

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	中山 泰晶
論文題目	The Petz (lite) recovery map for scrambling channel (スクランプリングなチャンネルに対するペッツ(ライト)復元写像)		
(論文内容の要旨)			
<p>ブラックホールの情報損失問題は、重力の量子論を構築する上での試金石としての役割を持っている。近年発見された、いわゆるアイランド則は、ブラックホールの情報損失問題を解決するための経験的方法の一部として知られている。特に、アイランド則の AdS/CFT 対応に基づくホログラフィックな導出と、重力側のワームホールによる導出の観点からは、ブラックホールの内部の量子情報がホーキング放射を通してアイランド領域から抽出できることを示唆している。このような背景において、本論文では、ホーキング放射からブラックホールの情報を復元するための操作手順を主題としている。</p> <p>Hayden と Preskill は、ブラックホールのダイナミクスをランダム行列とみなして、ブラックホールに投げ込まれた量子状態の復号に成功する条件を研究した。Chandrasekaran と Levine は、AdS/CFT 対応の低次元トイモデルである SYK モデルという別のカオス系における Hayden-Preskill 復号プロトコルを研究した。この 2 つのモデルは量子誤り訂正の理論的枠組みの観点からも見ることができ、Knill-Laflamme 条件を満たす場合の量子ノイズチャンネルに対する一般的な回復写像として Petz 回復写像を構成することができる。本論文では、蒸発するブラックホールに対する Hayden-Preskill セットアップや、SYK モデルなどのカオス系における Petz 回復写像の性質を探究している。これらの系は、ブラックホール上で情報のかき混ぜが非常に速いというスクランプリングと呼ばれる現象を示す系であるので、回復写像 R の表現が著しく単純化され、物理的ヒルベルト空間に埋め込まれた符号部分空間における状態の時間発展を定義する元の写像 N の随伴写像だけで与えられることが期待される。</p> <p>本論文では、この簡素化現象を 2 つの例で確認することで、情報回復のプロトコルについての理解を深めることを目的とした研究を行なった。一つ目は、Haar ランダムユニタリーによって記述される Hayden-Preskill セットアップである。元々の状態と、復号された状態の間の距離としての相対エントロピー $S(R[N[\rho] \rho])$ を計算し、長時間のホーキング放射が起こっていわゆるデカップリングが実現されたときに、S の値が消滅することを示す。さらに、スクランプリングの性質により簡略化された回復写像が、Yoshida と Kitaev によって提案されたプロトコルと等価であることを示す。2 つ目の例は SYK モデルであり、2 次元コード部分空間はフェルミオン演算子の挿入によって定義され、システムは SYK ハミルトニアンによって時間発展する。時間発展する密度行列の多様な行列要素を計算により関連付けることにより、情報回復現象を確認する。特に、典型的には、スクランブル時間の 2 倍の時間が経つと、もともとの入力とした密度行列の要素とは S の小さな誤差で、回復された密度行列が一致することを示す。</p> <p>本論文では、アイランド則、Hayden-Preskill 復号プロトコル、量子誤り訂正、SYK モデル、SYK モデルにおけるレプリカトリック計算など、上記の現象を理解するための基本的なツールのレビュー並びに動機についても記述されている。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

ホーキングによると、ブラックホールは温度を持ち、ホーキング輻射により質量を損失する。古典ブラックホール時空の周りで場の量子論を用いると、ホーキング輻射という熱的な輻射が存在することが示されてしまい、エネルギー保存から、ブラックホールは質量を失っていく。このときに、熱的な輻射は情報を持ち得ず、一方でブラックホールのエントロピーはその地平面の面積に比例する形で考えられること、の両立が、確率保存の考え方と矛盾する。これがホーキングによる情報損失の問題である。

量子情報理論の仮想的セットアップとして、ブラックホールに落ちていく物質の情報がブラックホールによりかき混ぜられて、輻射として出てくるときには乱雑になってしまい、ほぼ熱的に見える、という解釈が、矛盾の解消にあたりと考えられ、HaydenとPreskillの情報復号プロトコルは、ほぼ熱的なホーキング輻射から、どのように、ブラックホールに落ちていった物質の情報を復元するか、ということについての条件を与えている。ただ、このプロトコルは純粋に量子情報理論に基づいており、ブラックホールという曲がった時空の描像はそこにはない。

本論文はこの課題について、具体的なSYK模型と呼ばれる物理模型を用いて、時空の描像へと繋げる基礎を作った論文である。

SYK模型は、弦理論に基づいたAdS/CFT対応における、具体的な物理模型として盛んに研究されている。重力側ではJT重力理論に対応することが知られている。本論文ではこのSYK模型を用いて、ブラックホールに落ちていく物質のヒルベルト空間をコード部分空間として記述し、Hayden-Preskillの仮想量子情報セットアップをSYK模型に翻訳することで、具体的な物理模型で情報の復号を議論している。

このように、抽象的な量子情報のセットアップに物理学の具体性を与え、将来の研究において重力の描像へと繋げうるような基盤を築いているのが、本論文であり、物理学における重要な貢献である。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、2024年1月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 2024年 4月 1日以降