

学位申請論文公開講演会

日時：2026 年 1 月 30 日(金) 15:00～

申請者：大澤 悠生 (QG 研)

場所：B4 講義室

題目：真空揺らぎとブラックホールにおける情報喪失問題についての研究

主論文の要旨

現代の自然科学において、量子論と重力理論の統合は未だ解決されていない最重要課題の一つである。特に、ブラックホールの事象の地平面近傍における量子効果は、時空の微視的構造や情報の保存則に関する根本的な問いを投げかける。近年急速に進展した量子情報理論を適用することで、これらの量子論と重力理論の境界領域における物理現象を解明するという期待は高まりつつある。ブラックホールからの Hawking 放射に起因した、ブラックホールの蒸発やそれに伴う「情報喪失問題」は、量子論のユニタリ性を脅かすパラドックスとして議論が続いている。本論文では、曲がった時空における場の量子論および相対論的量子情報理論の枠組みを用い、真空中の量子相関の構造とその抽出可能性、およびブラックホール蒸発過程における情報の行方について理論的解明を行う。

本研究の前半では、Hawking 放射を擬似的に再現する系である「動的鏡模型」を用いて、蒸発過程に際した情報回復に伴うエネルギー量に関して検証を行った。具体的には、加速運動から等速運動へ移行した後に停止する鏡の軌道を解析することで、Hawking 放射の純粋化を担うパートナーと、この時放出される莫大なエネルギー（バースト）との関係を調べた。解析の結果、パートナーの分布を表す空間プロファイルとバーストの発生位置は明確に分離しており、両者は無関係であることが示された。これは、真空揺らぎとしてエネルギーを使わずに情報が復元されうるというシナリオを支持する結果である。したがって Wald らの「ブラックホール蒸発にかかる情報回復にはバーストによるエネルギーが必要である」という主張に対する反例となっており、真空揺らぎのシナリオの整合性をより強固なものとした。

本研究の後半では、真空中から量子もつれを取り出す「エンタングルメント・ハーベスティング」の実行可能性について解析を行った。ここでは、ガウス状態にある 2 つの局所的な測定器間の相関を、パートナー公式により再定式化した Simon の判定条件に基づき評価した。まず、プロファイル関数同士の重なりが量子もつれを抽出する必要条件であることを明確化し、次にプロファイル関数が、場のモードの空間的局在を物理的に表す指標であることを確認した。そして、加速運動する観測者のモード（リンドラーモード）のみで構成された測定器モードに対しては、プロファイル関数間に重なりが存在したとしても、量子もつれの抽出が原理的に不可能であるという「No-Go 定理」を導出した。この結果は、ブラックホールからの Hawking 放射を蒸発初期において実粒子の形でのみ観測を行う場合、初期状態の情報を担う量子相関が抽出できないことを示唆しており、ブラックホールからの情報回復シナリオに対して重要な制約条件を与える。

以上の研究により得られた結論は、以下の二点である。第一に動的鏡模型におけるバーストが情報回復とは無関係であり、真空揺らぎのシナリオの整合性が保証されているということである。第二に、ブラックホールから情報の復元をするためには実粒子としての Hawking 放射に関する測定だけでは不十分であるということである。以上の結果は真空揺らぎのシナリオがエネルギー収支および量子情報の測定という二つの側面から裏打ちされていることを強く示唆する。