

格子 QCD を用いた標準模型の検証と新物理探索

Precision test of the standard model and search for the new physics in lattice QCD

新谷 栄悟

理化学研究所計算科学研究センター

1. 研究目的

格子 QCD 計算を利用して、素粒子原子核分野において注目されている、ミュオン異常磁気能率 ($g-2$) およびバリオン数の破れに関わる行列要素の第一原理計算を実施する。これまでの理論計算では、QCD に従う強い相互作用を取り入れた計算実行は困難であり、モデルを仮定した系統誤差の評価があいまいであった。したがって、今後のミュオン粒子 $g-2$ や陽子崩壊に関する実験事実を正確に記述するためには、モデルに依存しない第一原理計算が必要となる。そこで、本研究ではこれらの物理量を格子 QCD 計算から高精度で求めることで、将来の高強度実験との比較、標準模型の検証および、それを超えた新しい物理探索に重要なインプットとなる理論計算を与えることを目的とする。

2. 研究成果の内容

平成30年度の OFP を利用した格子 QCD 計算では、PACS グループが中心となって生成したゲージ配位上で、上記の物理量を計算した。具体的なパラメータとして、 $2+1$ フレーバーの動的クォークを含んだ格子サイズ 128^4 、格子カットオフ 2.33GeV および 160^4 、格子カットオフ 3.09GeV のゲージ配位で、パイ中間子質量は 135MeV である。物理量の計算を効率よく行うための AMA パラメータチューニングを施すことで、効率性が3倍以上向上される。OFP 上での計算実行ではメニーコアに対応したコード開発と SIMD 命令とスレッド化を組み合わせた、細かいコーディングを行った。

ミュオン粒子 $g-2$ 計算では、ベクトル型カレントの2点関数を高精度で求めて、重み関数との積を時間積分した結果として与えられる。この際に、重み関数の構成から、時間方向のほぼすべての成分が高統計で求まっている必要がある。格子 QCD 計算における相関関数の時間成分が大きい領域は、シグナル・ノイズ比が指数関数的に悪くなる傾向があり、この誤差を小さくすることが最大の課題である。本研究では、AMA 法を格段に改良して、より効率化が図られる domain-decomposition 法と deflation 法を組み合わせた最適化を行い、高統計結果が得られた。図1にこれまで得られた結果を示す。左図に表すように、 $t=1\text{fm}$ ぐらいでピークがあり、その後なだらかに減少していく。右図には、格子カットオフ依存性を調べるために、二つのカットオフ間の結

果の差をプロットした。local カレントを用いた場合、格子カットオフ依存性が小さくなっていることがわかる。ただし、クォーク質量が大きいとその質量に関連した格子化に伴う系統誤差が顕著になることがみてとれる。

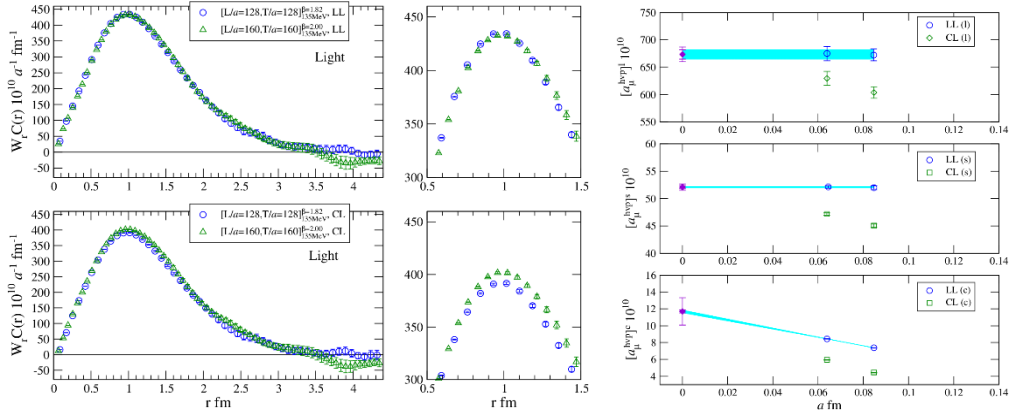


図1：(右図) ベクトル型カレントの2点関数と重み関数との積の時間方向依存性。2つのシンボルはlocalおよび保存カレントの違いを表している。(左図) カットオフ依存性を表す。上からlight、ストレンジ、チャームクォークフレーバーについて表している。実線は連続極限をとるための外挿線を表している。

3. 学際共同利用として実施した意義

OFFPを利用した計算は、これまでの格子QCDでは達成できていないほどの高精度でかつ大規模なシミュレーションを実施できた。この結果、物理的なゲージ配位上で正確にミュー粒子 $g-2$ を求めることができた。この成果は、全体の誤差がまだ2%と実験値と比較すると大きいですが、これまでより正確な系統誤差の影響を調べることができた。特にモデルを介することがなく、格子QCD計算のみでミュー粒子 $g-2$ を求められたことは意義がある。

4. 今後の展望

今後は、これまでの結果を踏まえて、より大規模な計算実施に移行する計画である。PACSグループが生成した 256^4 ゲージ配位は3点目のカットオフ上のデータが得られるため、連続極限を信頼できる方法で求めることができる。加えて、ベクトル型カレントの2点関数の構成上必要となる非接続ダイアグラムも同時に求める。このダイアグラムは全体の寄与としては小さいが、統計精度が向上すれば無視できない大きさとなる。非接続ダイアグラムをいかに効率的に遂行するかを今後系統的に調べる方針である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. Finite-volume correction on the hadronic vacuum polarization contribution to muon $g-2$ in lattice QCD, Phys. Rev. D 98, 054505 (2018) pp1-13.
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).

(2) 学会発表

1. “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.

(3) その他

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
COMA			
Oakforest-PACS	○	680,000	272,000
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			