氏　　　名	青　山　龍　美（あお　やま　たつ　み）
学位の種類	博　士（理　学）
学位記番号	理　博　第 2693 号
学位授与の日付	平成 15 年 5 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	Realization of supersymmetry on the lattice via overlap formula （オーバーラップ形式に基づく格子上の超対称性の実現）
論文調査委員	（主　査）教　授　九　後　太　一　　教　授　川　合　　光　　教　授　中　村　卓　史

論　文　内　容　の　要　旨

格子上のカイラル対称性に関する理解は近年著しく進展している。この発展の鍵となるのはDirac演算子に対するGinsparg-Wilson関係式と，その下での作用が持つある厳密な対称性である。Lüscherによって示されたこの対称性は，古典連続極限でのカイラル変換に帰着し，その意味で格子上のカイラル対称性と呼ばれる。

NarayananとNeubergerにより提唱されたOverlap formulaは，Ginsparg-Wilson関係式を満たす局所的でゲージ共変なDirac演算子を具体的に構成する一つ方法を与えており，彼らのOverlap Dirac演算子に基づくフェルミオン場の理論はwell-definedな格子正則化になっている。申請者の主論文は，このような性質を持つOverlap formulaを拡張して，超対称性を持つ理論に適用する試みを行なっている。具体的には超対称性の多重項であるchiral multipletをOverlap formulaを用いて格子上に構成した。

超対称性は，素粒子の現象論的観点からは，もしそれが理論に存在すれば，階層性問題を解決し得るといった好ましい点を持っている。（階層性問題とは，弱・電磁相互作用のエネルギースケールと大統一理論のスケールが16桁も違い，その大きな比がどうして安定になるのかという問題である。）しかし一方，我々の低エネルギースケールでは超対称性は明らかに実現しておらず，自然な見方としては何らかの動力学的な機構によってある特徴的なスケールで自発的に破れていると考えられる。故に超対称性を持つ理論の理解には破れの機構の把握が不可欠となる。このテーマに関してはいくつかのアイデアに基づきモデルが提案され議論されているが，完全な議論のためには非摂動論的なアプローチが必要である。格子上の場の理論は非摂動論的な取り扱いの可能な理論構成であり，超対称性に対してそのような方法論を提供すると期待されるものである。

しかしながら，超対称性の代数は空間並進の生成子を含み，これは格子に離散化された空間の上ではwell-definedではない。代数を尊重する差分化を試みると，理論が極めて非局所的になることが知られている。別の立場としては，超対称性の多重項の各成分を組として扱い，これらに対する超対称変換の変換則を定義するというアプローチがある。代数そのものは連続極限で回復すると期待する。このような構成法では，フェルミオン場（特にカイラルな場）を格子の上で扱う必要が出てくる。この点に関しては，この申請論文ではOverlap formulaの方法を適用して議論を行なった。

申請者は，結果として得られたchiral multipletの格子上の作用が，その成分場のボソン場とフェルミオン場を混合する格子上の超対称変換に対して実際に対称性を明白に保っていることを示している。これに加えて，理論は$U(1)\times U(1)_R$対称性を持っていることがわかる。これはOverlap formulaが示す格子上の厳密なカイラル対称性を反映したものであり，Wilsonフェルミオンなどのカイラル対称性を自明に破る構成法を用いた場合などに比べて，この方法の大きな利点となっている。一方，この論文で与えた構成法は相互作用を含まない自由な理論のみを扱っている。自由場の場合のカイラル多重項の連続的な空間を格子に離散化する際のもう一つの問題点として，差分演算子が積に関する分配則（Leibniz則）を満たさないことが挙げられるが，このために超対称性を明白に保ったまま相互作用項を導入することは困難である。この点を克

服する可能性についても申請者は最終章で議論を与えている。

論文審査の結果の要旨

素粒子論において，弱・電磁相互作用のエネルギースケールと，それらがさらに強い相互作用と大統一されるスケールとが16桁も違うが，その大きな比がどうして輻射補正に対して安定にとどまるのかという問題が，階層性問題と呼ばれる。これに対する一つの有力な考え方が，超対称性である。超対称性があれば，輻射補正は小さく，莫大な階層性が安定にとどまる。しかし一方，我々の低エネルギースケールでは超対称性は明らかに実現しておらず，自然な見方としては何らかのダイナミカルな機構によってある特徴的なスケールで自発的に破られていると考えられる。このため超対称性を持つ理論の理解には破れの機構の把握が不可分となる。このテーマに関してはいくつかのアイデアに基づきモデルが提案され議論されているが，完全な議論のためには非摂動論的なアプローチが必要である。

格子上の場の理論はそのような非摂動論的取り扱いを可能にする理論構成であり，超対称性に対してもそのような方法論を提供すると期待される。しかしながら，超対称性の代数は空間並進の生成子を含み，これは格子に離散化された空間の上ではwell-definedではない。代数を尊重する差分化を試みると，理論が極めて非局所的になることが知られている。別の立場としては，超対称性の多重項の各成分を組として扱い，これらに対する超対称変換の変換則を定義するというアプローチがある。代数そのものは連続極限で回復すると期待する。このような構成法では，フェルミオン場（特にカイラルな場）を格子の上で扱う必要が出てくる。

格子上のカイラル対称性に関しては，近年著しく理解が進展した。この発展の鍵となったのはDirac演算子に対するGinsparg-Wilson関係式と，その下での作用が持つある厳密な対称性である。Lüscherによって示されたこの対称性は，古典連続極限で通常のカイラル変換に帰着するので，格子上のカイラル対称性である。さらにNarayananとNeubergerにより提唱されたOverlap formulaは，Ginsparg-Wilson関係式を満たす局所的ゲージ共変なDirac演算子を具体的に構成する一つの方法を与えており，彼らのOverlap Dirac演算子に基づくフェルミオン場の理論はwell-definedな格子正則化になっている。

申請者は申請論文において，このような性質を持つOverlap formulaを拡張し，超対称性を持つ理論に適用する試みを行なった。具体的には超対称性の多重項であるchiral multipletの作用をOverlap formulaを用いて格子上に構成した。申請者は，結果として得られたchiral multipletの格子上の作用が，その成分場のボゾン場とフェルミオン場を混合する格子上の超対称変換に対して実際に対称性を持つことを示した。さらに加えて，理論が$U(1)\times U(1)_R$対称性を持っていることも示した。これはOverlap formulaが示す格子上の厳密なカイラル対称性を反映したものであり，Wilsonフェルミオンなどのカイラル対称性を自明に破る構成法を用いた場合などに比べて，この方法の大きな利点となっている。

連続的な空間を格子に離散化する際のもう一つの問題点として，差分演算子が積に関する分配則（Leibniz則）を満たさないことがあり，そのために超対称性を明白に保ったまま相互作用項を導入することは難しい。申請者は，この点を克服する可能性についても最終章で議論をしているが，この論文の主な部分は相互作用を含まない自由場の場合のみを扱っている。しかし自由場の場合とはいえ，ボソン場とカイラルフェルミオン場の間の超対称性の明白な格子上の理論を構成することに成功しており，今後の発展の基礎を与えるものである。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。

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。