

機関番号：8 2 1 1 8

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540391

研究課題名（和文） 中間子を用いた量子力学の非局所性検証の理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical Study on the Nonlocality of Quantum Mechanics based on Mesons

研究代表者

筒井 泉（IZUMI TSUTSUI）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：10262106

研究成果の概要（和文）：量子力学の最も顕著な特徴とされる非局所性を、中間子等の素粒子を用いて実験的に検証する場合に生じる同種粒子性の問題や、粒子崩壊による測定の受動性の問題を考察し、その精確な取り扱いのための理論的研究を行った。その結果、多体系の量子相関の定量化の新しい方法を確認し、同時に粒子の同種、異種に共通した量子相関の測定の設定に対する依存性（量子もつれの相対性）を明確にするなど、素粒子の量子相関の測定の基礎を与えることに成功した。

研究成果の概要（英文）：We studied several issues associated with experiments designed for testing nonlocality of quantum mechanics based on elementary particles including mesons. The problems for establishing quantum correlations due to the indistinguishability of particles and their passive nature of decays were analyzed. We proposed a novel set of measures which is useful to characterize the entanglement of many particle states (such as GHZ and W). The intrinsic relative nature of entanglement with respect to measurement setups was also made transparent in our treatment of correlations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：原子・分子・量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：量子情報

キーワード：Bell 不等式

1. 研究開始当初の背景

量子力学の非局所性の検証は、量子力学と古典力学との決定的な差異の在処を見定めるために重要であり、量子情報科学の今後の発展にもその解明は鍵となると考えられている。従来は主として光子を用いた検証実験がなされていたが、近年、イタリア Frascati や日本の Belle グループなどで、中間子を用

いた高いエネルギー領域での検証実験の試みが始まり、その結果に興味を持たれていた。

2. 研究の目的

中間子系を用いた場合の光子系との違い（測定の受動性と、崩壊時間に起因する測定精度の制限など）を明確にすることにより、中間子等の素粒子を用いた量子力学の非局所性

の検証実験の理論的な基礎を固める。

3. 研究の方法

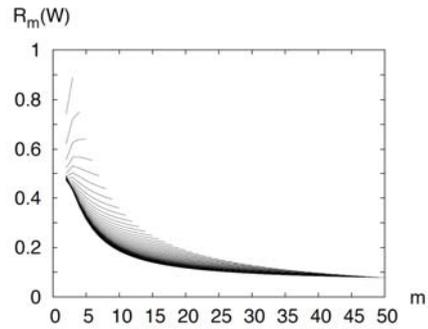
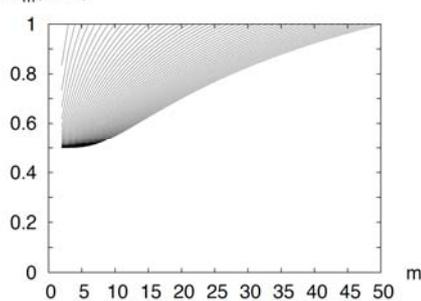
実際の中間子系を用いた実験で、特に重要になる同種粒子性など特殊性を考慮した量子相関（量子もつれ）の測定と評価の基礎を構築した。より一般的な観点から、多体系が任意の部分系に相関が分割される場合の条件とその物理的な意義を明確にし、さらに相関と測定の設定の関係について、数値的シミュレーション等の手法を用いて研究した。

4. 研究成果

本研究の成果は、中間子実験及びより一般的な同種粒子系の量子相関についての基礎理論の構築に必要な、多体系の任意の分割についての量子相関の評価基準の設定と、同種粒子性による量子もつれの定義の明確化、及び中間子の崩壊の受動性問題に関連した測定の選択と量子力学の非決定性の問題の3つに分けられる。それらは以下の通りである。

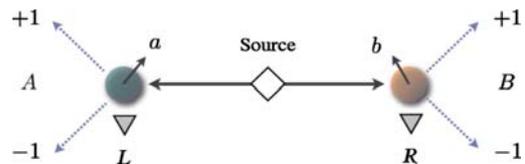
- (1) 一般に多体系の量子相関を定義するには、その任意の部分系への非分離の程度を示す「量子もつれ測度」(entanglement measure)が必要になる。本研究では新しい「量子もつれ測度」を全系の量子エントロピーに基づいて定義し、これを用いて一般の複雑な量子相関を特徴づけることが可能になった。この「量子もつれ測度」は、想定される分割ごとに定義され、その特定の分割の程度を定量化するもので、例えば一般化された多体 GHZ 状態や W 状態の量子相関の程度を任意の分割数のもとで評価すると、これら2種類の量子もつれ状態の相関の性質の顕著な違いが、分割の依存性の観点から明らかになる（下図では粒子数 $n=50$ の場合の m 個の部分系への分割に関する量子相関の程度を表す。上側が GHZ 状態、下側が W 状態で、分割数 m の増加とともに両者は極めて対照的な変化を示している。）

この結果は、中間子を用いた量子相

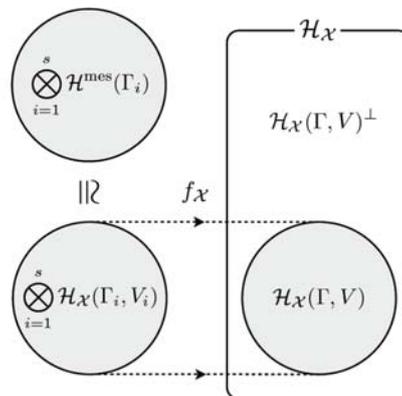


関実験での相関の分析だけでなく、一般の多体系量子状態の分類にも応用できるものであり、非常に有用な量子相関の指標となるものと期待される。

- (2) 量子力学の非局所性の検証実験は、標準的には光子や原子、中間子といった同種粒子系を用いて行われるが、本研究ではこのような同種粒子系に適合した量子もつれの定義とその評価方法を確立した。その結果、一般に量子相関の存在を検知するための

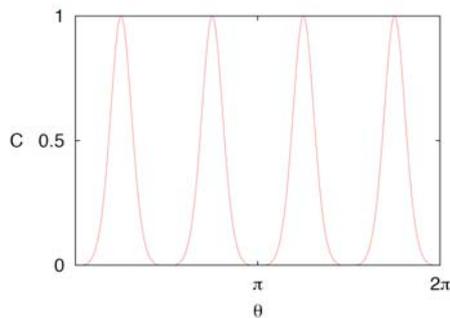


測定の設定には一定の規準を満足することが要請され、これを満たすものであれば、多体系の対称性（同種粒子系・異種粒子系）に拘わらず、量子もつれの定量的評価が可能であることが判明した。その本質は、上のような標準的な同種粒子の2体相関において、既に粒子の仮想的な区別を測定器の位置（左右 L, R）によって行っていることに既に内在していたが、本研究ではこれを一般の多体系に拡張した際に、部分系への分

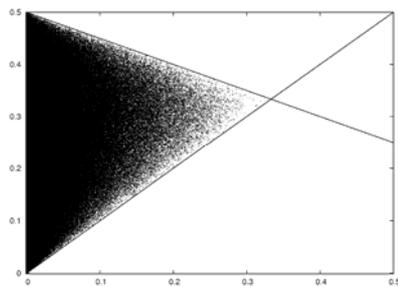


割が測定結果から可能になる条件を提示したことになる。その条件とは、基本的には測定の設定 V が粒子の区別を可能とし、量子状態を対応する異種粒子系の状態に写像できることであり、上図のように、設定 V と部分系への分割 Γ によって定まる状態空間（上図右）から、同等な直積構造を持つ標準的な状態空間（上図左）への全単射写像が存在することである。そしてこの後者が、直接、測定結果から再現される状態空間に他ならない。

さらに以上の考察から、量子もつれの存在の有無そのものが、測定の設定 V に依存する相対的な概念に過ぎないことが明確になる。この量子もつれ（相関）の相対性は、近年、Zanardiらによって指摘されていたものであるが、本研究によって一層明確な私たちで提議されることになった。例えば、上述の簡単な2体系においても、測定系を L と R とで混合することにすれば、通常の Bell 状態の量子もつれの程度（concurrence）は、そ



の混合角 θ とともに大きく変化することが見て取れる（上図参照）。加えて、3体の場合にも同様な測定系の変化を行ったシミュレーションの結果、2つの Schmidt 係数の分布（下図の縦と横軸がその係数の値）から、



測定の設定の変化によって量子相関の観点からは殆ど可能な範囲の状態を構成できることが判明した。以上の量子相関（量子もつれ）の測定の設定に関する相対性の観点は非常に

重要なものであり、このことは例えば量子もつれの無い状態でも、測定の設定を変えることによって量子もつれ状態を生み出すことができることを示していることから、今後の応用のための研究に興味を持たれる。またこの事実は、中間子のような素粒子系の相関測定の実験においても、必ずしも量子もつれ状態を必要としない可能性をも示唆している。

- (3) 中間子を用いた Bell 不等式の検証実験における最大の問題点の1つは、粒子の崩壊によって測定を行うため、測定が受動的なものとなり、本来の非局所性の検証に必要な測定の実験的自由性が担保されていないことにある。この点において興味深い定理（Conway-Kochen の「自由意志定理」）が最近提出され、測定設定の自由性と、測定結果の非決定性との深い関係が指摘された。この議論は 1967 年の物理的実在の状況依存性を示した Kochen-Specker 定理に基づくものであるが、その代わりに Arvind による 2 組の Mermin 型のモデル（9 個の物理量を 6 組に分けて魔方陣の形にしたもの）を援用することによって、同等の結果を導くことが出来ることを示した。この考察によって、最近、幾つかのグループで争点になっていた Bell 定理との関係など、この新しい定理の位置づけと、その依拠する物理的及び論理的な基礎を明確にすることができた。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 6 件）

- ① T. Sasaki, T. Ichikawa and I. Tsutsui, Entanglement of Indistinguishable Particles, Phys. Rev. A83 (2011) 012113. 査読有
- ② T. Ichikawa, T. Sasaki and I. Tsutsui, Separability of N-particle Fermionic States for Arbitrary Partitions, Journ. Math. Phys. 51 (2010) 062202. 査読有
- ③ T. Ichikawa, T. Sasaki and I. Tsutsui, Entanglement Measures for Intermediate Separability of Quantum States, Phys. Rev. A 79 (2009) 052307. 査読有
- ④ T. Ichikawa, S. Tamura and I. Tsutsui, Testing the EPR Locality using B-Mesons, Phys. Lett. A 373 (2008) 39. 査読有

〔学会発表〕(計 15 件)

- ① I. Tsutsui, Entanglement of Indistinguishable Particles based on Measurement、国際研究集会「Nagoya Winter Workshop 2011」、2011年2月16日、名古屋大学
- ② I. Tsutsui, Comments on the entangled H(2p) pair generation experiment at the Photon Factory, viewed from the foundation of quantum mechanics、国際workshop「The James Sullivan Workshop on Atomic and Molecular Sciences and their Applications」、2011年1月29日、上智大学
- ③ I. Tsutsui, Non-locality of Quantum Mechanics in Particle Physics - Exploration by Mesons -, ICHOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses (SIR2010)、2010年2月21日、東京大学
- ④ 筒井 泉、 B 中間子による Bell 不等式の検証実験とその意義、第6回 AMO (原子、分子、光学) 討論会、2009年6月12日、大阪大学

〔図書〕(計 1 件)

筒井 泉、岩波書店、「量子力学の反常識と素粒子の自由意志」、2011年、100頁

6. 研究組織

(1) 研究代表者

筒井 泉 (TSUTSUI IZUMI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：10262106

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：