

測定と実在：EPR に対する Bohr の回答

小澤 正直 (Masanao Ozawa)

名古屋大学大学院情報科学研究科

量子力学は科学における最も成功した理論の一つであり、すべての自然現象の背後にある基本原理だと考えられている。しかし、その発見から 80 年以上が経過した現代にあっても、量子力学が描き出す自然像に関しては、多くの不可解さが残されている。量子力学の基礎に関して、2 つの大きな問題を投げかけることができる。一つは存在論的な疑問で、量子力学の描く実在の特質を問うものであり、もう一方は認識論的な疑問で、量子力学の描く実在が我々にどう認識されるかを問うものである。ところで、量子力学の基本概念が状態と観測可能量からなり、また、基本的な状態変化が時間発展と測定であることから、この 2 つの問題は、より具体的な次の問題に還元することができる。つまり、観測可能量の値とは何かという問題と、観測可能量の値はいかにして測定されるのかという問題である。

量子力学が現れるまでの自然理解の根本原理を担っていた古典物理学に対して、これらの問題は、自明であると考えられている。つまり、どの観測可能量も常にその値を持ち、測定によって、それがそのまま測定装置に移され、我々の知るところになるが、測定によって対象が何らかの影響を被ることはない。我々の素朴な自然観は、この古典力学的な自然像から出来上がっていると考えられている。ただし、これがそのまま我々の経験を反映しているかどうかは注釈が必要であろう。温度計でお湯の温度を測るとお湯の温度が変化するということはよく指摘される。しかし、非常に小さい温度計を用意すれば、その影響は無視できる。つまり、影響がないというのは、連続的にいくらでも小さくできるという意味である。一方、量子力学では、知るといふ人間の知覚作用が対象に影響を与えると言われることがあるが、これは誤解である。見るためには光を当てる必要があるが、光も長年、当て続けると色があせてくる。そうだとすれば、一度見ただけでも当たった光はその何分の一かの影響を与えたことになる。見ることが対象に影響を与えるのはその意味である。この影響は、巨視的スケールでは連続的にいくらでも小さくできると考えられるが、微視的スケールでは、光のエネルギーが量子化されるので、いくらでも小さくすることはできない。

さて、量子力学には、不確定性原理というものがあり、これにも、存在論的及び認識論的の 2 つの側面がある。存在論的不確定性原理は、位置と運動量のように非可換な 2 つの観測可能量が同時に確定した値をもつことはないという原理で、両者の不確定さ（標準偏差）の積が一定の下限を持つというロバートソンの不等式によって定量的に表現される。一方、認識論的不確定性原理は、位置と運動量のように非可換な 2 つの観測可能量を同時に測定することはできないという原理で、両者の測定誤差に関するいわゆる小澤の不等式によって定量的に表現される。ただし、小澤の不等式で許容されている

ように、実際には、位置と運動量が同時に測定可能な場合がある。そのようなケースの典型例が、いわゆる EPR の思考実験である。

EPR 思考実験では、遠く離れた粒子 1 と粒子 2 がある時刻 t に EPR 状態と呼ばれる量子纏れ状態にあり、それぞれの位置と運動量が完全に相関している。従って、時刻 t における粒子 2 の運動量を測定すると、時刻 t の粒子 1 の運動量もわかってしまう。つまり、粒子 1 の運動量の測定ができたことになるが、この測定は粒子 1 には何の影響も与えていないので、粒子 1 に取り付けた測定装置で直接時刻 t の粒子 1 の位置を測ることができる。従って、EPR 状態では、粒子 1 の位置と運動量を同時測定することができる。これは、シュレーディンガーによる EPR 思考実験の解釈である。それでは、EPR 状態においては、粒子 1 の位置と運動量が同時に実在していると考えられるのだろうか。

アインシュタイン達は、実在性の基準 (EPR 実在性基準) を設け、その基準に照らして EPR 状態においては、粒子 1 の位置の値と運動量の値が同時に実在していると結論した。その基準とは、ある観測可能量の値をその系を乱すことなく確実に予言できれば、その値は実在するというものである。EPR 思考実験では、粒子 2 の運動量を測定すれば、粒子 1 の運動量がわかる、つまり、確実に予言できることは前述したが、EPR 状態の特質から同様に粒子 2 の位置を測定すれば、粒子 1 の位置がわかる。従って、EPR 実在性基準から運動量の値も位置の値も実在していると結論される。ところが、これは前述の存在論的不確定性原理と矛盾する。つまり、そのような状態が量子力学の理論には含まれていないので、アインシュタイン達は、量子力学は実在を完全に記述していないと結論した。

ボーアは、この議論に対して直ちに反論を発表した。その骨子は、EPR 実在性基準が独断的であり、量子力学が不完全だという結論は受け入れられないというものである。ボーアの反論は非常にわかりにくいという定評があるが、結果的には、EPR 状態において位置の値と運動量の値が実在することを記述する理論は、不可能であることが理論的にも実験的にも示されて、ボーアの反論の方が妥当だと評価されている。ボーアの反論において重要な点は、EPR の思考実験において、粒子 2 の運動量を測定する場合と、粒子 2 の位置を測定する場合とでは、粒子 1 の実在の要素が異なるという主張である。つまり、いずれの場合にも、粒子 1 に力学的影響を及ぼすことがないという意味で、粒子 1 を乱していないことは確かであるが、粒子 2 の運動量の値から、粒子 1 の運動量の値が予言できるための条件と、粒子 2 の位置の値から、粒子 1 の位置の値が予言できるための条件は異なるので、粒子 2 でどの観測可能量を測定するかと言うことが、粒子 1 の実在の要素に影響を与えるという主張である。

クリフトンとハルヴォーソンは、このボーアの主張を数学的に明確な形で再構成することに成功した。つまり、ある状態のもとである観測可能量を測定した場合、その観測可能量を含めて、値が実在すると考えられる観測可能量の集まりを一般的に特徴付けると、ボーアの主張のように、EPR 状態で粒子 1 に関する実在の要素は、粒子 2 で測定する観測可能量に依存する。本講演では、この仕事を通して、ボーアが採用した実在性の基準を明らかにし、その基準と、その後現れたコッヘン・シュペッカーの定理などの no-go 定理との関連を明らかにする。また、これらの結果と、量子集合論に基づく新しい量子論的実在像および文脈的実在主義との関係について議論する。