

量子力学の観測問題について

松原 邦彦

2007年7月7日

量子力学における観測値の決め方は次の2ステップで行われる。

ステップ 1 : 与えられた系の物理的状態は

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi \quad (1)$$

に従って変化すると規定される。 H は対象としている系のハミルトニアンである。ここで ψ は

$$\psi = \sum a_i \psi_i \quad (2)$$

で表される状態にあるとする。 $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ は Q を力学変量に対応する演算子とし、 λ_i をある確定した数値とする固有値方程式

$$Q\psi_i = \lambda_i \psi_i \quad (3)$$

を満たしているとする。

ステップ 2 : 力学変量 Q に対して測定を行うと、これに対応する値 λ_i のいずれかが観測されるとする。複数の値 λ_i の中のどれが観測にかかるか、その確率は ψ を構成する要素 ψ_i の比率 a_i に依存すると解釈すると観測事実が説明できる。

ステップ1は連続、因果的に理論が組み立てられている。そして物質およびエネルギーが波動の形態で移動する描像によって記述できる。ステップ2の観測値において突然に不連続、非因果的に結果が現れる。そしてその現れ方は粒子の描像として観測にかかる。この観測過程の根拠はいったい如何なるものであろうか？これは論理的に一貫性をもつものなのであろうか？というのがいわゆる観測問題である。この問題は、いったい量子力学はどこまで実在の世界を反映しているのかという疑問にまで発展し、量子力学の解釈をめぐる中心的課題として現在に至るまで議論の絶えない問題となっている。

量子力学における観測問題を巡って様々な考え方が提起されている。これらの分類は簡単ではないが、便宜のため以下には概略的に4つに分類して考察する。

考え方 - その1 : 測定したときに物理的実体が確定する。

観測が行われるまでは、波動関数が量子的状態を表し、観測装置によって観測されたときに、物理的な実体が確定すると考える。波動関数は観測されたとき、突然に収縮し、粒子として現れるとする。いったん観測にかかれば、観測された状態以外は全て捨てられ、再びよみがえることはないとする。そしてその後の時間発展は観測によって選び出された状態からスタートする。かくして物理的実体を決定する役割を観測装置に負わせる。観測装置はマクロな大きさを持ち、常に古典力学に従って機能している。したがって観測装置は

古典力学によって支配されているとせざるを得ない。連続的な波動関数と不連続的な粒子の奇妙な同居を一般原理へと昇格させ、自然界がもつ相補性として受け入れようというわけである [1]。

この考えはいわゆるコペンハーゲン学派の解釈として、量子力学の主流的考え方をなし、現在まで行われてきた実験操作と矛盾しない、という点で妥当性をもつ。現実のあらゆる現象を観察してみても、一度粒子が特定の位置にあるエネルギー、運動量で観測された以上、それと矛盾する現象は決してその後に見れることはない。このことに鑑み、この理論はそのプロセスを検証するため、如何なる実験と測定を行っても、その結果は無矛盾であるように組み立てられている。

一方、この考え方に沿う人々はこれで全て満足しているかといえば、決してそのようには見えない。コペンハーゲン学派の中心人物であるボーアでさえ、その友人ペーテルセンに語ったところによると、「量子的世界というものは存在していません。抽象的な物理的記述が存在しているにすぎません。物理学のなすべき仕事は、自然界はどのように存在しているのかを見つけ出すことと考えるのは間違っています。物理学にとって重要なのは、自然界について何を述べることができるか、なのです。 [2]」つまり、数学的記述さえできればそれでよしとして、なぜそうなるかの解明を放棄せざるを得なくなっているのである。そこで、この考え方に沿う科学者はその不満足を補うため、観測装置の解釈をめぐる再びいくつかの派に分かれる。(この辺の事情は [3] に詳しい)

a) 観測装置も量子力学的な状態ベクトルで記述されるべきであるとして、その観測の機能を理論的に古典力学の機構に導こうとする考え方のグループ。

b) 観測の本質は測定器の「不可逆過程」そのものであるとする。測定器を作動させるためにエネルギー供給して増幅する過程が不可逆過程となり、その乱雑性が波動関数の収縮を起こすとする考え方のグループ。

考え方 - その 2 : 意識が波動関数を収束させる。

この考え方はコペンハーゲン学派の考え方に基づきながら、上記 a) の考えにそってその不満足な点を補おうとする。観測装置も量子力学的状態で表されるとすれば、観測のステップでは波動関数の収束を求めることはできない。その次のステップには観測者がいる。観測者もまた量子力学的状態で記述されるべきものとする。測定の最終末端は脳細胞によって認識される段階に至る。この考え方は波動関数の収束は観測の最終末端における「意識」によって起こるとする。この捉え方は、観測問題に存在するギャップを「物理的世界」と「意識の世界」の原理の異なる 2 つの世界にまたがる事象とし、両者が接触している界面に特別な性質を持たせようとする点で、他の考え方には見られない特徴をもつ。ユージン・ウィグナーがこの立場の指導的な提案者であった [4]。この観点では明らかに意識の世界は線形なシュレーディンガー方程式では記述できないことを前提にする。

しかし、その意識する主体は必ずしも人間とは限定しないとしても、では生命体ならどのレベルまでのものか判然としない。生命体が現れる以前の地球や、生命体の全くいない宇宙空間においてはいかなる波束も収束することがない、という矛盾に満ちた考え方に導く。

ペンローズ [5] は明かにこの考え方に基づきながら、他の捉え方と統合的な理論を展開する試みを行っている。波束の収束を「客観的収縮 OR (Objective Reduction)」と名付け、これをもって逆に脳神経つまり心の働きを説明しようと試みる。これは「物理の世界」と「意識の世界」を統一しようとする試みでもある。

考え方 - その 3 : 波動関数は知識の状態を記述するものである。

波動関数は物理系の状態を記述するのではなく、われわれが得ることのできる知識の状態を記述すると考える。こうすることによって解決できる問題は、波動関数の連続的な構造と、観測によって確認される不連続

的な構造との間に存在する思考上のギャップを立ち切ることである。この考えに沿えば、波動関数の突然の収束についてそれ以上の説明を不要とし、理論上のギャップはもはや問題とはならなくなる。

この考え方の発芽はマックス・ボルンの解釈 [6] にみられる。考え方 - その 1 で引用したボーアの言葉の中にさえ、この考え方が一部混入しているのがみられる。ボーアの考え方は、ボルンの解釈から一歩進めて到達したものとも考えられる。波動関数は量子的な粒子の運動について統計的な情報を与えるものとする限り、この考え方は妥当な側面を持っている。この解釈によれば、粒子の運動の不連続性が本質的なものであって、波動関数はそれらの情報について与えられる統計的な知識を記述したものと解釈される。

しかし、上の解釈は、普通の意味での情報の欠落があることを前提にしているから、最大に情報が得られた場合はどうなるのか、という問題が発生してくる。非常に低いエネルギーにおける振舞いにも現れる干渉効果や、1つの電子について現れる量子効果についてなぜ統計的にならなければいけないかという疑問について明確な解答を与えない。

この考え方をとる物理学者はその宿命としてそこで発生した不都合を解決すべく次の2つの方向に分かれる。1つは、波動関数は単なる計算の道具であるから、それ以上の解釈は無意味であるとするものである。(例えば [7]) その極限において、マックス・ボルンも予想しなかった考え方、つまり量子論は認識の科学であって、認識状態はすなわち自然の姿であり、それ以上の追求は必要ない、という認識論が待っていることになる。

もう1つはそれを原理とはみなさず、情報の完全な記述方法があるはずであると主張する方向である。アインシュタインは最初ボルンの考え方を採用した。しかしそれでは納得できず、この第2の方向を模索した。

この考え方の延長線上には、完全な記述を支える隠れた変数があるはずであるとする理論への展開がある。ディヴィッド・ボームはこの考え方から出発している。彼は34歳のころ「観測過程の解釈を考へてはいけぬ」としきりに書いていたという。観測に伴って現れる確率的状態変化の裏にはそれを必然的に記述する隠れた変数がある、とする量子論を世に送り出してから、晩年のインタビュー記事 [8] には「量子力学が記述するのは統計的なものだけで、個々の現象や事象については何も記述できず、確率しか論じ得ない。」と語ったとある。隠れた変数理論は相対論を満たさないことが認められており、一般には認知されていない。

考え方 - その 4 : 多世界に分岐したものの1つが実現する。

波動関数によって予想されるプロセスは全て存在する、と考える。すべてシュレーディンガー方程式に従って時間発展するのが量子力学的状態だとし、ある物理量を観測するとその観測された状態が人間によって現在の世界と認識されるのであって、別の観測された状態があればそれが現実の世界だと考える。こう考えると量子力学的世界は連続的に変化しているのであって、「波束の収縮」などは考えなくてよい。この考え方は1957年にヒュー・エヴェレットによって提案された [9]。

和田純夫氏 [10] によれば、波動関数を局在波としてのデルタ関数の重ね合わせとして表し、各局在波それぞれを、そこに存在する粒子に対応させる。考えている粒子は1つなのに、それが「場所 a にある状態」、「場所 b にある状態」などの一般に無限の状態が共存していると解釈する。そこで、波動関数は粒子の存在の「共存度 (coexistence)」を表すという。この共存度は観測が行われる前はお互いに干渉効果を示すが、観測が行われたあとは干渉を起こさないとしている。

共存する各状態の中の1つがどのようにして実現するかの説明には次のように答える。すなわち、観測者は共存する各状態、言い換えればそれぞれの世界にいるとして、我々はたまたま観測結果を得た世界に属していたのであると。

この考え方に基づくと、それぞれの瞬間に世界は様々な観測可能性の数だけ分岐していくことになる。そして観測して確定した数だけ世界が実在することになる。それぞれ観測にかかった世界は分岐し、他の世界とは干渉することなく連続的に時間発展をする。従って異なる観測値を得た別の世界の結果はこちらの世界に何の影響も与えない。かくして同時に存在する多数の平行宇宙が何の相互作用をすることなしに存在すると認めることになる。そこで「多世界解釈」とも呼ばれる。

このプロセスを許容すれば、まともな説明が不可能となっている「波束の収縮」という現象から逃れることができる。波束は収縮することなく、どこまでも連続的に時間発展していく。そして物理世界は論理的に一貫しており、突然の飛躍を持ち込む必要がなくなる。

この考え方にも多くの批判がある。第一にその多世界が存在することを証明する事ができないのではないかという点である。確認できなければ、正しいかどうかわからない。第二に時間と共に限りなく多くの世界に枝分かれしていくという世界は、「実在」の意味を根底から揺るがすというものである。

これらの解釈に対する物理学者の反応は様々である。いずれの理論にも古典力学と量子力学の論理的衝突があり、我々は思考のいくつかの段階で論理を切り替えて理解しなければならないのが現状である。

筆者は、このような理論の衝突は、我々の知らないもう一つの時空の性質があり、それを明らかにできていないところから発生しているのであろうと推測する。もしこれを明らかにできれば観測問題は解決の見通しがたつのではないかと考える。

追記：このメモは拙書「時空構造と存在の確定」(丸善プラネットより発行)の第II部の序章の一部をアレンジしたものです。「時空構造と存在の確定」ではこの考えに沿って一つの新しい時空の性質を導入し、独特の量子力学の解釈の理論を展開しています。

参考文献

- [1] バスティン編, "量子力学は越えられるか", 柳瀬睦男、他 訳, 東京図書 (1973). 原著: "QUANTUM THEORY AND BEYOND", edited by Ted Bastin, Cambridge University Press, London (1971).
- [2] J.C ポーキングホーン「量子力学の考え方」宮崎 忠 訳 講談社(1987) p.208, 第8章にボアとアージ・ペーテルセンという友人との個人的会話であるとして紹介されている。この引用はさらにマックス・ヤンマー著、「量子力学の哲学」からのものである。
- [3] 並木美喜雄、「量子力学の観測問題をめぐって」、日本物理学会誌 第37巻第7号(1982), p.535. a) として v.Neumann, E..P. Wigner を挙げ、b) として H.S. Green, A. Daneli, A. Loinger, G.M. Prosper, L. Rosenfeld を挙げている。これらの論文のいくつかは「新編物理学選集 69 量子力学における観測の理論」、日本物理学会、東京、1978 に収録されている。並木美喜雄、「観測問題とその周辺」、数理学 No. 392 Feb. 1996 サイエンス社, p.5 にもその解説がある。
- [4] E.P. Wigner, "Remarks on the mind-body question", in The Scientist Speculates, p. 284-302, edited by I.J. Good, Heinemann, London(1961)

- [5] ロジャー・ペンローズ著、「心は量子で語られるか」中村和幸 訳 p.132 講談社 (1998) Original: Roger Penrose, " The Large, the Small and the Human Mind " Cambridge University Press (Cambridge)
- [6] Born, M. Atomic Physics (Blackie, 1944)(ボルン「現代物理学」鈴木、金 関 訳 みすず書房. ボルンの考え方を解説したレポートはほかにも見られる。例えばバスティン編量子力学は越えられるか柳瀬睦男、他 訳 東京図書 (1973) "QUANTUM THEORY AND BEYOND", edited by Ted Bastin, Cambridge University Press, London (1971) の p.4. その他、ピーター・ギビンス「量子論理の限界」、金子 務、宇多村俊介訳、産業図書 (1993), p.81. Original: Peter Gibbins, "Particles and Paradoxes, The Limits of Quantum Logic, Little Ldd, London(1987)
- [7] Christopher A. Fuchs and Asher Peres, Quantum Theory Needs No 'Interpretation', Physics Today, Vol.53, No.3 (March 2000) American Institute of Physics p.70
- [8] 井本信之「量子力学の解釈問題」、数理科学 (特集 波動関数のミステリー)、Vol.7, サイエンス社 (2002.7), P.52. それぞれの解釈問題の旗手にインタビューしたときの記事。「ボームに聞く」を参照。
- [9] H. Everett, "Relative State Formulation of Quantum Mechanics", Rev. Mod. Phys. 29, 454(1957)
- [10] 和田純夫「状態の共存と波動関数の解釈」 数理科学 (特集 波動関数のミステリー) Vol.7, サイエンス社 (2002.7), P.7