

アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼンの 議論とベルの定理

—— 量子論における分離不可能性 ——

田 中 裕*

1964年に発表されたベルの不等式の実験的検証は1970年代から複数の科学者グループによって遂行されたが、1982年にフランスの物理学者アラン・アスペによって行なわれた光子対の偏極相関の範囲を測定する実験は、実験の精度の高さと遅延選択の採用による非局所的相関の確認によって、量子物理学の解釈をめぐる原理的諸問題の考察に新しい局面を拓いたといえる⁽¹⁾。嘗ては思考実験にすぎなかったものが技術の進歩によって現実の実験となることによって、1930年代にボーアとアインシュタインの間でなされた量子力学の完全性をめぐる哲学的論争が新しい姿で甦ることとなった。この論文は二部に分かれる。第一部ではEPRの議論に要約されるアインシュタインの量子力学批判を適切な形で再定式化することによって、ベルの定理との論理的な関係を明らかにすることを目的とする。ベルの不等式の実験的反証によって明らかとなった「分離不可能性」の事実を確認したあとで、第二部ではEPR相関と相対性理論の基本思想との関係を主題とする。

(I) EPRの議論とベルの定理

アインシュタインの量子力学批判のポイントは、量子力学が実験と合わない予測をするという事でもなければ、内的に矛盾しているという事でもなかった。それがポドルスキーとローゼンとともに発表した論文で展開した議論(所謂EPRの議論)では、むしろ量子力学の経験的な正しさと内的整合性が前提されていたと言って良い。彼が否定したのは、量子力学を「完全な理論」と見なす解釈であり、EPRの議論が意図したことは、もし我々が量子力学は(アインシュタインの要求する意味で)完全であると仮定すれば、量子力学の標準的定式とその経験的予測の正しさそのものが逆理を導くことを示すことであった。従ってEPRの議論

で提示された逆理とは、背理法にもとづく量子力学の不完全性の証明という文脈のなかで理解されるべきものである。この逆理から逃れるためには、量子力学の完全性を否定しなければならない——これがアインシュタイン自身の出した結論であった⁽²⁾。しかしながら、一般に逆理を導く論証——背理法——が有効であるためには、そこで、使用される諸々の概念が議論の主題に対して適切かつ有意味であることが前提されねばならない。EPRの議論では、実在性と完全性に対する一定の諸概念(古典物理学的概念)が前提されていたために、量子力学のコペンハーゲン解釈の唱道者たちは、これらの概念そのものが量子論の主題には不適切なものであると主張することによって、この逆理を無視する事ができた。さらに、EPRの議論で前提された諸概念を最初から不適切なものとして却下するのではなく、条件付で受容した場合においても、背理法を用いるあらゆる議論がそうであるように、この議論において前提された多くの命題のうちどれが否定されるべきであるかは一義的には決まらない。EPRの議論の筋道を有効なものとして認めることと、その前提または結論の正しさを認めることは全く別の事柄である。EPRの議論を有効なものとして認め、尚かつ量子力学の完全性を主張する事は論理的に可能であって、その場合にはこの議論の諸前提の一つが誤りであると主張すれば良い。

以下で筆者が示すように、EPRの議論で前提された諸概念を最初から不適切なものとして退けずに、この議論に論証としての有効性を認めることは、量子力学がいかにパラドキシカルな(通念に反する)実験的予測をするかを理解するうえで必要不可欠なのである。

1964年のベルの定理は、このような「反常識的」な実験的予測——EPR相関——がEPRの議論の中で提案された思考実験から導出されることを示した。冒頭に述べたようにこの思考実験を実験室で現実に行なう事によって、EPR相関がどれほど逆説的であっても

* 目白学園女子短期大学

否定しがたい事実である事は、実験的に確認されたと言っよう。こうして、EPRの議論を現在の地点でふりかえってみると、この議論の真の結論は量子力学の不完全性ではなくて、アインシュタインにとっては自明と思われた命題、即ち「局所的実在の分離可能性 (Einstein Locality) の原理」の否定にあると見るのが妥当である。このことは、ボーア・アインシュタイン論争とベルの定理との関係、とくにこの論争の背後にある量子論と相対論の基本思想の対立という根本的な問題を理解する上で重要であるので、基本的な論点を以下に整理しておこう。

1. EPRの議論の前提

EPRの議論で前提される「実在性」および「完全性」の意味は、次の二つの基準によって定められている。

(1) 物理量の実在性を判定する基準(十分条件): もし、系をいささかも乱すことなく物理量の値を確実に(即ち確率1で)予言できるならば、この物理量に対する物理的実在の一要素が存在する。

(2) 物理理論の完全性を判定する基準(必要条件): 物理理論が完全であるのは「物理的実在のあらゆる要素がその物理理論に一つの対応物を持つ」場合に限られる。

EPRの議論では、「実在性」と「完全性」の定義(必要十分条件)ではなく、ただそれらの判定基準のみが与えられた。従って、それは、何を物理的実在と見なすか、またどのような物理理論を完全なものとするかについて、物理学者の間で見解の相違がある事がある程度前提したうえで、言わば、それらの最大公約数的な概念を与えるものとして提示された。従って、基準(1)は確率的予測、即ち、統計的に検証される予測を与える変数(量子力学の波動関数や作用素)に、はたして物理的実在が対応しているのかどうかという問題には中立的である。それらの確率変数が(ド・ブローイの物質波のような)物理的実在に対応しているのか、あるいは物理的実在に関する我々の知識に対応するだけだと考えるか、どちらの選択肢も、さしあたっては排除してはいない。そこで要求されているのは、系を攪乱せずに確率1の決定論的な予測を許す物理量を「実在的」と呼ぶことだけであって、我々がその他にどのようなものを「実在的」と呼ぶかは問題にしていない。また、ハイゼンベルクによる不確定性原理の認識論的定式を持ち出して、「系を攪乱せずに物理量を確実に予言する」ことは不可能だと言うわけにもいかない。

不確定性原理が禁止しているのは、相補的な二つの物理量を同時に認識することを可能にする観測装置を作る事であって、一つの物理量の測定については、「系を攪乱せずにその値を確実に予言する可能性」は否定されていないからである。また、基準(2)はあとで述べるように、ノイマンが否定しボーアが肯定した所謂「隠れた変数」の理論の可能性の問題と深く関わっている。アインシュタイン自身は「隠れた変数」という用語を使わなかったが、「何が観測可能であるかは理論によって決定される」という立場を表明していた事からわかるように、量子力学が言及していない「隠れた実在」を記述する変数を持つ理論の存在を予想していた事は間違いないであろう。

更に、EPRの議論では、しばしば見落されがちな論点であるが、

(3) 量子力学の標準的定式に基づく統計的予測の経験的な正しさ(correctness)が前提されていた。ここで経験的な正しさとは、量子力学の標準的定式に基づく統計的予測が実験によって裏づけられるという意味である。これは、EPRの議論の目的が、新しい実験事実の出現によって量子力学の統計的予測が将来反証されるかも知れないという漠然とした外在的批判ではなくて、現在の実験的データによって裏づけられた量子力学の標準的な定式をむしろ積極的に受け入れることによって、量子力学の経験的な正しさがかえってその不完全性を証明しているという趣旨の内在的批判であった事を示している。

2. EPRの議論の形式的構造

EPRの議論の核心部分はアインシュタインとその共著者によって次のように述べられている。

量子力学では交換しない作用素によって記述される物理量の場合、一方の認識が他方の認識を排除している。それゆえに(1)波動関数によって与えられる実在の記述は不完全であるか(2)これらの二つの量は同時には実在性を持ちえないかいずれかである。過去において相互作用した二つの系の一方について為された測定をもとに他方についての予言をする問題を考察する事によって、(1)が虚偽であるならば、(2)もまた虚偽であることが示される。こうして、波動関数によって与えられた実在の記述は不完全であるという結論が導かれる。

従ってEPRの議論の形式的構造は、次のような三

段論法に要約される。

大前提: $\sim CV \sim S$
小前提: $C \rightarrow S$
結論: $\sim C$

命題 C: 量子力学(波動関数による実在の記述)は完全である。

命題 S: 相補的な(交換しない作用素で記述される)二つの物理量が同時に実在性を持つ。

3. EPR の議論の物理的内容

EPR の議論の大前提はハイゼンベルクの不確定性原理を、実在性と完全性に関する EPR の基準を採用する事によって言いかえたものにすぎないから、用語法の差異を別にすれば、量子力学の教科書的な説明と隔たるものではない。従って EPR の議論の実質的な内容は、小前提で提起された思考実験が与えていると言ってよい。それは、過去において相互作用し、現在は空間的に隔てられた二つの粒子からなる量子論的システム的一方 (1) を測定すれば、他方 (2) は保存則によって、系の状態を因果的に攪乱することなく予測できることを利用する思考実験であった。EPR の思考実験で提示された量子論的システムは、位置と運動量の間に相関関係を持つ二粒子を表す波動関数

$$\Psi(x_1, x_2) = \int \exp\{i(2\pi/\hbar)(x_1 - x_2 + x_0)p\} dp$$

によって記述されるものであった。この合成系において、 $x = x_1 - x_2$ と $p = p_1 + p_2$ とは交換可能な作用素になるので、上記の波動関数は二つの確定した値 $x = -x_0$ および $p = 0$ をとる事ができる。

EPR の思考実験は後にボームによって二粒子系のスピンの相関や光子対の偏極の相関を与える実験として単純化された。そこで問題になっている合成系は、量子力学の標準的定式によれば形式的に

$$\Psi = 2^{-1/2}(\phi_1(I) \otimes \phi_1(II)) - 2^{-1/2}(\phi_2(I) \otimes \phi_2(II))$$

と書く事ができよう⁹⁾。このような合成系の特徴は、空間的に隔てられた部分系の間に位相的相関があり、全体系は確定した相関関係を予言するのに、部分系の測定値については不確定なままであるということである。

この全体系において確定した相関関係が、量子力学の標準的定式から導かれるものであることを確認した上で、そのような相関関係の存在が、部分系に於ける不確定性関係——もとの EPR の思考実験の場合には x_1 と p_1 、 x_2 と p_2 とが同時には確定しないということ——と矛盾しないのかどうかと言う問題が EPR

の議論の核心である。

4. 隠された前提を明示する EPR の議論の再定式化

EPR の思考実験は部分系の相補的な物理量を同時に測定する実験として提示されたわけではないということに注意しなければならない。我々が正確に測定できるのは、部分系 (1) の位置 x_1 と運動量 p_1 の一方のみであり、しかもそれがどのような値であるかは、測定する以前には決定できない。それは部分系 (2) についても全く同様である。しかし部分系 (1) の位置 x_1 を測定すれば、全体において確定した位置の相関関係によって、部分系 (2) の位置 $x_2 = x_1 + x_0$ を「系を攪乱することなく予言できる。」従って物理量の実在性に関する EPR の判定基準によって、 x_2 は x_1 を測定した時点で「実在性を持つ」と言わなければならない。もし我々が部分系 (1) の運動量 p_1 を測定すれば、全体において確定した運動量の相関関係によって、部分系 (2) の運動量 $p_2 = -p_1$ を、「系を攪乱せずに確実に予言できる。」それゆえに、前と同じ理由から、 p_2 は p_1 を測定した時点で「実在性を持つ」ことになる。ところで、我々は系 (1) について位置と運動量を同時には測定できないが、位置と運動量のどちらを測定するかは自由に選択できる。ある時点で我々のなすこの選択が、空間的に十分遠く隔てられた系 (2) に即座に影響するとは考えられないであろう。このことから、EPR の議論は、部分系 (2) の相補的な物理量 x_2 と p_2 とは「同時には認識できない」にしても、「同時には実在性を持つ」と主張した。それが、上で図式的に示した EPR の議論の小前提 (C → S) の物理的内容であった。

EPR の思考実験では、部分系 (1) について相補的な物理量 x_1 と p_1 のどちらを測定するかについて我々がなす自由な選択が、すくなくとも選択の瞬間においては空間的に十分に隔てられた部分系 (2) には何の影響も及ぼさない事が前提されていた。この隠された前提——それを局所実在の分離可能性と呼び L で表す——を明示化して EPR の議論を再定式化すれば次のようになる。

大前提: $\sim CV \sim S$
小前提: $C \wedge L \rightarrow S$
結論: $L \rightarrow \sim C$

命題 L: (局所的实在の分離可能性)空間的に十分に隔てられた二つの場所 ($dx^2+dy^2+dz^2-c^2dt^2>0$) で行なわれる測定結果は因果的に独立である。

ここで、命題 L はボームによって提案された二粒子系のスピンの相関や光子対の偏極の相関を与える実験の場合にも適応可能なように、一般的な形で定式化した。もとの EPR の思考実験の場合の遠距離相関は、位置と運動量の相関である以上、厳密に同時的相関でなければならないが、スピンや偏極の遠距離相関は、二つの部分系の測定の時刻が観測者の依拠する基準系で厳密に同時的である場合だけでなく、二つの測定に時間差があっても、それらの間の空間的距離がその時間差に光速をかけたものよりも大きい場合をも含むからである。そして相対論の枠組の中では、 $ds^2>0$ だけ隔てられた二つの事象は、適当に基準座標系を選択すれば、そこでは「同時に生じたもの」と見なし得るから、この一般化は適切なものであろう。問題はこの命題 L がアインシュタインによって当然の事として前提されていたということであり、上に示した再定式化によれば、EPR の議論で結論される量子力学の不完全性とは、L という前提のもとでの「条件付の」不完全性であったと言う事である。

5. アインシュタインの量子力学批判の再検討

上述のように再定式化された EPR の議論は、アインシュタイン-ボーム論争の真の問題点の所在がどこにあったかを示唆している。それは、通常理解されているように、決定論の世界像にアインシュタインが執着し、量子力学の非決定論的世界像に満足しなかったということではない。EPR の議論は決定論と非決定論の選択については全く中立的であったし、微視的物理現象に確率論を使用する事は、アインシュタイン自身が先鞭をつけた方法であったという科学史的事実を想起すべきであろう。また量子力学は確かに個別的事象の予測については非決定論的であるが、統計的な集団については、複雑かつ不安定な系に関する古典的な統計力学よりも遥かに決定論的な予測を与える事を忘れてはならない。

また、「我々とは独立に世界のあり方は根底において決定されている」という实在論的立場をアインシュタインに、「世界のあり方は根底において我々に依存しており、我々とは独立にある世界について語る事は無意味である」という現象論的立場をボームに配当する事も

彼等の論争の基本性格を不当に単純化したものであろう⁽⁴⁾。確かに、アインシュタインは、直接に観測されていない物理量の「实在性」についてあからさまに語り、ボームは「实在」という語を避けて、「現象」という語を、巨視的実験装置による測定を常に含意する量子力学的事象を記述するのに好んで用いた。しかし、この「現象」という語は、ボームにあっては意識と实在の二元的分離を克服するために持ち出されたのではなく、微視的事象が巨視的実験装置に媒介されることなしには認識されないこと、即ち「現象が古典物理学による説明の範囲をいかに遙かに越えたものであっても、およそ確実な事実と言われるものの説明と云うものは古典的な言葉で表現されるものでなければならない」⁽⁵⁾ という文脈で導入されたものであった。「古典的な言葉」が实在論的である事、即ち意識から独立に確定している事実を記述するものである事は、ボームの言う「古典論と量子論との相補性」の立場では、むしろ前提されていたと云ってよかろう。ボームの言った事は、量子論が記述する事象は、古典論によって記述される実験装置の組み立てから切り離して論じる事はできないということであって、物理的現象が意識から独立に存在しないということではない。またアインシュタインが「实在性」について云々する場合は、その判定基準を明示している事から明らかになるようき、必ずしも「实在」という言葉を使用しなければ定式化できない議論を展開したわけではない。もし我々が好むならば、「实在性」という言葉を「系を攪乱しない確実な予測の可能性」という言い方で置き換えても EPR の議論は依然として有効なのである。それではボーム・アインシュタイン論争の真の問題点とは何であったのだろうか。それは、量子力学と相対性理論の根本思想が基本的に対立している事、即ち量子力学が局所的实在の分離可能性の原理 L とは基本的に相容れない確率論的予測を与えると言う事であった。観測による「波束の収縮」という非局所的な現象が L を前提したのでは全く不可解な遠距離相関を予言するということを具体的に示したのがベルの定理であり、その実験的検証によって L が実際に否定されるに至った歴史的経緯を以下に要約して見よう。

6. ベルの定理の意味するもの

我々は、EPR の議論の結論を $L \rightarrow \sim C$ という命題に要約した。即ち、局所的实在の分離可能性 (L) が量子力学の不完全性 ($\sim C$) を含意するのである。これを言

い換えれば、量子力学の完全性(C)は局所的実在の分離不可能性($\sim L$)を含意する事になる。アインシュタインがCが認めなかった理由は $\sim L$ が相対性理論の根本思想である「遠隔作用の禁止」と抵触するからであった。このことは、もとのEPRの議論では言及されなかったが、13年後に書かれたアインシュタインの「量子力学の実在」では次のように明示されている。

空間的に離れた物体(AとB)についての相対的な独立性に関して、次のような概念が特徴的である。即ち、Aによる外部への影響は、決してBに対して直接に作用しない。これは〈近接作用の原理〉と言われているもので、場の理論においてのみ矛盾なく適用できる。……量子力学において、 Ψ 関数が現実の物理的状況を(原理的に)完全に記述すると考えた時、それは遠隔作用の仮定を意味するものであり、この仮定は全く受け入れがたいものである⁽⁶⁾。

Lを否定する事は、単に相対性理論の根本思想に抵触するだけでなく、「(準)閉鎖系の存在という概念を否定し、そのために実験によって確かめ得る法則の理解を困難にする」という代償を払うことを意味している。それは、物理系を記述する場合に、部分系の記述よりも全体系の記述が優先することを意味している。この事情を徹底して考えれば、微視的領域に関する完全な記述は、宇宙全体の記述を前提するという事になり、量子力学の完全性を主張する事が、逆に有限な物理系の完全な認識を不可能にするだろう。

前に指摘したように、物理理論の完全性に関するEPRの判定基準は「隠れた変数」という語を含んでいない。この語は、ノイマンの有名な「隠れた変数の不可能性の証明」に由来するものである。この証明は、量子力学の基本的な理論枠組をそのままにして「隠れた変数」を追加すれば数学的な矛盾に陥る事、即ち、統計的公式を与える量子力学の基本的フォーマリズムそのものが、分散のない集団の存在を禁止していると言う意味で、「隠れた変数」を原理的に排除している事を述べたものである。しかし、この証明は量子力学と全く異なる理論枠組を持つ「隠れた変数の理論」を否定したわけではないし、数学的証明の形式からわかるように、理論の内的整合性にかかわる統辞論的(syntactical)性格をもっており、EPRの判定基準が要請しているような理論と事実との対応にかかわる意味論的(semantic)性格のものではない⁽⁷⁾。従ってノイマンの議論は量子力学がアインシュタインの言う意味で完

全である事を証明したわけではない。

量子力学が言及していない「隠れた実在」を記述する変数を持ち、その統計的な平均操作によってこれまでの実験によって検証された量子力学の統計的予測を全て再現するような「隠れた変数の理論」は、ノイマンの証明以後にも実際にボーム等によって提示されたし、物理学者の中では少数派であるとはいえ、これからも引き続き研究されることが予想される。しかしながら、このような「隠れた変数の理論」に重大な制約が課せられる事を証明したのがベルであった。ベルの定理の結論は、局所的実在の分離可能性の原理Lを前提するいかなる「隠れた変数の理論」も不可能であるという事であった。ここで隠れた変数の理論の立場を $\sim C$ で表すならば、この結論は $\sim(L \wedge \sim C)$ によって表現できるだろう。この定理は、EPRの議論の有効性と矛盾するものではなく、むしろEPRの議論を完結させる性格をもっていた事は、両者を結合した時にどのような結果が得られるかを見れば明らかとなるう。

EPRの議論: $L \rightarrow \sim C$
ベルの定理: $\sim(L \wedge \sim C)$
結論: $\sim L$

上の推論図は、EPRの議論の真の結論は量子力学の不完全性ではなくて局所的実在の分離不可能性 $\sim L$ であったと言う事を示す。

このベルの定理はEPR型の思考実験—ただしボームによって提案されたスピンの相関を与える二粒子系による—を量子力学で説明した場合と、局所的な隠れた変数で説明した場合とでは、統計的な予測に決定的な違いが出る事に基づいていた。ベルの定理の第一段階は、EPR型の思考実験を局所的な隠れた変数で説明するいかなる理論も、それが示す統計的予測に一定の限界がある事(ベルの不等式)を導出する。第二段階は、量子力学による統計的予測がこの限界を越える事を示す。それゆえに量子力学の統計的予測の全てを再現する「局所的な隠れた変数の理論」は有り得ないというメタ理論的な結論が得られた⁽⁸⁾。

しかし、もしベルの不等式が量子力学の予測に反して成り立つ事が現実の実験によって示されたならば、量子力学は完全性を云々する以前に経験的に正しくないという結果が得られるだろう。そこで、メタ理論的なベルの定理の証明とは別に、EPR型の思考実験を現

実に行なう事によって、ベルの不等式を破るような遠距離相関 (EPR 相関) が実測されるかどうかを検証する必要がある。ここで注意すべき事は、ベルの不等式が破れている事が現実に示されれば、命題 L はそれだけで反証されたと見なし得る事である。

ベルの不等式を導くものは、L 以外には分析的な論理的一数学的公式だけであることは注目に値する。

たとえば、アスペによって実験的に反証された光子対の偏極相関に関するベルの不等式は、実験者が任意に方向を変更できる二つの偏光解析器の測定結果 (+1 または -1) の相関係数 $E(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ によって定義される量 $S = E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) - E(\mathbf{a}, \mathbf{b}') + E(\mathbf{a}', \mathbf{b}) + E(\mathbf{a}', \mathbf{b}')$ について $-2 \leq S \leq 2$ を与える。局所的な隠れた変数の理論がこの不等式を満たさねばならない事は、隠れた変数を λ とし、それぞれの偏光解析器の測定値を決定する関数を $A(\lambda, \mathbf{a}) = +1$ or -1 $B(\lambda, \mathbf{b}) = +1$ or -1 , λ の確率分布関数を $\rho(\lambda)$ として、 $E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \int \rho(\lambda) A(\lambda, \mathbf{a}) B(\lambda, \mathbf{b}) d\lambda$ から簡単な数学的計算によって求められる。量子力学による相関係数は $E_{QM} = \cos 2(\angle \mathbf{ab})$ であるので、 $\angle \mathbf{ab} = \angle \mathbf{ab}' = \angle \mathbf{a}'\mathbf{b} = 22.5^\circ$ $\angle \mathbf{a}'\mathbf{b}' = \angle \mathbf{bb}' = 45^\circ$ $\angle \mathbf{ab}' = 67.5^\circ$ の実験的配置の場合に $S_{QM} = 2\sqrt{2}$ となり、ベルの不等式が破れる事が量子力学によって予言される⁹⁾。

前に述べたように 1970 年代から行なわれた一連の実験が EPR 相関の現実性を確認した以上、我々のとるべき道は局所実在の分離可能性の原理 L の否定以外にはない。しかしこの原理を否定する事は、アインシュタインが予見したように、我々の持つ実在概念、時空概念、因果概念を根本的に改める事を意味するであろう。特に L の否定が光速度を越える遠隔作用の存在を意味するならば、そのような遠隔作用を禁止する相対性理論と量子力学の整合性があらためて問題となろう。(この問題の考察が次号に掲載される第二部の主題である)

参考文献

- (1) ベルの不等式の実験的検証については Aspect, A., Grangier, P. and Roger, G. "Experimental

tests of realistic local theories via Bell's theorem" Phys. Rev. Lett. 47, 460-463 (1981) 49, 1804 (1982) "Experiments on Einstein-Podolsky-Rosen type correlations with pairs of visible photons" in *Quantum Concepts in Space and Time*, (QCSP) Oxford Science Publications pp. 1-15 (1986).

- (2) アインシュタイン-ボーア論争の基本文献は、Einstein, A. Podolski, B. and Rosen W., "Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?", Phys. Rev. 47, 777-780 (1935). ボーアの上記論文に対する応答 Phys. Rev. 48, 698-702 (1935) および Bohr, N. "Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics" in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, ed. by P.A. Schilpp (1949) pp. 200-241.

これらは、*Quantum Theory and Measurement* (QTM) ed. by J.A. Wheeler and W.H. Zurek, Princeton Series in Physics (1983) pp. 3-151 に再録されている。

- (3) Bohm, D. *Quantum Theory*, Prentice-Hall, Inc. (1951) Chap. 22-17.
 (4) デスパニャ・B. 「量子力学と観測の問題」(1965) (亀井理訳) ダイヤモンド社 pp. 108-114.

ヴァイツゼッカー・C.F. von 「コペンハーゲン解釈」バスティン・T 編「量子力学は越えられるか」(1971) 所収(柳瀬睦男・他訳) 東京図書 pp. 24-30.

- (5) QTM p. 17.
 (6) Einstein, A. "Quantenmechanik und Wirklichkeit" *Dialectica* 2 (1948), pp. 320-324. アインシュタイン選集 1 (湯川秀樹編) 共立出版, 195-200.
 (7) フランコ・セレリ 「量子力学論争」(1983) (櫻山義夫訳) pp. 63-67.
 (8) Bell, J.S. "On the Einstein-Podolski-Rosen paradox." *Physics* 1 pp. 195-200 (1964) reprinted in *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press pp. 14-21 (1987).
 (9) QCSP pp. 1-15.