

# 量子論における測定と実在：不確定性・相補性・非局所性

小澤正直

名古屋大学大学院情報科学研究科

「量子論は実験結果を正しく予言するが、その解釈が問題である」とよく言われることがある。はたして、本当にそうだろうか。従来からハイゼンベルクの不確定性原理として知られてきた関係式が、最近の理論的提案[1]とその実験的検証[2]で否定されたことを考えると、そうとも言い切れないのではないだろうか。「実験結果の予測」と「解釈」をそれほど簡単に分けることができないことは、科学哲学の分野では、よく言われてきていることである。にもかかわらず、これまでの「量子論の哲学」では、あたかも「正しい理論」が解釈と独立に存在するとした上で、その「解釈」の議論に終始してきたかのように見える。つまり、「実験結果の予測」をするのは物理学者の仕事であり、その「解釈」を論じるのが、科学哲学者の役割であるという分業体制が暗黙のうちに仮定されてきたようである。しかし、それが現実的であるかは、疑わしい。

本講演では、量子論の草創期に物理学者のハイゼンベルクとボーアによって構築された量子論の「解釈」を再検討して、現代的な観点から合理的な「解釈」の構築を目指すわれわれの研究プログラム[3]について紹介したい。

1925年にハイゼンベルクは、ボルン、ヨルダンらと行列力学を構築して、量子力学の最初の体系を生み出した。その基本関係式にいわゆる正準交換関係がある。これは、粒子の任意の座標軸に関する位置  $Q$  と運動量  $P$  という二つの物理量が  $PQ-QP=h/(2\pi i)$  という関係を満たすという仮定である ( $h$  はプランク定数)。この仮定と物理量のとりうる値は正準交換関係を実現する作用素のスペクトル (行列の固有値) であるという仮定から、調和振動子のエネルギー  $H=P^2/(2m)+m\omega^2Q^2/2$  がとびとびの値を持つというプランクの量子仮説を導くことができた ( $m$  は粒子の質量,  $\omega$  は角振動数)。このように行列力学は、物理量の非可換性という新たな数学的要素を物理学に導入したのであるが、その物理学的意義、つまり、非可換性から導かれる物理学の新しい原理を明らかにすることがハイゼンベルクとボーアの課題であったと言えるであろう。

非可換性の役割が第一義的には、物理量のとりうる値について古典力学から大きく逸脱する「プランクの量子仮説」の導出であったことから、その新しい原理は「物理量の値」に対する拡大解釈を意図していたことは明らかである。歴史的には、ハイゼンベルクとボーアは 1926 年にこの共通の課題に対して激しい議論を繰り返したようであるが、1927 年になって最初に見解を明らかにしたのは、不確定性原理を唱えたハイゼンベルクであり、引き続いて、ボーアが相補性原理を提唱した。

行列力学の発見が、原子核における電子の正確な軌道概念の放棄という指導原理に従い、観測可能な軌道の遷移確率の計算規則を求めるところから導かれたように、ハイゼンベルクの成功は、理論の要素を観測可能なものに厳しく制限することから導か

れた。しかし、一方で、ハイゼンベルクは、何が観測不可能か、つまり、「軌道概念の放棄」は理論の前提ではなく、理論の帰結として導かれるべきであるとするアインシュタインの批判にさらされていた。このような葛藤から生まれた不確定性原理は、位置と運動量は共に正確に観測可能な量だとしながら、両者を共に測定する場合の測定精度の制約を明らかにし、霧箱の実験ではある精度で軌道が観測されるにも関わらず、正確な軌道概念が理論的には放棄されなければならない理由を明らかにした。

ボーアは、ハイゼンベルクが測定精度の制約を基本原理とすることに難色を示して、より根本的な原理として物理量の値の定義可能性に関する制約を基本原理と考えた。つまり、ある系の物理量はその系にその物理量を測定する装置を結合して初めて測定方法という物理量の操作的な定義が可能になるので、各系の物理量を測定装置から独立に定義されたものと考えすることはできないとする考えである。ボーアの考えは、アインシュタイン、ポドルスキー、ローゼン (EPR) のパラドックスに対する回答に明瞭に反映されている。そこでは、EPR が物理量の値と言う実在は、空間的に離れたところで行われる測定 (光速では影響が伝わらない測定) に影響されないと仮定したのに対して、そのような実在性の基準は曖昧であって、実在性という概念は、測定によって得られた値が、理論に組み込まれて、新たな理論的予言を導くことを可能とする論理的な条件にも影響されると反論した。つまり、EPR 状態にある空間的に離れた粒子 I, II に対して、粒子 I の実在の要素は、粒子 II に対して位置を測定するか、運動量を測定するかで異なると述べたのである。

さて、われわれの目標は、ハイゼンベルクの不確定性原理とボーアの相補性原理をそれぞれ量子力学の基本公理から厳密に導くことができる数学的厳密性をそなえた法則として再構築することである。これらの目標は、1980年代から発達した数学的量子測定理論と、1990年代の後半から進歩した様相解釈に関する数学理論に基づいて、これまでかなりの成功を収めている。それによると、不確定性原理として提唱された誤差と擾乱の関係式の不備が明らかにされ、新しい関係式が提案されている。また、ボーアの物理量は、ハイゼンベルクの観測可能量の概念より、ベルの存在可能量の概念に近い。したがって、相補性原理の課題は、測定の文脈に応じて、観測可能量から存在可能量を選び出す規則を数学的に明らかにすることにある。講演では、これまでの成果と今後の課題について論じたい。

#### 参考文献

- [1] M. Ozawa, *Physical Review A* 67, 042105 (2003); *International Journal of Quantum Information* 1, 569 (2003); *Annals of Physics* 311, 350 (2004).
- [2] J. Erhart et al., *Nature Physics* 8, 185 (2012); L. A. Rozema et al., *Physical Review Letters* 109, 100404 (2012); S.-Y. Baek et al., *Scientific Reports* 3, 2221 (2013); F. Kaneda et al., *Physical Review Letters* 112, 020402 (2014); M. Ringbauer et al., *Physical Review Letters* 112, 020401 (2014).
- [3] M. Ozawa, Y. Kitajima, John Templeton 財団研究助成 35771  
<http://www.templeton.org/what-we-fund/grants/reality-and-measurement-in-algebraic-quantum-theory> (Accessed: May 10, 2014)