

論文審査の結果の要旨

氏名 大下 翔誉

本論文は8章からなる。第1章は、イントロダクションである。宇宙の構造形成の標準モデルは、様々な宇宙論観測データを無矛盾に説明できている。しかし、この標準モデルでは、宇宙の始まりに急激な加速膨張（以後インフレーション）があったことを仮定しており、さらにインフレーションを起こす真空エネルギーの時間発展を記述するスカラー場のポテンシャルが十分に平坦であったことを前提としている。地上の粒子加速器でも達成し得ない高エネルギー、高密度の宇宙でこのように平坦なポテンシャルが実現されるか、より一般的には現在の宇宙に成長し得るインフレーションの初期条件が如何に普遍的か、あるいは偶然的要素を必要とするのか、という宇宙の初期条件問題は長年の謎である。1章では、この宇宙の初期条件問題がレビューされている。また、この問題に関連して、ブラックホールまわりの情報損失の問題、重力の自由度を含む熱力学の第二法則の議論がレビューされている。これらの問題について、強重力場中における重力の自由度と熱力学的考察という観点からレビューが展開され、本論文研究の物理的動機付けが与えられている。

第2章では、インフレーションの初期条件問題、宇宙の始まりの特異点問題、強重力場中での重力の自由度を考慮した熱力学的考察、ホーキング氏が提唱したブラックホールの蒸発、またブラックホールの情報損失問題、現宇宙のヒッグス場の準安定性の問題（将来不安定性が起こる可能性）、という諸問題および議論について、さらに詳しいレビューが述べられている。

第3章では、インフレーションの初期条件問題を解決し得るシナリオが提唱されている。初期宇宙は、一般には物質分布、重力場が非一様な状態（系）にあると考えられる。偽の真空エネルギーのバブル領域が、輻射で満たされ、真の真空エネルギーの領域に取り囲まれており、その輻射圧が張力が釣り合いの状態にある、定常かつ非一様な時空構造の理論モデルを一般相対論の枠組みで無矛盾に設定している。この系は古典的にはインフレーションし得ないが、量子効果（量子トンネリング効果）によって、偽真空のバブルが一様性の高い状態へ遷移し、インフレーションが始まる機構が示されている。この際、時空構造の重力的エントロピー増加を考慮することで、遷移確率がほぼ1であることが示されている。つまり、より一般的な非一様な初期宇宙であっても「普遍的」にインフレーションが起こることが提唱されている。この研究については、現在論文執筆中であり、一ヶ月程度のタイムスケールで投稿する予定にあるそうである。

第4章は、宇宙のインフレーションのなかでも熱力学の第二法則的考察が成り立つかという問題が検証されている。インフレーション宇宙は、近似的にド・ジッター時空で記述されるが、その時空では光が一方向にしか横断することができない「地平線」と呼ばれる時空構造を持つ。ブ

ブラックホールの熱力学的考察との類推から、ド・ジッター時空が持つ地平線の面積は重力場の持つエントロピーの大きさに比例すると予想される。しかしながら、膨張宇宙においては、物質場の量子ゆらぎによって、その地平線の大きさが確率的にゆらぐことが知られており、ある確率で膨張宇宙の重力エントロピー（地平線の面積）が減少し、熱力学第二法則が破れるのではないかと指摘があった。この章では、膨張宇宙において引き伸ばされる量子ゆらぎが量子性を失う機構（古典化）に着目し、量子場が量子性を失うことで生じるエントロピーが重力エントロピーの減少率を上回ることが示されている。このように、「量子ゆらぎの古典化」という機構が、膨張宇宙における熱力学の第二法則を説明する上で、本質的な役割を果たすことを示した。この研究は、Oshita & Yokoyama (PTEP, 053E02, 2016) および Oshita (Phys. Rev. D 97, 2018)の査読雑誌に掲載されている。

第5章では、量子情報理論とブラックホール（以後 BH）の蒸発過程の一貫性があるかという問題が議論されている。BH を形成した物質は BH の蒸発過程によって、熱放射（ホーキング放射）に変換されるが、このため BH の情報が損失される可能性が議論されてきた（BH の情報損失問題）。情報の損失は量子論で禁止されるため、これはホーキング放射の正当性に関わる問題である。BH の地平面付近では粒子と反粒子が対生成され、反粒子は BH に落ち込み、粒子は無限遠に飛んでいく。ホーキング放射は、この地平面から放射される粒子に他ならない。ホーキング放射がブラックホールを形成した物質の情報を含んでおり、量子情報理論とも無矛盾であるためには、対生成した粒子-反粒子間の量子もつれは何らかの機構で消滅しなければならないことが、2012年のPolchinskiらのグループによって指摘されていた。この量子もつれがどのように消失するかを、BH 内側へ落下していくホーキング反粒子の量子性を調べることで明らかにされている。例えば、BH に自由落下する大きさのある物質は、潮汐力によって大きく歪められ破壊されるが、落下するホーキング反粒子も BH の中心に近づくにつれて、その量子ゆらぎが位相空間内で極端に大きく歪められ、量子性（密度行列の非対角成分）を失い古典化することが示されている。この結果は、量子情報理論と BH の蒸発過程の一貫性に対する傍証とみなせると考えられる。この研究は、Oshita (Class. Quant. Grav. 34, 195002, 2017)に掲載されている。

第6章では、ヒッグス粒子の準安定性（Higgs metastability）に着目し、宇宙のコンパクト天体の存在可能性が議論されている。ヒッグス粒子の準安定性により、ゼロでない確率で負の真空エネルギーをもつ真空泡（バブル）が、我々の宇宙で生成され得ることが指摘されている。特に、ブラックホールが触媒として作用し、このような相転移が起こりやすくなる可能性がある。第6章では、ブラックホール以外の初期宇宙の相転移を起源とするコンパクト天体（例えば、モノポール）が、どの程度相転移を起こしやすいかを調べており、ブラックホールよりも、地平線をもたないコンパクト天体のほうが相転移を起こしやすいことが示されている。宇宙年齢以内に相転移を起こしてしまうコンパクト天体のパラメータ領域が存在することも示されている。この研究は、Oshita, Yamada & Yamaguchi (arXiv:1808.01382)で投稿され、現在査読過程にある。

第7章では、ブラックホールの蒸発過程でインフレーションが起き得ることを指摘している。BH のホーキング放射の温度は、BH の質量に反比例し、BH の蒸発が進むほど、その温度は徐々に高くなる。その温度が初期宇宙での温度に同程度になったとき、その熱エネルギーが宇宙の加速膨張に必要な真空のエネルギーに変換される機構（対称性の回復および量子トンネリング効果）

が指摘されている。これは、BH の内側で新たな高エネルギー宇宙が始まることを示唆し、BH が蒸発するような後期宇宙の BH から新たなインフレーションが起こるといふ、言わば宇宙の輪廻のようなシナリオが提唱されている。この研究は、Oshita & Yokoyama (Phys. Lett. B 785, 197, 2018)に掲載されている。

最後に、第8章では、本論文のまとめが述べられている。

このように本論文は、宇宙の始まりであるインフレーションが如何に起こるか、微妙に調整された初期条件が必要か？という長年の謎であった宇宙の初期条件問題に着目し、初期宇宙が非一様であっても、強重力場中における量子的トンネリング効果で「普遍的」にインフレーションが起こるといふシナリオを提唱しており、我々の宇宙観を変え得る発見であり、その学問的意義は高い。強重力場中での時空構造の理論模型の構築、強重力場中の量子的トンネリング効果、重力場の自由度を考慮した熱力学的考察、またブラックホールの情報損失問題への考察、と鋭い洞察力に基づき、幅広い研究が展開されている。なお、本論文3章以降7章までが論文提出者の研究に基づいており、論文提出者の単著の論文(4、5章)、また、横山氏(4、7章)、山口氏(6章)、山田氏(6章)との共同研究による研究成果として査読論文に発表されている。これらの研究のほとんどについて、論文提出者が着想、計画、また主体となって解析および論文執筆を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。