

初期宇宙におけるインフレーション理論とゆらぎの生成

中村研究室 中村 優

宇宙を物理学として扱うことを可能としたのは1916年に発表された一般相対性理論である。一般相対性理論のアインシュタイン方程式を宇宙全体に適用したフリードマンの解や、ハッブルの法則の発見によって、宇宙が定常的ではなく膨張していることが示唆され、さらに元素の起源に対する考察から、宇宙は高温高密度の状態から始まるとするビッグバン理論が提唱された。その後の宇宙マイクロ波背景放射の発見によってビッグバン理論は広く支持され、現在、標準理論とされている。

ビッグバン理論は現在観測されている宇宙をよく説明するが、宇宙マイクロ波背景放射が非常に高い精度で一様であることから、因果関係を持たないはずの領域が同じ性質をもつという地平線問題と、宇宙の曲率が不自然なほどゼロに近いという平坦性問題の2つが説明できない。そこで、これらの問題を解決する理論としてインフレーション理論が提唱された [1,2]。

インフレーション理論とは、初期宇宙で指数関数的な膨張が起きるとする理論の総称であり、ビッグバン理論の問題点を解決できるほか、宇宙の構造形成や背景放射の温度ゆらぎを、宇宙初期のゆらぎに由来するものとして説明できるため、初期宇宙を記述する理論として有力視されている。

本発表では、インフレーション理論の概要について説明する [3,4]。まず、ビッグバン理論の抱える2つの問題がどのように解決されるかについて議論する。平坦性問題については、フリードマン方程式

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

において、宇宙が指数関数的な膨張をする場合に曲率 K が指数関数的にゼロに漸近することから解決される。ここで、 a は宇宙の大きさの尺度を表すスケール因子、 ρ はエネルギー密度、 G は万有引力定数である。また、地平線問題については、インフレーションの初期に地平線の中にあった領域が指数関数的な膨張によって地平線の外まで引き離され、インフレーション後の宇宙の減速膨張によって再び地平線の中に入ることにより、現在の地平線を超えて因果律を持つことが可能になることで解決される。

次に、インフレーションの有力なモデルの1つとして、インフラトン場と呼ばれるスカラー場 ϕ が一時的に真空のエネルギーを持ちアインシュタイン方程式の宇宙項の役割を果たすことでインフレーションを起こす系を考える。ここで ϕ は運動方程式

$$\ddot{\phi} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{\phi} + \frac{dV(\phi)}{d\phi} = 0$$

に従う。 $V(\phi)$ はスカラー場のポテンシャルエネルギー、 $\dot{\phi}$, $\ddot{\phi}$ は ϕ の1,2階の時間微分である。スカラー場の変化は、ビッグバン理論の2つの問題を解決するのに十分な空間の膨張に要する時間持続する必要がある、これがスローロール・インフレーションと呼ばれる。この仮定の下で運動方程式を解き、スカラー場がインフレーションを起こす機構について説明する。

最後に、インフレーション理論の検証について議論する。インフレーションにより生成される初期ゆらぎが宇宙膨張によって引き延ばされたものを原始ゆらぎと呼び、その中にはインフラトン場のゆらぎを起源にもつ原始密度ゆらぎと、計量のゆらぎを起源にもつ原始重力波の2種類が存在する。原始密度ゆらぎは観測された背景放射の温度ゆらぎとよく一致し、インフレーションを裏付ける証拠のひとつとなっている。また、原始重力波の観測はインフレーションの決定的な証拠になると期待されており、さらにインフレーションモデルの特定に大きな役割を果たし得ることを示す。

[1] K. Sato, Monthly Notices of Royal Astronomical Society, **195**, 467 (1981)

[2] A. H. Guth, Phys. Rev. D **23**, 347 (1981)

[3] 松原 隆彦, 宇宙論の物理 (下), 東京大学出版会 (2014)

[4] V. F. Mukhanov, H. A. Feldman, and R. H. Brandenberger, Phys. Rep. **215**, 203 (1992)