

機関番号：82118

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007 ~ 2010

課題番号：19540316

研究課題名 (和文) ブラックホール熱力学と量子異常

研究課題名 (英文) Black hole thermodynamics and Quantum anomalies

研究代表者

磯 暁 (ISO SATOSHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：20242092

研究成果の概要 (和文)：ブラックホールからのホーキング輻射を、ホライズンでの因果性とそれに伴う量子異常 (重力アノマリーおよびゲージアノマリー) として普遍的に理解できることを明らかにした。またこれらエネルギー流や電荷の流れに対する結果を、高いスピン流へ拡張し、熱的なスペクトルを完全に再現できることを示した。さらに、非平衡統計力学で発展した手法である「揺らぎの定理」と結びつけ、一般化されたブラックホール熱力学第二法則の新しい導出やそこからのずれの可能性を示唆した。

研究成果の概要 (英文)：

We have shown that the Hawking radiation can be understood universally in terms of the gravitational and gauge anomalies near the horizon. This result was also generalized to the higher spin currents beyond the energy and the charge flow. Furthermore, we have applied new techniques developed in the non-equilibrium statistical physics to the black hole system, and obtained a new derivation of the generalized second law of black hole and indicated a quantum deviation from it.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：素粒子物理

キーワード：ブラックホール ホーキング輻射 ウンルー効果 量子異常 揺らぎの定理

## 1. 研究開始当初の背景

ブラックホール時空で場の量子論を考えると、ホライズンの存在により有限温度熱力学的な振る舞いをするのが知られている。これは時空にマイクロな統計的性質が隠されていることを示唆し、弦理論などによる解釈などが提案されていた。

## 2. 研究の目的

ブラックホール時空での熱力学がどの程度普遍的に成り立つ性質なのか、また背後にひそむマイクロな時空構造にどのように迫ることができるのか、また非平衡統計熱力学とどのように関係しているのか、こういったことを明らかにしていくのがこの研究の目的であった。

### 3. 研究の方法

研究の方法として特に着目したのが、場の理論の普遍的性質として知られる量子異常現象である。量子異常現象は、カイラルな自由度をもつ系では普遍的に現れるが、ブラックホールの地平面は、因果律により内向きの波のみが存在し、外向き波との対称性が破れている。この意味でカイラルな性質をもつ。この結果、地平面のある時空で量子異常現象は重要な役割を果たす。

もう一つの手法として、ミクロな構造を探る手がかりとしての熱平衡からの揺らぎに着目した。多くの熱力学法則は、熱力学自由度に関して熱平均をとった後の関係式を記述している。しかし、そこからの「揺らぎ」を見ることで、背後のミクロな構造、例えば比熱やアボガドロ数そのものを知ることができる。この研究では、特に非平衡統計力学で開発された「揺らぎの定理」をブラックホール系に適用することで、ブラックホール熱力学の新しい理解を目指した。

### 4. 研究成果

この研究の主要な目的は、ブラックホールの熱力学、特にホーキング輻射やブラックホールのエントロピーなどの性質を、超弦理論や行列模型といったミクロな観点、および量子異常などのマクロな観点の双方から理解して、時空の微視的および巨視的構造を理解することにある。

研究期間の前半で行ったのは、マクロな観点、特にホライズン近傍における因果性と量子異常効果（重力アノマリーとゲージアノマリー）を使うことで、ホーキング輻射の普遍性を明らかにした。これらの結果は、電荷の流やエネルギー流の大きさについて普遍的な結果を与えることが示されたが、さらに高階スピンをもつカレントを系統的に考察することで、ホーキング輻射のエネルギースペクトルそのものが普遍的に与えられることを示すことができた。この結果は、量子重力現象をつかんだホーキング輻射の考え方が、全フラックスのみに適用されるにとどまらず、より広く適用できることを示している。

その後、この考え方を静的なブラックホール解から動的な解へ拡張して、ホーキング輻射の解析を行ったが、結果としては、ホーキング輻射の普遍性を検証するにとどまった。これは、ミクロな視点を取り入れることなく、情報喪失問題などのブラックホールの根源的な問題を解決するのは困難であることを意味しており、超弦理論や行列模型の視点を取り入れることが重要である。

そこで超弦理論の非摂動的な定式化として知られるM理論についての研究を行った。M理論はまだその詳細が理解されていない理論であるが、Mブレーンとよばれる膜の存在が知られている。超弦理論のDブレーン解は、ゲージ理論として特徴づけられることが知られていたが、Mブレーンの場合、自由度が枚数の2乗とは異なる振る舞いをすることから、Dブレーンとは異なるゲージ構造があるのではないかと期待されていた。こういった状況に対して、平成20年ころに大きな進展があった。その二つが Lie3 代数というゲージ構造に基づく BLG 理論の提唱と、Chern-Simons ゲージ理論に基づく ABJM 理論である。これらの理論の関係がはっきりしていなかったが、ABJM 理論からある種の極限 (Wigner-Inonu 縮約) をとることで、Lorenzian BLG 理論が得られることを明らかにした。

行列模型に関しては、この科学研究費以前から継続して研究を進めてきたが、この期間中には、特にギンスバーグ・ウイelson 更生法をもちいた非可換2次元球面上での位相不変量の構成を行った。その結果、有限自由度しかもたない非可換球面上のゲージ理論に対して、非自明な位相不変量が構成できることを明らかにした。また、この位相不変量に対するダイナミクスに関する考察も行った。

研究期間の後半で行った研究が、非平衡統計力学とブラックホール熱力学の融合である。ブラックホールは、地平面での因果性のために、ホーキング輻射やブラックホールエントロピーなどの熱力学的な性質をもつ。これは地平面での因果性と場の量子論の普遍性から得られるが、これまで熱平衡からの揺らぎはあまり議論されてこなかった。

そこで、熱平衡系からの揺らぎを取り入れるために、ブラックホール時空におけるスカラー場を考察し、それが満たす確率微分方程式 (Langevin 方程式) を導出した。これは horizon のすぐ外側にある拡張地平面 (stretched horizon) を考えて、両者の間の自由度を積分することで導出できた。この結果、これまで考えられてきた古典的なメンブレン作用に対する量子補正を得ることができた。またこの結果に「揺らぎの定理」を適用することで、ブラックホールとスカラー場の系全体のエントロピーが増大する確率と減少する確率の比を求めることができ、そこから、ブラックホール熱力学に対する一般化された第二法則を導出した。面白いことに、この第二法則は、半古典近似において熱平衡近似を使うことでのみ成立し、それぞれの条件を外すことで、そこからのずれが生じ

ることがわかった。今後は、このずれを詳細に調べ、ブラックホールのミクロな構造との関係を明らかにすることが重要な方向性である。

この結果は、ブラックホール熱力学の第二法則に対する示唆を与えているが、これをさらに推し進め、電磁場や重力場についての考察を行った。古典的には、拡張地平面でオームの法則やナビア・ストークス方程式を導出できることが知られていたが、この結果にホーキング輻射による量子揺らぎを取り入れることを検討した。これは、現在も継続して研究を進めている。

ブラックホールの地平面と類似した現象が、一様加速する観測者の見る有限温度効果がある。これはウンルー効果とよばれ、加速度に比例した温度をもち、さらに最近では、ウンルー観測者のもつ熱力学法則からアインシュタイン方程式が導出されることも議論されている。ウンルー効果は、これまで大きな加速度を実現することができず、検証は困難とされてきたが、最近の強いレーザー電磁場を使うと十分検証可能な加速度が実現されることがわかってきた。その検証方法として提案されているのが、一様加速運動する荷電粒子の、熱効果による量子揺らぎがつくる電磁輻射を見ることである。

しかし、どのような電磁輻射が発生するのかについて、さまざまな議論がなされており、系統的な解析がなされていなかった。私は、電磁場と相互作用している荷電粒子の運動に、量子的な揺らぎと輻射による散逸の効果を取り入れ、そこから確率微分方程式で記述することに成功した。さらに、その輻射と真空ゆらぎの干渉効果の重要性も指摘した。これらの解析をおこない、これまで直観的に議論されてきたウンルー効果による輻射を系統的に導出することができた。

## 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 12 件)

Higher spin currents and thermal flux from Hawking radiation

By S. Iso, T. Morita and H. Umetsu  
Phys. Rev. D75 (2007) 124004

Fulxes of higher-spin currents and Hawking radiations from charged black holes, by S. Iso, T. Morita and H. Umetsu

Phys. Rev. D76 (2007) 064015

Higher spin gauge and trace anomalies in two-dimensional backgrounds,

By S. Iso, T. Morita and H. Umetsu  
Nucl. Phys. B799 (2008) 60-79

Index theorem in spontaneously symmetry-broken gauge theory on fuzzy 2-sphere

By H. Aoki, Y. Hirayama, S. Iso  
Phys. Rev. D78 (2008) 025028

Hawking radiation, Gravitational anomaly and conformal symmetry: The origin of universality by S. Iso

Int. J. Mod. Phys. A23 (2008) 2082-2090

Hawking radiation via higher-spin gauge anomalies by S. Iso, T. Morita, H. Umetsu  
Phys. Rev. D77 (2008) 045007

Janus field theories of multiple M2 branes, by Y. Honma, S. Iso, Y. Sumitomo, S. Zhang,  
Phys. Rev. D78 (2008) 025027

Scaling limit of N=6 superconformal Chern-Simons theories and Lorentzian Bagger-Lambert theories,

By Y. Honma, S. Iso, Y. Sumitomo, S. Zhang,  
Phys. Rev. D78 (2008) 105011

Construction of a topological charge on fuzzy S2\*S2 via Ginsparg Wilson relation

By H. Aoki, Y. Hirayama and S. Iso  
Phys. Rev. D80 (2009) 125006

Generalized conformal symmetry and recovery of SO(8) in multiple M2 and D2 branes, by Honma, S. Iso, H. Umetsu, Y. Sumitomo, S. Zhang,

Nucl. Phys. B816 (2009) 256-277

Stochastic analysis of accelerated charged particle -transverse fluctuation

- by S. Iso, Y. Yamamoto, S. Zhang,  
to appear in Phys. Rev. D (2011)

Stochastic equations in black hole background and non-equilibrium fluctuation theorem,

By S. Iso, S. Okazawa, to appear in Nuclear Physics B (2011)

[学会発表] (計 8 件)

日本物理学会 2011年3月25日 新潟  
ブラックホールと揺らぎの定理

日本物理学会 2010年9月13日 九州工業大学  
ブラックホール情報喪失問題と揺らぎの定理

同学会 9月11日  
Unruh 輻射における干渉項の効果

日本物理学会 2010年3月22日 岡山大学  
ランジュバン方程式とアンルー輻射

日本物理学会 2009年3月23日  
岡山大学 シンポジウム招待講演 アンルー  
輻射

日本物理学会 2008年9月12日 甲南大学  
高強度レーザーにおけるアンルー効果の検  
証

日本物理学会 2008年3月26日 山形大学  
ブラックホールの灰体因子と興系普遍性の  
破れ

日本物理学会 2007年9月22日 北海道大学  
Hawking radiations and higher-spn  
currents

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

磯 暁 (ISO SATOSHI )  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・教授  
研究者番号：20242092

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：