

ハイゼンベルク不確定性原理の反証可能性

小澤 正直 (Masanao Ozawa)

名古屋大学大学院情報科学研究科

科学哲学の分野では、科学と疑似科学を区別する判定条件の一つに理論の「反証可能性」がポパーによって提案されている。法則は通常、何々が常に成り立つと言う普遍量化命題で述べられるため、それを実験で立証することはできないが、一つでも反例が見つかれば、実験で反証することができる。しかし、また、理論の検証は、何らかの理論と全く独立には行われないという意味で、ハンソンは検証の「理論負荷性」を指摘している。本講演では、通常、「量子力学では、位置と運動量のように非可換な物理量の同時測定は不可能で、それらの誤差の積は常にその交換子で定まるある一定値以上である」と述べられるハイゼンベルク不確定性原理の反証可能性について、最近の研究成果を交えて、解説を試みる。主な話題は、ハイゼンベルクの不確定性原理、量子測定の理論、誤差と擾乱の定義、誤差と擾乱の関係式、誤差と擾乱の計測法、スピン測定における誤差と擾乱の振る舞い、実験的実現などである。この解説を通して、これまでの量子力学には、誤差と擾乱の理論がなかったため、ハイゼンベルクの不確定性原理には反証可能性がなかったこと、量子測定理論の進歩によって、誤差と擾乱の定義とその測定法が与えられたこと、それらの基本的関係式（小澤の不等式）が厳密な方法で導かれたが、それにはハイゼンベルクの不等式にはない 2 項を付け加える必要があったこと、スピンの近似的射影測定でハイゼンベルクの不等式が全く成り立たないパラメータ領域があること、そのことを実験で実証したこと、量子測定の誤差と擾乱の計測可能性と基本関係式が生み出す新しい科学の可能性などについて議論する予定である。とりわけ、誤差は、真値と測定値の差の平均量（2 乗平均平方根）であるが、量子力学の理論的扱いでは、真値と測定値のそれぞれが非可換な作用素に対応し、それぞれを測定して差を求めるという方法では測れないと言う問題があった。それらにまつわる理論的、実験的問題の克服と、弱測定などの新しい実験技術との関わりについて議論する。

参考文献：

1. J. Erhart, S. Sponar, G. Sulyok, G. Badurek, M. Ozawa, and Y. Hasegawa, Experimental demonstration of a universally valid error-disturbance uncertainty relation in spin-measurements, *Nature Phys.*, DOI: 10.1038/NPHYS2194 (2012).
2. M. Ozawa, Universal uncertainty principle in measurement operator formalism, *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* 7, S672-S681 (2005).
3. M. Ozawa, Uncertainty relations for noise and disturbance in generalized quantum measurements, *Ann. Phys. (N.Y.)* 311, 350-416 (2004).
4. M. Ozawa, Uncertainty principle for quantum instruments and computing, *Int. J. Quant. Inf.* 1, 569--588 (2003).
5. M. Ozawa, Physical content of the Heisenberg uncertainty relation: Limitation and reformulation, *Phys. Lett. A* 318, 21-29 (2003).
6. M. Ozawa, Universally valid reformulation of the Heisenberg uncertainty principle on noise and disturbance in measurement, *Phys. Rev. A* 67, 042105 (1-6) (2003).