

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

Fundamental problems in the generation of
primordial perturbations

初期ゆらぎの生成に関する基礎的問題

申 請 者

浦川	優子
Yuko	Urakawa

物理学及応用物理学専攻・宇宙物理学研究

2 0 0 9 年 1 2 月

近年の宇宙背景輻射（CMB）や大規模構造（LSS）の観測に代表される宇宙論的観測の技術向上に伴い、宇宙の姿は精密科学として議論することが可能となった。宇宙の進化過程は、地上実験では検証できない高エネルギー状態の物理法則や超マクロな宇宙論的スケールの物理法則に大きく依存する。従って、宇宙の精密観測によってこのような極限的な状況における物理法則を明らかにすれば、宇宙論のみならず物理学の大きな進歩に繋がると考えられる。

ビッグバン宇宙論は、観測と整合的な宇宙の膨張則、3 Kの宇宙背景輻射、及び軽元素量を説明することにより、標準理論としての地位を確立した。しかし、ビッグバン宇宙論に基づいて現在の宇宙を理解するには、宇宙の初期条件を非常に高い精度で微調整する必要がある。この初期条件の不自然さを解決すべく提案されたのがインフレーション理論である。ビッグバン元素合成の時期よりもはるか以前に加速膨張期があったと考ええると、より普遍的な初期条件の下で、空間的にはほぼ一様等方な現在の宇宙の幾何構造を説明することができる。また、現在の大規模構造の種となる初期ゆらぎを生成できる点も、インフレーションの魅力の一つである。しかし、インフレーション理論は基本的枠組みにおいては大きな成功を収めているものの、その現実的モデルの構築に於いては多くの課題が残されている。その最大の要因としては、インフレーションは現在の高エネルギー加速器実験によって到達可能なエネルギースケールよりも遥かに高いエネルギースケールで起こったと考えられるため、インフレーション時の宇宙を記述する理論には不確かさや不定性が多く残されていることが挙げられる。その事実を反映し、現在までに膨大な数のインフレーションモデルが提案されてきた。

こうした状況を打開する切り札として期待されているのが、CMBやLSSなどの精密観測を通じて、インフレーション期に生成されたゆらぎを観測的に明らかにすることである。この初期ゆらぎにはインフレーションモデルの情報が刻まれており、ゆらぎの詳細な解析によって、インフレーションのダイナミクスが明らかになると期待されている。インフレーションを起こすスカラー場の量子ゆらぎによって生成された密度ゆらぎは、急速な宇宙膨張によって引き延ばされ、宇宙の構造の起源となる古典統計的なゆらぎとなると考えられる。そのゆらぎの振幅は 10^{-5} 程度と非常に小さいため、線形摂動で十分よく近似される。しかし、線形解析の範囲内でゆらぎの2点相関を考えると、異なる理論に基づいて提唱された多くのインフレーションモデルが、観測と整合的なゆらぎを予言する。このモデルの縮退を解くためには、3点以上の相関関数によって特徴づけられる非ガウス性やループ補正といった非線形効果に着目することが必要となる。特にゆらぎの3点相関関数については、既に観測的制限を議論することが可能な段階に入っており、3点相関を特徴づける無次元パラメーター f_{NL} に対するWMAPの制限から、実際にいくつかのインフレーションモデルが棄却され始めている。観測精度の向上に伴い、初期ゆらぎについてより多くの情報を得ることが可能となったが、そ

の一方でインフレーション中のゆらぎの生成機構については、いくつかの根本的な問題が残されている。インフレーション中に生成されるゆらぎのループ補正は、紫外だけでなく赤外でも発散することが知られている。しかしながら、その正則化の手法については膨張宇宙において場の理論を考える際に直面する原理的な困難のために、これまであまり議論されていなかった。しかし、インフレーションについてより精密な情報を得るためには、各モデルにおいて生成されるゆらぎを正しく評価する必要がある。そのために、ゆらぎの正則化の問題は避けて通れない重要な課題である。そこで本論文では、まず赤外発散の正則化の手法を提案し、その正則化が観測されるゆらぎにどのような影響を及ぼすのか明らかにした(Ⅰ)。また、紫外発散の正則化が観測量に及ぼす影響についても解析した(Ⅱ)。

宇宙論的観測により明らかにされることが期待されるのは、インフレーションの機構やその背後にある高エネルギーの理論だけではない。**Newton** 重力の拡張として **Einstein** によって提案された一般相対性理論は、非常に高い精度で、太陽系近傍の実験・観測と整合的であることが確かめられている。**CMB** や **LSS** などの観測データを、一般相対性理論に基づいて解析すると、現在の宇宙の大部分は暗黒エネルギー(73%)及び暗黒物質(23%)と呼ばれる未知の“物質”によって占められていることがわかる。こうして解析された観測データは、素粒子標準理論に含まれない未知の“物質”の存在を示唆していると考えられる。しかし一方で、ここでの解析の際に課された前提条件に誤りがあった可能性についても、十分議論する必要がある。特に、一般相対性理論が宇宙論的なスケールでも成り立っているのかについては、実験的検証は非常に困難であり、もし大きなスケールで重力理論が変更されている場合には、観測データの解析はそれに応じて修正する必要がある。実際、一部の修正重力理論では、暗黒エネルギーや暗黒物質を導入しなくても、いくつかの観測を説明できることが示されている。こうした縮退を解き暗黒エネルギーや暗黒物質の正体を解明するためには、より多くの観測データを蓄積し、これらを詳細に解析することが必要となる。本論文では、暗黒エネルギー及び暗黒物質に対する観測的制限についても調べている(Ⅲ)。

以上が、本論文で述べる著者が行なった研究Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの背景と動機であり、第1章にまとめている。本論文は全11章から構成され、第2章以降の各章の概要は以下に述べる通りである。第2章では、標準ビッグバン理論についてまとめ、第3章ではビッグバン理論では説明できない初期条件の不自然さに関する問題を概観した後、インフレーション理論ではこれらの問題がどのようにして回避されているのかを述べた。第4章では、現代の宇宙論の基礎となる一様等方宇宙における摂動論について整理し、第5章では密度ゆらぎや **CMB** の温度ゆらぎの解析方法を述べ、これらの定式化をもとに **LSS** や **CMB** の温度揺らぎなどの観測デー

タを用いて、宇宙モデルに対する観測的制限を議論した。この章では、まずこれまでの研究について概観した後、著者が行なった研究Ⅲについてまとめた。研究Ⅲでは、宇宙初期には暗黒物質として振る舞い、現在に近づく暗黒エネルギーとして振るまう統一モデルに対する観測的制限を調べた。ここで考えたモデルは現象論的なモデルではあるが、現代宇宙論の最大の謎である暗黒エネルギーと暗黒物質を一つの場の異なる側面として統一的に記述することができれば、宇宙をより簡単に記述できるため、その観測的整合性を議論する意義は十分ある。しかし、ここで考えた統一モデルに於いては、銀河分布を観測した SDSS のデータと整合的な密度ゆらぎを与えるようにモデルのパラメーターを選ぶと、大スケールの温度揺らぎが CMB の観測と矛盾してしまうことがわかった。

第6章から第10章では、本論文の主題であるインフレーション中のゆらぎの生成及びその基礎的問題について議論した。第6章では、膨張宇宙における場の量子論の基礎的な事項をまとめた後に、線形摂動論に基づくゆらぎの2点相関の解析方法をまとめた。これをもとに、WMAP 衛星がこれまで明らかにしてきた初期揺らぎの性質とそこで示唆されるインフレーションのダイナミクスについてまとめた。第7章では、紫外発散の正則化に関する研究Ⅱについてまとめた。ゆらぎの2点相関は、線形解析の範囲内でも、2点が一致する極限において発散することが知られている。そこで、研究Ⅱでは一致極限で現れる紫外発散の正則化によって、観測するゆらぎがどのような影響を受けるのかを調べた。その結果、正則化の際に2点相関に導入された正則化因子は、宇宙膨張とともに無視できる程度に小さくなり、観測量に影響を及ぼさないことがわかった。第8章以降では、初期ゆらぎに対する非線形効果について議論した。第8章では、WMAP による非ガウス性に対する観測的制限を概観した後、古典的なゆらぎの成長についてまとめた。また、量子的なゆらぎの生成についてまとめた後、標準的な摂動論に基づいて計算されたループ補正は紫外だけでなく赤外でも発散していることを説明した。第9章及び第10章では、赤外発散の正則化に関する研究Ⅰについてまとめた。第9章では、標準的な摂動論に基づいて計算されたゆらぎは、特に非線形効果を考えると、実際に我々が観測する揺らぎとは大きく異なることを示した。次に、一成分のスカラー場を含むインフレーションモデルにおいて、観測量となるゆらぎの計算方法を与え、有限時間継続するモデルを考える限りこのゆらぎは赤外発散を生じないことを示した。第10章では、多成分系へ拡張しより一般的なモデルに於いてゆらぎの正則化の方法を与えた。これらの研究より、インフレーションモデルの情報を含むループ補正を計算することが可能となった。

最後に第11章では、本論文の結論と今後の展望についてまとめた。