

氏 名 張 森

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1417 号

学位授与の日付 平成 23 年 3 月 24 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 Quantum Fluctuations and Space-time Horizons

論文審査委員 主 査 教授 北澤 良久
教授 磯 暁
教授 小玉 英雄
教授 橋本 省二
准教授 西村 淳
教授 石橋 延幸 筑波大学

論文内容の要旨

In this Thesis I discuss the quantum fluctuations related to the event horizons. There are two main topics. The first topic is the fluctuations in Unruh effect. We used a stochastic equation to investigate fluctuations of the path for a uniformly accelerated charged particle. The second topic is to apply fluctuation theorem to black holes. We derived non-equilibrium relations for black holes.

The unification of quantum theory with general relativity must be one of the most interesting problems for theoretical physics. The answer to this problem is also expected to tell us about the structure of space and time.

There are various approaches to this problem. It is widely believed that the thermodynamical behavior of the black holes and the Hawking radiation will play a key role in this problem. The black hole is a region of space time in which the gravitational field is so strong that even light cannot escape from it to infinity. However, people noticed later that there is an analogy between black hole physics and thermodynamics. And after that, Hawking showed that the black hole has a thermal radiation with a black body spectrum due to the quantum effect. This means that the black hole thermodynamics is not just an analogy. It should have some physical meaning. This is a very surprising fact since the black hole itself is just a solution of Einstein equation which is a hyperbolic second order partial differential equation. This fact gives many implications about microscopic structure of space time. For example, if the thermo-dynamical quantities of black hole are physical, how do we explain them from statistical mechanics? Or more precisely, how to count the number of states and obtain the black hole entropy? The theory of quantum gravity should answer these questions. Indeed there are varieties of works to explain the black hole entropy from microscopic point of view.

On the other hand, the event horizon plays an important role in the thermodynamics of black holes. Unruh found that the Minkowski vacuum appears as a thermal state for a uniformly accelerated observer. This effect is known as the Unruh effect. And the Unruh effect is related to Hawking radiation via equivalence theorem. Just as the black hole case, the event horizon also emerges for the uniformly accelerated observer. There are many kinds of derivations of the Hawking radiation. From either of them, one can see that the existence of event horizon is very essential for the Hawking radiation. Furthermore, Ted Jacobson even found that one can derive Einstein equation by assuming the thermodynamics

of horizons.

So the thermodynamics of event horizon is closely related to gravity, and must be a key to the quantum aspect of gravity. Understanding these thermo-dynamical properties of horizons better should be important to understand the structure of space time. Until now, most of the discussions of the horizons were done in equilibrium region. In this thesis, we would like to investigate the non-equilibrium fluctuations related to the event horizons.

Our works are done on two cases. The first one is a stochastic approach to the Unruh effect and the second one is to show a fluctuation theorem for black holes.

When a particle uniformly accelerated in Minkowski vacuum, it will observe a thermal bath. Due to interactions with this thermal bath, the motion of the particle will become stochastic. Using the stochastic approach, we investigated the fluctuations of this particle and proved the equi-partition theorem for the transverse fluctuations. We also obtained the relaxation time of the fluctuations and the extra radiation due to the fluctuations (the Unruh radiation). These results are also useful in experiments which are under planning to detect such radiation by using ultrahigh intensity lasers which are in construction at Europe.

For black holes, we applied the recent developments in non-equilibrium statistical physics to area changing processes of the black hole interacting with external matter. We derived the non-equilibrium fluctuation theorems corresponding to Crooks and Jarzynski's theorems. This will also give another derivation of the generalized second law of black hole thermodynamics. The second law holds only after taking a thermodynamic average, and it should be violated as an individual process in a way to satisfy the Jarzynski equality. This is a first step to understand the non-equilibrium nature of black hole horizons.

Behind the horizon thermodynamics, there should be a fundamental structure of space-time. I hope that our results would make some help on this problem.

I. 本論文の内容

張森さんの学位申請論文は、ホライズン（地平面）をもつ時空における場の量子論に現われる量子熱力学的な効果について研究したものである。その中でも特に、張さんは、ブラックホールの地平面と加速運動する観測者がみるリンドラーホライズンに着目し、以下のような点を明らかにした。

1. ブラックホールは、一般相対論の古典解であり、それ自体は温度やエントロピーといった熱力学的概念と無関係である。しかしBeckensteinやHawking は今から30年前に、ブラックホールのある時空で場を量子化すると、ホライズンのもつ因果的な性質と組み合わせ、真空を考えているにも拘わらず有限温度の熱力学的な性質を持つことを明らかにした。このような熱力学の背後には、時空のもつ微視統計的性質が隠されていると考えられ、それを明らかにすることは量子重力理論の最重要課題と考えられている。これまでこの問題を扱う手法として、（局所平衡も含めた）平衡熱力学での様々な概念が適用されてきた。張さんの学位論文では、最近非平衡統計力学で発見された新しい手法である「揺らぎの定理」（およびJarzynski等式）を、ブラックホールの量子論に適用し、そこからブラックホールホライズンの揺らぎが満たす恒等式を導いた。この恒等式から導かれる結果にはいくつか挙げられるが、特に一般化された熱力学第二法則を導くことができる。また、ブラックホールのホーキング温度と無限遠での温度が異なる場合には、ブラックホールと外界との熱の流れが生じるが、そこでの熱伝導率を（非線形な領域まで含め）を求めるができる。

2. もう一つの地平面として、張さんが注目したのは、加速運動する観測者が見るリンドラーホライズンである。物質が何もないゼロ温度の真空中をある観測者が加速運動すると、その観測者は加速度に比例する有限温度の効果を持つことが知られている。これはウンルー効果とよばれる。ウンルー効果は、非常に小さくこれまでの加速度では検証することが不可能であったが、最近の高強度レーザーの進展により、ウンルー効果を検証できる可能性が広がってきた。そこで張さんは、レーザー場の中で加速運動する荷電粒子が出す輻射に着目し、古典的なラーマー輻射からの量子的な変化を調べることで、どうやったらウンルー効果が検証できるかを解析した。これは、粒子が感じる有限温度効果により、運動方向とは直交する横方向への揺らぎが発生し、その揺らぎ運動からくる輻射に対応する。この意味で、この余分な輻射は、完全に量子的な効果と言える。この余分な量子的輻射はウンルー輻射と

よばれているが、これまでの解析では非常に重要な量子的な干渉効果が見過ごされてきた。張さんは、荷電粒子の揺らぎを統計的に扱い、揺らぎの熱統計的な性質を明らかにするとともに、揺らぎの出す輻射と真空の量子揺らぎとの干渉効果も含めることで、これまで考えられてきた輻射が大きな変更を受けることが明らかになった。

II. 本論文の意義

本論文は、ホライズンをもつ時空での場の量子論の有限温度効果を、非平衡統計力学の観点から扱った。特にストカスティックな手法を適用することで、ホライズンの揺らぎや、荷電粒子の運動についての揺らぎを解析している。これまでこのような研究では平衡状態のみを議論することが多かったが、張さんは揺らぎに着目することで時空の非平衡な振る舞いを明らかにしようとしており、今後の研究の発展が楽しみである。

III. 総括的評価

以上のように張さんの学位論文は、時空の熱力学を非平衡揺らぎに着目することで、背後にある微視的な性質の解明や、またレーザー場によるウンルー効果の検証に適用しようとする意欲的な論文である。また学位論文そのものも、時空熱力学のレビューからはじめ、上記のような研究を丁寧にまとめられており、博士の学位論文とふさわしいものであると認め、合格と評価した。