

学位申請論文公開講演会

日時：2026年1月30日(金) 13:00~

申請者：朝永 真法 (QG 研)

場所：B4 講義室

題目：動的鏡モデルにおける量子もつれ指標としての強度相関

主論文の要旨

一般相対性理論が記述するブラックホールの近傍のような強重力領域では、時空のダイナミクスにより場の真空定義が変化し、粒子生成や量子的相関が生じる。このような状況下で場が持つ情報論的性質を定量的に扱うことは、量子論と一般相対性理論が交差する領域における場の非局所相関の構造を理解し、重力自身の量子性を考えるうえで重要である。

本研究では、ブラックホール蒸発を示すトイモデルとして動的鏡モデルを採用し、場の非局所相関を2つの検出器へ転写する手法（Entanglement Harvesting）を用いた解析を行った。検出器モデルとして二準位検出器（Unruh–DeWitt detector）を導入し、検出器間の量子相関をネガティビティ（量子もつれの指標）で定量化するとともに、検出器出力に対応する二次強度相関関数 $g^{(2)}(\tau)$ を同一の理論枠組みで導出した。この定式化により、強度相関とネガティビティの関係を比較することが可能となる。

具体的にはまず、動的鏡モデルにおける場と検出器の相互作用を摂動展開により取り扱うことで、検出器の密度行列要素および正規順序積で表される強度相関に対する公式を導出した。導出された公式を基に数値計算を行い、検出器間距離 d 、検出器エネルギー・ギヤップ Ω 、スイッチング幅 σ などのパラメータ依存性を調べた。これらのパラメータに対するネガティビティと $g^{(2)}$ の依存性を解析・比較することで、両者が定性的に類似した振る舞いを示すことを確認した。

また、強度相関の表式を、一次コヒーレンス由来の項、量子的な二次コヒーレンス由来の項、熱的雑音由来の項の3つに分解することで、検出器のパラメーターを変えたときの、それぞれの項の割合の変化を解析した。これにより、熱雑音が強度相関の振る舞いに与える影響を評価できる。数値計算の結果、短距離かつ低温に相当する条件下では $g^{(2)}$ の振る舞いが検出器間の量子もつれの有無を反映し得る一方で、高温あるいは長距離領域では熱的雑音や古典的相関の影響が支配的となり、 $g^{(2)}$ 単独で量子もつれを判定可能な限界が存在することが確認できた。さらに、 $g^{(2)}$ の特定の値域がネガティビティの存在に対する十分条件を与えることが明らかとなった。

本研究の結論として、実験的に測定可能な強度相関と、直接測定が困難な場の量子もつれを関係付ける理論的枠組みを確立した。さらに、ホーキング放射に由来する熱的雑音が存在する環境下であっても、一次コヒーレンスが抑制された状況であれば、強度相関が量子もつれの信頼できる指標となりうることを明らかにした。