

氏名	ふか や ひでのり 深 谷 英 則
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2989 号
学位授与の日付	平成 18 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	Lattice QCD with fixed topology (トポロジーを固定した格子 QCD)

論文調査委員 (主査) 助教授 大野木哲也 教授 二宮正夫 教授 畑 浩之

### 論 文 内 容 の 要 旨

この論文は格子上のカイラル対称性をもつフェルミオン作用を用いた格子 QCD シミュレーションを念頭にとポロジを固定するゲージ作用の性質を詳細に調べたものである。またトポロジーを固定した QCD の応用として、 $\varepsilon$  領域での QCD の相関関数からのハドロンの低エネルギー定数の決定についての成果も報告している。

カイラル対称性は、低エネルギーのハドロン物理、宇宙初期における相転移などを研究する上で不可欠な性質であるが、時空間の場の値を離散的な格子点上に代表させる格子正則化により失われてしまう。この欠如は格子 QCD シミュレーションの精確さ、信頼性を損なう致命的欠陥であると言っても過言ではない。たとえば、Wilson の処方によるフェルミオン作用の定義 (Wilson fermion) では、カイラル対称性の破れによる加算的くりこみが必要なため、“massless” quark を扱うための bare quark 質量は“有限”にとらなければならない。しかもこの“massless”の定義自体、ダイナミカルに変化するあまいなものであり、「quark の質量はいくらか?」という基本的なことがらさえ複雑な理論計算、関数の外挿作業を要する。

ところが近年の研究で、Ginsparg-Wilson (GW) 関係式によるカイラル対称性の再定義により、格子理論においてもカイラル対称性を、連続理論と違う形で実現できるということが発見された。もちろんこの再定義は連続極限で元の定義と一致する。これにより、「massless quark」や、「カイラル相転移」はよく定義されたものになり、さらにはアノマリーや、トポロジカルチャージといった、カイラル対称性に特有の量子効果についても連続理論の性質が良く再現され、正しく評価できることが摂動論的に確かめられている。

しかし、非摂動的領域において、Ginsparg-Wilson 関係式を満たす Dirac 演算子である overlap Dirac 演算子は、いくつかの問題点をかかえている。それは全て、トポロジーの境界上で発生する。この境界上で、overlap 演算子はなめらかさを失い、局所性が保証されず、数値計算のコストも大幅に増大する。

学位申請論文では、これらの問題を解決する手法として、トポロジーを固定する作用を 2 つ提案し、実際に数値計算に応用することで、その効果を確認した。1 つ目は、Luescher のアドミッシビリティ条件を自動的に満たすゲージ作用、もう 1 つは カットオフスケールの負質量を持つ Wilson fermion 作用である。どちらの作用を用いても、

1. トポロジカルチャージの安定。
2. 物理量 (クォークポテンシャル) が従来の結果の連続極限と矛盾のない値であること。
3. overlap 演算子の近似の改善

という結果が得られた。

また、本論文ではトポロジーを固定した格子 QCD 計算の応用として、 $\varepsilon$  領域での QCD の研究を動的フェルミオン効果を見捨てるクエンチ近似において行い。カイラル摂動論との比較により、物理量 (パイオンの崩壊定数、カイラル凝縮) を抽出できることも示した。

## 論文審査の結果の要旨

現在、動的フェルミオン効果の入った格子 QCD の非摂動的計算は、フレーバー物理などの素粒子現象論、および有限温度 QCD 相転移などのハドロン物理における最重要課題のひとつである。従来の格子フェルミオン作用を用いたシミュレーションは始まっているが、有限格子間隔におけるカイラル対称性の破れが大きな不定性となり、本質的な進歩を妨げている。

近年発見された Overlap フェルミオン作用は有限格子間隔で厳密なカイラル対称性をもつ優れた作用でその応用が待たれている。

しかし、格子化による artifact, 具体的には有限格子上での量子揺らぎによってゲージ場が滑らかでない配位をとるときにフェルミオン作用は ill-defined になりかつ数値計算コストが爆発的に増大する。このため、Overlap フェルミオンの応用がなかなか進まない状況にある。

本研究は、格子ゲージ場の作用を改良することにより、Overlap フェルミオンの問題を解決する新しい提案を与えるものである。本研究で示された新しい作用の結果は近い将来の Overlap フェルミオンの full QCD の研究に大きく貢献できる可能性をしめすものと言える。

また、クエンチ近似におけるクエンチ近似での  $\epsilon$  領域の QCD の研究は、カイラル摂動論の低エネルギー係数の精密な決定方法を与えた。ここで提案された切断近似の伝播関数の手法は先行する研究にもとづく低エネルギー係数の決定精度を格段に向上させるもので、将来の fullQCD が可能になったときにも有用な優れたアイデアにもとづく研究成果である。

よって本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。