

プロジェクト名(タイトル):

電子異常磁気能率を求める多次元数値積分計算の最適化に関する研究

利用者氏名:

○仁尾 真紀子(1,2)、佐藤 龍政(1,3)

理研における所属研究室名:

(1)仁科加速器科学研究センター 中間子科学研究室

(2)埼玉大学大学院理工学研究科

(3)横浜国立大学理工学府数物・電子情報系理工学専攻

1. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

電子及びミュオンは共に荷電レプトンであり、ミュオンが電子より約 200 倍重い以外は、電荷やスピンなど等しい性質を持っている。荷電レプトンの磁場との結合の強さは、スピンに比例する磁気能率で表され、その大きさは g 因子という数で示される。荷電レプトンの g 因子は 2 からわずかにずれ、そのずれ $g-2$ を異常磁気能率と呼ぶ。このずれは、何も粒子のない状態である真空が、量子効果によって揺らぐことに起因している。

近年、荷電レプトンの異常磁気能率($g-2$)の値を、実験と理論の双方で精密に決定し、両者に差があることを明らかにすることで、素粒子の標準模型を超える新物理現象を探すと試み脚光を浴びている。ミュオンの実験では 2021 年に引き続き 2023 年にフェルミ国立研究所から実験値が発表され、この値は、過去の実験値と無矛盾で、不確かさが半分になった。この発表に先立つ 2020 年、各国 100 名以上の理論研究者の協力により、素粒子標準模型によるミュオン $g-2$ の理論値が決定され、この値と最新実験値の差は 5.0 標準偏差(σ)である。2021 年以降には別の理論値が複数得られており、これらは実験値と矛盾なく、状況は混沌としている。

日本の J-PARC でも、フェルミラボとは異なる方法でのミュオン $g-2$ の測定実験の準備が進んでおり、理研の中間子科学研究室もこれに参画している。独立した実験、さらに理論の詳細研究が期待されている。

電子においても 2022 年秋にこれまでの値より 2.2 倍精度の良い新測定値が発表された(図 1 参照)。電子の反粒子、陽電子での測定、さらに量子測定技術の導入も進行中で、新物理探索への感度を持つのも間もないと思われる。

これらの電子およびミュオンの $g-2$ の理論値の 99.999% 以上は電磁気学的な効果により生じている。この値は、量子電磁気学理論(QED)の摂動計算を用いて、高い精度で計

算することができる。

現在まで、電子 $g-2$ の QED 計算は、摂動の 8 次まで解析的な値が得られており、数値計算は摂動 10 次および次の摂動 12 次をターゲットとしている。本研究では、大規模数値積分計算を実行し、摂動 10 次の項の値を 4 桁決定することを目的としている。

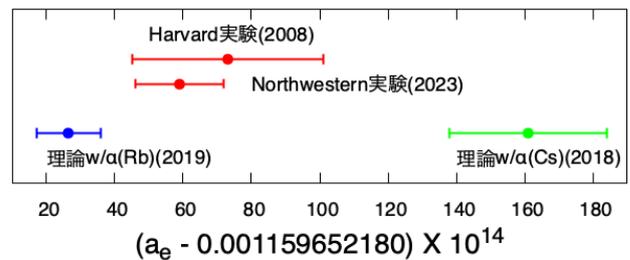


図1 電子 $g-2$ の実験値と理論値の比較。赤は電子 $g-2$ の実験値を示す。理論値は、電磁気力の強さを示す微細構造定数 α に二つの相異なる値が存在し、それによって、青と緑の二つの値がある。

2. 具体的な利用内容、計算方法

電子やミュオンの $g-2$ の値は、これらが光子と相互作用する結果として生じ、摂動の各次数の寄与はファインマン図という絵の集合で表すことができる。ファインマン図は高次元積分を表しており、この積分をモンテカルロ数値積分で評価する。被積分関数の構成、モンテカルロ積分プログラム、そして偽4倍精度実数ライブラリ、全て私たちの研究グループの自作プログラムを使用して計算を実行している。

本年度の積分のターゲットは、摂動 10 次の項の寄与の一部を与える 98 個の積分である。実は、私たちの摂動 10 次の結果と、他グループの結果に有為な差があると 2019 年に報告された。両者のファインマン図ごとの寄与の比較は、非自明であるが、私たち自身が新たに開発した方法を適用し、個別の図ごとの数値計算結果に両者の間に矛盾がないことが 2021 年には判明した。また、数値計算の比較的容易な 98 個の積分において、両者の値には矛盾はないもの

の、その差が正の方向に極端に偏っており、これらが積み重なって、5 標準偏差にも及ぶ差が生じていることがわかった。

どちらの摂動 10 次の値が正しいかを決定するため、98 個の積分を、モンテカルロの統計量を 100 倍に増やして再計算を実施している。

3. 結果

98 個の積分の倍精度計算は比較的容易で 2021 年度には終了した。レプトン $g-2$ の摂動計算結果は、微細構造定数 α の決定にも使用され、一度得られた数値計算結果は、解析解が得られるまで数十年に渡って、科学全般を、その基礎の基盤の土台から支える数字として、使用されるものだ。ゆえに、この 98 個の積分の評価には慎重を期し、偽 4 倍精度での評価をさらに実施すべきと考えている。

今年度は HBW の有償利用に当てる研究費が確保できず、かつ、HBW 自体の使用リソースが半減され、運用期間が 8 ヶ月と短縮されたこともあり、全体の 5%まで無料使用を許されているリソースは、8 月に使い尽くした。98 個の積分の評価として、ほとんど進捗を得ることはできなかった。

追加でリソースを要請し、これは、積分プログラムの改善のテストなどに利用した。

4. まとめ

積分アルゴリズムの改善とテストが間に合わなかったこと、計算機使用料の確保ができなかったこと、HBW のリソースが半減されたことなどから、98 個の積分の数値計算には、進捗を得られなかった。

5. 今後の計画・展望

HBW のアーキテクチャでは `simd` ベクトル化のベクトル長の値が、実計算時間に大きく影響することがわかっている。しかも、このチューニングには、実際にプログラムを走らせて実験するしか、最適なパラメタを発見する方法がなかった。HBW2 はアーキテクチャとして HBW を踏襲しており、同様のパラメタチューニングが要求されると思われる。まずは、これを実行し、現在使用している積分アルゴリズムで、98 個の積分計算に、どの程度のリソースが必要かを勘定する。

また、手元 PC で、従来の積分アルゴリズムよりも振る舞いの良いものが出来上がっており、これらを QED レプトン $g-2$ の摂動高次の大型計算に適用した場合に、どの程度の高速化が実現できるかについても確認する。