

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610053

研究課題名(和文) ミュー粒子の異常磁気能率におけるQCD力学の格子計算方法の開拓

研究課題名(英文) Innovation of calculation method of QCD contribution to the muon g-2 by lattice QCD simulation

研究代表者

早川 雅司 (Hayakawa, Masashi)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20270556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：QCDにより誘導される光子間の散乱がミュー粒子の異常磁気能率に生ずる量子効果(HLbLの寄与)は、幾つかの中間子を変数とするモデルの評価しかされていない。その結果を含む異常磁気能率の標準モデルの予言が測定値から優位にずれている現状では、このHLbLの寄与を場の理論の第一原理より計算することが不可欠である。本研究では、特にconnected型のファインマン図から及ぼされる効果を、格子QCD数値実験によって計算する方法を開拓し、第一原理計算としては最初の結果を報告した。また、disconnected型のファインマン図すべてを含む寄与を計算する方法のアイデアを一つ提案した。

研究成果の概要(英文)：The hadronic light-by-light scattering contribution is one of the QCD contribution which could be significant to the muon g-2, but has been only estimated by the hadronic model calculation. The standard model prediction containing the result obtained as such disagrees with the experimental value of the muon g-2. Before concluding that this difference should come from the unknown structure not included in the standard model, it is quite important to calculate the hadronic light-by-light scattering contribution by the lattice QCD simulation. We demonstrated the feasibility of our method invented to simulate the contribution induced from the connected-type hadronic light-by-light scattering diagram, and reported the first lattice QCD result for this contribution. I also proposed one idea for the method that computes all contribution including disconnected-type diagrams.

研究分野：素粒子理論

キーワード：magnetic moment of muon QCD contribution lattice QCD simulation

1. 研究開始当初の背景

現在のミュオン粒子の異常磁気能率では、素粒子の標準模型による予言値と、実験による測定値の間にずれが見られる。しかし、予言値の一部をなす、QCD が光子間の散乱を介してミュオン粒子の異常磁気能率に及ぼす寄与 (HLbL の寄与、図 1) は、ハドロン模型による評価しかされていない。この評価値は、まさにずれと同程度の大きさを呈している。この状況下で急務な課題は、この HLbL の寄与を、クォーク・グルーオンのゲージ理論である QCD で直接計算し、揺るぎない標準模型の予言値を得ることで、測定値と比較、及び、その模型の正しさを再考することである。

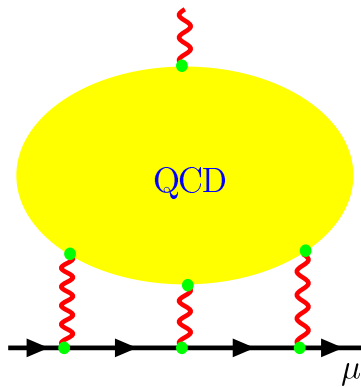


図 1: QCD が誘導する光-光散乱振幅 (HLbL) の寄与。黄色の QCD 部分が、3つの仮想光子の伝搬を介して、ミュオン粒子(黒線)の磁氣的性質に影響を及ぼす。

2. 研究の目的

本研究の目的は、HLbL の寄与を格子 QCD シミュレーションによって計算する方法を開拓することで、場の理論の第一原理計算による確固たる予言値を得る基盤を構築することである。

3. 研究の方法

格子 QCD シミュレーションにより、「直接的な方法」で HLbL の寄与の計算を試みる場合、「京」の全性能で 100 年以上の時間が要される。よって、HLbL の寄与を計算するには、方法の開拓が不可欠である。O(100)年要する計算コストを飛躍的に減らす唯一の方針は、HLbL の寄与にとって重要な量子効果を優先的に計算する機能(importance sampling)を、計算方法に組み込むことであろう。

例えば、図 1 中の QCD 部分とミュオン粒子をつなぐ仮想光子に流れる運動量が大きくなると、光子の伝搬関数による抑制が働くであろう。また、光-光散乱振幅の大きさも、光子の運動量が π 中間子の質量に比べて十分大きくなれば、運動量の大きさに従い減少する。対象としている量に関するこのような観察から、「直接的な方法」は、非常に小さい寄与に膨大な計算機時間を費やす方

法である可能性が高いであろう。そして、importance sampling を行う "weight" として如何なるものを選択するかが、計算が機能するか否かを支配する。

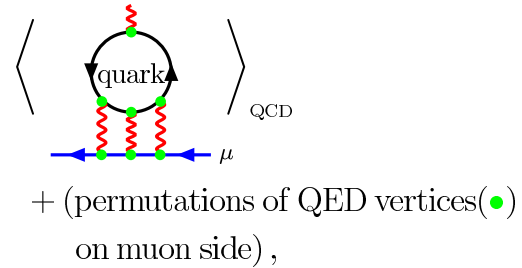


図 2: connected 型ファインマン図からの HLbL の寄与

HLbL の寄与を計算する第一段階として、図 2 に示されている connected 型のファインマン図 (クォーク部分の 4 つの電磁相互作用 vertex がすべて同一のクォーク・ループ上にあるファインマン図) から誘導される寄与を計算するために考案した nonperturbative QED 法 (図 3) の実用性について、シミュレーションを実行することで確認する。この方法では、クォーク部分とミュオン粒子部分の間を媒介する光子のうち 2 個を、格子 QED シミュレーションの中で確率的に生成する。そのため、図 3 のように quenched QED の配位にクォークとミュオン粒子を共に結合させて平均をとる。その際、図 3 の第 2 項のようなクォーク部分とミュオン粒子部分が一つの光子のみで媒介される不必要な量子効果も生成されるため、この寄与を第 1 項から差し引きする。

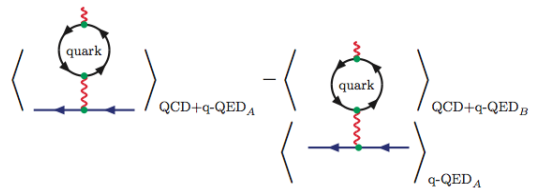


図 3: nonperturbative QED 法. q-QED は格子 quenched QED に関する平均を表す。

ここでは、格子ゲージ理論特有の相互作用による寄与 (図 12 中の M_{C_i} , S_{C_i} に相当する寄与) は図示していない。

また、nonperturbative QED 法とは全く別の方法による connected 型ファインマン図からの HLbL の寄与の計算方法の実行可能性についても調べる。

並行して、すべてのファインマン図からの寄与 (図 2、図 4、図 5、図 6、図 7、図 8、及び図 9) を計算する方法を考案する。

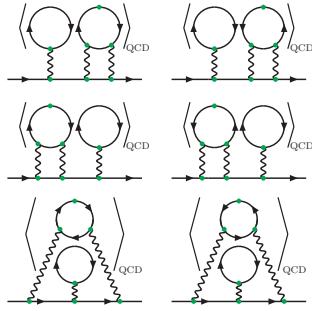


FIG. 1: $(3_E, 1)$ -type diagrams. The diagrams with $O(a)$ local QED vertices are not shown.

図 4: $(3_E, 1)$ 型ファインマン図の寄与

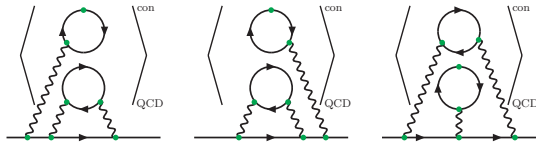


FIG. 1: $(2_E, 2)$ -type diagrams

図 5: $(2_E, 2)$ 型ファインマン図の寄与

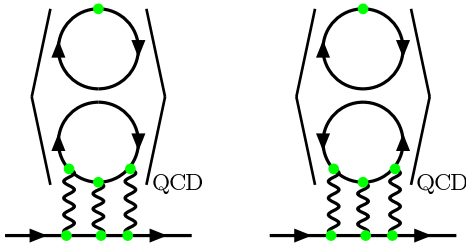


FIG. 1: $(1_E, 3)$ -type diagrams

図 6: $(1_E, 3)$ 型ファインマン図の寄与

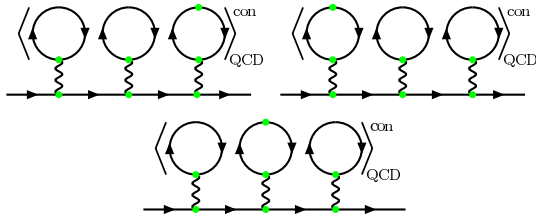


FIG. 1: $(2_E, 1, 1)$ -type diagrams

図 7: $(2_E, 1, 1)$ 型ファインマン図の寄与

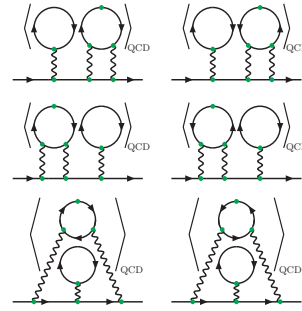


FIG. 1: $(3_E, 1)$ -type diagrams. The diagrams with $O(a)$ local QED vertices are not shown.

図 8: $(1_E, 1, 2)$ 型ファインマン図の寄与

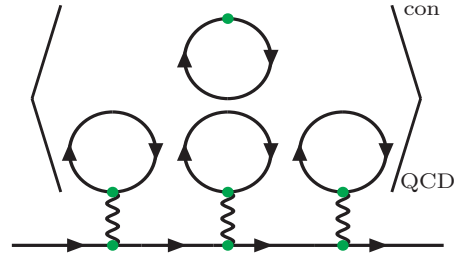


FIG. 1: $(1_E, 1, 1, 1)$ -type diagrams

図 9: $(1_E, 1, 1, 1)$ 型ファインマン図の寄与

4. 研究成果

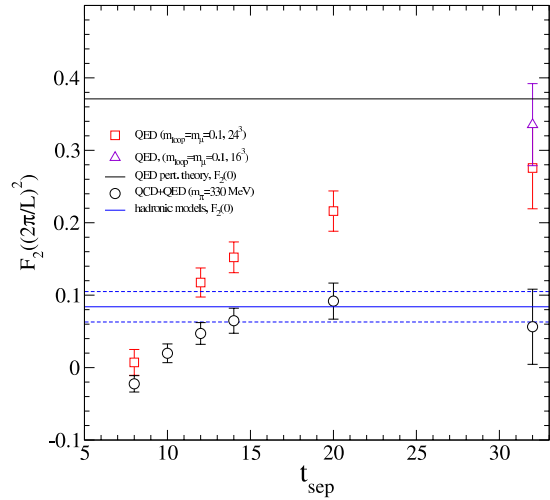


図 10: Nonperturbative QED 法による connected 型 HLbL の寄与 (黒点). 黒帯は hadronic 模型による評価値.

図 2 の Connected 型のファインマン図から誘導される HLbL の寄与を格子 QCD シミュレーションによって計算する方法として、図 3 の nonperturbative QED method を試みた結果を、図 10 (黒色のドット) に示す。誤差は統計誤差のみである。正確には、縦軸は、外部

QED 頂点から流れ込む運動量が有限体積下で最小となる値での磁気形状因子の測定値である。横軸はミュオン粒子を作り出す機能を持った演算子を置いた3次元超平面の時刻と、ミュオン粒子を作り出す機能を持った演算子が存在する3次元超平面時間の時刻の差(t_{sep})である。まず、重要な点は、統計誤差に埋もれないシグナルの存在を確認することができたことである。さらに、 t_{sep} 依存性がほぼなくなり、plateauを形成しているデータの集合が確認できた。この部分の値は、シミュレーションに用いた格子の体積、格子間隔のもとでの、0でない最小運動量における磁気形状因子の値であるが、黒帯で示されたハドロン模型の予言値と偶然にも矛盾していない。ただし、図10の格子QCDによる結果は、図2のconnected型ファインマン図の寄与だけに相当していることを強調しておく。

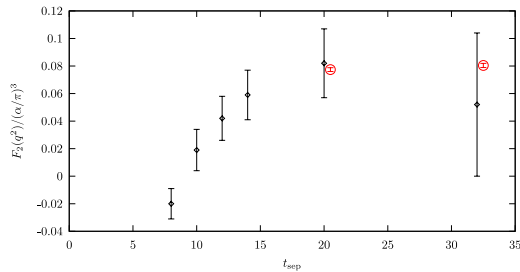


図 11: Moment 法による connected 型 HLbL の寄与 (赤点)。黒点は、nonperturbative QED 法による結果。

Nonperturbative QED 法の成功の後、全く別の方法として、moment 法を試みた。図 11 に moment 法による結果(赤点)を示す。この moment 法による結果は、nonperturbative QED method による結果(黒点)と矛盾していない。さらに、moment 法によって、統計誤差を大幅に縮減することができた。以上の HLbL の寄与の結果は、第一原理計算による初めてのものである。

しかし、これまでのところ、connected 型ファインマン図しか計算していない。HLbL の寄与としては、実際には、図 4、図 5、図 6、図 7、図 8 及び図 9 に示されるような合計 6 種類の disconnected 型のファインマン図からの寄与もある。ハドロン模型による計算がほぼ正しいと仮定した場合、以下の考察より、disconnected 型ファインマン図の寄与は重要となり得ることが予想される。ハドロン模型計算で主要な量子効果は、中性擬スカラー粒子の媒介により誘導されていた。特に、 η' の媒介による寄与も比較的大きな寄与を与えている。 η' の質量の起源には、disconnected 型のファインマン図が本質であった。よって、ハドロン模型による計算が妥当な際に、disconnected 型のファインマン図をすべて無視してしまうと、 η' は擬 Goldstone boson として媒介するため、 η' の媒介による寄与を過

大評価してしまう危険性がある。この疑問に対する解答を得るには、格子 QCD シミュレーションを実行するしか術はない。そこで、nonperturbative QED method を拡張し、dynamical (QCD+QED) シミュレーションをすることで、すべてのファインマン図からの寄与を計算する方法(図 12)を一つ考案し、国際会議で発表した。図 12 の中に現れる K_D の項が、他の項に含まれる 2 つ以上の非自明な非連結成分から成る寄与を完全に取り去る上で必要である点も指摘した。

$$\frac{1}{3} \{ (\mathcal{M}_C - \mathcal{S}_C) + (\mathcal{M}_{C'} - \mathcal{S}_{C'}) + (\mathcal{M}_D - \mathcal{S}_D) - \mathcal{K}_D \}$$

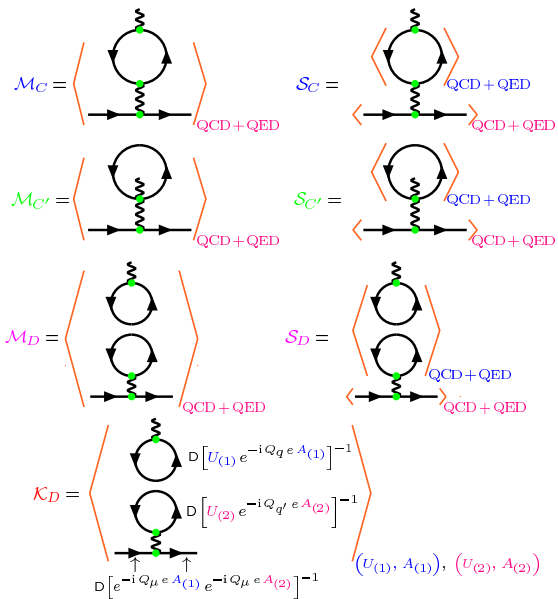


図 12: 全 HLbL の寄与のための nonperturbative QED 法。ゲージ配位は、(QCD + QED) の系で生成されたものを想定。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① T. Blum, S. Chowdhury, M. Hayakawa and T. Izubuchi, "Hadronic light-by-light scattering contribution to the muon anomalous magnetic moment from lattice QCD", Physical Review Letters 114, no. 1, 012001 (2015). Doi:10.1103/PhysRevLett.114.012001 (査読あり).
- ② T. Blum, N. Christ, M. Hayakawa, T. Izubuchi, L. Jin and C. Lehner, "Lattice Calculation of Hadronic Light-by-Light Contribution to the Muon Anomalous Magnetic Moment", Physical Review D 93, no. 1, 014503 (2016). Doi:10.1103/PhysRevD.93.014503 (査読あり).

〔学会発表〕（計 1 件）

M.Hayakawa, 33rd International Symposium
Lattice Field Theory, Kobe, July 14 ~
July 18, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川雅司 (HAYAKAWA, MASASHI)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20270556