

# アイシュタイン・ポドルスキー・ローゼンの 相関と相対性理論

## —— 量子論における分離不可能性 ——

田 中 裕\*

1982年のアスペによるベルの定理の実験的検証は、遅延モードを採用する事によって量子力学的相関が光速度以下の因果作用によって引き起こされたものでない事を示す点で画期的なものであったが<sup>(1)</sup>、この検証実験に対するベル自身のコメント(1986)は「何かガベルの陰で光速度以上の速さで伝達されている」こと、即ち遠隔作用の实在性と「相対性理論をアイシュタイン以前の問題状況に戻す必要性」即ち「ローレンツ不変性を持つ現象の背後にローレンツ不変性を持たない深層レベルがあり、このレベルでは絶対的な同時性と絶対的な因果の順序があると想定する」ことによって量子論的遠距離相関(EPR相関)を説明する可能性に言及している<sup>(2)</sup>。またエーベルハード(1989)のEPR問題の歴史的回顧と様々な解釈の包括的要約も、冒頭に「光速度を越える遠隔作用は(アイシュタインにとって受入れがたい観念であったが)今日では様々な実験結果と理論的な分析によって实在な効果である可能性が強い」という視点を提示し、この遠隔作用が、いかなる意味で「实在的」であるかをめぐる様々な解釈の違いを分析している<sup>(3)</sup>。量子力学を「観測者に言及せずに」实在論的に解釈するポパー(1982)は、「遠隔作用があるならば何か絶対空間のようなものがある」ことを理由に「量子論に絶対的的同时性を導入すべき理論的理由があるとするならば、我々はローレンツの解釈に戻らなければならないだろう」と言っている<sup>(4)</sup>。

### 相対論以前の問題状況の再考

まず、EPR相関が相対論をアイシュタイン以前の問題状況に連れ戻すという、ベルやポパーの提示した問題設定を吟味してみよう。問題の核心はローレンツ変換の解釈として、アイシュタインとローレンツのいずれかを選択するかということである。ここで提示された意見は、EPR相関が実験的に確認された現在、

初めてローレンツの解釈にとって有利な状況が生まれたと言うものである。このような状況把握は正しいであろうか。著者は正しくないと考えるが、その理由を示す前に、ローレンツ変換に関するアイシュタインとローレンツ自身の解釈の違いをまとめておこう。

(1) ローレンツのエーテル理論による解釈では、ローレンツ変換は、第一義的にはエーテルに対して静止した系 $\Sigma$ (絶対時間、絶対空間)とエーテルに対して運動する系 $\Sigma'$ (相対時間、相対空間)との関係を表現したものである。これに対してアイシュタインの相対性理論による解釈では、絶対時間と相対時間、絶対空間と相対空間の区別をはじめからたてないから、ローレンツ変換は、物理的に全く対等な二つの慣性基準系の相互関係を表している。

(2) 「電磁気学の基本法則が互いに等速直線運動する二つの系で同一の形式をとること」特に「光速度がどちらの系でも一定であること」は、ローレンツのエーテル理論では説明を要する不可解な事実であって、エーテルという「隠れた实在」が物体に及ぼす因果的效果(収縮効果、遅延効果)の相殺によってアドホックな仕方でも説明された。相対性理論では、この逆説的な事実を一切説明することなく受容し、理論構成の出発点で要請される基本原理(相対性の原理、光速度不変の原理)とした。

きわめて興味深い事に、(2)の歴史的事実が我々に示しているのは、ローレンツ理論とアイシュタイン理論との関係が、それぞれの理論の提示された歴史的順序を別にすると、量子力学の基本原則を更に深いレベルの实在を持ち出すことによって説明しようとする「隠れた変数の理論」と量子力学自身との関係に類似しているということである。こうしてみると、ベルやポパーが示唆した方向は、量子力学のレベルより深い实在を記述する「隠れた変数の理論」を探求する代りに、相対性理論では捨象された「隠れた实在(それを必ずしもエーテルと呼ぶ必要はない)」の理論をなんらかの

\* 目白学園女子短期大学助教

形で復活させようとする試みと言って良いだろう。著者は、少なくともローレンツのエーテルと電子の理論のような相対論以前、量子論以前の古典論の枠組を復活させる「科学史を逆行させる」方策は、以下の理由から支持しがたいと考える。

「ローレンツ収縮」や「運動する時計の遅れ」がエーテルという「隠れた実在」による因果的メカニズムによるとするローレンツ自身の解釈は、ローレンツ変換の対称性によって論破されている。 $\Sigma$ と $\Sigma'$ は数学的には全く対等であり、我々は次の命題を同時に認めねばならない。

(a)  $\Sigma$ を基準にすれば、 $\Sigma'$ の物差しは収縮し $\Sigma'$ の時計は遅れる。

(b)  $\Sigma'$ を基準にすれば $\Sigma$ の物差しは収縮し $\Sigma$ の時計は遅れる。

それゆえに、ローレンツの言うようにエーテルの因果的作用で収縮効果や遅延効果を説明するならば、(a)と対称的な(b)の効果が全く説明されないことになるだろう。

ここで、ローレンツ自身が「電子論」(1915)の補遺で「( $\Sigma$ の)変数 $t$ だけが真の時間と見なし得るのであって、( $\Sigma'$ の)局所時 $t'$ は補助的な数学的量の以上のものと見なしはならないという観念を固守した」<sup>(6)</sup>ことを彼自身の誤りとして認めていたことを附記しておくのが適切であろう。

ローレンツの理論をなんらかの形で復活させようとするものは、この理論が相対性理論に対していかなる関係を持つものであったかについて正確なメタ理論的認識を持たねばならない。エーテルという「隠れた実在」に言及するローレンツ理論は、「真の」普遍的時間と「見かけの」局所的時間の区別、物の「真の」長さ「見かけの」長さの区別を、エーテル(絶対基準系)に準拠する事によって基礎づけており、ローレンツにとっては、マイケルソン・モレーの実験によつて絶対基準系の存在に対して何の手がかりも得られなかったということは実験事実から理論に対してなされた重大な挑戦であった。ローレンツ変換とはこの挑戦に答えるために提示されたアド・ホックな仮説であって、アインシュタイン理論におけるような普遍的な意味をローレンツ自身の理論枠組ではもっていなかったことに注意しなければならない。相対性の原理を電磁気学にも適用可能な普遍原理とするアインシュタイン理論ではマイケルソン・モレーの実験結果は自然に導かれるものであり、なんら問題性を孕む物ではなかった。

従って、ローレンツが数学的ファーマリズムの対称性に逆らって、 $\Sigma$ と $\Sigma'$ を対等に扱わず、収縮効果と遅延効果がどちらを基準にしても現われるという事の物理的な意味を説明できなかったことは、彼が、絶対基準系において時間と空間の「真の計量」が定義されるといふニュートン以来の古典的な考え方を保持していたからにはかならない。周知のごとくアインシュタイン(1905)は、あらゆる慣性系で真空中の光速度が一定であるという「逆説的な事実」を「原理」とする事によって、光信号による同時性の操作的な定義から基準座標系の時間座標に物理的意味を与えた。彼はまた、空間的な場所に絶対的な意味を持たせずに、物差しと物体との関係を表す操作的定義によって空間座標に物理的な意味を与えた。これらの操作的な定義の持つ意味は、「異なる空間的場所における時刻の同一性(同時性)」が「異なる時刻における空間的場所の同一性」とともに基準座標系に対して相対化された事にある。この時間計量と空間計量の区別の相対化が相対性理論において、「運動する物体の収縮」や「運動する時計の遅れ」の効果の生まれる理由である<sup>(6)</sup>。これらの現象は、もはや何物かが不可解な因果作用を及ぼす事によって生じた効果としては了解されていない。それは時間計量と空間計量が本来、一体不可分であって、両者を結合させた四次元の時空計量( $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$ )のみが観測者の依拠する基準座標系に依存しない不変性を持ち、それを時間的部分と空間的部分に抽象し区別する仕方が一通りではない(無限に多くある)という事を意味しているのである。時間と空間とは別々に分離されるならば実在性(観測者に依存しない不変性)を持たないが、両者は統合されれば実在性を持つと言ってもよい。

相対性理論では、絶対時間と絶対空間の実在性は否定されたが、この否定は同時に「四次元の絶対時空」の実在性の肯定を伴っていた<sup>(7)</sup>。それゆえに、「観測不可能な実在を切り捨てる」というオッカムの剃刀の原理をローレンツ理論に適用する事によって、アインシュタインの相対性理論が生まれたと言うのは事柄の半面しか見ていないのである。その裏面を見れば、時間と空間の実在性に関する全く新しい見方に基づき、従来は抽象的に分離して考察されてきた時間と空間とを一体不可分なものとして扱う理論をアインシュタインが提示したことが分かる。この時空を分離不可能な統一体として見る思想がEPR相関の説明にどのように関係するかについて第三節であらためて考察することに

する。

## 2. EPR 相関は相対性理論の反証と見なし得るか

次に、EPR 相関が現実を検証されたことが、絶対基準系と「超光速の遠隔作用」の実在性を証明するものであるかどうかという問題を論じよう。この問題について、もしその答えが肯定的であればローレンツ理論をアインシュタイン理論よりも優先させる理由があるというのが、ポパーをはじめとする多くの論者に共通する問題意識であった。このことは、ローレンツ理論とアインシュタイン理論の相違を科学史の文脈で論じることとは独立に決定されねばならない。我々は、端的に、「EPR 相関の実測は相対性理論を反証するものと解釈できるか」と問うことにしよう。この問いかけは、問題の所在を明らかにする上で重要である。ここで我々は、どのような場合に相対性理論が反証されたと見なされるべきかについて一定の了解と合意を必要とする。ポパーが適切に指摘したように「潜在的な反証者 (potential falsifier)」を明示し得ない理論は、物理学的には無内容な公式の集合に過ぎず、形而上学的説明原理を与えているにすぎない<sup>(8)</sup>。「いかなる場合に理論が反証されたと見なし得るかを、その理論自身が明示すること」はアインシュタイン自身によって実践された科学論であった。量子力学も相対性理論もともに極めて抽象的かつ一般的な物理理論であるが、「潜在的な反証者」を持たない「閉ざされた理論」ではない。従って、我々が相対性理論の反証可能性について端的に語ることは、EPR 相関と相対性理論の双方を理解する上で必要である。

かつてハイゼンベルグ(1927)が強調したように、「不確定性関係を破る仕方でも相補的な物理量を同時測定する実験装置が存在すれば量子力学は反証される」<sup>(9)</sup>が、それと同じように、無限大の速さで伝わる信号があれば、絶対的同時性が定義され、相対性理論は反証されるだろう。

従って、EPR 相関を利用する瞬間的な遠距離通信が存在するならば、相対性理論の反証について語ることは意味がある。しかし EPR 相関は、二つの偶然的事象系列の間にある相関関係であって、一方の事象系列を我々が操作することによって、超光速の遠距離通信をおこなうことはできない。このように超光速の信号として EPR 相関を利用できないことは、それを使って異なる場所におかれた時計を絶対的な意味で同調することができないということを意味している。量

子論的遠距離相関は、非決定論的事象の間の相関であって、古典物理学に於ける遠隔作用(万有引力)、即ち決定論的事象のあいだの同時的相関とは本質的に異なっているために、エネルギーや信号を瞬間的に遠方へ伝達することはできないのである。

更に、相対論的な意味で空間的距離( $ds^2 > 0$ )をもって隔てられた二つの事象の間に、絶対的な生起の順序を確定する実験が存在すれば、確かに相対性理論は反証されたことになるだろう。しかし、ここでも EPR 相関がそのような実験を可能にするとは考えられない。

実験的に検証された EPR 相関は、量子論的系の一方の部分系の測定 A と他方の部分系の測定 B とのあいだに相関関係があることを予言するが、これは A と B との間で対称的な統計的相関関係であって、(実験室で我々が準拠している基準系で) A が B より時間的に先行しようと、後行しようと、また同時的であろうと、そのこととは全く無関係に成立するのである。従って、EPR 相関そのものは、相関する二項の間の絶対的な時間的順序については、なにも語らない。我々が統計的公式から言えることは、空間的に隔てられた二つの事象 A と B の間に相関関係があるということだけで、A と B が影響したか、B が A に影響したかということではない。

以上の考察は相対性理論の理論的予測によって禁止されている「潜在的な反証者」を EPR 相関が現実化することはないということを示している。これは、EPR 相関の実験的検証が、量子力学の「潜在的な反証者=ベルの不等式」を現実化しなかったことと裏腹の関係にある。この意味で、量子力学と相対性理論の間には、すくなくも両者の与える実験的予測に関しては、平和的共存の関係がある。それは、量子力学の背後に隠れた変数の理論を探したり、相対性理論の絶対基準系の存在を想定したりせずに、両者の基本的な枠組を同時に受け入れることによって、実在と時空と因果律に関する新しい見方を提示すべきことを示唆しているのである。

ハイゼンベルグが回想しているように、1905 年のアインシュタインの論文の持つ革命的な意味は量子論の創始者達が新しい物理的原理を確立する上で導きの糸となったものであったが、それは EPR 相関をいかに説明するかという現在において議論の的となっている問題を考察する上でも非常に示唆的である。EPR 相関は、量子力学のフォーマリズムから自然に予言される現象である。しかし、それは物理的な実在に関する

古典的な見方を前提するかぎり、超光速の遠隔作用のような不可解な因果的メカニズムに訴えない限り説明のつかないものであった。それは、空間の収縮効果や時間の遅延効果をエーテルという「隠れた実在」に起因する因果的効果として説明することに似ている。そして、相対性理論が時間と空間の「分離された」実在性を否定するとともに、「分離不可能な」時空の実在性を肯定する事によって、ローレンツ理論から本質的に区別される理論となったように、EPR 相関の自然な説明とは、遠隔作用に基づく因果的メカニズムではなく、従来は分離され抽象されていた実在の諸要素を「分離不可能な」全体性において捕らえ直すことによって与えられるだろう。

こうして、相対論以前の問題状況をふりかえる事によって、我々は、ローレンツに倣って絶対基準系を復活させることは歴史に逆行する非生産的な試みであると結論してよからう。EPR 相関と相対性理論との整合性の問題は、相対性理論によって我々に拓かれた道を後戻りせずに歩み通すことによって解かれなければならない。それは1905年のアインシュタインの論文の革命的な精神によって、1935年のアインシュタインの量子力学批判を更に乗り越えていくべき事を、相対性理論の精神によって相対性理論の形式を乗り越えていく事を余儀なくされるということである。EPR 相関の現実性は、量子力学と相対性理論との整合性の問題をあらためて提起し、相対性理論の基礎を我々に再考させた。相対性理論は、その根本形式が、遠隔作用を禁止し、局所性と連続性の原理を貫徹する点で量子力学と容易に統合されない面をもっているからである。それにもかかわらず、絶対基準系と遠隔作用を許容するニュートンやローレンツの理論よりは、相対性理論はその革命的精神と方法論において量子力学に遙かに接近しているということが確認された。

そればかりではなく、相対性理論は、エーテルという「隠れた実在」を切り捨てると同時に、時間と空間の計量の実在性に対して「分離不可能な時空計量」という新しい実在の捕らえ方を提示している点で、EPR 相関を「隠れた変数の理論」によらずに、しかも「遠隔作用ぬきで」説明する道さえ示唆しているように思われる。この示唆を具体的にどのように生かすか、それは、相対論の枠組の中で「波束の収縮」をどのように理解すべきかという問題と関連させて論じなければならない。

### 3. 相対論の枠組での「波束の収縮」

デスピニャの「量子力学の概念的基礎」(1976)の分離不可能性に関する議論は、波束の収縮をめぐる他の諸問題とともに、基本的には非相対論的な枠組の中で設定されている。その理由は、相対論の枠組の中で量子論を論じる事が数学的定式化においても物理学的解釈においても様々な議論を引き起こすからである。シュレーディンガーがド・ブロイの物質波の満たすべき方程式を相対論的枠組の中で設定する事を断念して非相対論的枠組の中で定式化したのと同じように、波束の収縮を巡る議論の殆どは、非相対論的枠組の中で論じられていると言ってよい。更に、非相対論的枠組においてすら、波束の収縮を巡るアポリアは未解決である。量子力学の対象言語であるシュレーディンガー方程式や統計作用素による記述の枠組の中で波束の収縮を表現することはできないことがこのアポリアの核心にある。どのようにこの記述枠組を拡大ないし一般化すれば観測する系と観測される系を統一的に記述できるかという問題は、量子力学の観測の理論の中心的な課題であるにもかかわらず、物理学者の間で意見が一致していない。しかし、この困難な問題についてどのような態度決定をするようにせよ、観測者と観測系を統一的に記述する理論が非相対論的枠組で定式化されるならば、それは次の段階で、相対論的に一般化されねばならないであろう。我々が以下で考察したいのは、そのような一般化が必然的に伴うメタ理論的な解釈にかかわる問題である。

デスピニャは波束の収縮の謎について次のように述べている。

我々が苦闘しなければならない謎は、波動関数は(非相対論的であれ相対論的であれ)非局所的なものだから、その崩壊は非局所的現象であるという事実によって作られている。量子力学の定式(非相対論的および相対論的のどちらも)に従えば、この現象は瞬間的に伝播する。その意味で、波束の収縮は非共変的な過程だといえる。もしもこの崩壊が、古典論的現象における確率の収縮のように純粹に主観的な性質のものならば、このことは何の困難もない。けれども我々はそうでないという主張の非常に強い論拠をみてきた<sup>(10)</sup>。

量子論に於ける波束の収縮が純粹に主観的なものではないということについてのデスピニャの指摘は重要である。それは、この問題の安易な解決に対する防波

堤である。例えば、波動関数は客観的実在を記述するものではなく我々の知識(の欠如)を表現する確率論公式であるから、新しい情報が測定によって得られれば、それが示す条件付の確率が不連続的に変化する事に何の不思議もないというたぐいの説明がある。

この種の説明は、しかしながら、古典的な確率論のアルゴリズムと量子力学で実際に使用されている確率論のアルゴリズムとの間の根本的な相違に言及していないがゆえに不満足なものである。古典的な確率論では、排反的な選択肢で表される確率事象の和事象の生起する確率は、それぞれの選択肢の生起する確率の和で表される。例えば、二つのスリット A または B を粒子が通過する確率は、それぞれのスリットを通過する確率の和に等しい。これに対して、量子的な確率論では、確率計算のアルゴリズムは絶対値と位相の両方を持つ複素数の確率振幅によって遂行される。そこでは、全体事象の確率振幅は部分事象の確率振幅の和ではあるが、排反的事象の和事象の確率(確率振幅の絶対値の二乗)は部分事象の確率の和にはならないのである。排反的な選択肢の間に位相的な干渉があること、二つのスリットの実験で言えば、粒子が A を通る可能性と B を通る可能性の間に波動的な干渉がある事が、量子的な確率論を古典的な確率論から決定的に区別する特徴である。この区別は、量子論理の提唱者の「古典論理の基本法則(分配律)が量子力学で成り立たない」という主張の背景にあるものであるが、単に論理学の公式を古典論理から量子論理に切り替えるだけでは問題はなにひとつ解決しはしない。そこで言われている「論理」とは推論の妥当性を決める一般的規則という意味での論理ではなく、量子的な確率論の基礎を成す複素数の確率振幅のアルゴリズムを実数の確率値に翻訳する時に、非ブール代数的構造が現われることを意味しているにすぎないからである。古典的な確率論と量子的な確率論のアルゴリズムの相違は、むしろ確率概念の基礎にある様相概念の相違を反映するものとして理解されねばならない。例えばシュレーディンガー表示によれば、「可能態」にある系の状態は、時間とともに変動し、波動的干渉パターンを示すことによって「現実態」としての系の観測値の統計を決定している。量子力学では、ただ一つの粒子についても、それがとり得る可能な経路の間に干渉効果が生まることが実証されている。従って、干渉効果は多数の粒子の未知の相互作用の結果生まれるものではなくて、一つの粒子が一定の実験状況のもとで示す振舞を特徴づけるもの

と見なすべきである。個別的予測にかんする非決定性だけであるならば、統計力学における古典的な確率解釈のように、それを初期条件に関する我々の無知に帰することは可能だろう。しかし統計的予測に関する(干渉効果による)過剰なまでの決定性が量子論の確率予測の特徴である。この特徴は、量子論で現われる確率を純粋に主観的に解釈することを不可能にしている。「確定した現実」と「その現実に関する(不十分な)知識」とを二元的に分離して、波動関数は前者ではなくて、後者を記述するものだという考えを我々はとるわけにはいかない。配位空間での確率波で表示される量子論的系の「可能態」は現実の測定値によって規定されるその「現実態」から分離できないのである。

波束の収縮とは確定した実在から区別される我々の知識の非連続的な変化ではないということを確認したあとで、この非連続的な変化が「瞬間的に生じる」非共変的なものであるというデスピニャの見解が果たして妥当なものであるかどうかを次に検討しよう。この問題は EPR 相関と相対性理論の関係を論じるさいの決定的なポイントであることは間違いない。波束の収縮を非相対論的に記述すれば、系にはただ一つの座標時間しかないから、この現象は空間的には非局所的であるが時間的には局所的に、即ち瞬間的に生起するかのようには語らなければならない。時刻  $t_1$  で準備された系が時刻  $t_2$  において測定されると、系は  $t_1$  から  $t_2$  まではシュレーディンガー方程式に従って連続的にかつ可逆的に変化するが、時刻  $t_2$  で波束の収縮という不可逆的な非連続的な変化が起こり、この変化が遠く離れた系の他の部分に瞬間的に伝播する(EPR 相関)かのように語られるのである。しかし相対論の枠組では、第一節で述べたように、空間は時間と不可分離であるために、空間的な非局所性は時間的な非局所性を含意することに留意しなければならない。従って「空間的に隔てられた二つの量子論的事象の同時的相関」について語ることは意味を失い、波束の収縮は空間的にも時間的にも非局所的な現象であることを認めなければならない。そして、このような時間的な非局所性を認めることは、因果律と時空との関係に関する我々の古典論的な通念を変更することを意味する。非相対論的な量子力学では、時間と空間が分離され、時間は媒介変数として導入されるが測定可能な物理量に対する作用素としての身分をもっていない。それは物理系にたいして外的な指標としての役割を演ずる時間座標であるにすぎない。これに対して、空間座標の方は系に固有な

測定可能な物理量に対応する作用素としての身分をもっている。このことが時間と空間とが非相対論的量子力学では分離されて扱われているということの意味である。従って、観測による波束の収縮が空間的な非局所性を持つことは直ちに理解されるが、それが時間的な非局所性をもつ持つことは無視されるという結果になる。EPR の議論ほど有名ではないが、不確定性原理と時空の座標秩序との関係についてアインシュタイン (1931) は、「量子力学に於ける不確定性を未来の不確定性だけに制限することは不可能であって、我々は (それと対称的な) 過去の不確定性をも認めなければならない」ことを指摘していた<sup>(11)</sup>。この議論もまた EPR の議論と同じく量子力学の不完全性を示すという文脈で指示されたものであったが、「波束の収縮」を相対論的文脈の中で議論する時の重要なポイントとなるであろう。

量子力学の完全性が「過去の不確定性」を含意すること、即ち「我々が現在において為す選択が、未来に起こり得る出来事を限定するだけでなく、過去に起こり得た出来事をも限定する」ことはウィーラー (1980) の遅延選択 (delayed choice) の実験の主題である<sup>(12)</sup>。この原理的に遂行可能な実験は、過去において半透明の鏡を光子が通過したか反射したかという事実は、現在我々のなす観測装置の選択によって確定することを示している。

この実験は、もし隠れた変数を前提しないならば、「結果が時間的に原因に先立つ因果性 (advanced causality)」として解釈しなければならない。それは、既に確定した過去が変わることではなく、不確定な過去が現在に於ける選択 (測定様式の決定) によって「遡及的に」確定することを意味するのである。このように、波束の収縮が過去遡及的な効果を持つことは、EPR 相関の空間的な非局所性を時間的な非局所性と結合して考察することを自然なものとする。即ち、空間的に隔てられた二つの事象 A と B との間の遠距離相関を、両者の間の媒介ぬきの因果関係 (遠隔作用) として捕らえるのではなく、A と B との間の共通の過去または共通の未来にある事象 M によって媒介された相互関係として、時空的な非局所性を持つものとして理解することを可能にするのである。即ち波束の収縮を A-M-B の三項の全体と結合して理解するならば、「超光速の遠隔作用」を想定せずに量子論的な遠距離相関が説明できるのである。EPR 相関を生む波束の収縮は A(B) から M に至る遡及崩壊 (retrocollap-

se) と M から B(A) に至る崩壊 (collapse) の組み合わせとして表現されよう。このことは、ポーレガール (1977) が指摘したとおり、EPR 相関の確率予想をシュウィンガー・ファインマンによる相対論的に共変な S 行列形式が与えることによって裏書きされる<sup>(13)</sup>。S 行列による定式の時間対称性は、更に、EPR 相関と、ブフリーガーとマンデルの二つのレーザー源からの干渉実験 (1967) との内的関連を明らかにする<sup>(14)</sup>。前者が「共通の過去によって媒介された空間的に隔てられた二事象の分離不可能性」であるのと対称的に、後者は「共通の未来によって媒介された空間的に隔てられた二事象の分離不可能性」を与えるからである。

このように相対論の枠組の中では、波束の収縮は瞬間的に起こるのではなくて、時空的な非局所性をもつ事象として理解されねばならない。しかし、このことは「全ての事象が四次元時空の中で確定した形で存在する」という決定論の世界像を放棄すべきことを意味する。我々は「四次元時空において存在する事象」ではなくて「四次元時空において非局所的に生起する事象」を語らなければならないからである。ここで、生起とは可能態から現実態への移行であり、この移行は量子論的システムに外的な時間座標による過去から未来への推移とは区別しなければならないからである。

## 参考文献

- (1) 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*, Oxford Science Publications pp. 1-15 (1986)
- (2) *The Ghost in the Atom* ed. by, P. V. W. Davies & J.R. Brown, Cambridge University Press (1986) pp. 14-21 Bell, J.S. *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press pp. 68-80 (1987)
- (3) Eberhard, P.H. "The EPR Paradox, Roots and Ramifications" in *Quantum Theory and Pictures of Reality (QTPR)*, ed. by W. Schommers, Springer-Verlag (1989)
- (4) Popper, K.R. *Quantum Theory and the Schism in Physics*, Hutchison, (1982) p. 30.
- (5) Lorentz, H.A. *The Theory of Electrons*

- Teubner Leibzing (1915) Addenda 72
- (6) Einstein, A. "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", Ann. Der Phys. 17 (1905) (邦訳アインシュタイン選集 I—共立出版) 20-47 頁
- (7) Schommers, W. "Space-Time and Quantum Phenomena" (1989) in QTPR, p. 232
- (8) Popper, K. Realism and the Aim of Science (1983) pp. xx-xxiii
- (9) Heisenberg, H. "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", Zeitschrift für Physik, 43, 172-98 (1927)
- (10) d'Espagnat, B. Conceptual Foundations of Quantum Mechanics, Benjamin, Inc. (1976) (邦訳「量子力学における観測の理論」—岩波書店) 91 頁
- (11) Einstein, A. "Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics" Phys. Rev. 34 (1931) pp. 780-781
- (12) Wheeler, J.A. "Law without law" in QTM (1980) pp. 182-213
- (13) Beauregard, O.C. "Time Symmetry and the Einstein Paradox" IL Nuovo Cimento Vol, 42B, N. 1 (1977) pp. 41-64 Vol, 51B, N. 2 (1979) pp. 267-279
- (14) Beauregard, O.C. "On the Zigzagging Causality Model of EPR Correlations and on the Interpretation of Quantum Mechanics" Foundation of Physics, Vol. 18 No. 9, (1988): Pflugor, R.L. and Mandel, L. Phys. Rev., 159, 1084 (1967)