

## 課題名 (タイトル) : 格子 QCD を用いた素粒子現象論の研究

利用者氏名 :

○新谷栄悟

所属 :

計算科学研究機構連続系場の理論研究グループ

## 1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

本研究は素粒子現象論において標準模型の精密計算が要求される物理量について、格子 QCD を用いた第一原理計算からその厳密解を求めることを目的とする。具体的には、一つはミュオン異常磁気モーメント ( $g-2$ ) のハドロンの寄与の計算、もう一つには陽子崩壊過程における QCD 寄与の計算の 2 点について、格子 QCD を用いた非摂動計算を試みた。これらの物理量は、標準模型とそれを越えた新しい物理に関する知見を得るために重要視されている。ミュオン  $g-2$  に関しては、その精密計算と精密測定からすでに標準模型からのずれが見え始めている。現在のところ  $3\sigma$  で実験値と標準模型計算との差があるが、それを  $5\sigma$  まで追及して、その差を新物理の兆候として確定するためには、実験精度と共に理論に関する不定性の排除が求められる。格子 QCD は QCD に関する寄与を厳密に求めることができるため、これまでの  $e^+e^-$  衝突実験をもとに現象論的評価で求められていたミュオン  $g-2$  のハドロンの寄与の値と比較可能となる。それにより、理論値の信頼性を高められる。

一方で、陽子崩壊に関しては、大統一理論 (GUT) で知られている崩壊過程であり、実験では依然として未観測な現象であるが、神岡に建設予定の HyperKamiokande や他国の地下実験においても主要な物理量として注目されている。GUT は標準模型を内包して力の統一を预言する理論機構である。陽子崩壊はその貴重な証拠であり、これまでの観測から得られた陽子寿命の下限値 (現在は  $8.2 \times 10^{33}$  年) は GUT を基本とした様々なモデルの選定に利用される。GUT モデルは、しかし、低エネルギー領域では標準模型からの寄与、特に QCD についてはカイラル摂動論を扱いその値を使って陽子寿命を導くが、その計算には大きな不定性が残っている。格子 QCD ではその不定性を取り除いた厳密値を求めることができるため、その値を提唱して GUT

预言の信頼性を高めることは重要となる。

このプロジェクトでは、以上の 2 つの物理量に関する準備段階として、基本的な計算手法の確立と、現実的なゲージ配位上におけるモンテカルロ計算の実施に向けたパラメータチューニングを行った。この成果を元にして、一般利用で大規模計算に移行する計画である。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

ミュオン  $g-2$  では、ベクトル型相関関数の高精度計算、陽子崩壊においては核子-演算子-中間子の 3 点関数の計算が必要となる。これらの計算をより効率的に進めるために AMA 法を用いた低精度計算を多数行う必要があり、そこで用いる近似解の構成にチューニングが必要である。近似解にはディラック行列の逆を反復法で求めるが、その前処理として deflation 法を用いた高速化が重要である。チューニングには、その deflation 法で構成する低固有モードの部分ベクトル空間の大きさを計算コストと近似解の精度とのバランスで最適解を見つけることに集中する。本年度の簡易利用では、そのパラメータ探索に GW-MPC 及び GW-ACSG を用いた。パラメータの種類として、domain decomposition を用いた SAP 法におけるドメイン空間のサイズ、deflation ベクトルの個数、及び反復回数が増えられる。本年度の利用では SAP 法を用いた計算コードの開発とその実装を主に行った。用いた格子サイズは  $32^3 \times 64$  で、SAP 法ライブラリの実装と、FX100 上における SIMD 最適化を行った後に、その性能評価と AMA 法の比較小さい格子を用いたチューニングを行った。

## 3. 結果

添付した別の pdf ファイルに SIMD 化した後の性能評価をまとめた表が載せてある。この表では、全体の性能コストの大部分をしめる、ディラック行列の逆

計算に対する Flops 数とキャッシュミス率、SIMD 化率がまとめてある。主に計算コードのカーネル部分であるディラック行列とフェルミオンベクトルとの積計算に、SIMD 繰り込み関数を使用してその高速化を実現した。ディラック行列積計算には単精度・倍精度計算と必要となる。各精度に SIMD 化を手動で組み替えて、従来のコンパイラによる自動生成の計算コードと比べて 4 倍弱の性能向上が達成できた。その計算コードを利用して、AMA 法における SAP 法の利用とパラメータチューニングの結果、これまでの低固有モードを逐次計算する場合と比較して、特に deflation 空間の構成に要する時間に 10 倍以上の高速化が実現できた。

#### 4. まとめ

平成 28 年度の簡易利用では、大規模計算に移る前段階として、計算コードの開発を行った。AMA 法においては SAP 法の利用とそのパラメータチューニングを行い、deflation 法で用いる低固有モードの部分ベクトル空間の構成に要する時間の大幅な削減が実現できた。

#### 5. 今後の計画・展望

この計算で得られた結果は、一般利用において大規模計算を実行して、 $96^4$  格子上のミュオン  $g=2$  の計算で使用している。さらに、陽子崩壊の格子計算のためのカーネルとしても実装した。今後は、これらのパラメータを用いた大規模な陽子崩壊の計算実行や、より大きい格子上のミュオン  $g=2$  の格子 QCD 計算に応用していきたい。

平成 28 年度 利用研究成果リスト

**【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】**

1. Georg von Hippel, Thomas D. Rae, Eigo Shintani, Hartmut Wittig, “Nucleon matrix elements from lattice QCD with all-mode-averaging and a domain-decomposed solver: an exploratory study”, Nucl. Phys. B914, 138(2017)
2. Eigo Shintani, Thomas Blum, Taku Izubuchi, Amarjit Soni, “Neutron and proton electric dipole moments from  $N_f=2+1$  domain-wall fermion lattice QCD”, Phys. Rev. D 93, 094503 (2016)

**【国際会議などの予稿集、proceeding】**

1. Renwick J. Hudspith, Randy Lewis, Kim Maltman, Eigo Shintani, “Strong coupling constant from Adler function in lattice QCD”, Mod. Phys. Lett. A 31, 1630037 (2016).

**【国際会議、学会などでの口頭発表】**

1. (Poster) “Lattice study of finite size effect in  $g-2$  HVP”, The international workshop on future potential of high intensity accelerators for particle and nuclear physics (HINT2016), J-PARC, Tokai, December 5-8, 2016.
2. (Oral) “Lattice study of finite size effect in  $g-2$  HVP”, Towards high precision muon  $g-2$ /EDM measurement at J-PARC, J-PARC, Tokai, Japan, November 28-29, 2016.
3. (Oral) “EDM calculation on the lattice”, ECT\* workshop, Baryons over antibaryons: the nuclear physics of Sakharov, 25 July 2016, 29 July 2016, Torento, Italy.
4. (Oral) “Strong coupling constant from Adler function in lattice QCD”, MITP workshop Determination of fundamental parameters in QCD, 7-12 March 2016, Mainz, Germany.
5. (Oral) “Strong coupling constant from vector vacuum polarization function on the lattice”, RBRC workshop in Lattice gauge theories 2016, 9-11 March 2016, BNL, USA

**【その他（プレスリリース、学術会議以外の一般向けの講演など）】**

なし