The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	物理的実在の量子力学的記述は完全だとみなしうるか？
Author(s)	森田, 邦久
Citation	メタフュシカ. 2019, 50, p. 51-61
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/73766
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

物理的実在の量子力学的記述は完全だとみなしうるか？

森田邦久

1．序論

本稿では、非相対論的量子力学は物理的実在を完全に記述することはできないことを議論する。なるべく量子力学の哲学にあまりなじみがない読者にも理解できるように心がけて論述する（とはいえ、ぼんやりとした知識くらいはもっている読者を想定している―量子力学が非決定論的な世界を提示していると言われているらしいとか、波動関数というものがあるらしいとか、なんか色々と解釈があって、多世界解釈とかいうのもあるらしいとか、その程度でよい）。

1935 年、アインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンが出版した通称 EPR 論文（Einstein et al. 1935）で提示された物理的実在の量子力学的記述は不完全性であるという議論は、同年に出版されたボーア（Bohr 1935）の同名論文（以下、ボーア論文）で反駁されたと一般にはみなされている。ところが、このボーア論文は難解で、じっさいのところ、ボーアがどのように EPR に反論したのかについて意見が分かれている（Beller and Fine 1994; Howard 1994, 2004; Halvorson and Clifton 2001）。本稿では、ボーア論文のどの解釈によっても結局は EPR の議論を回避できていないこと、くわえて、ボーアが念頭においていたかもしれない以外の仕方で量子力学を解釈したとしても、やはり EPR の議論をうまく回避できておらず、それゆえ物理的実在の（非相対論的な）量子力学的記述は不完全であることを議論する（なお、ボーアが念頭においていた可能性のあるどの解釈によっても EPR の議論が回避できないことについては、[Morita 2020] でも議論している）。ここで重要なのは、本稿で議論しようとしているのは、「物理的実在」を完全に記述することはできないということである。それゆえ、そもそも物理的実在を記述すること自体を放棄して、「量子力学が、隠れた変数などなしに、実験結果をうまく説明・予測できるなら、科学理論としての役割を果たしている」という立場に立つなら、本稿の議論はあてはまらない。

さて、量子力学の解釈問題を考える際、以下の二点が論点となる。ひとつ目は、波動関数が、（Ia）系の物理的状態を記述しているのか、それとも、（Ib）系の物理的状態についての観測者の知識状態を記述しているのか、という点（[Ia] を存在論的解釈、[Ib] を認識論的解釈とよぼう）、ふたつ目は、波動関数の収縮を、（IIa）認めるか、（IIb）認めないか、という点である。論理的には

これらの組み合わせは、（Ia）+（IIa）,（Ia）+（IIb）,（Ib）+（IIa）,（Ib）+（IIb）の 4 通りあるが、ボーアの回答として可能性があるのは、（Ia）+（IIa）,（Ib）+（IIa）,（Ib）+（IIb）のいずれかであろう。そこで、本稿の大部分ではまず、これら 3 つについて検討する。そして、（Ia）+（IIb）は、たとえば多世界解釈がこれにあたるので、これについても検討し、最終的にそのいずれもが物理的実在の記述として不完全とならざるを得ないことを示す。

本誌の読者には EPR 論文についてなじみがない読者も多いと思われるので、この序論の残りでは、EPR 論文の議論を簡単にまとめておこう。じっさいの論文は位置と運動量を用いて議論されているが、以下ではわかりやすさを優先してスピンを使って説明する（Bohm 1951）。「スピン」とは量子力学に特有の物理量で、電子の場合は +1/2 か − 1/2 の 2 つの値しかもたない。スピンには「軸」があり、直交する軸のスピンの測定値は同時に正確に予測することができない（不確定性関係）。たとえば、*x* 軸と *y* 軸が直交しているとすると、*x* 軸スピン（以下、*x*- スピンと表記）と *y* 軸スピン（以下、*y*- スピンと表記）の測定値を同時に正確に予測することができない。

いま、ふたつの電子 I と II があって、これらは相互作用している。これらふたつの電子を合わせたスピンの値は 0 だとわかっているとする。時刻 t_0 でこれらふたつの電子は空間的に離れはじめる。十分に空間的に離れた時刻 *t* において電子 I の *x*- スピンを測定し、値が +1/2 であるならば、保存則より電子 II の *x*- スピンは − 1/2 であるし、− 1/2 ならば +1/2 になるはずである。つまり、電子 II の *x*- スピンは測定前から確率 1 で予測できる。ここでもし、*x*- スピンではなく *y*- スピンを測定したとしても同様で、電子 II の *y*- スピンは電子 II を直接に測定しなくても予測できる。

ここでのポイントは、電子 I の、たとえば *x*- スピンの測定は、電子 II の *x*- スピンになんの影響も及ぼさないはずだということである。それゆえ、電子 II の *x*- スピンの測定値が正確に予測できる―その値を +1/2 としよう―ということは、（その前後で電子 II にはなんの外力も働かなかったはずだから）電子 II の *x*- スピンは測定前から明確な 1 つの値（+1/2）をもっていた（もしくは、すくなくとも、測定前から「測定されたなら +1/2 という値を与える」という傾向性をもっていた―特別な場合を除いて、このあと、このことも含めて「明確な 1 つの値をもつ」と書く）ということだ。そして、電子 I の *x*- スピンを測定するか *y*- スピンを測定するかは、電子 I と II が離れてから決定してもよい。どちらを選択しても、（電子 II の）どちらの測定値も確率 1 で予測できるのだから、これらを同時に予測することができなくても、電子 II の x- スピンも y- スピンもどちらもが測定前から明確な 1 つの値をもっていたはずだ。

このことをシュレーディンガーは巧みな比喩で説明している。いま太郎にふたつの異なるタイプの問題 X と Y の 2 問からなる試験を課したとしよう。どちらがさきに出題されるかはランダムである。そして、太郎はどちらがさきに出題されても、さきに出題された問題は完全に解くことができる。しかし、その問題を解くことで疲弊して、次に出た問題を解くことができない。だが、何度同じ試験をやっても、そしてどちらのタイプの問題がさきに出ても、さきに出たほうはかならず完全に解ける。そうであるならば、どちらも同時に解くことができないとしても、太郎はどちらの問題をも解く能力があると判断してよいだろう。同様に、*x*- スピンと *y*- スピンのど

ちらも予測できるのだから、これらを同時に予測できないとしても、これらは測定前から確定した値をもっていたといってよいはずだ。以下では、物理量 Q が測定前からただひとつの明確な値をもっているということを「Q は実在する」ということにしよう（ただし、EPR での「実在」の定義はこのようなものではない）。

さて、量子力学によると x- スピンと y- スピンの波動関数が同時に固有関数という状態になることはない（固有関数についてはあとで説明する）。そして、EPR 論文によると、理論が完全であるためには、その理論に、実在の要素（いまの場合、x- スピンと y- スピン）と対応する要素（x- スピンの固有関数と y- スピンの固有関数）がなければならない。それゆえ、量子力学が完全であるならば、x- スピンと y- スピンは同時に実在することはない。しかし、いまみたように、EPR 実験によれば、x- スピンと y- スピンのどちらも実在するはずである（系を乱さずに確率 1 でスピンの値を予測できるから―これを EPR は実在の十分条件とみなした）。それゆえ、量子力学は完全ではないとアインシュタインたちは主張するのである。以上が EPR の思考実験と、それを使ってアインシュタインたちが示そうとしたことである。

本稿は以下のような構成になっている。2 節では、（Ia）+（IIa）の組み合わせは、量子力学の不完全性を示すことになることを議論する。3 節では、（Ib）+（IIa）および（Ib）+（IIb）の組み合わせについて検討するが、これは、ハルヴォーソンとクリフトンが、ボーアがこう考えていたとして示した見解である（Halvorson and Clifton 2001）。4 節では、残りの組み合わせ（Ia）+（IIb）について検討しよう。

２．波動関数は物理状態を記述していて、波動関数は収縮する

本節では、組み合わせ（Ia）+（IIa）「波動関数は系の物理的状態を記述しており、かつ波動関数の収縮がある」について検討していこう。まず、ボーアが波動関数の収縮を認めていたのかどうかには議論の余地がある。ボーアは公刊された論文などでは波動関数の収縮に言及していないのだから、かれは波動関数の収縮を認めていなかったという意見も多い（Halvorson and Clifton 2001; Howard 2004; Faye 2008）。だが、「ボーアは波動関数の収縮について言及していないから、波動関数の収縮を認めていなかった」は論理的には成り立たないし、ボーアが明確に波動関数の収縮を否定していたという文献的証拠もない。さらに、ジンカーネイゲル（Zinkernagel 2016, p. 12）によると、たしかに、ボーアは公刊された論文などでは波動関数の収縮に言及していないかもしれないが、1927 年のコモ講演の、未公刊の草稿において、波動関数の収縮に言及しているという。ただ、じっさいのコモ講演では波動関数の収縮について言及せず、かつ、その後も言及しなかったのだから、この事実は、むしろ、ボーアが波動関数の収縮を認めていなかったという議論に説得力を与えているように思える（草稿の段階では言及していたのにもかかわらず、完成稿では言及しなかったということは、波動関数の収縮という概念に問題を感じたから言及しなかったという流れが自然のように思えるから）。しかし、ボーアがじっさいにどのように考えていたのかはともかくとして、（Ia）+（IIa）の組み合わせは、一般には標準的な量子力学の解釈だとされているので、まずは、この解釈では量子力学の物理的実在の記述が不完全になることを議

論しよう。

すでに述べたように、EPR の思考実験において、電子 I の *x*- スピンの波動関数は、測定前は固有関数ではない。ここで「物理量 *Q* の波動関数が固有関数になっている」というのは、「*Q* の測定値が確率 1 で予測できる」（＝「*Q* は実在している」）ということだと思ってよい。すると、（Ia）「波動関数は系の物理状態の記述になっている」が成り立っており、かつその記述が完全だとすれば、*Q* の波動関数が固有関数になっていないということは、*Q* は明確な 1 つの値をもっていない（もしくは、測定によって特定の明確な 1 つの値を与える傾向性をもっていない）ということになる。なお、この対偶をとると「（波動関数が系の物理状態の完全な記述になっているとき）*Q* が明確な 1 つの値をもつならば *Q* の波動関数は固有関数になっている」ということである。それゆえ、電子 I の *x*- スピンを測定することによって、はじめてその *x*- スピンは明確な 1 つの値をもつことになり、そして、それによって *x*- スピンの波動関数は固有関数へと「収縮」する。そして、電子 I と対になっていた電子 II の *x*- スピンも確定するので、その波動関数も固有関数へと収縮する。

この波動関数の収縮は、（波動関数は系の物理状態の記述になっているのだから）あきらかに物理的な変化である。だが、いまみたように、電子 I の *x*- スピンの測定の瞬間に、空間的に離れた（原理的にはどれだけ離れていてもよい）電子 II の *x*- スピンの波動関数が収縮するのだから、なにか、**力学的な**作用が媒介なしに瞬間的に電子 I の系から電子 II へと働いていることになる（このように、媒介なしに作用が働くことを「遠隔作用」という）。このこと（電子 I の測定がなんらかの力学的作用を電子 II に及ぼすこと）は、ボーア自身も 1935 年の論文で明確に否定していることであり、それゆえ、（Ia）＋（IIa）の組み合わせは、ボーアの解釈というのは難しい。

だが、それはともかく、さきに述べたように、このような解釈が量子力学の標準的な解釈だと思われているので、この解釈に問題があることを議論しておくべきであろう。ひとつは、上で述べたように、遠隔作用を認めることになってしまう点である。この点は、アインシュタインが量子力学にたいして批判的であった理由のもっとも重要なもののひとつである（Morita 2016）。アインシュタインは、1948 年の論文（Einstein 1948, S. 322）で、

> この原理〔近接作用の原理〕を否定するならば、（準）閉鎖系という概念が不可能になり、それによって、よく知られた意味での、実験的に検証可能な法則の成立も不可能になる

と述べている。なお、「近接作用」とは、「遠隔作用」と異なり、なんらかの媒介を介した作用のことである。「閉鎖系」というのは、因果的に閉じているような系のことである。たとえば「太陽系」は文字どおりひとつの系をなすが、太陽系の外と因果的に断絶しているのかというとそうではない。私たちが地球から見ることのできる星のほとんどは太陽系外の恒星であるが、恒星から発せられた光が原因となって私たちがそれをみるという結果が生じているわけだから、因果的に閉じていないのはあきらかであり、それゆえ太陽系は閉鎖系ではない。厳密な意味で閉鎖系といってよいのは宇宙全体のみである。しかし、ほぼ周囲から因果的に閉じていると考えてよい系

は存在し、それを「準閉鎖系」と呼ぶ。

物理法則を定式化したり、またそれを検証したりするためには、因果的に（ほぼ）閉じた系―すなわち（準）閉鎖系―が必要となる。なぜなら、物理法則とは、そもそも因果関係（正確には相関関係）を定式化したものであり、ある事象が、なにが原因で生じたのかがわからなければ、物理法則そのものをみいだすことができないからだ。だがもし局所性が確保されていないならば、ある系が一見、閉鎖系であるようにみえても、空間的に遠く離れた、系の外部で生じた事象が原因で、系の内部の事象が生じているのかもしれない。そうすると、物理法則を定式化すること自体ができなくなってしまうのである。

たとえばいま、近接する系と因果的相互作用がないかほぼ無視できる十分に大きな系 S があるとしよう。そして、系 S の内部に生じる現象だけを観測して法則 L をたてたとしよう。しかし、もし局所性がないならば、このようにして得られた L は十分な根拠をもたない。なぜなら、いま述べように、もしかしたら近接していない遠くの系から非局所的な作用を及ぼされているかもしれず、それが考慮に入れられていないからだ。たとえば、現在の宇宙論では「多宇宙仮説」というものがある。すなわち、私たちの宇宙のほかにも因果的に切り離された多くの宇宙が存在するという仮説である。ここで、「因果的に切り離された」と述べたが、以下のような可能性がある。すなわち、私たちの宇宙 U_1 と同じ「母宇宙」から生まれたが、現在は U_1 と因果的な結びつきのない宇宙 U_2 があるとする。そして、U_1 を構成する粒子たちと U_2 を構成する粒子たちが母宇宙のときに量子的にもつれていたとしよう。もしそうならば、私たちの宇宙 U_1 での各粒子は、量子もつれがとけるまでは U_2 の粒子と非局所的な相関があるということになる。上の仮想的な状況がかりに現実的にあったとしても、U_1 での物理学にとってどれくらい深刻な影響があるのかはわからないが、非局所性を認めるということは、かりに多宇宙仮説が正しいとすると、上のような状況でなくとも、なんらかの影響を及ぼす可能性はあるのではないだろうか？それゆえ、物理学を可能にするためには、遠隔作用を認めることはできない。

さらに、遠隔作用の問題をおいておいても、この解釈には問題点がある。そして、その問題点は、EPR 論文とはとりあえず無関係である。波動関数が系の物理状態を完全に記述しているという前提（Ia）で、なおかつ、測定によって明確な 1 つの値を得るという前提（この前提については 4 節で検討する）であるならば、波動関数は測定によって固有関数へと「収縮」する（IIa）。しかし、問題は、この収縮過程はシュレーディンガー方程式によって記述できないということである。ここで「シュレーディンガー方程式」とは、量子力学の基本方程式で、測定されていない系の波動関数の時間発展を記述することができる。もし、この収縮過程がシュレーディンガー方程式によって記述できるのならば、それは、波動関数が測定によってどの固有関数に収縮するかが予測できるということであり、それゆえ、シュレーディンガー方程式によって、測定時に物理量がどの値をとるかが確率 1 で予測できるということである。だが、問題は、まさに、シュレーディンガー方程式では（特殊な場合を除いて）、物理量の測定値を確率 1 で予測できないという点にある（量子力学が非決定論的世界観を示しているというのはこのことである）。したがって、波動関数の収縮過程はシュレーディンガー方程式で記述できないのである。

だが、これはおかしなことである。なぜなら、収縮過程、すなわち測定過程が物理過程であるならば、そのほかの物理過程と測定過程を区別する論理的な根拠はなく、それゆえ、シュレーディンガー方程式によって記述されなければならないはずだからだ。したがって、波動関数の収縮を認めるならば、この過程に非物理的過程が因果的影響を与えていることになる。しかし、それは物理学が閉じていない、すなわち、物理過程を物理学だけで記述できないということを認めることでもあり、したがって、量子力学は物理的実在の不完全な記述であるということを認めることにならざるを得ない。

ところで、1964 年、ベル（Bell 1964）は、隠れた変数（「量子力学は不完全であり、それゆえ、量子力学には含まれていない、物理量の測定値を予測するための変数が存在するのではないか」という考えかたがあり、そのような変数を「隠れた変数」という）があるとすると成り立つはずの不等式を考案した（ベルの不等式）。この不等式は何度かの実験的検証を経て、破れている、つまり隠れた変数がないということが示された。それならば、やはり量子力学は完全なのではないか？

だが、隠れた変数にもいくつかのヴァージョンがあり、ベルの不等式が破れていることによってその存在が否定された隠れた変数は、非局所相関を前提としない隠れた変数で「局所的な隠れた変数」といわれる。ここで、「非局所相関がある」とは、空間的に離れた物理量の値が、なんの媒介もなしに相関していることである（遠隔作用のように、力学的な作用を必ずしも含意しない）。つまり、非局所相関を前提とした局所的でない隠れた変数がある可能性はまだ残されているし、また、局所的な隠れた変数でも、ベルの不等式によってそのすべてが否定されたわけではないとする議論もある。たとえば、ベルの不等式では、*x*- スピンや *y*- スピンすべてに共通する隠れた変数があるという仮定であったが、スピンごとに異なる隠れた変数があるかもしれない。また、どのスピンを測定するかは実験者が決定するわけだが、その実験者の意志を決定する隠れた変数があるかもしれない。したがって、量子力学が本当に完全かどうかはなお論争中であり、隠れた変数のどのヴァージョンまでがベルの不等式の破れによって否定されるかは現在でも量子力学の基礎論の研究者たちのあいだで盛んに研究されている。

また、かりに隠れた変数がなかったとしても、上述のように、非物理的過程が物理過程（波動関数の収縮過程）に因果的影響を与えているならば、量子力学は物理理論なのだから、隠れた変数はないのは当然であり、だが、物理過程を記述できていないのだから、そういう意味では、やはり不完全であるということになる。

３．波動関数は観測者の知識状態を記述している

では次に、（Ib）+（IIa）もしくは（Ib）+（IIb）について検討しよう。つまり、波動関数は系の物理状態についての観測者の知識状態を記述しているという解釈である。この解釈では、私たちは原理的に物理量の測定値を確率 1 で予測できないが、しかし、その物理量が明確な 1 つの値をもっているということが可能になる。したがって、物理的な過程としての波動関数の収縮を認める必要はない。だが、原理的に測定値を確率 1 で予測できないのに物理量が明確な 1 つの値を

もっているとはどのような状況だろうか。次のような例を考えてみよう。

0 から 9 のいずれかの数字を確率 1/10 で完全にランダムに生成することができるコンピュータがあるとする（じっさいはそのようなコンピュータは存在しえないが、議論のためにあると仮定する）。いま、そのコンピュータが 10 個の数字を生成して、それを紙に一列に書き出したとする。私はそれを左から順に読みはじめ 5 個目まで読んだとしよう。このとき私には次の 6 番目の数字を予測することは原理的にできない（完全にランダムに生成された数列だから）。わかるのは、0 から 9 のいずれかの数字が確率 1/10 で現れるということだけである。しかし、そのこと（原理的に 6 番目の数字が予測できないこと）は 6 番目の数字が確定していないということを意味しない。じっさい、仮定より、6 番目の数字はすでに確定していて 5 番目の数字の右側に存在している。同様にして、測定時の状態を原理的に予測できないが、しかし測定前から値がただ 1 つに確定しているという状況は想定可能である。

この考えかたをとったとき、では、その波動関数は測定時に収縮するのかしないのかはなかなか難しい問題である。測定することによって、たとえば *x*- スピンの値が +1/2 だとわかったならば、観測者の知識状態を記述する波動関数も固有関数になりそうである。このあたり、ハルヴォーソンとクリフトンの議論はよくわからない。だが、このことはあまりのちの議論に関係してこないので、（Ib）であれば、（IIa）でも（IIb）でもあまり関係がないということで、議論を続けよう。

さて、波動関数が観測者の系に関する知識状態を記述しているという解釈は、上述のように理解可能ではあるが、しかし結局は、量子力学による物理的実在の記述の完全性を守ることができていない。まず、コッヘン＝シュペッカーの定理という、すべての物理量に確定した値を付与することができないという定理がある（Kochen and Specker 1967）。それゆえ、たとえば、電子のすべての軸のスピンの値が確定しているということはありえない。したがって、文脈依存的実在論というものをとらなければならない。これは、どの物理量を測定するかによってどの物理量が実在するのかが決まるという考えかたである。つまり、*x*- スピンを測定するときには *x*- スピンが、*y*- スピンを測定するときには *y*- スピンが、実在するというわけである。

だが、それではいつ、EPR 実験でいえば、電子 I の *x*- スピンは実在することになるのだろうか？ *x*- スピンを測定する実験をセッティングしたときだろうか？そして、その瞬間に、電子 II の *x*- スピンも実在性をもつようになるのか？しかし、その後、測定直前に、（簡単に変更可能だとして）*y*- スピンの測定に設定し直したらどうなるのだろうか？その瞬間に電子 I の *x*- スピンの実在性は消え、*y*- スピンが実在性をもつことになるのか？そして、それと同時に電子 II の *x*- スピンの実在性も消え、*y*- スピンが実在性をもつのか？さらに、これは力学的な遠隔作用の存在を認めることになるのではないだろうか？なぜなら、「実在する」という意味を「明確な 1 つの値をもつ」という意味だと解すれば、セッティング以前は明確な値をもっていなかったのが、セッティングと同時に、空間的に離れた電子 I と電子 II の *x*- スピンがどちらも明確な値をもつようになるからだ。かりに「実在する」を「測定されたら特定の値をもつ傾向性をもつ」ということにしても話はあまり進展しない。いずれにせよ、セッティング以前にはそのような傾向性をもっていなかった（すくなくとも値は確定していなかった）はずなのに、空間的に離れた電子 I と電子 II が同時

にそのような傾向性をもつのならば、やはり力学的な変化があったと考えるべきであろう。そして、かりに、そのような遠隔作用があることを容認したとしても、これは物理過程なのだから、なんらかの方程式によって記述できなければならない。だが、量子力学にはそのような方程式はない。それゆえ、（Ia）+（IIa）および（Ia）+（IIa）の解釈は、量子力学が物理的実在を完全に記述しているという主張を擁護できない。もちろん、ここで「実在する」という言葉の意味が重要になるのだが、上で挙げた以外に妥当な、そしてこれらの問題点を回避可能な「実在する」という言葉の意味があるだろうか？

近年、QBism という新しい解釈が注目を浴びているが、この解釈は基本的に波動関数が知識状態を表しているという立場をとる（Fuchs 2010 など）。しかし、QBism は、そもそも量子力学が物理的実在を記述できるという立場を放棄しているもいえるので、上述のような問題は生じない（が、本当にそれでいいのか、という問題は残る）。

４．波動関数は系の物理状態を記述していて、波動関数は収縮しない

最後に、（Ia）+（Ib）の組み合わせ、つまり、「波動関数は系の物理状態を記述しているが、波動関数は収縮しない」という解釈について検討しよう。この考えかたは、2 節での議論を踏まえると奇妙に思えるが、それは「測定によってただ 1 つの明確値を得ることができる」という前提があるからだ。この仮定を放棄すると、この組み合わせも可能になる。それが、多世界解釈と呼ばれる解釈である（たとえば、Vaidman 2014 をみよ）。直観的に考えると、測定のたびに観測者はただ 1 つの測定値を得たように思えるが、じつは、そこで世界が分岐していて、ほかの世界では異なる値を得ているとするのだ。

この多世界解釈にはすでにさまざまな批判が存在するが、もっとも奇妙なのは、世界は未来へ向けて分岐する一方で、収束することはないという点であろう。シュレーディンガー方程式は時間に対称的な方程式であり、それゆえ、ある物理過程 A → B が存在するならば、その逆向きの過程 B → A も存在する。したがって、世界が一方的に分岐するという描像が正しいとすれば、なんらかの説明が必要である。すくなくとも現時点では、そのような説明は与えられておらず、したがって、多世界解釈も受け容れがたい。

もちろん、（Ia）+（Ib）の組み合わせとしては、多世界解釈以外の解釈も考え得るだろう。たとえば、二状態ベクトル形式を用いた解釈は、そのようなものである（二状態ベクトル形式については、Aharonov, et al. 1964 をみよ）。そして、本節での批判は、あくまで多世界解釈にだけ向けられたものである。それゆえ、もし、物理的実在の量子力学的記述が完全であることを擁護するならば、本稿で検討した 4 つの組合せのなかでは、（Ia）+（Ib）の組み合わせ、すなわち「波動関数は系の物理的状態を記述し、かつ波動関数は収縮しない」だけが、有効な解釈である。ただし、排除しきれていないというだけで、積極的に擁護可能な解釈が存在するわけではない。

５．まとめ

本稿では、量子力学が物理的実在の完全な記述になってはいないことを、以下のあり得る 4 つ

の解釈を検討することを通して、示した。

（1）波動関数は系の物理状態を記述しており、波動関数は測定過程において収縮する。
（2）波動関数は系の物理状態を記述しており、波動関数は測定過程において収縮しない。
（3）波動関数は系の物理状態に関する観測者の知識状態を記述しており、波動関数は測定過程において収縮する。
（3）波動関数は系の物理状態に関する観測者の知識状態を記述しており、波動関数は測定過程において収縮しない。

それぞれにたいする批判として、本稿では、以下のような議論をした。

（1）測定過程において、非物理的過程が物理的過程に因果的影響を与えることになる。
（2）時間的非対称性などの問題がある。
（3）（4）この解釈では、文脈依存的実在論を導入することになる。しかし、いかにして、実験設定が物理量の実在に影響を与えるのかが不明であり、結局はその点において量子力学は不完全である。

ただし、（2）にたいする批判は、ほかの批判に比べるといささか弱い。それゆえ、「物理的実在の量子力学的記述が完全である」という主張を維持するためには、（2）の解釈を発展させる方向しかないだろう。

参考文献

Aharonov, Yakir, Peter G. Bergmann and Joel L. Lebowitz (1964) Time Symmetry in the Quantum Process of Measurement. *Physical Review B* 134: 1410-6.

Bell, John S. (1964) On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics* 1: 195-200.

Beller, Mara and Arthur Fine (1994) Bohr's Response to EPR. In: Jan Faye and Henry Folse (eds.) *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, pp. 1-31. New York: Kluwer.

Bohm, David (1951) *Quantum theory*. New York: Dover Publication.

Bohr, Niels (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review* **48**: 696-702.

Einstein, Albert, Boris Podolsky, and Nathan Rosen (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review* **47**: 777-80.

Einstein, Albert (1948) Quanten-Mechanik und Wirklichkeit. *Dialectica* 2: 320-4.

Faye, Jan (2008) Copenhagen interpretation of quantum mechanics. In: Edward N. Zalta (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <plato. stanford.edu/>.

Fuchs, Christopher A. (2010) QBism, the perimeter of Quantum Bayesianism. *arXiv:1003.5209* [quant-ph].

Halvorson, Hans and Rob Clifton (2001) Reconsidering Bohr's Reply to EPR. In: Tomasz Pacek and Jeremy Butterfield (eds.) *Non-Locality and Modality,* pp. 3-18. Kluwer Academic Publishers.

Howard, Don (1994) What makes a classical concept classical? In: Jan Faye and Henry Folse (eds.) *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, pp. 201-29. New York: Kluwer.

Howard, Don (2004) Who Invented the "Copenhagen Interpretation"? A Study in Mythology. *Philosophy of Science* **71**, 669-82.

Kochen, Simon and Ernst P. Specker (1967) Problem of hidden variables in quantum mechanics. *Journal of Mathematics and Mechanics* 17 (1) , 59-87.

Morita, Kunihisa (2016) Einstein's Criticism and Humean Philosophy. *Historia Scientiarum* 26 (1) : 65-74.

Morita, Kunihisa (2020) Did Bohr Succeed in Defending the Completeness of Quantum Mechanic? *Principia*, 掲載予定 .

Vaidman, Lev (2014) Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechacanics. Stanford Encyclopedia of Philosophy. Visited at 20th, Sep. <https://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/>.

Zinkernagel, Henrik (2016) Niels Bohr on the Wave-function and the Classical/Quantum Divide. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **53**, 9-19.

（もりたくにひさ　大阪大学大学院 人間科学研究科・准教授）

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

Kunihsa Morita

By reconsidering the Einstein–Podolsky–Rosen (EPR) argument, this study posits that the quantum-mechanical description of physical reality cannot be considered complete. First, I propose that there are four possible types of interpretations of quantum mechanics: (1) the wave function describes the physical state of the system, and collapses through the observation process, (2) the wave function describes the physical state of the system, and does not collapse through the observation process, (3) the wave function describes the state of the observer's knowledge about the system, and collapses through the observation process, and (4) the wave function describes the state of the observer's knowledge about the system, and does not collapse in the observation process. Second, I examine these interpretations and conclude that a quantum-mechanical description of physical reality cannot be considered complete. This conclusion is based on the following argument: (1) implies that a non-physical process influences a physical process, while (2) violates the time-symmetrical nature of the Schrödinger equation; however, (3) and (4) do not have the above-mentioned problems. As dictated by the principles of quantum mechanics, we cannot, in principle, predict measurement values, although it is possible for physical quantities to have realities prior to measurement. However, this solution has a drawback, in that it violates the Kochen–Specker theorem, which states that all physical quantities cannot have definite values at the same time. Therefore, proponents of (3) or (4) have to introduce the concept of contextual reality; whether a physical quantity has a reality depends on the context. Nevertheless, it is unclear how the context determines which physical quantities will have a reality. Thus, all the four possible types of interpretations of quantum mechanics have drawbacks.

「キーワード」
EPR の思考実験、量子力学の完全性、認識論的解釈、存在論的解釈