

論文審査の結果の要旨

氏名 佐々木寿彦

本論文は、`Entanglement in Identical Particle Systems` (同種粒子系における量子もつれ) と題し、5章からなる。第1章は序論、第2章は議論の前提となる基礎知識、第3章は問題提起とそれに関連する先行研究、第4章は同種粒子系における量子もつれについての研究、第5章はまとめと結論をそれぞれ記している。

第1章の序論に続いて第2章では近年の量子情報理論の発展に伴って発展した量子論の基礎や測定を扱う手法についてまとめられている。ここでは一般的に用いられる量子もつれの定義について述べられている。その定義とは、純粋状態が1項でかけるならば量子もつれがないという定義である。また、同種粒子系を量子力学でどのように扱うのかということについてもまとめてある。量子力学における同種粒子の扱いとは、本来は区別できない同種粒子を一旦区別して扱い、対称化あるいは反対称化を行うことによって区別をなくすというものである。第3章では、まず始めに同種粒子系における量子もつれの定義の問題点について書かれている。すなわち、一般的に用いられる量子もつれの定義を同種粒子系に適用すると、量子相関のない状態に対しても量子もつれしていると判定してしまう場合が存在するということである。この問題に対する解決策は先行研究でも提案されており、この章において近年の代表的な先行研究がまとめられている。それらは基本的に、同種粒子系において異なる量子もつれの定義を新たに導入することにより問題の解決をはかったものである。この章では第4章で重要な概念となるテンソル積構造についての先行研究も紹介している。テンソル積構造とは、量子力学の公理において、複合系を表すために用いられる概念である。一般的に用いられる量子もつれの定義には、その前提となる構造としてテンソル積構造があり、1項でかけるかどうかということも、どのテンソル積構造を用いているのかに依存している。そのため、一般的な量子もつれの定義はテンソル積構造に依存しているということがこの先行研究によって理解できることが述べられている。第4章は本論文のオリジナルな研究を記述している。ここでは、相関を測定する場合にどのような要素が重要になるのかについて明らかにし、それをもとにして、量子相関を指導原理とした同種粒子系における量子もつれの新たな定義を提案している。まず、第3章でとりあげられた、量子相関が無いにもかかわらず通常の定義では量子もつれしていると判定されてしまう状態について、なぜそのようなことになってしまったのかを議論している。そもそも相関というものが複数の測定値の間の関係であり、量子もつれをその観点で定義するならば、量子もつれを扱う際に用いられるテンソル積構造はそれぞれの測定器の測定値を表す空間の複合系としての意味を付与する必要があるということである。そして、同種粒子を一旦区別してから対称化や反対称化する方法において用いられているテンソル積構造は、仮に区別された粒子の複合系としてのテンソル積構造であり、必ずしも測定値とは対応していないことが述べられる。本論文で用いられている測定モデルは、複数の区別できる測定器において任意の決まった数の同種粒子が検出されるということを想定している。この場合、一つの測定器系において測定にかかる部分は一旦区別してから対称化や反対称化でつくる全ヒルベルト空間の部分空間であり、さらに、その部分空間は、個々の測定器が得られる最大の情報を表す空間のテンソル積構造で構成される空間と同一視できることが示される。後者の空間で採用されているテンソル積構造は測定器系を表すテンソル積構造と考えられる。本論文で新たに提案される量子もつれの新たな定義とは、この新たなテンソル積構造に対して純粋状態が1項でかけるかどうかで判別するものになっている。1項でかけるかどうかで判別する点は従来と同じであるが、適用するテンソル積構造が異なっている。この定義は、量子もつれは状態だけで判別されるものではなく、どのような測定器系を用いるのかにも依存していることが明示的にわかる理論形式となっている。さらに、本論文で用いている測定モデルで考えるならば、どのような測定器でも量子相関が得られない状態がどのような状態であるかを完全に特徴づけている。第5章では、本研究で得られた結果を要約している。以上のように、本論文では同種粒子系の量子もつれの構造を明らかにし、量子相関と整合的な定義を与えており、この問題に対する明快な解答を与えた。

なお、本論文は市川翼氏、筒井泉氏、米澤信拓氏との共同研究に基づいているが、問題解決の主要なアイデアは論文提出者が主体となって研究を進めた結果であり、論文提出者の寄与が大部分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できるものと認める。