

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 荒井 駿

論 文 題 目

The Diversity of Entanglement Structures with Self-Duality and
Non-Orthogonal State Discrimination in General Probabilistic Theories
(一般確率論における自己双対性と非直交状態識別を持つエンタングルメント構造の多様性)

論文審査担当者

主 査 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授 博士 (理学)
永尾 太郎

委 員 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授 博士 (情報理工学)
Le Gall, François

委 員 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 准教授 博士 (理学)
南 和彦

委 員 名古屋大学大学院情報学研究科 教授 博士 (Ph.D)
Buscemi Francesco

論文審査の結果の要旨

一般確率論は、状態と測定の情報理論的操作的側面に注目し、古典確率論や量子確率論を含む自然な確率モデルを一般的に扱う理論である。一般確率論における1つの本質的な問題に、エンタングルメント構造 (一般確率論において可能な量子合成系のモデル) の特徴付けがある。標準的な量子論において、量子合成系のモデルは標準エンタングルメント構造に一意的に定まる。しかし、一般確率論においては、量子合成系のモデルは一意的に定まらない。そのため、理論的には、標準エンタングルメント構造の代わりに他のエンタングルメント構造に従う物理系が存在する可能性があり、一般確率論は盛んに研究されてきた。

本論文は、様々なエンタングルメント構造から標準の構造を決定する追加の原理を見つけるために、エンタングルメント構造の多様性を解析し、物理的に自然な原理による特徴付けを行うものである。本論文の貢献は、次の5つのテーマに分けられる。

(テーマ A) エンタングルメント構造が許容する測定の状態識別性能を用いた分類

(テーマ B) 標準エンタングルメント構造よりも優れた性能を持つ測定の再現不可能性

(テーマ C) 群の対称性により、エンタングルメント構造がどの程度特徴付けられるかの究明

(テーマ D) 標準エンタングルメント構造ではない自己双対エンタングルメント構造の存在を示すための一般論の構築

(テーマ E) 標準エンタングルメント構造と実験的に区別不可能な自己双対エンタングルメント構造の存在証明

本論文は、序文と結論を含む5章からなる。第2章では、正錐および一般確率論の基礎についての解説があり、次に、本論文の中心的な概念であるエンタングルメント構造について、定義と性質が導入される。

第3章では、エンタングルメント構造の多様性を解析するために、基礎的な情報タスクである状態識別に着目し、テーマ A およびテーマ B に取り組む。状態識別は、その成功確率がモデル内の測定の能力に依存するタスクであり、標準的な量子論では、識別可能性は状態の直交性をともなう。本論文では、一般的な測定について、標準的な量子論よりも優れた状態識別性能を持つための必要十分条件を与える。それは、テーマ A の主結果である。その必要十分条件の応用として、状態識別性能の限界を考えることにより、標準エンタングルメント構造を導出する。また、量子超越測定の再現不可能性 (テーマ B の主結果) を示す。これらの応用は重要であり、状態識別により、量子超越測定を持つモデルが標準エンタングルメント構造から区別されることがわかる。

論文審査の結果の要旨

第4章では、エンタングルメント構造の自己双対性に注目し、テーマC、D、Eに取り組む。一般確率論においては、自己双対性を同質性と呼ばれる群の対称性と組み合わせることにより、Euclidean Jordan Algebraに対応する数理モデルを特徴付けることができる。しかし、自己双対性と同質性の一方のみを想定した場合にモデルがどのように制限されるかは、エンタングルメント構造に限定しても未解決であった。第4章では、まずエンタングルメント構造について群の対称性に関する条件を調べ、その結果、同質性よりも弱い条件により、標準エンタングルメント構造を一意的に導出する。それは、テーマCの主結果である。次に、自己双対エンタングルメント構造に着目する。特に、標準エンタングルメント構造以外の自己双対エンタングルメント構造は存在するかどうかという未解決問題に取り組む。自己双対モデルの多様性を明らかにするために、自己双対性に関する一般論を展開する。また、テーマDの主結果として、その一般論を適用することにより、標準エンタングルメント構造ではない自己双対エンタングルメント構造の存在を示し、上述の問題を解決する。

さらに、その一般論を適用し、疑似標準エンタングルメント構造と呼ばれる重要な自己双対エンタングルメント構造のクラスを調べる。疑似標準エンタングルメント構造は、小さな誤差を含む物理的実験によっては標準エンタングルメント構造から区別できない自己双対エンタングルメント構造であり、第4章では、無限個の疑似標準エンタングルメント構造の存在を示す。その上、エンタングルメント構造が自己双対かつ標準エンタングルメント構造に近いとしても、非直交な状態識別が可能であること(テーマEの主結果)を示す。

本研究は林正人教授との共同研究であるが、本研究に必要な証明や計算は学位申請者が行った。林教授との共同作業は、主に論文の構成、議論の展開や関連研究との比較に関する部分に限られる。

以上のように、本論文は、一般確率論と量子論の関係について新しい知見を与えるものであり、学位論文として十分な内容をもつものであると認められる。2022年12月21日に開かれた学位審査セミナーでは、学位申請者による本論文の解説と、質疑応答を行った。解説はよく準備され要点を押さえたものであり、質問に対する回答も適切であった。学位申請者は、研究内容に関する十分な知識・理解と見識を備えた者であると認められる。以上のことから、学位審査委員会は、学位申請者には博士(数理学)の学位が授与される資格があるものと判断する。