

課題名 (タイトル) :

レプトン異常磁気能率の精密理論計算

利用者氏名 : ○仁尾真紀子, 早川雅司, 青山龍美

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

本研究課題は、電子とミュオン粒子の持つ異常磁気能率 ($g-2$) の値を、量子電気力学理論 (QED) から計算して精密に求めることである。

電子の g 因子は 2008 年にハーバード大学のグループが 0.28ppt の精度で測定に成功した。この g 因子の測定値に比肩する精度を持つ理論値を QED から第一原理計算によって求め、QED の検証を行うことが研究の目的である。さらに、QED が正しいと仮定すれば、実験と理論の $g-2$ の値から、電磁気力の相互作用定数である微細構造定数 α の値を、ほかのどの方法よりも高い精度で決定することができる。この値は CODATA 推奨値として広く科学および工学の領域に使われている。

電子 g 因子の理論値は、QED だけで値を決めることはできず、入力値として他の物理現象から決めた微細構造定数 α の値が必要である。これまでは α の精度が十分でないため、実験値と理論値の直接比較ができないでいた。しかし、2011 年に Rb 原子の光学格子の実験から決めた α の値が公表され、従来の 7 倍の精度となり、理論値と実験値の直接比較が可能になった。これにより、電子 $g-2$ でも、弱い相互作用やハドロンの影響がはっきりと見えるようになった。

ミュオン粒子は電子よりも 200 倍程度重いので、より、高いエネルギーの現象に敏感である。ミュオン粒子の $g-2$ は 0.1ppm 程度の精度で未知の重い新粒子の影響を受けるのではないかと予想されており、実験、理論ともに精度の改良に精力がそそがれている。特に、実験は、理論を含め日本主導の研究グループにより J-PARC で新しい実験が計画されている。そのミュオン粒子 $g-2$ 理論値における最も大きな寄与を与える QED の寄与を特定することが、私たちの研究目的である。

2. 具体的な利用内容、計算方法

レプトン粒子への QED の効果は、ファインマン図を用いた摂動計算によって求めることができる。各ファインマン図はそれに相当する計算式を解析的に処理した後には、多重積分に帰着する。今、私たちに関心を持っている摂動の 10 次では、独立な積分の数は数百個、多重積分は 13 次元、一個の独立な積分の被積分関数の長さが 10 万行程度と膨大なものになる。これを数値積分計算によって求める。

QED 摂動計算において、数値計算上の障害となるのが、赤外および紫外発散のカウンター項による相殺である。特に赤外発散では数値計算の桁落ちが激しく、実数の精度として 4 倍精度、特に桁落ちの激しいものは 8 倍精度、

が要求される。

以上、計算量の膨大さと、4 倍精度実数が要求されることから多くの計算機資源を必要としている。

3. 結果

2009 年秋に RICC が稼働開始以降、順次 QED10 次の計算を RSCC から RICC に移植した。特に、RSCC では計算機の能力が足りず、倍精度でしか計算できなかった積分計算を 4 倍精度で実行することが可能になり、積分値の著しい収束をみることもできた。これによりもともと計算の困難であった 389 個の積分の総和は、目標とする精度のほぼ 2 倍程度にまで到達している。これらの結果は、現在、まとめの段階に入っている。他に光散乱を内部的に含むファインマン図のセットについても、早川を中心として精力的に計算を行った。

摂動 10 次については、これですべての計算が、質量依存性も含めて、予備的な段階ではあるが結果を得られた。最終的な検証も含めて、順次、結果の発表を行っている。

4. まとめ

RICC の稼働から一年半、ようやく 10 次のすべての計算ができるようになり、検証の終わったものから結果を発表するにいたった。

5. 今後の計画・展望

10 次摂動計算のファインマン図のセットに、まだ、計算をもう少し推し進める必要のあるものがあるので、これを実行する。さらに、10 次の計算がある程度大きな誤差をもってでも値が求められると、より次数の低い 8 次の計算の改良が求められる。こちらも平行して計算を続行してゆく。

6. RICC の継続利用を希望の場合は、これまで利用した状況

5 でも述べたが、10 次の計算の続行、並びに 8 次の計算の改良を行う。10 次は、ファインマン図によって倍精度と 4 倍精度を使い分ける、8 次は、最終結果で 5 桁以上を求めなければならないことも考え合わせて、すべて 4 倍精度で計算をすすめる。

7. 一般利用で演算時間を使い切れなかった理由

該当せず。

8. 利用研究成果が無かった場合の理由

該当せず。

H22 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】

1) 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). RIKEN-TH-202. Jan 2011. 29 pp.

e-Print: arXiv:1101.0459 [hep-ph], to appear in Phys. Rev. D.

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

T. Aoyama, M. Hayakawa, T. Kinoshita, M. Nio. RIKEN-TH-203. Dec 2010. 48 pp.

e-Print: arXiv:1012.5569 [hep-ph], to appear in Phys. Rev. D.

3) 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 (Nagoya U. & Nishina Ctr., RIKEN), T. Kinoshita (Nishina Ctr., RIKEN & Cornell U., LEPP), M. Nio (Nishina Ctr., RIKEN). RIKEN-TH-192. Sep 2010. 17 pp.

Published in Phys.Rev. D82 (2010) 113004 .

4) Tenth-order lepton $g-2$: Contribution from diagrams containing sixth-order light-by-light-scattering subdiagram internally.

Tatsumi Aoyama, Katsuyuki Asano, Masashi Hayakawa (Nagoya U.), Toichiro Kinoshita (Cornell U., Phys. Dept.), Makiko Nio (Nishina Ctr., RIKEN), Noriaki Watanabe (Nagoya U.). RIKEN-TH-182. Jan 2010. 18 pp.

Published in Phys.Rev. D81 (2010) 053009 .