

## 論文審査の結果の要旨

氏名 市川翼

本論文は5章からなり、第1章は序論、第2章はベルの不等式の破れをBメソンで検証する可能性についての研究、第3章は同種粒子系の多体状態の量子もつれについての研究、第4章は多体量子状態の量子もつれの測度についての研究、第5章はまとめと結論をそれぞれ記している。

本論文は、近年盛んになっている量子もつれ（エンタングルメント）について、申請者の研究をまとめたものである。それは、以下で述べる3つの研究内容からなる。

まず第1に、量子もつれについて最も基本的で重要な関係式である、ベルの不等式の破れをB中間子で検証する可能性についての研究である。ベルの不等式の破れの検証実験は光子、スピン系、低エネルギー核子など様々な物理系で行われている。しかしながら、中間子を用いた検証実験の可能性については近年まで論争が行われており、確定的な結論が得られていない状況であった。本学位論文ではCP対称性の破れを無視した場合にB-中間子対を用いたベルの不等式の検証実験が可能かという問いに取り組んだ。B-中間子の場合、実験条件を自由に選択することが現状では困難であり、ベルの不等式を導くには仮定を補充する必要がある。本論文はB-中間子の崩壊現象が対をなすもう一方のB-中間子の崩壊現象と独立であるという仮定と、崩壊現象が時間的に等質であるという仮定を局所实在論に要請することでベルの不等式を構成することが可能であることを示した。また、KEKで行われているBelle実験の現在の実験条件でベルの不等式の破れの検証実験が可能かどうかについても解析を行った。Belle実験では対をなすB-中間子それぞれの崩壊時刻ではなく、その差のみを測定しており、そのために検証実験の実現が困難であることが分かった。また、検出器の効率がある閾値 $\epsilon$ よりも低い場合や、量子もつれ状態をなす個々の粒子への測定が互いにspace-likeな時空点で行われてない場合、ベルの不等式の破れが実験的に検出されようとも、それが直ちにベルの不等式を導く仮定のうち少なくとも一つが否定されることにはならないことが示されている。現在のところ、上記の二つの問題点を同時に克服した実験はなされていない。本論文はBelle実験の現在の実験条件がこれらの問題点を克服しているか検証した。検出

効率については  $B$ -中間子が多重崩壊を起こすために、崩壊の各段階における検出効率が高いにも関わらず全体では  $\varepsilon$  以下であることが分かった。ただし、崩壊の等方的が検証できれば、データの補完により実効的に  $\varepsilon$  を越えた検出効率を得られる。また、Belle 実験で得られるデータは崩壊時刻の差であることから、対をなす  $B$ -中間子が互いに space-like かどうかは確定的に決められない。ただし、 $B$ -中間子対を生成する電子陽電子衝突のエネルギーを十分大きくすることで space-like に離れた  $B$ -中間子対を高確率で生成でき、問題点を解決できる。また、崩壊時刻そのものを測定できるように測定器を改良することでも解決できる。以上まとめると、本学位論文において、 $B$ -中間子対を用いたベルの不等式の破れの検証が原理的に可能であり、崩壊時刻そのものの測定と崩壊の等方性が保証されれば Belle 実験において非常に確度の高い実験が行えることを示した。

第2に、同種粒子系の多体状態に特徴的な量子もつれについての研究である。ただし、同種粒子系での可観測量の対称性がもたらす効果は考慮されておらず、本論文の結果は限定された状態にのみ適用可能であることが、最初に注意されている。多体量子系においては定性的に異なる量子もつれ状態が数多存在することが知られており、それらの分類が盛んになされている。ただし粒子数  $n$  が増えた場合についての解析は非常に難しく、一般の  $n$  での分類は未だ知られていない。本論文では、特にボゾンまたはフェルミオンの同種粒子の系について考察し、以下の結論を得た： $n$  体ボゾン系では大域的量子もつれ状態（構成粒子が全て互いにもつれあっている状態）か完全直積状態  $|\psi\rangle = \otimes_{i=1}^n |\phi\rangle_i$  のみが許され、 $n$  体フェルミオン系では大域的量子もつれ状態のみが許される。この主張はエニオンに対しても拡張可能である。つまり、素粒子の量子もつれ状態を考える場合、大域的量子もつれ状態に着目すればよい。

第3に、多体量子状態の量子もつれの測度についての研究である。量子情報科学においては定量的評価のために量子もつれ測度と呼ばれる写像を用いることが多い。また、この写像は局所操作と古典通信に対する単調減少性等、いくつかの要請を満たさねばならない。二体系の純粋状態に対しては量子もつれ測度の一般的構成法が知られており、それに基づいて様々な量子もつれ測度が提案されている。一方、多体系では、二体系での構成法で

本質的な役割を果たす Schmidt 分解に対応する操作が存在しないため、様々な観点から構成法が提案されている。このような状況を受け、二体系における量子もつれ測度から出発し、多体量子もつれ測度を構成する試みがなされており、この方針に基づき Meyer と Wallach や Love らが多体量子もつれ測度を提案している。本論文では、Meyer-Wallach 及び Love らと同様の方針に基づき、多体量子もつれ測度族  $\{R_m(\psi)\}_{m=2}^n$  を構成した。ここで  $n$  は粒子数とする。この量子もつれ測度は任意の  $n$  体純粋状態に適用可能であり、 $m=2$  のとき Love らの量子もつれ測度に、 $m=n$  のとき Meyer-Wallach の量子もつれ測度に一致し、先行研究の自然な拡張になっている。また、著しい性質として、 $R_m(\psi) = 0$  のとき量子状態  $|\psi\rangle$  は  $m$  個の部分系の直積状態に分離可能であることが挙げられる。このことから  $R_m(\psi)$  は部分分解性という多体量子系特有の特徴を反映した量子もつれ測度とすることが出来る。

本論文は、以上の 3 つの研究項目を合わせた全体として見れば、量子もつれに関する研究として、博士論文として十分な内容を持つものと審査委員全員が認めた。

なお、本論文は、筒井泉氏・田村智志氏・米沢信拓氏・佐々木寿彦氏との共同研究であるが、論文提出者が主体になって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって、博士（理学）の学位を授与できると認める。