

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 4 月 27 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740143

研究課題名(和文) 物理点での格子QCD+QED数値計算の実現と陽子荷電半径の計算

研究課題名(英文) Realization of lattice QCD+QED simulation at the physical point and calculation of proton charge radius

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：従来の格子QCD計算は、アイソスピン対称性の破れの効果を無視したものであった。実際その効果は統計誤差に埋もれていて無視していても良かった。しかし近年の精密な数値計算では、もはやその効果を無視できない。幾つかある先行研究では、その効果を部分的に取り入れたものがほとんどで、みな物理点から大きく離れた計算であった。

本研究では、世界で初めて物理点で完全にアイソスピンの破れの効果を取り入れた計算を実行して、クォーク質量の決定を行った。

研究成果の概要(英文)：The effect of isospin symmetry breaking was ignored in traditional lattice QCD calculations because it was expected to be small compared to their statistical errors. But in recent precise numerical calculations, we can no longer ignore the effect. There are several previous attempts. They consider the effect partially or are done away the physical point. The aim of this project is the realization of calculations at the physical point, which include the full effect of isospin symmetry breaking. We realized it and estimated the quark masses.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：格子ゲージ理論 非摂動効果 物理点 数値計算

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型は、強い力を記述する量子色力学QCDと電磁気力、弱い力を統一的に記述するGlashow-Weinberg-Salam理論からなる。本研究では、原子核スケールの物理が対象である。このスケールでは、強い力が支配的であり、先ず第0近似としてQCDのみを扱う。しかし、QCDの数学的構造により、従来解析で使われてきた摂動論が適用出来ない。そこで、定量的な解析には、非摂動的に定式化した格子QCDによる第一原理計算が有効である。特に、現実と同じクォーク質量（物理点）において数値計算を行う事は、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非常に重要である。

これまでの格子QCD計算は、6種類あるクォークの内の軽い3つ（アップ、ダウン、ストレンジ）の動的効果を取り入れた研究が主流であった。数値計算で得られたハドロンの質量スペクトルが実験値を再現する等、多くの成功を収めてきた。但し、近似として、軽いアップとダウンクォーク質量差を無視した計算（2 + 1フレーバーQCD）であった。

より精密な結果を得るには、その質量差を考慮する必要がある。また、その質量差と電磁気力の効果は同程度と見積もられているために、より現実的な数値計算では、アップとダウンクォークの質量差と電磁気力の両効果（アイソスピン対称性の破れの効果）を考慮した1 + 1 + 1フレーバーQCD+QED計算を物理点で実現しないと行けない。

本研究を始めた時点では、格子QCD+QED計算がいくつかあったが、物理点から遠く離れたもので、かつQEDの動的効果を無視したものであった。当時、物理点上かつQCD+QEDの動的効果を取り入れた計算は、大きな挑戦であり、実現が望まれていた。

### 2. 研究の目的

現実のアップ、ダウン、ストレンジクォーク質量を用いた物理点での格子 QCD+QED 数値計算を実行し、強い相互作用と電磁相互作用が共存する系での非摂動現象を定量的に明らかにする事を目指す。本研究の最大の利点は、アイソスピンの破れの効果を取り入れたより現実的な数値計算になっている点である。また物理点上で数値計算をするため、直接実験結果と比較出来る。更に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による系統誤差を完全に排除する事である。

以上の研究目的のもと、以下2つを研究課題とした。

#### (1) 物理点での格子 QCD+QED 計算：

本研究の主目的は、アップとダウンクォークの質量差と電磁気力の効果（アイソスピン

対称性の破れの効果）を考慮したより現実的な格子1 + 1 + 1フレーバーQCD+QED 計算を実現し、アップ、ダウン、ストレンジクォーク質量の決定を目指す。

#### (2) 陽子荷電半径の計算：

最近の興味ある実験として、陽子の荷電半径の測定で、陽子半径が4%減ったという報告がある。 $\mu$  粒子 + 陽子系での測定で、従来の電子 + 陽子系での測定値に比べて5%小さい値を得ている。現時点でこの不一致の原因は特定されていない。

まずは、QCD + QED で説明可能か調べる必要がある。これまで QED は理論と実験から摂動論で十分と思われてきたが、QCD との混合系では、摂動論で十分という保証はなく、非摂動効果を調べる必要がある。

上記物理点での QCD+QED 数値計算の実現後に、陽子荷電半径を計算し、不一致の原因を探る。はたして QCD+QED (素粒子標準理論) 内で説明可能か、それとも素粒子標準模型を超える物理が必要かを定量的に調べる。

### 3. 研究の方法

現実のクォーク質量を用いた、アップ、ダウンとストレンジクォークの動的効果を考慮した格子QCD+QED計算のための格子QCD作用は、Iwasakiゲージ作用とO(a)改良されたWilsonクォーク作用を用いる。数値計算のパラメータは、格子サイズ $L^3 \times T = 32^3 \times 64$ 、格子間隔 $a = 0.9\text{fm}$  ( $\beta = 1.90$ )、空間体積 $(La)^3 = (2.9\text{fm})^3$  である。

計算手順は、以下のように行う。

(1) 物理点近傍の2 + 1フレーバーの格子QCD配位を生成する。アップとダウンクォーク質量を現実の値近傍まで下げるために、領域分割されたハイブリッドモンテカルロ法と質量前処理を使う。

(2) それとは独立に、QCDの格子よりもメッシュの細かな格子 $64^3 \times 128$ で電磁場を生成し、QCDの単位格子内の余分な自由度を足し上げることにより滑らかな配位を作る。

(3) これらの配位を一つにまとめてQCD + QEDの元となる配位とする。

(4) QEDのクォークの動的効果とアップ、ダウン、ストレンジクォーク質量の物理点からのずれは、ノイズ法を用いたリウエイティング法で取り入れる。

(5) 物理点のクォーク質量と格子間隔は、 $u, K, K_0$  と  $\Omega^-$  の質量をインプットにして決定する。

有限体積効果を見積もるために、より大きな格子サイズでの計算を行う。

数値計算は、筑波大学のPACS-CS、T2K-Tsukuba、HA-PACS、東京大学のFX10、理研AICSの京を使う。また、計算資源が地理的に分散していて、扱うデータ量も膨大になるため、データの移

動と保存には、ILDGのデータグリッドを活用する。

#### 4. 研究成果

(1) 物理点での格子 QCD+QED 計算の実現：  
1+1+1 フレーバー-QCD+QED の物理点での数値計算を世界で初めて実現し、アップ、ダウン、ストレンジクォークの質量の決定を行った。

手法は、2+1 フレーバー-QCD のゲージ配意を出発点にし、アイソスピンの破れの効果と物理点からのずれをリウエイティング法により取り入れた。実際、アイソスピンの破れに起因する荷電 K 中間子と中性 K 中間子の僅か 4MeV の質量差を再現できた。図 1 の誤差棒付きのデータは数値計算の結果で、傾きがその質量差を表している。(2本の青色実線が誤差 1 の傾きになっている。)また、赤色の実線は実験値に対応する傾きで、数値計算の結果が実験値をきちんと再現していることがわかる。

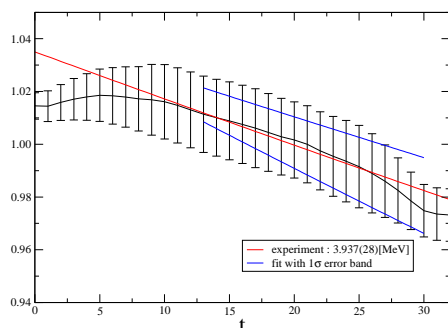


図 1：荷電 K 中間子と中性 K 中間子の質量差

(2) より大きな体積での QCD 計算

上記計算は、格子体積(2.9fm)<sup>3</sup>の結果で、有限体積効果を見積る必要がある。実際、有限体積効果の目安となるパイオン質量  $m$  と空間の長さ  $L$  の積が  $mL=2$ 程度となり、QCDの有限体積効果だけでも、パイオン等の擬スカラー粒子の質量と崩壊定数に対しては数パーセントとなる。一方、メソン等のベクトル粒子や核子等のバリオンの質量に対する効果は更に大きくなると予想され、無視出来ない。更にQEDの効果も考えると、より大きな体積での計算が非常に重要である。

まず、QCDの有限体積効果を見積るために、格子体積(9fm)<sup>3</sup>の物理点計算を行った。図 2 は安定粒子の質量の実験値からのずれを表している。 $\pi$ 、K、 $\Omega$  の質量を物理インプットに使い、他の粒子(N、 $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ )の質量が数値計算の予言になる。それらが実験値を再現していることがわかる。

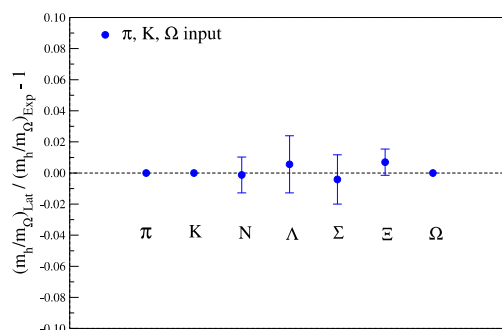


図 2：安定粒子の質量の実験値からのずれ

また、物理点探索時の副産物として、物理点近傍のデータが得られた。これらを用いて、QCDの低エネルギー有効理論に含まれる定数達の評価を行った。現象論と他グループと無矛盾な結果を得た。

以上の結果から、信頼出来る大きな体積の QCDのゲージ配位を生成したことになる。これは、大きな体積を必要とするQCDから直接原子核を生成する研究や核力の性質を研究するための土台となる重要な成果である。

次に、QED の効果を取り入れたテスト計算を行った結果、我々の開発した手法がこの大きな体積に適用するには難しいことが分かった。原因は、体積を大きくすると、適用できる条件がより制限されるためである。そこで、手法の改善を試み、今後の QCD+QED の研究につながるテスト計算を始めた。

(3) 陽子荷電半径の計算：

興味ある物理量として陽子の荷電半径がある。但し今回の計算では統計数が十分には多くなく、意味ある結果を得るには難しいことが分かった。現在準備中の QCD+QED のゲージ配意生成の研究で明らかにする予定である。

本課題の主目的は、物理点でアイソスピン対称性の破れを取り入れた QCD+QED の数値計算を実行することだった。我々は世界で初めてこれを実現し、アイソスピンの破れの効果を確認した。その後の他グループの研究が、QED 効果を取り入れていることを見ると、本研究の成果は大きい。ただし、有限格子間隔と有限体積の効果を評価できていないことが、懸案事項である。最近、ドイツを中心としたグループによるそれらの系統誤差を評価した研究がある。また、QCD+QED の計算が世界の主流になりつつある。そのため、効率の良い計算手法を開発することが、成果を出す重要な要素になってくると思われる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

“Challenge to lattice QCD simulations at the physical point”,

N. Ukita, Journal of the Japan Society for Simulation Technology, Vol.32, No.1, 2013, pp.4-7, 査読有.

“1+1+1 flavor QCD + QED simulation at the physical point”, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, Phys.Rev. D86, 2012, 034507, 査読有,  
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.034507.

“Lattice quantum chromodynamics at the physical point and beyond”, S. Aoki, N. Ishii, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, O. H. Nguyen, M. Okawa, K. Sasaki, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, PTEP, 2012, 01A102, 査読有,  
DOI: 10.1093/ptep/pts002.

〔学会発表〕(計4件)

“物理点における格子QCD計算”,  
浮田尚哉, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, 2015年3月11日, 紀尾井フォーラム (東京都・千代田区).

“Physical point simulation in 2+1 flavor lattice QCD”,  
N. Ukita, Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers German-Japanese Seminar 2013, 6-8 Nov 2013, Regensburg(Germany).

“京コンピュータによる物理点での格子QCD計算”,  
浮田尚哉, 日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月11日, 京都産業大学(京都府・京都市).

〔その他〕

ホームページ等

PACS-CS グループ:

<http://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/PACS-CS/LQCD/>

HPCI 戦略プログラム分野5:

<http://www.jicfus.jp/field5/jp/>

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: 50422192