

平成23年 5月 10日現在

機関番号： 82401

研究種目： 基盤研究(C)

研究期間： 2007～2010

課題番号： 19540322

研究課題名（和文）

レプトン異常磁気能率への量子電気力学からの寄与

研究課題名（英文） QED contribution to lepton anomalous magnetic moment

研究代表者

仁尾 真紀子 (NIO MAKIKO)

独立行政法人理化学研究所・川合理論物理学研究室・仁科センター研究員

研究者番号： 80283927

研究成果の概要（和文）：

本研究では、電子およびミュオン粒子の異常磁気能率への量子電気力学からの寄与を摂動計算の手法に基づいて求めた。計算プログラムの生成を自動化し、大規模数値計算を行うことで、正確にしかも迅速に答が得られるようになった。電子への8次摂動の寄与を新たに決定し直し、その値を用いて、電磁気学の基本定数である微細構造定数を正確に決定することができた。また、更なる精度の向上に必要な10次の寄与を予備的ではあるが得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

The QED contributions to the anomalous magnetic moments of the electron and muon have been calculated by using perturbation theory. We were able to obtain the results promptly, because we automated program coding and performed large-scale numerical calculation to evaluate the resultant programs. Then the eighth-order contribution to the electron anomaly was renewed. By using the new theory formula, the fine-structure constant, which is a fundamental constant of electro-magnetic force, was precisely determined. Furthermore, we determined the contribution from the tenth-order perturbation, although it is preliminary.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：電子、ミュオン粒子、異常磁気能率、量子電気力学

## 1. 研究開始当初の背景

本研究を開始した 2007 年の前年、2006 年に、ハーバード大学のグループが電子異常磁気能率の測定に成功した。これは 1987 年のワシントン大学の値の約 6 分の 1 の不確定性を持つ画期的なもので、さらに 3 倍程度の精度改良が可能であるとされていた。

一方、電子異常磁気能率の理論は、ほぼ量子電気力学(QED)によって説明がつく。QED の摂動計算によって、微細構造定数の中級数の形で異常磁気能率のとるべき値を予言できる。古く 1948 年の 2 次摂動の項の決定から始まり、2007 年では 8 次摂動までの値が知られていた。2 次、4 次、6 次の項は解析的な値や、複数のグループの数値計算など値として確定したものであるのに対して、8 次は私たちのグループによる数値計算があるのみであった。ハーバード大の 2006 年の実験結果、さらに後に 2008 年に発表された改良値と比較することを考えると、8 次の項を完全に確定し、さらに 10 次の項を新たに計算する必要がある。

QED をはじめ場の理論において、それが正当化できるときには摂動論は非常に強力な手段である。しかし、もっとも単純な QED においてでさえ、8 次いわんや 10 次の計算を行うことは非常に困難なことであり、世界中でもこれを遂行できるのは私たちだけである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、電子異常磁気能率への QED からの寄与、特に 10 次摂動の寄与を決定することにある。この計算の結果として次の 3 つの科学的な成果を目指している。

(a) 電子の異常磁気能率における実験と理論のより高い精度での比較により、QED 自身を検証する。さらに QED の成功を基に発展した場の理論を検証し、素粒子物理学の拠って立つ基礎概念を確かめる。

(b) 電子の異常磁気能率における実験と理論から、物理基本定数の一つである微細構造定数を 100 億分の 1 の相対精度で決定する。科学で使用する他の基礎的物理定数の値を決定し、さらに計量の標準を定めるためにも役立つ。

(c) ミューオンの異常磁気能率においては、現在の理論値と実験値の差は 1.7 から 3.3 標準偏差とされている。素粒子標準模型からの

理論値のうち、最も大きな寄与を占める QED からの寄与を確固たるものとすることで、新物理現象の探索を理論面から手助けする。

## 3. 研究の方法

QED の摂動計算を数値計算の方法で行う。その数値計算プログラムを自動生成できるアルゴリズムを開発し、コードとして作成する。それによって、膨大な量を要求される 10 次の摂動計算のプログラムを、間違いなく迅速に生成した。

これらのプログラムのうち、検証を経たものから、理研の大型コンピュータシステム (RSCC 後に RICC) に移植し、大型数値計算を行い、結果を得た。

数値計算の実行には、通常の実数演算では実数の精度が不足する。これは紫外発散や赤外発散をカウンター項で相殺させているため、桁落ちが起きるからである。このため 4 倍精度演算を実現する高速ライブラリを組み込み、計算の高速化と実現を図る。

## 4. 研究成果

まず、赤外発散の仕組みを、質量くりこみによるものと、頂点関数と同様の振る舞いを示すものの 2 つに起源があることを解明した。それによって 10 次までのすべての赤外発散を除去するアルゴリズムを自動化に組みこむことに成功し、自動化コードが完成した。[2]。

検証も兼ねて、自動化コードで 8 次のプログラムを生成し数値計算を行い、結果を求めたところ、前の結果からずれていることが判明した。そこで、新旧プログラムの徹底検証を行い、旧プログラムのセットのなかに同じでなければならぬものが、違った形で書かれていることを発見した。これによって、8 次の値が改訂され、微細構造定数の値もその不確定性を超えて大きく変更された [1, 3]。この成果に関してはプレスリリースを行った。

8 次のテストを経たことで自動化コードの信頼性が高まった。これとは別に 3 つの自動化コードを制作した。真空偏極のファインマン図に対応するもの、光光散乱を含むファインマン図に対応するもの、さらに頂点関数と波動関数のくりこみ定数の有限部分を計算するプログラムを生成するものの 3 つである。全部で 4 つの自動化コードを組み合わせることで、10 次全 12672 ファインマン図を分類した 32 個のゲージ不変セットのうち、28 個のセットを自動生成できることとなった。これらの計算結果が [5, 7-9] である。

一方、その構造上、自動化の手間暇をかけるよ

りは、むしろ手でプログラムを書いたほうが早い特殊な構造を持つものもあり、光光散乱を内部的に含む残りの4セットがそうである。うち1セットはすでに前に計算されており、本研究では残り3セットについて計算を行った[4, 6]。

本研究開始以前の成果もあわせて、10次摂動の全32セットについてプログラム制作を完了した。うち30セットについては数値計算も終了し、そのなかの29セットの結果はすでに公表している。(うち2セットの値は投稿中である。)1セットは出版準備中である。

数値計算については残り2セットで進行中である。特にSetVと呼んでいる光子5個からなる補正を受ける図は、ファインマン図にして6354個に相当し、10次の図の過半数を占め、最も計算の困難なものである。これについても、4倍精度実数計算ライブラリの導入や超並列化によって、数値計算が徐々に進捗しており、近いうちに値が公表できるだろう。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

① Proper Eighth-Order Vacuum-Polarization Function and its Contribution to the Tenth-Order Lepton  $g-2$ .”, T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio, Phys.Rev. D83 (2011) 053003. 査読有

② Tenth-Order QED contribution to Lepton Anomalous Magnetic Moment - Fourth-Order Vertices Containing Sixth-Order Vacuum-Polarization Subdiagrams.”, T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio, Phys.Rev. D83 (2011) 053002. 査読有

③ Tenth-order lepton  $g-2$ : Contribution from diagrams containing sixth-order light-by-light-scattering subdiagram internally.”, T. Aoyama, K. Asano, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio, N. Watanabe, Phys.Rev. D81 (2010) 053009. 査読有

④ Tenth-order lepton  $g-2$ : Contribution of some fourth-order radiative corrections to the sixth-order  $g-2$  containing light-by-light-scattering subdiagrams.”,

T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio (Nishina Ctr., RIKEN), Phys.Rev. D82 (2010) 113004. 査読有

⑤ Automated calculation scheme for alpha\*\*n contributions of QED to lepton  $g-2$ : New treatment of infrared divergence for diagrams without lepton loops.”, T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, Makiko Nio, Nucl.Phys. B796 (2008) 184-210. 査読有

⑥ Revised value of the eighth-order QED contribution to the anomalous magnetic moment of the electron.”, T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio, Phys.Rev. D77 (2008) 053012. 査読有

⑦ Eighth-Order Vacuum-Polarization Function Formed by Two Light-by-Light-Scattering Diagrams and its Contribution to the Tenth-Order Electron  $g-2$ .”, T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio, N. Watanabe, Phys.Rev. D78 (2008) 053005. 査読有

⑧ Tenth-Order Lepton Anomalous Magnetic Moment: Second-Order Vertex Containing Two Vacuum Polarization Subdiagrams, One Within the Other.”, T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio, Phys.Rev. D78 (2008) 113006. 査読有

⑨ Revised value of the eighth-order electron  $g-2$ .”, T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio, Phys.Rev.Lett. 99 (2007) 110406. 査読有

[学会発表] (計9件)

① Update on the Tenth-order QED contribution to the lepton  $g-2$ ”, T. Kinoshita, T. Aoyama, M. Hayakawa, M. Nio, the 4<sup>th</sup> International Symposium on LEPTON MOMENTS, 19-22 July 2010, Cape Cod, MA, USA.

② 「電子異常磁気能率へのQED高次補正計算の現状」、青山龍美、日本物理学会、シンポジウム講演、2009年9月10日、甲南大

③ 「QED高次補正計算の発展」、木下東一郎、日本物理学会、シンポジウム講演、2009年9月10日、甲南大

④ 「内部的に光光散乱を含んだダイアグラムからの、電子の異常磁気能率に対する寄与の計算 2」渡邊矩章、日本物理学会、2009年3月29日、立教大学

⑤「光光散乱を内部に含んだダイアグラムの電子異常磁気能率に対する寄与の計算」浅野克行（登壇）、早川雅司、渡邊矩章、日本物理学会、2009年3月29日、立教大学

⑥10th-order QED correction to electron  $g-2$ : progress report” 青山龍美（登壇）、早川雅司、木下東一郎、仁尾真紀子、日本物理学会、2009年3月29日、立教大学

⑦「レプトン異常磁気能率に対する、光光散乱を含んだファインマン図の寄与の、5 ループレベルでの決定に向けて」浅野克行、青山龍美、木下東一郎、仁尾真紀子、早川雅司、渡邊矩章（登壇）、日本物理学会、2008年9月22日、山形大、岩手大

⑧「2 つの光光散乱を含んだファインマン図が与える、レプトン異常磁気モーメントへの寄与の解析」青山龍美、木下東一郎、仁尾真紀子、早川雅司、渡邊矩章（登壇）、日本物理学会、2008年3月23日、近畿大学

⑨ Automated calculation of QED corrections to lepton  $g-2$ ”, T. Aoyama (speaker), M. Hayakawa, T. Kinoshita, and M. Nio, PoS RADCOR2007 (2007) 025, Proceedings for 8<sup>th</sup> International Symposium on Radiative Corrections (RADCOR2007): Application of Quantum Field Theory to Phenomenology 1-6 October 2007, Florence, Italy.

[図書] (計1件)

①“In search of the Breakdown of QED – Study of Lepton  $g-2$  from 1947 to Present –”, T. Kinoshita, in “Lepton Dipole Moments (Advanced Series on Directions in High Energy Physics)”, B. Lee Roberts (編集), William J. Marciano (編集), pp.69 – 108, World Scientific (Singapore). 31 May, 2010.

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

理研プレスリリース 2007 年

「電子の磁石の強さを1兆分の1の精度まで計算」  
<http://www.riken.jp/r-world/info/release/press/2007/070822/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

仁尾 真紀子 (NIO MAKIKO)

独立行政法人理化学研究所・川合理論物理学研究室・仁科センター研究員  
80283927

### (2) 研究分担者

早川 雅司 (HAYAKAWA MASASHI)

名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授  
20270556

青山 龍美 (AOYAMA TATSUMI)

名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授  
30391840

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

木下東一郎 (KINOSHITA TOICHIRO)

コーネル大学・素粒子物理学研究所・ゴールドウ  
インスマス名誉教授