

CP violation in WWZ coupling with vector-like quarks

浅川 恵理 (お茶の水女子大学)

標準模型の minimal な拡張模型として、第 4 世代にベクトルライククォークを導入する模型がある。これまでに第 3 世代までのクォークは実験的に存在が確かめられているが、トップクォークより更に重いクォークは観測されていない為、その存在の可否及びその性質は未知である。ベクトルライククォーク模型とは、第 4 世代クォークの存在を仮定した上で、その性質として、ベクトル型の相互作用をさせる、すなわち、弱い相互作用に入ってくる軸性ベクトル型の相互作用はさせない模型である。その結果、クォークの世代間の混合を表す小林-益川行列 (KM 行列) がユニタリ-行列ではなくなり、flavor-changing neutral current (FCNC) が tree level で生じる。そして FCNC によって、ゲージ場 3 点結合における CP の破れが 1-loop level で引き起こされる。この結合において、標準模型の 1-loop 補正では CP の破れは現われず非常に小さい為、ゲージ場 3 点結合の CP の破れを見るのが標準模型とベクトルライククォーク模型とを区別する一つの手段になり得る。ここでは、第 4 世代にベクトルライククォークが存在する模型のゲージ場 3 点結合 WWZ に対する量子補正を CP-odd form factor に注目して議論する。

用いる模型は、第 4 世代にベクトルライククォークを加えることで、標準模型のクォークセクターのみを拡張した模型である。ベクトルライククォーク U、D の SU(3)×SU(2)×U(1) ゲージ群に対する変換性は (3, 1, 2/3)、(3, 1, -1/3) で、left-hand 成分、right-hand 成分共に同じ性質 (SU(2) singlet) である。Z ボソンとの相互作用は次のように表される。

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= -\frac{g}{\cos\theta_W} \bar{u}^a \gamma^\mu \left(F_{Lab}^u \frac{1-\gamma_5}{2} + F_{Rab}^u \frac{1+\gamma_5}{2} \right) u^b Z_\mu \\ &\quad -\frac{g}{\cos\theta_W} \bar{d}^a \gamma^\mu \left(F_{Lab}^d \frac{1-\gamma_5}{2} + F_{Rab}^d \frac{1+\gamma_5}{2} \right) d^b Z_\mu, \\ F_L^u &= \frac{1}{2} V V^\dagger - \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W, \quad F_R^u = -\frac{2}{3} \sin^2 \theta_W, \\ F_L^d &= -\frac{1}{2} V^\dagger V + \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W, \quad F_R^d = \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W. \end{aligned} \quad (1)$$

今、KM 行列は、クォークの質量行列を対角化する 4×4 ユニタリ-行列 A_L^u 、 A_L^d を用いて $V_{ab} = \sum_{i=1}^3 (A_L^{u\dagger})_{ai} (A_L^d)_{ib}$ のように定義されている為、ユニタリ-性は失われている。これが FCNC を tree level で生じさせる起源である。WWZ 結合に対する 1-loop 補正は図 1 のように書ける。

一方、WWZ 結合を次のような 7 つの form factor を用いて表すことができる [1]。

$$\mathcal{L}_{eff} = g \cos\theta_W \Gamma^{\mu\nu\lambda} W_\mu^\dagger W_\nu Z_\lambda, \quad (2)$$

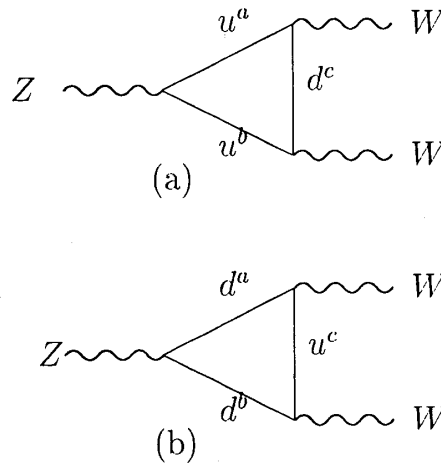


図 1: Possible one-loop diagrams which induce CP -odd couplings for the WWZ vertex.

$$\begin{aligned} \Gamma^{\mu\nu\lambda} = & f_1(p - \bar{p})^\lambda g^{\mu\nu} + f_2 \frac{1}{M_W^2} (p - \bar{p})^\lambda q^\mu q^\nu + f_3 (q^\mu g^{\lambda\nu} - q^\nu g^{\lambda\mu}) \\ & + i f_4 (q^\mu g^{\lambda\nu} + q^\nu g^{\lambda\mu}) + i f_5 \varepsilon^{\mu\nu\lambda\rho} (p - \bar{p})_\rho + f_6 \varepsilon^{\mu\nu\lambda\rho} q_\rho \\ & + f_7 \frac{1}{M_W^2} (p - \bar{p})^\lambda \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} q_\rho (p - \bar{p})_\sigma. \end{aligned}$$

このうち、 CP を破る form factor は f_4 , f_6 , f_7 の 3 つで、図 1 (a) のグラフに対して次の結果を得る。

$$f_4 = \frac{-g^2}{64\pi^2 \cos^2 \theta_W} \sum_{a=1}^4 \sum_{b=1}^4 \sum_{c=1}^4 \text{Im} [V_{ac} V_{bc}^* (VV^\dagger)_{ba}] I_4(m_{ua}, m_{ub}, m_{dc}), \quad (3)$$

$$f_6 = \frac{-g^2}{64\pi^2 \cos^2 \theta_W} \sum_{a=1}^4 \sum_{b=1}^4 \sum_{c=1}^4 \text{Im} [V_{ac} V_{bc}^* (VV^\dagger)_{ba}] I_6(m_{ua}, m_{ub}, m_{dc}), \quad (4)$$

$$f_7 = 0. \quad (5)$$

I_4 , I_6 はループ積分に起因する部分で、これに関しては [2] を用いて数値計算を行った。Eqs.(3),(4) は、クォークの質量に関して妥当な仮定 ($m_u = m_c$, $m_d = m_s = m_b$) によって次のように簡単化できる。

$$f_i = \frac{g^2}{32\pi^2 \cos^2 \theta_W} C S_i \quad (i = 4, 6), \quad (6)$$

$$C = \text{Im} [V_{34} V_{44}^* (VV^\dagger)_{43}],$$

$$\begin{aligned} S_i = & I_i(m_u, m_t, m_d) - I_i(m_u, m_U, m_d) + I_i(m_t, m_U, m_d) \\ & - I_i(m_u, m_t, m_D) + I_i(m_u, m_U, m_D) - I_i(m_t, m_U, m_D). \end{aligned}$$

ここで、もし $m_u = m_t$ とすると、 S_i は消えてしまうことがわかる。この様な議論により、図 1 (b) の寄与は無視できる。Eq. (6) で、更に D クォークは第 3 世代の b クォークとのみ混合すると仮定すると、

$$C = -|(A_L^d)_{34}|^2 \text{Im} \left[(A_L^u)_{43} (A_L^{u\dagger})_{33} (A_L^u)_{34} (A_L^{u\dagger})_{44} \right], \quad (7)$$

となり、これはクォーク質量行列を対角化する行列の積であるから、多く見積もっても $|C| < 0.1$ となり、また D、b の混合がなければ 0 になることがわかる。

S_i については数値計算により ($m_U, m_D \geq 200 \text{ GeV}$ 、 $\sqrt{Q^2} \geq 180 \text{ GeV}$)、 $O(10^{-1})$ であることが示される。従って、

$$|f_4|, |f_6| < 1 \times 10^{-5} \quad (8)$$

が得られ、標準模型による予測値と超対称性模型の予測値 [3] の中間の値が得られた。超対称性模型は 2 桁大きな値 (10^{-3}) を得ることが可能であるが、これが現在計画中の加速器実験で観測可能な下限である。従って、近い将来、WWZ 結合における CP の破れがみつかった場合、その源がベクトルライククォークである可能性は排除される。[4]

参考文献

- [1] K. Hagiwara, R.D. Peccei, D. Zeppenfeld, and K. Hikasa, Nucl. Phys. B282, 253 (1987).
- [2] J. Fujimoto, Y. Shimizu, K. Kato, and Y. Oyanagi, Prog. Theor. Phys. 87, 1233 (1992).
- [3] M. Kitahara, M. Marui, N. Oshimo, T. Saito, and A. Sugamoto, Eur. Phys. J. C4, 661 (1998).
- [4] E. Asakawa, M. Marui, N. Oshimo, T. Saito, and A. Sugamoto, hep-ph/9902478