

論文 Original Paper

プレオン模型におけるレプトクォーク粒子の性質

関 口 宗 男*

Properties of Leptoquarks in Preon Model

Motoo SEKIGUCHI*

Synopsis: We take the viewpoint that the standard model is a low energy effective theory among composite quarks, leptons and weak bosons in preon model, with hypercolor $SU(N)_{HC}$ gauge interaction. In this applying a fermion-boson type preon scheme and supposing confinement and preon line rule (like the OZI-rule) for the hypercolor confining force, we concentrate to investigate properties of leptoquarks, whose existence is naturally in our scheme. Due to the preon-line rule, which is predicted to be valid, the event-ratio of neutral to charged current interactions is predicted to be 1 with the initial e^+P channel in the HERA experiment. It is noted to be that our relevant leptoquarks cannot be produced by the high energy collision processes of e^+e^- , e^-P , $P\bar{P}$ and PP .

keywords: composite, leptoquark, preon

要旨：標準模型はプレオン模型における複合クォーク、レプトン及びウイークボゾンの低エネルギー実効理論であるという立場をとり、複合系の束縛力としてハイパーカラー $SU(N)_{HC}$ ゲージ相互作用を考える。特に、フェルミオン・ボゾン型のプレオン模型を採用し、この模型でその存在が自然に予言されるレプトクォーク粒子の性質を検討する。このときハイパーカラー閉じ込め相互作用には、OZI 則に倣ってプレオン・ライン則を仮定する。ライン則に従えば、HERA 実験における e^+P 衝突において中性カレント相互作用と荷電カレント相互作用の事象比は 1 になる。また、このレプトクォークは e^+e^- , e^-P , $P\bar{P}$ 及び PP 衝突実験では生成することができない。

1. 序 論

近年、標準模型が 180 GeV 付近のエネルギー領域まで、正しいことが CERN (欧洲合同原子核研究所) の LEP (陽電子 (e^+)・電子 (e^-) 衝突型加速器) 等による精密実験により検証された。さらに、これらの実験は標準模型を単純に拡張した $SU(5)$ 統一模型^[2]では、相互作用を統一することは不可能であることを示唆している。また、標準模型の枠内でもヒッグス粒子が関係する部分は、全く実験的に検証されていない。このため標準模型を超える模型を構築する様々な試みがなされている。これらのうち代表的なものとして、超対称統一模型^[1]、テクニカラー模型^[1]、クォーク及びレプトンの複合模型 (プレオン模型)^[1]がある。これらの模型の多くは、この論文で議論するレプトクォークと呼ばれるバリオン数とレプトン数を持つスカラー粒子 (または、ベク

トル粒子) の存在を予言している。このレプトクォークの生成及び崩壊過程を検討することは標準模型を超える物理を探索する上で重要な課題である。

レプトクォーク探索の現状としては、DESY (ドイツ電子シンクロトロン研究所) の HERA 実験 ($e^+(e^-)$ ・陽子 (P) 衝突型加速器) の H1 と ZEUS グループが高い運動量移行データにレプトクォークが生成された事象が含まれる可能性があると報告した^[3,4,5]。様々な検討がなされたが^[7,8,9]、その後の解析結果では標準模型の予言値よりも事象数が超過ぎみの傾向であるが、粒子の生成を確証できる事象は含まれていないと報告している^[6]。最終的には来年度以降の高輝度ビームによる実験により再検討される。また、フェルミ国立加速器研究所の TEVATRON (P ・反陽子 (\bar{P})) や LEP II 等による探索も継続されている。今後も LHC (CERN, PP 衝突型加速器), JLC (e^+e^- 衝突型加速器, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)) 等により TeV エネルギー領域まで存在可能性を検討することが計画されている。

この論文では、プレオン模型^[11,12]におけるレプトク

* 電気工学科 講師 博士 (理学)

Lecturer, Department of Electrical Engineering Dr. of Science.

クォークの生成・崩壊過程を検討する。特に我々は、レプトクォークとクォーク及びレプトンの実効相互作用に、プレオン・ライン則^[10,9]を仮定する。これは、ハドロン間の実効相互作用を取り扱うときに有効であったクォーク・ライン則(OZI則)をプレオン模型にあてはめたものである。ライン則を仮定することにより崩壊比等を明確に予言できる。また、現在進行しているHERA実験でのレプトクォークの生成可能性を検討する。

2. プレオン模型とレプトクォーク粒子

我々は標準模型を低エネルギー領域における複合クォーク、レプトン及びウィークボゾンの有効理論であり、これらの複合粒子はハイパー色 SU(N_{HC}) ゲージ相互作用によりプレオンと反プレオンが閉じ込められた束縛状態であると仮定する。我々はプレオンとして

$$F = (F^U, F^D), \quad B^{(i)} = (C^{(i)}, S^{(i)}), \quad (1)$$

を考える。FはDiracスピノールで大局的SU(2)アイソ2重項、 $B^{(i)}$ はスカラー粒子で世代数($i=1, 2, 3$)を運んでいる。Fと $B^{(i)}$ はSU(N_{HC})群の基本N次元表現に属する。プレオンの量子数を表1にまとめておく。

ここでCとSがバリオン数(またはクォーク数)Bとレプトン数Lをそれぞれ持つ。ハイパー色1重項のクォークとレプトンの構成は、

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F^U \bar{C}^{(1)} \\ F^D \bar{C}^{(1)} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F^U \bar{C}^{(2)} \\ F^D \bar{C}^{(2)} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F^U \bar{C}^{(3)} \\ F^D \bar{C}^{(3)} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F^U \bar{S}^{(1)} \\ F^D \bar{S}^{(1)} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F^U \bar{S}^{(2)} \\ F^D \bar{S}^{(2)} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F^U \bar{S}^{(3)} \\ F^D \bar{S}^{(3)} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

と仮定する。我々はゲージ対称性としてSU(2)_L×SU(2)_Rを考えている^[10,13]、そのためハイパー色1重項の複合ウィークボゾンとして W_L と W_R が存在し、その構成は¹

$$\bar{W}_{\mu,L} \approx (\bar{F}_L \bar{\tau} \gamma_\mu F_L), \quad \bar{W}_{\mu,R} \approx (\bar{F}_R \bar{\tau} \gamma_\mu F_R), \quad (4)$$

となる。ここで、 F_L と F_R はそれぞれFの左巻き成分と右巻き成分である。我々の模型ではさらにハイパー色1重項として存在が予言される粒子があり、それらを表2にまとめる。

表2のなかで

$$\Phi_{SC}^{(ij)} \approx (S^{(i)} \bar{C}^{(j)}), \quad (5)$$

は $B=1/3$ と $L=-1$ を量子数として持つ、したがってこの粒子が我々の模型のレプトクォークになる。この論文では、プレオンのS波の束縛状態のみを検討する。

¹ 我々の枠組みでは余分なアイソ1重項ゲージ粒子 $W_{\mu,h}^{(0)} = \bar{F}_h \gamma_\mu F_h$ ($h=L$ and R)の存在が予言される。以前に \bar{W}_R^0 の質量下限を検討している^[10,13]。

表1 プレオンの量子数

| | F^U | F^D | $C^{(i)}$ | $S^{(i)}$ |
|-------|----------|----------|-----------|-----------|
| ハイパー色 | <u>N</u> | <u>N</u> | <u>N</u> | <u>N</u> |
| 色 | 1 | 1 | 3* | 1 |
| 電荷 | 1/2 | -1/2 | -1/6 | 1/2 |
| B | 0 | 0 | -1/3 | 0 |
| L | 0 | 0 | 0 | -1 |

表2 ハイパー色1重項複合ボゾンとその生成過程

| | |
|--|-------------|
| $\Phi_{SC}^{(ij)} \approx (S^{(i)} \bar{C}^{(j)})$ | $e^+ P$ |
| $\Phi_{SS}^{(ij)} \approx (S^{(i)} \bar{S}^{(j)})$ | $e^+ e^-$ |
| $\Phi_{CC}^{(ij)} \approx (C^{(i)} \bar{C}^{(j)})$ | $P \bar{P}$ |

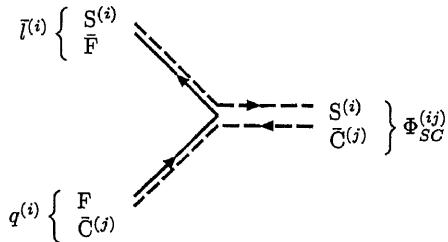


図1 レプトクォーク(反レプトクォーク)の生成過程(崩壊過程)

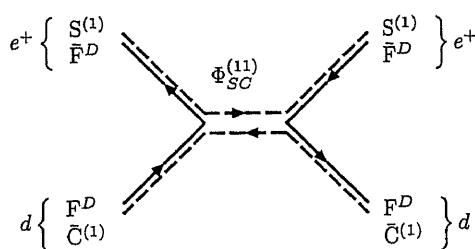
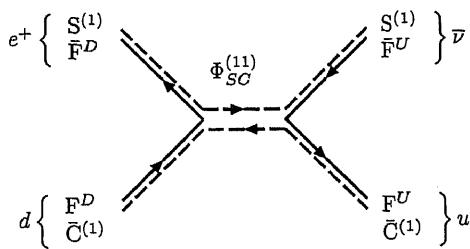
表3 $\Phi_{SC}^{(ij)}$ の生成比(崩壊比)

| レプトクォーク | 生成(崩壊)チャネル | 比 |
|---------------------------|---|-----|
| $\Phi_{SC}^{(ij)}$ | $(\bar{v}^{(i)} u^{(j)}) / (\bar{e}^{(i)} d^{(j)})$ | 1/1 |
| $\Phi_{SC}^{(ij)\dagger}$ | $(\bar{u}^{(i)} \nu^{(j)}) / (\bar{d}^{(i)} e^{(j)})$ | 1/1 |

3. ライン則とレプトクォーク粒子の性質

プレオンを結合させる閉じ込め力としてハイパー色-SU(N_{HC})ゲージ相互作用を仮定している。この閉じ込め力に対して、我々は以前にQCDでのOZI則に倣ってプレオン・ライン則を仮定した^[10]。OZI則は $1/N$ 展開が良い近似で成り立つ場合に正しい結論が得られる^[14]。我々の複合ウィークボゾンの検討等^[13,15]からハイパー色-N_{HC}はかなり大きい可能性があり、ライン則が成り立つことが期待される。また、ライン則を仮定することによりレプトクォークの生成・崩壊過程を予言することが可能となり、さらに生成比(崩壊比)を予言することが可能となる。他のプレオン模型^[8]では、これらの比を予言することはできない。

プレオン・ライン則はプレオンの持つ量子数の保存を保証する。このためレプトクォークの関与する反応では、バリオン数とレプトン数及び世代数を保存する。こ

図2 $\Phi_{SC}^{(11)}$ の生成崩壊過程（中性カレント）図3 $\Phi_{SC}^{(11)}$ の生成崩壊過程（荷電カレント）

ためこれらの保存則を破る陽子崩壊やフレーバー変換荷電カレント相互作用は抑制される。

以上の仮定から、我々のレプトクォークとレプトン、クォークの実効湯川相互作用は、

$$\mathcal{L} = \sum_{i,j} \lambda_{SC}^{(ij)} (\bar{\nu}^{(i)} \Phi_{SC}^{(ij)} u^{(j)} + \bar{u}^{(i)} \Phi_{SC}^{(ij)\dagger} \nu^{(j)} + \bar{e}^{(i)} \Phi_{SC}^{(ij)} d^{(j)} + \bar{d}^{(i)} \Phi_{SC}^{(ij)\dagger} e^{(j)}), \quad (6)$$

と書ける。ここで、 $\nu^{(i)}$ と $e^{(i)}$ ($u^{(i)}$ と $d^{(i)}$) は世代数 i のレプトン (クォーク) を表す。このラグランジアン (6) に対応する我々のレプトクォーク (反レプトクォーク) 生成 (崩壊) のファインマン・ダイアグラムを図1に示す。また、表3に生成比と崩壊比をまとめる。

4. HERA 実験とレプトクォーク

表2、図1, 2, 3より、我々のレプトクォークは現在可能な実験では e^+P 衝突実験のみ生成可能であることが結論される。 e^+e^- , e^-P , $P\bar{P}$ 及び PP 衝突実験ではライシン則により、たとえ t チャンネルであってもレプトクォークを交換することが不可能である。したがって、我々のレプトクォークは低エネルギー実験からの質量下限値の制限を受けない。この点が、他の模型で存在が予言されているレプトクォーク^[7]との大きな違いである。ここでは HERA e^+P 衝突実験で我々のレプトクォークがどのような性質を示すかを検討する。図2と図3が示すように e^+ と陽子内部の d クォークの衝突により s チャンネルに $\Phi_{SC}^{(11)}$ が生成され崩壊する。この時の事象は図3から中性カレント相互作用と荷電カレント相互作用で同じ比になる。このため分岐比が

表4 $\Phi_{SC}^{(11)}$ の全生成断面積と全崩壊幅

| $\lambda_{SC}^{(11)}$ | 全生成断面積 (pb) | 全崩壊幅 (MeV) |
|-----------------------|-------------|------------|
| 0.01 | 0.057 | 1.6 |
| 0.025 | 0.35 | 10 |
| 0.05 | 1.4 | 40 |

$$\frac{\Gamma(\Phi_{SC}^{(11)} \rightarrow e^+ d)}{\Gamma(\Phi_{SC}^{(11)} \rightarrow all)} = \frac{\Gamma(\Phi_{SC}^{(11)} \rightarrow \bar{v} u)}{\Gamma(\Phi_{SC}^{(11)} \rightarrow all)} = \frac{1}{2}, \quad (7)$$

となる。ここで $\Phi_{SC}^{(ij)}$ の全生成断面積の大きさは、重心系でのエネルギーの2乗を S とすると、崩壊幅が小さい近似のもとで

$$\sigma(e^+ q \rightarrow \Phi_{SC}^{(ij)}) = \frac{\pi}{2S} \lambda_{SC}^{(ij)2} q (m_\phi^2/S), \quad (8)$$

となる。ここで $q(m_\phi^2/S)$ は陽子内部でのクォーク分布関数^[16]である。また、全崩壊幅は、

$$\Gamma_{SC}^{(ij)} = \frac{\lambda_{SC}^{(ij)2}}{4\pi} m_\phi, \quad (9)$$

である。HERA 実験では図2、図3に示すように $\Phi_{SC}^{(11)}$ が生成されると予測される。HERA 実験では $\sqrt{S}=300$ GeV であり、レプトクォークの質量を探索可能な上限値近傍の値として $m_\phi=200$ GeV^[17] とすると、このとき d クォークの分布関数は、 $d(0.44)=0.083$ となる。 $\Phi_{SC}^{(11)}$ の全生成断面積と全崩壊幅の値を表4にまとめた。また、陽子内部には海クォークとして s クォークと b クォークも存在するので、 $\Phi_{SC}^{(12)}$ と $\Phi_{SC}^{(13)}$ も生成される可能性がある。以下の解析では(5)式の湯川結合定数を

$$\lambda_{SC}^{(ij)} = \lambda_{SC}, \quad (10)$$

と仮定する。このとき3種類のレプトクォークの質量をすべて同じ200 GeVとした場合、HERA 実験での生成断面積の比は、

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{sea}(e^+ s \rightarrow \Phi_{SC}^{(12)})}{\sigma_{val+sea}(e^+ d \rightarrow \Phi_{SC}^{(11)})} &\approx 0.02, \\ \frac{\sigma_{sea}(e^+ b \rightarrow \Phi_{SC}^{(13)})}{\sigma_{val+sea}(e^+ d \rightarrow \Phi_{SC}^{(11)})} &\approx 0.01, \end{aligned} \quad (11)$$

となる。この場合、生成されるレプトクォークはほとんどが $\Phi_{SC}^{(11)}$ である。これらのレプトクォークの種類の識別は、それぞれの終状態で判断することができる。

5. まとめ

我々はプレオン模型からその存在が予言されるレプトクォーク粒子の生成・崩壊過程を検討した。現在進行している実験では $\Phi_{SC}^{(11)}$ が HERA における e^+P 衝突実験でのみ生成可能であることがわかった。このときの、中性カレント相互作用と荷電カレント相互作用の事象の比は1になる。今後の HERA における高輝度実験により発見が期待されるが、より高エネルギー領域でのレプトクォーク探索のためには、その生成過程が限定されてい

ることから LHC においても e^+P と e^-P の衝突実験を実行することが望まれる。表 2 にまとめたハイパー色一重項複合ボソン $\Phi_{SS}^{(ij)}(\Phi_{CC}^{(ij)})$ は $e^+e^-(P\bar{P})$ チャンネルで LEP II, JLC (TEVATRON) 実験により生成されることが期待される。今後これらの束縛状態についての生成・崩壊過程の検討を行う予定である。

参考文献

- [1] See for a review, R. N. Mohapatra, *Unification and Supersymmetry*, (Springer-Verlag, New York, 1986).
- [2] H. Georgi and S. L. Glashow, Phys. Rev. Lett. **32** (1974), 438.
- [3] C. Adloff et al., Z. Phys. **C74** (1997), 191.
- [4] J. Breitweg, et al., Z. Phys. **C74** (1997), 207.
- [5] H1 and ZEUS Collaboration, B. Straub, Summary talk given at *XVIII International Symposium on Lepton Photon Interactions*, Hamburg, July 28–August 1, 1997.
- [6] H1 and ZEUS Collaboration, U. F. Katz, Summary talk given at *Minerva-G. I. F Gentner Symposium on From Elementary Particles to Complex Systems*, Jerusalem, May 25–28, 1998.
- [7] See for example, G. Altarelli et al., Nucl. Phys. **B506** (1997), 3.
G. Altarelli, G. F. Giudice, M. L. Mangano, Nucl. Phys. **B506** (1997), 29.
J. L. Hewett and T. G. Rizzo, Phys. Rev. **D56** (1997), 5709; and the references therein.
- T. Kon and T. Kobayashi, Phys. Lett. **B409** (1997), 265.
- T. Kon, T. Matsushita and T. Kobayashi, Mod. Phys. Lett. **A12** (1997), 3143.
- [8] K. Akama, K. Katsuura and H. Terazawa, Phys. Rev. **D56** (1997), R2490.
- M. Yasué, Preprint TOKAI-HEP/TH-9701 (1997), hep-ph/9707312.
- Z. Xiao, Preprint RAL-97-043 (1997), hep-ph/9709324.
- [9] M. Sekiguchi, H. Wada and S. Ishida, Prog. Theor. Phys. **99** (1998), 707.
- [10] S. Ishida and M. Sekiguchi, Prog. Theor. Phys. **86** (1991), 491.
- [11] J. C. Pati and A. Salam, Phys. Rev. **D10** (1974), 275.
K. Matumoto, Prog. Theor. Phys. **52** (1974), 1973.
- [12] H. Terazawa, Y. Chikashige and K. Akama, Phys. Rev. **D15** (1977), 480.
- [13] M. Sekiguchi, H. Wada and S. Ishida, Prog. Theor. Phys. **96** (1996), 623.
- [14] See for example, S. Coleman, *Aspects of Symmetry* (Cambridge University Press, Cambridge, 1985), p. 351.
- [15] M. Suzuki, Phys. Rev. **D37** (1988), 210.
K. Akama and T. Hattori, Phys. Rev. **D39** (1989), 1992.
- [16] M. Glück, E. Reya and A. Vogt, Z. Phys. **C67** (1995), 433;
C53 (1992) 127.
- [17] R. J. Cashmore et al., Phys. Rep. **122** (1985), 275.