

課題名(タイトル): 荷電粒子の形状因子における QED 高次摂動効果の研究

利用者氏名: 仁尾 真紀子

理研における所属研究室名: 仁科加速器科学研究センター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

本研究においては、電磁気学の量子力学である QED (Quantum Electrodynamics) 理論を用いて、電子、ミュオン、陽子の三種類の素粒子単体の性質を導き出す計算を行った。

これらの荷電粒子はその性質を形状因子という関数で表すことができる。基本対称性である荷電共役、鏡映反転、時間反転のそれぞれの対称性を考慮し、相対論的な要請も加味すると、形状因子は F_1 と F_2 という2個の関数のみで表される。 F_1 の微分係数は、荷電粒子のおおよその荷電半径とみなすことができ、 F_2 は、荷電粒子の磁気能率における量子異常を与える。

電子とミュオンにおいては、これらの素粒子が磁場中でのような振る舞いを行うかを定める、磁気能率の大きさを示す g 因子が F_2 と関係する。ディラックの相対論的量子力学では $g=2$ と整数値であるが、じっさいには真空の量子的揺らぎにより2より0.1%程度大きな値を持つ。朝永振一郎らによって構成された QED 理論はこのわずかの差を説明することに成功し、現代の素粒子理論の発展と繋がった。

現在では、最先端の物理測定を駆使した実験により、 $g-2$ は電子では 3/100 億、ミュオンでは 4/1000 万の精度で測定されている。当然、理論計算にも同程度の精度が要求される。

電子 $g-2$ の測定値は Harvard によって測定されたものが最新値である。現在は、電子の他にその反粒子である陽電子に関する $g-2$ 測定実験が進行中だ。QED 理論によると電磁気力の結合定数である微細構造定数 α のべき展開級数として良い近似が得られ、これを摂動展開とよぶ。QED では α による摂動展開の係数を一切の入力パラメタなしに物理原理のみから計算することができる。それゆえ、実験値が理論の α による摂動展開式に等しいと仮定することで、 α の値を決めることが可能となる。

2018 年秋に科学技術測定の国際標準単位系である SI の改定が正式決定された。新単位系の発足は 2019 年からだ。

改定のなかにはプランク定数を定義化しそれに基づいて質量単位 kg を決定するという歴史的な変更があった。微細構造定数 α の値はこのプランク定数の定義値の決定に使用された。また、プランク定数 h の他に基本電荷 e などの値が厳密化されることにより、他の多くの測定により決められる物理定数のうちもっとも基本的な量として微細構造定数 α が位置付けられることとなった。

ミュオンの $g-2$ においては、2019 年には米国 Fermilab から新実験の最初の結果が報告される予定で、研究者の間で期待が高まっている。CERN LHC で素粒子標準模型を完成するヒッグス粒子が発見された以外に新たな粒子の発見がない現状では、標準模型を超える現象として、もっとも確実に強力な候補がミュオン $g-2$ における測定値と理論値の差だと考えられている。日本では理研の先端中間子研究室も参画し、J-PARC での実験準備がすすめられている。ともに従来の BNL の測定値の不確かさを 1/4 にすることを目指している。

陽子においては、ミュオンと陽子の水素原子様束縛状態(ミュオン水素原子)でのエネルギー準位(ラムシフト)が詳細に測定されており、ここから陽子の荷電半径を正確に決めることができる。この値が、従来の水素原子による決定、そして陽子-電子散乱実験による決定からともに有意にずれており、「陽子荷電半径の謎」と呼ばれている。陽子は、電子やミュオンと違い、単一点粒子ではなく、構成粒子クォークによる内部構造を持つため、QED だけで陽子の構造関数をすべて求めることはできない。QED+QCD の系として扱うものだ。本研究ではこの QED の寄与についてフォーカスする。

陽子の荷電半径の謎に関して、理研の先端中間子研究室ではミュオン水素原子の超微細構造測定の準備がすすめられている。これは陽子の F_1 (の微分)と F_2 の双方に関係する量で、ラムシフトとは別の線形結合で寄与する。陽子(と反陽子)の g 因子については、理研のウルマー基本対称性研究室において CERN で世界最高精度での測定が実施された。さらに、「陽子荷電半径の謎」の解明をめざして、world best precision の水素原子の分光実験が新たに

2つドイツとフランスで実施された。双方が得たリユドベリ定数 R の値には有為な食い違いがあり、新たな問題となっている。陽子電子の散乱実験に関しては、東北大学で低エネルギーでの測定を目指して実験準備が進んでいる。

2. 具体的な利用内容、計算方法

電子とミュオン $g-2$ においては、その両方に共通する寄与で、QED の寄与のうちもっとも誤差の大きな項の数値計算の改善を目指した。具体的には、Set V と名付けた摂動の 10 次の項で、電子(ミュオン)が5個の仮想的光子の量子揺らぎから受ける寄与を多次元(10~13 次元)数値積分の実行により計算した。Set V に属する389個の積分のうち、誤差の大きなものから随時実行し、改良を図った。

Hokusai GreatWave では 64node 2048 コア並列を用い、Hokusai BigWaterfall では 25 node 1000 コア並列を用いた。ともに simd 化のための最内ループ数をそれぞれのマシン用に調整して最適化を行い、ほぼ理論値通りに BW と GW で約 1.7 倍の速度比に落ち着いた。先の並列度の選択はこの結果に拠っている。これによりどちらのシステムでも、どの積分に対しても、24時間以内に 160 億個のサンプル数を計算できることとなった。これにより積分値の不確かさを従来の約 1/2 に圧縮できた。GW では割り当てられたリソースを 2018 年 11 月中にはすべて使い切り、BW も 2 月初旬に 100% 消化した。年度内は、GW の特別運用ルールによる最低優先度によって積分の実行を少しずつ継続している。

陽子については光光散乱過程が F1 の原点での微分係数に及ぼす値を、同じく数値積分計算によって求めた。方法としては、 $g-2$ で用いた被積分関数生成法を転用、寄与の抽出を F2 から F1 に変更し、その微分をとったものを被積分関数として準備した。それを数値積分で評価する。とくに、光光散乱に現れる軽い粒子の質量をパラメタとして変更し、多くの場合で計算を行った。数値計算としてはごくごく小規模なものである。

3. 結果

電子とミュオン $g-2$ 、F2 の計算においては、GW と BW を併用して用いることで計算が加速され、研究開始当初の QED の寄与の不確かさをハドロンの寄与の不確かさよりも小さくするという 10 年来の目標によりやく到達した。

陽子の F1 微分係数の計算では、陽子の質量と光光散乱過程に現れる軽い粒子の質量比が大きい場合に、数値計算が非常に困難になる。おおよその傾向と値は得られたが、

精度と信頼性の検証に課題を残している。

4. まとめ

計算リソースのほとんどを電子とミュオンの F2 の計算に使用した。結果、研究目標である QED で計算して物理として意味のある限界精度にまで到達することができた。

陽子については F1 微分係数の試験的な計算を行った。

5. 今後の計画・展望

電子とミュオン $g-2$ つまり F2 の計算においては、今後は規模を大幅に縮小し、ゆっくりと精度の改善を目指す。2018 年 4 月には Cs 原子の物質波を干渉させる手法での測定結果を用いて、世界最高精度の微細構造定数の値が発表された。電子 $g-2$ から決めた微細構造定数の値よりわずかに精度がよく、2.4 標準偏差だけずれており、その意味するところに注目が集まっている。電子 $g-2$ の実験と Cs 原子干渉実験、ともに今後の数値の改良(概ね一桁)を公言している。ただし少なくとも数年の時間は要すると予想される。その間、QED の $g-2$ 計算は計算そのものを検証し、精度を多少なりとも改善することを目指す。これまでのように統計を増やすだけでなく、数値計算方法の改善、積分アルゴリズムの見直し、そして QED 数値計算方法そのものも含めて、さまざまな試みを行う。

陽子に関しては、解析的な計算とそれを逆に数値計算に応用して、精度のよい数値計算を実行することを考える。さらに、陽子の F1 微分係数が及ぼすさまざまな物理現象への影響について解析をすすめることを計画している。大型計算リソースを利用する可能性は低い。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

“Theory of the Anomalous Magnetic Moment of the Electron”, Tatsumi Aoyama, Toichiro Kinoshita, and Makiko Nio, Invited review article, Special Issue of Atoms, “High Precision Measurements of Fundamental Constants,” edited by Joseph N. Tan. Submitted.

【口頭発表】

“Revised and Improved Value of the QED Tenth-order Electron Anomalous Magnetic Moment”, Makiko Nio, Talk at parallel session Top/QCD/Loopverein, Asian Linear Collider Workshop 2018, May28–June1, 2018, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan.

“Higher-order QED corrections to the lepton $g-2$ ”, Makiko Nio, Invited talk, SchwingerFest2018:g-2, Dec 3–5, 2018, UCLA Faculty Center, Los Angeles, USA.

“($g-2$)e ($g-2$)mu 10th-order at last using power of Super Computers”, Makiko Nio, Plenary talk, 19th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research(ACAT), March 11–15, 2019, Saas Fee, Switzerland. (Scheduled)