

令和元年6月6日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05323

研究課題名(和文) ミューオン精密物理で切り拓く次世代素粒子標準模型への道

研究課題名(英文) Road toward the next standard model explored with muon precision physics

研究代表者

野村 大輔 (Nomura, Daisuke)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員

研究者番号：40583555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ミューオンの異常磁気能率 ($\mu\text{on } g-2$) への素粒子標準模型からの予言値のうち、最も不定性の大きな寄与である hadronic leading-order 項と呼ばれる項を計算した。以前の解析と比較して、我々は新しいデータを解析に加えたり、輻射補正に由来する不定性の評価方法を見直したり、データの組み合わせ方を工夫したりするなど、解析の様々な部分に改良を施した。我々の結果によると $\mu\text{on } g-2$ の実験値と理論値との間には 3.7 標準偏差の不一致がある。これは標準模型を超える新物理の寄与である可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子の標準模型を超える新物理が存在するかどうかは素粒子物理学において大きな問題である。我々の得た結果はミューオンの異常磁気能率について標準模型の予言する値と実験値とがあまりよく一致しないことを意味しており、これによって標準模型を超える新物理が存在する可能性はさらに高まったと言える。

研究成果の概要(英文)：We have reevaluated the hadronic leading-order contribution to the muon $g-2$, which has the largest uncertainty in the Standard Model prediction for the muon $g-2$. Compared to our previous analysis, we have included new input data, have reevaluated the uncertainties associated with radiative corrections to the hadronic data, and have improved the way to combine various hadronic data. Our main conclusion is that there is a 3.7 sigma discrepancy between the experimental value of the muon $g-2$ and the Standard Model prediction, which may be a hint of new physics beyond the Standard Model.

研究分野：素粒子物理学の理論

キーワード：ミューオン 異常磁気能率 素粒子の標準模型 強い相互作用

1. 研究開始当初の背景

歴史的に、レプトン異常磁気能率は素粒子物理学の発展に大きな役割を果たしてきた。例えば Schwinger は量子電磁力学 (QED) によるレプトンの磁気能率への輻射補正を初めて計算したが、その値は当時の実験値とぴったり合っていた。このことは QED の正しさを裏付ける証拠の一つとして高く評価されている。また、レプトンフレーバー数の保存則も標準模型が確立する過程において大きなヒントを提供した。ミューオンが電子と光子とに崩壊する過程 ($\mu \rightarrow e\gamma$) は今に至るまで観測されていないが、このことは、電子とミューオンとにそれぞれ対応するニュートリノが存在することを示唆していた。

単に歴史的な意味においてだけではなく、現在でもミューオンの異常磁気能率 ($\mu\text{on } g-2$) やレプトンフレーバー数保存は素粒子物理学に大きなインパクトを及ぼしている。例えば標準模型からの $\mu\text{on } g-2$ の予言値とその実験値との間には 3 シグマ以上の差が報告されていたが、このことは標準模型を超える新しい物理の存在を示唆している可能性があり、さらなる研究が必要であった。また、 $\mu \rightarrow e\gamma$ が観測されていないという事実も、超対称標準模型など、標準模型を超える物理に強い制限を与えている。

$\mu\text{on } g-2$ が新物理探索に与える影響を示す一例として、 $\mu\text{on } g-2$ のずれが超対称標準模型の予言する新粒子からの寄与だった場合に、好まれるパラメータ領域の一部を右図に示す。この図は、超対称粒子、とくにスレプトンやウィーノの質量が 1 TeV 程度であれば、 $\mu\text{on } g-2$ のずれがうまく説明できることを示している。このように、 $\mu\text{on } g-2$ の標準模型からの予言値をなるべく精度よく計算することは、新物理の探索に有効なヒントを与えるものとして極めて重要であった。

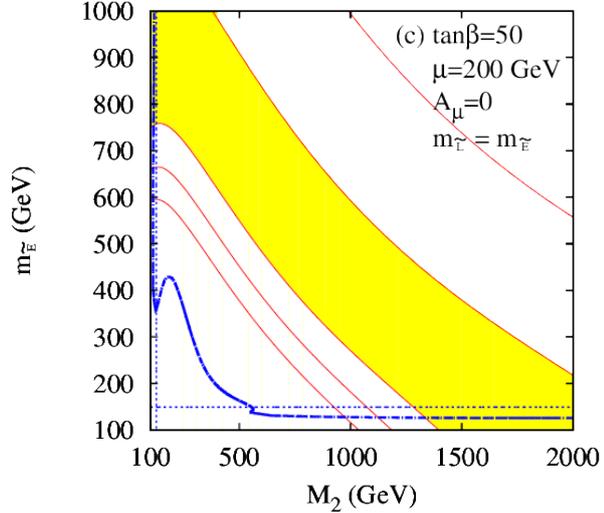


図1 超対称標準模型において、 $\tan\beta = 50$, $\mu = 200$ GeV の場合に $\mu\text{on } g-2$ のずれから示唆されるパラメータ領域の一部 (参考文献 ① から引用)。縦軸はスレプトン質量、横軸はウィーノ質量 (単位はいずれも GeV)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ミューオンの異常磁気能率 ($\mu\text{on } g-2$) やミューオンの稀崩壊、とくにレプトンフレーバー数保存則を破る崩壊、ミューオンの電気双極子能率 (EDM) など、ミューオンの性質を詳細に調べることによって、素粒子物理の標準模型を超える新しい物理を探ることである。そのためには素粒子標準模型からのこれらの物理量に対する予言値を正確に知ることが必要であるため、標準模型からのこれらの物理量、とくに $\mu\text{on } g-2$ に対する標準模型の予言値を高精度で計算することも目的とする。

3. 研究の方法

我々は $\mu\text{on } g-2$ の標準模型からの予言値をアップデートし、同時に解析手法を改良した。

右に、この研究の開始当初における $\mu\text{on } g-2$ の標準模型からの予言値の内訳と実験値とを比較した表を挙げる (参考文献 ② から引用)。この表から、標準模型からの予言値を精度よく評価するためにはハドロンからの寄与を可能な限り精度よく計算することが必要であることがわかる。

| | |
|--|--------------------------|
| QED contributions | 11 658 471.808 (0.015) |
| EW contributions | 15.4 (0.2) |
| hadronic contributions | |
| LO hadronic contributions | 694.9 (4.3) |
| NLO hadronic contributions | -9.8 (0.1) |
| hadronic l-by-l contributions | 10.5 (2.6) |
| Standard Model prediction, $a_\mu(\text{SM})$ | 11 659 182.8 (4.9) |
| experimental value, $a_\mu(\text{exp})$ | 11 659 208.9 (6.3) |
| difference, $\delta a_\mu (\equiv a_\mu(\text{exp}) - a_\mu(\text{SM}))$ | 26.1 (8.0), 3.3 σ |

図2 この研究の開始当初における標準模型からの $\mu\text{on } g-2$ への予言値の内訳。(参考文献 ② から引用)。

muon $g - 2$ への標準模型の予言値のうち、最大の不定性を与える leading-order (LO) ハドロニック項 $a_\mu(\text{had, LO})$ と呼ばれる項は、光学定理および分散関係を利用して、 $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ の全反応断面積 $\sigma_{\text{had}}^0(s)$ の実験データをインプットとして下の式で計算することが可能である：

$$a_\mu(\text{had, LO}) = \frac{m_\mu^2}{12\pi^3} \int_{m_\pi^2}^{\infty} \frac{ds}{s} \hat{K}(s) \sigma_{\text{had}}^0(s)$$

ここで重み関数 $\hat{K}(s)/s$ が低エネルギー領域を強調することから、低エネルギーでの $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ 、中でも $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ のデータ、とくに ρ メソンピーク周辺のデータが最も重要である。

ここで問題になってくる点が、いくつかの実験グループが $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ のデータを出しているがそれらは必ずしも互いにコンシステントなわけではない、という点である。実際、右図からわかるように KLOE 実験と BaBar 実験との間でパイオン形状因子のデータには明らかに違いがある。

このような状況のもとまず問題になるのは、KLOE 実験、BaBar 実験からのデータをどう解析に取り入れればよいかである。この点についての最良の方法はこれらの実験で今のところ見落とされている系統誤差の源を突き止めることであろう。ただ実際にはこの方法は生のデータにアクセスできないとほぼ不可能である。そこで次善の策として、前回の我々の解析ではそれぞれの実験データにおいて系統誤差のエネルギーに依存する成分のうち最大公約数的な部分を実験データの normalization の不定性として考慮に入れ、残りの部分を統計誤差に含めて χ^2 関数を構成しこれを最小化するような $R(s)$ の形を求めている。今回の解析ではこれを見直し、各実験グループによって与えられたデータに基づき covariance matrix をそのまま使って χ^2 関数を構成し、それを最小化するような $R(s)$ の形を求めている。この方法には各実験データを誤差の範囲内で energy-dependent に形を変形させることができるという利点がある。ただしこの方法をそのまま単純に実行すると D'Agostini bias と呼ばれる現象によってバイアスのかかった結果が得られてしまう。これを避けるために参考文献 ③ で提案された「繰り返し (iteration) による方法」を採用してこのバイアスを回避した。

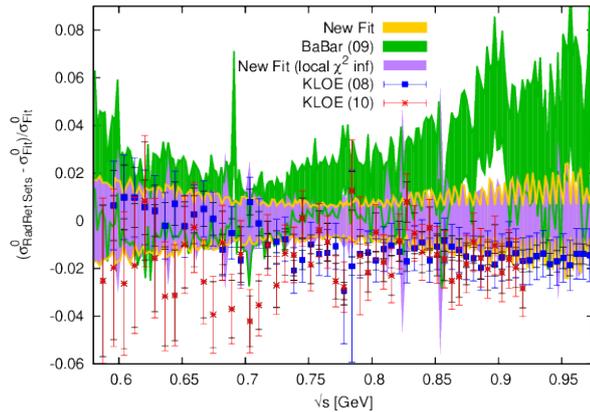


図3 この研究の開始当初におけるパイオン形状因子の実験データのエネルギー依存性 (参考文献 ② から引用)。

4. 研究成果

下の〔雑誌論文〕のリストの ③ の論文において、我々は最新の $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ の実験データを用いて muon $g - 2$ の LO ハドロニック項を評価した。その際、我々が 2011 年にこのテーマに関する解析を論文として発表した後に現れた実験データのうち、我々の解析に関係するものすべてを約 30 本の論文から取り出し、我々の解析に加えた。

これらの解析においては、実験データの normalization error の扱いが重要になる。normalization error が無視できない状況には、データを素朴に組み合わせただけでは D'Agostini bias と呼ばれるバイアスのかかった解析結果が出る恐れがある。今回、我々は下の参考文献 ③ において提唱されたバイアスの恐れのない方法を用いて各実験データを組み合わせた。

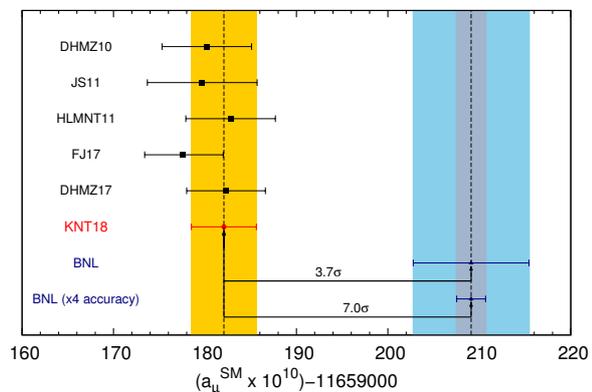


図4 ミューオン異常磁気能率への標準模型からの予言値 (左側のエラーバー) と、実験値 (右の薄い青の帯) との比較。我々の結果 (KNT18) と現在の実験値 (BNL) との間には 3.7 シグマの不一致がある。

また、解析のあらゆる部分を見直し、小さな改良を随所に施した。

論文③における我々の結果によると、 $\mu\text{on } g-2$ への標準模型からの予言値と実験値との間には 3.7 シグマの不一致がある（前ページの図4参照）。このことは標準模型を超える新しい物理が存在する可能性を示唆しており、広く注目を集めている。実際、論文③は Physical Review D 誌の注目論文 (Editors' Suggestion) に選ばれた。また、Inspire 高エネルギー物理学文献データベース (<https://inspirehep.net>) によれば、この報告書の執筆時点 (2019年6月) において論文③はすでに 100 回以上引用されている。

現在 J-PARC と Fermilab とで $\mu\text{on } g-2$ を測る実験が進行中であり、Fermilab 実験グループからは 2019 年中に最初の論文が出るのが期待されている。これらの実験の結果によっては標準模型を超える物理が存在する可能性がさらに高まることも十分に考えられ、世界中の素粒子物理学者がこれらの実験に注目している。

また、 $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ の反応断面積に関連する物理量の例として QCD の結合定数 α_s がある。論文③では $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ の反応断面積の実験データを解析に用いたが、このデータに重み関数を掛けてエネルギーについて積分したものは有限エネルギー和則によって QCD の摂動論と関係づけることができる。我々は論文②において、2GeV 以下のデータと有限エネルギー和則とを用いてデータと QCD の予言とを比べることにより、タウレプトン質量での QCD 結合定数の値を決定した。

<参考文献>

- ① G.-C. Cho, K. Hagiwara, Y. Matsumoto and D. Nomura,
“The MSSM confronts the precision electroweak data and the muon $g-2$,”
JHEP **11** (2011) 068.
- ② K. Hagiwara, R. Liao, A. D. Martin, D. Nomura and T. Teubner,
“ $(g-2)_\mu$ and $\alpha(M_Z^2)$ reevaluated using new precise data,”
J. Phys. **G38** (2011) 085003.
- ③ R. D. Ball, et al. (NNPDF Collaboration),
“Fitting Parton Distribution Data with Multiplicative Normalization Uncertainties,”
JHEP **05** (2010) 075.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① “A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment”
M. Abe, S. Bae, G. Beer, (途中 50 名省略), D. Nomura, (以下省略. 全 96 名)
Prog. Theor. Exp. Phys. **2019** 053C02 (2019), 査読あり.
DOI: 10.1093/ptep/ptz030
- ② “The strong coupling from $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ below charm”
D. Boito, M. Golterman, A. Keshavarzi, K. Maltman, D. Nomura, S. Peris
and T. Teubner,
Phys. Rev. **D98** (2018) 074030, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevD.98.074030
- ③ “The muon $g-2$ and $\alpha(M_Z^2)$: a new data-based analysis”
A. Keshavarzi, D. Nomura and T. Teubner,
Phys. Rev. **D97** (2018) 114025, 査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevD.97.114025

[学会発表] (計11件)

- ① 野村大輔: 「ミューオン異常磁気能率に対する標準理論計算：最近の進展」
(素粒子論領域, 素粒子実験領域, 実験核物理領域 合同企画講演)
日本物理学会 第 74 回年次大会、九州大学、2019 年 3 月 14–17 日.
- ② D. Nomura, “Muon $g-2$: a new data-based analysis”
at the international workshop “ e^+e^- Collisions From Phi to Psi 2019 (Phipsi19)”
February 25–March 1, 2019, Budker Institute of Nuclear Physics and Novosibirsk
State University, Novosibirsk, Russia.
- ③ D. Nomura, “Hadronic vacuum polarization contribution to the muonium HFS
and related topics”
at the workshop “Physics of muonium and related topics”
December 10–11, 2018, Osaka University, Japan.
- ④ D. Nomura, “Muon $g-2$: a new data-based analysis”

at “2018 WPI-next mini-workshop ‘Hints for New Physics in Heavy Flavors’ ”
November 15-17, 2018, Nagoya University, Japan.

- ⑤ 野村大輔, 講義「Muon $g - 2$ の理論」
at “Flavor Physics Workshop 2018”
October 30-November 2, 2018,
Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU),
the University of Tokyo, Kashiwa, Japan.
- ⑥ D. Nomura, “Standard Model prediction for the muon $g - 2$ ”
at “The 20th International Workshop on Neutrinos from Accelerators
(NuFACT 2018)”
August 12-18, 2018, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA.
- ⑦ 野村大輔, A. Keshavarzi, T. Teubner: “Improved and updated Standard Model
prediction for muon $g - 2$,”
日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学、2017 年 9 月 12–15 日.
- ⑧ D. Nomura, “Hadronic Leading Order Contribution to the Muon $g - 2$ ”
at “International Workshop on Flavour changing and conserving processes
(FCCP 2017)”
September 7-9, 2017, Anacapri, Capri Island, Italy.
- ⑨ D. Nomura, “Hadronic Contributions to Muon $g - 2$,”
at workshop “Towards high precision muon $g-2$ /EDM measurement at J-PARC,”
November 28-29, 2016, J-PARC, Tokai, Ibaraki, Japan.
- ⑩ D. Nomura, “Hadronic contributions to muon $g - 2$,”
at workshop “The 6th KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology and
the 2nd Durham-KEK-KIPMU-KIAS Joint Workshop,”
October 24-28, 2016, KIAS, Seoul, South Korea.
- ⑪ D. Nomura, “Status of Calculation of $\alpha_{\text{QED}}(M_Z^2)$ and muon $g - 2$ ”
at workshop “Precision theory for precise measurements at the LHC
and future colliders,”
September 25-October 1, 2016, Quy Nhon, Vietnam.

[その他]

研究者情報データベース (researchmap) : <https://researchmap.jp/dnomura>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。