

外 / - 344

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

"Study of Quantum
Measurement Processes
by Simulation"

「量子観測過程のシミュレーションによる研究」

申 請 者

村 山 良 昌

Yoshimasa MURAYAMA

平成元年 1 月

量子力学の創設を、Schrodinger-Haisenbergによる新しい力学の提案とBornによる確率解釈の出現の時期とみなせば、既に60年余の年月が経過している。しかしながら、量子力学の本質が古典力学のそれとはあまりに離れていたために、多くの解釈上の論争を生み、今に到るも解決をみないものが数多い。観測問題がその類の典型である。

観測過程は量子波動の確率解釈と深く結びついている。このことは次のような事実に明白に現われている。光学におけるYoungの干渉計や電子線のAharonov-Bohm効果を用いた干渉の実験で観測される干渉縞は、光子や電子の波動性と結び付けて、古典的な波の干渉との類似で単純に説明されることが多い。しかし、事柄はそれ程単純でない。一見波動の干渉と見える模様も、子細に見れば（ビーム強度を弱くした極限で）個々の点の集積であることが実験的に示されているのである。個々の波動の示す過程はあくまでも量子としてのそれであり、その振舞を確率的に記述するのが量子力学である。感光板上に記録されるものは点であり、記録以前の状態が（観測していないのでなんとも言えないが）波動であったと仮定することは自然であろう。通常は、波動として振舞っていたものが記録の瞬間に変容して量子になるものとして、現象を波束の収縮と表現することが多い。

しかし、波束の収縮をそのように解釈することは一体正しいのであるか？量子力学で記述する波動はあくまでも確率波の振幅である。それを古典的な波の振幅と同様に解釈することには無理があるようと思われる。

波束の収縮を量子過程の集合(ensemble)で定義することが出来れば、よりもっともらしいのではなかろうか？そのような観点から観測過程を定式化した理論に、いわゆる町田ー並木理論と呼ばれるものがある。本論文では、町田ー並木理論の精神に沿って、現実の物理過程を意識しながら、計算機の上で量子観測過程を模擬しようとするものである。このような数値シミュレーションの手法は、計算機の能力の向上とあいまって、物理学のあらゆる分野で説得性のある結果を数多く提供してきている。量子力学の問題も、その例外ではない。

量子力学での干渉性は量子が同時に備え持つ波動性の最も直接的な現われである。ここでいう波動性とは、同一条件下にある複数個の量子が確率的に示す波動状の振舞といい替えてよい。一定の初期条件と、相互作用すべき環境とが与えられれば、それ以後のある状態が出現する確率は「決定論的に」決ってしまうことが前提となる。その解を与える方程式がSchrodinger方程式である（本論文は非相対論的範囲に限っている）。

量子論における干渉効果は、光子、電子はいうまでもなく、最近では、中性子を用いたものの実験検証の発展が目覚ましい。これは、高品位のS1を用いた中性子干渉計の開発に負うところが大きい。本論文では、中性子干渉実験を念頭においてシミュレーションを行なう。

本論文の構成は次の通りである。

第1章では、観測問題の歴史と問題の所在を概観する序論を述べる。

第2章では、ここで特に取り上げる町田ー並木理論を概説する。

第3章では、中性子干渉実験が波束のダイナミクスによってどのようにシミュレートされるかを論じる。

第4章では、Viennaの中性子干渉実験と比較すべき観測過程としての数値シミュレーションの詳細と結果を論じる。

第5章では、結論と将来の展望を述べる。

量子観測過程を議論する場合に、頼るべき物理的なモデルとして、中性子干渉の実験がもっとも有力であり、その物理は比較的透明である。また、理論的研究と比較すべき実験データの集積も少なくない。第1章で観測問題の歴史を概観して後、次章では未解決と思われている問題に一つの解を与える町田ー並木理論を紹介するとともに、その理論が実験と比較されるときにどのような物理モデルになるべきかを議論する。

第3章は、S1中性子干渉計が1個の中性子を2個の確率波に分割することから始まる。2個の波束は、一般には、それぞれ異なった環境と相互作用をした後、重ね合させられる。理想的な場合（すなわち、双方のpathに沿っての物理的な環境が全く同じ場合）には、古典波と同一の理想的な干渉縞を生じるはずである。ここで注意しなければならないのは、干渉縞を得るために、極めて多数の事象の集積が必要なことである。ただ1個の点を感光板の上に記録出来てもそれが干渉縞のどの位置にあるのかの情報は得られないことは明白であろう。さらに、この章では、波束の重疊とは物理的になにを意味しているかを論じる。双方のpathから、S1干渉系の同一の領域・同一の時刻に入射した波束は、S1のボテンシャルによるシンクロナスな散乱を通じて“mixing”を受け、その結果重疊効果が現われる。この事実をシミュレーションで示す。

このように、本質的に確率的な事象の観測には、多数の同一事象の記録の集積を必要としていて、最終的にわれわれが得ることの出来る「古典的」情報はensemble平均でしかない。個々の事象の生起する確率は時間に依存したSchrodinger方程式を、用いたモデルの範囲で厳密に解くものとする。

もし、系が理想的ではなく、2つのpathに沿った2粒子の飛行環境に差があるときには、その環境次第でいろいろな結果が期待される。理想的な場合の対極にあるのは、一方のpathの環境が他のそれとは大きく異なっている場合である。確率振幅は位相情報を持っているので、それら環境の効果は環境との相互作用を通じて粒子が取る位相の差によって知ることができる。環境の大きな変異は、大きな位相差と同義である。複数個の粒子が飛来するとして、それらの各個が感じる環境が異なるとき、感光板に集積された情報は位相項の上で平均される。位相差の時間的変動が十分に大きい場合には、位相項は消失する。位

相に依存しない情報は、確率振幅の自乗のみから生じ、古典的な粒子の情報の集積と変わることろがない。すなわち、現実的な環境を定義するとき、その系で相互作用を受けた、いいかえれば、観測を受けた粒子は、環境が時間的に変動する程度に応じて、位相情報の消失の程度が異なることになる。このような観点で、量子観測過程をモデル化して、シミュレーションを実行することが出来る。その結果を第4章で詳述する。

第5章は総括的議論および結論に加えて、今後の発展の方向を考慮・示唆するために供される。