

## 【若手研究(S)】

### 理工系 (数物系科学)



#### 研究課題名 厳密なカイラル対称性をもつ格子理論による 量子色力学のトポロジカルな真空構造の解明

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授 はしもと しょうじ  
橋本 省二

研究分野：数物系科学

キーワード：素粒子 (理論)

#### 【研究の背景・目的】

量子色力学 (QCD) は、強い相互作用の基礎理論としてすでに確立している。しかし、この理論を「解く」、すなわち固有状態を計算して導くことは、低エネルギーでの非摂動的性質のために未だに難しい問題である。その基本となる基底状態 (= 真空) の性質に関して、70年代にはトフーフトやウィッテン、グロスら、代表的な理論物理学者が、準古典近似や  $1/N_c$  展開 ( $N_c$  は色荷の数、 $=3$ ) を用いた解析を行ったが、実際の QCD に対する定量的な計算には至らなかった。ただし、ゲージ理論のトポロジーや量子異常が真空を決めるうえで重要な役割を果たすことが認識されるようになった。

QCD を非摂動的に扱うもっとも有効な手法は、格子ゲージ理論の数値シミュレーションによるもので、これまでにハドロンの質量や行列要素の計算などに威力を発揮してきた。しかし、この手法の大きな問題は、格子化の過程でカイラル対称性を壊してしまう点にあり (ニールセン・二宮の定理)、トポロジーや量子異常といったカイラル対称性が直接関係する性質に関して意味のある結果を得ることは難しかった。この問題を根本的に解決したのが ノイバーガーによるオーバーラップ・フェルミオンの提案(1998)であり、これによって量子異常を正しく反映しながら、厳密なカイラル対称性をもつ格子上のフェルミオンが構築された。

オーバーラップ・フェルミオンを数値シミュレーションにのせることは、その桁違いに大きい計算コストのためにその後にも困難な課題であったが、2006年、高エネルギー加速器研究機構に50テラフロップス級のスーパーコンピュータが設置されてようやく本格的なシミュレーションが可能になった。研究代表者らのグループは、厳密なカイラル対称性をもつ格子 QCD シミュレーションを世界で初めて実現し、物理量の計算に成果をあげつつある。このシミュレーションは、QCD のトポロジー構造を厳密に保つ初めてのもので、素粒子物理において70年代からの謎であった  $U(1)$  問題や Strong CP 問題といった QCD の真空構造にかかわる問題に、ようやく第一原理からせまることができるようになった。

本研究計画では、この研究をさらに発展させ、ゲージ場のトポロジカルな励起にともなうクォークゼロモードとカイラル凝縮の関係、フレーバー1重項の物理、QCD における南部ゴールドストーン粒子であるパイ中間子のループ効果の検証、トポロジーに関係する  $\theta$  真空の問題など、QCD 真空の

性質を、シミュレーションを通じて明らかにすることを旨とする。

#### 【研究の方法】

この研究では、大規模シミュレーションによって QCD 真空のデータを集めることが最初の課題となる。これまでに蓄積してきたデータを利用すると同時に、さらに詳細な解析のためにより大規模な格子でのシミュレーションも実行する。そのための計算アルゴリズムの改善も本研究計画の重要な課題である。

集まった QCD 真空のデータのもとでクォークがどのように振る舞うかを計算機上で“測定”する。このデータ解析では、クォーク固有モードの解析や、非連結クォークループの計算など、新しい手法を開発し積極的に取り入れていく。

#### 【期待される成果と意義】

QCD 真空はどうなっているのかという問いは、物質の質量がどうやって生まれたのかという根源的な問いに直結している。この問題に対してシミュレーションを使ってせまることができるようになった意義は大きい。この研究計画を通じて QCD 真空の様子とその帰結を多角的に理解することができる。

#### 【当該研究課題と関連の深い論文・著書】

- H. Fukaya et al. [JLQCD collaboration], “Two-flavor lattice QCD simulation in the epsilon-regime with exact chiral symmetry,” *Physical Review Letters*, 98, 172001 (2007).
- J. Noaki et al. [JLQCD and TWQCD collaborations], “Convergence of the chiral expansion in two-flavor lattice QCD,” *Physical Review Letters*, 101, 202004 (2008).

#### 【研究期間と研究経費】

平成21年度－25年度

50, 800千円

ホームページ等

<http://jlqcd.kek.jp/>

E-mail: shoji.hashimoto@kek.jp