

氏名	吉岡興一
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2173号
学位授与の日付	平成12年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Infrared Fixed Point Physics (赤外固定点上の現象論)

論文調査委員 (主査) 教授 九後太一 教授 川合光 助教授 畑浩之

論文内容の要旨

1970年代に標準理論が確立されて以来、この理論の枠組みで説明できないような実験結果は今も見出されていない。しかし、標準理論は自由なパラメータを数多く含み、これらを任意に調節することによって観測量を再現しているのが現状である。この問題に対してこれまで主に行われてきたアプローチは、フレーバー対称性等に代表されるように、高エネルギー領域でより高い対称性を課すことにより低エネルギーの構造を決定することであった。しかしこの方法では、ある一つの低エネルギー物理を導く数多くの可能性が存在し、しかもそれらを区別することは難しい問題となる。一方、これとは逆方向のアプローチとして、理論の赤外固定点を利用する方法がある。固定点とは、繰り込み群方程式のベータ関数がゼロであるということであり、理論に含まれる結合定数の間に繰り込み群不変な関係式が満たされていることを意味する。このような固定点上の理論の持つ最も興味深い特徴は、高エネルギー領域の詳細に全くよらずにその物理が決定されることにある。我々の住んでいる世界が赤外固定点上にあると考えるならば、フェルミオンの質量等の現象論的量は、背後の理論によらず動的に決定される可能性がある。申請者はこの赤外固定点の方法を応用し、フェルミオンの質量行列の決定や、ニュートリノの物理、超対称性の破れのパラメータ、ヒッグスポテンシャルの問題等の解析を行った。

赤外固定点を用いた解析において、とくに重要となるのが固定点への収束性である。すなわち、固定点の構造を現象論的に応用するためには、その理論が低エネルギー領域で実際に固定点上に収束している必要がある。しかし、標準模型のような漸近的自由なゲージ理論はこのような性質を持っていない。申請者は初めに、参考論文1において、この問題を改善する方法として、漸近的非自由なゲージ理論では固定点への収束性が非常に強く、低エネルギー領域での湯川結合定数は、そのinput値に依らずゲージ結合定数により完全に決定されることを示した。これは、高エネルギー領域での大きなゲージ結合定数が繰り込み群を支配して収束性を向上させるためであり、擬固定点シナリオにおけるトップ湯川結合定数と同じ役割を果たしている。この強い収束性の応用として具体的に、超対称標準模型にベクトルの世代を加えた模型を考察した。この模型はゲージ群が全て漸近的非自由となる最も単純な拡張である。主論文において、湯川結合定数の強収束性の性質から、この模型のフェルミオンの質量行列がどのように決定され得るのかを議論した。その結果、赤外固定点によるアプローチはフレーバー対称性による方法等と同様、可能な質量行列を模索する上で一つの強力な方法となることを明らかにした。

さらに、統一理論におけるゲージ対称性を用いることによって、赤外固定点の構造からは決定されないレプトンの質量行列も議論できる。そこで、SO(10)統一理論を具体的に構築して、とくにニュートリノ部分の解析を行った。その結果、標準模型の3世代ニュートリノを超えてさらに1つのニュートリノが自然に軽く残り、Superkamiokande等の実験から示唆されるレプトンの大混合角を統一理論の枠組みで矛盾なく説明することを見いだした。さらに、この模型は宇宙論からの要請であるdark matterの候補としての軽いニュートリノも与えていることを明らかにした。また一方で、右手型ニュートリノの存在は湯川結合定数の繰り込み群に影響を及ぼし、この効果によって超対称標準模型は実験から示唆される中間スケールでのシーソー機構と相入れないことが知られている。申請者は、漸近的非自由な理論のように湯川結合定数が非常に速く赤

外固定点へ収束していくモデルにおいてはこの問題が生じないことを示した。

次元をもつ結合定数についても同様に赤外固定点への収束性や安定性の議論が行える。具体的に上述のモデルを例にとり、超対称性を破るパラメーターについて固定点の構造を解析した。収束性の程度を表す量を解析的に求めて評価することにより、湯川結合定数と同じく、漸近的非自由なモデルでは収束性が非常に強くなる事を明らかにした。この事実を応用すると様々な低エネルギーの現象論的特徴が見いだせる。主論文においては、ヒッグスポテンシャルの構造を調べることによって、標準模型の $SU(3)_c \times U(1)_{em}$ ゲージ群が破れないことを、赤外固定点への収束性の良さが保証していることを明らかにした。また、その振る舞いは漸近的自由な理論の擬固定点シナリオと、漸近的非自由な理論の固定点シナリオでは大きく異なっていることを見いだした。ヒッグスポテンシャルへのこのようなアプローチは、大統一理論における対称性の破れの問題等に有力な手段となり得ると考えられる。

論文審査の結果の要旨

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 群に基づく素粒子の標準理論は、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用のすべてを記述する理論として1970年代に確立し、現在までこの理論に矛盾する実験結果は見出されていない。しかし、標準理論には自由なパラメータが数多く存在し、これらを決定する論理は理論に含まれてはいない。この問題に対する従来の主たるアプローチは、大統一理論に代表されるように、高エネルギー領域でより高い対称性を課し低エネルギーの構造を決定することであった。一方、これとは逆方向のアプローチとして、理論の赤外固定点を利用する方法がある。固定点とは、繰り込み群方程式のベータ関数がゼロであるということであり、理論に含まれる結合定数の間に繰り込み群不変な関係式が満たされていることを意味する。このような固定点上の理論の持つ最も興味深い特徴は、高エネルギー領域の詳細に全くよらずにその物理が決定されることにある。申請者は、申請論文において、我々の住んでいる世界が赤外固定点上にあるという可能性を考察し、それを実現するモデルを構成して、フェルミオンの質量行列の決定や、ニュートリノの物理、超対称性の破れのパラメータ、ヒッグスポテンシャルの問題等の解析を行った。

赤外固定点の構造を現象論的に応用するためには、その理論が低エネルギー領域で実際に固定点上に収束している必要がある。しかし、標準模型のような漸近的自由なゲージ理論はこのような性質を持っていない。申請者は初めに、参考論文1において、この問題を改善する方法として、漸近的非自由なゲージ理論を提唱し、そこでは固定点への収束性が非常に強く、低エネルギー領域での湯川結合定数は、そのinput値に依らずゲージ結合定数により完全に決定されることを示した。これは、高エネルギー領域での大きなゲージ結合定数が繰り込み群を支配して収束性を向上させるためである。

申請者は主論文において、この強い収束性の応用として具体的に、超対称標準模型にベクトルの世代を加えたモデルを構成し、湯川結合定数の強収束性の性質から、この模型のフェルミオンの質量行列がどのように決定され得るのかを議論した。その結果、赤外固定点によるアプローチはフレーバー対称性による方法等と同様、可能な質量行列を模索する上で一つの強力な方法となることを明らかにした。さらに、統一理論におけるゲージ対称性を用いることによって、赤外固定点の構造からは決定されないレプトンの質量行列も議論できる。そこで、 $SO(10)$ 統一理論を具体的に構築して、とくにニュートリノ部分の解析を行った。その結果、標準模型の3世代ニュートリノを超えてさらに1つのニュートリノが自然に軽く残り、Superkamiokande等の実験から示唆されるレプトンの大混合角を統一理論の枠組みで矛盾なく説明できることを見いだした。さらに、この模型は宇宙論からの要請であるdark matterの候補としての軽いニュートリノも与えていることを明らかにした。また一方で、右手型ニュートリノの存在は湯川結合定数の繰り込み群に影響を及ぼし、この効果によって超対称標準模型は実験から示唆される中間スケールでのシーソー機構と相入れないことが知られている。申請者は、漸近的非自由な理論のように湯川結合定数が非常に速く赤外固定点へ収束していくモデルにおいてはこの問題が生じないことを指摘した。

次元をもつ結合定数についても同様に赤外固定点への収束性や安定性の議論が行える。申請者は、具体的な模型として上述のモデルを例にとり、超対称性を破るパラメーターについて固定点の構造を解析した。収束性の程度を表す量を解析的に求めて評価することにより、湯川結合定数と同じく、漸近的非自由なモデルでは収束性が非常に強くなる事を明らかにした。この事実を応用すると様々な低エネルギーの現象論的特徴が見いだせる。主論文においては、ヒッグスポテンシャルの構造を調べることによって、標準模型の $SU(3)_c \times U(1)_{em}$ ゲージ群が破れないことを、赤外固定点への収束性の良さが保証していることを明らかにした。また、その振る舞いは漸近的自由な理論の擬固定点シナリオと、漸近的非自由な理論の固定点シナ

リオでは大きく異なっており、ヒッグスポテンシャルへのこのようなアプローチは、大統一理論における対称性の破れの問題等にも有力な手段となり得ると考えられる。

以上のように申請者は、われわれの世界が赤外固定点の上にあるという考え方が種々な現象論的事実を説明する可能性があることを具体的なモデル構築を通して明らかにした。よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

平成 12 年 1 月 19 日、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。