標準モデルを超える新たな素粒子論

―　アインシュタインの夢　―

河野　誠公　著

はしがき

標準モデル(模型)における未解決問題は２つに大別できる。１つは、ゲージ群：$SU_C(3)\times SU_L(2)\times U_y(1)$ の形態の起源と各ゲージ群の保存電荷の由来に対する問題であり、１つは、このゲージ場と作用する物質場（レプトン場、クォーク場）の３世代の起源とその３世代を特徴付ける質量の階層構造の由来に対する問題である。

前者の問題は、３つのゲージ結合定数の統一と関係し、後者の問題は、１３個の湯川結合定数とスカラー場の真空期待値に関する定数と関係している。前者の問題に対しては、標準モデルのゲージ群を包含するより大きな対称群 SO(10) などを考えることで１つの解答を得ることができている。５つのヘリシティ状態から構成されるテンソル表現を考え、５つの内３つの状態をカラー量子数に、残りの２つの状態を $SU_L(2)\times U_y(1)$ 電弱量子数に割り付けることでカラー荷と電荷を定義する。しかしこれらの概念だけでは、後者の問題、すなわち物質場３世代の質量の階層構造に対する知見は得られない。

これらの未解決問題とは別に標準モデルでは重力場を扱うことができない。ゲージ場理論と重力場理論を統合する４つの力の統一という大きな課題がある。一方で (2n+2)次元のスピノール表現では、n が偶数の次元では整数スピンを持つボソン場を、n が奇数の次元では半整数スピンを持つフェルミオン場を特徴付ける表現を与えることが知られる。

本書では、標準モデルの上記２つの未解決問題を解消しつつ、かつ多くの成果を収めた標準モデルを包含する新たな素粒子論を提案する。高次元スピノールで表現される素粒子場と４次元時空間の対称性に基づく新たな素粒子像を描く。高次元スピノール表現を用いると標準モデルでは扱えなかった重力場もごく自然に構成することができ、４つの力を統一するいわゆる究極的統一理論に自然な形で到達する可能性を秘めている。

(2n+2)次元スピノール表現で与えられるベクトルゲージ場の正準量子化の延長上で重力ゲージ場の量子化を展開すると、この過程で物質２重項場

の交換作用において新たな保存量が交換できる可能性が見つかる。この新たに発見した保存量を「質量チャージ」と呼ぶことにする。
一方で n ＝ 1, 3, 5 奇数次の (2n+2)次元スピノール表現を用いて物質場 3 世代の階層構造を構成すると、各世代の物質場（クォーク場とレプトン場）はそれぞれ固有の「質量チャージ」を保有することが導かれる。電子の質量もしくはトップクォークの質量を基準にとると、全てのクォークと荷電レプトンの質量を湯川結合定数を用いることなく特定できることを見る。更にはクォーク 3 世代混合、ニュートリノ振動現象と各世代間の「質量チャージ」の交換とを結びつけると、質量チャージとその交換確率からそれぞれの混合角を求めることができることを見る。

本書は 3 部構成とした。第 I 部では、(2n+2)次元のスピノール表現を持つ粒子場と 4 次元時空間の対称性に基づく新たな素粒子像を描く。n= 1, 3, 5 の奇数のとき物質場となるフェルミオンを与え、n= 0, 2, 4 の偶数のときスカラー場を含むボソンを与える。各素粒子はそれらの器となる 4 次元時空間を有効作用空間とすることで、4 次元ローレンツ不変な自由（量子）場を得る。

第Ⅱ部の前半では (2n+2)次元スピノール表現で与えられる 4 次元ローレンツ不変な量子自由場の正準量子化を行う。各種のゲージ変換を不変にする相互作用項を、共変微分を用いて統一的に表現しラグランジアン密度を構成する。この統一的表現に基づく重力ゲージ場のラグランジアン密度から Einstein 重力場のラグランジアン密度が、古典的近似として導かれることを確認する。この過程において、重力定数と 3 つのゲージ結合定数の大きなスケールの差の由来の手掛かりを得る。

第Ⅱ部の後半ではゲージ場特有の問題となるゲージ条件に依存しない量子化の方法（BRS 変換）を扱う。非可換ゲージ場の延長上で、重力ゲージ場を構成するスピン接続とアフィン接続の量子化を行うとそれらの真空構造が見えてくる。その構造から 2 つの接続ゲージ場のゲージ位相に拘束条件が生じ、物質場の交換作用において新たな保存量「質量チャージ」を交換できることを発見する。

第Ⅲ部前半では、この「質量チャージ」を用いて荷電レプトンと 3 世代クォークの質量の特定を試みる。レプトンとクォーク 3 世代各質量項を「質量チャージ」を用いた表現で具体的に構成し、電子の質量チャージとの比をとることで各素粒子の質量を得る。クォークにおいては測定データベー

スと計測精度の範囲内でほぼ一致し、荷電レプトンでは数%程度質量が大きい方へずれることを見る。この荷電レプトンでのずれに対してはニュートリノ振動の影響を考慮することで解消できる可能性を見る。

第Ⅲ部後半では、「質量チャージ」を用いてクォークとニュートリノの3世代混合行列を求める。世代混合(遷移)は遷移前後の素粒子の持つ「固有の質量チャージ」の交換を意味するものと考え、「質量チャージ」の交換に基づく遷移確率を導入し世代混合行列要素を表現する。高い実験精度で混合行列が得られているクォーク世代混合に対し適用することにより、質量素チャージの交換確率が交換する質量素チャージの総個数の逆数となっていることを見る。ニュートリノ世代混合では第Ⅲ部前半で行なった荷電レプトンの質量補正の逆作業を行うことで混合行列に対する制約条件を加えることができ、ほぼ純粋にニュートリノ世代混合行列を得ることができる。

本書をまとめている段階で分かったことだが、得られた3つの混合角（$\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$）は最新のT2K実験（$\theta_{13}$測定）結果を含めかなり良い一致が見られ、質量チャージの発見と第Ⅲ部で行なった質量チャージによる3世代クォークと荷電レプトンの質量の特定、ニュートリノ振動を利用した荷電レプトンの質量補正、世代混合と質量チャージの交換との関係付け等々の正当性が示されたものと思われる。

この第Ⅲ部での成果は延いては第Ⅰ部及び第Ⅱ部における理論展開の正当性の後ろ盾となるものと考え得る。すなわち、高次元スピノールで表現される素粒子場と4次元時空間の対称性に基づく新たな素粒子像、具体的には $n = 1, 3, 5$ 奇数次の $(2n+2)$次元スピノール表現を用いた物質場3世代の階層構造、$n = 0, 2, 4$ 偶数次の $(2n+2)$次元スピノール表現を用いたスカラー場（Higgs場）、電弱ゲージ場、色ベクトルゲージ場及び重力ゲージ場の構成とそれらの4次元時空間上への射影表現及びそれらの量子化の正当性を裏付け、重力場を含めた4つの力の統一理論に大きく踏み込めたものと考える。

2013年10月

河野　誠公

目　　次

第Ⅲ部（前半） レプトン，クォーク３世代の質量の起源

第Ⅲ部（後半） クォーク，レプトン世代混合の起源

第Ⅰ部　スピノール場（素粒子場）の構成と対称性

　第Ⅰ部では、スピノール粒子場（フェルミオン及びボソン）と４次元時空間の対称性に基づく新たな素粒子像を描く。

　真空にスピノール生成子（超対称性生成子）を作用させることにより、より高次元でより大きなスピンを持つスピノール粒子場を構成する。(2n+2)次元のスピノール表現を持つ各粒子場はそのスピノール次元に則した対称性を備える。

n= 1, 3, 5 の奇数のとき物質場となるフェルミオンを与え、n= 0, 2, 4 の偶数のときスカラー場（Higgs 場）を含むボソンを与える。

各素粒子はそれらの器となる４次元時空間を有効作用空間とすることで、４次元ローレンツ不変な自由（量子）場を得る。ここでは、群の関係性：SU(2)×SU(2) = SO(4) が重要な役割を担うことになる。

　第１章ではスピノール代数と超対称代数を簡単に復習しておく。第２章から第６章でスカラー場、物質場、ベクトルボソン場及び計量場へと積み木を積み重ねるように１つずつより大きなスピンを持つ素粒子を構成し、各場の持つ対称性を確認する。

第３章の物質場の構成では、ディラック場の表現では区別できないクォークとレプトン、更には第１世代から第３世代物質場を区別した表現が可能となる。この物質場の階層構造においてカラー対称性が重要な役割を担う。

第４章では、生成子が作用する真空（スカラー場）のヘリシティ状態の違い（スカラー場の SU(2) 対称性の破れとの関係性は第Ⅱ部で調べる）により中性及び荷電ベクトルボソンがそれぞれ構成される。

第５章では色ベクトル場（グルーオン）を構成する。カラー対称性を持つベクトルボソンは前章で構成したベクトルボソンと同じスピノール次元では構成できず、次章の計量場と同じ次元が必要となる。色ベクトル場のカラー対称性とクォーク／レプトンのカラー対称性とが強く関係する。

最後に第６章にて計量場を構成する。計量場ではカラー対称性は中性だが、斉次ローレンツ群の表現とカラー対称性との関係性を色ベクトル場の延長上で持たせると、ベクトル型のスピン接続と反対称テンソル型のアフィン接続とで計量場が構成される可能性が生まれる。第Ⅱ部の統一場の構成と量子化の中で議論を深める。

目　次