

氏名	す やま てる あき 須 山 輝 明
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 3120 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 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 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Analysis of the generation and evolution of inhomogeneities during preheating stage after inflation (インフレーション後のプレヒーティング期における非一様性の生成及び進 化の解析)
論文調査委員	(主 査) 助教授 田 中 貴 浩 教 授 畑 浩 之 教 授 中 村 卓 史

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は宇宙初期に起こったと考えられているインフレーション後の再加熱過程における物理現象の痕跡を探る理論的研究である。再加熱の時期を直接観測的に調べることは難しいが、理論的推論によって間接的に制限を加えることが可能である。再加熱現象に関しては近年プレヒーティングと呼ばれる複数のスカラー場間のパラメータ共振によってゆらぎの成長が支配されている時期が存在した可能性が指摘されている。このような現象はインフレーションを起こすインフラトン程度の軽い質量を持つ場が複数存在する場合にはかなり普遍的に起こる現象である上、非常にダイナミカルな現象であるためになんかの痕跡を現在の宇宙に残しているのではないかと考えられる。このような観点から、プレヒーティングによって生じたゆらぎを種に原始ブラックホールが形成される可能性と、このゆらぎ自身が構造形成の種となった密度ゆらぎを説明する可能性について議論した。

まず、原始ブラックホールについてであるが、宇宙の地平線サイズが生成されるブラックホールのサイズと同程度であった時期に、振幅が $O(1)$ のゆらぎが地平線サイズで存在する場合にブラックホールは形成されると考えられている。このような原始ブラックホールは僅かな割合であっても輻射優勢期に生成されると、その後の宇宙の発展で割合が増大し宇宙のエネルギー密度を支配する。そのため、原始ブラックホール生成は強く制限されている。原始ブラックホールを生成するような大振幅のゆらぎが生成される可能性がいくつかのプレヒーティングのモデルで指摘されていた。本論文では、このゆらぎの振幅の評価に関するこれまでの計算に存在していた曖昧さを数値シミュレーションを駆使することで克服している。結果として、パラメータ共振によって生成されるゆらぎには地平線サイズに及ぶような長距離の相関は生じないため、地平線サイズで平均化したゆらぎの振幅は抑制されること、また、そのためゆらぎの振幅は原始ブラックホール生成のしきい値を超えないということがはっきりとした。つまり、原始ブラックホールによってプレヒーティングのモデルが強く制限されることはないことがわかった。

プレヒーティング中の物理として、スカラー場のポテンシャルの2階微分が負になることによって生じるタキオン不安定性と呼ばれるゆらぎの増幅機構も考えられる。この場合にも原始ブラックホールが生成される可能性がある。本論文では同様に数値シミュレーションを用いた解析で、タキオン不安定によってゆらぎの振幅が大きくなる場合がありえることを明らかにした。ただし、その増幅されたゆらぎの振幅は線形摂動で計算したゆらぎの振幅を超えることはないということも同時に明らかにした。

最後に、プレヒーティングで生じるゆらぎが宇宙背景放射を通じて観測されている密度ゆらぎを説明する可能性についての研究では、特別なモデルにおいてはブラックホール生成のしきい値に比べると十分に小さいが、観測される密度ゆらぎを説明するには十分な振幅がプレヒーティング期に生成される可能性を示した。これは、密度ゆらぎ生成の全く新しい機構を与えるものとして注目に値する。

論文審査の結果の要旨

本論文は宇宙初期に起こったプレヒーティング期の物理を観測可能な物理量と関連付けるものである。プレヒーティングはインフレーションの後、インフレーションを起こしていたスカラー場の持つ真空のエネルギーが輻射に転化されるプロセスの前段階として、スカラー場の空間的一様成分が持つエネルギーがパラメータ共振などを通じてより短波長の成分へとカスケードしていくプロセスである。これは宇宙初期にかなり一般的に起こったと期待される現象である。これまでに、プレヒーティングを通じて大きなゆらぎが生成され、結果として多くの原始ブラックホールが生成される可能性が指摘されていた。そのようにして原始ブラックホールが生成されると観測と著しい矛盾が生じるため、プレヒーティングのモデルに対して強い制限がつく可能性があると考えられていた。

本論文では、プレヒーティングにおけるゆらぎの生成過程を数値シミュレーションし、そのプロセスにおいて長距離の相関を持った大振幅のゆらぎは生成されないことを示し、これまでの主張に誤りがあったことを明らかにしている。プレヒーティングは非線形の現象であるので数値シミュレーションによって、はじめてこのような事実を明らかにすることが可能になった。この計算結果を用いて、原始ブラックホール生成に必要とされるゆらぎの生成がほぼ不可能であることを結論している。この結論に至る議論は論理的にも堅実なもので信頼できると判断した。プレヒーティングの多くのモデルが原始ブラックホールの制限を免れて現実的なモデルの候補としての可能性があるということを示した点で、結論が与える学問的意義は大きい。

次にプレヒーティングの中でもタキオン不安定性が重要な役割を果たす状況に関しても議論をおこなっている。ここでも数値シミュレーションを駆使することで、これまで提案されていたゆらぎの成長の可能性をきっぱりと否定し、単純な線形摂動による評価がゆらぎの振幅として可能な最大値を与えるという明解な結論を得ている。数値シミュレーションの結果をきちんと整理し解析し、計算結果の意味するところを簡潔な主張にまで高めている点は高く評価できる。

一方、構造形成の種になるような、より長波長で小さい振幅のゆらぎに関してもおもしろい結論を導き出している。この計算では、これまで考えられていたゆらぎの生成機構は原始ブラックホールの場合と同様にはたらかないということを明らかにした上で、全く別の種類のゆらぎの生成機構があり、観測と矛盾しない振幅を与えることが可能であることを示している。この新しいゆらぎの生成機構は複数のスカラー場のもつカオス的なダイナミクスに起因するもので、この発見の独自性は高い。

以上の点を総合して、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認めた。加えて、論文内容とそれに関連した試問の結果、十分な理解があることが確認され、合格と認めた。