり、自発的対称性の破れにより、ゲージボソンに質量を与える。最終行はフェルミオンとヒッグス場の間の湯川相互作用を表している。フェルミオンのゲージ不変な質量項は、左手系と右手系が異なる変換性を持つため許されず、ヒッグス場を介した湯川相互作用によってフェルミオンの質量が生成される。

本発表では、上記の素粒子標準模型のラグランジアンの数学的構造と各項の物理的意味を明らかにし、そこから導かれる結果について議論する [1-3]。

[1] S. Weinberg, *A Model of Leptons*, Phys. Rev. Lett. **19**, 1264 (1967)

[2] A. Salam, *Weak and electromagnetic interactions*, Conf. Proc. C **680519**, 367 (1967)

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