

EPR に対するボーアの反論の再構成

北島雄一郎
日本大学生産工学部

空間的に離れた二つの粒子に関する波動関数が存在して、その波動関数において一方の粒子（この粒子を粒子 1 とよぶ）の位置を測定することによって、もう一方の粒子（これを粒子 2 とよぶ）の位置を確実に知ることができ、かつ、その波動関数において粒子 1 の運動量を測定することによって、粒子 2 の運動量を確実に知ることができるということを、Einstein, Podolsky, Rosen（以下、EPR と略記）は示した（EPR, p.780）。この状態における実在を考察するために、EPR は「我々がある系をいかなる仕方でもかき乱すことなく、ある物理量の値を確実に（確率 1 で）予言することができるならば、その物理量に対応する物理的実在の要素が存在する」（EPR, p.777）という基準を提起した。粒子 1 と粒子 2 は空間的に離れているから粒子 1 の測定は粒子 2 に影響は与えないと考えられるので、この基準に基づくと粒子 2 の位置と運動量はともに実在の要素となる（EPR, p.780）。一方、量子力学において粒子 2 の位置と運動量は非可換な物理量なので同時に実在の要素となることはできない（EPR, p.778）と EPR は論じた。これらの議論と、「物理理論が完全であるならば、物理的実在すべての要素はその物理理論の中に対応する表現をもつ」（EPR, p.777）という完全性に関する基準から、量子力学的記述は不完全であるという結論が導かれる。

この議論に対して、ボーアは「系をいかなる仕方でもかき乱すことなく」という EPR による実在の基準に曖昧さがあると指摘する（Bohr 1935, p.700、日本語訳、pp.113-114）。その上で、次のように述べている。

測定過程の最後の決定的な段階では、考察している系に対して力学的擾乱が加わっていないことは明らかである。しかしこの段階でさえ、その系の将来の振る舞いに関していかなるタイプの予言が可能なのかを定める諸条件そのものに対する影響という問題が本質的なものとして存在するのである。「物理的実在」という言葉を与えることが正当と考えられるどの現象に対しても、この諸条件がその現象の記述に不可欠の要素を構成しているのであるから、上述の著者たち[EPR]の立論は、量子力学的記述が本質的に不完全であるという彼らの結論を正当化するものではないことがわかる。（Bohr 1935, p.700、日本語訳、p.114）

つまり、ボーアによれば、量子力学においてある物理量の物理的実在を語るためには、その物理量をどのような条件で測定したのかを考慮しなければならず、「物理的実在の問題に対する私たちの見解を根底から改めざるをえない」（Bohr 1935, p.697、日本語訳、p.104）ことになる。

より具体的には、ボーアは一方の粒子の位置を測定しようとして装置を設定すると、もう一方の粒子に対して力学的な擾乱を加えているわけではないにもかかわらず、もう一方の粒子の運動量が実在の要素であると考えられることはできなくなると考える (Bohr 1935, pp.699-700、日本語訳、p.112-113)。こうした議論をもとに、ボーアは量子力学が不完全であるという EPR の結論に反対した。

量子力学が不完全であるとする隠れた変数があり、それを考慮に入れることによって量子力学は完全なものとなるだろう。それでは、そのような隠れた変数は存在するのだろうか。この問題を考える際に重要なのは、ベルの不等式である。ベルは、局所的な隠れた変数を仮定すると、ある不等式が導かれることを示した。これがベルの不等式と呼ばれるものであり、この不等式が成立するかどうかは実験によって確かめることができる。そして実験の結果、量子力学においてベルの不等式は破れていることが示された。したがって、ベルの不等式を導く際に仮定した条件をみたく局所的な隠れた変数は存在しないことになる。つまり、ベルの不等式を導く際に仮定した条件を妥当であるとするならば、EPR による量子力学は不完全であるという結論は否定される。

本発表では、非相対論的量子力学のみならず相対論的場の量子論にも適用可能な枠組みである代数的量子論において EPR と同様の議論が成り立つ状態を定義する。そして、この状態が数多く存在することと、この状態においてベルの不等式が破れることを示す (Kitajima 2013)。その上で、EPR 状態のもとで EPR に対するボーアの反論を再構成することによって (cf. Ozawa and Kitajima 2012)、ボーアによる実在の概念を明確にしたい。特に、一方の粒子の位置の測定という実験設定がもう一方の粒子に力学的な影響を与えるわけではないにもかかわらず、その実験設定がもう一方の粒子の実在の要素には影響を与え、その結果もう一方の粒子の運動量は実在の要素とは考えられないという一見謎めいたボーアの反論を明確にすることを目指す。

参考文献

- Bohr, N. (1935) ‘Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?’, *Physical Reviews*, **48**, 696-702. [山本義隆編訳『ニールス・ボーア論文集 I 因果性と相補性』(岩波文庫) pp.101-119]
- Einstein, A., Podolsky, B., and Rosen, N. (1935) ‘Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?’, *Physical Review*, **47**, 777-780.
- Kitajima, Y. (2013) ‘EPR states and Bell correlated states in algebraic quantum field theory’, *Foundations of Physics*, to appear.
- Ozawa, M. and Kitajima, Y. (2012) ‘Reconstructing Bohr's reply to EPR in algebraic quantum theory’, *Foundations of Physics*, **42**, 475-487.