

令和元年6月4日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05311

研究課題名(和文) ブラックホールの量子情報物理学的研究

研究課題名(英文) Research of quantum information physics on black holes

研究代表者

堀田 昌寛 (Masahiro, Hotta)

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：60261541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホール蒸発過程における情報喪失問題に切り込む研究を量子情報物理学の観点から実施した。ブラックホールとホーキング輻射の間の量子もつれの時間発展は未だ解かれていない重要な問題である。蒸発後期において地平面面積に比例するベッケンシュタイン-ホーキング(BH)エントロピーとブラックホール熱力学エントロピーとエンタングルメントエントロピーの3つが一致するという仮定が有力だったが、蒸発ブラックホールと同じ熱的性質をもつ量子ビットモデルの構築に成功し、上記の3つのエントロピーは全て異なることを示した。特にBHエントロピーよりもエンタングルメントエントロピーははるかに大きな値をとることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学は現代社会の技術における重要な基礎を与えているが、その全体像に理解はなされていない。特に、未だ完成されていない重力や曲がった時空の量子効果を記述する量子重力理論には大きな注目が集まっている。その構築の指導原理を探る対象として、強重力を伴うブラックホールの蒸発過程は長く多くの研究者によって探求されてきた。この過程では量子力学の基礎的性質であるユニタリー性が破れる可能性があり、これまでの量子力学の定式化を大きく変更する必要がある。その過程においてブラックホールとホーキング輻射の量子情報物理学的研究は重要である。我々の研究成果によって今後量子力学の新しい側面がより明らかになるだろう。

研究成果の概要(英文)：We propose a model with multiple qubits that reproduces the thermal properties of 4-dimensional (4-dim) Schwarzschild black holes (BHs) by simultaneously taking account of the emission of Hawking particles and the zero-energy soft hair evaporation at horizon. The results verify that the entanglement entropy between a qubit and other subsystems, including emitted radiation, is much larger than the BH entropy analogue of the qubit, as opposed to the Page curve prediction. Our result suggests that early Hawking radiation is entangled with soft hair, and that late Hawking radiation can be highly entangled with the degrees of freedom of BH, avoiding the emergence of a firewall at the horizon.

研究分野：量子情報物理学

キーワード：ブラックホール 量子情報 量子もつれ エンタングルメント

1. 研究開始当初の背景

ホーキング輻射を出すことにより、ブラックホール(以下BH)は質量を失いつつ蒸発することが知られているが、その最終状態は未だに不明のままである。BHが何も残さず完全に蒸発する可能性を初め、特異点からミニ量子宇宙生成が起きる可能性やプランク質量程度の無限縮退をもつ残留物(レムナント)になる可能性などが多くの研究者によってこれまで議論されてきた。これらの最終状態の様々なアイデアは、いわゆる情報喪失問題を解決する仕掛けとともに提案されたものである。1976年にホーキング自身によって情報喪失問題として指摘されたように、初期時刻に量子的純粋状態にあったBHの蒸発過程において量子力学そのものが大きく修正を受ける可能性がある。もしBHが熱的混合状態で記述されるホーキング輻射だけを残して完全蒸発するならば、量子力学の基本的性質であるユニタリ性を満たさないことになる。量子情報理論の見地から言うと、混合状態にあるホーキング輻射系と組むことによって合成系が純粋状態になる他の量子系(量子もつれパートナー系)がどこにも存在しないことになり、初期純粋状態中に含まれていた量子情報の一部が完全に失われることを意味する。逆に蒸発過程においてユニタリ性が壊れることがないならば、なんらかのパートナー系が存在する必要がある。そのあり得る物理系の候補として、先のミニ量子宇宙やプランク質量の残留物等が提案されている。これらの中でも蒸発後にはホーキング輻射自身が全体として混合状態ではなく純粋状態になる可能性が近年注目されている。初期に放出された熱的ホーキング輻射の量子もつれパートナーは蒸発後半に放出された輻射そのものであることが可能性としてある。輻射全体では純粋状態であるが初期の輻射だけに注目すると、その縮約された混合状態がホーキングの計算によって示された熱的なものに精度よく一致しているというシナリオである。1993年にペイジはこのシナリオにおいて、ユニタリ性を保ちながらホーキング輻射によってBHから量子情報がどのように解放されるかを示すペイジ曲線仮説を提案した。彼はBHと輻射のそれぞれのヒルベルト空間の有効次元を有限だと仮定し、さらに時間とともにそれが変化する設定を考え、BHと輻射の間のエンタングルメントエントロピー(以下EE)を考察した。そしてEEは各時刻で小さいほうの系の熱的エントロピーに一致するという仮定を導入した。初期時刻には純粋状態にあるBHだけが存在するため、EEは零である。時間とともにBHは蒸発して、その熱的エントロピーと同定されるベッケンシュタイン-ホーキングエントロピー $A/(4G)$ は減少し、ホーキング輻射の熱的エントロピーは増加する。シュワルツシルトBHの場合、質量が元の約7割にまでに減少したときに、この2つの熱的エントロピーは一致する。このときの時刻はペイジ時刻と呼ばれ、またペイジ時刻以降のBHは年寄りBH(old black hole)と呼ばれる。ペイジ曲線仮説においてEEはペイジ時刻の前までは輻射の熱的エントロピーに一致し、単調増加する。ペイジ時刻以降ではEEは $A/(4G)$ に一致しながら単調減少し、BHの完全蒸発の時刻でEEは再び零になる。ペイジ時刻ではBH質量はまだ天体物理学的なオーダーであるため、地表面上での時空曲率もプランクスケールに比べて圧倒的に小さいままである。従って素朴には量子重力の効果がまだ働かない時期とも考えられる。しかしEEのペイジ曲線を再現するには、非局所的な量子重力効果が地平面領域に強く働く必要があるため、超弦理論等の検証に天体スケールのBHが役立つ可能性を示唆しており、多くの研究者の関心を惹いている。このような関心からBH相補性仮説も提案された。無限遠方の観測者にとっては地表面上に量子的な膜が形成されて、崩落物質の情報が記録され、そこからホーキング輻射がその情報を持ち出してくることで、BH蒸発がユニタリ性を満たす可能性である。また量子重力の効果で実際にはBHは地平面も特異点もない単なる星になるというファジボール仮説や、地表面上にプランクスケールの“火の壁”が生じ、そしてBHの内部空間はないとするBHファ

イアウォール仮説等も、このページ曲線や量子もつれのモノガミー性に関する量子情報的議論の系統から提案されている。一方これらのシナリオには一般相対論分野から厳しい批判も出ている。例えばBHの事象の地平面は重力崩壊の過去から未来まで含む時空の全体構造が決まった後で初めて定まるものであり、地平面近傍は平坦なミンコフスキー空間でのリンドラー地平面近傍と質的に変わったものではない。そこに物理的な火の壁が発生する量子重力効果が強く働く必然性が全くない。またファジボールのように重力崩壊において束縛曲面としての地平面すら形成されないためには、地平面が通常形成される領域に崩落物質を跳ね返すほどの強い圧力が量子重力によって発生する必要がある、この不自然さも短期的にすらBHが形成されないシナリオの妥当性に疑問を投げかけている。このような背景のもと、ユニタリ性を保ちつつ、量子重力はBHの最終爆発時にだけ影響を与えるという従来の一般相対論分野での期待とも整合するシナリオを、ウンルーとシュツホルトとともに本研究遂行者は提唱して最近注目を集めている。このシナリオでは、情報書き込みにエネルギーを必要としない零点振動がホーキング輻射のパートナー系となり、BH最終爆発時に無限遠方に向かうこの零点振動流によってBHに蓄えられていた情報が解放される。ただ現時点ではまだ重力場の効果が十分に解析されていない。

2. 研究の目的

ブラックホールの情報喪失問題及びそのエントロピーの起源の問題を量子情報理論の立場から解析し、その普遍的な解決の糸口を見出す。ブラックホール相補性、ファジボール、ファイアウォールのシナリオの背景にあるページ曲線仮説を量子情報理論及び量子統計力学的見地から批判的に再検証し、あり得る修正を提案しつつ、一般相対論のこれまでの知見とも整合するシナリオを提示、深化させる。またホーキング輻射の量子もつれパートナー系がエネルギーを必要としない量子場の零点振動流であるシナリオを精密化する。ブラックホールエントロピーの起源の候補である、地平面近傍の漸近的対称性で生成されたマイクロ状態の解析を行い、ベッケンシュタイン-ホーキングエントロピー $A/(4G)$ を再現できるかを検証する。

3. 研究の方法

ページ曲線仮説における年寄りBHの熱的エントロピーがBHとホーキング輻射の間のエンタングルメントエントロピーの上限であるという主張を、BHを多量子ビットで近似する離散的モデルを用いて研究する。ホーキング粒子の量子もつれパートナーがエネルギーを持たない量子場の零点振動流である可能性を、バイジャ計量等を使って重力崩壊系において検証する。漸近的平坦な時空やAdS空間の境界における量子場の零点振動が担う量子情報の構造を解析して、情報喪失問題を考察する。BHエントロピーの起源の問題に対して地平面の漸近的対称性が生成するマイクロ状態を解析する。また測定エネルギーコストの反作用を解析して量子情報理論的宇宙検閲仮説の検証を進める。量子エネルギーテレポーテーションを包含するBHの量子情報熱力学の構築も試みる。

4. 研究成果

2016年度

ブラックホールは少なくとも古典的には、質量、電荷、角運動量の3つの量だけでその時空は特徴づけられる。これらの量は「毛」と表現されるが、一方この少なさが、ブラックホールが持つ膨大な量のエントロピーとの間に矛盾があるように思われてきた。質量が大きいほどエントロピーは増加するので、質量無限大極限で、この問題は先鋭化している。一方この極限で、事象の地平面近傍領域の時、空曲率は零に近づき、平坦なミンコフスキー時空で記述可能となる。地平面は、平坦時空を一様加速度運動する観測者に対するリンドラー平面へと写像される。この場合、その総和が無限大量のエントロピーになるミクロな物理状態の存在はこれまで謎とされてきた。[1]の論文では、この問題に対する説得力のある仮説を提示し、その詳細な解析を行った。一般相対論の一般座標変換の一部はリンドラー地平面近傍ではゲージ自由度から物理的自由度を創発することが示された。異なる多数の物理的状态が出現し、ソフトヘアと呼ばれる電荷量で区別することができる。この状態が質量無限大極限でのブラックホールエントロピーの起源になっていると考えることができる。この電荷は地平面を通過する波の情報を重力的に記憶する機能を持つが、純粋な重力波の情報は蓄えられないことも示された。この性質は重要であり、自由度を量子化したときに生じる量子複製不可能定理に関するパラドクスを解決する鍵になっている。

2017年度

ブラックホール蒸発におけるブラックホールとホーキング輻射の間の量子もつれの時間発展について研究を行った。ホーキング輻射の温度とブラックホールのエネルギーと関係式を再現する、量子ビットモデルを具体的に構築し、エンタングルメントエントロピーが熱的エントロピーやベッケンシュタイン-ホーキングエントロピーよりもはるかに大きいことが分かった。量子もつれの時間発展に対しては、広く支持されてきたページ曲線と呼ばれる仮説があったが、その予想を覆す結果であり、その論文はPhysical Review Lettersに受理された。蒸発するブラックホールは輻射でエネルギーを失うと、その温度が上がる負の比熱という特徴があったが、これを重力場に特有な零エネルギー励起であるソフトヘアの蒸発を解析に採り入れたことで再現できた。熱輻射を出すセクターとブラックホールの部分系が欠落した真空セクターの2つが現れるため、系の熱的エントロピーは地平面面積に比例するベッケンシュタイン-ホーキングエントロピーより大きくなり、また真空状態とのもつれの寄与からエンタングルメントエントロピーは熱的エントロピーより更に大きくなった。またブラックホールなどの曲がった時空における量子情報物理学の理解を深める実験の理論的サポートも起こっている。量子ホール系のエッジ電流を用いて本研究者が提案している曲がった時空上での量子エネルギーテレポーテーションを実装する予備実験として、基盤上を運動するエッジ電流励起の透過、反射を制御する実験論文に参加し、Applied Physics Lettersに受理された。

2018年度

ブラックホール蒸発において、ホーキング輻射とブラックホール間の量子もつれの時間発展は、これまで明確な理解がなされていなかった。有力な仮説としては「ページ曲線仮説」が提案されている。蒸発後期には、地平線面積に比例するベッケンシュタイン-ホーキング(BH)エントロピーと、ブラックホールの熱力学的エントロピーと、エンタングルメントエントロピーが高い精度で一致するという内容である。これに対して、本研究遂行者である堀田を第一著者とする論文(Phys. Rev. Lett. 120, 181301 (2018).)では、この仮説が成り立たない可能性を指摘した。蒸発をするブラックホールから出るホーキング輻射と同じ熱的性質を示す量子ビット多体モデルの構築に成功し、そのモデルでページ曲線仮説に出てくる3つのエントロピーは互いに大きく異なる

値をとることを示した。特に量子もつれ指標であるエンタングルメントエントロピーはBHエントロピーよりはるかに大きな値をとれるため、これまで議論されてきたブラックホール防火壁パラドクスなどを根本から見直す必要性がでてきた。ブラックホール蒸発がユニタリー性を満たしつつ、熱輻射だけが空間に残される場合、無限遠方に伝搬するそのホーキング粒子間の相互作用も小さくなるため、自由場のホーキング粒子の純粋化パートナーの研究はブラックホール情報喪失問題において重要である。我々はこれに対して任意のホーキング粒子モードを固定したときのパートナー粒子モードを求める一般公式を構築することに成功した (Prog. Theo. Exp. Phys., Issue 10 (2018); J. Phys. A: Math. Theor. 52 125402 (2019))。これはどのように初期の重力崩壊の詳細情報がホーキング粒子とパートナーに記憶されるのかという問題に対して大きな示唆を与える。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- [1] *Spatially Overlapped partners in Quantum Field Theory*,
J. Trevison, K. Yamaguchi, and M. Hotta, *J. Phys. A: Math. Theor.* **52** 125402 (2019). 査読有。
- [2] *Quantum information capsules and information delocalization by entanglement in multiple-qubit systems*, K. Yamaguchi, N. Watamura, and M. Hotta, *Physics Letters A* **383** (2019) 1255-1259 (2019). 査読有。
- [3] *Pure state entanglement harvesting in quantum field theory*,
J. Trevison, K. Yamaguchi and M. Hotta, *Prog. Theo. Exp. Phys.*, Issue 10 (2018). 査読有。
- [4] *Soft-hair-enhanced entanglement beyond Page curves in a black-hole evaporation qubit model*,
査読有。
M. Hotta, Y. Nambu and K. Yamaguchi, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 181301 (2018).
- [5] *Transmission and reflection of charge density waves in a quantum hall edge controlled by a metal gate*, M. Matsuura, T. Mano, T. Noda, N. Shibata, M. Hotta and G. Yusa, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 063104 (2018). 査読有。
- [6] *Gravitational memory charges of supertranslation and superrotation on Rindler horizons*,
M. Hotta, J. Trevison and K. Yamaguchi, *Phys. Rev D* **94**, 083001 (2016). 査読有。

〔学会発表〕(計 5 件)

- [1] Masahiro Hotta, “*Soft-hair-enhanced entanglement beyond Page curves in a black-hole evaporation qubit model*”, The 12th Relativistic Quantum Information Workshop,
Customs House in Brisbane, Australia, February 20-February 22, 2019.
- [2] Masahiro Hotta, “*Soft-hair-enhanced entanglement beyond Page curves in a black-hole evaporation qubit model*”, The Relativistic Quantum Information Workshop 2018, University of Seoul, Korea, July 16-July 20, 2018.

- [3] Masahiro Hotta, “*Entanglement beyond Page curves in a black-hole evaporation qubit model*”, Third International LeCosPa Symposium Cosmic Prospects, National Taiwan University, Taiwan, November 27- November 29, 2017.
- [4] 堀田昌寛, 物性若手夏の学校(志賀高原)講師(2016年7月29日—2016年8月1日)
- [5] Masahiro Hotta, “*Gravitational memory charges of supertranslation and superrotation on Rindler horizons*”, Relativistic Quantum Information North 2016, IQC, University of Waterloo, Canada, June 21-June 24, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者
研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者
なし。
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：