

初期宇宙において生成される重力波についての理論的考察ならびにその観測手段について

日大生産工 ○ 姫本 宣朗

1 研究目的

重力波とは、重力場の時間的変動によって生ずる空間を伝播する時空の歪みであり、一般相対論によってその存在が予言されているものである。現在、その重力波を捉えようと、世界の各地で検出器の建造、または計画が活発化しており、宇宙を見る新しい窓として大いに期待されている。

観測されるであろう重力波は、超新星爆発のような星の動的活動によって生成されるパルス的で波形が特定できるものと、位相がランダムで特徴的な波形を特定できないものとの大別できる。後者の中で特に我々の宇宙に様に存在しているものは、背景重力波と呼ばれ、宇宙の誕生やその後の進化を研究する上で、極めて重要な情報を含んでいる観測量と考えられている。

初期宇宙の記述まで含めたこれまで宇宙論の研究は、ビッグバンの名残である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測と共に発展してきた。しかしながら、電磁相互作用の関係から、CMB は光の最終散乱面 (宇宙の晴れ上がり：宇宙が誕生して約 38 万年ごろ) までの光しか見ることができない。一方、重力波にとっての宇宙の晴れ上がりは、プランク時間 ( $10^{-43}$  秒) である。なぜなら重力は自然界の4つの力の中で最もかつ極端に相互作用が弱いからである。そのため、重力波が宇宙誕生の瞬間の情報を直接的に担っているということになる。

このような観点から、背景重力波を観測手段とする観測的初期宇宙論を構築することを目指してきた。本講演では初期宇宙起源の背景重力波の生成メカニズム、ならびにその検出方法についてこれまでの研究成果を報告する。

2 研究内容

理論的に背景重力波のシグナルは、非常に微弱な

観測量であると予想されており、現在建設中の検出器では感度が足りないと推定されている。しかしながら、次世代検出器として宇宙で重力波観測を行う「スペースレーザー干渉計計画」が日<sup>1)</sup>・米<sup>2)</sup>で着々と進められており、背景重力波の観測実現性は、一步一步着実に前進している。このような現状をふまえて、次世代検出器を考慮に入れた効率のよい観測データの解析方法について研究を行った。

2-1 背景重力波検出のための統計処理について

宇宙のあらゆる方向から定常的にやってくる背景重力波は統計量として扱われる。基本的に、検出器の雑音に埋もれてしまう背景重力波は、複数台の検出器から得られる観測データを使い、その相関関数を統計量として検出の判定を議論する。これまでの多くは、観測量ならびに検出器のノイズの統計的性質に対して、ガウス性を仮定した議論がされてきたが、現実には非ガウス性が現れることがわかっている<sup>3)</sup>。このような状況のときの最適な相関関数は、もはやガウス分布の場合のそれとは違うことがわかっている。本研究では、非ガウス性をもつ検出器のノイズのモデルとして、

$$p(x) = \frac{(1-P)}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} e^{-x^2/2\sigma_m^2} + \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-x^2/2\sigma_t^2} \quad (1)$$

のような確率分布関数を採用し、二台の検出器の観測データから構成する標準的な相関関数 (SCC) と非ガウス性を考慮に入れた場合に最適と考えられる改良型の相関関数 (GCC) を使って、それぞれの検出効率について比較した<sup>4)</sup>。ここで (1) 式の右辺第一項が main パートのガウス分布であり、第二項が tail パートのガウス分布である。P は二つのパートの比率 ( $0 \leq P \leq 1$ ) を表しており、 $\sigma_m^2$ 、 $\sigma_t^2$  はそれぞれのガウス分布の分散で、 $\sigma_m^2 < \sigma_t^2$  の関係がある。すなわちこの確率分布関数は、2成分ガウス分布と言える

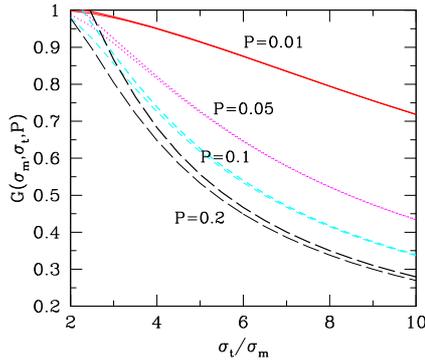


図1 非ガウス性に対する検出効率の振舞い

図1の縦軸は、 $G(\sigma_m, \sigma_t, P) = \epsilon_{GCC}^2 / \epsilon_{SCC}^2$  で与えられ、 $\epsilon_{GCC}$  と  $\epsilon_{SCC}$  のそれぞれは、GCC と SCC を用いて統計的に検出したと判定するシグナルの振幅の下限值である。非ガウス性の強さを表す  $P$  と  $\sigma_t/\sigma_m$  の値が大きくなるほど、 $G(\sigma_m, \sigma_t, P)$  の値が小さくなることからわかる。本研究によって SCC に対する GCC の検出効率のゲインを定量的に評価することができた。

### 2-2 背景重力波の起源の同定について

背景重力波を効率よく検出するためには、初期宇宙モデルに依存した背景重力波のスペクトルについても正確に予言することが重要になる。なぜならそのスペクトルが背景重力波検出のためのテンプレートになるからである。そこで実際に初期宇宙において相転移が起こった状況を仮定した中で、テンプレートに対する検出効率の依存性を signal to noise ratio (SNR) を評価して調べた<sup>5)</sup>。データ解析を行う際のテンプレートとなるスペクトルの関数  $\Omega_{\text{filter}}(f)$  は、相転移が起こった場合のスペクトル  $\Omega_{\text{gw}}(f)$  とフラットなスペクトル  $f^0$  (インフレーションによって生成され、相転移を考慮していない場合のスペクトル) を用いた。ここで  $f$  は振動数。

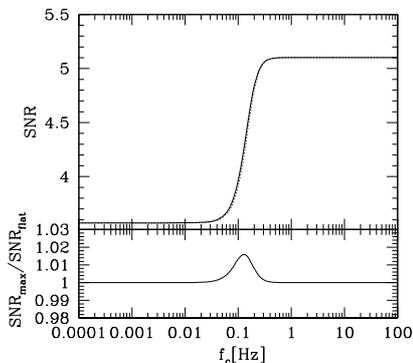


図2  $\Omega_{\text{filter}} = \Omega_{\text{gw}}$  の場合の  $\text{SNR}_{\text{max}}$  (上部実線) と  $\Omega_{\text{filter}} = f^0$  の場合の  $\text{SNR}_{\text{flat}}$  (上部点線) の比較図

図2は、日本のスペースレーザー干渉計計画で提案されている DECIGO を想定した場合の各  $\Omega_{\text{filter}}$  についての SNR の比較図である。定義から  $\Omega_{\text{filter}} = \Omega_{\text{gw}}$  のフィルターを使ったとき、SNR は最大の  $\text{SNR}_{\text{max}}$  になる。図2から 0.1Hz あたり (DECIGO の高感度領域) において各 SNR に違いが出てくるのがわかる。今後はこの量をもとに、背景重力波の起源の同定方法を開発していく予定である。

### 3 まとめ

初期宇宙の情報を豊富に担う背景重力波は、宇宙論・素粒子論にとって非常に大きな影響を与える観測量である。しかしながらその観測は非常に難しく、さまざまな工夫を凝らさなければならない。本研究では、統計処理からのアプローチで検出効率を模索してきたが、今後考えるべき手法はまだ残されている。一方、より現実的な初期宇宙モデルを追及していくことも、背景重力波を用いた観測的初期宇宙論を展開していく上で重要な研究テーマである。今回は標準的な宇宙モデルの中で調べてきたが、弦理論によって動機づけられるブレーン宇宙モデル<sup>6)</sup> などの高次元時空理論に基づいた宇宙モデルを探究していくことも今後の研究課題であると言及して、本稿を閉じることにする。

- 1) <http://tamago.mtk.nao.ac.jp/decigo/>
- 2) <http://lisa.nasa.gov/>
- 3) B.Allen et al., “Robust statistics for deterministic and stochastic gravitational waves in non-Gaussian noise”, Physical Review D65, 2002, p122002
- 4) Y.Himemoto et al., “Detecting a Stochastic Background of Gravitational Waves in the Presence of Non-Gaussian Noise”, Physical Review D75, 2007, p022003
- 5) T.Chiba, Y.Himemoto, M.Yamaguchi and J.Yokoyama, “Effective Search Templates for a Primordial Stochastic Gravitational Wave Background”, Physical Review D76, 2007, p043516
- 6) Y.Himemoto, “ブレーン宇宙とインフレーション理論”, 別冊 数理科学 量子重力理論, 2009, p106