

論文の内容の要旨

Gravitational waves induced by scalar perturbations in the early Universe

(初期宇宙におけるスカラー揺らぎを起源とする重力波生成)

氏名 猪又 敬介

重力波は天体の性質を調べるためだけでなく、初期宇宙を探るための重要な観測量となりうる。例えば、インフレーション中に量子揺らぎから生まれたとされる原始重力波、宇宙ひもから生成される重力波、および宇宙が一次相転移を経験する際に生成する重力波など、多くの種類の重力波が初期宇宙で生成されると考えられている。

本論文では、初期宇宙においてスカラー揺らぎが生成する重力波に焦点を当てる。

スカラー揺らぎはこれまで宇宙に関する多くの情報を我々にもたらしてきた。特に宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background: CMB)の揺らぎや宇宙の大規模構造(Large scale structure: LSS)の観測を通してスカラー揺らぎの性質を調べることで、我々は精密に宇宙の進化を議論できるようになった。スカラー揺らぎはインフレーション中の量子揺らぎから生成されたと考えてられているため、その性質を調べることは初期宇宙に存在したとされるインフレーション期の詳細を解き明かすことにつながる。

しかしながら、CMB揺らぎやLSSの観測で調べられるのは、およそ波長が1Mpc以上の大スケール揺らぎである。その理由としては、小スケールのCMB揺らぎが拡散減衰(シルク減衰)の効果で光子脱結合のタイミングではすでに均されてしまっていることや、小スケールのダークマター揺らぎが非線形になってしまうためにLSSから小スケール揺らぎの情報を引き出すのが難しいということが挙げられる。

その観測的困難にも関わらず、小スケール揺らぎは現代宇宙論の最も熱いトピックの一つとなっている。例えば、大きな振幅をもつ小スケール揺らぎは原始ブラックホールを生成する。そして、原始ブラックホールはダークマターやLIGO/Virgoの重力波観測で見つかった30太陽質量ほどのブラックホールの有力な候補として注目を浴びている。そのため、小スケール揺らぎをいかにして調べるかを議論することは宇宙論における最も重要な課題の一つと言える。

スカラー揺らぎは非線形レベルでのテンソル揺らぎとの結合を通して重力波を生成する。重力波は一旦生成してしまえば、拡散減衰で均されてしまうスカラー揺らぎと異なり、現在まで生き残る。したがって、このような重力波を使えば、今までCMBやLSSの観測で調べるのが難しかった(波長が1Mpcよりも小さい)小スケール揺らぎを調べることができる。それゆえ、多くの研究者がこの種類の重力波から初期宇宙の情報を引き出すようとしている。本論文では、特に小スケール揺らぎの振幅および初期物質優勢期の観点からこの種類の重力波を詳しく議論する。

小スケール揺らぎの振幅の観点からは、将来の重力波観測でどのスケールのどれほどの

振幅の小スケール揺らぎが調べられるかを明らかにする。小スケール揺らぎの振幅はインフレーションモデルの詳細に密接に関係しており、例えばそれが原始ブラックホールをほとんど生成しなくても、その振幅は初期宇宙の重要な情報を持っている。本論文では、先行研究で使われていた間違っただ関係式を正し、さらに、将来観測の感度曲線およびスカラー揺らぎのパワースペクトルの形を注意深く考慮し議論する。

初期物質優勢期の観点からは、初期物質優勢期が重力波のスペクトルに対して与える影響を調べる。初期物質優勢期はインフレーションを起こす場であるインフラトンのインフレーション後のコヒーレントな振動で実現されるため、初期物質優勢期を調べることは初期宇宙の発展の理解につながる。本論文では、先行研究では考慮されていなかった初期物質優勢期から放射優勢期への遷移中の揺らぎの発展に焦点を当て、議論を進める。揺らぎの発展はその遷移の詳細に大きく依存するため、遷移がゆっくりと起きる場合と突然起きる場合の二つのケースを具体例として考える。そして、遷移がゆっくり起きる場合ではスカラー揺らぎが遷移中に減衰し、それに起因して生成する重力波が(先行研究に比べ)小さくなるということを示す。一方、遷移が突然起きる場合では、遷移後のスカラー揺らぎの速い振動のために、遷移後に非常に大きな重力波が生成されるということを示す。