

別紙 4

| | | | |
|------|---|---|---|
| 報告番号 | ※ | 第 | 号 |
|------|---|---|---|

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Perturbative quantities from lattice formulations

(格子場の理論に基づく摂動的な物理量の計算)

氏 名 中山 勝政

論 文 内 容 の 要 旨

素粒子物理学における格子場の理論に基づく数値計算は、ハドロン質量の計算などに代表されるように、摂動的な枠組みを超えて非摂動的な領域における物理を正しく記述できる一つの手法として発展してきた。低エネルギー領域において強結合である量子色力学は、格子場の理論を用いて非摂動的な寄与を計算する方法が成功している理論の良い例だといえる。一方で、格子正則化による場の理論の定式化には、空間を離散化する近似を原因とした物理的性質の破れや系統誤差が付きまとう。そのため、この破れや誤差をよりよく理解するための研究がなされている。

申請者は、このような近年の研究と計算機の発展を背景にして、摂動的な領域に対しても格子場の理論に基づく数値計算を利用するという研究を行った。物理的性質の破れや系統誤差を十分小さく抑えつつ高いエネルギー領域で数値計算を行い、対応する摂動計算や実験結果と比べることで、量子色力学が矛盾なく素粒子の振る舞いを記述していることを精査できる。具体的には、摂動計算に対して格子場の理論を利用することで、摂動的な記述に現れる強結合定数やクォーク質量などのパラメーターを精度よく決定できる。これらの摂動的なパラメーターの精度は、ヒッグスの分岐比などを含む様々な観測量に対する理論予測の精度に直接的に寄与する。

この学位論文では、素粒子標準模型に含まれる量子色力学に対して格子計算を適用し、二種類の摂動的物理量を研究した。一つ目はチャーモニウム相関関数の近距離からくる寄与で構成されるモーメントと呼ばれる量であり、摂動的にも実験的にも決定できる物理量になっている。低エネルギーに対応する遠距離の計算結果からは非摂動的な物理量として中間子の質量が得られる一方で、近距離の寄与を主にして構成されるモーメントは摂動的な展開が十分に有効であり、クォーク質量と強結合定数が得られる。申請者は

格子計算で得られたベクトルカレントのモーメントを実験結果と直接的に比較し、格子計算が実験を再現していることを確認したうえで、より一般的な系統誤差の見積もりを用いてチャームクォーク質量を1%の誤差で決定した。

二つ目として、量子色力学のフェルミオンとゲージとの相互作用を記述するディラック演算子の固有値密度に着目した。ゼロに近い固有値領域は低いエネルギー領域であり、非摂動的な量であるカイラル凝縮とも関連している。申請者はより高い固有値領域に着目し、摂動計算と格子計算とを比較して強結合定数を決定した。また、固有値密度の摂動的な領域はフェルミオンの格子定式化における近似を原因とした大きな離散化誤差を含むため、従来知られている定式化に含まれるパラメータを一般化することで誤差を低減した。

上記二つは強結合定数の次数にして三次の摂動計算がなされているが、共通してなお摂動展開の打ち切り誤差が最も支配的な系統誤差の原因となっていることがわかる。ディラック固有値密度に関する研究では、くりこみ点を適切に選択することでこの誤差を低減できることを示した。

さらに、量子色力学に対する数値計算の他に、超対称性を持つ量子力学系を用いて格子化を用いた定式化の異なる記述方法を研究した。一般の次元においてテンソルネットワーク表現として研究されているこの表現を利用し、モンテカルロ法では符号問題によって効率的な計算が行えない摂動的な領域のエネルギーを正しく計算できることを確認した。この表現は低次元において非常に効率の良い計算手法を与え、格子化の影響や数値計算で使用されるアルゴリズムの性質を詳細に調べることができる。

以上のように、申請者は格子計算を摂動展開とともに利用することで、高い精度で物理量を決定できることや、定式化の拡張による離散化誤差の低減が摂動的な量の精度に寄与すること、符号問題が回避できることなどを数値的に示した。