

エキゾチックフェルミオンを含む電弱ゲージモデルと USY 機構

樋口勝一（神戸海星女子学院大学）
山本克治（京都大学）

Abstract

We discuss possibility of applying the USY scheme for electroweak gauge models with exotic fermions, including vector-like quarks and leptons, which are inspired by the E_6 grand unified theory. The models with singlet quarks have been investigated extensively so far. Prospects for the models with doublet leptons are also considered here.

1. 素粒子の標準理論と今後の課題

標準理論は $SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ 対称性をもつ電弱ゲージ理論で、今までに知られている素粒子の現象のほとんどを正確に記述することがわかっている[1,2,3]。ただし、弱い相互作用を媒介する W や Z ボソンなど、一般にはゲージ対称性によりゲージボソンに質量は生じない。また、既存のフェルミオン（クォークとレプトン）に対して $SU(2)_W \times U(1)_Y$ ゲージ相互作用がカイラルであること、すなわちフェルミオンの左巻と右巻成分が異なった変換性を持つため、ゲージ不变な質量項が構成できない。したがって、このような素粒子の実際の質量を生成させるために、 $SU(2)_W \times U(1)_Y$ の自発的破れに基づく、いわゆるヒッグス機構が考えられ[2]、標準理論において重要な役割を果たしてきた。ヒッグス機構は、ヒッグス粒子という中性のスカラーボソンの存在を予言する。標準理論を完結するものとしてその発見が待ち望まれてきたが、2012年7月に、ヨーロッパの CERN における LHC 加速器実験で、ヒッグス粒子とみなされる新粒子を発見したことが発表された。

しかしながら、標準理論では説明できない重要な事象も残されている。それらのうちのいくつかを以下に示す。

- ・フェルミオンの質量の階層性
- ・ニュートリノの振動
- ・ヒッグス粒子の質量の理論的予測

- ・弱混合角の起源

- ・クォークやレプトン混合の起源

- ・ゲージ結合定数が異なること

- ・宇宙論との整合性（バリオジェネシス、インフレーション、ダークマター、ダークエネルギーなど）

これらの事象を説明するために、標準理論を拡張したり、新しい種類の粒子を導入したりして、さまざまな理論的試みがなされてきた。

2. エキゾチックフェルミオンと USY 機構

標準理論の課題に取り組み、新しい物理を考える有望な可能性のひとつとして、 E_6 大統一理論が提案されている[4]。 E_6 大統一理論では、標準理論のゲージ対称性が以下のように統一される。

$E_6 \supset SO(10) \supset SU(5) \supset SU(3)_C \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ この E_6 の 27 次元表現(表 1)の中には、 $SU(2)_W \times U(1)_Y$ に対して左右同じに相互作用する、いわゆるベクトル型のシングレットクォークやダブルレットレプトンの存在が示唆されている。そして、シングレットクォークを含む電弱ゲージモデルについては、これまで詳細な研究が行われてきた[5]。このモデルの特徴は、標準理論では存在しない比較的大きなフレーバー変換中性カレント（Flavor Changing Neutral Current : FCNC）が生じる点である。また、そこには CP 対称性を破る新たな位相が期待できることであ

る。我々もシングレットクォークを含むモデルにおけるフレーバー変換過程について系統的に研究をおこなってきた[6]。

一方、フェルミオンの質量階層性を自然に導く USY 機構(Universality Strength for Yukawa couplings)を標準理論に適用したモデルについても研究されてきた[7]。その結果、単に標準理論に USY を適用するだけでは、CKM 行列(Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)[3]に存在する CP 対称性を破る位相が小さすぎるという欠点があることがわかっている。その他、USY 機構をフェルミオンの 4 世代モデルにも適用したものもある[8]。

このような中で、我々はシングレットクォークを含む電弱ゲージモデルに USY 機構を適用したモデルを提案した[9]。このモデルの特徴は、クォークの質量階層性を自然に導く利点を持ちながら、CKM 行列の中の位相の実験値を再現できるということである。シングレットクォークの存在が E₆ 大統一理論から自然に導かれていることからも、このモデルが電弱エネルギー領域(100GeV から 10TeV 程度)で標準理論を超える新しい物理を与える有力なものであると考えている。

以下の節では、これまで研究を行ってきた USY 機構を適用したシングレットクォークを含むモデルについて概観するとともに、ダブルレットレプトンを含むモデルに対して USY 機構を適用する可能性についても考える。

3. シングレットクォークと USY 機構

USY 機構の標準理論への適用が 1990 年に Branco らによって研究され、クォークの質量と CKM 行列の絶対値が再現された[7](図 1)。しかしながら、CKM 行列の CP 対称性を破る位相は、実際とは異なる小さい値しか得られないことも判明した。その後、2003 年に同氏らによって、超対称性を持った拡張標準理論に USY 機構を

適用したモデルが分析されたが、CKM 行列における CP 位相は小さいままであった[10]。

このような中で、我々は E₆ 大統一理論から存在が示唆されるシングレットクォークを含むモデルに USY 機構を適用した[9](図 2)。このモデルでは、シングレットクォークは電荷 -2/3 を持つ D タイプクォーク(以下 D クォーク)のみが存在し、電荷 1/3 を持つ U タイプクォーク(以下 U クォーク)は存在しない。E₆ の 27 次元表現に D クウォークが含まれるが、U クウォークは含まれていないことがその理由である。

標準理論では、同じ第 3 世代である t クウォーク(172GeV)が b クウォーク(4.19GeV)よりもはるかに大きい質量を持つが、「標準理論 +USY」の枠組みではこの質量の階層性は説明できない。しかし、D クウォークが存在すれば、USY 機構によって比較的軽い b クウォークの質量が自然に導かれ、これで t クウォークと b クウォークの質量階層性が説明される。

さらに、CKM 行列に対する現状の実験結果を反映する十分に大きな CP を破る位相を再現するためには、D クウォークは 2 世代以上必要であることも判明した。この場合、2 つのうちの軽い方の D クウォークの質量は 1TeV 程度となり、LHC 実験において、近い将来その発見が期待される[11](表 2)。これらのことと、u タイプクウォークと d タイプクウォークの湯川結合項の大きさをすべて等しくおくこと、すなわち D クウォークも含めた完全な USY の枠組みで実現できたのである。

もちろん、このモデルにおける FCNC は実験的制限内におさまっていることが確認され、第 3 世代を含む FCNC が標準理論のものより大きくなる可能性のあることも示されている [6,11](図 3)。なお、このモデルにおいては、E₆ の 27 次元表現の 1 つの成分にあてはめることのできるシングレットヒッグスを、通常のクウォークだけでなく、シングレットクウォークにまで USY を適用するために導入している。

なお, D クォークの 1 世代のみを含むモデルが Branco らによって最近提案されているが, D クォークの間の結合に対しては USY の条件を放棄しており, 不満足なものである [12].

まとめると, 標準理論に D クォークを付加した我々のモデルでは USY 機構を完全に適用することができた. その結果, 自然にクォーク質量の階層性が説明され, なおかつ CKM 行列内の CP 対称性を破る位相が再現される.

4. ダブレットレプトンと USY 機構

エキゾチックレプトンとして, 右巻きニュートリノとベクトル型荷電シングレットレプトンを含むモデルに USY 機構を適用することで, レプトンセクターについても τ 粒子と τ ニュートリノとの質量階層性を自然に説明することが可能となることをこれまでに指摘している[13]. ただし, このモデルにおいて, 荷電レプトンの質量の再現, ニュートリノの振動に現われるレプトン混合行列の再現は今後の課題である.

一方, E_6 大統一理論から示唆される, ベクトル型のダブルレットレプトンを含むモデルについては, USY 機構を適用したときのレプトンセクターの質量と混合の構造はまだ調べられていない. これまでの研究で, クォークセクターでは, u タイプクォークと d タイプクォークの湯川結合を等しくした USY がうまく機能して, クォークの質量と混合が再現されることがわかっている. このことから, ダブルレットレプトンを含むモデルでも USY 機構により実際のレプトンの質量と混合を導けることが十分に予想される. 今後は, この重要な課題に取り組んでゆく.

4. まとめ

E_6 大統一理論から存在が示唆されているエキゾチックフェルミオンを含む電弱ゲージモデルに USY 機構を適用することと, それに関連した事象についての現状を概観した. D クォークを含むモデルについては詳細が研究されてきたが,

ダブルレットレプトンを含むモデルについてはあまり研究がなされていない. 今後の課題といい.

参考文献

- [1] S. L. Glashow, Nucl. Phys. 22, 579 (1961);
S. Weinberg, Phys. Rev. 19, 1264 (1967);
A. Salam, Elementary Particle Physics,
p.367, edited by N. Svartholm (Almgvist
and Willsells, Stockholm, 1968);
W. Marciano and H. Pagels,
Phys. Rep. 36, 137 (1978).
- [2] P. W. Higgs, Phys. Rev. Lett. 13, 508
(1964); Phys. Rev. 145, 1156 (1966).
- [3] M. Kobayashi and T. Maskawa,
Prog. Theor. Phys. 49, 652 (1979).
- [4] F. Gursey, P. Ramond, and P. Sikivie,
Phys. Lett. 60 B, 177 (1976);
P. Langacker, Phys. Rep. 72, 185 (1981);
J. L. Hewett and T. G. Rizzo,
Phys. Rep. 183, 193 (1989).
- [5] F. del Aguila and J. Cortes,
Phys. Lett. B156, 243 (1985);
Y. Nir and D. Silverman,
Phys. Rev. D42, 1477 (1990);
G. C. Branco, P. A. Parada and
M. N. Rebelo, Phys. Rev. D52, 4217 (1995).
- [6] K. Higuchi and K. Yamamoto,
Phys. Rev. D62, 073005 (2000).
- [7] G. C. Branco and J. I. Silva-Marcos,
Phys. Lett. B237, 446 (1990).
- [8] J. I. Silva-Marcos, Phys. Rev. D62, 073004
(2000).
- [9] K. Higuchi, M. Senami and K. Yamamoto,
Phys. Lett. B638, 492 (2006).
- [10] G. C. Branco, M. E. GomeZ, S. Khalil and
A. M. Teiceria, Nucl. Phys. B659, 119
(2003).
- [11] K. Higuchi and K. Yamamoto,

- Phys. Rev. D81, 1015009 (2010).
[12] G. C. Branco, H. R. Colaco Ferreira, A.G
Hessler, and J. I. Silva-Marcos,
JHEP05(2012) 001.
[13] K. Higuchi, M. Senami, and
K. Yamamoto, Kobe Kaisei. Rev. 44, 117
(2006).

表 1. E₆大統一理論の 27 次元表現～SU(3)_C×SU(2)_W×U(1)_Y

●標準理論のフェルミオン

量子数	(3, 2, 1/6)	(3 [*] , 1, -2/3)	(1, 1, 1)	(3 [*] , 1, 1/3)	(1, 2, -1/2)
粒子	$q=(u, d)$	u^c	e^c	d^c	$l=(v_e, e)$

●エキゾチックフェルミオン

量子数	(3 [*] , 1, 1/3)	(3, 1, -1/3)	(1, 2, -1/2)	(1, 2, 1/2)	(1, 1, 0)
粒子	D^c	D	$L=(N, E)$	$L^c=(N^c, E^c)$	S

●右巻ニュートリノ

量子数	(1, 1, 0)
粒子	ν^c

※上記粒子は、左巻ワイルフェルミオンで表示した。上付き「c」は反粒子を表し、右巻フェルミオンに相当する。

$$M_\chi = c_\chi \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow c_\chi \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} \quad (\chi = u, d)$$

$$M_\chi = c_\chi \begin{pmatrix} 1+\delta_1 & 1 & 1 \\ 1 & 1+\delta_2 & 1 \\ 1 & 1 & 1+\delta_3 \end{pmatrix} \Rightarrow c_\chi \begin{pmatrix} * & 0 & 0 \\ 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} \quad (\chi = u, d)$$

図 1. 標準理論におけるフレーバーデモクラシーが保たれた質量行列(上)とそれが破れた質量行列(下)

$$M_u \propto \begin{pmatrix} \exp(i\phi_{11}^u) & \exp(i\phi_{12}^u) & \exp(i\phi_{13}^u) \\ \exp(i\phi_{21}^u) & \exp(i\phi_{22}^u) & \exp(i\phi_{23}^u) \\ \exp(i\phi_{31}^u) & \exp(i\phi_{32}^u) & \exp(i\phi_{33}^u) \end{pmatrix} \square \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

$$M_D \propto \begin{pmatrix} \exp(i\phi_{11}^d) & \exp(i\phi_{12}^d) & \exp(i\phi_{13}^d) & \exp(i\phi_{14}^d) & \exp(i\phi_{15}^d) \\ \exp(i\phi_{21}^d) & \exp(i\phi_{22}^d) & \exp(i\phi_{23}^d) & \exp(i\phi_{24}^d) & \exp(i\phi_{25}^d) \\ \exp(i\phi_{31}^d) & \exp(i\phi_{32}^d) & \exp(i\phi_{33}^d) & \exp(i\phi_{34}^d) & \exp(i\phi_{35}^d) \\ \kappa \exp(i\phi_{41}^D) & \kappa \exp(i\phi_{42}^D) & \kappa \exp(i\phi_{43}^D) & \kappa \exp(i\phi_{44}^D) & \kappa \exp(i\phi_{45}^D) \\ \kappa \exp(i\phi_{51}^D) & \kappa \exp(i\phi_{52}^D) & \kappa \exp(i\phi_{53}^D) & \kappa \exp(i\phi_{54}^D) & \kappa \exp(i\phi_{55}^D) \end{pmatrix} \square \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \kappa & \kappa & \kappa & \kappa & \kappa \\ \kappa & \kappa & \kappa & \kappa & \kappa \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{15} & \end{pmatrix}$$

図 2. シングレット D クオークを含む USY モデル (3 世代+D の 2 世代)

表2. フェルミオンの質量

フェルミオン	電荷	第1世代	第2世代	第3世代	エキゾチック
クォーク	+2/3	u (2.5MeV)	c (1.27GeV)	t (172GeV)	
	-1/3	d (4.95MeV)	s (101MeV)	b (4.19GeV)	D (1TeV程度?)
ν° ソン	0	ν_e (<2eV)	ν_μ (<0.19MeV)	ν_τ (<18.2MeV)	?
	-1	e (510eV)	μ (105MeV)	τ (1.777GeV)	?

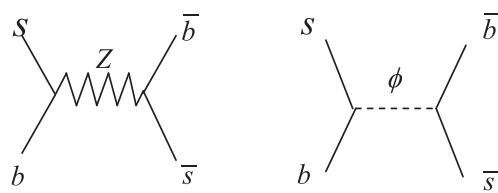


図3. 標準理論には存在しない FCNC の例

