

## 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

Study of the topological vacuum structure of  
Quantum Chromodynamics using the lattice field theory  
with exact chiral symmetry

橋本 省二 (HASHIMOTO SHOJI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授



### 研究の概要

カイラル対称性を厳密に保つ格子上のフェルミオン定式化を用いて量子色力学 (QCD) の数値シミュレーションを実行し、カイラル対称性の自発的破れなど、ゲージ場のトポロジカルな励起とそれに付随するクォークの低エネルギー固有モードが重要な役割を果たすと考えられている、量子色力学の真空の性質やその他の物理現象を研究する。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子色力学

### 1. 研究開始当初の背景

量子色力学 (QCD) は、強い相互作用の基礎理論として知られ、高エネルギー領域での素粒子反応を非常によく再現する。一方で、この理論を「解く」、すなわち真空状態から始まる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。

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。しかしながら、この手法の一つの弱点は、クォークのもつカイラル対称性を格子上で実現するのが難しい点にある。QCD の真空を特徴付けるもっとも重要な性質はカイラル対称性の自発的破れだが、これを数値シミュレーションで実証するのはそれほど簡単な問題ではない。

### 2. 研究の目的

本研究では、1998 年になって理論的な構成が知られるようになった、厳密なカイラル対称性をもつ格子フェルミオン定式化を用いて、カイラル対称性の自発的破れなど、QCD の基本的な性質を明らかにすることを目的とする。カイラル対称性の自発的破れには、ゲージ場のトポロジカルな励起とそれに付随する低エネルギー・フェルミオン固有状態が密接に関連していると考えられており、厳

密なカイラル対称性をもつ定式化を使った研究を行うことで、理論的なあいまいさを含まない解析が可能になる。研究代表者らが進めてきた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の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、トポロジーに関する $\theta$ 真空の問題、量子異常に伴うパイ中間子崩壊、有限温度相転移におけるトポロジー的励起の寄与など、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が、本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

本研究で中心となるのは、厳密なカイラル対称性をもつ格子定式化を使った量子色力学の大規模数値シミュレーションである。そこで得られるデータは、ゲージ場の真空をあらゆるゲージ配位と、その上でのクォークの低エネルギー固有モードである。特に後者は、カイラル対称性の自発的破れの起こる様子を反映していると考えられる。

これらのデータを利用して、上記にあげた物理量を計算する。特にクォークの低エネルギー固有モードのデータを利用することで、計算精度を向上させることができるだけでなく、それぞれの物理量とカイラル対称性の自発的破れとの関係を知ることができる。

#### 4. これまでの成果

平成 23 年度までの研究による大きな成果としては、クォークの低エネルギー固有モードの分布を解析することで、カイラル対称性の自発的破れをあらゆる秩序変数であるカイラル凝縮の値を精密に計算したことがあげられる。これは、他の定式化では非物理的な寄与を引き去る操作が必要となるため非常に困難だったものである。量子色力学の真空を特徴付けるもっとも重要な物理量であるカイラル凝縮を計算できたことは、量子色力学の研究のなかでも大きなインパクトをもつものである。

ゲージ場のトポロジカルな励起は、クォークの低エネルギー固有モードに反映され、さらに非連結クォーク・ループにも影響を与える。その影響がもっとも顕著に表れるのはフレーバー1 重項の  $\eta'$  中間子で、質量ゼロに近いパイ中間子に対して、非常に大きな質量をもつ。これを格子計算で再現することを目指した解析は、現在も進行中である。非連結クォーク・ループが面白い寄与をする物理量としては、他にも核子のストレンジクォーク成分があげられる。価クォークとしては存在しないストレンジクォークが核子内にどれだけ含まれているかという問題は、ある種のダークマターの検出効率にも関係する重要な課題である。この量の計算を行い、以前の格子計算に知られていた値とは矛盾し、一桁小さな結果を得た。さらに、以前の計算の問題点がどこにあったのかも明らかにすることができた。これも、厳密なカイラル対称性をもつ定式化によって初めて可能になった研究である。

パイ中間子のループ効果の検証を、これまで通常行われてきたパイ中間子の質量と崩壊定数だけでなく、カイラル凝縮やパイ中間子の形状因子についても行った。カイラル凝縮に対しては、クォーク質量の非常に小さなイブシロン領域でのデータが得られたおかげで、パイ中間子のループ効果を明確に判別することが可能になった。一方で、パイ中間子の形状因子に対しては、シミュレーションで取り扱うことのできるクォーク質量の領域ではパイ中間子のループ効果を確認することはできず、実験値も再現できないことがわかった。これは、カイラル有効理論の高次効果が重要になることを示唆しており、さらに小さなクォーク質量での精密計算を行うことが重要になる。

これら以外にも K 中間子の崩壊形状因子や、量子色力学の結合定数の精密決定、有限温度相転移におけるトポロジカルな励起の寄与などについても研究を進めており、一部は公表論文として発表している。

#### 5. 今後の計画

本研究計画を将来のさらに大きな研究につなげるためには、厳密な（あるいは非常によい）カイラル対称性を保った上で格段に高速なシミュレーションが可能になる定式化を開発することが重要になる。こうした理論的定式化やアルゴリズムの研究は当初の研究計画にも含まれていたものだが、今後は徐々にこのテーマに軸足を移していく方針である。

#### 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

- H. Fukaya, S. Aoki, T.W. Chiu, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, “Determination of the chiral condensate from QCD Dirac spectrum on the lattice,” *Physical Review D* 83, 074501 (2011).
- K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, “Nucleon strange quark content from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry,” *Physical Review D* 83, 114506 (2011).
- E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada, “Strong coupling constant from vacuum polarization functions in three-flavor lattice QCD with dynamical overlap fermions,” *Physical Review D* 82, 074505 (2010).
- H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, “Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD,” *Physical Review Letters* 104, 122002 (2010).
- S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, “Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry,” *Physical Review D* 80, 034508 (2009).

ホームページ等

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