

特集 / 不確定性原理の新展開

不確定性原理の新展開

古い解釈と新しい定式化

小澤 正直

1. はじめに

不確定性原理は、1927年に『量子論的運動学および力学の直感的内容について』と題された論文¹⁾で、ハイゼンベルク (Heisenberg) によって提唱された量子力学の基本原則である。ハイゼンベルクは、これにより、量子飛躍、粒子・波動の二重性などのパラドックスを簡単な定量的関係に解消して、量子力学の直観的内容を明らかにしたばかりでなく、ニュートン (Newton) 以来の古典力学に基づいた決定論的世界観の終焉を宣言した。

不確定性原理の意味する内容は、深くて広範であるが、次の3つの関係式に集約することができる。以下、 \hbar はプランク (Planck) の定数を 2π で割った値を表す。

(A) 測定精度と擾乱に関する定式化：任意の状態において、対象の位置を測定すると、その平均誤差 $\epsilon(Q)$ とその測定による運動量の平均変化量 $\eta(P)$ について、

$$\epsilon(Q)\eta(P) \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

が成り立つ。

(B) 同時測定の精度に関する定式化：任意の状態において、対象の位置と運動量を同時に測定すると、位置の平均誤差 $\epsilon(Q)$ と運動量の平均

誤差 $\epsilon(P)$ について、

$$\epsilon(Q)\epsilon(P) \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

が成り立つ。

(C) 量子揺らぎに関する定式化：任意の状態における位置の標準偏差 $\sigma(Q)$ と運動量の標準偏差 $\sigma(P)$ について、

$$\sigma(Q)\sigma(P) \geq \frac{\hbar}{2} \quad (3)$$

が成り立つ。

ここで、平均誤差とは、厳密には2乗平均平方根誤差を意味し、つまり、測定されるべき量と測定値との差の2乗を平均して得られた値の平方根であり、運動量の平均変化量とは、測定が行われる直前の運動量と測定直後の運動量の差の2乗平均平方根である。また、ある量の標準偏差とは、その量と平均値との差の2乗平均平方根である。

(A) は、ハイゼンベルクがガンマ線顕微鏡の思考実験で最初に明らかにした関係であり、対象のある性質を知ることは、必然的に対象の他の性質を乱してしまい、それら2つの性質が同時に存在しているとは考えられないという考えの元となった関係である。

(B) は、ガンマ線顕微鏡の思考実験で (A) を示した後、ハイゼンベルクがそれを一般化して述べた関係で、実際に、(A) は (B) の論理的帰結であると考えられる。