

氏 名	はま 濱 ざき 崎 たかし 崇
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 1799 号
学位授与の日付	平 成 9 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 第 二 専 攻
学位論文題目	Evolution of Cosmological Perturbations in the Inflation Universe Scenario (インフレーションシナリオでの宇宙密度揺らぎの進化)
論文調査委員	(主 査) 教 授 佐 藤 文 隆 教 授 益 川 敏 英 教 授 九 後 太 一

論 文 内 容 の 要 旨

銀河などの空間分布や宇宙背景放射の温度揺らぎから読み取れる原始的密度揺らぎの振幅とスペクトルを定量的に説明することが宇宙の構造形成理論の主要な課題である。この原始揺らぎは一般相対性理論にもとづく一様等方宇宙モデルへの一次の摂動でその発展が解析される。

一方、インフレーション理論においては密度揺らぎの起源をスカラー場（インフラトン）の量子揺らぎによって説明しようとしている。インフレーション期において生成された密度揺らぎは空間の指数関数的膨張によって瞬時に超地平線スケールに引き延ばされ、フリードマン膨張期になるまで地平線のなかに再び帰ってくることはない。この密度揺らぎの超地平線スケールにおける発展を伴う際、密度揺らぎの断熱モードの発展方程式は長波長極限で厳密に解け、しかもその表式が非摂動の物理量だけで書かれている。したがって、もし長波長極限の表式が超地平線スケールにおける密度揺らぎの進化の良い近似になっているならば、非摂動の発展方程式の解から直ちに密度揺らぎの発展もわかる。この観点からするとスカラー場がポテンシャルをゆっくり転がる“引きずり期”とスカラー場のエネルギーが完全に輻射に転化した後の密度揺らぎの発展を簡単に知ることが出来る。このため、一般に状態方程式が正則でエントロピー揺らぎが無視できる場合の長波長極限の密度揺らぎの超地平線スケールにおける発展は既に解決済みの課題とみなされていた。

しかし、インフレーション期と輻射優勢期とを結ぶ再熱化の時期ではこれらの条件は両方とも満たされていない。申請論文はこの時期の揺らぎの発展を考察してこれまでの扱いの妥当性を検討したものである。再熱化の時期には、スカラー場がポテンシャルの最小値のまわりを振動しており、曲率ゆらぎと速度揺らぎとを組み合わせで作った Bardeen 変数に対する発展方程式に含まれる係数はスカラー場の時間微分が消える毎に周期的に発散する。このため長波長極限の厳密解に有限波数の効果を摂動論的に取り入れることができない。その上、再熱化の時期にはスカラー場と輻射が共存し、また前者から後者へのエネルギー輸送も存在するため、両成分の間にエントロピー揺らぎが発生する。このため、断熱モードの発展方程式

にはこのエントロピーモードによる付加項があらわれ、その影響は一般に無視できない。

そこで本申請論文では長波長極限の表式に対する有限波数による補正項とエントロピーモードによる補正項とを評価することで、再熱化の時期でも長波長極限の表式が密度揺らぎの超地平線スケールにおける発展の良い近似になっているかどうかを詳細に調べた。その結果、扱う変数の置き換えや常微分方程式の解の振る舞いに関する定理を援用することによって、従来の近似法はおおむね妥当であることを示した。

論文審査の結果の要旨

膨張宇宙の原始揺らぎをインフレーション説で説明しようとする試みは既に15年前にさかのぼるが、真空膨張期から輻射膨張期への変わり目である再熱化期での揺らぎ発展の取り扱いに不明確な点が残されていた。申請論文はこの点を詳細に検討し従来行われてきた取り扱いの適用限界を明解に示したものである。

この検討のために申請論文では揺らぎ発展方程式の書き換えを行っている。その一つは Mukhanov によって導入された平坦スライスにおけるスカラー場の揺らぎという意味を持つ変数の発展方程式を採用したことである。ここでは係数が正則で、有限波数による補正項の構造も単純なことから有限波数の効果を定量的に評価できる。一成分系では他のスカラー型摂動変数もこの変数に関数的に従属しているから、この変数の有限波数による級数解は他の任意のスカラー型摂動変数の有限波数による級数解に変換できる。したがって、発散的な状態方程式にも拘らず有限波数の効果は、ジーンズ長以上のスケールについては無視できることを定量的に示した。

次に、密度揺らぎの振舞いを、もとのスカラー場の WKB 近似してえられる完全流体として扱い、それが超地平線スケールにおいて高い精度で一致することを示している。この方法は多成分系への拡張を容易に可能にしている。

以上の準備に基づき申請者は問題をスカラー場完全流体と輻射の共存系として定式化し直した。スカラー場完全流体と輻射の共存系の動力学は、曲率揺らぎと全系の速度揺らぎ（断熱モード）と、二成分間に生じた密度揺らぎのずれ（エントロピーモード）と言う四変数で記述される。エネルギー輸送がスカラー場完全流体のエネルギー密度や局所的な宇宙の膨張率の関数として記述されるという仮定の下で導出されたエントロピーモードの発展方程式を見ると、これに断熱モードの変数が現れるときは必ず超地平線スケールの揺らぎを考えていることによる抑制因子を伴うためエントロピーモードの生成は抑制されることを示した。

次に再熱化期のエントロピーモード成長の上限を常微分方程式の一般論を用いて与えた。近年の論議では、スカラー場から輻射へのエネルギー変化がパラメータ共鳴のように局所的なスカラー場エネルギー密度や宇宙の膨張率の変化に対して急激な依存性を示す場合や、ボルン崩壊のようにそれらに対しては比較的穏やかな依存性しか示さない場合に対して個別になされていた議論が、これより一般的に扱われた。

これらの手法を用いた議論によって、エントロピーモードが断熱モードの進化に影響を与えないためには再熱化が一定期間以内に終了することが必要であることが示された。そして例えばカオティックインフレーションのモデルでは、再熱化が軽元素合成の前に終了すれば、断熱モードに対するエントロピーモードからの補正は極めて小さいことがわかった。これらの論拠から本申請論文では、エントロピーモードか

らの補正を無視して求まる長波長極限の厳密解が再熱化の時期においても、超地平線スケールにおける密度揺らぎに対しては、良い近似であることを結論している。これらは従来の論議に定量性を与えるものであり当該研究領域に寄与するものであり高く評価できる。

参考論文は何れもインフレーション理論や場の量子論に関するものであり、申請論文の基礎になっている。

よって、本論文は理学博士の学位論文として価値あるものと認めるものである。

なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について試問した結果、合格と認めた。