

課題名 (タイトル):

レプトン異常磁気能の精密理論計算

利用者氏名 : 松川 (仁尾) 真紀子

所属 : 和光研究所 仁科加速器研究センター 初田量子ハドロン物理学研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

レプトン粒子には、電子、ミューオン、タウの三種類が存在するが、そのうち磁気能率(g)が精密に測定されているものは電子およびミューオンである。

電子の場合は、単一電子を電磁トラップに捕獲する方法で、2008年にハーバード大のグループが g を相対精度 3×10^{-13} の精度での測定に成功した。電子 g の値は、理論的には、量子電磁気学(QED)によって説明することができる。私たちのこれまでの研究成果により、理論値は微細構造定数 α の4乗の項まで確定している。しかし QED は入力値である α については何も制限を与えないので、この値は、他の実験で決めたものを使用するしかない。2011年の初頭によく十分な精度を持つ α の値が、ルビジウムの光学格子を用いた反跳の測定を通して得られた。これによって、ようやく電子の実験値と QED 理論値を直接比較することができ、QED 理論、ひいては素粒子標準理論の考え方を数値的に検証することができるようになった。

また、QED 理論を正しいと仮定すると、理論式と実験値が等しいとすることで、微細構造定数 α の値を詳細に決めることができる。この電子 g 値による α の値が、実は最も精度の高いものである。化学および物理での多くの現象が電磁気力に関するものであることから、科学全般で使用する多くの定数の値はこの α の値に依存して決定されている。

ミューオンの場合は、2011年度になって、ブルックヘブン実験の後に続く実験が、2つとも認められるという大きな進展があった。一つは米国フェルミラボでの実験で、これはブルックヘブンの実験装置をそのまま移設して行うものである。もう一つは日本の J-PARC で行うもので、ミューオンビームを一度「冷却」するという、ブルックヘブン実験に新しいアイデアを盛り込んだ実験が計画されている。

現在、ブルックヘブンの実験値と素粒子標準理論の値とでは3%の差があり、これが真に素粒子標準理論の

破綻を示しているのかどうかに関心が集まっている。両新実験計画ともに2016年までには実験値の精度を4倍に上げることを目指している。このミューオンの理論値も99.9999%まではQEDからの寄与であることが判明している。

以上の状況をかながみて、本研究課題ではQEDでの電子およびミューオンの g 値を正確に、詳しく求めることを目的とした。

2. 具体的な利用内容、計算方法

電子、ミューオンどちらの g 値のQED計算においても摂動論による方法を用いる。摂動の次数のうち、低次(2,4,6)については解析的な解が知られているので、私どもの研究対象は8次および10次の摂動項を対象とする。

摂動計算はファインマン図を用いて視覚的に表すことができる。各ファインマン図からの寄与は多次元積分の形で表すことができる。これを数値計算可能な形に処理し、プログラム化し、数値積分によってその寄与を求める。8次では891個、10次では12672個のファインマン図があり、しかも被積分関数は長大(10次では一つの積分が10万行程度)である。この計算を行うために、被積分関数を自動生成するコードを開発した。こうして生成したプログラムをモンテカルロ多次元積分によって評価する。

3. 結果

本年度、行った計算は

1)8次のフェルミオンループを含む項からの質量依存項。(ほとんど)倍精度による計算。

2)8次の光子4個のみの補正による非質量依存項。4倍精度計算による計算。

3)10次のフェルミオンループを含む項から質量依存項。(ほとんど)倍精度による計算。

4)10次の光子5個のみの補正による非質量依存項。である。1)3)は、計算の項目は多いが、計算に要する時間は短い。実質的に計算機の時間を使用したの

は、2)と4)の計算である。

これによって、8次の13ゲージ不変セット、10次の32ゲージ不変セットそれぞれについて、質量異存性も含めて、すべて計算結果を得ることができた。解析的な部分の計算も終わったものから、順次、結果を公表した。

4. 今後の計画・展望

10次の概算計算結果が得られた現在となつては、QED理論値のうち最も大きな不確定性を与えるのは、8次の数値計算による誤差である。この誤差を半分にするこゝとで、電子 g の実験と理論の比較がハドロンや弱い相互作用の効果もみることができる。これまでの8次の数値計算は、全領域を4倍精度で行ってきた。そのおかげで積分の結果は常に安定しており、破綻すること無く長期間にわたって計算をすすめることができた。しかし、精度が不必要な安全領域にまで4倍精度を適用していたのは確かである。そこで、積分領域における桁落ちの危険性を判定するアルゴリズムを組み込むこゝとで、4倍精度と倍精度を自動的にスイッチしながら計算できるようにプログラムを改良中である。テスト計算では、大旨、10%から30%程度の加速が得られ、かつ、積分結果も10桁の精度まで一致することが確かめられた。今後は、この方法を、8次および10次の各積分のうち、安全領域が多いと思われるものから順次適用し、計算の高速化を図る。

5. RICCの継続利用を希望の理由

これまでの理研RSCCおよびRICCの利用によって、QEDのレプトン g 値の計算は、すべての必要なファインマン図の値を得ることができた。しかし、4で述べたように、8次ではさらに精度の改良が望ましい。さらに、10次では、計算があまりにも複雑で多くあるため、数値計算で評価した不確定性の信用性に若干の疑問が残る。これを正確に煮詰めてゆく作業が必要である。

6. 一般利用で演算時間を使い切れなかった理由

昨年度と同じ演算時間を頂いたが、審査の段階でランク2になり、ジョブの優先度が下がったため、ジョブが平均で昨年の半分程度しか実行されなくなったこ

とが時間を使い切れなかった最大の理由である。計画停電による節電等はあまり影響がなかった。

ランク決定に影響した審査員のコメントのうち、ネガティブなものは、「申請の演算時間が長すぎる。」という一言に集約される。長い演算時間を費やすしかアプローチのない研究課題に対し、申請の演算時間が長すぎるといわれても、当惑するしかない。計算時間を根本的に短くするには、物理学における場の理論の解法という大問題を解くという、ここ100年間で誰もできなかったことをなさねばならない。とすれば、多量の演算時間を投入する価値が、計算結果にあるかどうか、判断基準であるべきではなからうか。

さらに、RICCに導入されているフェアシェアの機能についても一考を求める。RICCの混雑度は土日や休暇中に著しく低下するという特徴がある。このため、年末年始にかけて私の提出したジョブは、数多く実行された。その反動として、休み明けからまったく私の大規模ジョブが走らなくなってしまった。フェアシェア値の低下のためである。しかたがないので、この間を利用して並列度が少なく実行時間の短いジョブを実行した。そのため私のアカウントでのジョブ待ち時間がゼロクリアされてしまい、知らずしてフェアシェア値の回復をさまたげることになった。結局、1月初旬から2月末まで、256並列で24時間のジョブは、ほんのわずかししか実行されなかった。

計算機とは使ってこそその計算機で、利用率100%を目指すべのものであろう。RICCの利用率が低いときの利用は、フェアシェア値の勘定からははずしていただきたいものである。このように計算の実行されるペースに大幅な変動があると、研究計画の遂行に大幅な狂いが生じる。ご一考願いたい。

平成 23 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

いずれの論文も、すでに著作権を出版社に譲渡済み。

[1].

Tenth-Order QED Contribution to the Lepton Anomalous Magnetic Moment -- Sixth-Order Vertices Containing an Internal Light-by-Light-Scattering Subdiagram.

T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio.

e-Print: arXiv:1201.2461 [hep-ph], submitted to Phys. Rev. D.

[2].

Tenth-Order QED Lepton Anomalous Magnetic Moment --- Eighth-Order Vertices Containing a Second-Order Vacuum Polarization.

Tatsumi Aoyama (KMI, Nagoya & Nishina Ctr., RIKEN), Masashi Hayakawa (Nagoya U. & Nishina Ctr., RIKEN), Toichiro Kinoshita (Cornell U., Phys. Dept. & Nishina Ctr., RIKEN), Makiko Nio (Nishina Ctr., RIKEN). Published in Phys.Rev. D85 (2012) 033007, e-Print: arXiv:1110.2826 [hep-ph].

[3].

Tenth-Order Lepton Anomalous Magnetic Moment -- Sixth-Order Vertices Containing Vacuum-Polarization Subdiagrams.

Tatsumi Aoyama (KMI, Nagoya & Nishina Ctr., RIKEN), Masashi Hayakawa (Nagoya U. & Nishina Ctr., RIKEN), Toichiro Kinoshita (Cornell U., Phys. Dept. & Nishina Ctr., RIKEN), Makiko Nio (Nishina Ctr., RIKEN). Published in Phys.Rev. D84 (2011) 053003, e-Print: arXiv:1105.5200 [hep-ph].

[4].

Tenth-Order QED contribution to Lepton Anomalous Magnetic Moment - Fourth-Order Vertices Containing Sixth-Order Vacuum-Polarization Subdiagrams.

Tatsumi Aoyama (KMI, Nagoya & Nishina Ctr., RIKEN), Masashi Hayakawa (Nishina Ctr., RIKEN & Nagoya U.), Toichiro Kinoshita (Nishina Ctr., RIKEN & Cornell U., LEPP), Makiko Nio (Nishina Ctr., RIKEN). Published in Phys.Rev. D83 (2011) 053002, e-Print: arXiv:1101.0459 [hep-ph].

[5].

Proper Eighth-Order Vacuum-Polarization Function and its Contribution to the Tenth-Order Lepton $g-2$.

Tatsumi Aoyama (KMI, Nagoya & Nishina Ctr., RIKEN), Masashi Hayakawa (Nishina Ctr., RIKEN & Nagoya U.), Toichiro Kinoshita (Nishina Ctr., RIKEN & Cornell U., LEPP), Makiko Nio (Nishina Ctr., RIKEN). Published in Phys.Rev. D83 (2011) 053003, e-Print: arXiv:1012.5569 [hep-ph].