

研究種目： 若手研究(B)
 研究期間： 2007～2009
 課題番号： 19740149
 研究課題名(和文)
 ブラックホール蒸発とブラックホール統計力学
 研究課題名(英文)
 Black Hole Evaporation and Black Hole Statistical Mechanics
 研究代表者
 齊田 浩見(Saida Hiromi)
 大同大学・教養部・准教授
 研究者番号： 80367648

研究成果の概要(和文)：

ブラックホール(BH)とは、重力が異常に強くて何も逃げられない時空領域である。このBHの研究を通してミクروسケールでの重力の理解を深めるために、次の2つの問題を考えた：(1) BHが蒸発して小さくなっていくと最後はどうなるか？(2) BHが一つだけの場合、BHのエントロピーはBHの面積で与えられる(エントロピー=面積則)。この法則はBHが複数ある場合でも正しいと予想されているが、その予想は正しいか？そして次の結果を得た。(1)の結果；BHは(エントロピー増大則から)完全には蒸発しきらずプランクスケールの残存物が残らなければならない。(2)の結果；BHが複数ある場合、エントロピー=面積則は成立しない(BHが複数ある場合の予想は間違っていた)。さらに、重力ポテンシャルは、プランク長程度の短い距離では(従来の、負の無限大に発散、という予想とは違って)有限の値になることも示された。

研究成果の概要(英文)：

Black Hole (BH) is the spacetime region affected by extremely strong gravity, and nothing can escape from BH. In order to understand deeper the micro-scale properties of gravity via researching BH, we consider two problems: (1) What does happen at the end of BH evaporation? (2) It is already known that, when a single BH exists, its entropy is given by the area of BH (Entropy-Area law). It has been conjectured without proof that the entropy-area law holds for systems including some BHs. Is this conjecture correct? Then, the results of research are as follows. Result on (1): BH can not evaporate completely due to the law of entropy increase, and a remnant of Planck scale should remain. Result on (2): The conjecture is wrong, and the entropy-area law does not hold in the system including some BHs. Furthermore, it is also found that the potential of gravity has finite value within a short length scale such as Planck length (contrary to the past expectation which expects that the gravitational potential is negative infinity at short length scale).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	300,000	1,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学，素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ブラックホール熱力学，エントロピー＝面積則，量子重力，熱力学，量子統計力学，非平衡蒸発過程，相対論的散逸流体

1. 研究開始当初の背景

ブラックホールの動的性質と量子論的な性質の研究は互いに関連する部分がある。まず、ブラックホールの動的な性質としては、重力崩壊によるブラックホール生成過程と、ホーキング輻射によるブラックホール蒸発過程がある。前者の生成過程は、一般相対論の実験的検証を目指した研究とも関わって、深く研究が進んできた。しかし後者の蒸発過程は、特にその最終段階で重力の量子効果が効くことから、研究が難しく進展がなかった。

2. 研究の目的

重力の量子論的な性質を理解することを目的に、次の2つの問題を考えた。

(1) ブラックホールが蒸発していくと、その最終段階で完全に蒸発しきってしまうのか、あるいは何か残存物が残るべきなのか、を明らかにする。

(2) ブラックホールから放出されるホーキング輻射のスペクトルは熱的である。これは、ブラックホールが重力場の熱平衡系であることを意味する。そして、ホーキング輻射が曲がった時空上の量子効果であることから、ブラックホールという熱平衡系の構成要素は重力の量子論的なマイクロ状態だと考えられる。そこで、ブラックホールの熱平衡状態を統計力学的に記述するために必要な条件を調べることで、重力の量子論的なマイクロ状態の性質を明らかにする。

3. 研究の方法

上記の目的(1)，(2)共に、量子重力理論のモデル（超弦理論やループ重力など）を使わずに、熱力学や統計力学、通常の量子力学など、可能な限り実験的に確立している理論だけを使って問題を考えることにする。

(1) ブラックホール蒸発の最終段階の研究について。蒸発過程は、熱力学的に厳密には、非平衡過程である。そこで、輻射場の非平衡熱力学を利用し、ブラックホール蒸発過程を非平衡熱力学系の発展として記述する。熱力学的な定式化をすることで、エントロピーを計算できる。そして、蒸発の最終段階でブラックホールは完全に蒸発しきると仮定し、エントロピーの時間変化を見積もる。熱力学第2法則によればエントロピーは増加しなけれ

ばならないので、完全蒸発過程でエントロピーが増加するかどうかを調べることで、完全蒸発するという仮定が妥当かどうかを判断できる。

(2) ブラックホール熱平衡系の統計力学的な根拠について。次の3段階で研究を進める。
① 第1段階。ブラックホールの熱力学的な状態量が、通常の実験室系のように示量性と示強性による分類に従わないことに注意する。ブラックホールの熱力学的な性質を議論するときに、通常熱力学の議論のどこを修正しなければならないかを明らかにする。

② 第2段階。通常の実験室系の統計力学が成立するために必要な条件を明らかにする。

③ 第3段階。上の2つの結果を比べて、ブラックホールという熱平衡系が存在可能なための、重力のマイクロ状態が満たすべき条件を読み取る。

4. 研究成果

(1) 研究目的(1)の成果。ブラックホール蒸発過程のエントロピーの時間変化を見積もることで、(少なくとも本研究での状況設定、熱浴に囲まれたブラックホール、の下では)蒸発の最終段階で完全に蒸発することはエントロピー的に無理なことが分かった。ブラックホールが蒸発すると、その最終段階では、プランスケール程度の残存物が残らなければならない。

(2) 研究目的(2)の成果。研究方法の第1段階において、従来の予想とは異なる、ブラックホールの熱力学的な性質が明らかになった。それは、ブラックホールが複数存在する場合のエントロピーの表式についてである。従来は、ブラックホールが1つだけある場合の計算結果から単純に予想して、ブラックホールが複数あってもそのエントロピーは地平面の面積（の1/4倍）で与えられると考えられてきた。しかし、ブラックホールが複数ある場合には、エントロピーは必ずしも地平面の面積では与えられないことが明らかになった。そのため、研究目的(2)では、状況設定を具体化して、ブラックホールが1つの場合を考えることにした。その理由は、エントロピーの表式が簡単になるので、解析も簡単になると考えたからである。次に、方法の第2段階は、既に統計力学の基礎研究で明らかになっている事実を調べることで実行でき

た。最後に、方法の第3段階で得た結論は次の通りである：ブラックホールという重力の熱平衡系が存在するためには、その構成要素（量子重力のマイクロ状態）の間の相互作用のポテンシャルが、ニュートン重力ポテンシャルとは異なり、短い距離スケールで負の有限値で抑えられなければならない。さらに、相互作用ポテンシャルが、2体相互作用の和で表わされるなら（3体以上の相互作用がない場合）、その2体相互作用は短い距離スケールで反発力的でなければならない。（この結果は現在、論文として執筆中。）

以上2つの結果は、超弦理論やループ重力など量子重力のモデルに寄らないという意味で普遍的なものである。そして、これから量子重力理論を探っていく上で、強固な指針になると考えられる。

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6件）

(1) 査読論文: Hiromi Saida, 2009, To what extent is the entropy-area law universal?, Progress of Theoretical Physics 122, 1515-1552

(2) 査読論文: Hiromi Saida, 2009, de-Sitter thermodynamics in the canonical ensemble, Progress of Theoretical Physics 122, 1239-1266

(3) 査読論文: Miho Urano, Akira Tomimatsu and Hiromi Saida, 2009, Mechanical First Law of Black Hole Spacetimes with Cosmological Constant and Its Application to Schwarzschild-de Sitter Spacetime, Classical and Quantum Gravity 26, 105010

〔学会発表〕（計29件）

(1) 斉田浩見, 一般相対論的な散逸流体理論：アルファ粘性を超える散逸の現象論, 国立天文台研究集会 2011：銀河中心 SgrA* の観測的ブラックホール時空研究, 2011年3月8日, 東京大学

(2) 斉田浩見, 因果的に無矛盾な散逸流体の現象論：解析・数値的に扱いやすそうな EIT の簡単化, 第4回ブラックホール磁気圏研究会, 2011年3月11日, 大同大学

(3) 斉田浩見, General Relativistic Dissipation in Accretion Flow onto Black Hole --- toward full GR modeling of BH accretion ---, JSI workshop: The Ins and Out of Black Holes, 2011年11月15日, Loews Annapolis Hotel (メリーランド州, アメリカ合衆国)

(4) 斉田浩見, シンポジウム「一般相対論の直接検証：BH シャドウの直接撮像と重力波の検出」はじめに, 日本物理学会 第65回年次大会, 2010年3月21日, 岡山大学

(5) 斉田浩見, 高橋芳太, 長倉洋樹, Relativistic Dissipative Accretion Flow onto Black Hole, The 19th workshop on General Relativity and Gravitation, Japan, 2009年12月3日, 立教大学

(6) 斉田浩見, Relativistic Dissipative Hydrodynamics and Accretion Disc, 日本物理学会 2009年秋季大会 (素核宇宙分野), 2009年9月12日, 甲南大学

(7) 斉田浩見, 浦野美保, 富松彰, AdS ブラックホールの特異な熱力学的性質と重力摂動, 日本物理学会 第64回年次大会, 2009年3月29日, 立教大学

(8) 斉田浩見, 相対論的な非平衡流体力学, 第2回ブラックホール磁気圏研究会, 2009年2月22日, 名古屋大学

(9) 斉田浩見, To what extent is the entropy-area law universal?, APCTP-NCTS International Workshop on Gravitation and Cosmology, 2009年1月18日, 浦項工科大学 (浦項市, 韓国)

(10) 斉田浩見, To what extent is the entropy-area law universal?, 第10回特異点研究会「特異点と時空および関連する物理」, 2009年1月10日, 高エネルギー加速器研究機構

(11) 浦野美保, 富松彰, 斉田浩見, Schwarzschild-de Sitter 時空の有効温度, 日本物理学会 2008年秋季大会 (素核宇宙分

野), 2008年9月23日, 山形大学

(12) 齊田浩見,
Schwarzschild-de Sitter Thermodynamics
with Minimal Set of Assumptions,
日本物理学会 2008 年秋季大会 (素核宇宙分
野), 2008年9月23日, 山形大学

(13) 南部保貞, 岩山博之, 庄司多津男, 齊田
浩見,
Acoustic Black Hole in Plasma Flow –
Theory: Observation of a classical analog of
Hawking Radiation,
International Congress on Plasma Physics
2008, 2008年9月9日, 福岡国際会議場

(14) 齊田浩見,
Steady State Thermodynamic Approach to
Schwarzschild-de Sitter Spacetime,
第9回特異点研究会「特異点と時空および関
連する物理」, 2008年1月13日, 立教大学

(15) 齊田浩見,
Black Hole Evaporation as a
Nonequilibrium Process,
APCTP Jeju Meeting on Gravitation and
Cosmology, 2007年10月19日, Gallery
House (済州島, 韓国)

(16) 齊田浩見,
Black Hole Evaporation as a
Nonequilibrium Process,
2nd Dynamics and Thermodynamics of
Blackholes and Naked Singularities,
2007年5月10日, Politecnico de Milano (ミ
ラノ市, イタリア)

[図書] (計3件)

(1) Hiroshi Saida, 2011年,
Extended Irreversible Thermodynamics in
the Presence of Strong Gravity (Invited
contribution to, Thermodynamics, edited
by J.C.Moreno-Pirajan),
InTech Open Publisher, 26 ページ (齊田担
当分)

(2) Hiroshi Saida, 2011年,
Limit of Universality of Entropy-Area Law
for Multi-horizon Spacetimes (Invited
contribution to, Classical and Quantum
Gravity: Theory, Analysis and Application,
edited by V.R.Frignanni),
Nova Science Publisher, 56 ページ (齊田担
当分)

(3) Hiroshi Saida, 2008年,
Black Hole Evaporation as a

Nonequilibrium Process (Invited
contribution to, Classical and Quantum
Gravity Research, edited by
M.N.Christiansen and T.K.Rasmussen),
Nova Science Publisher, 52 ページ (齊田担
当分)

[産業財産権]
なし

[その他]
ホームページ等

[http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takaha
si/BHmag2010/](http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/BHmag2010/)

[http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takaha
si/SgrA2011/Site/Welcome.html](http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/SgrA2011/Site/Welcome.html)

[http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takaha
si/GR_BH/](http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~takahasi/GR_BH/)

[http://www2.rikkyo.ac.jp/web/jgrg19/ind
ex.html](http://www2.rikkyo.ac.jp/web/jgrg19/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊田 浩見 (大同大学・教養部・准教授)
研究者番号: 80367648

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし