新たな量子重力理論と質量素荷

－　3 世代物質粒子とハドロンの質量起源　－

河野　誠公　著

はしがき

相対性原理により、空間だけでなく時間も絶対的なものではなく各慣性系に固有の時間が存在することが結論付けられる。この相対性原理を加速度運動する座標系へ拡張させると、重力加速度が働く重力源（天体）の近くでは、時間間隔が変化し空間も伸縮することが導かれる。時空間は従来の平坦なユークリッド幾何学では記述できず、ゆがんだ曲面の幾何学による記述が必要となる。アインシュタインは、曲面上での座標変換に対し不変となる曲率テンソルを用いて重力方程式を導いた。(1915 年）ところが、このアインシュタインの重力理論では、物質との重力相互作用において、短距離の極限で生じる量子ゆらぎに起因する発散が回避できず量子化が困難と考えられている。

本書では、量子ゆらぎの回避を試みる代表的な２つの量子重力理論であるループ量子重力理論と超弦理論にて展開される議論を文献(2),(4)を参考に確認し、先に執筆した「標準モデルを超える新たな素粒子論」[6), 7)] にて提案したスピノール表現に基づき構成される量子計量場の発散積分に対するくりこみ可能性を議論する。この量子計量場の構成の特性上生じる２つの接続ゲージ場のゲージ位相差により、物質粒子３世代の質量の階層構造を与える新たな素荷（チャージ）「質量素荷」が構成される。この質量素荷を用いることにより、これまで全く説明ができないと考えられていた３世代の６つのクォークと３世代レプトン（μ,τ 粒子）の各質量が特定できることを見る。更に、クォーク，ニュートリノ各３世代間でのこの質量素荷の交換を考えることにより、それぞれの３世代混合現象における混合角がそれぞれ特定できること、クォークの複合粒子である中間子とバリオンに適用することによりそれらの各質量が特定でき、やはりこれまで十分な説明が困難であった軽いクォークとバリオン質量との大きな質量差も定量的に高い精度で説明できることを見る。

本書は２部構成とした。第Ｉ部では、量子重力理論の量子化（くりこみ可能性）に焦点を当てる。第１章では、先ずアインシュタインの重力方程式の導出までを振り返り、第２章にてアインシュタインの重力理論では、

量子ゆらぎに起因する発散積分が回避できない論拠をくりこみ可能な有効場理論（量子電磁理論（QED）を含む標準モデル）と対比し確認する。2-3 節では、この量子ゆらぎに起因する発散を回避するループ量子重力理論と超弦理論のアプローチ方法と課題をそれぞれ確認しておく。第３章では、スピノール表現を用いて既知の全ての素粒子が構成できることを示す。この素粒子の構成では真空や素粒子の元となるスピノール（回転子）が複数個のヘリシティの組合せ状態で表現されることを前提としている。[6), 7)] 3-6 節では、このスピノール表現を用いて構成された計量場と 2-3 節の 2 つの量子重力理論とを比較する。真空の扱い（視点）を変えると、それぞれ類似した構造が見えてくる。第４章では、先ず 2 つの接続で構成される計量場の正準量子化を演算子法により行う。この量子化された量子計量場のラグランジアン密度より、その古典的近似としてアインシュタイン重力場が導かれることを示す。[6), 7)] この量子計量場のラグランジアン密度は、2 つの接続ゲージ場のラグランジアン密度の和で与えられるため、その Feynman 図では計量テンソルの微分項を直接扱う必要がなく、くりこみ可能な有効場理論と同様な扱いが可能となる。従い、量子ゆらぎに起因する発散積分は「くりこみ処方」を適用することにより回避される。最後に 4-4 節では、天文学的に小さな結合定数である重力定数が、２つの接続ゲージ場間のエネルギー密度のスケーリング変換を含む結合定数として解釈できることを示す。

第Ⅱ部では、新たな量子数「質量素荷」が構成され、それを用いて物質粒子の質量が特定できることを示す。 第５章では、計量場に対し経路積分法による量子化である BRS 変換を行う。すると、2 つの接続ゲージ場のゲージ位相の関係式が導かれる。この位相差と重力相互作用において物質２重項場が交換するヘリシティとの合成により、新たな素荷（チャージ）「質量素荷」が構成される。[6), 7)] 第６章では、この「質量素荷」を用いて 3 世代のクォークとレプトン２重項の質量表現を導き、結合定数を用いることなく各質量が特定できることを示す。[6), 7), 8)] 第７章ではクォーク 3 世代混合とニュートリノ振動現象へ適用する。それぞれの世代混合は、3 世代の各クォークまたはニュートリノがそれぞれ保有する「質量素荷」を交換する現象として統一的に説明が可能であり、それぞれの混合角が質量素荷を用いて定義された交換確率振幅により特定できることを示す。[6), 7), 8)] 最後に第８章では、クォークの複合粒子であるハドロンの質量に適用する。

π，K 中間子と核子，Λ粒子を構成するクォークが保有する「質量チャージ」を用いてそれぞれの質量表現を導き、各質量が高い精度で特定できることを示す。[17)]

本書は、先に執筆した「標準モデルを超える新たな素粒子論」の議論の中で量子計量場の領域に焦点を当て、従来の重力理論における量子ゆらぎに起因する発散の議論を踏まえた上で、スピノール表現に基づく量子計量場のくりこみ可能性を議論した。真空と素粒子に対して複数個のヘリシティの組合せ状態を仮定することにより、物質粒子では 3 世代のクォークとレプトンが、ボソンではスカラー場（Higgs 粒子），ベクトル粒子（光子，W ボソン，グルーオン）及び２つの接続ゲージ場から成る計量場が自然な形で構成されるだけでなく、スピンや電荷，カラー荷といった各素粒子を特徴付ける量子数も自然な形で定義することができる。更に、量子計量場の構成の特性により新たに構成された量子数「質量素荷」により、3 世代のクォークとレプトンを特徴付ける各質量が特定されるだけでなく、クォークの複合粒子であるハドロンの各質量も高い精度で特定できることから、複数個のヘリシティの組合せ状態で表現される各素粒子の描像、物質粒子が交換するヘリシティの組み合わせで定義される「質量素荷」を含む各種量子数の正当性が示されたものと考える。ベクトルゲージ相互作用と重力相互作用の統合だけでなく、全ての素粒子と全ての相互作用を統一的に表現する究極の統一理論に向けて大きく前進できたものと確信する。

2018 年 11 月

河野　誠公

目　　次

第Ｉ部　くりこみ可能な量子重力理論

第１章　時空の対称性とアインシュタイン重力場

１－１．相対性原理とローレンツ変換 [1), 2)]

経験則である相対性原理に従うと、全ての自然法則はあらゆる慣性基準系において同一である。すなわち、自然法則を表わす方程式は、1 つの慣性基準系から他の慣性基準系への座標変換に対して不変である。
一方、物質粒子間の相互作用は、相互作用している粒子の座標の関数として表され、相互作用は瞬時に行われるとの仮定が暗に含まれていた。ところが、経験的に瞬時に行われる相互作用は存在せず、ある有限の時間が必要であることを知っている。相互作用する 2 つの物体間の距離をその有限の時間間隔で割ったものを相互作用の伝播速度とよぶ。この伝播速度は、相互作用の最大の伝播速度とよばれるべきもので、相対性原理により全ての慣性基準系において同一でなければならない。よって、この伝播速度は普遍定数であり真空中を光が伝わる速度、すなわち光速度と考えられている。[1)]

相対性原理には従うが、相互作用の伝播は瞬時に行われるとしたガリレイの相対性原理と区別して、相対性原理と相互作用の伝播速度である光速度の有限性とを結びつけたものをアインシュタインの相対性原理とよぶ。

古典力学では空間は相対的だが時間は絶対的なものとして扱われる。ところが、速度ベクトルの合成法則に従うと、合成運動の速度はそれを構成する運動の各速度のベクトル和となる。この法則は相互作用の伝播速度にも適用されるべきものなので、異なる慣性基準系では伝播速度が異なる値となってしまう。このことは、アインシュタインの相対性原理と完全に矛盾する。この問題は、Michelson による光速度の測定実験（1881 年）により、光の速度はその伝播方向に依存しないことが確認され、よって、アインシュタインの相対性原理が確認された。[1)]

アインシュタインの相対性原理により、時間も絶対的なものではなく、慣性基準系に固有の時間が存在することが結論付けられた。

（固有時間とローレンツ変換）[1)]

慣性基準系の中で、静止系に対して任意の運動をする時計を観測することを考える。静止系の時計で測った微小な時間間隔 dt の間に‘動いている時計’は、距離 $\sqrt{dx^2+dy^2+dz^2}$ だけ進むとする。‘動いている時計’の座標系 (x', y', z', t') ではこの時計自体は静止しているので、$dx'=dy'=dz'=0$ となる。長さの要素 ds の不変性により、

$$ds^2 = c^2\,dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2\,dt'^2 \qquad (1\text{-}1)$$

$$\therefore\ dt' = ds/c = 1/c\ \sqrt{c^2\,dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2}$$

ここで、‘動いている時計’の速度を υ とする。

$$\upsilon^2 = (dx^2 + dy^2 + dz^2)/dt^2 \qquad (1\text{-}2)$$

(1-1) 式へ代入すると、

$$dt' = ds/c = dt\ \sqrt{1-\upsilon^2/c^2}\ = dt\ \sqrt{1-\beta^2} \qquad (1\text{-}3)$$

ここに、$\beta \equiv \upsilon/c$

よって、‘静止している時計’が $t_2 - t_1$ だけ時間が経過する間に、‘動いている時計’が刻む時間の長さは、

$$t'_2 - t'_1 = \int_{t_1}^{t_2} dt\ \sqrt{1-\beta^2} \qquad (1\text{-}4)$$

この‘動いている時計’の示す時間を、この対象の固有時間という。

次に、互いに等速度で運動する座標系間の座標変換を考える。座標系 $K(x, y, z, t)$ から座標系 $K'(x', y', z', t')$ への変換を行う。簡単のため、K 系から見て K’系は x 軸の正方向に一定の速度 υ で運動しているものとする。古典力学ではこの問題は簡単に解けて、以下のガリレイ変換となる。

$$x' = x + \upsilon t,\quad y' = y,\quad z' = z,\quad t' = t \qquad (1\text{-}5)$$