

令和 4 年 5 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2021

課題番号：16K05317

研究課題名(和文) ミュー粒子の異常磁気能率におけるQCD非摂動力学の解明

研究課題名(英文) Nonperturbative QCD dynamics in muon anomalous magnetic moment

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ミュー粒子の異常磁気モーメントは素粒子理論で原理的に予言可能な量である。現時点での素粒子の標準模型は、陽子などの原子核を、クォークとグルーオンによる「強い相互作用」のゲージ理論(QCD)で記述する。磁気モーメントに対する素粒子模型と実験値との精密な比較を果たすためには、QCDからの影響を定量的に評価することが必須である。本研究では、QCDの寄与のうち、純粋に理論的な分析を要する寄与に関して数値シミュレーションによる結果を世界に先駆けて提示した。その結果、素粒子標準模型によるミュー粒子の異常磁気モーメントの理論値における潜在的な不確かさを削除するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミュー粒子異常磁気能率(muon $g-2$)の実験による測定値と既知の素粒子構造による理論値の間には「ずれ」が窺われる。

理論値はQCD(陽子などの原子核を形成する力の理論)が光-光散乱振幅を介してmuon $g-2$ に及ぼす効果(HLbLの寄与)を含む。QCDのモデル計算でしか計算できなかったHLbLの寄与の大きさはずれと同程度であるため、ずれが新素粒子構造の存在に由来する点を断定できなかった。

本研究はQCDによるHLbLの寄与の理解を世界に先駆けて実現してこの難点を解決した。改定後の理論値は2021年に発表されたmuon $g-2$ の次世代実験の測定値と比較され、未知の素粒子構造の存在を示唆した。

研究成果の概要(英文)：The anomalous magnetic dipole moment of the muon, so called the muon $g-2$, is one of the quantities that can be predicted from any renormalizable model of elementary particles, such as the Standard Model. In the Standard Model, proton and all other nucleons are described by QCD including quarks and gluons, the gauge theory of strong interactions. In order to realize accurate comparison between theory and experiment of muon $g-2$, it is indispensable to understand the effect of QCD on muon $g-2$ qualitatively. This research presents the first result for the QCD effect which requires purely theoretical analysis by the numerical simulation. This helps to remove the theoretical uncertainty whose size has not been known in the theoretical prediction on the muon $g-2$ from the Standard Model.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ミュー粒子 異常磁気モーメント QCD 格子ゲージ理論 数値シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ミュオン粒子の異常磁気能率は、その高精度測定値と理論解析値を照合することにより、未知の素粒子構造の探索を可能とする量である。本研究の開始当時(2018年)において最良の測定値はブルックヘブン国立研究所(BNL)で1997年から2007年に渡る実験で得られた測定値であるが、その値(図1のBNLg-2(2007))は、既知の素粒子構造(素粒子標準模型)による予言値から3.3のずれを呈していることが分かった。他方、素粒子標準模型の検証は、LHCによる新粒子の直接観測の試み・ニュートリノ実験などを通じて徹底的に行われたが、新素粒子構造を要求する結果は得られなかった。このような背景下で、ミュオン粒子の異常磁気能率の測定値、素粒子模型による予言値の双方を再検証することが必要となった。2007年以降、測定値のさらなる誤差の改善する実験プロジェクトの立案・準備が実施されてきた。理論値に関しては、電気的な力のみによる主要な寄与のさらなる高精度計算と複数グループによる結果の相互比較を経て、その部分に誤りがある可能性は完全に否定された。原子核を形作っている強い相互作用(QCD)による寄与、および最も保守的には、弱い相互作用(中性子を崩壊させる要因となる力)による寄与、に対する予言値(これら3つをすべて加えたものが、標準模型の予言値)に関しては再考察の余地が残されていた。

2. 研究の目的

ミュオン粒子異常磁気能率に対する素粒子標準模型からの予言値を確固たるものとするため、QCD(原子核を形作っている強い相互作用のゲージ理論)の寄与のうちで純粋に理論的考察を要する、QCDによる光-光散乱を介する寄与(HLbLの寄与)に関して場の量子論の第一原理に基づいた予言値を得ることが本研究の目的である。

本研究以前では、HLbLの寄与はハドロン模型などにに基づき分析されていた。このようにして得られた結果が素粒子標準模型からの予言値の一部として組み込まれていたが、それがQCDの本来的な量子効果をどれだけ正しく近似しているかという点を定量的に議論することはできなかった。実のところ、ハドロン模型計算によるHLbLの寄与の大きさは、ミュオン粒子異常磁気能率における理論値と実験値の間のずれと同じオーダーである。本研究は、「HLbLの寄与の真の大きさは従来の計算結果の(2~3)倍程であり、理論・実験間のずれは解消する」という可能性の成否を問うものである。

3. 研究の方法

QCDによる光-光散乱を介する寄与(HLbLの寄与)に対して場の量子論の第一原理に基づいた予言値を得るためには、QCDの非摂動効果を定量的に評価する必要がある。格子で近似された時空間上を計算機の中で実現し、そこでQCDの実験を行うことで興味ある物理量の予言を引き出すのが、格子QCD数値シミュレーションである。本研究の一つの目標は、格子QCDシミュレーションに基づきHLbLの寄与の予言を引き出す上で実質的に有効な計算方法を一つ確立することである。

1997年稼働のブルックヘブン国立研究所による実験結果が公表される度に、HLbLの寄与に関して格子QCDシミュレーションによる解析の必要性は認識されているが、直接的な方法では地球上の資源では永久に計算不可能な種の問題と位置付けられていた。当該研究者らは使用可能な計算機環境で計算可能な方法の候補を模索・立案してきた。実際に大規模のシミュレーションを実施してその方法の有効性を検証し、その中で改善、もしくは必要があれば、方法の一からの見直しを行うことで、HLbLの寄与の真の値に迫る。

4. 研究成果

QCD(原子核を形作る強い相互作用のゲージ理論)が光-光散乱振幅を介してミュオン粒子の異常磁気能率に誘導する寄与に関し、格子ゲージ理論シミュレーションによる分析結果を世界に先駆けて得ることができた。

より正確には、アップ・クォーク、ダウン・クォーク、ストレンジ・クォークの質量が等しい極限で残る2種のファインマン図の寄与に関して大規模数値実験を行なった。HLbLの寄与は格子QCDの理論からは、一つは光子がすべて一つのクォーク・ループ上にあるタイプ(connecting diagram(図2))と呼ばれるものと、そうでないもの(disconnected diagram(図3))に分けることができる。一般に、格子QCDシミュレーションではdisconnected diagramの寄与を分析す

ることが大変難しい。採択した方法は disconnected diagram の寄与における統計揺らぎの制御を可能とした。その上で、disconnected diagram は connected diagram と「同程度の大きさ・逆符号」で異常磁気能率に寄与することが分かった。そして、今回の格子シミュレーションによる結果は、模型計算による結果と誤差の範囲で合致することが分かった(文献[1])。この研究成果は次のような意義を有する：「QCD による光-光散乱振幅が誘導する寄与の真の値が、模型計算によって得られた結果の3倍である」という可能性は否定された。研究成果は、ミュー粒子の異常磁気能率における標準模型による予言値と実験値とのずれをさらに理論的に補強するに至った。この結果は、本課題の成果の一つである標準模型による予言のコンセンサス値の決定に貢献した(文献[2]：the top-cited hep-ph paper of 2020)。フェルミ国立研究所(FNAL)における次世代ミュー粒子異常磁気能率実験が稼働後一年間で蓄積したデータの解析結果を2021年に発表した(文献[3])が、それは以前のBNLによる測定値と矛盾しないことが確認された(図1)。測定値は本課題で得られた標準模型の予言値と比較され、両者の間のずれの存在が再確認された。

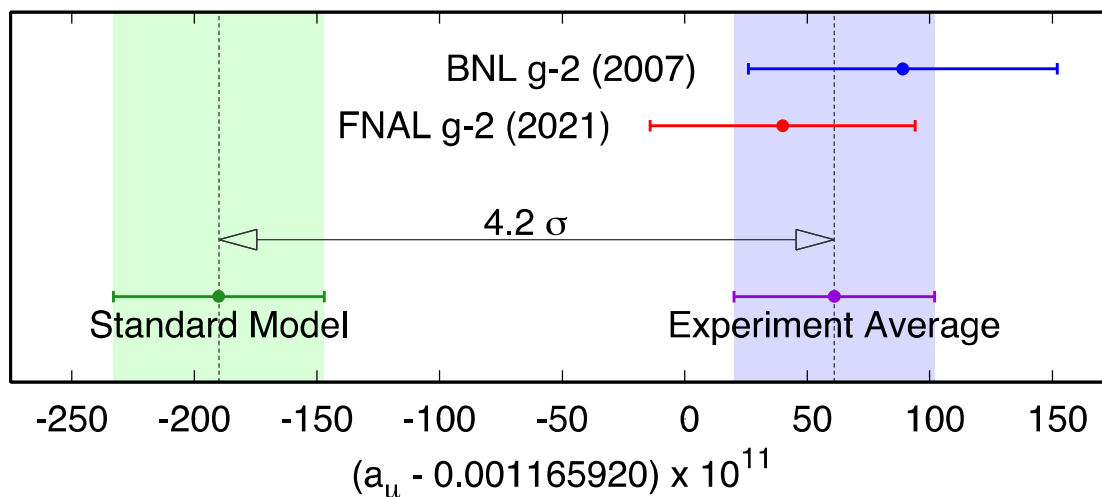


図 1：ミューオン異常磁気能率における実験値と理論値の比較。実験値はBNLで得られた測定値とFNALで得られた測定値の平均、理論値は、文献[2]で得られた素粒子標準模型による予言値を表す。

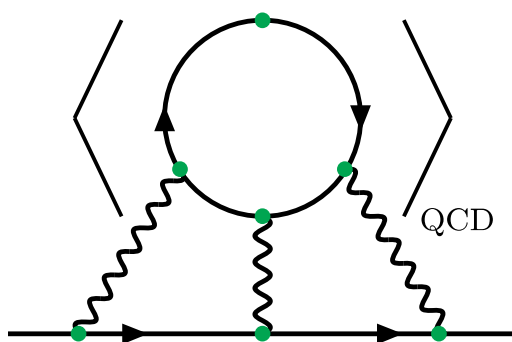


図 2：connected diagram

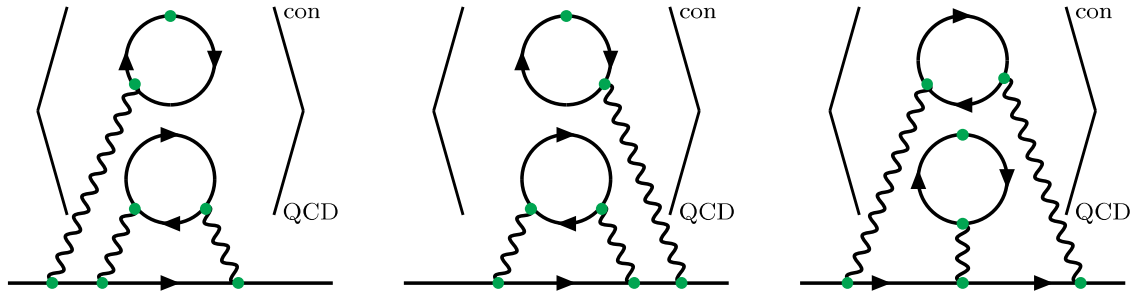


图 3 : (2,2)-型 disconnected diagram

文献

[1] T.Blum, N.Christ, M.Hayakawa, T.Izubuchi, L.Jin, C.Jung and C.Lehner,
 ``Hadronic Light-by-Light Scattering Contribution to the Muon Anomalous Magnetic
 Moment from Lattice QCD,"
 Phys. Rev. Lett. 124, no.13, 132002 (2020).

[2] T.Aoyama, et al.
 ``The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model,"
 Phys. Rept. 887, 1-166 (2020).

[3] B.Abi et al. [Muon $g-2$],
 ``Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm,"
 Phys. Rev. Lett. 126, no.14, 141801 (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 T. Blum, N. Christ, M. Hayakawa, T. Izubuchi, L. Jin, C. Jung and C. Lehner	4. 巻 124
2. 論文標題 Hadronic Light-by-Light Scattering Contribution to the Muon Anomalous Magnetic Moment from Lattice QCD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 132002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.132002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T.Aoyama and et.al.	4. 巻 887
2. 論文標題 The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Reports	6. 最初と最後の頁 1,166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physrep.2020.07.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T.Blum, N.Christ, M.Hayakawa, T.Izubuchi, L.Jin, C.Jung and C.Lehner	4. 巻 96
2. 論文標題 Using infinite volume, continuum QED and lattice QCD for the hadronic light-by-light contribution to the muon anomalous magnetic moment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 34515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.034515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T.Blum, N.Christ, M.Hayakawa, T-Izubuchi, L.Jin, C.Jung and C.Lehner	4. 巻 118
2. 論文標題 Connected and Leading Disconnected Hadronic Light-by-Light Contribution to the Muon Anomalous Magnetic Moment with a Physical Pion Mass	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 020051-020056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.118.022005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 早川雅司
2. 発表標題 Is the theoretical prediction for the muon g-2 really correct ?
3. 学会等名 PPP2016 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 早川雅司
2. 発表標題 Standard model prediction for the muon g-2 : QCD and QED contributions
3. 学会等名 The 1st KEK-KIAS-NCTS Joint Workshop on Particle Physics Phenomenology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 早川雅司
2. 発表標題 Hadronic light-by-light scattering contribution to the muon g-2 from Lattice QCD
3. 学会等名 The 2nd Durham-KEK-KIPMU-KIAS Joint Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------