

平成 30 年 5 月 7 日

報道機関 各位

東北大学大学院理学研究科

ブラックホールにおける量子もつれが 既知の“限界”より強い可能性を明らかに ホーキング博士の議論の穴を発見

【発表のポイント】

- 量子ビット^(注1)を用いた模型の理論的解析により、ブラックホールの熱的エントロピー^(注2)の導入に用いられてきたホーキング博士の考え方に穴がある可能性を指摘した。
- 量子もつれ^(注3)に関する予想の不十分な点を見出し、ブラックホールにおいてこれまで考えられていた上限を超える強い量子もつれが存在しうると示した。
- この模型の解析を通して、ブラックホールが極めて高温な防火壁で覆われているという仮説が論理的必然でないことを明らかにした。

【概要】

東北大学大学院理学研究科の堀田昌寛助教、山口幸司(博士課程前期 2 年)は、名古屋大学理学研究科の南部保貞准教授と共同で、ブラックホールから輻射が出る過程を模倣した量子ビット模型を提案し、その性質の理論的研究を通して、ブラックホールがこれまで考えられていた“限界”よりも強い量子的なもつれを共有できる可能性を見出しました。

ブラックホールは現代物理学の課題のひとつである量子重力理論の完成に向けて重要となることが強く期待される研究対象のひとつです。ホーキング博士によって導入されたベッケンシュタイン・ホーキングエントロピーはブラックホールの熱的なエントロピーであると考えられており、それが量子もつれの強さの上限を与えると信じられてきました。堀田助教らは量子ビット模型を用いてこの議論の不十分な点を見出し、これまでの理論的予想が、ある種のブラックホールに対しては成り立たない可能性を指摘しました。この量子ビット模型はブラックホールの熱的な性質を再現するものになっており、そこでは零エネルギーの輻射^(注4)が重要な役割を果たし

ます。この零エネルギーの輻射が量子もつれを共有できることから、ブラックホールが極めて高温な防火壁で覆われているという仮説が論理的必然でないことを明らかにしました。

本研究の成果は、米国物理学会誌 *Physical Review Letters* に 2018 年 5 月 4 日 (米国東部時間) オンライン版に公開されました。

【詳細な説明】

ブラックホールは曲がった時空構造のひとつであるが、熱的性質を持つことが様々な解析から予言されていました。例えば 1975 年のケンブリッジ大学のスティーヴン・ホーキング博士の研究では、ブラックホールはホーキング輻射と呼ばれる熱的な輻射を出すことが明らかになり、この輻射の温度がブラックホールの温度であることを仮定してブラックホールのエントロピーが導入されました。これはベッケンシュタイン・ホーキングエントロピーと呼ばれ、ブラックホールの熱的エントロピーであるところまで考えられてきました。

現代物理学における課題のひとつは量子重力理論が未完成であることであり、それを解決するためには、極めて強力な重力源であるブラックホールにおいてその量子的な性質を明らかにすることが重要となる可能性が高いと考えられます。ブラックホールが輻射を出しながら消失する過程においてはブラックホールを構成する物質の量子的な情報が失われる可能性が指摘されていますが、これは情報喪失問題とよばれます。これは、量子論の基本的な原理に従えば、情報は必ずどこかに保持されるはずだからです。量子重力理論の完成に向けてこの情報喪失問題を解決することが重要だと考えられ、盛んな研究が行われています。

このような量子的性質を調べるためのひとつの便利なツールが、ある種の量子的な相関(量子もつれ)を定量化するエンタングルメントエントロピーであり、情報喪失問題はこのエンタングルメントエントロピーから理解することもできます。普通の物理系では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も小さいのですが、ブラックホールが輻射を出しながら完全に消失する過程の後半においてはその二つが一致することがアルバータ大学のドン・ペイジ教授によって 1993 年に予想されていました。上述のホーキング博士の議論と合わせて、ブラックホールが輻射を出す過程の後半ではエンタングルメントエントロピーはベッケンシュタイン・ホーキングエントロピーとも一致すると予想されていました。

東北大学大学院理学研究科の堀田昌寛助教、山口幸司(博士課程前期 2 年)は、名古屋大学理学研究科の南部保貞准教授と共同で、ブラックホールから輻射が出る過程を模倣した量子ビットモデルを提案して、その性質の理論的研究を行いました。この系において導入可能な三種のエントロピーの比較を行った結果、これら

は一致せず、エンタングルメントエントロピー、熱的エントロピー、ベッケンシュタイン・ホーキングエントロピーの順に大きいことが示されました。特に、エンタングルメントエントロピーがこれまで考えられていた上限値であるベッケンシュタイン・ホーキングエントロピーよりも大きい、すなわち既知の“限界”よりも強い量子もつれが存在することが明らかになりました。このモデルは、実際のブラックホールそのものを直接的に記述するものではないものの、ベッケンシュタイン・ホーキングエントロピーを導入する際のホーキング博士の議論と同様な状況設定を考えています。このことから、実際のブラックホールにおいても上述の先行研究の予想が必ずしも正しくない可能性が示唆されます。

我々の住む 4 次元時空の球対称なブラックホールはエネルギーが外へ持ち出されると温度が高くなる、つまり比熱が負であるという注目すべき性質がありますが、その物理的な起源は明確にはわかっていません。この研究で提案された量子ビットモデルはこのブラックホールと同じ熱力学的な性質を持ちます。このモデルにおける負の比熱の起源はエネルギー零の輻射である(図 1)ため、将来的に実際のブラックホールにおける同様の輻射の役割を調べることでブラックホールの熱的性質の理解が進むかもしれません(図 2)。更に零エネルギーの輻射がホーキング輻射と強い量子もつれを共有することが可能となることから、ブラックホールが極めて高温な防火壁で覆われているという仮説が論理的必然ではないことも明らかにしました。

近年、ブラックホールにおける零エネルギーの輻射への関心が高まっています。元々、2001 年に本研究の著者のひとりである堀田助教が当時東北大学大学院生であった佐々木健一氏、佐々木高洋氏と共同で発表した論文中で指摘されていたブラックホール地平面上の零エネルギーマイクロ状態が、ホーキング博士、ケンブリッジ大学のマルコム・ペリー教授、ハーバード大学のアンドリュー・ストロミンジャー教授によって 2016 年に再発見され、ブラックホールが収縮するにつれてそのマイクロ状態が零エネルギーの輻射と転化する可能性が論じられました。更に、彼らはこの零エネルギーの輻射こそが情報喪失問題を解決するキーポイントとなると予想したため、現在様々な研究が進められております。本研究はこのような零エネルギーの輻射がブラックホールにおいて熱統計力学的、情報理論的に重要な役割を果たす可能性を指摘したものであるということも出来ます。

【論文情報】

雑誌名： Physical Review Letters 誌 5 月 4 日号に掲載

論文タイトル： Soft-hair-enhanced entanglement beyond Page curves in the black hole evaporation qubit model

著者： Masahiro Hotta, Yasusada Nambu, and Koji Yamaguchi

DOI 番号 : <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.181301>

URL :

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.181301>

【参考図】

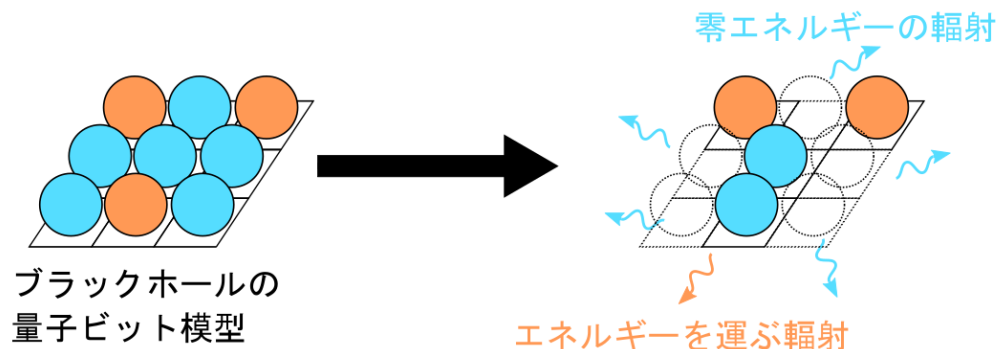


図1:ブラックホールから輻射が出る過程を模倣する量子ビット模型の模式図。図中の球はそれぞれ量子ビットを表し、色の違いはエネルギーの違いを表す。高いエネルギーにある量子ビット(オレンジ色)はエネルギーを外に放出することで零エネルギーの状態(青色)になる。零エネルギーの量子ビットは零エネルギーの輻射に崩壊していく。後者の過程が十分多く起こるとき、高いエネルギーにある量子ビットの割合が大きくなっていくため、エネルギーが外に持ち出されるにもかかわらず量子ビット系の温度は高くなっていく。

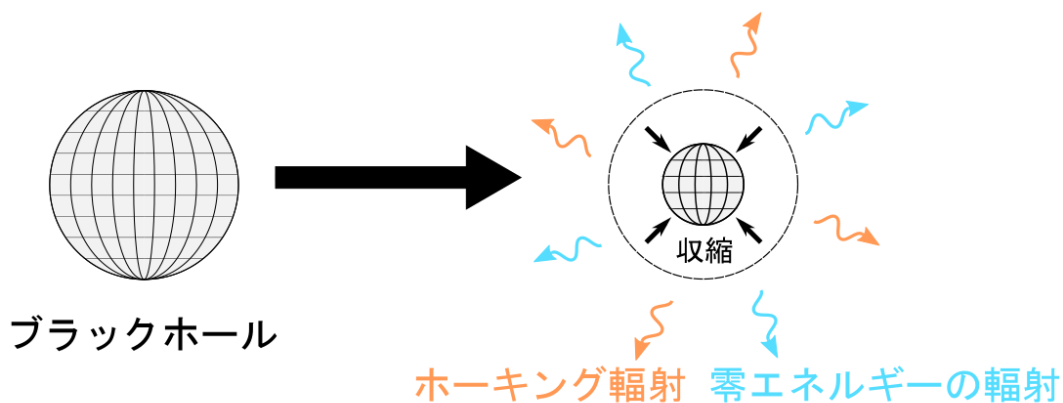


図2:ブラックホールが輻射を出しながら消失していく過程の模式図。ブラックホールはホーキング輻射を放出しながらエネルギーを失い収縮していく。近年の研究から、零エネルギーの輻射も同

時に放出されるだろうと予想されている。

【用語説明】

注1：量子ビット

ふたつの状態しか持たないもっとも簡単な量子系のこと。特に量子情報・量子計算等の分野において、系を構成する最小単位としてしばしば用いられる。

注2：熱的エントロピー

熱統計力学に現れるエントロピーで、系の「乱雑さ」を表すひとつの指標である。

注3：量子もつれ

古典系にはないような非局所相関のこと。量子もつれは量子テレポーテーションなどの興味深い現象のリソースとして利用することが出来るだけでなく、系の様子を特徴づけるものとしても重要である。

注4：零エネルギーの輻射

エネルギーを持たない輻射のこと。重力を記述する理論(一般相対論)が持つ、一般座標変換対称性の一部である超時間推進対称性から導かれる輻射(保存カレント)はソフトヘアと呼ばれるエネルギーを持たない輻射であり、ブラックホールが消失する過程においてこのソフトヘアが重要である可能性が議論されている。

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

東北大学大学院理学研究科物理学専攻

助教 堀田 昌寛 (ほった まさひろ)

電話：022-795-6427

E-mail：hotta@tuhep.phys.tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

東北大学大学院理学研究科

特任助教 高橋 亮 (たかはし りょう)

電話：022-795-5572、022-795-6708

E-mail：sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp