

# 「格子ゲージ理論の大規模シミュレーションとその素粒子現象論への応用」平成22年度研究報告書

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 橋本省二

平成23年4月26日

## 1 研究組織

scqcd グループは KEK、大阪大、筑波大を主体とするグループで、「大型シミュレーション研究」の開始当初から、格子 QCD の大規模シミュレーションを通じて、素粒子物理学の非摂動的研究を行ってきた。対外的には JLQCD collaboration の名前で研究発表を行っている。メンバーは以下の通りである。

- 研究責任者

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

- 研究従事者

- 金児 隆志 (かねこ たかし)  
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 助教
- 山田 憲和 (やまだ のりかず)  
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 助教
- 松古 栄夫 (まつふる ひでお)  
高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター 助教
- 野秋 淳一 (のあき じゅんいち)  
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 研究員
- 池田 裕章 (いけだ ひろあき) 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科 D3
- 大野木 哲也 (おおのぎ てつや)  
大阪大学 理学研究科 教授
- 深谷 英則 (ふかや ひでのり)  
大阪大学 理学研究科 助教
- 新谷 栄悟 (しんたに えいご)  
Postdoctoral fellow, Riken Brookhaven Research Center
- 大木 洋 (おおき ひろし)  
名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 特任助教

- 武田 光平 (たけだ こうへい) 筑波大学大学院 D3
- 青木 慎也 (あおき しんや)  
筑波大学 物理学系 教授
- 宇川 彰 (うかわ あきら)  
筑波大学 副学長、教授
- 金谷 和至 (かなや かずゆき)  
筑波大学 物理学系 教授
- 石塚 成人 (いしづか なるひと)  
筑波大学 計算科学研究センター 准教授
- 吉江 友照 (よしえ ともてる)  
筑波大学 計算科学研究センター 准教授
- 蔵増 嘉伸 (くらまし よしのぶ)  
筑波大学 計算科学研究センター 准教授
- 谷口 祐介 (たにくち ゆうすけ)  
筑波大学 物理学系 助教
- 大川 正典 (おおかわ まさのり)  
広島大学大学院 理学研究科 教授
- 石川 健一 (いしかわ けんいち)  
広島大学大学院 理学研究科 准教授
- Ting-Wai Chiu  
National Taiwan University, Department of Physics, Professor
- 小川 兼司 (おがわ けんじ)  
National Taiwan University, postdoctoral fellow
- T.H. Hsieh  
Academia Sinica, Taiwan.

## 2 研究目標

自然界の強い相互作用は量子色力学 (QCD) という非常に簡潔な理論 (ゲージ場の量子論) で記述される。高エネルギーでの深非弾性散乱などのデータに見られるように、摂動的 QCD の予言は実験と精密に一致しており、QCD が強い相互作用の基礎理論であることに関して疑う余地はほとんどない。一方、低エネルギーでの QCD はその非摂動的な性質のために、解析的な手法では定量的な予言を与えるのが多くの場合に非常に困難である。例えば、物質の質量はそのほとんどがカイラル対称性の自発的破れによってもたらされると理解されているが、QCD を解くことでこれを示すことは未だに難しい問題である。

格子上に定義された QCD (以下では格子 QCD) は、QCD の非摂動的領域も含む構成的な定式化を与えているだけでなく、数値シミュレーションを使って非摂動的計算を行う手法を提供しており、計算機の急速な進歩にもなってハドロンの質量や行列要素など、様々な物理量の現実的な計算が可能になりつつあり、さまざまな系統誤差を正確に理解した上で信頼できる計算を行うことが課題となる。

これまでのほとんどの QCD シミュレーションは、カイラル対称性を格子上で壊すようなフェルミオン定式化を用いて行われてきた。カイラル対称性は、ゲージ対称性と並んで QCD のもっとも重要な対称性の一つであり、自発的対称性の破れによって物質の質量の源を与えるという、われわれの自然界の理解のためにも根元的な役割を果たしている。従来の格子 QCD シミュレーションでは、カイラル対称性を保つ定式化を使っていなかったため、カイラル対称性の自発的破れという興味深い現象を直接扱うことはできず、カイラル凝縮の計算など格子 QCD では計算困難と考えられていた物理量も数多い。

このような状況のなかで、本研究課題では厳密なカイラル対称性をもつフェルミオン定式化を用いた動的クォークシミュレーションを推進している。この研究によってカイラル対称性の自発的対称性の破れとそれに伴う現象にたいして、初めて理論的にクリーンなやり方でせまることができるようになった。対称性の破れの秩序変数であるカイラル凝縮の計算が可能になったのはその一例であり、対称性の破れとゲージ場のトポロジーの関係など、理論的にも興味深い問題を数値的に解析することも可能になる。

またこの定式化を使えば、カイラル極限付近でのシミュレーションが不安定になる問題がないため、物理的なアップおよびダウクォーク質量やさらにはクォーク質量ゼロでのシミュレーションも（有限体積効果の問題を除けば）実行可能である。比較的重いクォーク質量からの外挿の際にも、連続理論で知られているカイラル有効理論の予言（クォーク質量依存性）を使うことが正当化できるので、カイラル極限の問題は非常に単純化できる。カイラル対称性をもたないフェルミオン定式化では、余分なパラメータを導入してフィットした後で連続極限をとる操作が必要になるので、数値的にははるかに困難な問題になる。

厳密なカイラル対称性をもつフェルミオン定式化は、オーバーラップフェルミオンとして知られており、計算コストが通常のウィルソン型フェルミオンに比べて 100 倍程度も大きいという問題はあるが、これまでの我々の研究により、現行のスーパーコンピュータシステムを使えば大規模なシミュレーションも十分に可能であることが明らかになった。

カイラル極限の問題が根本的に解決できれば、現象論的応用での価値も高い。なぜなら、カイラル極限におけるカイラルログの問題は普遍的で、ほとんどの物理量がこの問題の影響を受けるからである。これまで、パイ中間子や K 中間子の崩壊定数、K 中間子のバグパラメータ、B 中間子の崩壊定数とバグパラメータ、パイ、K、B 中間子のセミレプトニック行列要素等の計算を進めてきたが、これらのすべてにおいてカイラル極限の問題は未解決で、この研究プロジェクトによって初めて本質的な解決が期待できる。これらの物理量はクォークフレーバー物理において小林益川行列要素を決定する上での中心的な物理量であり、信頼できる理論計算がかねてから期待されてきたものである。

この研究課題の目的は、これらの重要なハドロン行列要素を厳密なカイラル対称性をもつ格子 QCD のシミュレーションで計算すること、またそのための基本的な手法を開発することである。

### 3 平成 22 年度の研究報告

これまで、本研究のなかでは 2 フレーバー QCD (アップおよびダウクォークによる真空偏極の効果を取り入れた QCD) のシミュレーションに続いて、より現実的な 2+1 フレーバー QCD (上記に加えてストレンジクォークによる真空偏極の効果も取り入れた QCD) のシミュレーションを行った。このランのパラメータは、格子サイズ  $16^3 \times 48$ 、格子間隔 0.12 fm で、ゲージ作用としては岩崎型を採用し、トポロジーを固定するための余分なウィルソンフェルミオンを導入した。アップおよびダウクォークの質量は  $m_s/6 - m_s$  の範囲をカバー、ストレンジクォークは物理的な  $m_s$

をはさむ形で2点を取り、全体で10点のクォーク質量の組み合わせでシミュレーションを実施した。

さらに有限体積効果を理解するために、パラメータをしばった上で大きな体積 ( $24^3 \times 48$ ) でのシミュレーションを実行した。体積以外のパラメータは主要なシミュレーションと同一なので、有限体積効果による寄与を直接みることができる。

平成22年度の大型シミュレーション研究では、研究期間が4ヶ月と短く、またスーパーコンピュータの更新時期にあたるため、システム・シャットダウン後の物理解析を可能とする all-to-all クォークプロパゲータの生成とデータの蓄積を主として行った。

また、次期システムでの研究において必要な技術的基礎となる研究も行っている。その一つは、トポロジを固定することによる物理量への影響をあらわす理論的定式化をより非自明な状況で確認すべく、有限温度相転移近傍でのトポロジ感受率の計算を進めた。また、オーバーラップ・フェルミオンのもつカイラル対称性の厳密性を少しだけ破ったときの影響を調べるため、クォークの残存質量の系統的研究も行っている。

以下の研究を行った。

## 4 成果報告

平成22年度(平成22年10月～平成23年1月)に発表した論文は、本論文2件(うち1件は平成23年4月現在投稿中)と、格子場の理論国際会議での会議録5件、さらにドイツのグループがかかわるもの2件であった。

## 参考文献

- [1] K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki and T. Onogi [JLQCD collaboration], “Nucleon strange quark content from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry,” arXiv:1011.1964 [hep-lat].
- [2] H. Fukaya *et al.* [JLQCD and TWQCD collaborations], “Determination of the chiral condensate from QCD Dirac spectrum on the lattice,” Phys. Rev. D **83**, 074501 (2011) [arXiv:1012.4052 [hep-lat]].
- [3] E. Shintani, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Onogi and N. Yamada, “Two-photon decay of  $\pi^0$  from two-flavor lattice QCD,” PoS **LATTICE2010**, 159 (2010) [arXiv:1102.5544 [hep-lat]].
- [4] J. Noaki *et al.* [JLQCD and TWQCD Collaborations], “Chiral properties of light mesons in  $N_f = 2+1$  overlap QCD,” PoS **LATTICE2010**, 117 (2010).
- [5] K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi and N. Yamada [JLQCD Collaboration], “Nucleon strange quark content in 2+1-flavor QCD,” PoS **LATTICE2010**, 160 (2010) [arXiv:1012.1907 [hep-lat]].
- [6] T. Kaneko *et al.* [JLQCD Collaboration], “Light meson form factors in  $N_f = 2 + 1$  QCD with dynamical overlap quarks,” PoS **LATTICE2010**, 146 (2010) [arXiv:1012.0137 [hep-lat]].

- [7] G. Cossu, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. i. Noaki and E. Shintani [JLQCD Collaboration], “Finite temperature QCD at fixed Q with overlap fermions,” PoS **LATTICE2010**, 174 (2010) [arXiv:1011.0257 [hep-lat]].
- [8] C. Lehner, J. Bloch, S. Hashimoto and T. Wettig, “Geometry dependence of RMT-based methods to extract the low-energy constants Sigma and F,” arXiv:1101.5576 [hep-lat].
- [9] C. Lehner, S. Hashimoto and T. Wettig, “Geometry dependence of RMT-based methods to extract the low-energy constants Sigma and F,” PoS **LATTICE2010**, 088 (2010).