

# QED 摂動論によるレプトン異常磁気能率の計算

青山 龍美 〈名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構〉

早川 雅司 〈名古屋大学大学院理学研究科〉

木下 東一郎 〈Cornell University〉

仁尾 真紀子 〈理化学研究所仁科加速器研究センター〉

電子やミュオン粒子はスピンに伴う磁気能率を持ち、その大きさはボーア磁子を単位として  $g$  因子で表される。 $g$  因子は Dirac の相対論的量子力学による値  $g=2$  から仮想光子の量子効果により 0.1% ほどずれ、これを異常磁気能率 ( $g-2$ ) と呼ぶ。

電子の異常磁気能率は最も精密に測定されている物理量の一つであり、理論的には量子電気力学 (QED) でほぼ説明できることから、高精度理論計算を通じて QED の精密検証を与えてきた。最新の測定値はハーバード大グループによる円筒形の Penning trap を用いた実験で得られたもので、0.24 ppb (ppb =  $10^{-9}$ ) もの精度に達している。理論計算もそれに見合う精度まで進める必要があり、摂動論に基づく高次項の評価が急務であった。

著者らのグループは数値的手法により摂動の 10 次項の完全な決定を行い、結果として電子  $g$  因子について  $10^{-12}$  のオーダーまで測定値と理論計算が一致することをみた。この精度まで QED の正しさが検証されたと言える。他方、QED の理論が正しいとすると、QED の結合定数である微細構造定数  $\alpha$  の値を測定値と理論計算から求めることができる。その値は 0.25 ppb の精度を持ち、他のどの決定法によるものより精度の高い値である。電磁気的な相互作用は多岐にわたる物理現象に現れることから様々な決定法があり、これらの値が互いに無矛盾であるかは、QED の正しさを検証するもう一つのアプローチとなる。

電子の約 207 倍の質量を持つレプトンであるミュオン粒子の異常磁気能率も 0.5 ppm (ppm =  $10^{-6}$ ) の高い精度で測定されている。

測定値と、QED を含む素粒子標準模型からの理論値の間に約  $3\sigma$  の差が見つかり、標準模型を超える新物理を探るプローブの一つとして注目されている。そのような議論の前提として、大半を占める QED の寄与を高精度に求めることが不可欠である。QED 摂動論の 10 次項の決定と 8 次項の精度の改良により、QED からの寄与は現在の測定の不確かさの 1/1,000 まで求まり、目下準備中の次の実験による測定精度の向上にも十分対応できると言える。理論値で最も不確かさの大きい寄与はハドロン効果によるもので、標準模型との差を議論する上でこの寄与の精度の向上が現在の主要な課題である。

QED 摂動論を数値的に行うにあたって、著者らの手法は、中間くりこみの処方を用いて計算の各段階で発散量があらわに現れないようにするものであり、それによって計算機上での数値計算が可能になる。摂動の 10 次に寄与するファインマン図形は膨大かつ複雑であるが、これを系統的に扱う手法を開発した。著者らが約 10 年にわたって進めてきた QED 摂動論の数値的研究について紹介する。

## —Keywords—

### 量子電気力学, Quantum ElectroDynamics (QED):

U(1) ゲージ場に基づく相対論的場の理論。電磁相互作用を含む相対論的量子力学を第二量子化した理論。ただし、ここでは電子以外の粒子 (後述のミュオン粒子、タウ粒子など) を含む。物理理論としては最も精度良く検証されている。

### 素粒子標準理論:

SU(3) × SU(2) × U(1) をゲージ群として持つ場の理論。素粒子として 6 種類のクォーク、3 種類の荷電レプトン (電子、ミュオン粒子、タウ粒子)、3 種類のニュートリノ (以上フェルミオン)、およびヒッグス粒子 (スカラー粒子) を含む。また、この理論の部分構造として QED が内包されている。

### 新物理を探るプローブ:

高精度理論計算を行うと、一般に直接は関係しない粒子の影響も入ってくる。したがって、様々な物理量に対し既知の粒子および相互作用による影響を詳細に計算しそれを実験と比べることで、未知の粒子または相互作用 (つまり新物理) の影響があるかどうか分かり、さらにその粒子の性質もある程度推測できる。実際、2012 年度発見されたヒッグス粒子はこのような計算に基づいておおよその質量は見積もられていた。