

量子情報技術と科学基礎論

東北大学大学院情報科学研究科
小澤 正直 (Masanao Ozawa)

量子力学は、微視的世界の現象を原因とする我々の経験を説明し、予測するために生まれ、大いに成功を収めた物理理論であるが、それ以前の自然科学が持っていた規範を大きく打ち破ったことで、その成立以来、科学基礎論の重要な研究対象とされてきた。量子力学の基本原則であるプランクの量子仮説が、19世紀末の主力産業であった鉄鉱業における熔鉱炉の温度制御の問題という当時の科学技術上の社会的要請から発見されたことは、科学技術と科学基礎論の関係を考える上で興味深い事実である。20世紀後半から現在に至るまで主力産業は情報技術を中心に進展してきたが、このような社会の情報化は、20世紀末に至り、「情報は物理に従う」という新しいパラダイムのもとで量子情報技術という概念を確立し、量子力学に大きな変化をもたらした。本講演では、この量子情報技術による量子力学の変貌とそれによって量子力学的世界観がどのような変更を受けるのであろうかという問題について解説する予定である。

量子情報技術の萌芽は、1960年のレーザーの発見に遡ることが出来る。レーザーによって初めて人類は、量子状態というそれまでいわば仮想現実にはすぎなかったものを自由に制御する可能性を得たからである。本講演では、まず、レーザーの発見から、シャノン限界を打破する光通信、公開鍵暗号を崩壊させる量子コンピュータ、無条件安全な量子暗号といった基幹となる量子情報技術がどのように発見され、展開してきたのかを紹介し、次にそれらの技術を理論的に解明するために量子力学の内部でどのようなパラダイム変換がおこったのかを解説する。

このようなパラダイム変換の典型として、所与の現象を説明する科学から可能性を究める科学への変貌があげられる。観測理論は長いこと量子力学の基礎に関する半ば哲学的な議論の場と見なされてきたが、1984年に物理的に実現可能なすべての観測を厳密な数学的対象で特徴づけるという問題が解決すると、1990年代の半ばには、量子情報理論の中核理論の位置を占めるようになり、そこから、量子テレポーテーションを始めとする量子情報技術のプリミティブに関する基礎理論が生まれた。本講演の後半では、このようなパラダイム転換が、これまでの量子力学の哲学にどのような変更を迫っているのかについて考察する。

1980年代前半にいわゆるベルの不等式の実験的検証が一段落し、量子力学が説明する現象を非局所的実在主義と整合的な理論で説明することが不可能であることが明らかにされた。実在主義の放棄は、ボーアが当初から主張していた量子力学の相補性原理、および、それに基づくいわゆるコペンハーゲン解釈の帰結であったが、アインシュタ

インは実在主義的理論へ還元する可能性を EPR パラドックスで示唆していた。ベルの不等式の検証は、アインシュタインのプログラムに従うどの理論も説明することのできない実験的事実があることを検証したと考えられている。

量子力学が記述している現象の背後にどのような実在像が描けるのかという問いに対して、多世界解釈や様相解釈など様々な試みが知られているが、そのいずれにしてもいまだに首尾一貫した描像を与えていない。この問題に関して、量子情報の観点から二つの問題を提起する。一つは、物理量の値の実在性と観測可能性に関する広く流布している誤解についてである。これは、不確定性原理に関する根深い誤解を導いてきたが、その解決について解説する。もう一点は、量子情報技術が我々の生活に取り込まれることにより、物理世界に関する常識が変化する可能性についてである。

量子暗号のあるプロトコルでは、二つの粒子のそれぞれの性質は不確定だが、それらの関係性は確定しているという、量子纏れ合い状態と呼ばれるいわば非実在論的状況、つまり、実在主義的代替理論では説明できない確率相関を生み出す状態を利用して、個人情報をおかすことなく個人認証が可能になる。このように、量子力学的な実在のあり方を利用することにより、情報セキュリティの飛躍的向上が期待されている。将来、このような仕組みを日常生活で享受している哲学者が量子力学をどう解釈するだろうかというのは興味のある問題である。

もし、現代の哲学者が空間は曲がっているという常識の中で生活しているならば、将来、論理は非分配的だという常識の中で生活することも可能であろうと考えられる。これは、「論理は経験的か」という論文での量子論理に対するかつてのパトナムのスタンスである。しかし、量子論理がこれまでのように原始的なままでは、説得力が薄い。これに関して、最近飛躍的な進展が見られる量子集合論の現状を解説して、本講演を締めくくる予定である。そこでは、量子集合論における様々な理論的装置が、量子論理に基づく存在論としての機能を十分に発揮して、実在の極めて首尾一貫した描像を描き出す可能性について解説する予定である。