



単純ゲージ群に基づくクォーク・レプトンの統一複合模型

香山, 喜彦

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1984-03-31

(Date of Publication)

2008-10-28

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲0455

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1000455>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



| | |
|---------|----------------------------|
| 氏名・（本籍） | か 香 山 喜 彦 （大阪府） |
| 学位の種類 | 学 術 博 士 |
| 学位記番号 | 学博い第26号 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第5条第1項該当 |
| 学位授与の日付 | 昭和59年3月31日 |
| 学位論文題目 | 単純ゲージ群に基づくクォーク・レプトンの統一複合模型 |

| | | | |
|---------|-------|-----------|------------|
| 審 査 委 員 | 主査 教授 | 位 田 正 邦 | |
| | 教授 | 永 井 旺 二 郎 | 教授 小早川 惠 三 |
| | 教授 | 宮 垣 盛 男 | |

論 文 内 容 の 要 旨

弱い相互作用と電磁相互作用を統一した Glashow - Salam - Weinberg $SU_L(2) \otimes U_Y(1)$ ゲージ理論は、量子色力学とともに、現在我々の知りうるエネルギー領域（数百 GeV 以下）での実験結果を非常によく説明する。しかし、理論内に多くの不定パラメータを含むため、それに対応した物理量は計算不可能である。よって、この理論を越えた、より強い予言能力をもつ理論を追求しなければならない。その試みの中で、“統一ゲージ模型”と“物質場の複合模型”は、二つの大きな流れであり、前者の最大の成果が“大統一理論”である。

大統一理論は、クォーク・レプトン間のゲージ相互作用を単純ゲージ群により統一したもので、代表的な模型に、 $SU(5)$ 、 $SO(10)$ などがある。この理論では統一ゲージ群 G_{GUT} のくりこみ可能性により、クォーク・レプトンの世代構造が G_{GUT} の anomaly free な表現として解釈でき、電荷の量子化も自然に導かれる。また、Baryon asymmetry を説明する可能性もある。ゲージ相互作用が統一されるエネルギー Λ_{GUT} は $\sim 10^{15}$ GeV と非常に大きく、究極理論の基本的なエネルギーの大きさと考えられる Planck mass $\Lambda_{Pl} \sim 10^{19}$ GeV に近い。このように、究極理論への足がかりを与えたという意味からも、大統一理論の果たした役割は重大なものと言えよう。しかし、この理論にも多くの問題点がある。中でも“クォーク・レプトンの世代のくり返し”と、Higgs 粒子の存在に関係した“hierarchy 問題”は、大統一理論の枠内では解決できないものであった。ここで hierarchy 問題とは、現実的な理論とするために必要となる、非常に異なった energy scale を、その理論の枠内で自然に導けるかどうかである。大統一理論では、 Λ_{GUT} と、 $SU_L(2) \otimes U_Y(1)$ 対称性が破れる $\Lambda_W \sim 10^2$ GeV が問題と

なる。

一方、クォーク・レプトンを複合粒子と考える模型は、早くから考えられていたが、複合系を作る機構については、不明瞭なものであった。これに対し、'tHooft は、基本構成子（プレオン）を結びつける力も、量子色力学と同様な非可換ゲージ理論で解釈しようと試みた。しかし、加速器実験による結果は、クォーク・レプトンの大きさの逆数、つまり、プレオンを結びつけている力の大きさが、それらの質量よりも、はるかに大きくならなければならないことを示している。そこで、彼は、プレオンからクォーク・レプトンが生成される時、プレオンのカイラル対称性は破れず、クォーク・レプトンのカイラル対称性に移行することを要請した。しかし、それはプレオンを結びつける非可換ゲージ相互作用に、同じ非可換ゲージ相互作用に基づく量子色力学とは、非常に異なった性質を仮定していることになる。

クォーク・レプトンの複合模型（プレオン模型）を考察する理由は、クォーク・レプトンを複合粒子とみなすことによって、世代のくり返しが理解できると考えられること、それに、hierarchy 問題の原因であった Higgs 粒子も同時に複合粒子として作りえるので、この問題も解決できる可能性を持っていることがあげられる。この模型に、さらに大統一理論の長所が加われば、内部対称性を統一した理論として、最も理想的なものになると考えられる。そこで、我々は、複合模型に統一ゲージ理論の考え方を導入することによりプレオン間のゲージ相互作用を統一した“統一複合模型”を考察する。

まず、§ 2 では、プレオンを結びつける非可換ゲージ相互作用（Hypercolor）によって、クォーク・レプトンが生成される際、カイラル対称性が破れないための条件を、簡単な模型と量子色力学を対比させることにより追求する。その結果、Hypercolor ゲージ群のプレオン表現がカイラルな表現でなければならないことが推測される。また、カイラル対称性の保存から導かれる 't Hooft の anomaly 方程式について説明し、クォーク・レプトンのプレオン構造にも触れる。

次に、§ 3 で主題である統一複合模型を考察する。§ § 3-1 では、くりこみ群を用いて、相互作用の強さの変化により、統一複合模型の全体像を明らかにする。続いて、§ § 3-2 で、統一群を最も簡単な単純ゲージ群に制限した場合の模型の可能性を追求する。その際、必要な条件を付加することにより、SU(9) と SU(10) のゲージ群に基づく模型が得られた。しかし、§ 2 で導かれた Hypercolor 群のプレオン表現に対する条件により、SU(9) は排除され、SU(10) 模型のみが残る。この模型に対して、重要と考えられるカイラル対称性の anomaly 方程式を解くと、クォーク・レプトンの世代数として、 $N_g = 8$ を得るが、宇宙論での議論などから、この値は現実的でなく、問題が残されている。§ § 3-3 では、我々がここで採用した条件を再検討し、他の可能性として、これまでに提唱されている統一複合模型を紹介する。それによると、§ 2 で得た、プレオン表現の条件を満足する模型は、M. Ida の $SU(7) \otimes SU(7)$ と $SO(10) \otimes SO(10)$ 、及び我々の $SU(10)$ 模型のみである。

§ 4 では、hierarchy 問題を取りあげる。“'t Hooft の Naturalness” と呼ばれる概念を説明することによってこの問題の意味を明確にし、その解答としてこれまでに知られている“Supersymmetry の導入”と“Higgs 粒子の複合模型”の 2 つの方法について述べる。今のところ、これらの方法を用いて、統一複合模型での hierarchy 問題を解決することには成功していない。

最後に、§ 5で残された問題点を整理した上で、究極理論への展望を述べる。

論文審査の結果の要旨

電磁・弱相互作用に対するグラシヨウ・サラム・ワインバーグの標準理論は、その輝かしい成功にもかかわらず、理論的には必ずしも満足のゆくものではない。この欠点を除去する試みとしては、まず大統一理論 (GUT) をあげることができる。この理論は、強い相互作用も含めた力の統一を行うことによって、陽子崩壊の予言をはじめ、素粒子であるクォーク・レプトンの世界に対するより深い理解を可能にした。もう1つの試みは、クォーク・レプトンを複合粒子と考えることによって、理論の不定をなくそうとする複合模型のアプローチである。

しかし、大統一理論にはたくさんのパラメーターが残ること、クォーク・レプトンに見られる世代の理解が難しいことなどの問題があり、一方複合模型には模型を決めるための指導原理に欠けるといふ難点がある。本論文のテーマである統一複合模型は、この2つの考えを融合することによって、これらの困難を克服しようとする試みである。

本論文は、基本粒子間のすべてのゲージ相互作用を単純ゲージ群で規定することによって力の統一を行う、いわゆる複合GUTについて考察したものである。いくつかの物理的にもっともと思える条件を課すことによって、まずゲージ群がSU(9)およびSU(10)という2つの模型にしぼり、さらに基本粒子がとじこめ群に関して複素表現でなければならないという要請から前者を排除する。

こうして、唯一の可能性としてSU(10)が残り、右手中性微子がない場合のアノマリー方程式を解くことによって、世代数として8が得られた。宇宙初期でのヘリウム合成から決まっている中性微子の数(3または4)との食い違いについては、右手中性微子を導入すればさけられるが、この時世代数は決まらなくなることも示した。

本論文の後半では、大統一理論での相互作用のゲージ階層性を統一複合模型の立場から考察している。統一複合模型が生き残れるかどうかはこの問題の解決にかかっているが、本論文では世代数の問題とも関連して重力をも含めた究極理論による解決という方向を示唆している。

以上のように本論文は、統一複合模型という新しいアプローチにおいて、単純ゲージ群の場合について具体的な模型を見出し、その物理的現実性を検討した点で、素粒子物理学に寄与するところが大きい。

よって論文提出者香山喜彦は、学術博士の学位を得る資格があるものと認める。