

平成30年6月3日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07445

研究課題名(和文) ブラックホールのエントロピーの二面性の統一とホログラフィの起源の解明

研究課題名(英文) Unification of two aspects of black hole entropy towards the origin of holography

研究代表者

横倉 祐貴 (Yokokura, Yuki)

国立研究開発法人理化学研究所・分野横断型計算科学連携研究チーム・基礎科学特別研究員

研究者番号：50775616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホールのエントロピーはその表面積で与えられ、熱力学エントロピーとネーターチャージの二つの側面をもつ。本研究の目的は、その両者の関係を明確にすることであり、それはホログラフィの起源や情報問題の解明につながるものである。今回、蒸発するブラックホールのself-consistentな解を球対称性という条件だけから構築できた。その解では、ブラックホール内部の物質のエントロピー密度を体積積分すると、エントロピー面積則が再現される。また、量子力学的に、熱力学エントロピーをネーター保存量として定式化できた。これらは上記のブラックホールエントロピーの2つの側面をつなげるものだと期待できる。

研究成果の概要(英文)：Black hole entropy, which is given by the surface area, has two aspects: thermodynamic entropy and Noether charge. This research aims to clarify the relation of the two characterizations, which should lead to understanding of the origin of holography and information problem. We have constructed a self-consistent solution of evaporating black holes under assumption of spherical symmetry. In the solution, integrating entropy density of matter inside the hole reproduces the area law of black hole entropy. We have also formulated thermodynamic entropy as a Noether invariant in quantum mechanical systems. In future, these results should build a bridge between the two aspects of black hole entropy.

研究分野：素粒子論

キーワード：ブラックホール 量子重力 エントロピー 場の理論 情報問題 対称性 熱力学

1. 研究開始当初の背景

ブラックホールは量子効果により真空中で蒸発し、Hawking 温度の熱浴中で平衡になり、その表面積に比例する幾何学的なエントロピーを持つ。そのエントロピーは、ブラックホールを構成する微視的な自由度を表すが、それは重力の効果を含んでいるはずである。従って、ブラックホールエントロピーの起源を明らかにすることは、重力の量子論の適切な自由度を理解するのに役に立つと期待できる。

ブラックホールのエントロピーは熱力学エントロピーとネーター保存量の2つの側面をもつ。前者はブラックホール内部の物質に、後者はブラックホールの表面の幾何学に由来するが、両者の関係は明らかではない。それは、ブラックホールエントロピーのホログラフィ性の起源を理解する鍵になると考えられる。

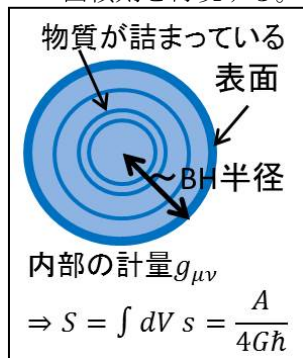
2. 研究の目的

ブラックホールエントロピーの上記の二つの側面の関係を明らかにする。そして、どのようにエントロピー面積則が現れるのかを理解することを目指す。

3. 研究の方法

ブラックホールは物質が崩壊して形成されそして蒸発することに注目すると、ブラックホールエントロピーを物理的に理解するには、時間発展を考慮した時空全体で理解せねばならない。そのために、相補的な二つの手法を使う。

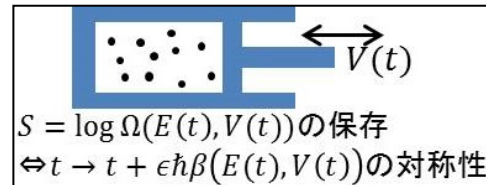
(A) 蒸発するブラックホールの self-consistent モデルに基づく研究。私はこれまで、Hawking 輻射の back reaction も含めた、形成から蒸発に至るモデルを構成してきた。それは、量子力学的なブラックホールはホライズンのない高密度な星であることを示している。特に、熱浴中で可逆的に形成したブラックホールにおいて、内部の物質のエントロピー密度の体積積分がエントロピー面積則を再現する。これは、物質の流れ



を一貫して追うことによって、情報の出入りとホログラフィ性を理解できる可能性を示唆する。本研究では、この解明を目指し、このモデルを場の理論的に詳しく調べる。

(B) ネーター保存量としての熱力学エントロピーに基づく研究。熱力学エントロピーは準断熱過程で保存する。私は、この保存則に

対応する対称性を見つけた。具体的には、ゆっくりと体積が変化する断熱容器内のN粒子古典系を考え、熱力学エントロピー $S = \log \Omega$ は断熱準静過程でのみ保存することに注目し、「配位空間上の軌道が熱力学量の準静的時間発展に対応する条件」を書き下した。これにより、ミクロな運動とマクロな熱力学的振る舞いが結びつく。実際に、その条件を満たす軌道に限った場合にのみ「 $t \rightarrow t + \epsilon \hbar \beta$ (ϵ :無限小パラメータ、 \hbar :プランク定数、 β :時間依存した逆温度)」という時間 t の対称性が現れる。これを量子論的・場の理論的に一般化させ、ネーターチャージとしてのブラックホールエントロピーの物理的な意味を考察する。



4. 研究成果

(1) 蒸発するブラックホールの self-consistent な解を、「conformal matter + 球対称性」という条件だけから構成することに成功した。massless scalar 場の s 波やアイコナル近似などの従来の条件を全て取り除き、より一般的な場の理論的定式化に大きく近づいた。具体的には次の手順で解を構成する。まず、崩壊物質と蒸発の時間発展を同時に扱う球対称性モデルに基づき、候補となる計量を構成する。次に、その計量の上で、保存則と 4D Weyl アノマリーからエネルギー運動量テンソルの期待値を評価する。最後に、半古典的 Einstein 方程式を確認する。この結果は論文として出版されている。

(2) 蒸発するブラックホール内部の時空上で (conformal に限らない) スカラー場の Heisenberg 方程式を解き、そこから直接、エネルギー運動量テンソルの真空期待値を求めることを試みた。つまり、物質場そのものの振る舞いを調べた。解く際には WKB 近似を使い、それによって完全に UV 発散は繰り込めることがわかった。だが、内部の曲率が大きいために、WKB 近似が IR 側で壊れていることが判明した。そこで、全く新しい曲率に関する展開法を開発し、それによって厳密解を求めることに成功した。現在までのところ、leading 解を用いた値はアノマリーと整合的である。また、角度方向の大きな圧力が生じることが再確認できた。以上の結果は現在論文として準備中である。

以上(1)(2)により、蒸発するブラックホールの self-consistent な描像が、(conformal matter に限定せず)球対称性という条件だけ

で、場の理論的な基礎付けができつつある。さらに推し進めることにより、物質の形成から蒸発までの流れ、そして「体積積分 \Rightarrow 面積則」の機構が場の理論的に明らかになるだろう。今回の成果はそのための確実な土台を与えたと言える。

(3) 量子多体系の熱力学エントロピーをネーター保存量として定式化できた。時間依存した外部パラメータをもつ量子多体系を考え、熱的純粋状態の方法を一般化させ、そのユニタリー時間発展を熱力学的状態空間における経路積分として定式化した。その有効作用には、熱力学エントロピーがその正準共役量とともに現れる。そして、外部パラメータがゆっくり変化する場合には、その共役変数の並進対称性が経路積分に出現し、それがエントロピーの期待値の保存則を導く。この対称性は古典のものと同じ形をしている。また、この経路積分の表示は熱力学と量子力学をダイナミクスのレベルで結ぶ基礎となりうるものである。この成果は arXiv:1611.07268 に発表済みで、現在投稿中である。

実は、ブラックホールエントロピーに関する対称性は、物質のエントロピーの対称性と同じ形をしている。また、今回の結果は、完全な量子力学的議論から熱力学的有効作用を導いている。ということは、量子重力の有効理論の対称性がブラックホールのエントロピーを導いている可能性がある。従って、本成果は、対称性の立場から、重力と物質のエントロピーを量子的に統一的に扱う第一歩を与えた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

[1] Hikaru Kawai and Yuki Yokokura, “A Model of Black Hole Evaporation and 4D Weyl Anomaly,” *Universe* 3, 51 (2017). 査読有、DOI:10.3390/universe3020051

[学会発表] (計16件)

[1] 横倉祐貴、川合光、“蒸発するブラックホールの内部のエネルギー運動量テンソル”、日本物理学会第73回年次大会、東京理科大学、3月(2018)

[2] Yuki Yokokura, “Quantum Fields inside Evaporating Black Holes”, KEK theory workshop, KEK, Nov 2017

[3] Yuki Yokokura, “A Self-consistent Model of Black Hole Evaporation”, *Quantum Black Holes in the Sky*, Perimeter Institute, Nov 2017. (招待講演)

[4] 横倉祐貴、川合光、“蒸発するブラックホールの内部の量子場の状態”、日本物理学会秋季大会、宇都宮大学、9月(2017).

[5] Yuki Yokokura, “A Model of Black Hole Evaporation and 4D Weyl Anomaly”, *Strings and Fields*, YITP Kyoto University, Aug 2017.

[6] Yuki Yokokura, “A Model of Black Hole Evaporation and 4D Weyl Anomaly”, *Loops17*, Warsaw University, July 2017.

[7] 横倉祐貴、“ブラックホールのエントロピーに関する研究”(若手奨励賞受賞講演)、日本物理学会第72回年次大会、大阪大学、3月(2017)、(招待講演)

[8] 横倉祐貴、川合光、“蒸発するブラックホールモデルと4次元ワイルアノマリー”、日本物理学会第72回年次大会、大阪大学、3月(2017)

[9] 横倉祐貴、“ネーター不変量としての熱力学エントロピー”、研究会「量子と古典の物理と幾何」、名古屋大、2月(2017)、(招待講演)

[10] Yuki Yokokura, “A self-consistent description of black hole evaporation”, KEK theory workshop, KEK, Tsukuba, Dec 2016

[11] 横倉祐貴、“ネーター不変量としての熱力学エントロピー”、第35回量子情報技術研究会、KEK、11月(2016)、(招待講演)

[12] 横倉祐貴、川合光、“エネルギー運動量テンソルの量子論的構成とブラックホールの内部構造”、日本物理学会秋季大会、宮崎大学、9月(2016)

[13] 横倉祐貴、佐々真一、“ネーター不変量としての熱力学エントロピー-III”、日本物理学会秋季大会、宮崎大学、9月(2016)

[14] Yuki Yokokura, “A self-consistent description of Black hole evaporation”, GR21, Columbia University, New York, July 2016

[15] Yuki Yokokura, “Thermodynamic Entropy as a Noether invariant”, *Holography and Quantum Information*, Yukawa Institute, Kyoto, May 2016

[16] 横倉祐貴、“Thermodynamic Entropy as a Noether invariant”、シンポジウム「New Horizon of Mathematical Sciences」、理研、4月(2016)、(招待講演)

〔図書〕(計 1 件)

[1] 横倉祐貴、“ネーター保存量としての熱力学エントロピー”、物理科学雑誌パリティ 2017年9月号(丸善出版)、34~37頁を担当。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横倉 祐貴 (Yokokura, Yuki)

国立研究開発法人理化学研究所・分野横断型
計算科学連携研究チーム・基礎科学特別研究
員

研究者番号：50775616