

# 論文審査の結果の要旨

氏名 宇賀神 知紀

ブラックホールは現実の天文学における興味深い対象であるのみならず、重力理論そのものの、とりわけ長年の懸案である量子重力理論の構築に本質的な役割を果たすと思われる重要な基本的物体である。言うまでもなく、ブラックホールの最大の特徴は「事象の地平面」と呼ばれる、時空を因果的に無関係な内部と外部に分離する面を持つことであるが、量子論を考慮に入れると、この地平面の存在に起因して様々な謎が現れる。例えば、ブラックホールに関する様々な量はすでに古典論の段階で熱力学的関係式を満たすことが知られているが、その背後にある量子論的な微視的状态とは何かという大きな問題がある。またこれに関連して、ブラックホールの内部に落ち込んだ情報は、黒体放射のスペクトルを持つホーキング放射と呼ばれる量子的な混合状態としてしか外部に出てこられない、というユニタリー性を破るように見えるプロセスをどう理解するかという「情報喪失問題」がある。これらの問題はすべて事象の地平面の内側で何が起きているかの理解と関係する重要で難しい問題である。

本論文で述べられている研究は、この未だ定式化することさえ難しい地平面の内側の量子論的な物理を、近年めざましい発展を遂げた、ある次元の共形不変理論 (CFT) とそれより次元高い次元の AdS 時空の量子重力理論のあいだに存在する「AdS/CFT 対応」の枠組みを用いて理解しようとする野心的な試みであり、幾つかの興味深い結果が得られている。

本論文は全 11 章および 4 つの補遺からなるが、第 1 章の序論および第 11 章の結論を除くと、第 2 章から第 8 章までの量子クエンチによるブラックホールのエンタングルメントエントロピーの時間発展に関する部分 (以下第一部と呼ぶ) と、第 9 章と第 10 章で述べられる higher spin 理論におけるブラックホールのエントロピーの導出に関する部分 (以下第二部と呼ぶ) に大別される。レビュー以外のオリジナルな研究は第 6,7,8 章および第 10 章に述べられている。

第一部においては、論文提出者は、外部から因果的に隔離されたブラックホールの内側を調べる非常に自然で有用な物理量として、密度行列の内側空間部分をトレースアウトして得られるエンタングルメントエントロピーに着目した。この量はまたすべての場の理

論においてその詳細によらず定義できる普遍的な量であるという利点も兼ね備えている。簡単のため、3次元の AdS 空間中のブラックホール時空とそれに対応する2次元の CFT を考える。このとき事象の地平面の内側を横切る時間スライスをとると、時空はその時間に対して非自明な発展をすることがわかるので、対応する2次元 CFT における時間依存する過程を見ることが重要になる。そのような過程で解析可能なものとして、ある時刻に CFT を基底状態から突然励起状態に上げる量子クエンチと呼ばれるプロセスがある。この励起状態は境界状態と呼ばれる CFT の状態で記述することができ、その時間発展を正確に追うことができる。様々な種類のクエンチに対するエンタングルメントエントロピーをレプリカ法を用いて計算すると、それぞれに特徴的な時間発展を得る。こうした計算はすでに行われていたが、論文提出者は、こうした CFT における様々なクエンチに対応する AdS 側の重力双対時空を構成する新しい系統的方法を開発し(第6章)、そのとき現れる境界に端を持つ極小曲面の面積としてホログラフィックにエンタングルメントエントロピーを計算した。そしてこれを CFT の結果と比較することにより、ホログラフィックな計算法が正しいことを確かめると同時に、エンタングルメントエントロピーが事象の地平面の内側の時間一定面の体積としての意味を持つことを示した(第7章)。これは地平面の内側の情報を得る具体的手段を提案するものであり、有意義な知見である。

以上は無限に広がった線上の CFT におけるプロセスについての考察であったが、第8章では、有限な円周上における自由なフェルミオンの系を考え、全領域で一様なクエンチに伴うエンタングルメントエントロピーを有限サイズ効果も含めて計算することに成功した。この場合は CFT のテクニックが使えず、また励起された準粒子が円周上で再帰することによる新しい効果があるので、計算は簡単ではないが、得られた結果は、ホログラフィックに解釈すると、ブラックホールの生成消滅過程に対応するという示唆を与えており、非常に興味深い。

第二部では、近年 AdS/CFT の簡単な例として注目されている、スピン2以上の massless ゲージ場 (higher spin 場) を含む3次元重力理論におけるブラックホールのエントロピーを計算する新しい公式を導出した。この理論においては、higher spin 場に関するゲージ変換が時空の計量を非自明に変化させてしまうため、ブラックホールの事象の地平面の概念が曖昧になり、通常のように地平面の面積に比例する量としてエントロピーを計算することに困難が生ずる。この問題に対して論文提出者はエントロピーを計算できるもう一つの方法として、計量を固定したままユークリッド化した時間方向の周期を変えるときに生

ずる錐的特異点 (conical singularity) の性質にエントロピーの情報が含まれることを利用することを考え、それを 3 次元の higher spin 理論を記述する Chern-Simons 理論に適用することによって、通常の重力理論における Wald のエントロピー公式に対応する公式を導出することに成功した。

以上のように、本論文はブラックホールの事象の地平面の内側という非常に興味深い領域が調べるのが難しい領域に関する幾つかの知見を、新しい手法を開発しながら得るのに成功しており、レベルの高い博士論文であると認められる。

なお、本論文で得られている新しい結果の一部は高柳匡氏および Per Kraus 氏との共同研究に基づくが、その部分においても論文提出者が主体的に拘わり十分な寄与をしていることを確認した。よって審査員一同博士 (理学) の学位を授与できると認める。