scqcdグループ 平成15年度利用報告

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16年5月27日

1　研究組織

scqcd グループは KEK、筑波大、京大基研、広島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。

- 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 助教授
- 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 助手
  - 蔵増 嘉伸 (くらまし よしのぶ)
    高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 助手
  - 筒井 直人 (つつい なおと)
    日本学術振興会 特別研究員 (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所)
  - 山田 憲和 (やまだ のりかず)
    RIKEN-Brookhaven Research Center Postdoctral fellow
  - 青木 慎也 (あおき しんや)
    筑波大学 物理学系 教授
  - 岩崎 洋一 (いわさき よういち)
    筑波大学 物理学系 教授
  - 宇川 彰 (うかわ あきら)
    筑波大学 計算物理学研究センター長、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 計算物理学研究センター 助教授
– 吉江 友照 (よしえ ともてる)
筑波大学 計算物理学研究センター 助教授
– 福来 正孝 (ふくぎた まさたか)
東京大学 宇宙線研究所 教授
– 大野木 哲也 (おおのぎ てつや)
京都大学 基礎物理学研究所 助教授
– 石川 健一 (いしかわ けんいち)
広島大学大学院 理学研究科 講師
– 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

2 はじめに

自然界の強い相互作用は量子色力学 (QCD) で記述されるが、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。格子上に定義された QCD(以下では格子 QCD) は、QCD の非摂動的性質を数値シミュレーションを使って定量的に計算する手法を与えており、計算機の急速な進歩にともなって物理量の現実的な計算が可能になりつつある。

特に素粒子物理学の現象論との関係で重要なのは、B 中間子と K 中間子の崩壊におけるハドロンの行列要素の計算である。KEK は B ファクトリー実験によって B の物理における世界の中心の一つになっているが、B の物理において CP の破れの測定と同様に重要なことは、小林益川行列要素を精密に決定して標準理論の検証を行うことである。現在のところ、いくつかの小林益川行列要素の決定精度はハドロン行列要素の不定性で制限されており、この点で格子 QCD シミュレーションの役割は本質的である。同様に、K 中間子崩壊の研究や陽子崩壊を通じた大統一模型の研究においてもハドロンの不定性が理論の予言可能性を制限しており、格子 QCD の進歩が素粒子物理学全体の中でも重要な位置をしめている。

動的クォークの効果を無視したクエンチ近似の範囲内では、大規模な数値計算が行われ種々のハドロンの質量や行列要素の値が高い精度で求められている。今後の大きな課題は、クェンチ近似によらない (動的クォークの効果を取り入れた) 数値シミュレーションで種々の物理量を精度よく計算し、真の意味での第一原理計算による予言を与えることである。この研究計画では、

B 中間子の混合パラメタ $f_B\sqrt{B_B}$ の、クェンチ近似によらない計算が目標の一つである。

動的クォークの効果を取り入れた計算は、必要とされる計算量が非常に多いために、最新のスーパーコンピュータを用いても依然として困難な問題である。特に、動的クォークの質量を自然界と同じ程度まで小さくすることは非常に難しく、現状ではアップおよびダウンクォークの質量として、ストレンジクォークの質量の $1/2$ 程度までしか到達できていない。このため、$f_B\sqrt{B_B}$ などの物理量の評価にはクォーク質量に関する外挿が必要になり、その際の不定性は現状での大きな問題である。

また、これまでの計算はフレーバー数が偶数に限られるというアルゴリズム上の制限から、ストレンジクォークの効果を無視したものになっていた。我々は、奇数フレーバーにも適応可能な厳密なアルゴリズムを開発し、$2+1$ フレーバーの大規模シミュレーションを開始した。その際に必要な $O(a)$-改良の係数の非摂動的計算も行った。

以下では、平成 15 年度 (2003 年度) に行った研究について報告する。

3 研究の概要

3.1 B 中間子混合パラメタのクェンチ近似によらない計算

中性 B 中間子の混合の強さを表す定数 $f_B^2 B_B$ (f_B は崩壊定数、B_B は B パラメタと呼ばれる) は、標準模型の基本パラメタの一つである小林益川行列要素 $|V_{td}|$ を決定する際に必要になるが、非摂動的な行列要素であるため、格子 QCD による数値計算が今のところ唯一の有望な計算手法である。クェンチ近似による計算は過去に多くやられてきたが、ダイナミカルクォークの効果を含めた計算は今回の我々のものが初めてである [2]。

我々の計算の基礎となる、フレーバー数 $N_f = 2$ の場合の大規模シミュレーションは、2000 年 3 月に現機種 (日立 SR8000) が導入された当初から行ってきたものである。このシミュレーションの詳細については、すでに 2002 年度に論文として発表している [1]。

図 1 は、B 中間子の崩壊定数 f_B のカイラル外挿の様子を示したものである。ここで、青丸はクェンチ近似によらない計算のデータ点を、三角はクェンチ近似による計算の結果をそれぞれ示している。ここで重要なのは、クェンチ近似によらない計算ではクォーク質量の非常に小さい領域でパイオンループの寄与によるログ依存性が理論的に予測されていることである。残念ながら、格子 QCD シミュレーションはこのように軽いクォークの領域まで到達していないので、カイラル外挿による大きな不定性が避けられない。この点の改善は、今後の大きな課題である。

また、格子計算で残っている不定性を除去するために、多くの系統誤差が

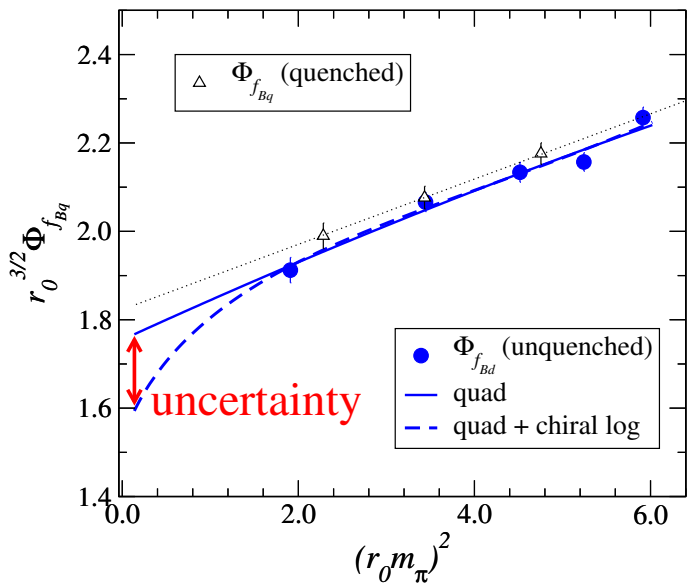

図 1: B 中間子の崩壊定数 f_B のカイラル外挿

相殺する Grinstein 比 $(f_{B_s}/f_B)/(f_{D_s}/f_D)$ の計算を $N_f = 2$ のデータの上で行った [3]。

3.2 $N_f = 3$ での非摂動的改良作用の構築

次期の大規模シミュレーションとして、ストレンジクォークの動的効果も含む $N_f = 2{+}1$ でのシミュレーションを、CP-PACS collaboration との共同研究として進めている。

このシミュレーションの第一段階として、フェルミオン作用の $O(a)$ 改良に必要な項のパラメタ $c_{\rm SW}$ を非摂動的に決定するための計算を行った。この計算はクェンチ近似と $N_f = 2$ では、すでに行われているが、$N_f = 3$ ではこの研究が初めてとなる。またゲージ作用として繰り込み群改良型を用いる点も、以前のものと異なる。

具体的には、ALPHA collaboration が開発したシュレーディンガー汎関数の方法を用い、軸性カレントのワード高橋恒等式を課すことで $c_{\rm SW}$ を決める条件とする。この計算を様々な結合定数とクォーク質量の値に対して系統的に行って、$c_{\rm SW}$ を結合定数の関数として求めた [4]。昨年度の研究 [5] に比べて、有限の格子間隔のために起こる誤差を摂動論を使って補正し、より正確な値を求めた点で進歩している。

ここで求めた $O(a)$ 改良の係数 $c_{\rm SW}$ を使った $N_F = 2 + 1$ での大規模シミュレーションもすでに行っており、軽いハドロンの質量についての予備的

結果を発表した [6, 7]。

3.3 陽子崩壊の行列要素の計算

陽子崩壊の確率を評価する際に必要になるハドロンの行列要素については、JLQCD collaboration が 1999 年に行った計算 [8] があるが、この計算は $O(a)$ の誤差を含む格子作用で、格子間隔として一点のみをとって行ったものであった。今回、この有限の格子間隔による誤差を取り除くために、3 つの格子間隔で計算を行い、連続極限への外挿を行った [9, 10]。これによって、10% 程度の系統誤差で行列要素を評価することに成功した。

4 平成 15 年度の研究発表

平成 15 年度に JLQCD グループが発表した論文は以下の通りである。

- 重いクォークの有効理論における展開パラメタの計算 [11]。
- クェンチ近似によらない B 中間子混合パラメタ $f_B\sqrt{B_B}$ の計算 [2]。
- 陽子崩壊行列要素の連続極限 [10]。

また、2003 年 7 月につくば市のつくば国際会議場で行われた国際会議 Lattice 2003 において、4 つの研究発表を行った [3, 4, 6, 9]。

参考文献

[1] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Light hadron spectroscopy with two flavors of $O(a)$-improved dynamical quarks," Phys. Rev. D **68**, 054502 (2003) [arXiv:hep-lat/0212039].

[2] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "$B^0 - \bar{B}^0$ mixing in unquenched lattice QCD," Phys. Rev. Lett. **91**, 212001 (2003) [arXiv:hep-ph/0307039].

[3] T. Onogi *et al.* [JLQCD Collaboration], "Precise Determination of the Grinstein Ratio of Heavy-Light Decay Constant in Unquenched QCD," Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 610 (2003).

[4] K. I. Ishikawa *et al.* [CP-PACS Collaboration], "Study of finite volume effects in the non-perturbative determination of c(SW) with the SF method in full three-flavor lattice QCD," Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 444 (2004) [arXiv:hep-lat/0309141].

[5] S. Aoki *et al.* [CP-PACS Collaboration], "Non-perturbative determination of c(SW) in three-flavor dynamical QCD," Nucl. Phys. Proc. Suppl. **119**, 433 (2003) [arXiv:hep-lat/0211034].

[6] T. Kaneko *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Light hadron spectrum in three-flavor QCD with $O(a)$-improved Wilson quark action," Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 188 (2004) [arXiv:hep-lat/0309137].

[7] K. Kanaya [CP-PACS Collaboration], Nucl. Phys. Proc. Suppl. **128**, 100 (2004) [arXiv:hep-lat/0310040].

[8] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Nucleon decay matrix elements from lattice QCD," Phys. Rev. D **62**, 014506 (2000) [arXiv:hep-lat/9911026].

[9] N. Tsutsui *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaboration], Nucl. Phys. Proc. Suppl. **129**, 284 (2004) [arXiv:hep-lat/0309139].

[10] N. Tsutsui *et al.* [CP-PACS and JLQCD Collaborations], "Lattice QCD calculation of the proton decay matrix element in the continuum limit," arXiv:hep-lat/0402026.

[11] S. Aoki *et al.* [JLQCD Collaboration], "Heavy quark expansion parameters from lattice NRQCD," arXiv:hep-lat/0305024, to be published in Phys. Rev. D.