研究業績： 量子電気力学の高精度計算手法の開発とその応用
分野：物理学・数学
受賞者： 木下　東一郎
所属： コーネル大学素粒子研究所、ゴールドウィンスミス名誉教授

「電子の磁石としての性質を、理論計算だけで導く」

対象分野について：

物質を構成する基本単位は何でしょうか。その答として素粒子標準模型が知られています。量子電気力学(Quantum Electrodynamics, QED)はその素粒子標準模型の一部を成し、荷電素粒子と光子の相互作用を記述するものです。つまり、荷電素粒子である電子の諸性質は、素粒子標準模型のパラメタである電荷 e と質量 m を除いて、すべて QED による計算で求めることができます。本研究では、電子のもつ磁気モーメントの値を 15 桁にわたって決定する計算を行いました。ほぼ同じ精度を持つ測定値と比較することで、「QED や素粒子標準模型がどの程度まで正しいか」の検証を可能にしました。これは、言い換えると、「私たちは物質の究極の姿をどの程度まで知り得たか」を明らかにすることです。

中高生向け解説：

電子は、負の電荷 e と質量 m を持つ粒子です。電気電子機器の内部にある回路を流れる電子も、原子核とともに原子を形成している電子も、すべて全く同じ電荷 e と質量 m を持っています。これらの電子はそれぞれに名前をつけて区別することができません。電子は個性を持たないのです。

原子核は、さらに陽子と中性子に分割されますが、電子はこれまでのところ、どのような実験を行っても、それを分割することができません。電子は大きさのない点粒子なのです。このように個々の区別ができず、物質を構成する最小単位となる粒子を素粒子と呼びます。電子は、最も身近にある素粒子の一つです。他には、電磁波の正体である光子（こうし）も、身近にある素粒子の一つです。

電荷ｅも質量ｍも電子が持つ性質ですが、なぜこれらの特定の値を持つかは、現在の物理学では未だ解明できていません。電子の持つ他の性質として、磁場中では磁石のように振る舞い、これを電子の磁気モーメントと呼びます。こちらは、電荷 e と質量 m が与えられれば、理論的な計算によってその存在と値の大きさまで説明することができます。

計算を可能にする物理理論を量子電気力学(Quantum Electrodynamics, QED)といいます。QED は時間と空間の相互変換である特殊相対性理論と、量子論を兼ね備えた、電子と光子の相互作用を記述する理論です。量子論とは、一つの粒子が2つ以上の状態を同時に

持つことが可能ということです。さらに素粒子のような個性のない粒子たちの集団を考えると、一個の電子を観測している間にも、ごくわずかの短い時間内なら、光子や、他の複数の電子が同時に存在しえるという真空の揺らぎが起こり得ます。QED での電子磁気モーメントの計算とは、この1粒子の持つ複数の状態と、真空の揺らぎを表す複数粒子の効果、それらすべての量子効果を足し合わせるものです。

計算は、とても長くて複雑です。どのくらい複雑かというと、現在の最新値を得るまでに約 70 年間、世界中の数多くの物理学者が部分部分の計算を行ってきました。最近の約 50 年間は、計算のあらゆる場面にコンピュータが導入され、その時々の最新鋭のスーパーコンピュータで数値計算が行われてきました。本研究での最新の QED 理論計算の結果として、電子の磁気モーメントの強さを表す g 因子の値は、

g(理論) = 2.002 319 304 363 22 ± 0.000 000 000 000 46

となるはずです。一方、実験で測定した g 因子は

g(実験) = 2.002 319 304 361 46 ± 0.000 000 000 000 56

です。12 桁にも及ぶ一致は、物理学史上、最も精緻な理論と実験の相互検証です。理論と実験はお互いの精度の向上が動機となり、70 年間、それぞれが切磋琢磨を重ねた結果、ともにこの精度に達しました。現在も、物質の究極の姿を知るために、精度の改良を目指す研究が行われています。