

立教大学学術推進特別重点資金(立教SFR)
大学院学生研究
2024年度研究成果報告書

研究科名	立教大学大学院	理学研究科	物理学専攻
研究代表者 (2025年3月現在 のものを記入)	在籍課程・学年	氏名	
	<input type="checkbox"/> 博士前期課程 年 <input checked="" type="checkbox"/> 博士後期課程 1年	堀越 啓吾	
指導教員	所属部局・職名	氏名	
	理学部・准教授	宇賀神知紀	
自然・人文・社会の別	<input type="checkbox"/> 自然 ・ 人文 ・ 社会	個人・共同の別	<input type="checkbox"/> 個人 ・ 共同 名
研究課題	ランダム行列を用いたブラックホール内部と Hawking 輻射の関係性の研究		
研究組織 (研究代表者 ・共同研究者) ※2025年3月現在 のものを記入	在籍研究科・専攻・課程・学年	氏名	
	立教大学大学院 理学研究科物理学専攻 博士後期課程1年	堀越 啓吾	
研究期間	2024 年度		
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 250,000円 / (採択金額) 250,000円		

研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフ等は使用しないこと。)
当該研究の研究目的を含むこと。 本研究では蒸発するブラックホール(BH)のエントロピーの振る舞いが量子論における情報の保存を破るという BH 情報喪失問題の理解に向けて以下の2つの研究を行った。 1つ目は表題に掲げた研究課題であり、BH 蒸発の際に放出される Hawking 輻射の非摂動効果に注目した。輻射の定量的な記述に関する BH の体積の解析にランダム行列を用いることでBH以外の時空からの寄与(非摂動効果)の解析を検討した。 2つ目は境界共形場理論を用いた 3450 模型におけるエンタングルメントエントロピーの計算を試み、またこの共形場理論(CFT)の重力双対が反ド・ジッター時空(AdS)におけるBHに与える示唆を考えた。
キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)
[ブラックホール] [量子重力理論] [AdS/CFT]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

以下の視点を含めて記載のこと。

- ・当該研究は何をどこまで明らかにできたのか(できなかったのか)。
- ・何をもちて研究成果(経過)を達成できた(できなかった)と考えられるのか。
自身が設定した研究目的・目標に照らして、その根拠がわかるよう記載のこと。

背景

現代の物理学における大きな目標の一つが、重力の量子論を構築することである。しかし、この理論を構築する困難の一つとして、Hawking の提唱したブラックホール(BH) 情報喪失問題が立ちはだかっている。この BH 情報喪失問題とは、BH が Hawking 輻射によって蒸発する際、内部の情報量を定量化するエントロピーの振る舞いが量子論における情報の保存を破る問題である。量子論の観点からは、蒸発とともに Hawking 輻射の自由度が増え輻射のエントロピーも増加する。一方、重力の古典論である一般相対論からの計算では BH 内部の自由度が事象の地平面の面積に比例する。この観点からは、BH の情報は蒸発に際して輻射とともに喪失される。重力を量子化するために、この問題は回避されるべきなので、現在でも活発な研究が行われている。

近年、重力理論の古典解と、その境界にある重力を含まない場の理論との双対性を記述するホログラフィー理論から、アイランド公式と呼ばれる上記のようなエントロピーの振る舞いを得る公式が提案された。BH 情報喪失問題におけるエントロピーの振る舞いを説明する際に有用である一方で、アイランド公式の物理的な意味は完全には理解されていない。

この BH 情報喪失問題の理解のために、上述したように Hawking 輻射の非摂動効果に注目したものと境界共形場理論を用いたエンタングルメントエントロピーの計算に注目したものと 2 つの研究を行った。

研究 1 ランダム行列を用いたブラックホール内部と Hawking 輻射の関係性

本研究では、2次元の重力理論である Jackiw-Teitelboim 重力理論(JT 重力)のもとにおいてブラックホール内部の体積、すなわち長さの計算手法としてランダム行列を用いるものを調べた。先行研究(arXiv:2403.08696)に基づき、ブラックホール内部を見る際に有効であると考えられる、非摂動的な効果を加味した JT 重力のバルク Hilbert 空間の構成を行った。特に、バルクの演算子の取り扱いを摂動的な理論から修正し、状態どうしの内積を直交する部分(摂動論)にオーバーラップを加えることで定義した。この定義のもとでバルクの長さ演算子を、指数関数を用いて定義していた先行研究(arXiv:2107.06286)とは異なり、その指数関数の演算子の対数を取る方法で定義した。これによって Two-sided ブラックホールを結ぶワームホールの長さの時間発展とその速度の確率分布を追った。長さの時間発展ははじめは線形に増加し、後期には一定となるので、速度の期待値は後期にはゼロになる。一方、速度の確率分布は $1/2$ の確率で負となることがわかった。BH に落下した観測者がファイアウォールに出会う確率の代替指標として縮むワームホールの検出が使われることがあり、この視点からは BH の時間発展の後期においてファイアウォールに出会う確率は $1/2$ であることが示唆されることがわかった。

以上のように先行研究を参照することで純粋な JT 重力における BH 内部の長さの計算手法を構成できた。今後は、先行研究で注目されていた BH 内部の長さを計算する際に物質場を結合し、その長さから BH 内部の自由度の数の時間発展を追う方法を検討する。この自由度の数がエントロピーの振る舞いと関わるので、蒸発に際して与える効果を考えていく。

研究 2 境界共形場理論(BCFT)を用いた 3450 模型におけるエンタングルメントエントロピー(EE)の計算

本研究では、2次元フェルミオン散乱のトイモデルである 3450 模型における散乱終状態としてのツイスト状態を用い、EE の計算を試みた。ここでの散乱の解析には BCFT を用いることができる。EE の計算にはレプリカ法を用いるため、この手法によりエントロピーの評価は 2 点関数の計算に還元される。したがって、3450 模型において EE を計算するために、散乱で現れるツイスト状態の 2 点関数を、BCFT を通じて計算することが本研究の中心課題である。

準備段階として、通常の共形場理論(CFT)を用いて、フェルミオンをボソン化した理論における頂点演算子の 2 点関数の計算手法を確認した。

この研究についての現状を第 70 回原子核三者若手夏の学校にてポスター発表[1]として報告し、議論を行った。

研究成果の概要 (つづき)

また、3450 模型における散乱問題に関連する境界条件を考慮するため、先行研究 (arXiv:1008.3439) での境界状態を用いた計算を調査した。この先行研究では、量子クエンチと呼ばれる瞬間的なエネルギー励起を用いて EE を評価しており、BCFT を活用して 2 点関数を具体的に計算している。また、計算で現れるテータ関数などの取り扱いを学んだ。

これらの理論的枠組みを参考に、3450 模型におけるツイスト状態の構成を行った。今後はこのツイスト状態の 2 点関数を計算し、EE の具体的な計算を進めていく。

一方、この CFT における重力双対について、その境界が反ド・ジッター時空にあるブレーンであると考えられており、今後は CFT における 2 点関数のこの時空での解釈から BH への効果を検討していく。

研究発表 (研究によって得られた研究成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。なお、成果発表を確認できる資料を合わせて研究成果報告書提出フォームより提出してください(紙媒体等、研究成果報告書提出フォームから提出できない場合は、別途リサーチ・イニシアティブセンターへ提出してください)。

- ①雑誌論文(著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書(著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催(会名、開催日、開催場所)
- ④その他(学会発表、研究報告書の印刷等)

※修士論文・博士論文は含みません。

① 雑誌論文(著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)

なし

② 図書(著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)

なし

③ シンポジウム・公開講演会等の開催(会名、開催日、開催場所)

なし

④ その他(学会発表、研究報告書の印刷等)

国内会議における発表

[1] 堀越啓吾「フェルミオン・単極子散乱と境界共形場理論」、第70回原子核三者若手夏の学校、2024年8月(ポスター発表、査読なし)