

学位論文題名

Quantum – Mechanical States as Ensembles of
States in a Classical Phase Space

(古典的位相空間内の状態のアンサンブルとしての量子力学的状態)

学位論文内容の要旨

量子力学に於て、測定以前にあらかじめ測定の結果が決定しているとするとうなるのかという議論の中で、ベルの提出した議論ほど反響を呼び、それについての理論、実験ともに多くの研究が為されたものは珍しい。ベルはシングレット状態にあるスピン-1/2粒子対が各々反対の速度で離れていった後に各々のスピンの測定をするというEPR-ボームの思考実験に於て、予め測定の結果が決定している隠れた状態のアンサンブルを仮定し、更にスピンの測定の局所性を表わす仮定を加えて、スピン対の相関に関する統計不等式を証明した。そして、このベルの不等式が破れれば、一方のスピンの測定が、非局所的に他方のスピンの測定結果に影響を及ぼすという遠隔作用の存在を意味すると主張した。その後、実験技術の進歩により、ここ二十年ほどのあいだになされた多くの(主に光子対に関しての)EPR型の実験でベル型の不等式の破れが確認され、量子力学には不可思議な遠隔作用といった非局所的な性質が備わっていると広く信じられている。この不可思議な遠隔作用の存在を認めるか否かは物理学にとって重大な問題であり、一部の物理学者達により、現実の実験における様々な要因(ディテクターの効率の低さ、同時計数の使用)により遠隔作用が無くてもベル型の不等式が破れ得ることが指摘されている。

本研究では、粒子描像にもとづく古典的で局所的なスピンの測定過程の動的模型を構成し、スピン対の同時計数が原因でベルの不等式が破れ得る事を示した。スピンに関して、元のベルの議論に忠実にディテクターの効率が100%であるとしてこのことが示されたのはこれが初めてである。

まず、粒子描像にもとづく古典的な単一のスピンの測定過程の動的模型を構成した。このスピンの測定の模型は、測定過程における隠れた状態の変化を常微分方程式で表わし、隠れた状態は各々の測定値を持つ状態へと変化してゆく様に構成されている。各測定値を持つ隠れた状態の集合は、測定過程を表わす常微分方程式のアトラクターになる。このアトラクターに一様に分布する隠れた状態のアンサンブルをその測定値に対応した量子力学的固有状態に対応させる。これは本研究の模型の新しい特徴である。単一のスピン-1/2の対象の測定においては、対象がいつ測定器に入りいつそこから出てゆくのかという運動の詳細は重要ではないので、この段階ではそれらを表わす自由度は無視する。対象の隠れた状態は以下のように6次元空間の点で表わせば十分である。 $S = (S_x, S_y, S_z)$ 、 $U = (U_x, U_y, U_z)$ とおき、この空間の座標を (S, U) とする。 S はスピニングベクトル、 U はその他のある自由度を表わす。スピンのz-成分の測定過程を、二つのアトラクター α_1 、 α_2 を持つ常微分方程式によってモデル化する。ここで、

$$\alpha_1 = \{ (S, U) : S_z = j, |S| = J, U_z = J, U_x = U_y = 0 \},$$

$$\alpha_2 = \{ (S, U) : S_z = -j, |S| = J, U_z = -J, U_x = U_y = 0 \},$$

$j = 1/2, J^2 = 3/4$ である。スピンの z -成分の測定におけるアトラクター α_1 に一樣に分布する隠れた状態のアンサンブルをスピンの z -成分の上向き固有状態と同一視する。他の固有状態についても同様なアンサンブルとの同一視を行なう。スピンの z -成分の測定過程を表わす常微分方程式の解として、対象の隠れた状態は、 α_1 または α_2 に漸近的に収束するので、隠れた状態がどちらかのアトラクターの定まった適当な近傍に入り安定化された時を測定の終了とみなす。スピンの他の成分の測定は異なる設定の測定器で行なわれるので、この測定過程に於ける隠れた状態の変化を記述する方程式は異なったものとなる。スピンの他の成分の測定は、スピンの z -成分の測定の模型から測定しようとする軸に回転する操作により自然な方法で得られるものとする。様々な方向のスピンの固有状態に対応する隠れた状態のアンサンブルを初期条件としてスピンの z -成分の測定過程を表わす常微分方程式を数値的に解いて解を求めた。その解のアンサンブルから計算されたスピンの上向きになる確率は、対応する量子力学の結果とよく一致していることが確かめられ、この意味で上の模型はスピン-1/2対象の測定過程の模型といえる。

さて、次にこの単一のスピンの測定の模型をEPR-ボームの思考実験に拡張する。この場合、スピン対が問題なので隠れた状態は二つの6次元空間の直積である12次元空間の点で表わされる。EPR-ボーム状態はシングレット状態なので、回転不変でありかつスピン対は負の相関を持っている。これら二つに特徴付けられる12次元空間内のある部分集合 s に一樣に分布するアンサンブルを初期条件とした。さらに、実際の実験では捕らえられた対象達が対であることを認識するために同時計数を使わなければならない。従って、今度はスピン-1/2対象の測定器内の運動の詳細を無視することはできない。この運動に関しては、ある数居時間 T があって、測定の終了時間が T より大きくなると測定器との相互作用の結果として位置にばらつきが生じ、そうでないときは素通りすると仮定した。この仮定から、対を成す各々のスピンの測定の終了時間が共に T 以下である対だけが同時に計数される確率が1であることが示される。ベルの不等式を最大に破る T を、前と同様にして数値的に求めると、 $T = 0.133$ であった。このとき、スピン対の相関は量子力学の結果と近似的に合致し、この模型は遠隔作用なしでベルの不等式を破ることも確かめられた。これには、同時計数を使っていることが本質的である。実際、同時計数を使わない場合($T = \infty$ での計算と同等)は、ベルの不等式を満たしていることが確かめられた。かくして、遠隔作用なしにベルの不等式を破る模型が構成され、ベルの不等式の破れは必ずしも遠隔作用の存在を意味しないことが示された。

本研究では、EPR-ボームの実験において、同時計数が見かけの非局所性の源であり遠隔作用は存在しないという考えを支持するスピン-1/2対象に関する新しい模型をつくることに成功した。従って、もし現在の量子力学の記述の背後に隠れた状態のアンサンブルが存在すると仮定しても、本研究の模型のような機構があれば、遠隔作用の非存在という物理学の伝統的な考え方と量子力学には矛盾はないことが示された。

学位論文審査の要旨

主査 教授 石川 健三
副査 教授 河本 昇
副査 教授 石垣 壽郎

学位論文題名

Quantum – Mechanical States as Ensembles of States in a Classical Phase Space

(古典的位相空間内の状態のアンサンブルとしての量子力学的状態)

現代物理学の柱の一つをなすミクロな自然現象を記述する量子論では、運動方程式より決定される複素波動関数が物理状態を表わし、波動関数の絶対値の2乗等の実数値が確率としての測定値を与える。一方、古典論では、実数値が直接運動方程式よりきまり、決定論的測定値を与える。量子論の測定値に対する非決定論的性格は量子論の初期の頃より、アインシュタインを初め多くの物理学者をなやませた。そのため、決定論的性格を持つ隠れた変数の理論が考えられたが、 $\Delta\alpha\Delta\beta$ の不等式とその実験的検証によりこれらは、否定されたかにみえる。

近年、 $\Delta\alpha\Delta\beta$ の不等式と矛盾しない局所的隠れた変数理論の可能性が議論されてきたが、これらはスピンの1の粒子に関するものである。最も基本的なスピンの1/2に関するものは未開拓であり、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような現況にあるスピンの1/2にかんして、 $\Delta\alpha\Delta\beta$ の不等式と相容れる隠れた変数理論を構築し、これをEPR-ボームの思考実験に適用することにより、 $\Delta\alpha\Delta\beta$ の不等式の破れが必ずしも局所的隠れた変数理論を否定するものでないことをしめした。この議論では、同時計数を使うことが本質的なところである。

著者は、スピンの1/2に対する隠れた変数理論として量子論的固有状態に対するアインシュタイン解釈と測定過程に対するアトラクターを持つ非線形微分方程式との二つからなるモデルを提案した。アトラクターを持つところに新しさがあるこの非線形微分方程式は、一つのベクトルが角運動量に対応し、他のベクトルが隠れた変数に対応する二つのベクトルを含む。方程式がアトラクターを持つため、解は初期条件に関係なく、安定している。そのため、スピンの対応がみやすい。このモデルを初め単一スピンの1/2に適用し、量子化の軸を変えた時の測定について量子力学と一致する結果を得た。さらにこれをEPR-ボームの思考実験に適用した。二つのスピンの測定に対して同時計数を使うことにより、局所的な隠れた変数理論でありながら、 $\Delta\alpha\Delta\beta$ の不等式を破る量子力学の結果と一致する相関を得た。スピンの1/2に関してこれがしめされたのは初めてである。これは、スピンの1/2についての隠れた変数理論としての一つのモデルである。これで量子力学と一致する結果を得たことより、 $\Delta\alpha\Delta\beta$ の不等式の破れが必ずしも隠れた変数理論を否定するわけではなく、量子力学的結果が遠隔作用をいみすものでないことが明確になった。量子力学が間違っていると考える物理学者は現在皆無であるが、本論文の結果は基礎的な所に関するもので、物理学や自然哲学の分野で有益である。

これを要するに、著者は局所的な隠れた変数理論に関して、スピンの1/2局所的隠れた変数の理論が存在することを始めて明かにした。これは、物理学と自然哲学との両分野に大きく貢献するものである。

よって審査員一同は、著者が北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。