

# 第1章 はじめに

現在の素粒子理論は、Glashow-Weinberg-Salam [1] の提唱した量子電弱理論と Gross-Wilczek-Politzer [2] の提唱した Han-Nambu [3] の  $SU(3)_c^{loc}$  カラーに基づく量子色力学理論により構成されている。これをまとめて素粒子の標準理論と呼んでいる。素粒子は、電子の仲間及び対になって現象に参与する中性微子（ニュートリノ）の仲間（レプトン族）、陽子・中性子を形成するクォーク（クォーク族）、そして光の仲間（ベクターボゾン族）、更に、質量の元を供給するヒッグス粒子である。

電子の仲間： $(e, \mu, \tau)$   $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$

陽子・中性子を形成するクォーク： $(u, c, t)_{赤、緑、青}$   $(d, s, b)_{赤、緑、青}$

陽子 =  $u_{[赤} u_{[緑} d_{青]}$  中性子 =  $u_{[赤} d_{[緑} d_{青]}$

光の仲間： $\gamma, G(赤、緑、青 \leftrightarrow 赤、緑、青), W^\pm, Z$

ヒッグス粒子： $H$

これらは、ヒッグス粒子を除いてすべては発見されている。ただし、単体としてのクォークは発見されておらず、その原因として量子色力学理論内で閉じ込め機構が関わっていると思われる。いくつかの有力な理論的考察 [4] はあるが、現在まで場の量子理論としての完成は見えていない。電子の仲間とクォークを

色の有無

単位電荷（= 1 : 電子の電荷を -1 とする）のみ違う相棒の組

電荷の大きさ

でまとめると

族	単位電荷のみ違う相棒の組	色の有無	電荷
レプトン	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$	無色	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$
クォーク	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$	三色 (=3つ子)	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$

表 1-1 : クォーク・レプトンの分類

のように表にすることができる。これのように一連の群としてまとまるので、もう少し数学の群論の言葉を借りて厳密にすることができて、

色の有無：3色 = 3つの自由度を持つ群： $SU(3)_c^{loc}$

単位電荷（= 1 : 電子の電荷を -1 とする）のみ違う相棒 =

2つの自由度を持つ群： $SU(2)_L^{loc}$

電荷の大きさ＝ 1つの自由度を持つ群： $U(1)_Y^{loc}$

をまとめて

$$SU(3)_c^{loc} \times SU(2)_L^{loc} \times U(1)_Y^{loc}$$

が素粒子の標準理論に課せられている群である。これらの群はゲージ群とよばれ標準理論のもつゲージ対称性をあらわしている。この対称性は空間の各点各点で成立する対称性であり局所対称性 (local symmetry) とよばれている。ここでは上付き添え字として「loc」で示してある。

表1-1をゲージ対称性に基づいて書き改めると表1-2のようになる。この対称性のもとでゲージボゾンとヒッグスボゾンの分類をすると表1-3のようになる。量子電弱理論は、 $\langle \text{真空} | \phi^{(0)} | \text{真空} \rangle$ を真空期待値といい、零では無くなることにより、 $SU(2)_L^{loc} \times U(1)_Y^{loc} \rightarrow U(1)_{em}^{loc}$ の様に自発的破れを起こす特徴を持っている。その結果、観測可能な状態としてのZボゾンと光は元の場の混合状態となる。この混合角を $\theta_w$ とした。量子電弱理論が提唱された1960年後半には $(e, \mu)$ と $(\nu_e, \nu_\mu)$ はすでに発見されおり、 $(u)_{\text{赤、緑、青}}$ クォークと $(d, s)_{\text{赤、緑、青}}$ クォークも理論

状態	族	組	色の有無	上下	超電荷	電荷
			$SU(3)_c^{loc}$	$SU(2)_L^{loc}$	$U(1)_Y^{loc}$	$U(1)_{em}^{loc}$
左巻き Left-handed	レプトン	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	1	2	$\frac{1}{6}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$
	クォーク	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$	3	2	$\frac{1}{2}$	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$
右巻き Right-handed	レプトン	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_R, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_R, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_R$	1	1	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$
	クォーク	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_R, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_R$	3	1	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$

表1-2：クォーク・レプトンのゲージ対称性に基づく分類

族	組	色の有無	上下	超電荷	電荷	観測可能状態	
		$SU(3)_c^{loc}$	$SU(2)_L^{loc}$	$U(1)_Y^{loc}$	$U(1)_{em}^{loc}$		
ゲージ ボゾン	$G_\mu^{(A)}$ (A=1...8)	8	1	0	0	グルーオン	$G_\mu^{(A)}$ (A=1...8)
	$W_\mu^{(\pm)}$	1	3	0	$\pm 1$	Wボゾン	$W_\mu^{(\pm)}$
	$Z_\mu^0$				0	Zボゾン	$\cos \theta_w Z_\mu^0 - \sin \theta_w A_\mu^0$
	$A_\mu^0$	1	1	0	0	光 ( $\gamma$ )	$\sin \theta_w Z_\mu^0 + \cos \theta_w A_\mu^0$
ヒッグス 粒子	$\begin{pmatrix} \phi^{(+)} \\ \phi^{(0)} \end{pmatrix}$	1	2	$\frac{1}{2}$	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$	ヒッグス ボゾン	$\phi^{(0)} - \langle \text{真空}   \phi^{(0)}   \text{真空} \rangle$

表1-3：ゲージボゾン・ヒッグス粒子のゲージ対称性に基づく分類

年	物理への寄与	加速器のある研究所	内容
1969	クォークとパートン u, d, s クォーク	SLAC at USA	電子-核子散乱による核子内のクォークの存在の発見 [4]
1973	中性電流	CERN at Swiss	ニュートリノ-核子散乱による量子電弱理論で予言されている中性電流の発見 [5]
1974	c クォーク	SLAC at USA DESY at Germany FRASCATTI at Italy	電子-陽電子衝突による c (charm) クォークの発見 [6]
1975	$\tau$ レプトン $\nu_\tau$ ニュートリノ	SLAC at USA	電子-陽電子衝突による $\tau$ レプトンと $\nu_\tau$ ニュートリノの発見 [7]
1977	b クォーク	SLAC at USA	電子-陽電子衝突による b (bottom) クォークの発見 [8]
1979	G ボゾン (グルーオン)	DESY at Germany	電子-陽電子衝突による量子色力学で予言されているグルーオンの発見 [9]
1983	$W^\pm$ ボゾン, Z ボゾン	CERN at Swiss	陽子-反陽子衝突による量子電弱理論で予言されている $W^\pm$ , Z の発見 [10]
1994	t クォーク	FNAL at USA	陽子-反陽子衝突による t (top) クォークの発見 [11]
1997	レプトクォーク???	DESY at Germany	陽子-反電子衝突によるレプトクォークの発見? [12]
1998	CP の破れ方???	KEK at Japan SLAC at USA	電子-陽電子衝突による小林・益川理論による CP の破れの発見?
200?	ヒッグスボゾン???	CERN at Swiss	陽子-反陽子衝突によるヒッグスの発見?

表 1-4 : 素粒子の発見

に用いられ始めていた。それ以外の素粒子は、次々に作られた粒子加速器での実験により表 1-4 のように発見されることになる。1998 年から日本の KEK と米国の SLAC で始まる b クォークを使った実験では、クォーク・レプトンの 3 世代モデルに基づく小林・益川理論 [13] が予言する CP の破れ方が正しいかどうかを観測することになっており現在、稼動に向け準備中である。また、スイスにある欧州連合の CERN では日本からの出資も得て、21 世紀初頭の実験を目指し加速器の開発が進められている。ここでは、標準モデルに登場していて未だ発見されていない唯一の素粒子「ヒッグスボゾン」の発見を目指している。

表 4-1 には、今後の進展によっては、昨年発見された事になるかもしれない「レプトクォーク」とよばれる素粒子が入っている。これは、標準モデルの素粒子として取り入れられていない新粒子である。理論的にはいくつかの可能性の一つとしてよく知られている異端の素粒子 [14] である。加速器のある DESY では、電子（陽電子）と陽子を正面衝突させてその反応の

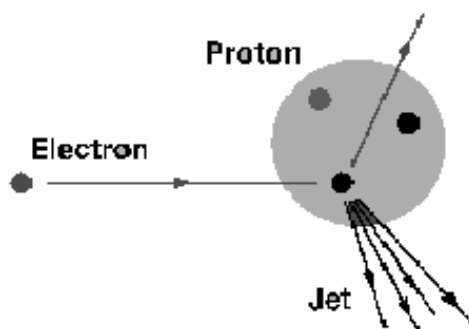


図 1-1 : 陽電子と陽子の散乱

度合いを観測している。陽子は  $uud$  となっているので内部では、電子（陽電子）と  $u$  クォークや電子（陽電子）と  $d$  クォークの衝突が起こっている。この様子は理論的にはクォーク・パートンモデル [15] で記述され、第 3 章で詳しく説明する。さて、この衝突では、標準モデルに基づいて衝突の大きさを計算することができる。陽電子-陽子衝突実験の時に、

## 陽電子+陽子→陽電子+何本かの粒子ジェット

という現象が起こる。陽子の中のクォークから陽電子にわたるエネルギーの大きさを衝突の大きさは変化するのだが、陽子の（静止）質量の200倍程度までは標準模型での予測値と一致する。しかし200倍程度を超える付近より予測値を超えた衝突の大きさを観測するようになる [16, 17]。しかし、電子-陽子衝突実験の時には対応するズレは観測されていない。陽電子-陽子衝突でのズレを理論的に説明するには、陽電子とクォークにのみ関与する「何か新しい物」を導入しなければならない。そこで、陽電子とクォークからなる複合系を考えたり、陽電子とクォークを結びつけるボソンを導入したりする。レプトンとクォークが結びつく事に掛けて「レプトクォーク」と呼ばれている。

本稿ではこのレプトクォークを

- 1) 新しい素粒子としてのレプトクォーク
- 2) 複合共鳴状態としてのレプトクォーク

の2つの可能性に的を絞って理論的に探っていく。以下の構成は、第2章ではHERAの実験結果といくつかの理論的可能性を簡単にまとめておく。第3章では、陽子・陽電子（あるいは電子）衝突の大きさをクォーク・パートン模型に基づき理論的に計算する。第4章では標準模型の枠内に新しい素粒子「レプトクォーク」を迎え入れて、それをSU(5)統一模型に拡張する。第5章では複合共鳴状態の「レプトクォーク」導入のため、標準模型での素粒子をすべて複合粒子 [18] で記述し、「レプトクォーク」の性質を議論する。第6章はまとめと今後の展望を述べて本稿を終わりとする。

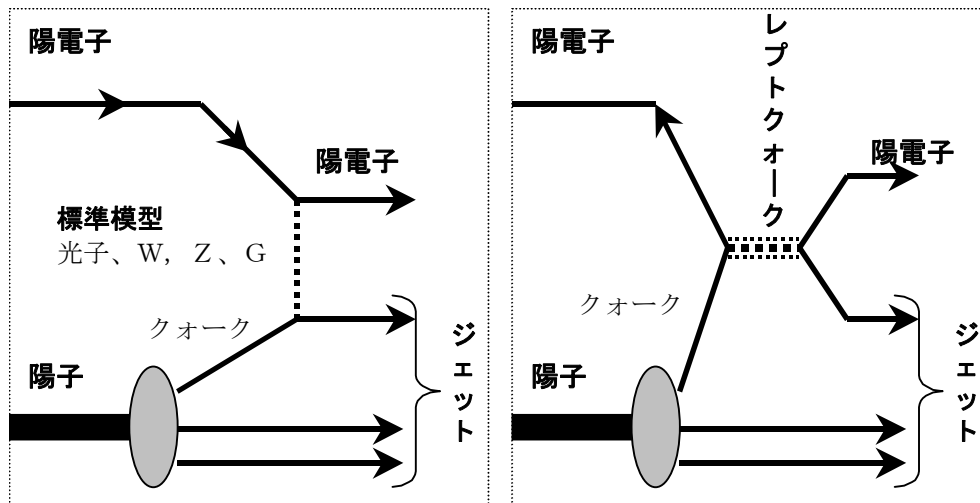


図1-2: 陽電子・陽子衝突実験: 標準理論からの寄与とレプトクォークからの寄与