

Nara Women's University

【内容の要旨及び審査の結果の要旨】 非回転および
回転ブラックホールのエントロピーへの量子スカラー
一場の寄与

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2010-07-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 石本,公子, 見目,正克, 岩淵,修一, 戸田,幹人, 重本,和泰 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10935/1716

氏名(本籍)	石本公子 (兵庫県)
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博課第319号
学位授与年月日	平成18年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 人間文化研究科
論文題目	非回転および回転ブラックホールエントロピーへの量子 スカラー場の寄与
論文審査委員	(委員長) 教授 見目正克 教授 岩渕修一 助教授 戸田幹人 教授 重本和泰 (帝塚山大学)

論文内容の要旨

近年非常に多くのブラックホールが観測されている。ことにほとんど全ての銀河中心には、巨大ブラックホールが観測されている。これらのブラックホールの多くは回転しており、アインシュタイン方程式の解で良い近似として記述される。ブラックホールは、いろいろな物質を飲み込みまた放出するので、熱力学的対象と考えられる。

ブラックホール物理と熱力学との間には多くの類似点がある。最も目立つのはブラックホールの面積とエントロピーの類似である。ブラックホールを熱力学的にとらえる事に対する理由は次のものである。ブラックホールの近くの重力場は十分強いので真空中に作られた仮想粒子対を实在のものにする事がある。電子、陽電子対が極めて強い電場により真空から生成されるのと同じように、ブラックホールの近くの重力場は十分強いので真空から粒子を生成することがある。物理的には、これはブラックホールが放射する、あるいは時間と共に蒸発し、そのエネルギーを空間に放出してしまう事を意味している。ブラックホールから出る特徴的な放射は、決まった温度の黒体放射になるといえる。したがってブラックホールを、決まった温度を持った熱力学的物体として取り扱うことができる。ブラックホール物理と熱力学とを対応させる事により、Bekenstein-Hawking の面積則を得ることができる。

しかし、この対応による導出の不十分な点は、議論が熱力学的なものにすぎないことである。エントロピーの完全な導出では、ブラックホールの量子状態を数え統計力学的に扱わなくてはならない。

統計力学的な方法で面積則を出そうとする試みが長年行われている。本研究で取上げる量子物質場のブラックホールエントロピーへの寄与の考察は、その試みの一つである。

量子物質場のエントロピーへの寄与に関しては、非回転の場合には、やはり面積側が成り立つことが示されている。しかし回転ブラックホール時空の場合には、回転ブラックホールに起因する super-radiant な不安定性が生じ、これが原因となって余分な発散の困難が生じるとして、これまでの計算は上手くいっていない。(2 + 1) 次元での BTZ ブラックホール解での研究 [I. Ichinose 他 (1995)]、および (3 + 1) 次元での Kerr ブラックホールでの研究 [M.H. Lee 他 (1996)] において、これまでの方法や結果は錯綜している状況である。計算と途中に出てくる積分の正則化において、各々が異なる正則化法で計算し結果も同じにならない。また、その正則化には根拠がとぼしく技巧的に正則化をしている。回転しているブラックホールの場合の計算結果は、非回転への極限を取った場合と始めから非回転で計算した値とでは一致しない問題もあった。

本論文では、これらの状況に対して、物質場のエネルギーの下限を正しく考察し、天頂角に依存する切断パラメータを導入することにより、余分な発散の困難が生じないエントロピーを得て、面積則が成立することを確認した。

回転するブラックホールで初めに取上げる BTZ ブラックホールは、(2 + 1) 次元ブラックホールである。(2 + 1) 次元時空における理論は現実を記述する理論と言うより、問題を簡略化し本質を捉えるモデルとしての意義がある。この (2 + 1) 次元ブラックホールに対する本論文の計算において、回転系のエントロピーの非回転への極限は、始めから非回転系で計算した値と一致した。(2 + 1) 次元の回転するブラックホールの下でのエントロピーの計算で、余分に生じる発散などの従来の問題点が回避され、正しい計算方法が分かったので、これを (3 + 1) 次元の回転している Kerr ブラックホール解に対し適用して、エントロピーを求めた。

計算を進めるに当たって、't Hooft による brick wall 正則化の方法を適用している。この方法を取り入れた理由は次のものである。ブラックホールの近くには多くのエネルギーレベルが存在し、ホライゾンで発散が生ずると考えられる。この発散は正しい量子重力理論が構築されれば、物理的に生じないと考えられる。このため、ブラックホールから微小距離以内の所にある波動関数は 0 としておく。本論文では、この brick wall 切断パラメータに角度依存性を持たせ、回転する時空におけるスカラー場のエントロピーが面積則を満たすことを示した。これは従来得られていない新しい結果である。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ブラックホール周辺の量子場の統計力学に関する研究である。ブラックホールとしては、非回転および回転する場合を考察し、量子場としては、スカラー場を扱っている。

論文では、第1章で導入を述べた後、第2章ではブラックホール物理と熱力学との間の類似点に注目した Bekenstein-Hawking の議論にしたがってブラックホールエントロピーの面積則を導く。この章は、論文の主題であるブラックホールエントロピーにたいするスカラー場の寄与の基礎となっている。この時、大切となる概念であるブラックホールの温度は、付録 A で説明される。

第3章では、回転ブラックホールを研究するのに先立って、非回転ブラックホールの下でのスカラー場の統計力学について調べている。研究方法としては半古典的方法と経路積分法の独立した2つの方法を用い、スカラー場の自由エネルギーを計算している。半古典的方法は、量子力学に基づいていて、プランク定数を小さいとして古典力学のイメージを持ちつつ量子効果を取り入れる方法である。この方法では、粒子数による和を手で加えている。一方経路積分法は、場の量子論に基づいていて、場を量子化して積分を行なうので、粒子数による和は、自動的に組み込まれている。

スカラー場の質量が小さい時には、2つの方法によって得られた自由エネルギーの値が等しくなることを示した。ここで、スカラー場の質量がゼロの場合は既に知られている結果であるが、回転しているブラックホールエントロピーの寄与を考察する際の基準を与える。スカラー場の質量がゼロでない場合に於いては、質量を摂動として扱い半古典的方法および経路積分法でスカラー場の自由エネルギーを求めている。これは新しい研究となっていて、評価できる。また、2つの計算方法で一致した結果を導いた点は、計算方法に信頼が持てる意義があり、この点も評価できる。

第4章で、回転するブラックホール時空におけるスカラー場のエントロピーの寄与を計算して求めている。回転ブラックホール時空の場合には、回転ブラックホールに起因する super-radiant な不安定性が原因となって余分な発散の困難が生じるとして、これまでの計算は上手くいっていない。具体的には、実際の時空次元より小さい $(2+1)$ 次元での BTZ ブラックホールでは一瀬他 (1995) などの研究があり、また $(3+1)$ 次元の Kerr ブラックホールでは M.H.Lee 他 (1996) などの研究があるが、これまでの方法や結果は錯綜している状況であった。計算と途中に出てくる積分の正則化

において、各々が異なる正則化法で計算し、結果も同じになっていなかった。またその正則化には根拠が乏しく且つ技巧的に正則化を行っていた。回転しているブラックホールの場合の計算結果は、非回転への極限を取った場合と始めから非回転で計算した場合とでは、値が一致していなかった。余分の発散が生じる原因としては、回転するブラックホールに対するスカラー場の寄与において、回転に起因する super-radiant の不安定性が生じることが原因であると考えられていた。super-radiant とは、入射スカラー粒子のエネルギーより散乱スカラー粒子のエネルギーのほうが大きい場合に当たり、この現象がなだれ的に増幅するのが super-radiant の不安定性である。

本論文では、このような状況に対して、慎重に計算を進めている。大切なのは、スカラー場のエネルギーの許される範囲と天頂角に依存する切断パラメーターの導入である。エネルギーの許される範囲とは、スカラー場のエネルギーと回転とのバランスであり、これを適切に配慮することにより、回転するブラックホールエントロピーに対するスカラー場の寄与の場合においても、余分の発散を生じないエントロピーを得ることができている。具体的には先ず、 $(2+1)$ 次元の BTZ ブラックホールを背景時空とするスカラー場の統計力学を調べている。このときの時空の計量は、動径座標にのみ依存し、スカラー場の許されるエネルギー範囲を適正に考慮する事のみにより、エントロピーの面積則を得ている。次に $(3+1)$ 次元の Kerr ブラックホールを背景時空とするスカラー場の統計力学を調べている。Kerr 計量は、動径座標と天頂角度に依存しており、スカラー場の許されるエネルギー範囲を適正に考慮すると共に天頂角度に依存する切断パラメーターを導入する事により、エントロピーの面積則を得ている。これらの結果により、ブラックホールエントロピーへのスカラー場の寄与は、Bekenstein と Hawking が熱力学的考察から与えたエントロピーの面積則と首尾一貫していることが示されている。これらの結果は、従来得られておらず、高く評価される。よって、本論文は学位(理学)を授与されるに十分な内容を備えているものと判断される。