

学位論文要旨

Study of the Schrödinger functional scheme for the Möbius domain wall fermion

(メビウスドメインウォールフェルミオンを用いたシュレーディンガー汎関数法の研究)

村上 祐子

量子色力学(QCD)の目的のひとつは、陽子や中性子に代表されるハドロンの構造を、素粒子であるクォークとグルーオンの複合粒子として、理論的に説明することである。QCDにおいて、クォークとグルーオンの間にはたらく相互作用の強さはエネルギースケールに対して敏感であり、高エネルギー領域や短距離では相互作用の強さが小さくなる「漸近自由性」と呼ばれる性質がある。高エネルギー物理においてはQCDの摂動論による解析が成功を収めた。一方、低エネルギー領域や長距離では相互作用の強さが大きくなり、QCDの摂動論による解析は破綻する。低エネルギーQCDでは、クォークとグルーオンの複合粒子であるハドロンの安定状態であるが、この性質をQCDの摂動論で解析することは不可能である。QCDの低エネルギー物理現象を分析するために非摂動的な手法が必要とされている。格子QCD(LQCD)はQCDの非摂動的定義であり、有限格子空間において離散的な時空間におけるゲージ対称性を伴って構成されている。このため、LQCDは第一原理数値計算が可能な定式化となり、QCDに対するスーパーコンピュータを使った非摂動的な解析が可能となる。

カイラル対称性はQCDにおけるハドロンの物理や低エネルギー物理において重要な役割を果たす。QCDにおけるハドロンの物理や低エネルギー物理を取り扱うために、我々にはLQCDによる数値計算が必要である。そのためLQCDにおけるカイラル対称性は必要不可欠である。しかしながら、ニールセン・二宮の定理により、LQCDではカイラル対称性を持つディラックフェルミオンの構成が不可能なことが証明されている。このため、LQCDでカイラル対称性に基づく物理を解析することは一般に困難であった。この問題は連続理論におけるカイラル対称性を格子場の理論における修正カイラル対称性へと拡張することによって解決された。この修正カイラル対称性は格子カイラル対称性と呼ばれ、格子カイラル対称性を保持する格子フェルミオンは格子カイラルフェルミオンと呼ばれる。メビウスドメインウォールフェルミオン(MDWF)は格子カイラルフェルミオンの一つである。

LQCDは連続時空を格子化して場の量子論に現れる紫外発散を正則化したものである。したがって、LQCDにおいても連続場のQCDと同様に理論のくりこみが必要である。LQCDでは非摂動的くりこみを適用するのが好ましい。シュレーディンガー汎関数法(SF法)は非摂動的くりこみ法の一つであり、格子カイラル対称性を持たないウィルソンタイプのフェルミオンに対する適用が成功している。格子カイラルフェルミオンに対するSF法は今後の研究のために重要ではあるが、その構成は注意深く行わな

ればならない。その理由はSF法におけるフェルミオン演算子に対して特別な時間境界条件を課すためである。

SF法における時間境界条件は格子カイラル対称性を実現させるギンツパーグ・ウィルソン関係(GW関係)を破ってしまう。SF法におけるカイラルフェルミオンを定義するために、GW関係を時間の中間部分では維持させつつ、時間境界では破るような境界条件をカイラルフェルミオン演算子の定義に導入することは非自明なことである。いくつかの解決法の一つとして、くりこみ群の普遍性の概念に基づく対称性を利用した場の理論的構成方法により、格子カイラルフェルミオンにSF法の時間境界条件を課す方法がある[1]。これまで、この普遍性の概念に基づいて、オーバーラップフェルミオンとドメインウォールフェルミオンに対するSF法が構成されている[1-4]。

2010年以降のコンピュータの高速化により、格子カイラルフェルミオンを用いたLQCDによるハドロン物理などの低エネルギーQCDの物理の計算が可能となってきた。実際には、先に述べたオーバーラップフェルミオンやドメインウォールフェルミオンは計算コストが高いため、より計算コストの低いメビウスドメインウォールフェルミオン (MDWF) が使われてきている。したがって、MDWFを用いた物理量の非摂動的なくりこみが必要となってきている。

公表論文[5]では、格子カイラルフェルミオン演算子を用いたSF法の構成におけるGW関係の議論から、MDWFに対するSF法の構成において必要な条件を理論的にまとめ、その議論に従う具体的表現を提示した。提案した手法を用いて、連続理論におけるSF法での演算子と我々の構成した格子上の演算子を摂動的に1ループレベルまでの近似で比較検証した。学位請求論文では、[5]の内容を詳細に掘り下げ、MDWFに対するSF法の演算子に対して普遍性の議論が要請する条件と、その実現について詳細に検討している。従来手法と比較して、本手法はLQCD特有の格子間隔による誤差を小さくできる可能性を明らかにした。この結果は、ハドロン物理の観測値の不定性をより小さくできると期待する。今後、格子カイラルフェルミオン、特にMDWFを使ったくりこみ定数の計算に適用したいと考えている。

参考文献

- [1] M. Lüscher, JHEP 0605, 042 (2006) [hep-lat/0603029].
- [2] S. Takeda, Nucl. Phys. B **796**, 402 (2008) [arXiv:0712.1469 [hep-lat]].
- [3] Y. Taniguchi, JHEP **0512**, 037 (2005) [hep-lat/0412024], JHEP **0610**, 027 (2006) [hep-lat/0604002].
- [4] S. Takeda, Phys. Rev. D **87**, no. 11, 114506 (2013) [arXiv:1010.3504 [hep-lat]].
- [5] Y. Murakami and K. I. Ishikawa, Int. J. Mod. Phys A, **33**, 1850012(2018).