HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Analytical Study on Cosmological Perturbations with Exact Solutions [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	佐々木, 伸
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第13908号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78433
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Tadashi_SASAKI_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（理　学）　氏　名　　佐々木　伸

学 位 論 文 題 名

Analytical Study on Cosmological Perturbations with Exact Solutions
（厳密解に基づく宇宙揺らぎの解析的研究）

20 世紀初頭の E. Hubble の発見およびその後の宇宙背景放射(CMB)の発見などにより、Einstein の一般相対性理論に基づく宇宙論の研究はこれまでに大きな成果を残してきた。特に、我々の宇宙が十分大きなスケールではほぼ一様かつ等方な空間であるということが、現在までの宇宙膨張の歴史を理解する上で根幹を成している。一様等方宇宙の膨張は Friedmann 時空に完全流体が存在する模型によって記述されるが、この模型は現在までに得られた観測事実と非常によく整合している。しかしながら、宇宙の一様等方性そのものがどういった原因で生じたのかということや現在の空間が何故平坦なのかといったことについて、このいわゆるビッグバン宇宙論では合理的な説明ができない。このような問題意識から現在まで精力的に研究されてきている理論がインフレーション模型である。インフレーション模型では高温高密度のビッグバン状態以前に宇宙が指数関数的な加速膨張をしたものと考える。このような加速膨張後には自然に一様等方性や平坦性が実現される上に、インフレーション期の量子場の揺らぎがその後の宇宙の密度揺らぎの起源になると考えることができ、標準的なインフレーション模型で予言される揺らぎのスペクトルが CMB の観測結果と整合していることが知られている。

一方で、重力波の直接観測が近年現実のものとなったことにより、重力波を用いて初期宇宙を探索することが近い将来に可能になると考えられている。上述の CMB をはじめとして、これまでの宇宙論の基礎となっているデータは本質的に電磁波の観測によるものである。しかしながら、ビッグバンからおよそ 38 万年後までの初期宇宙は原理的に電磁波による観測は不可能である。それに対して重力波はそのような制約を受けないため、従来は観測不可能であった過去まで遡って直接初期宇宙について調べることが可能になると考えられている。前述のインフレーション理論においても重力波が発生すると考えられており、重力波観測はインフレーション理論の検証という観点からも重要である。

以上のインフレーション模型での量子揺らぎや重力波は一様等方な Friedmann 時空上の線形摂動として扱われるが、線形摂動の時間発展方程式は宇宙に存在する流体の成分を 1 成分に限定した場合を除いて解が得られておらず、これまでは何らかの近似手法や数値計算が用いられてきた。

本論文では上述の観点から、宇宙論における線形摂動の時間発展方程式について、これまでに解かれていない複数の流体成分が存在する状況下での厳密解の構成と、その物理的な含意について考察を行った。

まず、厳密解の構成にあたっては、R. Burger らが楕円関数を係数にもつ線形常微分方程式の解析で用いた手法を応用した。本論文で扱う時間発展方程式は 2 階線形常微分方程式であるが、この手法ではこの方程式そのものを扱う代わりに、2 つの解の積が従う 3 階線形常微分方程式を解析する。一般に宇宙論での線形摂動の時間発展方程式は減衰振動をする解を持っているが、対応する 3 階の微分方程式にはこの減衰振動の振幅の時間変化のみを表す解が存在し、そのため元の 2 階の微分方程式の解と比べて非常に単純な形の解が存在しうる。はじめに、空間曲率と 4 種類

の流体成分を任意の割合で含めた状態でこの 3 階の微分方程式を解析し、宇宙の大きさを表すスケールファクターについて多項式解が存在するための条件を調べた。その結果、残念ながら全ての成分を含む状態では多項式解が存在しないことが明らかになった一方で、空間の曲率と他に特定の組み合わせの 2 種類の流体を含む場合の多項式解が 4 種類得られた。本論文ではこのうち物理的に有意義と考えられる 3 種類について考察を行った。これらの解は減衰振動の振幅を表しているが、この振幅を用いてもとの 2 階微分方程式の厳密解の構成を行った。

1 つ目の解に関しては相対論的な物質流体を含まないものの、非相対論的な物質、空間曲率、そして、宇宙定数を含むため、宇宙膨張が進み温度がおよそ 10^4K を十分に下回ってからの重力波伝搬を記述する解である。この厳密解は Weierstrass の楕円関数を用いて表されているが、流体成分を 1 種類に限定する近似を考えるとこれまでに知られていた初等関数による解と一致することが確かめられた。また、この重力波のエネルギースペクトルの厳密な評価式の導出も行った。その結果、重力波の振動数が十分大きい極限ではこれまでに知られていた近似解による表式と一致する一方で、大きな効果ではないものの、宇宙定数や空間曲率によってスペクトルが受ける補正を評価することができた。

2 つ目の解は、1 つ目の解における宇宙定数の代わりにエネルギー密度がスケールファクターに反比例するような物質が含む状況での重力波を表す。このような物質は標準的な宇宙論には含まれないものの、近年議論されている、時間変化するダークエネルギー(クインテッセンス)模型と見なすことができる。この重力波解に対するエネルギースペクトルを計算し前述の解のスペクトルと比較したところ、現実的に近い将来に実現可能な重力波観測器での周波数域では、これら 2 つのスペクトルの差は非常に小さいことが明らかになった。

3 つ目の解に関しては、1 つ目の解における非相対論的な物質の代わりに相対論的な物質流体を含む状況での摂動の時間発展を表す解である。これを、標準的なインフレーション以前に相対論的な物質流体が支配的な減速膨張期が存在する初期宇宙モデルと考えた。類似のモデルを考えた先行研究はいくつか存在するが、相対論的物質は含むものの空間は平坦と仮定しているか、逆に空間曲率を考えたものの相対論的物質は含まないモデルであり、本論文でのモデルはこれら 2 つの状況を包含するものになっている。この時空でのスカラー場の量子化を考えた。この際、標準的なインフレーションモデルで用いられている量子場の真空状態との差異から生じる重力的粒子生成について議論した。また、スカラー場の揺らぎによるエネルギー密度の計算も行い、特にインフレーション後にも残りうる宇宙定数への寄与が、空間曲率によるエネルギーと相対論的な物質によるエネルギーとの関係に依存して、その符号が変わりうることを示した。最後に、インフレーション後の密度揺らぎを標準的なインフレーションモデルによる結果と比較し、それが CMB の観測結果に与えうる影響について議論した。