

修士論文要旨

# 場の理論の一般純粋化パートナーと量子エンタングルメント

## General Purification Partners and Quantum Entanglement in Field Theory

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻  
富塚 健志

重力崩壊を起こしブラックホールを形成する過程を表す時空中での量子場の理論を考えると、ブラックホールが一定のエネルギーフラックスをもつ熱輻射を放出することが 1975 年 Hawking により示された。この輻射は Hawking 輻射と呼ばれる。輻射がブラックホールのエネルギーを徐々に持ち出し、最終的に完全に蒸発して輻射のみが残る可能性を考えると、次の問題が生じる。輻射が完全に熱的な混合状態のままならば、純粋状態にある崩壊物質を用意しても、最終的に混合状態の輻射だけが残ることになるが、量子力学のユニタリー性が成り立てば、このような時間発展は許されない。一般に混合状態にある量子系は、別のある補助量子系が存在して、それらを合わせた合成系が純粋状態にできる。これは状態の純粋化と呼ばれる。この視点から言えば、蒸発後に輻射と量子的に纏れている補助系が存在しないことは、純粋状態に蓄えられていた量子情報の一部が失われたことを意味する。このためこのユニタリー性の破れる可能性は、情報損失問題と呼ばれている。

量子重力の効果が効きだすと考えられる蒸発の最終段階では、既存の量子力学が成り立たず、そのためにユニタリー性が破れている可能性もあるが、近年の超弦理論の発展、特に AdS/CFT 対応により、ブラックホールからの輻射に事象の地平内部の情報がすべて含まれることが示唆されたため、ユニタリー性を保った蒸発シナリオが活発に議論されるようになった。Hawking 輻射を純粋化する補助量子系は、その純粋化パートナーと呼ばれる。この純粋化パートナーに関してはこれまでもいくつか候補があげられているが、例えばウィルチェックは 1992 年に、ブラックホールの蒸発過程を模した動的鏡模型と呼ばれる模型を使って、輻射場の真空の零点振動が Hawking 輻射と大量の量子纏れを共有できる可能性を指摘した。このことは Hawking 輻射の純粋化パートナーはエネルギーを持つ必要がないという重要な知見である。

また量子もつれの一般的な性質であるモノガミー性（一夫一妻制）から、それだけで純粋状態にある系は、他の系との間に量子纏れを持ってない。すなわち情報が外部に漏れない系であるから、純粋化パートナーの研究はブラックホールの文脈だけでなく、量子暗号や量子コンピューターといった量子工学の分野でも重要である。例えばブラックホール物理学にも応用できる、量子場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という量子プロトコルでは、パートナーを使って純粋化された量子系を用いることで、その効率を高めることもできる。

本論文では量子場の理論における純粋化パートナーの最近の研究の報告を行う。まず量子情報理

論の基礎理論を解説し、量子エンタングルメントの概念を導入する。そののち、慣性系での真空は一様加速度系の観測者からは熱浴として観測されるという Unruh 効果、および先述の Hawking 輻射について量子纏れの観点からの解析を行う。

量子場の理論におけるガウス状態に対しては、部分系 A を調和振動子の正準演算子のセットで与えたときに、その純粋化パートナーである部分系 B を指定する演算子を求める公式を構築することが具体的にでき、それは場の 2 点関数を用いて表されることがトレビソン-山口-堀田によって示された。この公式から A とその純粋化パートナー B は一般には空間的な重なりを持ち、空間的に離れたパートナーは特殊な例であることがわかる。Hawking 輻射の純粋化パートナーとしてこれまで求められていたものは、空間的に離れたパートナーであったため、空間的に重なりをもった純粋化パートナーから情報損失問題に新たな知見が得られる可能性がある。また本論文では、ウィルチェックが用いたブラックホールが Hawking 輻射を放出する過程を模した動的鏡模型による Hawking 輻射の純粋化パートナーについても考察した。