

氏 名	向 山 信 治
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2031 号
学位授与の日付	平成 11 年 3 月 23 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	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	The Origin of Black Hole Entropy (ブラックホールエントロピーの起源) (主査)
論文調査委員	教授 小玉英雄 教授 中村卓史 教授 堀内 昶

論 文 内 容 の 要 旨

1973年にBekenstein, Bardeen, Carter, Hawkingらは、定常的なブラックホール解のパラメーターである質量 M , 角運動量 J , 電荷 Q を変化させたとき、対応するブラックホールの面積 A の変化 dA とパラメーターの変化 dM , dJ , dQ およびブラックホールの表面重力強度 κ の間に、可逆過程に対する熱力学第2法則と類似の関係式 $(\kappa/8\pi G)dA = dM - \Omega dJ - \Phi dQ$ が成り立つことを示し、一般の動的ブラックホールに対する面積増大則を考慮して、ブラックホールが面積に比例するエントロピーを持つ可能性を指摘した。さらにその1年後、Hawkingは量子場と重力場の相互作用を考慮すると、ブラックホールが κ に比例する温度 $T_H = \hbar \kappa / 2\pi$ の熱輻射を放出して蒸発することを理論的に示した。この結果は上の熱力学的解釈と整合的となっており、ブラックホールのエントロピーに対して、 $S = A/4L_p^2$ という表式を与える。ここで、 L_p はPlanck長と呼ばれる、基本定数 $G, c, \hbar$ から決まる長さの次元を持つ量で、重力の量子効果が重要となる特徴的スケールを表す。したがって、上記の S の表式は、ブラックホールエントロピーが量子重力と深い関係があることを示唆している。

これらの研究以降、ブラックホールエントロピーの役割や起源を場の量子論や量子重力理論などより基礎的なレベルから解明しようとする試みが多くなされ、現在ブラックホール熱力学と総称される、基礎物理学の中心分野の一つとなっている。申請論文は、このブラックホール熱力学に関して申請者がこれまでに行った研究の成果をまとめたもので、大きく分けて3部からなる。第1部では、古典論の枠内でブラックホール熱力学の2つの一般化が議論されている。一つは、WaldおよびIyerによってなされた、上記ブラックホールに対する熱力学的関係式の一般共変性をもつ一般的な重力理論への拡張に関するもので、彼らの議論において用いられているゲージ条件の整合性が示されている。もう一つは、熱力学の非定常なブラックホールへの拡張に関するもので、エントロピーとして見かけのホライズンの面積を、エネルギーとして準局所エネルギーを用いると、球対称な動的ブラックホールに対して熱力学の第2法則が成り立つことが示されている。さらに、同種の考察を全く対称性を持たない一般のブラックホール時空に拡張する試みも議論され、一般系に対する熱力学第2法則の定式化が提案されている。

第2部は、いわゆる一般化された第2法則に関する議論である。これは、ブラックホールエントロピーにブラックホールと相互作用する通常の物質のエントロピーを加えた全エントロピーに対して熱力学第2法則が成り立つかどうかを問題としたもので、ブラックホールエントロピーが実際に通常の物質のエントロピーと同じ物理的意味を持つかどうかを明らかにする上で重要である。本論文では、準定常なブラックホールとスカラ場からなる系に対して、関数解析的な考察に基づいて、一般化された熱力学の第2法則が成り立つことが示されている。

第3部は、ブラックホールエントロピーを量子論的な基礎法則から導く試みに関する研究である。この種の試みとしては、現在、超弦理論に基づくものを含めて様々な研究があるが、本論文では、主に、量子場に対するエンタングルメントエントロピーに着目したアプローチが議論されている。このアプローチは、ブラックホールホライズンが時空を2つの領域に分割することによって失われる、場の量子状態が持っていた2つの領域にまたがる相関情報を表すエントロピー（エンタングル

メントエントロピー) をブラックホールエントロピーの微視的対応物と見なす試みである。このアイデア自体は, Sorkin らによるものであるが, 本論文ではそのアイデアを拡張し, エンタングルメントエネルギーという新たな概念を導入することにより, 相関情報のみにより熱力学が構成されている。特に, このようにして構成された熱力学が従来のブラックホール熱力学と同じ構造を持つこと, および, 対応する温度がオーダー 1 程度の比例係数を除いてHawking温度 T_H と一致することが示されている。また, このアプローチの発展として, 最近話題となっている量子情報の非破壊伝達 (量子テレポーテーション) においてエンタングルメントエントロピーが重要な役割を果たすことが示され, ブラックホール蒸発におけるエントロピーパラドクスとの関連が議論されている。第3部ではさらに, ホライズンを完全反射鏡で置き換えた時空におけるブラックホール外部の熱平衡量子場 (brickwall model) のエントロピーとブラックホールエントロピーの関係が考察されている。このモデルは最初, 't Hooftにより提案されたものであるが, 彼を含めて多くの人々により, 量子場の重力場への反作用が異常に大きくなるという困難が指摘されていた。本論文では, この困難は量子場の重力効果を決定する際に基準となる基底状態 (真空) の選択が適切でないためであり, Hartle-Hawking真空と呼ばれる適切な真空を基準とすると反作用の効果は無視でき, 量子場の温度がHawking温度と一致するときホライズン近傍に局在したエントロピーがBekensteinエントロピーと一致することが示されている。

論文審査の結果の要旨

ブラックホール熱力学は, ブラックホールの面積と全エネルギー (質量), 角運動量, 電荷の間に, 熱力学の第2法則と同じ関係式が成り立つという事実を出発点として生まれた学問分野で, 対応する温度やエントロピーに量子重力の特性量であるプランク長があらわれることから, 重力に対する古典論と量子論の橋渡をする可能性を秘めたものとして最近注目を浴びている。申請論文は, このブラックホール熱力学に関して申請者がこれまでに行った研究の成果をまとめたもので, 既発表の7編の論文および現在進行中の研究に基づいている。

ブラックホール熱力学の研究は, その性格からして古典論, 量子論の両側面から研究をする必要があり, 申請論文でもこの両者が議論されている。まず, 古典論に関する研究では, 動的なブラックホールの問題が取り扱われている。もともとのブラックホール熱力学における関係式は単にブラックホールを記述するパラメーター空間での微分式にすぎず, 通常の熱力学関係式のような一つの系の時間変化を扱ったものではない。申請論文では, この点に着目し, エントロピーや熱力学関係式の動的なブラックホールへの拡張が古典論の枠内で議論され, 対称性を持たない一般の動的重力系に対して熱力学の第2法則の定式化が提案されている。このような定式化は全く新しいものであり, ブラックホール熱力学の物理的な内容を明らかにする上で今後重要な役割を果たすことが期待される。

量子論的側面については大まかに分けて2つの問題が議論されている。その一つは, いわゆる一般化された第2法則に関するものである。これは, ブラックホールエントロピーにブラックホールと相互作用する通常の物質のエントロピーを加えた全エントロピーに対して熱力学第2法則が成り立つかどうかを問題としたもので, ブラックホールエントロピーが実際に通常の物質のエントロピーと同じ物理的意味を持つかどうかを明らかにする上で重要である。本論文では, 準定常なブラックホールとスカラ場からなる系に対して, 関数解析的な考察に基づいて, 一般化された熱力学の第2法則が成り立つことが示されている。これは, 系が限定されているものの, 世界的に見てこの種の法則の初めての厳密な証明である。

もう一つは, ブラックホールエントロピーを量子論的な基礎法則から導く試みに関する研究である。申請論文では, 超弦理論に基づく研究, エンタングルメントエントロピーに基づくもの, 't Hooftのブリックウォールモデルに基づくものなど様々なアプローチが取り扱われているが, 特に, エンタングルメントエントロピーに基づくアプローチでは, エンタングルメントエネルギーという新たな概念を導入することにより, ブラックホールホライズン近傍の量子場に対する相関情報のみにより熱力学が構成され, それが従来のブラックホール熱力学と同じ構造を持つこと, および, 対応する温度がオーダー 1 程度の比例係数を除いてHawking温度と一致することが示されている。この結果は, ブラックホール熱力学の量子論からの完全な導出とはなっていないものの, ブラックホール熱力学と微視的な基礎法則との深い関係を指摘したものとして興味深い。また, ブリックウォールモデルに関する研究では, ブラックホール熱力学との整合性から, 重力源としての量子場のエネルギーを測る基準として, Hartle-Hawking状態と呼ばれる真空状態を選ぶのが自然であることが示されている。これ

は、ブラックホール熱力学の議論が、現在最も困難な問題と考えられている量子場の重力場への反作用の問題に有用な情報をもたらす可能性を指摘した研究として高く評価できる。

参考論文では、ホライズン問題とエネルギー条件の関係、宇宙論的相転移時での宇宙の波動関数の振る舞い、重いカルツァクラインモードに対するパラメーター共鳴から高次元統一理論に対して制限を導く可能性などの、宇宙論の諸問題が議論されている。

以上述べたことより、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。

なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について諮問した結果、合格と認めた。