

論文内容の要旨

論文題目

CP symmetry and lattice chiral gauge theories

(CP 対称性と
格子カイラルゲージ理論)

氏名 石橋 真人

現在、実験が行われているエネルギースケールでの素粒子の振る舞いを記述する標準模型は、SU(3)のゲージ群を持つ強い力の理論 QCD と SU(2)×U(1)のゲージ群を持つ電磁気力と弱い力を記述する理論であるワインバーグ・サラム理論からなっている。SU(3)やSU(2)のようなノンアーリアンの群をもつゲージ理論は、漸近的自由という現象が起こり、低エネルギーでは強結合の理論になり、通常の摂動論では解析ができない。

このような強結合領域でのゲージ理論を解析する方法として、現在最も成功しているのが、ユークリッド時空を格子上に切ってその上で理論を定義する格子ゲージ理論である。格子上で理論を定義し、また有限の時空を出発点とするため、紫外領域にも赤外領域にもエネルギーカットオフが入り、この理論は発散のない有限な理論になっている。この有限な理論において物理量を計算し、その物理量を有限に保つように、体積無限大の極限と連続極限をとることによって連続理論での物理量を得ることができる。また、この理論の最も重要な特徴は、統計力学系の解析で使われるのと同様な方法を使いながら、計算機によるゲージ理論の数値計算を可能にすることである。このような数値計算によって、摂動論では計算できない QCD の物理量、ハドロンやクォークの質量、クォークの閉じ込めのストリングテンションなどが計算され、その値は年々改善されている。

格子ゲージ理論では、ゲージ場については格子点と格子点を結ぶリンク上のリンク変数として、うまく格子化できるが、フェルミオンについては種の倍増という、格子上で定義された 1 つのフェルミオンが連続極限で 16 個に増えてしまうという現象により、その格子化には理論成立当初から問題があった。特に、質量のないフェルミオンを格子化することは困難であると考えられてきた。しかし、最近のドメインウォールフェルミオンに始まる格子上でのフェルミオンの取り扱いの進展により、格子上に質量のないフェルミオンをのせることが可能になった。この間、そのような質量のないフェルミオンを格子上で扱う方法として、フェルミオン行列式のオーバーラップフォーマリズムから導かれたオーバーラ

ップディラック演算子を用いる方法や、繰りこみ群のアプローチから導かれた固定点作用を用いる方法が提案された。これらのディラック演算子は、全く異なるアプローチから導かれているにも関わらず、どちらもギンスバーグ・ウィルソン関係式と呼ばれる関係式を満たす。さらに、この関係式を満たすディラック演算子をもつ作用は、変形された格子カイラル対称性をもつことがわかった。このような進展を踏まえて、カイラル対称性がその計算に重要な役割を果たすような物理量である CP の破れのパラメーターの数値計算も始められている。

標準模型の大きな特徴の一つは、その中のワインバーグ・サラム理論がカイラルゲージ理論であるということである。カイラルゲージ理論において、左巻きフェルミオンと右巻きフェルミオンは異なったゲージ群の表現に属している。カイラルゲージ理論における重要な現象はゲージアノマリーが現れるということである。ゲージアノマリーとは、古典的な理論にあったゲージ対称性が量子論において破れるという現象である。このゲージアノマリーが現れるかどうかは、理論が持っているゲージ群とフェルミオン多重項によって異なる。ゲージアノマリーが存在すると、S 行列のユニタリティーなどの重要な性質が成り立たなくなるため、その理論は意味のない理論になってしまう。そのため、アノマリーがキャンセルしている理論を構成しなければならない。摂動論においては、ファインマンダイアグラムの 1 ループレベルでアノマリーがない時には、摂動論のすべての次数でアノマリーが出ないことが示されているが、非摂動論的なレベルでアノマリーがないことを示すには、1 ループアノマリーキャンセレーション以上の条件が必要になるかもしれない。例えば、SU(2)の fundamental 表現に属する奇数個のフェルミオン多重項をもつカイラルゲージ理論は、摂動論的にはアノマリーのない理論であるが、非摂動論的に、ウィッテンアノマリーと呼ばれるアノマリーが現れ、理論として成り立たなくなる。

カイラルゲージ理論におけるもう一つの問題は、理論の正則化の問題である。ゲージアノマリーが現れるということから、ゲージ不変な正則化はカイラルフェルミオンの多重項がアノマリーフリーの時に限り可能である。言いかえると、ゲージ不変な正則化はフェルミオンの属するゲージ群の表現に直接関係しているべきである。この意味では、よく使われる正則化の方法、例えば、次元正則化、パウリ・ビラース法などは、カイラルゲージ理論の解析においてあまり便利でないかもしれない。もし、より良いゲージ不変な正則化法が確立されるならば、電弱力が働く素粒子の系での輻射補正の計算が簡単になるかもしれない。

格子ゲージ理論における最近の進展は、正確なゲージ不変性を持つ格子上での非摂動論的なカイラルゲージ理論の構成への道を開いた。リュッシュャーによって定式化されたこの格子カイラルゲージ理論において、有限格子時空上でアノマリーフリーな U(1)カイラルゲージ理論や無限格子時空上におけるワインバーグサラム理論の構成が行われており、また格子上でのウィッテンアノマリーの解析もなされている。さらに、摂動論的にアノマリーのないゲージ群とフェルミオン多重項をもつカイラルゲージ理論がゲージ不変性を破ることなしに格子上で定式化された。このような格子上でのカイラルゲージ理論の構成によって、標準模型の数値計算、例えば、有限温度での電弱相転移の解析などが将来的に可能になるかもしれない。また、この構成は、強結合領域でのカイラルゲージ理論の理解を深めるだろう。

ところが、ハーゼンフラッツによって、この定式化におけるカイラルフェルミオンの作用が、CP 変換の下で不変でないことが指摘された。CP 変換は粒子と反粒子を交換する変換であるが、このギンスバーグ・ウィルソン演算子を用いた定式化において、粒子のカイラル射影演算子と反粒子のカイラル射影演算子が連続理論とは異なり基本的には非対称であることから、このようなことが起こってしまう。CP 対称性は、カイラルゲージ理論において基本的な離散的対称性であるので、格子上の理論でも保たれていることが期待される。標準模型においては、CP 対称性はカビボ・小林・益川行列の位相によってだけ破れており、この CP の破れは標準模型の格子での解析に影響を及ぼすかもしれない。このため、この定

式化における CP 対称性の破れを詳細に調べるのは大変重要である。

このような背景、動機のもとでこの学位論文では格子カイラルゲージ理論における CP 対称性の破れを詳細に調べた。はじめに、格子カイラルゲージ理論のリュッシャーの定式化についてレビューした。その後で、ハーゼンフラッツの解析において使われた射影演算子をかなり一般的な演算子へ拡張し、それを用いることによって、カイラルフェルミオンの作用の CP 対称性の破れを調べた。その結果、CP 対称性を保つ作用は存在するが、そのとき作用は非局所的になるか、またはフェルミオンの種の倍増が起きてしまうことがわかった。このことにより作用の CP 対称性の破れは演算子の局所性や、フェルミオンの種の倍増などの現象と関係していることが明らかになった。次に、具体的な計算を可能にするカイラル射影演算子を使いながら、フェルミオン生成汎関数の計算を行い、量子論レベルでの CP 対称性の破れの解析を行った。その結果、次のことが示された。この格子カイラルゲージ理論において CP 対称性の破れは 3 箇所にだけ存在する。一つ目は、フェルミオン生成汎関数にかかる定数位相因子。二つ目は、フェルミオン生成汎関数にかかる次元のある定数因子。三つ目は、外線にあらわれるフェルミオンプロパゲーター、または湯川結合を含んだカイラルゲージ理論を考えるとときには、湯川頂点に結びついたプロパゲーターである。最初の二つの破れは、トポロジカルセクターにだけ依存し、トポロジカルセクターが足し上げられる時に、それぞれのセクターにかかるトポロジカルウェイトに吸収できると考えられる。しかし、最後のフェルミオンプロパゲーターにおける CP 対称性の破れは取り除くことができない。この破れは、ヒッグズ場が期待値を持たないときには、局所的な項であるが、ヒッグズ場が期待値を持つ時には、非局所的になってしまう。湯川結合を含んだカイラルゲージ理論の解析においては、議論を簡単にするため、湯川結合を摂動論的に扱ったが、これを非摂動論的に扱う時にもこの非局所的な破れは残ると思われる。しかし、この格子カイラルゲージ理論に残る、これらの局所的な、または非局所的な CP 対称性の破れは、素朴には適切な連続極限をとることにより消えると思われる。ただし、はっきりとしたことを言うためには、さらなる解析が必要であるだろう。

補遺において、格子カイラルゲージの基本を簡単にまとめた。