



$g - 2$ 測定：標準模型の検証

服部凌哉

1 はじめに

どんな理論も**実験による検証**がなくては物理法則として認められません。素粒子標準模型は、**歴史上最も精密に検証され、現在最も精度良く自然を再現するモデル**です。このポスターでは理論の検証の代表例である g 因子を紹介します。

電子の g 因子という物理量から定義される異常磁気モーメント $a = (g - 2)/2$ は、実験 [1] と理論 [2] でそれぞれ⁽¹⁾

$$\begin{aligned} a_{\text{実験}} &= 0.001\,159\,652\,180\,59(13), \\ a_{\text{理論}} &= 0.001\,159\,652\,181\,606 \\ &\quad (11)(12)(229) \end{aligned}$$

であることがわかっています。**理論と実験がおよそ 10 桁という驚異的な精度で一致**しており、標準模型がいかに正確な理論かを物語っています。

2 g 因子とは？

古典的には、電子が回転していれば電流が生じて磁場を作るので、**軌道角運動量 L と磁気双極子モーメント μ (磁石の強さ) は比例**します。一般の角運動量 J を考えたとき、この古典の場合の比例関係から何倍 μ が大きいのかを表すのが g 因子です。具体的に式で表せば $\mu = g \frac{e}{2m_e} J$ で、当然 $g_{\text{古典}} = 1$ です。

電子のスピ角運動量 S と磁気モーメント μ の場合は少々ややこしいですが、量子電磁力学を用いた計算によって

$$\begin{aligned} g &= 2 + \frac{\alpha}{\pi} + \dots \\ &\approx 2.0023\dots \end{aligned}$$

⁽²⁾ というような値になります。量子的効果を考えないと $g = 2$ となるのですが、

場の量子論では真空中で瞬間的に生成する粒子の影響で、2 から少し変化します。 g 因子の 2 からのずれ $a = (g - 2)/2$ は**異常磁気モーメント**と呼ばれます。この a の中には、強い力・弱い力を含めた**理論の全ての情報が入っています**。

3 理論計算

図 1 は g 因子の計算に使う**ファインマン・ダイアグラム**で、左が最低次 (**Tree-level**) を、右は**1 ループ補正** (粒子生成を 1 回伴う効果の補正) を表します。相互作用の強さを表す $\alpha \approx 1/137$ についての摂動展開 (= 級数展開) をしており、頂点 2 つにつき α を掛け算するので、**ループが少ない項ほど g 因子への寄与は大きくなります**。図左からは 2 が、右からは α/π が得られます。ダイアグラムの数はループが増えるに応じて爆発的に増加し、5 ループの場合はなんと 12,672 個のダイアグラムが存在します。

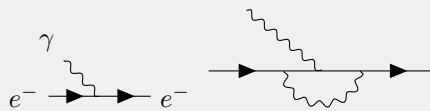


図 1: 低次のファインマン・ダイアグラム

弱い力・電磁気力に関する反応はループの数を増やしていけば精度を上げることができます。一方で強い力は**クォーク閉じ込めに代表される非摂動的効果**があり、この方法が使えません。そのため、ハドロン実験からの推測や**lattice-QCD による数値計算**などを用いる必要があります。理論計算なのに不確かさが付く原因となっています。

4 何がわかるの？

理論を支持する強力な証拠という他に、**標準模型を超える物理 (BSM)**の探索に重要です。先ほどの「理論の全ての情報」というのは、文字通り全てです。もし仮に未知の粒子が存在していたとき、その粒子からの寄与も含まれるのです。

暗黒物質や超対称性粒子が存在する場合、未知の粒子が関与する高次のループにより g 因子に補正が入り、標準模型の予測からずれると考えられています。

5 検証最前線

重い粒子ほど他の粒子とより強く (質量の 2 乗で!) 結合するので、 g 因子の「未知の物理」への感度は上がります。そのため、実は電子の仲間であり約 200 倍重いミュー粒子の g 因子が注目されています。

ミュー粒子の g 因子は、実験値を「**ハドロン実験の結果を用いた理論値**」と比較した場合 **4.2σ の差異**が報告されてきました [3]。一致するべき値に偶然 4.2σ の差異が生じるのは数万分の一の確率です。2020 年以降の Lattice-QCD による計算では実験と一致するとの報告もありますが、解決には至っていません [3]。

参考文献

- [1] X. Fan, T. G. Myers, B. A. D. Sukra, and G. Gabrielse, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 071801 (2023).
- [2] T. Aoyama, T. Kinoshita, and M. Nio, *Atoms* **7**, 28 (2019).
- [3] S. Navas et al. (Particle Data Group), *Phys. Rev. D* **110**, 030001 (2024).

(1) 括弧の数字は不確かさを表します。(13) というのは、最後の 2 桁に対して 13 くらいの不確かさがあるという事です ($a_{\text{実験}} = \dots 180\,59 \pm 0.0\dots 000\,13$)。 (11)(12)(229) はさらに誤差の由来ごとに区別した表記で、それぞれ QED10 次補正、QCD 計算、微細構造定数の測定誤差に由来します。

(2) α は微細構造定数と呼ばれ、 $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) \approx 1/137$ という値です。また、一次摂動の項 (α/π) までは電子、ミュー粒子、タウ粒子で同じです。

