

# 「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 21-22 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 22 年 11 月 2 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)  
大阪大学 理学研究科 研究員
- 大木 洋 (おおき ひろし)  
大阪大学 理学研究科 研究員

- 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 計算科学研究センター長、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 (たにぐち 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与えており、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はないため、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 21-22 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てきた。2+1 フレーバーのシミュレーションは平成 20 年度までに完了している。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。

平成 21-22 年度の大型シミュレーション研究では、以下の研究を行った。

**有限体積効果の研究** 上記の 2+1 フレーバー QCD シミュレーションの最大の問題点は、有限体積効果にある。格子の大きさ 1.9 fm は、中間子 1 つを収容するにも十分大きいとはいいがたいため、無視できない有限体積効果が予想される。特にクォーク質量が小さい領域では、パイ中間子のループ効果のためにその寄与が大きくなる可能性があり、注意が必要である。この点を明らかにするために、パラメータを 1 点にしぼ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。このシミュレーションに基づく物理量の解析は現在進行中であり、予備的な結果を Lattice 2010 で発表した [3]。

**パイおよび K 中間子形状因子** 以前に開発した、任意点から任意点へのクォークプロパゲータを用いて、パイ中間子および K 中間子の形状因子の計算を行った。従来の方法と比較して、取り得る運動量の組み合わせが多くなるため、形状因子のフィットが容易になる。カイラル有効理論の NNLO まで取り入れた解析により物理的クォーク質量への外挿を行った。

**フレーバー 1 重項物理** 以前に開発した、任意点から任意点へのクォークプロパゲータを用いて、フレーバー 1 重項に関わる物理量の計算を進めた。 $\eta - \eta'$  および  $\omega - \phi$  中間子混合 [7]、および核子のストレンジ成分の計算 [5, 6] である。特に核子のストレンジ成分の計算は解析が最終段階に達し、現在、論文を準備中である。

**QCD 結合定数の計算** (ユークリッド化された) 運動量空間の相関関数を運動量の大きい領域で摂動的 QCD と比較することで、QCD 結合定数を決めることができる。平成 20 年度には、この新しい手法を使って 2 フレーバーでの QCD 結合定数を計算したが、この計算を 2+1 フレーバーでの計算に拡張し、現実的な QCD での結合定数の決定を行った。この研究は論文で発表した [2]。

**パイ中間子の二体光子崩壊の計算** 中性パイ中間子は軸性量子異常を通じて二体光子に崩壊する。クォーク質量がゼロの極限ではその崩壊率は精密に計算可能だが、有限のクォーク質量での補正については信頼できる計算は存在しない。これを格子 QCD を用いて計算する試みを行った。具体的にはユークリッド化された運動量空間でベクトルカレントと軸性ベクトルカレントの 3 点関数を解析することになる。現実的な運動量配置への外挿はまだ簡単ではないが、最初の結果を得た [4]。

**ディラック演算子スペクトル** ディラック演算子の固有値スペクトルを解析することで、カイラル対称性の自発的破れを数値的に検証することが可能になる。これまでの解析はカイラル摂動論の最低次に基づいたものだったが、これを次の次数に拡張する解析を行い、論文を発表した [1]。

**有限温度 QCD の予備的研究** QCD の有限温度相転移は、カイラル対称性の回復を伴って起こる。このため、相転移の性質は対称性の詳細を反映する。したがって、厳密なカイラル対称性をもつ格子理論による研究は最終的な計算には不可欠となる。将来の大規模計算を目指した予備的な研究を小規模ではあるが進めている。

## 4 成果報告

平成 21-22 年度には、下記の 2 件の論文発表 (Physical Review Letters を 1 件含む) の他、格子場の理論国際会議での発表 6 件 (プレナリー講演 1 件を含む) やその他の国際会議での発表を行った。

## 参考文献

- [1] H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi and N. Yamada [JLQCD collaboration], “Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD,” Phys. Rev. Lett. **104**, 122002 (2010) [Erratum-ibid. **105**, 159901 (2010)] [arXiv:0911.5555 [hep-lat]].
- [2] E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi and N. Yamada, “Strong coupling constant from vacuum polarization functions in three-flavor lattice QCD with dynamical overlap fermions,” Phys. Rev. D **82**, 074505 (2010) [arXiv:1002.0371 [hep-lat]].
- [3] J. Noaki *et al.* [TWQCD Collaboration and JLQCD Collaboration], “Chiral properties of light mesons with  $N_f = 2 + 1$  overlap fermions,” PoS **LAT2009**, 096 (2009) [arXiv:0910.5532 [hep-lat]].
- [4] E. Shintani, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Onogi and N. Yamada [JLQCD Collaboration], “ $\pi^0$  to two-photon decay in lattice QCD,” arXiv:0912.0253 [hep-lat].
- [5] K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi and N. Yamada [JLQCD collaboration], “Calculation of nucleon strange quark content with dynamical overlap quarks,” arXiv:0910.5036 [hep-lat].
- [6] H. Ohki *et al.*, “Nucleon sigma term and strange quark content in 2+1-flavor QCD with dynamical overlap fermions,” arXiv:0910.3271 [hep-lat].
- [7] T. Kaneko *et al.* [TWQCD collaboration and JLQCD Collaboration], “Flavor-singlet mesons in  $N_f=2+1$  QCD with dynamical overlap quarks,” PoS **LAT2009**, 107 (2009) [arXiv:0910.4648 [hep-lat]].
- [8] H. Fukaya [JLQCD Collaboration and TWQCD Collaboration], “Exploring chiral dynamics with overlap fermions,” PoS **LAT2009**, 004 (2009) [arXiv:1001.1786 [hep-lat]].
- [9] S. Hashimoto, “Lattice QCD in Collision,” arXiv:0912.5262 [hep-ph].
- [10] S. Hashimoto, “Spontaneous chiral symmetry breaking on the lattice,” PoS **CD09**, 004 (2009) [arXiv:0912.5254 [hep-ph]].
- [11] T. Kaneko, “Pion form factors from lattice QCD with exact chiral symmetry,” PoS **CD09**, 011 (2009) [arXiv:0911.5193 [hep-ph]].