

Lifting the fog from the north

コペンハーゲンからの霧を晴らす

Nature Vol.453 (39) / 1 May 2008
Maximilian Schlosshauer

量子論にかかる悪名高い霧の一部は、波動関数を唯一のものと考えerことで解決できる。

物理学者リチャード・ファインマンが、「量子力学を理解する人間などいない」といったのは有名である。古典物理学は、私たちの日々の経験を忠実に映し出している。私たちはテニスボールの速度という概念を理解することができ、ニュートンの運動法則によりテニスボールの運動を説明することができる。しかし、これは量子物理学には当てはまらない。位置や運動量などの古典的な概念は、原子の世界の現象を矛盾なく記述することができない。

20世紀の初めに、電子などのミクロの粒子は、時に波のようにふるまうことが実験により示された。電子銃から電子を発射して複数のスリットを通過させると、池の表面のさざ波の重なり合いに似たパターンができる。そこで、量子力学の創設者たちは、抽象的で数学的な存在である波動関数を導入して物理系を記述した。

エルヴィン・シュレーディンガーは、1920年代に、波動関数は実在の波動を表していると考えた。そして、波動関数が空間に広がっているときには波としてのふるまいをみせ、波動関数が狭い範囲に押し込められて「波束」になったときには粒子としてのふるまいをみせると提案した。しかし、このアイデアは壁にぶつかった。量子力学の法則によると、孤立したミクロの粒子を記述する波束は急速に分散してしまいが、実際の粒子は明らかにもっと安定しているからである。

「波動関数だけが存在している」とするこの描像は、別の理由からも退けられた。波動関数は滑らかに発展していくため、空間的および時間的に不連続にみえるプロセスを説明できないと考えられたからである。波動関数は、

古典的にみえるたくさんの構造の重ね合わせに対応する、奇妙なものになるとも予測された。その例が、箱の中に隠されている間は、生きている状態にも死んでいる状態にもあるとされた「シュレーディンガーの猫」である。

そこで、物理学者たちは、波動関数は測定結果の確率を表す象徴的なものであると解釈し直した。こうして、系の物理状態に関するすべての情報を含むとされる波動関数と、ランダムな測定結果（量子イベント）という二元論ができあがった。それでは、測定結果はどうして現れるのだろうか？ また、測定結果はなぜ古典的な変数で表現できるのだろうか？

ニールス・ボーアは量子力学のコペンハーゲン解釈を提唱した1人であるが、彼はそれより先に進むことを拒んだ。こうして有名な「北からの霧」がかかった。そこでは、古典的な測定装置が中心的な位置を占め、実験結果を与える波動関数の「収縮」を引き起こすとされた。量子世界と古典世界の二元論が導入された。両立しえない古典的記述は、「波動と粒子の二重性」や「相補性」（このような記述は、互いに排他的な実験のしかたに関係しているに違いないという考え方）などの用語で神聖化された。コペンハーゲンからの霧は、量子力学は基本的には情報に関する理論であるとする最近の提案にも及んでいる。

この霧を晴らしたいなら、波動関数のことを、確率計算のための道具以上のものとして考えるべきである。量子力学を一貫して適用すれば、波動関数だけを使って、ミクロの現象とマクロの現象の両方を理解できるかもしれない。



D. PARKINS

私たちが経験する古典的世界は、量子宇宙の投影された影である。

そのかぎとなる要素が「エンタングルメント」（量子もつれ）である。系が互いに相互作用すると、それらは個別性を失い、共通の波動関数で記述しなければならない。エンタングルメントは至るところでみられる。物理系は環境との相互作用を避けることはできない。だから、系のふるまいは系と環境の両方を含む波動関数によって決定される。これが量子デコヒーレンス（干渉性の消失）という物理過程である（*Nature* 2008年5月1日号22ページ参照）。デコヒーレンスは系を「検閲」して、特定の場所にある物体など、古典的にみえる構造のみが通常観測されるようにする。観測もまた、二元論に頼ることなく、もつれていく相互作用として記述することができる。

さらには測定過程も、急速だが連続したデコヒーレンスにより説明できる。電子が写真乾板にぶつかるときに電子の波動関数を点粒子としてふるまわせるのは、「測定」の不思議な作用などではなく、電子と写真乾板（とその環境）とのエンタングルメントである。その結果として起こるデコヒーレンスは「強固で狭い」波束を作り出し、それが粒子のようにみえる。これはシュレーディンガーの考え方に近い。

もつれた波動関数はまだ、写真乾板上の点の位置などの古典的な構造の重ね合わせを含んでいる。私たちは、環境（このページにぶつかって散乱していく空気分子など）を完全にコントロールすることはできないので、そうした重ね合わせは通常、私たちの視界から隠されている。それにしてもなぜ、電子がぶつかった点はここに1つあるだけで、あそこにはないのだろうか？ そうした

観測はすべて、時間的に広がりのあるものとして考えられ、デコヒーレンスのおかげで、事実上、独立した波動関数の「分枝」として考えられる。議論の余地はあるが、おそらく必要なのはこれだけだろう。観測されない枝を波動関数から取り除く新しい収縮プロセスを導入すれば助けになるかもしれないが、実験によって否定されるおそれがある。もっとも、新しい物理現象が発見される可能性も常にあるが。

実験家たちは直観に反する「シュレーディンガーの猫」の子孫を多数作ってきた。例えば、大きな分子が別々の場所にある状態の重ね合わせや、電流が反対方向に流れている状態の重ね合わせなどを実現している。これらの実験は、デコヒーレンスから古典的な性質が連続的に出現してくる仕組みを実証した。こうした観測は、もつれた波動関数という「純粋に量子的」な描像で説明することができ、古典的な構造はすべてみせかけであるという考え方を支持している。古典的な観測装置、粒子、量子イベント、相補性や「波動と粒子の二重性」などを基本的な概念として導入する必要はない。

波動関数を真剣に受け取ることは、日常世界とはかけ離れた「量子宇宙」につながっていく。しかし、かつてファインマンが警告したように、パラドックスのようにみえるものは、現実と、現実のあるべき姿についての私たちの感覚との衝突にすぎないことが多い。 ■

Maximilian Schlosshauer は、メルボルン大学物理学科（オーストラリア）のリサーチフェロー。『デコヒーレンスと量子世界から古典世界への遷移』（邦訳なし）の著者。