

氏 名	野 口 達 也
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2439 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 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	余剰次元と赤外固定点を利用した質量階層性の研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 九 後 太 一 教 授 川 合 光 助 教 授 野 尻 美 保 子

論 文 内 容 の 要 旨

申請論文は「余剰次元」と「赤外固定点」という二つの新しいアイデアを用いて、素粒子（クォークやレプトン）の質量階層性を説明しようとする模型構築に取り組んだものである。

余剰次元模型とはわれわれの観測する4次元時空に加えて幾つかの余剰な内部次元があるという考え方の模型の総称であり、近年活発に研究されている。高次元時空の存在は超弦理論や近年発見された弦理論の双対性などから部分的に示唆されるものであり、現実の世界を記述する可能性をもっている。通常の4次元理論の場合にはゲージ結合定数のエネルギー依存性は対数的であるが、ゲージ場やフェルミオンが余剰次元を伝播する余剰次元模型ではその余剰な空間に広がった場の無限個のカラースークラインモードが存在するために、くりこみ群方程式の形が変わり、エネルギースケールに関して巾乗的に依存することになる。4次元理論の場合には変化するエネルギースケールが、例えば大統一理論と電弱スケールとの差を考えるのであれば、 10^{14} 倍にも及ぶが、くりこみ群方程式の対数的な依存性のためにゲージ結合定数の変化は小さい。しかし、巾乗的な依存性がある場合には、わずかのエネルギースケールの変化に対しても結合定数は劇的に変化する。申請者は、この巾乗則を湯川結合定数に応用することで、フェルミオン質量階層性を実現する可能性を考えた。

しかしながら、このようにして模型を構成する場合には低エネルギーでのフェルミオン質量は、インプットパラメータであるカットオフスケールでのフェルミオン質量の値に強く依存する。従って、階層性を説明することはできても、さらにフェルミオンの質量の値そのものを議論することはできない。

そこで申請者は巾乗則に加えて、4次元理論で知られていくくりこみ群方程式の赤外固定点構造を利用することでこの問題の解決を試みた。すなわち、4次元の場合、ゲージ結合定数と湯川結合定数の比が低エネルギー領域である値（赤外固定点）に収束することが知られている。重要なことはその値が群論的な係数によって決定されるので、各結合定数のインプットパラメータの値によらずに低エネルギーでのフェルミオン質量を予言できることである。余剰次元模型にこれを応用すると、ゲージ結合定数と湯川結合定数の比にある種の因子を乗じた量が赤外固定点上である値に収束することがわかる。

申請者は申請論文において、このような道具立てを利用して、ゲージ場、ヒッグス場そして、クォークやレプトンのそれぞれが色々な余剰次元を伝播する模型を考えた。そして、最も一般的なくくりこみ群方程式の形を仮定し、その方程式系を解析し、階層性を実現する赤外固定点とそこへの収束の速さを調べた。その後、実際に階層性を実現するような場の配置、すなわち、どの場がどの次元に住んでいるかというパターン、が存在するかどうかを調べた。その結果、世代間の階層性を実現するためにはヒッグス場の異常次元が小さい必要があることを明らかにした。このことを実現するためにはさらに幾つかの仮定が必要であることを指摘したが、中でも最も単純なものは余剰次元空間運動量保存則の仮定で、これを仮定すると階層性を実現する様々な模型を構成することができることを示した。

しかしながら、考察している余剰次元模型では一般的には余剰次元空間運動量は保存しない。なぜなら、この系では、境界上でのみ定義された場（境界場）とバルク空間を伝播する場（バルク場）が存在し、境界場とバルク場の相互作用におい

ては、余剰次元方向に並進対称性が存在しないので、その方向の運動量保存則は成立しないのである。しかし、申請者が参考論文で先に指摘していた余剰次元模型における境界膜のゆらぎの効果を考慮すると、余剰次元運動量保存則が実効的にあらわれることを示した。また、膜の揺らぎの有無や境界場が様々な配置をとるときに、くりこみ群方程式の指数がどのように計算されるかを分類している。

このようにして実現された余剰次元運動量保存則を利用し、具体的なフェルミオンの空間配置にもとづいて湯川混合行列を計算した。特に、ある種の模型ではフェルミオンの質量階層性と微小混合角が赤外固定点上で同時に実現され得ることを明らかにしている。

論文審査の結果の要旨

素粒子物理学の基本的問題の一つにフェルミオンの質量階層性問題がある。これは、クォーク・レプトンの質量が世代間および世代内で大きく隔たっているという事実をどう説明するかという問題である。例えば、アップクォークの質量は数 MeV 程度であるのに対しトップクォークは 174 GeV であり、その比は実に 10^5 倍である。申請論文は「余剰次元」と「赤外固定点」という二つの新しいアイデアでこの問題に取り組んだものである。

超弦理論の最近の進展により D-brane や Orientifold plane といった高次元膜の存在の重要性が認識され、これは、我々の住む 4 次元世界が実は、より高次元時空中での 3 次元膜であるという新しい可能性を示唆する事となった。余剰次元模型とは、必ずしも弦模型に基づかずとも、我々の世界をこのような高次元中の膜と捉えるアイデアに基づく模型の総称であり、近年活発に研究されている。通常の 4 次元理論の場合にはゲージ結合定数のエネルギー依存性は対数的であるが、ゲージ場やフェルミオンが余剰次元を伝播する余剰次元模型ではその余剰空間に広がった場の無限個のカルーツァークラインモードが存在するために、エネルギースケールに関して巾乗的に依存することになる。4 次元理論の場合には変化するエネルギースケールが大きくと、くりこみ群方程式の対数的な依存性のためにゲージ結合定数の変化は小さい。しかし、巾乗的な依存性がある場合には、わずかのエネルギースケールの変化に対しても結合定数は劇的に変化する。申請者は、この巾乗則を湯川結合定数に応用することで、フェルミオン質量階層性を実現する可能性を考えた。

しかしながら、このようにして模型を構成する場合には低エネルギーでのフェルミオン質量は、インプットパラメータであるカットオフスケールでのフェルミオン質量の値に強く依存する。従って、階層性を説明することはできても、さらにフェルミオンの質量の値そのものを議論することはできない。

そこで申請者は巾乗則に加えて、4 次元理論で知られていたりくりこみ群方程式の赤外固定点構造を利用することでこの問題の解決を試みた。すなわち、4 次元の場合、ゲージ結合定数と湯川結合定数の比が低エネルギー領域である値（赤外固定点）に収束することが知られている。重要なことはその値が群論的な係数によって決定されるので、各結合定数のインプットパラメータの値によらずに低エネルギーでのフェルミオン質量を予言できることである。余剰次元模型にこれを応用すると、ゲージ結合定数と湯川結合定数の比にある種の因子を乗じた量が赤外固定点上である値に収束することがわかる。

申請者は申請論文において、このような道具立てを利用して、ゲージ場、ヒッグス場そして、クォークやレプトンのそれぞれが色々な余剰次元を伝播する模型を考えた。そして、最も一般的なくくりこみ群方程式の形を仮定し、その方程式系を解析し、階層性を実現する赤外固定点とそこへの収束の速さを調べた。その後、実際に階層性を実現するような場の配置、すなわち、どの場がどの次元に住んでいるかというパターン、が存在するかどうかを調べた。その結果、世代間の階層性を実現するためにはヒッグス場の異常次元が小さい必要があることを明らかにした。このことを実現するためにはさらに幾つかの仮定が必要であることを指摘したが、中でも最も単純なものは余剰次元空間運動量保存則の仮定で、これを仮定すると階層性を実現する様々な模型を構成することができることを示した。

しかしながら、考察している余剰次元模型では一般的には余剰次元空間運動量は保存しない。なぜなら、この系では、境界上でのみ定義された場（境界場）とバルク空間を伝播する場（バルク場）が存在し、境界場とバルク場の相互作用においては、余剰次元方向に並進対称性が存在しないので、その方向の運動量保存則は成立しないからである。しかし、申請者が参考論文で先に指摘していた余剰次元模型における境界膜のゆらぎの効果を考慮すると、余剰次元運動量保存則が実効的にあらわれることを示した。また、膜の揺らぎの有無や境界場が様々な配置をとるときに、くりこみ群方程式の指数がどの

ように計算されるかを分類している。

申請者はこのようにして実現された余剰次元運動量保存則を利用し、具体的なフェルミオンの空間配置にもとづいて湯川混合行列を計算した。特に、フェルミオンの質量階層性と小さな混合角が低エネルギー領域の赤外固定点上で同時に実現され得るある種の模型を構成することに成功しており、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。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。