

# Inflationary scenarios with primordial magnetic fields and gravitational waves

上田, 和茂

<https://hdl.handle.net/2324/6787405>

---

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (理学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 上田 和茂

論 文 名 : Inflationary scenarios with primordial magnetic fields and  
gravitational waves  
(原始磁場と原始重力波が共存するインフレーション理論)

区 分 : 甲

### 論 文 内 容 の 要 旨

宇宙初期に急激な膨張があったとするインフレーション理論は、ホライズン問題や平坦性問題などのビッグバン宇宙論の問題点を解決する機構として1980年代初頭に導入された。この理論によると、現在の宇宙の大規模構造の起源は、インフレーションを引き起こしたインフラトンの量子揺らぎと考えられている。その予言は、宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎや銀河分布の精密観測によって裏付けられている。このようにインフレーション理論は現象論的に成功している。しかし、肝心の宇宙初期の揺らぎが量子起源であることの証明は未だなされていない。

インフレーション理論は、宇宙の構造形成の種となったスカラー揺らぎだけでなく、時空の量子揺らぎに起因する原始重力波の存在も予言する。2015年のLIGOによるブラックホール連星系からの重力波の発見以来、原始重力波の検出は最も重要な研究課題となっている。将来的な観測によって原始重力波が見つかった場合、インフレーション理論を強く支持すると考えられている。特に原始重力波の量子的性質を観測できれば、それは重力子の発見をも意味する。そのため、原始重力波を検出するための実験プロジェクトがいくつか存在する[S. Kawamura et al. (2011), Pau Amaro-Seoane et al. (2013)]。インフレーション中の激しい粒子生成によって、重力子の量子状態はスクイズされた状態になると考えられている。ゆえに、重力子のスクイズ状態の証拠を見つけることができれば、原始重力波の量子的性質を証明できると考えられる。これまで、Hanbury Brown-Twiss 干渉計を使用し、強度・強度相関を測定することによって、非古典的な粒子を古典的な粒子から区別する方法など[S. Kanno et al. (2018)]、スクイズ状態を使用して非古典的な原始重力波を検出するためのいくつかのアイデアが提案されている。

インフレーションを経た重力子は、環境による影響が存在しない限り、今日までスクイズ状態を維持すると考えられる。しかし、インフレーション中に重力子が物質場と相互作用した場合は、スクイズ状態を維持できなくなる可能性がある。従って、環境の影響を考慮することは、原始重力波の量子性を捉える上で重要な課題である。最も重量な環境の候補としては、宇宙磁場が考えられる。銀河系にはマイクロガウス程度の磁場が存在することは良く知られている。観測によると、銀河間にも小さいながらも宇宙磁場が存在していると信じられている。実際、ガンマ線の観測は、宇宙磁場の存在なしでは説明できないことが示されている[S. Ando et al. (2010)]。その大きさは $10^{-16}$ ガウスから $10^{-9}$ ガウスであり、そのコヒーレンス長はメガパーセクを超えていると言われる。このようなコヒーレンス長の宇宙磁場をつくる機構としては、インフレーション以外は考え難い。すなわち、宇宙磁場の起源はインフレーション中に生成された原始磁場であったと考えられる。

インフレーション中に原始磁場が生成された場合、重力子から光子への転換、およびその逆の転換を引き起こす可能性がある[M. E. Gertsenshtein. (1962)]。そこで本論文では、原始磁場によ

って引き起こされる、重力子・光子転換による原始重力波への影響を考察した。特に、重力子のスクイーズ状態がどのように変化するかを、磁場が宇宙膨張によって急速に減衰する場合と、ゆっくりと減衰する場合について調査した。

磁場がインフレーション期に急速に減衰するモデルでは、重力子のスクイーズ状態への重力子・光子転換による影響は限定的であることが分かった。これは、インフレーションによって原始磁場が急激に減衰することで、重力子・光子転換による光子・重力子ペアが減少し、最終的に重力子のみスクイーズ状態になるためである。

一方、インフレーション中に磁場がゆっくり減衰するモデルでは、重力子はスクイーズ状態を維持できない可能性がある。つまり、原始磁場がインフレーションにより急速に減衰する場合は、重力子のみが強くスクイーズされるのに対して、磁場がゆっくり減衰する場合は光子も同様に強くスクイーズされ、この場合の重力子の量子状態への影響は非自明であった。そこで、インフレーション中にゆっくりと減衰する原始磁場の存在下で重力子の転換プロセスを研究し、重力子が今日までスクイーズされた状態を維持できるかどうかを調べた。その結果として、原始磁場が重力子・光子間の最大量子もつれ状態を生成し、重力子の量子状態はスクイーズ(純粋)状態ではなく、重力子と光子の混合状態となることが分かった。

これらの結果は、将来の原始重力波の観測結果を解釈し、重力波の量子性を示すときに重要な示唆を与えると考えられる。