

機関番号：12102

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740123

研究課題名 (和文) 現実的なクォーク質量を用いた格子 QCD 数値計算と陽子崩壊行列要素の計算

研究課題名 (英文) Lattice QCD simulation at the physical point and calculations of the proton decay matrix element

研究代表者

浮田 尚哉 (UKITA NAOYA)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：50422192

研究成果の概要 (和文)：本プロジェクトは、現実のクォーク質量を用いて、アップ クォーク、ダウン クォークとストレンジ クォークの動的効果を考慮した 2+1 フレーバーの格子 QCD 数値計算を実行すること、及び物利点上での物理量計算を目的としている。従来の格子 QCD 数値計算では、クォーク質量を現実の値より遥に大きい領域で幾つか計算し、物理点へ外挿していた。問題は、その外挿による系統誤差が大きく、物理量に常に大きな不定性を残していたことである。本研究では、直接物利点の数値計算を実行し、外挿による系統誤差を取り除き、より精密な物理量の計算を目指した。

研究成果の概要 (英文)：This project aims to simulate 2+1 flavor lattice QCD on the physical point and to calculate observables at the physical point. The most popular strategy to obtain the result at the physical point is chiral extrapolation with the use of chiral perturbation theory as a guiding principle. This strategy, however, has large systematic errors from chiral extrapolation due to the nontrivial quark mass dependence. In this work, we have achieved the physical point simulation, which has been the long-standing problem in lattice QCD, to remove systematic errors from chiral extrapolation and to calculate observables more precisely.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合 計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2008年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2009年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総 計 | 2,400,000 | 720,000 | 3,120,000 |

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：素粒子 (理論)、格子 QCD

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型の一部である QCD は、低エネルギー領域でクォークの閉じ込め等の非摂動的現象をもたらす強い相互作用を記述すると考えられているが、紙と鉛筆による伝統的な解析法でその性質を調べることは難し

い。定量的な解析には、格子 QCD に基づく第一原理数値計算が有効である。

これまでの格子 QCD 数値計算では、計算コストの制限から、直接、現実のクォーク質量での計算は不可能だった。そこで、現実のクォ

ーク質量よりも遥かに重い領域で計算を行い、その後現実のクォーク質量への外装により物理量を評価していた。この外装は、理論的に非自明な関数で、大きな系統誤差の要因になっていた。

特に、崩壊・散乱過程や原子核の組成等における QCD 効果を精密に理解する上で、この外装による大きな誤差の除去、つまり、現実のクォーク質量での数値計算が、格子 QCD 分野での重要課題だった。

2. 研究の目的

現実的なクォーク質量を用いた 2 + 1 フレーバーの格子 QCD シミュレーションにより、強い相互作用の非摂動的現象を定量的に明らかにする事を目指す。
格子作用は Iwasaki ゲージ作用と 0(a) 改良された Wilson クォーク作用を用いる。
本研究の利点は、クォーク質量の軽い領域で複雑な振舞いを持つカイラル外挿（シミュレーションで用いたクォーク質量を現実の値へ外挿）による系統誤差を取除ける事である。

まず、格子計算による軽いハドロン質量スペクトルの実験結果との比較、また QCD の基本パラメーターであるクォーク質量の決定を行う。その後、素粒子標準模型を超える理論、大統一理論 (GUT, SUSY GUT) 等に強い制限を与える陽子崩壊の解析に必要な QCD 効果（ハドロン行列要素）を評価する。

3. 研究の方法

現実のクォーク質量を用いた、アップ・クォーク、ダウン・クォークとストレンジ・クォークの動的効果を考慮した 2 + 1 フレーバーの格子 QCD の数値計算の実現を目指す。
但し、クォーク質量は、数値計算の結果得られるものなので、以下の方法を採用する。

- (1) 現実のクォーク質量近傍で数値計算を実行する。
- (2) 現実のクォーク質量とのずれを、リウエーティング法で補正し、物理点の数値計算を実現する。

格子作用は、0(a) 改良された Wilson クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いる。
シミュレーションパラメーターは、格子サイズ $L=3$ fm、格子間隔 $a=0.09$ fm である。
クォーク質量を現実の値まで下げるために、領域分割されたハイブリッドモンテカルロ (DD-HMC) 法を採用する。計算時間を最も費やすのは、アップ・クォークとダウン・クォ

ークのディラック演算子の逆演算子の計算で、その計算法の更なる改良により計算コストの削減を試みる。また、軽いクォーク質量では、新たな問題に常に遭遇する可能性があるため、種々の逆演算子の計算法を用意する。

上記計画と同時に、現実のクォーク質量を含むいくつかのシミュレーション結果とカイラル有効理論との比較を行う。これによりカイラル有効理論でコントロール可能かどうかを調べつつ、QCD の基本パラメーターであるクォーク質量の決定を行い、軽いハドロン質量スペクトルの格子 QCD 計算が実験値を再現するかをみる。

また、興味ある物理量（ハドロン行列要素）として、核子の軸性ベクトル結合定数のクォーク質量依存性を調べる。いくつかのグループが調べているが、統一的な結論がない。やはり物理点近傍での解析が重要になっている。更に、パイオンの荷電半径のクォーク質量依存性等も調べる。

本研究では、カイラル外挿による系統誤差のない、あるいは十分無視出来る 2 + 1 フレーバーの格子 QCD 数値計算であり、現象論への重要なインプットとなり得る。

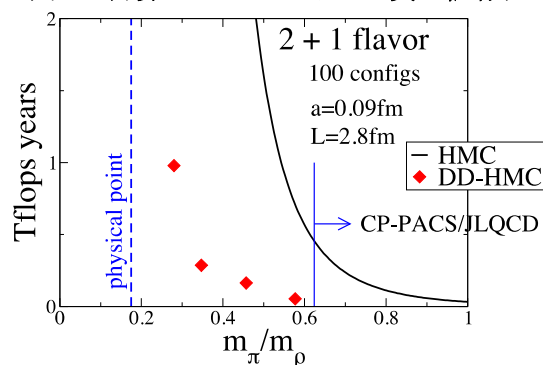
4. 研究成果

(1) 計算コスト：

現実のクォーク質量での格子 QCD には、膨大なコストが必要となる。

例えば 0(a) 改良された Wilson クォークの場合、従来用いられるハイブリッドモンテカルロ (HMC) 法での計算コストは、経験則によりパイオン質量（クォーク質量）を軽くする毎に 6 乗（3 乗）で計算コストが増大する（図 1 の黒実線参照）。現実のクォーク質量を用いたシミュレーション（独立な配位数 100、格子間隔 $a=0.09$ fm、体積 $L=2.8$ fm）のコストは、0(100) Tflops・Years となり、新たなアルゴリズム等による計算速度の加速が必要である。

図 1 計算コストのパイオン質量依存性



(2) アルゴリズムの発展による計算速度の加速：

この現状を打破する解決案として、まず領域分割されたハイブリッドモンテカルロ (DD-HMC) 法が挙げられる。格子を領域分割し、近距離力と遠距離力を分離する事で、マルチタイムスケールの分子動力学法が自然に適用できる。DD-HMC 法の採用により、計算速度は約 10 倍になる。

また、格子 QCD で最も計算時間がかかるクォーク行列の逆行列計算に対して、SAP (Schwarz alternating procedure) 及び SSOR を単精度で施し、その後、GCR を倍精度で使用する。この操作により、例えばパイオン質量が 300 MeV の場合、広く用いられている even/odd 前処理した倍精 BiCGStab (L=2) に比べ、4 倍の計算速度を達成している。また、SSE を活用することで、更に 2 倍の速度が得られる。これらの方法により、従来の方法に比べ、実測値で数十倍の性能向上が得られた (図 1 の赤印参照)。クォーク質量を下げると、性能向上比は更に増加する。

(3) 現実的なクォーク質量近傍までの格子 QCD 数値計算：

我々の研究以前には、従来の HMC 法による Iwasaki ゲージ作用と $O(a)$ 改良された Wilson クォーク作用を用いた 2 + 1 フレーバーの格子 QCD シミュレーションが、CP-PACS+JLQCD Collab. により行われていた。主要な計算機として CP-PACS、HITACHI SR8000 と地球シミュレーターを使用した。その際、格子サイズは $L=2$ fm、クォーク質量は、パイオン質量 600 MeV に対応する値までしか下げられなかった。

一方、現在では前述のアルゴリズムの発展及び計算機の性能向上により、現実のパイオン質量 135 MeV での数値計算が可能になりつつある。

我々は、筑波大学計算科学研究センターのクラスター計算機 PACS-CS (2560 ノード、ピーク性能 14.3 Tflops) を使用し、格子サイズ $L=3$ fm、格子間隔 $a=0.9$ fm のシミュレーションを行い、パイオン質量 150 MeV まで到達できた。

(4) 現実的なクォーク質量での格子 QCD 数値計算：

上記成果のパイオン質量 150 MeV の数値計算は、物理点 (パイオン質量 135 MeV) から

わずかしかずれていないので、リウエイティング法で、このずれを補正して物理点での数値計算を実現した。この物理点での数値計算は世界で初めて行われた重要な研究である。これにより、大きな系統誤差を生むカイラル外装を取り除くことが出来る様になった。

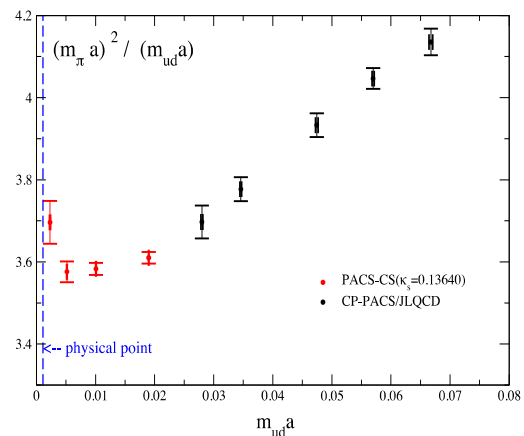
(5) カイラルログの兆候：

既にパイオン質量が十分小さいので、カイラル有効理論との比較が可能になった。

有効理論は、パイオン質量の十分軽い領域でカイラルログと呼ばれる対数的な振舞いを预言する。

実際、重いパイオン質量の CP-PACS+JLQCD データではカイラルログは見られないが (図 2 の黒印)、軽いパイオン質量の PACS-CS データでその曲りが見えつつある (図 2 の赤印)。

図 2 カイラルログ



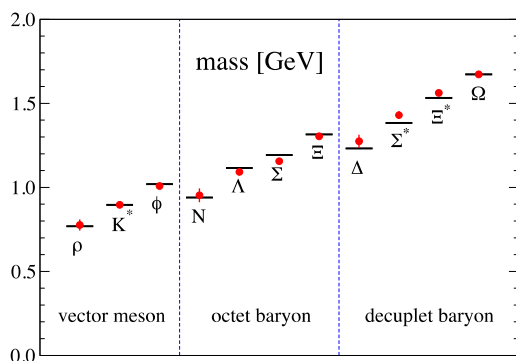
(6) 物理点近傍までの結果を用いたクォーク質量の決定とハドロンスペクトル：

カイラル有効理論を用いて、物理点に外挿し、QCD の基本パラメーターであるクォーク質量を決定した。

更に、ハドロンスペクトルを格子 QCD 計算によって再現することは、QCD が強い相互作用を記述する理論である事を示す最も基本的な要請である。

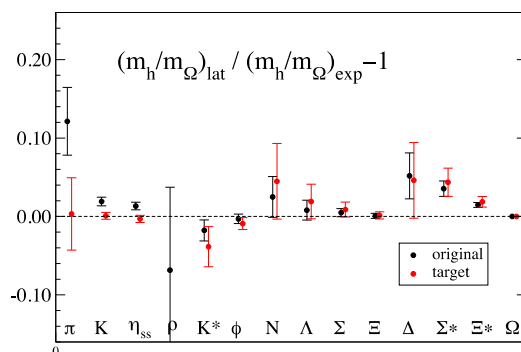
カイラル外挿の結果は、実験値を再現している (図 3)。但し、これらの結果は暫定的なものである。最終結果を得るには、現実のクォーク質量のシミュレーションを行い、かつ有限体積効果と有限格子間隔効果の評価が必要である。

図3 実験値との比較



(7) 物理点上で直接数値計算したクォーク質量とハドロンスペクトル：
リウエイティング法で直接物理点での数値計算をした結果、アップクォーク質量 2.97(28)(03) MeV、ストレンジクォーク質量 92.75(58)(95) MeV を得た。一番目の誤差は統計誤差、二番目は非摂動的に計算した繰り込み係数の誤差。ここではカイラル外装による誤差がないことが重要な結果である。更に、ハドロンスペクトルが、実験値をよく再現している（図4の赤印）。わずかなずれは、有限体積効果と有限格子間隔によるものと考えられる。これらの効果の評価は今後の課題である。

図4 実験値との比較



(8) ハドロンの行列要素計算：
興味ある物理量として核子の軸性ベクトル結合定数とパイ中間子の荷電半径のクォーク質量依存性を調べた。幾つかのグループが研究しているが、物利点への外挿による不定性が大きく統一的な結論がない。物利点での計算が重要になっている。但し今回の計算では格子体積が十分には大きくなく、意味ある結果を得るには難しいことが分かった。現在進行中のより大きな体積での研究で明かにする予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

〔雑誌論文〕(計9件)

- ① “Electromagnetic form factor of pion from $N_f=2+1$ dynamical flavor QCD”, O. H. Nguyen, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, N. Ukita, JHEP 1104:122, p1-28, 2011, 査読有.
- ② “Physical Point Simulation in 2+1 Flavor Lattice QCD”, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, Phys.Rev.D81:074503, p1-5, 2010, 査読有.
- ③ “SU(2) and SU(3) chiral perturbation theory analyses on baryon masses in 2+1 flavor lattice QCD”, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, Phys.Rev.D80:054502, p1-17, 2009, 査読有.
- ④ “2+1 Flavor Lattice QCD toward the Physical Point”, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, Phys. Rev. D79, 034503, p1-33, 2009, 査読有.

〔学会発表〕(計6件)

- ① 浮田尚哉、クローバーフェルミオンを用いた $N_f=2+1$ 格子 QCD での核子の軸性ベクトル結合定数、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 12 日、甲南大学岡本キャンパス.
- ② N. Ukita, Nucleon axial charge in 2+1 flavor lattice QCD with $O(a)$ improved Wilson quark action, Lattice 2009, 2009 年 7 月 27 日、Beijing China.
- ③ N. Ukita, 2+1 flavor lattice QCD simulation with $O(a)$ -improved Wilson quarks, LATTICE 2008, 2008 年 7 月 14 日、Regensburg Germany.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/people/LQCD>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浮田 尚哉 (UKITA NAOYA)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：5 0 4 2 2 1 9 2