

氏名(本籍)	なめ かわ ゆう すけ 滑川裕介(神奈川県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第3381号
学位授与年月日	平成16年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	物理学研究科
学位論文題目	<b>Light Hadron Spectroscopy in Two-Flavor Lattice QCD with Small Sea Quark Masses</b> (軽いクォーク領域の2フレーバー格子量子色力学によるハドロンスペクトルの研究)
主査	筑波大学教授 理学博士 石橋延幸
副査	筑波大学教授 理学博士 宇川彰
副査	筑波大学教授 理学博士 青木慎也
副査	筑波大学教授 理学博士 金谷和至

### 論文の内容の要旨

クォークは、現在確認されている物質の最も基本的な構成単位「素粒子」であり、陽子、中性子などのハドロンを構成している。しかし、クォーク間の強い結合のため通常クォークはハドロン内部に閉じ込められており、クォーク質量などの自然界の基本定数を直接実験で測定することができない。また、質量や大きさなどのハドロンの基本的性質も、クォークの力学を与える量子色力学(QCD)から解析的に計算することが難しい。これらの問題を解決する唯一の方法が格子場の理論に基づく量子色力学(格子QCD)である。

格子QCDでは、離散的な時空格子上にQCDを定式化し、格子間隔をゼロにする極限で連続時空中のQCDを定義する。格子間隔を有限にしておけば数値的計算が可能で、大規模シミュレーションが行われている。計算時間の大半はクォークの伝搬を表す巨大な行列の逆計算に費やされ、その計算量はクォーク質量に逆比例している。クォークが軽いと膨大な計算時間が要求され、現実の軽いクォークを直接シミュレーションすることができない。そのため、連続極限への外挿に加えて、クォーク質量を現実の軽いu, dクォークの質量に相当する数MeVまで外挿する「カイラル外挿」が必要である。ハドロンの性質やQCDの基本定数を研究するうえで、このカイラル外挿が現在最も大きな不定要因となっている。

本論文では、u, dクォークの対生成・対消滅の効果を取り入れた格子QCDシミュレーションが、クォーク質量の従来のシミュレーション範囲100~50MeVを大きく改善した65~13MeVで実行され、従来のカイラル外挿の精度が検証された。また、クォーク質量を小さくする上でのアルゴリズム上の問題も研究された。計算機資源の限界から、比較的粗い格子でシミュレーションが実行された。

この研究により、クォーク質量を小さくすると、逆行列計算で従来用いられてきたBiCGStab法に不安定性が発生することが指摘された。その対策として、改良されたBiCGStab(DS-L)法がテストされ、計算時間を増加させることなく安定性が劇的に改善されることが示された。また、モンテカルロ計算アルゴリズム自体にも不安定性が発生することが発見された。この問題はハイブリッド・モンテカルロ法における分子動力学発展のステップサイズを小さくすることで回避できることが示された。

クォーク質量が小さい領域の新たなハドロン質量データを加えて、カイラル外挿の再検討が行われた。新

しいデータは従来の二次式の外挿曲線から有意なずれを示しており、多項式によるフィットではより高次の項が必要との結論が得られた。また、ハドロンの性質のクォーク質量依存性について、QCDの有効理論であるカイラル摂動論の結果がしばしば格子データと比較されてきたが、従来の連続時空カイラル摂動論から導かれた理論式は、クォーク質量が30MeV程度以下のきわめて小さい領域でしか使えないことが示された。他方、格子クォークの特性を取り入れた格子カイラル摂動論の式も検討され、通常の格子シミュレーションが行われている重い領域も含めて、データをよく再現することが示された。

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文により、従来の重いクォーク領域からの多項式によるカイラル外挿では、ハドロン質量で10%程度、クォーク質量で10～20%程度の系統誤差があることが示唆された。また、格子QCDのカイラル外挿において、格子カイラル摂動論が有用であることが具体的に示された。これにより、細かい格子で格子カイラル摂動論を応用することで格子QCDの予言能力を飛躍的に高めることができると期待される。カイラル外挿の問題は格子QCDの中心的課題のひとつであり、その方法に明確な指針を与えたことは、QCD研究全体に大きな意義を持っている。

以上の観点から、本論文は水準の十分高い独創的研究といえる。

よって、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。