

課題名(タイトル):

格子 QCD による標準模型の精密検証

利用者氏名:

○新谷栄悟(1)、藏増嘉伸(2)

理研における所属研究室名:

- (1) 計算科学研究センター連続系場の理論研究チーム
 (2) 筑波大学大学院数理物質科学研究科

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

本研究はミュオン粒子異常磁気能率 ($g-2$) を、格子 QCD を用いた第一原理計算から厳密に求めることで、これまでの実験測定において標準模型における理論値からの差を決定することを目的としている。

背景として、ミュオン粒子 $g-2$ では BNL が 2004 年に発表した精密測定の結果と近年の高次摂動計算の結果とに 3 シグマの有意な差があることが分かり、この違いは素粒子標準模型では説明がつかない新しい物理の兆候として知られている。現在、この差を「ミュオン粒子 $g-2$ 異常」と呼ばれている。様々な高エネルギーモデルがこの差の説明するために提唱されているが、しかし、その予言の信頼性を高めるためには基礎となる「ミュオン粒子 $g-2$ 異常」の精度をさらに向上させることが、実験測定と理論計算の双方に求められている。この事実から、次期実験計画としてフェルミ国立研究所と JPARC において、ミュオン粒子 $g-2$ の超高精度測定が立ち上がっている。これらの実験では実験精度を BNL 実験の 3 倍以上向上させて、「ミュオン粒子異常」の発見に繋げようとしている。一方で、理論計算では高次摂動計算の精度は実験値の 100 倍以上に達しているために、次の高精度化は非摂動計算に移っている。この計算では主に強い相互作用である量子色力学 (QCD) が寄与する。従来の現象論的な評価法を用いた場合、ミュオン粒子 $g-2$ に含まれる量子効果のあるハドロンチャンネルに限定したうえで、対応する別の実験測定である e^+e^- 衝突や τ 崩壊過程から求めている。実際に、上記の現象論的な評価が「ミュオン粒子 $g-2$ 異常」の理論計算としてよく参照される。しかしながら、問題点として、厳密な理論計算としてはすべてのハドロンチャンネルを含んだ量子効果を取り入れて、ミュオン粒子 $g-2$ を求めなければならないが、高次項を無視していることに起因する系統誤差の可能性が残っている。この点を排

除した理論計算を実現して、これまでの現象論的な評価法とは独立した理論値を提供するために、格子 QCD を用いた第一原理計算を実施することが本研究の動機である。この非摂動計算によって、十分な精度の理論計算を提供できれば、次期実験計画と並行してミュオン粒子 $g-2$ の精度向上に貢献することができる。

2. 具体的な利用内容、計算方法

ミュオン粒子 $g-2$ 計算では図 1 で表される主要項のダイアグラムの計算に HOKUSAI を用いた。この計算では、QCD と QED とに分解して計算することが可能であるため、QED 計算には摂動展開からの解析解を用いて、QCD 計算で格子 QCD を用いた第一原理計算を行う。QED の解析関数は、カーネル関数形として運動量の 2 乗で表される。その QED カーネルと QCD カーネルとの積の無限大積分が図 1 のダイアグラムの評価式である。そのため、QCD カーネルの数値積分値を本研究により求める。QED との接続部分はベクトル型の演算子に関わるので、QCD 計算において、ベクトル型の相関関数から対応するダイアグラムを抜き出す。その方法として、本研究では時間依存する相関関数を格子 QCD 計算により求めたうえで、QED カーネルを掛け合わせて、時間積分に置き換える手法をとる。この方法は、求める相関関数が単純であることと、時間依存性を見ることで、ハドロンの影響を考慮しやすいという利点がある。ただし、時間無限大積分による外挿と、関連する有限体積効果が大きく関わるので、その点を注意深く考慮しなければならない。さらに格子化に伴う系統後評価を行い、最終的なミュオン粒子 $g-2$ を与えることができる。

そこで、本研究では格子 QCD 計算における有限体積効果の定量的な計算と、格子化誤差を系統的に調べて、連続極限におけるミュオン粒子 $g-2$ 値の決定を試みた。具体的には、物理的なパイ中間子を含んだ 2 つの格子サイズを持つゲージ配位 ($L=5.4$ fm と 10.8 fm、カッ

トオフ 2.33 GeV) と同様の体積でより細かい格子間隔を持つゲージ配位 (L=10.1 fm、カットオフ 3.08 GeV) 上で計算を行った。

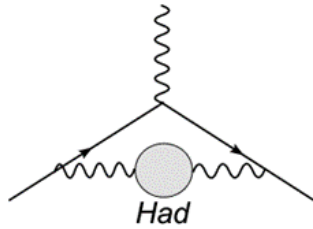


図 1: ミュー粒子 $g-2$ 計算におけるダイアグラム。「Had」部分が数値計算でターゲットとする、QCD が関わる部分。

3. 結果

まず、有限体積効果について本研究の結果を示す。図 2 では、カットオフ 2.33GeV における 2 つの体積、L=5.4 fm と 10.8 fm でのミュー粒子 $g-2$ の格子 QCD 結果の差を示している。この図では、さらにカイラル摂動論との比較のために、おなじパイ中間子質量における結果もプロットしている。この結果から、格子 QCD による数値的な解析において、単純なカイラル摂動論では不十分であった有限体積効果が現れることが確認できた。実際にカイラル摂動論との比をとると 1.7 倍近くの差が現れる可能性があることがわかる。これは、L=5-6 fm で格子 QCD 計算とカイラル摂動論を組み合わせる評価しているほかのグループの結果には捉えきれない有限体積効果が存在することを意味している。

次に、図 4 では格子 QCD 計算において用いるベクトル型演算子の違いによる格子化誤差の変化を調べた結果を示す。格子上ではベクトル型演算子は local 型と point-splitting 型として定義可能であるが、この図から local 型を用いた方が、格子化の誤差は小さく抑えられることが分かった。次に、図 4 では、その被積分関数を用いてミュー粒子 $g-2$ を求めた結果を、クォークごとにプロットした。Local 型では 2 つのカットオフの違いがほとんど見られないことがわかる。ただし、チャームクォークについてはその質量が重いことによる $0(am_c)$ の効果により違いが表れているが、全体的な影響は小さい。この結果をもとに、local 型のフィットから得られるミュー粒子 $g-2$ の格子 QCD 計算の結果を図 5 に示した。この図から、本研究結果と BMW および RBC-UKQCD の結果と誤差内で一致する結果が得られた。しかし、ETMC や HPQCD および、現象論モデルの結果と

は 1σ 以上大きくなっている。この原因として考えられるのは、ETMC や HPQCD の結果で見逃されている有限体積効果やカイラル外挿における系統誤差と考えられる。非物理的なシミュレーション点からの外挿ではモデルに依存するために評価が難しいうえに、この物理量には物理的なパイ中間子近傍で強くパイ中間子質量に依存するので、正当な評価ができていない可能性がある。興味深いのは、格子 QCD の計算ではミュー粒子 $g-2$ の値は BNL 実験値とよく合っている点である。本研究結果は現象論的モデルの評価方法に何かしら考慮されていない寄与が隠されていることを示唆している。

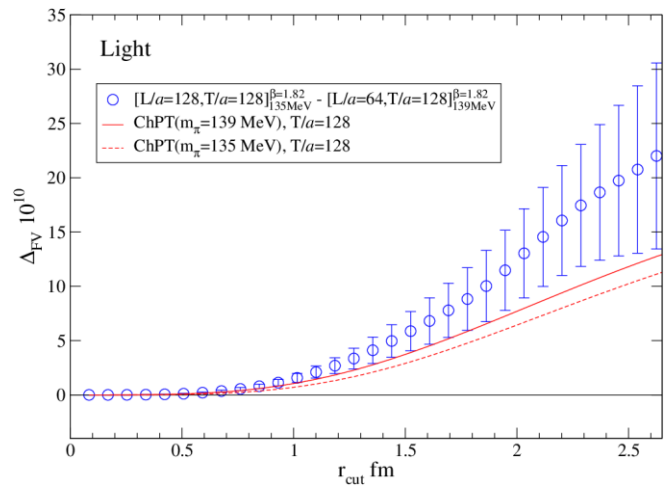


図 2: 格子 QCD 計算による有限体積効果の結果とカイラル摂動論との比較。

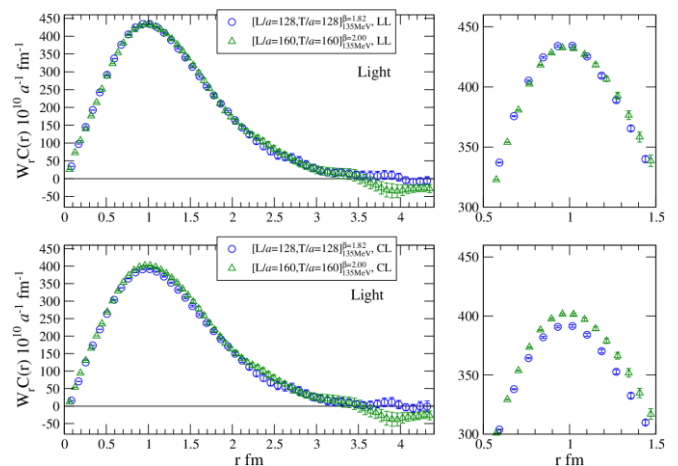


図 3: ミュー粒子 $g-2$ の格子 QCD 計算において必要となる被積分関数のソース間距離依存性。異なるシンボルはカットオフの違いを表す。上図は演算子に local 型のみ、下図は local と point-splitting 型を用いた結果である。

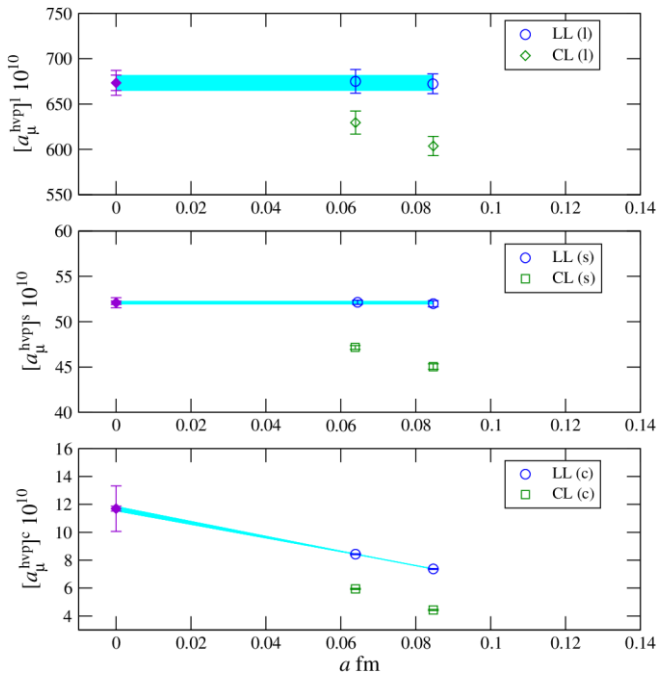


図 4: 格子 QCD 計算における格子化誤差の影響。上からアップ・ダウンクォーク、ストレンジクォーク、チャームクォークでの格子間隔依存性を示す。図に示してある直線バンドはフィット関数を示す。異なるシンボルは演算子の違いを表している。

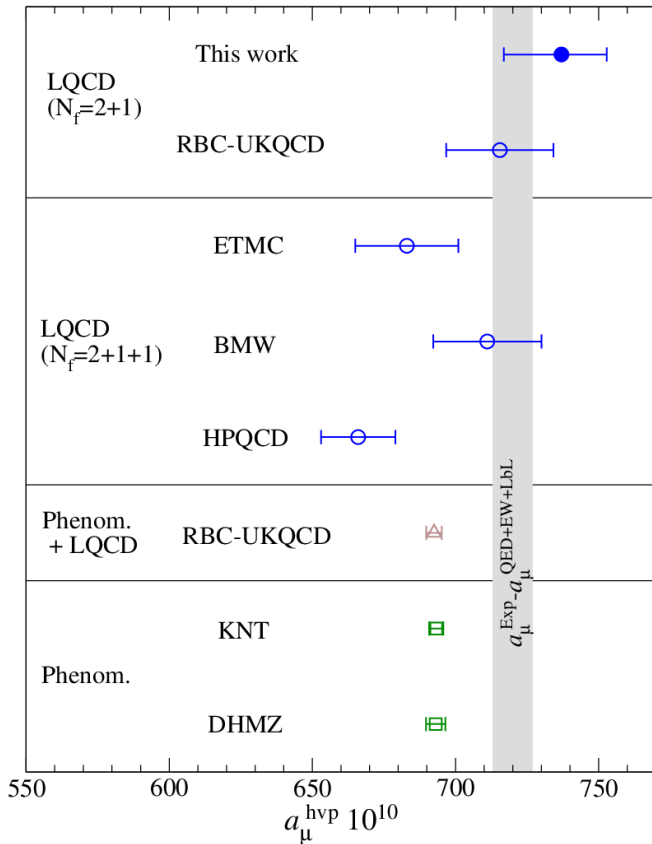


図 5: この研究で得られた、ミュオン粒子 $g-2$ の格子計算とほかのグループとの比較。現象論モデルの計算結果もあわせてプロットしている。縦のバンドは、BNL 実験と QED と電弱相互作用、QCD の光光散乱ダイ

アグラムを合わせた理論評価との差を表す。

4. まとめ

平成 30 年度の研究成果では、ミュオン粒子 $g-2$ 計算の格子 QCD 計算を高精度で行うことができ、連続極限、有限サイズ効果についての系統的な解析を行った。この解析の結果、格子 QCD は BNL 実験の結果を再現することができることを示唆している。さらに従来の現象論モデルにはなんらかのモデル依存性（例えばマルチハドロン状態の寄与など）が隠されていた可能性を提案した。この結果は、これからのミュオン粒子 $g-2$ 実験や高エネルギーモデルのパラメータ領域に大きなインパクトを与える。

5. 今後の計画・展望

本研究成果ではいくつかの評価しなければいけないダイアグラムが抜けている。これらは、基本的には非接続ダイアグラムに関連しており、ひとつはクォーク非接続ダイアグラム、もう一つはアイソスピンの破れである。これらのダイアグラムの寄与は相対的に小さいが、高精度化を追求するには無視はできない。今後は、この 2 つの系統誤差の評価に移行したい。また、同時に連続極限の信頼性を高めるために、さらに細かい格子上で計算実行して、その最終値を決定していきたい。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

1. Eigo Shintani, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, and Takeshi Yamazaki, “Nucleon form factors and root-mean-square radii on a $(10.8 \text{ fm})^4$ lattice at the physical point”, *Phys. Rev. D* 99, 014510 (2019), pp1—23
2. Taku Izubuchi, Yoshinobu Kuramashi, Christoph Lehner, Eigo Shintani, “Finite-volume correction on the hadronic vacuum polarization contribution to muon $g-2$ in lattice QCD”, *Phys. Rev. D* 98, 054505 (2018) pp1-13.

【会議の予稿集】

1. Eigo Shintani, “Proton and neutron electromagnetic form factor and charge radius in lattice QCD”, *Hyperfine Interact* (2018) 239, 29.
2. Taku Izubuchi, Yoshinobu Kuramashi, Christoph Lehner, Eigo Shintani, “Lattice study of finite volume effect in HVP for muon $g-2$ ”, *EPJ Web of Conferences* 175, 06020 (2018).
3. Renwick Hudspith, Randy Lewis, Kim Maltman and Eigo Shintani, “ α_s from the Hadronic Vacuum Polarisation”, *EPJ Web of Conferences* 175, 10006 (2018).

【口頭発表】

1. Eigo Shintani, “Lattice calculation of nucleon form factor at physical point”, 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2018), Tsukuba, Japan, 12—17 November, 2018.
2. Eigo Shintani, “Analysis of systematic error in hadronic vacuum polarization contribution to muon $g-2$ ”, LATTICE2018, Kellogg Hotel and Conference Center, Michigan, USA, 22-28 July 2018.