

「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21年11月6日

1 研究組織

scqcd グループは KEK、京大基研、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 准教授

- 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
- － 青山 龍美 (あおやま たつみ)
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
- － 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
- － 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)
京都大学 基礎物理学研究所 大学院生

- 武田 光平 (たけだ こうへい) 筑波大学大学院 D3
- 深谷 英則 (ふかや ひでのり)
名古屋大学 理学研究科 特任助教
- 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つ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、カイラル対称性を厳密に保った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する。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。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る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ン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 年度 (前半) の研究報告

平成 21 年度 (前半) の大型シミュレーション研究では、以下の研究を行った。

- スtrenジクォークの動的効果を含んだ 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。この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えないため、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。このランと解析が現在、並行して進行中である。

- 上記の大規模シミュレーションと並行して、これまでに蓄積した2および2+1フレーバーの格子データを利用して、以下のような物理量計算のプロジェクトを進めた。

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ている。 $\eta - \eta'$ および $\omega - \phi$ 中間子混合、および中性子のストレンジ成分の計算である。それぞれ、予備的な計算が完了して、物理解析が進行している。

QCD 結合定数の計算 上記の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て計算を進めている。

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進めている。

厳密なカイラル対称性はこのプロジェクトで初めて実現されるものであるため、これら以外にも新たな応用を開拓できる可能性が大いにある。今後も素粒子現象論を中心に、広くテーマを考えていきたい。

4 成果報告

上記であげた研究成果を含め、論文リストについては、研究成果報告書の本紙を参照されたい。