

受付 ID	17a19
分野	素粒子

# レプトン及び核子間に働く電磁気相互作用による形状因子の第一原理計算

## Ab initio study of electromagnetic form factor of lepton and nucleon

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 ( $g-2$ ) および陽子電荷半径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  $g-2$  や電荷半径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、それを越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 29 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  $64^4$ 、格子カットオフ  $2.33\text{GeV}$  のゲージ配位で、パイ中間子質量は  $139\text{MeV}$  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  $g-2$  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。4MeVのパイオン質量の違いが、 $t=1\text{fm}$ を超えたあたりで現れている。右図には、その質量依存性を調べるために、二つの質量間の結果の差をプロットした。わずかに、1fmから135MeVパイオンの値が大きくなっていることが分かる。この差はカイラル摂動論で表される違いとよく一致している。

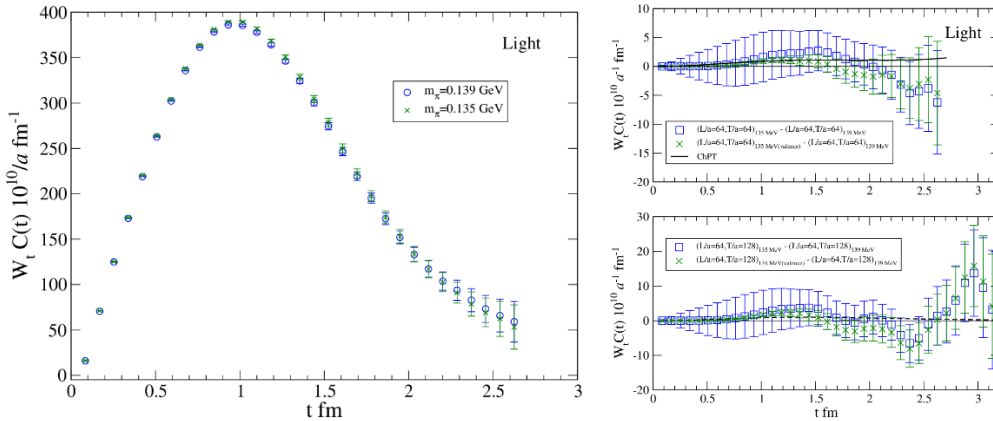


図1：(右図) ベクトル型カレントの2点関数と重み関数との積の時間方向依存性。2つのシンボルは139MeVパイオンと135MeVパイオンの2つの質量の違いを表している。(左図) 右図にあるそれぞれのパイオン質量における時間積分結果の差。上図は時間方向が64、下図は128とした結果を表す。実線はカイラル摂動論で予想される領域を示す。

### 3. 学際共同利用として実施した意義

OFP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オン粒子  $g-2$  における質量依存性を確かめることができた。この成果は、少なくとも4MeV程度の小さな質量差はカイラル摂動論によって説明可能であることが分かり、今後の研究計画に意義深い結果が得られた。

### 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 $128^4$ ゲージ配位は $64^4$ と比較して、同じ格子カットオフ、物理的なパイオン質量を持ち、体積のみが16倍大きくなっている。この違いは、ミュオン粒子  $g-2$  の有限体積効果の大きさを正確に見積もることが可能となる。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. 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).

(2) 学会発表

1. ”Lattice study of finite volume effect in the HVP contribution to muon  $g-2$ ”, Workshop on hadronic vacuum polarization contributions to muon  $g-2$ , KEK, Japan, February 12, 2018.
2. “Lattice study of finite volume effect in HVP for muon  $g-2$ ”, The 35th International Symposium on Lattice Field Theory, Palacio de Congressos, Granada, Spain, 18-24 June 2017.
3. “Lattice study of finite size effect in the leading order of hadronic contribution to muon  $g-2$ ”, First Workshop of the Muon  $g-2$  Theory Initiative, Q Center, Chicago, USA, 3-6 June 2017.

(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
HA-PACS/TCA			
COMA			
Oakforest-PACS	○	328000	82000
※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。			