

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	横倉 祐貴
論文題目	A Self-consistent Model of the Black Hole Evaporation and Entropy in Gravity		
(論文内容の要旨)			
Hawking輻射の発見以来、ブラックホールの熱力学は、量子重力理論のための一つの重要な現象である。ブラックホールのエントロピーの微視的起源を理解することは、「時空の基本的自由度は何か」という基本的な問いに答えるヒントを与えうる。従来の多くの場合、horizonをもつ真空のブラックホール解が使用され、特に漸近的AdSの場合や温度ゼロの極限的な場合などに対して、ある程度の理解が得られている。しかし、現実の世界では、ブラックホールは星の重力崩壊により形成され、その過程でHawking輻射が生じ、それは漸近的平坦かつ有限温度である。さらに、それは時間発展により、最終的には蒸発し、初期の星のもつ情報は失われると考えられている。これが、量子論を重力の文脈で考えた時に生じるもう一つの問題である。 この問題に対し、従来は、まず重力崩壊によりhorizonと特異点をもつブラックホールが形成されると仮定し、真空のhorizonにおいて粒子生成が生じ、それが蒸発をもたらすと考えられてきた。しかし、その場合だと、対生成で生じたエンタングルメントが増加し続け、その結果情報が失われてしまう。一方、近年では、ブラックホールの蒸発の時間発展の結果、horizonは真空ではなく、「高エネルギーをもつ何か(firewall)」が存在すると予想されている。だが、現段階では、それは量子論の一般論からの推測であり、その存在性や具体的なメカニズムは未だに不明である。 以上より、蒸発の効果も取り入れたブラックホールの時間発展を理解することは、情報問題とエントロピーの起源の解明に対し、最も有用かつ直接的である。これは最終的には時空も物質も量子的に扱って解くべき問題であるが、それは非常に困難である。一般的に、重力を量子化せずとも、蒸発の最終段階を除き、ほとんどの部分を調べられると期待できるが、それでも未だに解析的に解くのは容易ではない。 そこで、本論文では、次の仮定の下で、Hawking輻射のback reactionも含めた、ブラックホールの形成から蒸発までを記述するself-consistentなモデルを構築した。(1)eikonal近似を物質場のHeisenberg方程式を解く際に使用。(2)物質場のs波だけを考慮。これにより、実質的に解くべきself-consistent方程式は1つだけで十分になる。(3)Hawking輻射を担うmassless scalar場は大きな自由度($N \gg 1$)をもつ。これが、崩壊後の重力の大きな揺らぎを抑え、時空を古典的に保つ。 実際に、ダイナミカルな時空中で生成される粒子生成によるエネルギーフラックスを評価し、self-consistent方程式を、崩壊物質が十分に自身のSchwarzschild半径に近づいた状況で解いた。その解はブラックホールの内側を記述し、horizonも大きな特異点も生じることなく、蒸発する。その内側は玉ねぎ状の構造を持ち、各層がHawking輻射をする。さらに、熱浴中の定常的な場合に、ブラックホール内の輻射の微視的状态数を数え上げることにより、ブラックホールのエントロピーの面積則を完全に再現した。崩壊物質と輻射との相互作用による散乱を考慮することにより、崩壊物質の初期に持っていた情報(バリオン数など)が、ブラックホールの寿命に比べて、十分に短い時間で戻ってくることがわかった。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、第一に、ダイナミカルな時空から生じる粒子生成によるエネルギーフラックスを評価し、そのself-consistent方程式を直接的に解いている。その解は、ブラックホールの内部を記述し、その結果、horizonも大きな特異点も生じないことを示している。その中心のPlanckサイズ程度の特異的領域は、今後、弦理論などにより完全な記述が可能であると期待できる。この意味で、このモデルは、具体的かつより正確に、量子的なブラックホールの振る舞いを与えるものを言える。

また、定常なself-consistent解を用いて、その内部構造を考慮することにより、これまで成されていなかった、有限温度の普通のSchwarzschildブラックホールのエントロピー面積則の微視的理解を与えた。それは、ブラックホールの形成と蒸発の見方に基づくものであると同時に、従来のEuclidean的手法によるブラックホールエントロピーの導出の見方とも無矛盾なものである。

さらに、このモデルは情報がどのように帰ってくるかに具体的に答える可能性がある。従来の真空解の用いた議論では、星などの崩壊物質の持つエネルギーはHawking輻射に変換されて戻ってくるが、その初期情報がどのように帰ってくるのかは明確ではない。これに対し、本論文では、崩壊物質そのものを下層からやってくる輻射により散乱させて、帰還させる機構を構築している。実際に、それが生じる時間スケールは、十分に短い。しかし、未だに量子場の真空状態としての情報の復帰は示されていない。そこで、Eikonal近似が破れる時間スケールを評価すると、それは散乱する時間スケールと同じになっている。ゆえに、その時間スケールで、波としての振る舞いが有効的になり、外に情報が輻射と共に漏れ出すと予想できる。そして、このモデルは近年のfirewallの考え方に対する具体的な答えとして、Hawking輻射のback reactionが、高エネルギーの内部構造を生み出すことを示している。

また、輻射のback reactionを取り入れているおかげで、Hawkingフラックスの式に高次の項が現れ、それが温度に高次項を生み、そして、エントロピー面積則に、物質場の数 N に依存する $\log$ 補正を与える。これは時空のダイナミクスによる補正であり、ブラックホールの(非平衡的)熱力学の新しい現象を与える可能性がある。

以上のように、申請者は四十年間続くブラックホールのエントロピーの起源と情報問題に対し、従来のような真空解のよる解析ではなく、輻射のback reactionを直接的に取り入れて時間発展を考慮することが重要であることを示す研究結果を与えた。それは、ブラックホールに内部構造を生み、それが、エントロピーや情報復帰の機構、さらには新しいブラックホールの熱力学現象の理解にとって大切であることを指摘している。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年1月16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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降