

氏 名 松本 光洋

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1670 号

学位授与の日付 平成26年3月20日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Evolution of a black ring by Hawking evaporation

論文審査委員 主 査 教授 磯 暁
教授 小玉 英雄
教授 北澤 良久
准教授 井岡 邦仁
准教授 郡 和範
教授 前田 恵一 早稲田大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

Evolution of a black ring by Hawking evaporation

In four spacetime dimensions, a stationary, asymptotically flat, vacuum black hole is completely characterized by its mass and spin angular momentum. In particular, the topology of its event horizon must be a sphere. By contrast, in five dimensions, in addition to the Myers–Perry black hole which is a natural generalization of the four–dimensional Kerr black hole, various exact solutions of black objects with non–spherical horizon topologies have been found. In this thesis, we focus attention to black ring solutions with the $S^1 \times S^2$ horizon topology. A black ring solution rotating in the direction of S^1 was found by Emparan and Reall. Since a five–dimensional spacetime can have two angular momenta, Pomeransky and Sen’kov extended it to a solution with two independent rotation parameters (i. e., spinning both in the directions of S^1 and S^2).

A black hole is known to evaporate due to quantum effects of fields in curved spacetime as shown by Hawking. The rate of mass and angular momentum loss by the Hawking radiation for a Kerr black hole was first studied by Page taking account of fields with spins $1/2$, 1 and 2 , and it was shown that a Kerr black hole spins down to a nonrotating black hole regardless of its initial state. However, Chambers et al. showed that if only a massless scalar field is taken into account (i. e., in the absence of fields with nonzero spin), a four–dimensional Kerr black hole evolves to a state with the nonvanishing dimensionless rotation parameter, $a/M \doteq 0.555$. This analysis was extended to five–dimensional Myers–Perry black holes by Nomura et al. They showed that any such black hole with nonzero rotation parameters a and b evolves toward an asymptotic state with $a/M^{1/2} = b/M^{1/2} \doteq 0.1975(8/3\pi)^{1/2}$. Here, this value is independent of the initial values of a and b .

It is interesting to extend these studies to the case of a black ring. Although the Hawking radiation of black rings has been studied in various context, the time evolution of a black ring has not been studied up to now. The difficulty in this study is that the method of mode decomposition of the Klein–Gordon field in this spacetime is not known since separation of variables has not been realized, and therefore, two–dimensional numerical calculations of eigenfunctions are required. In order to avoid this difficulty, we consider a thin black ring with a small thickness parameter, $\lambda \ll 1$. Here, “thin” or the small thickness

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

parameter λ means that the S^2 radius is much smaller compared to the S^1 radius. In such a situation, a black ring can be approximated by a boosted black string. Then, the separation of variables for the scalar field can be done, and we have well defined modes.

Using this thin-limit approximation, we give a formulation to study the evolution of a thin Pomeransky–Sen’kov black ring by the Hawking radiation, and discuss general features that do not depend on details of the greybody factor. It is shown that a black ring evaporates without changing the thickness parameter λ . Then, we apply our method to a special case of the Emparan–Reall black ring without S^2 rotation, and derive a semi-analytic formula for the time evolution of the evaporation. Here, the formula is semi-analytic in the sense that the evolution is expressed by analytic formulas but they include one parameter related to the greybody factors that have to be evaluated numerically. By developing a numerical code, we also determine the value of this parameter with sufficient numerical accuracy. In the evaporation, the shape of the Emparan–Reall black ring keeps similarity to its initial configuration. The lifetime of a black ring is shorter by a factor of $O(\lambda^2)$ compared to a five-dimensional Schwarzschild black hole with the same initial mass.

In addition to the time evolution, we present numerical results on detailed properties of the evaporation of a thin Emparan–Reall black ring. Specifically, we examine the energy and angular spectra of emitted particles in the evaporation. Compared to the energy spectrum for a four-dimensional Schwarzschild black hole, the energy spectrum for a black ring shifts to high-frequency region. It is also shown that the angular spectrum has a similar shape to that of the energy spectrum except in the low-frequency region where the angular spectrum becomes negative due to the effect of the greybody factors.

As a closely connected system to a thin black ring, we apply our method also to the evaporation of a thin black string whose Schwarzschild radius $2M_K$ is much smaller than the compactification scale L along the string direction. In addition to the formulas for time evolution, we give the numerical results on detailed properties of evaporation of a five-dimensional unboosted Schwarzschild black string by comparing them with those of a four-dimensional Schwarzschild black hole. Because of the contribution of the Kaluza–Klein modes, the energy emission rate of a black string is larger by a factor of $O(L/M_K)$ compared to that of a black hole. The energy spectrum of a black string shifts towards the higher frequencies compared to that of a black hole if we compare them fixing M_K .

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、ホライズンがリング状の形状をもつ 5 次元回転ブラックリング解について、その Hawking 輻射による形状の変化と放射スペクトルを世界で初めて調べた研究の報告である。

4 次元時空では、漸近的に平坦な定常真空ブラックホール解は Kerr ブラックホールに限られ、その構造は質量と角運動量により一意的に定まる。これに対し、5 次元ではこの一意性は成り立たず、Kerr ブラックホールに対応する球形のブラックホール(MP 解)以外に、ホライズンがトーラス形状(S2xS1)をもつブラックリング解が 2000 年代に発見されている。これらの高次元ブラックホールが現在の 4 次元宇宙の巨視的現象で登場することはないが、宇宙初期や加速器を含む超高エネルギー現象では一時的に現れる可能性がある。この際、高次元ブラックホールは Hawking 輻射という量子過程により消滅すると考えられており、その検証にはこの量子蒸発過程の詳しい研究が必要となる。このような背景の元、これまでに、5 次元球形ブラックホールの量子蒸発過程が詳しく調べられている。松本氏の研究は、類似の研究を、細長い 5 次元ブラックリングに対して世界で初めて行ったものである。

一般に、ブラックホールからの Hawking 放射のスペクトルは、Planck 分布にあたる部分と灰色因子と呼ばれるブラックホールの黒体度合いを表す量の積で表される。これらのうち、Planck 因子は質量や角運動量などのブラックホールパラメータのみで決まる普遍的な構造を持つのにに対し、灰色因子は外部から入射した波がどの程度ブラックホールに吸収されるかという情報を表し、ブラックホール時空での波動の振る舞いを詳しく調べないと決まらない。このため、灰色因子の決定はやっかいであるが、輻射の反作用やスペクトルの決定では決定的な重要性をもつ。4 次元ブラックホールではゼロ質量の自由場の波動方程式はスピンによらず変数分離可能となるため、灰色因子の決定は 1 次元常微分方程式の問題に帰着され、比較的容易に数値的に計算することができる。5 次元以上でもホライズンが球形の MP 解では、スカラ場については同様の方法が使える。これに対して、ブラックリング解では、スカラ場の方程式も変数分離可能でない。このため、灰色因子を求めるには膨大な数のモードに対して偏微分方程式を直接解くことが必要で、これまで実行されたことはない。

本論文では、ブラックリング解が、その太さとリング半径の比 λ が小さいとき、ブラックホール時空と 1 次元空間の積であるブラックストリング時空をブーストした時空で近似できることを用いてこの困難を回避している。この近似により、灰色因子は、4 次元ブラックホール時空での有質量場の振る舞いの問題に帰着される。この方法を用いて、Hawking 輻射に伴うブラックリングの形状変化では、パラメータ λ が一般に一定に保たれること、蒸発によりリングサイズがゼロに向かって減少することを示し、さらに放射スペクトルが球形ブラックホールの場合と異なった形状をもち、低エネルギーでは回転方向と反対符号の角運動量が放出されるという興味深い結果を得ている。

本論文の構成は以下の通りである。まず、第 2 章と第 3 章で球形ブラックホールの研究の概要とブラックリングの基礎事項を紹介した後、第 4 章ではブラックストリング近似によ

(Separate Form 3)

る計算の方法が説明されている。この定式化を用いて、第 5 章では蒸発過程でブラックリングのサイズと形状の時間発展を調べ、さらに第 6 章ではブラックリングからの **Hawking** 輻射のエネルギースペクトルをブラックリングの回転が 1 方向のみの場合について計算し、結果を球形ブラックホールのもものと比較している。

このように松本氏の論文は、最先端の基礎物理学の研究に重要な貢献をする独創的な成果を含んでおり、共同研究に基づくものであるが、問題設定や具体的な計算、物理的意義の検討すべての面において本質的な寄与をしたと認められる。以上より、本論文は博士論文にふさわしいと判断した。