

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02906

研究課題名（和文）ミュオン異常磁気能率ハドロン寄与の完全な計算

研究課題名（英文）Complete calculation of hadronic contributions to muon anomalous magnetic moment

研究代表者

出淵 卓（Izubuchi, Taku）

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・グループリーダー

研究者番号：60324068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,300,000円

研究成果の概要（和文）：ミュオン粒子の磁場中でのスピン運動の周期へのハドロン寄与と呼ばれる原子核を構成するクォークとグルーオンからの影響を、量子色力学の第一原理計算を行うことによって計算した。ハドロン寄与を現実世界のクォークの質量や電荷に則して、統計誤差を抑え系統誤差を全て評価した計算を行った。その結果、1つめのハドロン真空偏極寄与を0.5%程度、光光散乱寄与を30%程度の精度で決定することが出来た。他の理論計算と合わせて理論値は最新の実験値から標準誤差の4.2倍程度小さく出ており、このずれが理論・実験の誤差によるものなのか、未知の素粒子や相互作用の発見に繋がるのか非常に重大な問題となっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在までに非常に高精度で測定されているミュオン粒子の異常磁気能率と直接付き合わせるものの出来る理論物理からの信頼できる理論値を第一原理計算により導出した。最新の実験値は理論値に比べて既知の素粒子や物理法則では説明のつかない有意なずれを示している。近い将来、日米で今よりもさらに4-5倍程度精度の高い実験が計画されており、理論計算のさらなる進展と合わせて、現在の標準模型と呼ばれる既知の素粒子・物理法則を超えた新発見が近い将来もたらされる可能性が高まっている。

研究成果の概要（英文）：Hadronic contribution to the muon's anomalous magnetic moment, $g-2$, was computed by solving the first principle, Quantum Chromo Dynamics, on a massively parallel computer using discretized space-time lattice.

We compute two different hadronic contributions for quark mass and electric charge of nature. Statistical error of the Monte Carlo integral was highly suppressed, and all systematical errors were taken into account. Our calculation, which gives 0.5% accuracy for Hadronic Vacuum Polarization contribution and 30% error for Hadronic Light-by-Light contribution, predicts a smaller $g-2$ value than that of the latest experimental value by 4.2 times the standard error. It now becomes one of the most exciting issues in fundamental physics whether this discrepancy is due to unknown new particle and/or interaction beyond the Standard Model of particle physics.

研究分野：素粒子理論

キーワード：格子場の理論 素粒子論 ミュオン粒子の異常磁気能率 ハドロン物理 素粒子標準模型

1. 研究開始当初の背景

ミュー粒子は電子と同じ電荷を持つ約200倍重い(荷電)レプトンと呼ばれるスピン1/2を持つ粒子である。磁場中でミュー粒子のスピンが磁場の方向からその反対方向に向きまだ同じ方向に戻ってくるまでの周期は、質量に反比例し比例係数はg因子と呼ばれる無次元の数で表される。ミュー粒子が仮に古典電磁気学に従うならば、g因子は正確に2となる量であるが、現実世界では量子力学の効果でミュー粒子や磁場から放出されまた吸収される素粒子の影響により2から0.1%程度大きくなり、このずれはミュー粒子の異常磁気能率と呼ばれている。

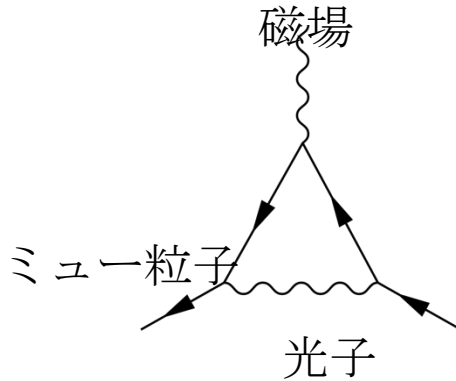


図1 ミュー粒子の異常磁気能率に対応する過程(ファインマンダイアグラム) 矢印付きの実線がミュー粒子。波線は磁場やミュー粒子から放出・吸収される光子を表す。J.シュインガーにより1948年に計算された。

このずれは1940年頃に誕生した量子場の理論と呼ばれる素粒子の基本法則の発見と確立に大きく寄与し続けてきた。実際、この0.1%程度のg因子の2からのずれはミュー粒子が光子を一回放出・吸収する過程を量子電磁気学で計算すると計算出来、量子電磁気学の確立につながった。現在ではこのg因子は非常に高精度(11桁程度)で実験的に測られており、その結果は全ての既知の素粒子の物理法則を表す素粒子標準理論から予言される値と正確に合致しなくてはならないが、2000年頃に米国ブルックヘブン国立研究所では標準理論から有意に異なった結果が報告され、実験値、理論値どちらかに間違いがあるのか、それとも素粒子標準模型では説明のつかない新しい素粒子や物理法則の発見に繋がるのか大きな問題となっていたため、米国のフェルミ研究所と日本のJ-PARCでこのずれの検証とより精密な実験が計画、進行中であった。

尚、電子のg因子はミューオンに比べてさらに正確に測定されているが、ミュー粒子の方が新しい物理に(質量の自乗に比例するため)4万倍程度敏感であると期待されるため、ミューオン粒子の異常磁気能率に注目が集まっている。

2. 研究の目的

本研究ではこの標準模型から得られる理論値の計算、特に今までの理論計算で最も理論誤差の大きい、ミュー粒子や磁場が光子を通して放出吸収するクォークからの寄与を曖昧さ無く求めることを目標とした。クォークは原子核などのハドロンと呼ばれる物質を構成する素粒子で非常に強い力でハドロン中に閉じ込められている。クォークからのg因子への寄与(ハドロン寄与とも呼ばれる)には以下の2つの図に示すようにミュー粒子が放出・吸収する光子を通じてクォークと反クォークを生成消滅する過程(この光子とクォークの部分は量子電磁気学での最低エネルギー状態である真空中に仮想的にハドロンが生成・消滅する過程と同じであることから、ハドロン真空偏極寄与 Hadronic Vacuum Polarization (HVP)と呼ぶ)と、磁場からクォーク・反クォークが生成され、ミュー粒子と3つの光子を通じて繋がるハドロン光光散乱寄与(2つの光子がハドロンを放出吸収してまた2つの光子になることから、丁度光と光の散乱に対応する)。ハドロンから1つの光子を通じてミュー粒子と繋がる過程は光の伝搬への影響として真空偏極の過程に取り入れられており、またハドロンから出た2つの光子がミュー粒子に繋がる過程は対称性から起きないので、この光光散乱がハドロンが関わる寄与として、真空偏極の次に大きなものとなる。

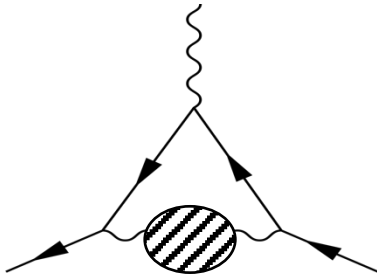


図 2 ハドロン真空偏極寄与。斜線の部分が光子から放出されるクォーク反クォーク対から出来たハドロンを表す。

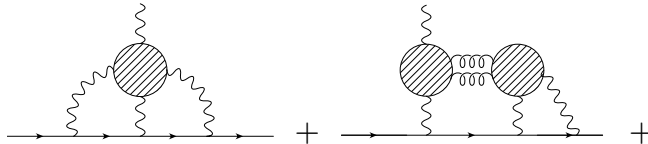


図 3 ハドロン光光散乱寄与。左側が一番寄与の大きな主要部、右側が次に主要な寄与。両者はクォークがどのように繋がっているか（左図ではクォークは一つのループ、右図では2つのループをなす）が異なる。この他にも6種類の異なるつながり方をするクォークの寄与がある。

Contribution	Value $\times 10^{11}$
Experiment (E821)	116 592 089(63)
HVP LO (e^+e^-)	6931(40)
HVP NLO (e^+e^-)	-98.3(7)
HVP NNLO (e^+e^-)	12.4(1)
HVP LO (lattice, $udsc$)	7116(184)
HLbL (phenomenology)	92(19)
HLbL NLO (phenomenology)	2(1)
HLbL (lattice, uds)	79(35)
HLbL (phenomenology + lattice)	90(17)
QED	116 584 718.931(104)
Electroweak	153.6(1.0)
HVP (e^+e^- , LO + NLO + NNLO)	6845(40)
HLbL (phenomenology + lattice + NLO)	92(18)
Total SM Value	116 591 810(43)
Difference: $\Delta a_\mu := a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{SM}}$	279(76)

表 1 異常磁気能率 $(g-2)/2$ の内訳。HVP が真空偏極寄与。HLbL が 光光散乱寄与。QED は量子電磁気のみからの寄与（図 1 とその高次効果に対応）。Electroweak は電弱相互作用からの寄与。

これらのハドロン寄与は異常磁気能率全体への影響は真空偏極寄与が約 2 万分の 1、光光散乱はさらにその約 100 分の 1 という極小の寄与であるが、最新の実験の誤差は光光散乱の半分以下の誤差で、将来はさらにその 4 倍から 5 倍程度精度の高い実験が予定されている。理論の誤差に関しては、この 2 つのハドロン寄与の誤差が支配的であり、現在及び近未来の実験精度に見合う精度は真空偏極寄与を 0.2-0.5% 程度の誤差で、光光散乱を 10% 程度の寄与で決定することが求められている。これだけ高精度の実験と付き合わせる理論計算は現実世界の素粒子の運動を忠実に計算し、それでも残る様々な種類の誤差を全て完全に評価し尽くした値を求めなくてはならない。

3. 研究の方法

現実世界に忠実な完全な計算を行うために本研究では、クォークが運動する時空間を格子状に離散化し、その格子上でクォークや反クォークが前記の 2 つ（真空偏極）ないし 4 つ（光光散乱）の光子の放出・吸収をする確率の振幅を、量子色力学と呼ばれる量論的に正しい第一原理のモンテカルロ積分を行う事により解く格子量子色力学の大規模数値計算を行った。

現実世界のクォークの持つ質量・電荷を忠実に計算するために今まではほとんど行われてこなかった、量子色力学と量子電磁気学を同時に格子上で計算し、クォークのスピンに関わる重要な対称性であるカイラル対称性と呼ばれる対称性を格子状でも保ったままの理論形式（ドメインウォール フェルミオン形式）を用いていることが特色となる。

目標とする精度を目指して 真空偏極の計算では、モンテカルロ積分の統計誤差を計算コストのより低い近似計算を組み合わせる All Mode Average 法を、ハドロンの中のクォークの運動の主要部分となる低エネルギー固有状態を数千個分計算し、その部分は正確に計算し残りの数億から数十億の自由度に関しては統計的に偏りのないモンテカルロ計算を行うことによって行った。

クォークの低エネルギー部分の計算は疎視化した格子上での計算と元の精密な格子上での計算を繋げるマルチグリッド法を考案して高効率化している。

真空偏極寄与は、光子が様々なハドロンになりまた光子に戻る現象であるが、特に光子間の距離が遠くなるとエネルギーの低いハドロン、特に様々なハドロンの中でも質量が最小であるパイ中間子が2つ伝搬する過程が大きな寄与をもたらす。この性質に注目して目的とする光子から光子への過程だけでなく、2体のパイ中間子が生成され光子になる過程やその逆をも計算しそれらの複数の過程の情報を合わせることによって遠距離部分の計算精度を大きく改善することに成功した。これらの2体パイ中間子はお互いに強い相互作用を通じて力を及ぼし合うが、その相互作用（2体パイ中間子の散乱相互作用）を正しく取り入れたこととなっている。

今までの多くの格子量子色力学の計算では、6種類あるクォークの内最も軽いアップとダウンクォークの質量差を無視したアイソスピン対称近似を行いまたクォークの持つ電荷もゼロとして扱っている。これらの近似は真空偏極寄与で目的とする精度では許されない近似となり、現実世界のアップ・ダウンクォークの質量と電荷を使って計算する必要がある。これらの寄与（アイソスピン対称性の破れの寄与）も、対応する過程を計算知ることによって行った。この計算は格子計算としては新しい先進的な計算であり、ミュー粒子の異常磁気能率という高精度が必要な計算のために開発した。アイソスピンの破れの計算は他にも多くの高精度が必要な物理にとって必要な技術要素であり多くの応用が期待できる。

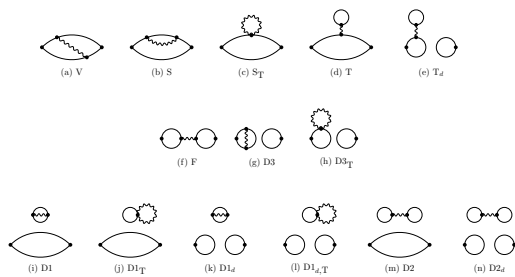


図 4 真空偏極のアイソスピンの破れの効果を計算するのに必要なファインマンダイアグラム。

4. 研究成果

以上述べた様々な工夫を凝らした計算の結果、ハドロン真空偏極寄与については我々の格子計算結果と電子・陽電子が対消滅してハドロンへ崩壊する実験の振幅を表す比（R比）の精度のエネルギー部分を合わせて目的とする 0.5% 程度の精度を達成した。ただし、この R比を使うところは実験からの数値を使っており、純粋な理論物理計算ではない。R比を使わなかった場合の我々の結果の精度は 2-3% 程度の精度で最終的な目標にはまだ達していないのでそれを目指して現在も計算を進行中である。

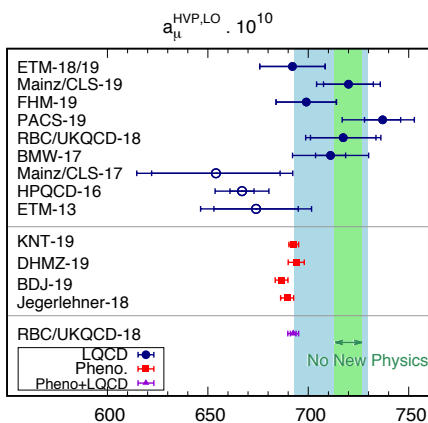


図 5 真空偏極の計算結果のまとめ。RBC/UKQCD-18 が本研究結果。水平線より上が、本研究を含む格子計算のみの結果。水平線の間は4つの結果は電子・陽電子のハドロンへの崩壊散乱実験(R比)からの結果。二つめの水平線の下が格子計算とR比のそれぞれの誤差が小さいエネルギー領域についての合算したハイブリッド値。”No New Physics”の両矢印で示した範囲が、ミュー粒子の異常磁気能率の実験結果。

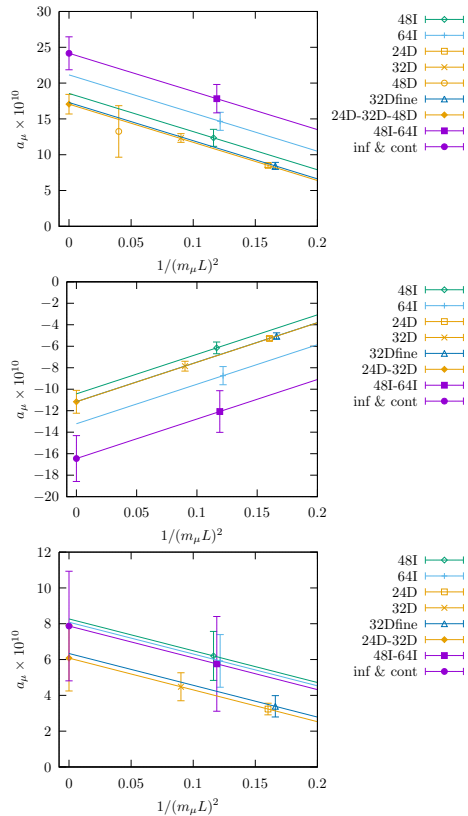


図 6 光光散乱寄与の主要部（上図）、次に主要な部分（中図）を計算している格子の大きさの逆数の自乗の関数として表した図。横軸がゼロとなる外挿値が求めたい格子の体積が無限大の極限。異なるシンボルは格子間隔のサイズの違いや、ミュー粒子と光子の計算方法の違いを表す。主要部と次主要部をを足した合計が下図。

ハドロン光光散乱寄与に関しては、複数あるクォークのつながり方の内、主要となる 2 つの寄与に関してはそれぞれ目標とする約 10% の精度を達成したが、これらの 2 つの寄与は符号が逆でお互いに予想外に強い打ち消し合いが起こることが判明した。このため、4 種類のつながり方の総合計としては 30% 程度の精度に留まっており、こちらもさらなる計算を進めている。

図 5 に示したように、格子計算、R 比共に、ミュー粒子の異常磁気能率の実験結果からのずれを示している。ずれの大きさは 理論・実験両方の誤差の 3.7 倍程度と有意な水準で、両者に間違いがなければ素粒子標準模型では説明のつかない新しい素粒子や新物理法則が存在することを示唆する。

2021 年 4 月 7 日には フェルミ研究所から 最新のミュー粒子の異常磁気能率の結果が報告され大きな話題となった。2000 年のブルックヘブン研究所の実験結果（本報告で使っている実験値）と誤差・中央値共に無矛盾で、両実験を合わせて素粒子標準模型からのずれは誤差の 4.2 倍と未知の現象を捉えている可能性がより高くなった。フェルミ研究所では数年先に今の 4-5 倍程度精度の高い報告を目指し、日本の J-PARC でも同様の精度で異なった実験手法での実験が計画中で、本研究を含む理論計算のさらなる進展と合わせて、現在の標準模型と呼ばれる既知の素粒子・物理法則を超えた新発見が近い将来もたらされる可能性が高まっている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Blum Thomas, Christ Norman, Hayakawa Masashi, Izubuchi Taku, Jin Luchang, Jung Chulwoo, Lehner Christoph	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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Aoyama T., 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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Bruno Mattia, Izubuchi Taku, Lehner Christoph, Meyer Aaron	4. 巻 LATTICE2018
2. 論文標題 On isospin breaking in τ decays for $(g-2)_{\mu}$ from Lattice QCD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 135
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.334.0135	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Boyle Peter, Hudspith Renwick James, Izubuchi Taku, Juettner Andreas, Lehner Christoph, Lewis Randy, Maltman Kim, Ohki Hiroshi, Portelli Antonin, Spraggs Matthew, RBC and UKQCD Collaborations	4. 巻 121
2. 論文標題 Novel $ \langle V_{us} \rangle $ Determination Using Inclusive Strange Decay and Lattice Hadronic Vacuum Polarization Functions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 202003 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.121.202003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Izubuchi Taku, Kuramashi Yoshinobu, Lehner Christoph, Shintani Eigo	4. 巻 175
2. 論文標題 Lattice study of finite volume effect in HVP for muon g-2	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06020 ~ 06020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817506020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Izubuchi Taku, Kuramashi Yoshinobu, Lehner Christoph, Shintani Eigo, PACS Collaboration	4. 巻 98
2. 論文標題 Finite-volume correction on the hadronic vacuum polarization contribution to the muon g ₂ in lattice QCD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054505 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.054505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Maltman Kim, Hudspith Renwick, Izubuchi Taku, Lewis Randy, Ohki Hiroshi, Zanotti James	4. 巻 CKM2016
2. 論文標題 $ V_{us} $ from tau decays in theory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science PoS CKM2016	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.291.0030	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Blum Thomas, Christ Norman, Hayakawa Masashi, Izubuchi Taku, Jin Luchang, Jung Chulwoo, Lehner Christoph	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 034515 1-11
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 Maltman K., Hudspith R.J., Izubuchi T., Lewis R., Ohki H., Zanotti J.M.	4. 巻 287-288
2. 論文標題 The inclusive flavor-breaking α_s -based sum rule determination of V_{us}	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear and Particle Physics Proceedings	6. 最初と最後の頁 25 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysbps.2017.03.037	査読の有無 無
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 Blum T., Boyle P.A. A., Golpers V., Izubuchi T., Jin L., Jung C., Juettner A., Lehner C., Portelli A., Tsang J.T., RBC and UKQCD Collaborations	4. 巻 121
2. 論文標題 Calculation of the Hadronic Vacuum Polarization Contribution to the Muon Anomalous Magnetic Moment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 022003 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.022003	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12件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Leading disconnected diagram and other disconnected diagrams
3. 学会等名 Muon g-2 Theory Initiative Hadronic Light-by-Light working group workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Hadronic contributions to muon g-2 - LQCD confronting the most precise experiments -
3. 学会等名 Seminar Tata Institute of Fundamental Research (TIFR), Mumbai, India (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Lattice QCD studies of Muon g-2 and related topics
3. 学会等名 Frontiers in Lattice Quantum Field Theory, IFC, Madrid, Spain (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 HLbL lattice and truncation error in DR
3. 学会等名 g-2 Workshop, 18-22 June, 2018, Mainz, Germany, (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Vus from taus (LQCD)
3. 学会等名 10th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM2018), University of Heidelberg, German during September 17-21 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Inclusive Hadronic Tau decay, Vus and related topics
3. 学会等名 Seminar at Columbia University, 2019-01-28 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Muon g-2 and related topics
3. 学会等名 International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Interplay between R-ratio and Lattice for the muon g-2 HVP
3. 学会等名 First Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Hadronic contributions to muon g-2 and inclusive tau decay
3. 学会等名 Seminar at DESY, Zeuthen, Germany, (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Lattice QCD and selected applications
3. 学会等名 The Inter-institutional meeting in Interdisciplinary Theoretical and Computational Physical Science (ITCPS2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Finite Volume Study for muon g-2 light-by-light contribution
3. 学会等名 Lattice 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Taku Izubuchi
2. 発表標題 Leading disconnected diagram and other disconnected diagrams
3. 学会等名 muon g-2 theory initiative workshop for Hadronic Light by Light held (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018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			
米国	ブルックヘブン研究所	コロンビア大学	コネチカット大学	
英国	エジンバラ大学	サウスハンプトン大学		
スイス	CERN			