

## 論文審査の結果の要旨

氏名 向田享平

本論文は6つの章及び3つのAppendixからなる。まず第1章では研究の背景と研究結果の概要が述べられ、論文全体の構成が提示される。次の第2章では、宇宙初期におけるスカラー場の凝縮の効果に関するレビューが行われ、本学位論文研究に先立つ諸研究の基本的な結果がまとめられている。特にスカラー場がインフラトン (inflaton) の場合の宇宙の再加熱温度との関係が詳述され、さらに  $\delta N$  形式理論や、スカラー場がカーバトン (curvaton) の場合等についても言及されている。第3章では、質量の軽い粒子と凝縮したスカラー場の相互作用の時間発展を記述するための閉時間経路形式が導入される。加えて有限密度系の長い時間にわたる振る舞いを決定する  $n$  点実効作用の技法が述べられ、特に2点実効作用からKadanoff-Baym方程式が導かれる。この方程式は、スカラー場の相関の時間発展を議論する際の基礎方程式であり、本論文の考察はこれに依拠するものである。

第4章及び第5章は、本学位論文の根幹を成す部分である。まず第4章で、初期宇宙におけるスカラー場の凝縮したモデルの基本的性質を抽出した現象論を展開し、「時間スケールの分離」を前提に、種々の状況に適用可能な粗視化した実効的方程式を導いている。そしてその上で、宇宙論的な時間スケールの下での基幹的な発展方程式を導出することに成功しており、第5章以後の議論は、この発展方程式を基礎として行われる。具体的には、まずインフレーション後の宇宙の再加熱温度について考察し、それが本論文での詳細な分析の結果、従来知られた結果とは大きく異なる可能性を指摘する。この差異は、再加熱過程の終了前における輻射の状況変化にも現れる。これとは別に、カーバトンの場合における軽い粒子との相互作用の効果を評価し、それがパワースペクトルや非線形パラメーターに大きな変化をもたらす可能性があることを論証している。

最後の第6章では、本論文の結論が述べられている。ここではさらに、本文では触れられなかった幾つかの別のモデルへの適用結果についての議論もなされ、それらを含めた本研究の意義が述べられるとともに、今後の関連研究の方向にも言及されている。また3つのAppendixでは、本論文での記法がまとめて掲載され、有限温度の場の理論、標準宇宙論と初期宇宙における熱力学、及び曲率零のFLRW計量の下でのスカラー場の取り扱いに関する技術的補足がなされている。

本論文の目的は、初期宇宙において極めて重要な役割を果たすと考えられているスカラー場の効果を、量子場の理論としての系統的な方法に基づいて、より一般的な基盤に立って詳細に分析することにより、初期宇宙の可能なシナリオや模型に関する新たな知見を

得ることにある。その典型例であるインフラトン場は、凝縮のポテンシャルエネルギーによってインフレーションを引き起こし、その結果、宇宙の一様性や平坦性問題を解決し、原始密度揺らぎを生成することが期待されている。またカーバトンの場合も、同様な原始密度揺らぎの可能性が指摘されている。その一方、これらのスカラー場は、輻射場との相互作用を通してインフレーション終了後の宇宙を適当な温度に再加熱しなければならないことが要請される。本論文の具体的な目標は、これらを吟味する上で基盤となるべきスカラー場の相関関数を定める基本的な発展方程式を導出することと、これを用いて上記のスカラー場と輻射場との相互作用の効果を分析し、インフラトンやカーバトンなど種々のモデルの中のスカラー場の役割を評価することの2つである。

これら2つの目標は、本論文では十分に達成されていると評価できる。まず一つ目の目標に関しては、スカラー場の相関を完全に定めるKadanoff-Baym方程式から、「時間スケールの分離」に基づいて粗視化した実効的な発展方程式を導くことに成功している。これは輻射との相互作用を散逸効果として考慮し、高温プラズマによる補正を取り入れたものであり、極めて汎用性の高い方程式である。この方程式に基づいてインフラトンの場合を考察した結果、再加熱の機構は輻射場との相互作用に大きく依存することが示される。特に再加熱温度の変化は、インフラトンが小さな質量を持ち、相互作用が強いパラメーター領域において劇的であり、これらは従来の比較的単純なインフラトン描像を大きく変革するものになっている。またカーバトンの場合も、高温プラズマがエネルギー散逸を早める効果を持つなど、種々の変化の可能性があることが指摘される。これらの結果は、2つ目の目標も同様に達成されていることを示している。

以上をまとめると、本論文の研究は、場の量子論的手法と現象論的な技法に基づいてスカラー場の初期宇宙における役割を考察したものであり、初期宇宙における素粒子相互作用の研究として十分に高いレベルにあり、また学位論文として優れた内容を持っているものと判断できる。

なお、本論文の第4章及び第5章の内容は、中山和則、諸井健夫、瀧本真裕の各氏との共同研究であるが、根幹部分は論文提出者が主体となって確立したものであり、応用部分の分析においても論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、論文提出者に博士（理学）の学位を授与できると認める。