

QUANTUM WORLD

素粒子で紐解く量子の世界

量子力学を創始したハイゼンベルクらの記念碑的論文から100年。ユネスコは2025年を「国際量子科学技術年」と定め、「QUANTUM100」の空前のブームが巻き起こっている。一方、量子コンピュータに目を向けると、欧米中の覇権争いが激化し、日本でも実用化に向けた国産コンピュータ開発のニュースが注目の的だ。ICEPPはこれまで量子力学を礎とする素粒子物理の研究を行っており、2021年には量子プロジェクトの組織を立ち上げ、国内外屈指の大学・研究機関やIT企業との連携を強化してきた。サイエンス雑誌とは違った視点の必読「ICEPP×量子特集」をお届けしよう。

それぞれ独立に原子内の電子の状態を計算する方法をつくりあげ、量子力学の幕が開けた。ハイゼンベルクの手法は行列力学、シュレーディンガーの手法は波動力学と呼ばれている。2人の理論は違うように見えたが、アプローチが異なっているだけで、本質的には同じものであることが、シュレーディンガー自身により確かめられている。

1928年には、ポール・ディラックは、相対性理論の関係式を満たす波動方程式（ディラック方程式）を発見した。電子の振る舞いをより正確に表現できるようになったとともに、反粒子である陽電子の存在も予言した。

その後、物質をつくる素粒子に加えて、相互作用（力）をつかさどる素粒子の理解も進んだ。電磁気学を「量子化」した量子電磁力学（QED）では、光子が電磁気の力を媒介し、量子色力学（QCD）ではグルーオンが陽子や中性子を作り上げる強い力を媒介する。

量子力学の世界では、重ね合わせや量子もつれなど、私たちの日常生活とはかけ離れた現象が起きる。これらの現象は、セキュリティが堅固な量子通信や、超高速な量子計算へとつながり、量子情報科学という新たな分野を築いている。

01 THE BIRTH OF QUANTUM MECHANICS

現代物理学を支える量子力学の誕生

20世紀前半、物理学のあり方を大きく変える2つの理論が誕生した。1つは、アルバート・アインシュタインが提唱した相対性理論。もう1つは微小な世界での運動の様子を記述する量子力学だ。量子力学の誕生によって、原子の構造についての理解が進み、原子を構成する粒子の振る舞いを調べられるようになり、素粒子物理学の発展へとつながっていく。量子力学の萌芽を振り返っておこう。

量子力学は連続しないとびとびの量「量子」の発見から始まった。量子力学が登場するまでは、物理学で扱う量はすべて連続しているものだった。しかし、19世紀の終わり頃から、その考えでは解けない問題が出てきた。

有名なのは、溶鉱炉の中の鉄の温度だ。当時、溶鉱炉の中の鉄の色と温度に何らかの関係があることは、経験的に知られていたものの、その原理を説明できず、正確な温度がわからなかった。

その問題を解いたのが、マックス・プランクだ。1900年、彼は、鉄をはじめとする物体の温度と、そこから放出される光の色（波長）の関係を数式で表現した。ただし、このプランクの式は、光として放出されるエネルギーに「最小の単位」があると考えないと成り立たない。そのため、プランクはエネルギーには最小単位があるという「量子仮説」を提唱した。

1905年には、アインシュタインが「光量子仮説」を発表した。波として考えられていた光を、波長ごとに異なるエネルギーを持つ粒子として考えることで、金属から電子が飛び出す「光電効果」を説明した。

また、原子について研究が進むと、原子の中でもエネルギーがとびとびの値を取っていた。1913年にニールス・ボーアは、電子は原子核の周囲の決まった軌道上しか移動できない原子モデルを発表。原子核の周りを電子が回り続けられる理由を示した。

1923年には、フランスのルイ・ド・ブロイが「物質波」の概念を示し、粒子だと思われていた電子も波の性質を持つと主張。この主張は当時の常識を覆すものだったが、後に実験で電子に波の性質もあることが明らかになった。

そして、1925年から26年にかけて、ヴェルナー・ハイゼンベルクとエルヴィン・シュレーディンガーが、

