

量子電気力学はどこまで正しいのか？

量子電気力学 (Quantum Electro-Dynamics; QED) の基礎的研究に対して1965年、朝永振一郎ら3名にノーベル物理学賞が与えられた。QEDは、電荷をもつ粒子間には光子をやり取りすることで電磁相互作用が働くとする場の理論で、相対論的量子力学 (ディラックの電子論) では理解できない、いくつもの現象を説明することに成功している。精密さという観点で、QEDはこれまでに人類が手にした究極の理論といわれている。実験によって測定できる現実の事象と、人間のつくり出したモデルである理論を比較することは、理論の限界を診断する重要な仕事であり、QEDは人類の叡智を検証するのに最も適した理論といえる。

ディラックによれば、電子の磁気モーメントの大きさは、ボーア磁子という基礎物理定数のちょうど2倍になるはずで、この値は電子の g 因子とよばれる。しかし、 g 因子の実測値もQEDによる理論計算値も、2より0.1%ほど大きく、異常磁気モーメントとよばれている。最先端の実験では、静磁場と静電場によって荷電粒子を小さな空間に閉じ込めるペニングトラップを用いて、12桁もの精度が達成されている。QEDによる理論計算の精度も同じ桁に達しており、ここでは破綻はみられていない。

水素原子のエネルギー準位は、非相対論的量子力学の厳密解では、主量子数 $n=2$ の状態が4重 (スピンも含めると8重) に縮退しているが、水素原子に対するディラック方程式の厳密解は、全角運動量 j が $1/2$ と $3/2$ の、それぞれ4重に縮退した状態に分裂する。QEDでは $j=1/2$ の状態がさらに軌道角運動量の異なる ${}^2S_{1/2}$ と ${}^2P_{1/2}$ に分裂し、この2つの状態のエネルギー差はラムシフトとよばれている。水素原子におけるラムシフトは小さな値でしかないが、およそ原子番号 Z の4乗に比例して大きくなるため、重元素の多価イオンを用いた可視分光やX線分光による、ラムシフトの精密測定が行われている。ただし、測定値とQEDによる計算値は、それぞれの精度の範囲でいつも重なっており、不一致がみられた例はこれまでのところ1つもない。

では、QEDは正しいのだろうか？ 論理的に内部矛盾がなければ正しい理論といえる。しかしそれは、自然を説明できることを保証してはいない。QEDにほころびが見つかり、まったく新しい物理理論が必要になることを密かに期待しながら、高精度測定への挑戦は続いている。

会誌編集委員会