

氏 名	さい だ ひろ み 齊 田 浩 見
学位(専攻分野)	博士 (人間・環境学)
学 位 記 番 号	人 博 第 147 号
学位授与の日付	平成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	人 間 ・ 環 境 学 研 究 科 人 間 ・ 環 境 学 専 攻
学位論文題目	Hawking radiation in an expanding universe (膨張宇宙内のホーキング輻射)

論文調査委員 (主 査) 教授 松 田 哲 助教授 阪 上 雅 昭 助教授 早 田 次 郎

論 文 内 容 の 要 旨

ブラックホールとは、遠方にいる観測者にいかなる信号も送ることができない時空領域である。この興味深い時空の存在が提唱されて以来、ブラックホール研究は一般相対性理論の中心的研究課題のひとつであった。ブラックホールの特徴としては、まずブラックホールの質量、電荷、そして回転の強さを表す角運動量という3種類の物理量だけで時空の性質が完全に決定される“一意性”があげられる。これは“ブラックホールには毛が3本しかない”という形で言い表されることが多い。また少数の物理量で特徴づけられることから熱力学的な記述が可能であることが導かれ、実際ブラックホールが、温度やエントロピーという熱力学的性質を有していることが知られている。さらに古典的には何も放出しないブラックホールが量子論的にはエネルギーを放出し蒸発して行くという驚くべき現象も理論的に予言されている。このエネルギー放出過程はホーキング輻射と呼ばれていて、エネルギー放出率の周波数依存性すなわちスペクトルが上記のブラックホールの温度で特徴づけられる黒体輻射であることも示されている。

ところで上に挙げた輝かしいブラックホール研究の成果は、ブラックホールから十分に離れた点では時空が平坦で定常的であるという、いわゆる漸近的平坦な時空に限定されていた。一方、現実の宇宙は観測より現在も膨張を続けていることが知られており漸近的平坦な時空の範疇に含まれない。しかし、このような膨張宇宙におけるブラックホールが、漸近的平坦な時空の場合に有していた美しい性質をそのまま保っているのか？、という問題は今まで研究されて来なかった。

そこで本学位論文では、このような疑問に迫る第一歩として、膨張宇宙でのホーキング輻射を議論した。さて一般相対性理論の枠組みでは、時空はアインシュタイン方程式を満たさなければならない。従来、膨張宇宙でのブラックホール研究が進まなかった最大の理由は、そのような時空に対応するアインシュタイン方程式の滑らかな解が知られていなかったからである。本学位授与申請者は、解の滑らかさを一階微分まで連続と緩めることでスイスチーズモデルという膨張宇宙でのブラックホール時空に対応する解が構成できることに着目した。ここでスイスチーズモデルとは、膨張宇宙を表すフリードマン宇宙の球対称領域をくり抜き、そこにブラックホール解を接続したものである。申請者は、このスイスチーズモデルが膨張宇宙でのブラックホールの性質を研究するのに非常に有用であることに気づき、このスイスチーズ宇宙上に質量なしのスカラ場を導入し、これを量子化してホーキング輻射の計算を行った。

このように単純化したモデルで、宇宙膨張とともに動く座標系である共動座標系に乗っている観測者から見たホーキング輻射を計算することができる。結果的に得られる輻射のスペクトルは漸近的平坦な時空での黒体輻射とはまったく異なるものであった。申請者は

- (1) 時間に比例して宇宙が大きくなる。
- (2) 宇宙はある時期膨張するが、十分に時間が経った未来および充分時間を遡った過去では宇宙は膨張しない。

という2つの場合に具体的にホーキング輻射の計算を行った。その結果、輻射のスペクトルは黒体輻射からずれ、その輻射強度は漸近的平坦な場合の黒体輻射よりは強いという興味深い結果を得た。単純に考えると、膨張の効果により赤方偏移を

受けて輻射強度は温度の低い黒体輻射になって、輻射強度も落ちると考えてしまうかもしれないが、結果は逆で宇宙膨張の効果で輻射強度は強まる方向であり、かつ黒体輻射からずれるのである。

以上の結果に基づき申請者は、

- (1) 漸近的平坦な場合のブラックホールは最低エネルギーの平衡状態にある。
- (2) 一旦ブラックホールが膨張宇宙のような動的な背景宇宙に入れられると非平衡状態になり、かつエネルギーの放出率が高まる。

というユニークなブラックホール描像を提案している。今後、ブラックホールの他の性質を研究することでこの描像がより確かなものになることが期待されている。

論文審査の結果の要旨

ブラックホールとは、遠方にいる観測者にいかなる信号も送ることができない時空領域である。この興味深い時空の存在が提唱されて以来、ブラックホール研究は一般相対性理論の中心的研究課題のひとつであった。なかでも古典的には何も放出しないブラックホールが量子論的にはエネルギーを放出し蒸発して行くという驚くべき現象が理論的に予言されていて、このエネルギー放出過程はホーキング輻射と呼ばれている。しかし、このような輝かしいブラックホール研究の成果は、いわゆる漸近的平坦な時空に限定されていた。一方、現実の宇宙は観測より現在も膨張を続けていることが知られており漸近的平坦な時空の範疇に含まれない。

申請者は本学位申請論文において、これまで取り扱われて来なかった膨張宇宙でのホーキング輻射を議論した。学位申請論文の第1章では、当該研究の動機づけと目的について述べている。第2章では、本論文の解析で重要な役割をする、スイスチーズモデルによる膨張宇宙でのブラックホールの記述とその時空でのホーキング輻射の計算のための手順・方針が議論されている。具体的な計算に必要な数学的準備を第3章で行ったのち、第4章で膨張宇宙でのブラックホールからのホーキング輻射でのスペクトルを計算している。また第5章は結果の要約と議論である。さらに、付録の部分でスイスチーズモデルの詳細と従来の漸近的平坦なブラックホール時空でのホーキング輻射の計算が解説されている。

本学位申請論文の優れた点は、従来困難であると考えられてきた膨張宇宙でのブラックホールを表す時空を具体的に構成したことにある。一般相対性理論の枠組みでは、時空はアインシュタイン方程式を充たさなければならない。従来、膨張宇宙でのブラックホール研究が進まなかった最大の理由は、そのような時空に対応するアインシュタイン方程式の滑らかな解が知られていなかったからである。本学位授与申請者は、解の滑らかさを一階微分まで連続と緩めることでスイスチーズモデルという膨張宇宙でのブラックホール時空に対応する解が構成できることに着目した。ここでスイスチーズモデルとは、膨張宇宙を表すフリードマン宇宙の球対称領域をくり抜き、そこにブラックホール解を接続したものである。申請者は、このスイスチーズモデルが膨張宇宙でのブラックホールの性質を研究するのに非常に有用であることに気づき、このスイスチーズ宇宙上に質量なしのスカラール場を導入し、これを量子化してホーキング輻射の計算を行った。

申請者は、2つの宇宙膨張のモデルを採用し具体的にホーキング輻射の計算を行った。その結果、輻射のスペクトルは黒体輻射からずれ、その輻射強度は漸近的平坦な場合の黒体輻射よりは強いという興味深い結果を得た。

以上の結果に基づき申請者は、

- (1) 漸近的平坦な場合のブラックホールは最低エネルギーの平衡状態にある。
- (2) 一旦ブラックホールが膨張宇宙のような動的な背景宇宙に入れられると非平衡状態になり、かつエネルギーの放出率が高まる。

というユニークなブラックホール描像を提案している。このように本学位申請論文の成果は、膨張宇宙におけるブラックホール研究という新しい分野の先鞭をつけたものである。これまで困難であると思なされ手付かずの状態であった膨張宇宙でのブラックホールの性質という課題が、この研究により具体的に遂行可能であることが示された意義は非常に大きい。

また、本学位申請論文は、人間・環境学専攻自然環境論講座の自然構造基礎分野にふさわしい内容を備えたものといえる。よって本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成14年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。