

初期宇宙起源の重力波検出を目的とする最適化されたデータ解析の開発について

日大生産工 ○ 姫本 宣朗

1 研究目的

一般相対論は重力を記述する理論であり、その理論的帰結として得られるアインシュタイン方程式は、時空を特徴づけるメトリックとよばれる物理量に対する運動方程式を与えるものである。この方程式は、二階の偏微分方程式で与えられるが、背景時空を特徴づけるメトリックに対して小さな揺らぎを考えると、この微分方程式は波動方程式となり、小さな揺らぎは波としての解をもつ。この動的な時空の小さな揺らぎのことを重力波とよぶ。

我々は重力波を使って、電磁波に対する宇宙の晴れ上がり（宇宙誕生から約 38 万年後）よりずっと以前の初期宇宙を直接観測することが原理的に可能である。それは言わずと知れた、重力の相互作用が電磁気力のそれと比べて極めて弱いという理由からである。それゆえに、宇宙誕生間もないころに生成されたと考えられる初期宇宙起源の重力波をとらえることができれば、非常に高エネルギーであった初期宇宙の状態を直接的に垣間見ることができる。

このように宇宙誕生の瞬間にまで迫ることができる重力波を、初期宇宙論を展開するための究極の観測手段とすべく、重力波検出に向けたデータ解析の開発や、新たなインフレーション理論ならびに高次元宇宙モデルの提唱を行ってきた。本講演では、重力波検出に向けたデータ解析の最適化方法と新たな高次元宇宙モデルの可能性について報告する。

2 研究内容

本研究の目的である重力波を用いた初期宇宙論を展開していくためには、重力波のシグナルを常時取得できる態勢を整えておかななくてはならない。理論的に予想される初期宇宙起源の重力波のシグナルは、非常に微弱と考えられており、その検出には、次世代検出器の完成を待たねばならない。しかしながら、大型低温重力波望遠鏡（LCGT，東大宇宙線研

の建造に大型予算がついたことや、さらに宇宙を舞台にしたスペースレーザー干渉計（DECIGO(日本), LISA(米国)) の建造計画が活発になっていることから、次世代検出器を用いた背景重力波の観測は、そう遠くない未来と期待できる。そこでこのような重力波研究の現状をふまえて、現在、「1. 初期宇宙起源の重力波検出に特化した高効率な統計的手法のデータ解析の開発 2. 検出されるシグナルから初期宇宙起源の重力波を効率よく引き出すための方法」これら 2 点について研究を進めている。

2-1 高効率な統計的手法のデータ解析

全天方向から定常的にやってくる初期宇宙起源の重力波（背景重力波）は、統計量として扱われ、統計的な判定をもって検出の有無を判断する。前回の学術講演会¹⁾では、重力波検出器のノイズが、非ガウス性の確率分布をもつ場合の検出効率の特性について評価を行い、どのような統計量が検出にとって最適であるかについて議論を行った。その中で二台の検出器の観測データから構成した改良型相関関数（GCC）が最適であることが示された¹⁾。しかしながら、データ処理を行う上で GCC はコンピュータに対する負荷が大きいことが予想されるため、実際のデータ解析においては計算コストも考慮に入れたデータ解析の開発が望まれる。そこでこれらのことを考慮に入れた相関関数 Λ_{ACC} （ACC:Artificial-cutoff Cross Correlation）、

$$\Lambda_{ACC} \propto \sum_{j=1}^{N_{cut}} s_{1,j} s_{2,j} \Theta(x_{cr,1} - |s_{1,j}|) \Theta(x_{cr,2} - |s_{2,j}|)$$

を新たな統計量として定義し、その有効性を検証した³⁾。ここで $s_{i,j}$ は観測量、 $x_{cr,i}$ はそれぞれの検出器における cutoff parameter、 N_{cut} は $x_{cr,i} - |s_{i,j}| > 0$ を満たす観測点の数である。

Developing a data analysis for a Primordial Stochastic Gravitational Wave Background

Yoshiaki Himemoto

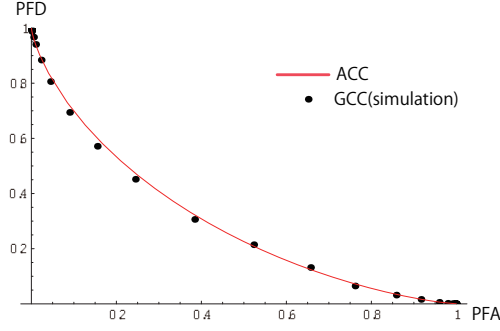


図 1 PFA-PFD 曲線

図 1 は ACC と GCC の検出効率を比較するものである。PFA(Probability of False Alarm) とは信号がないのに「ある」と主張する間違いをする確率であり、PFD(Probability of False Dismissal) とは信号があるのに「ない」と主張する間違いをする確率である。これらのエラーに関する確率をできるだけ小さくさせるような相関関数が、背景重力波を効率よく捉えるための統計量といえる。図より、解析的に導いた ACC の場合の PFA-PFD 曲線は、シミュレーションから得られた GCC のそれと同程度のものであることが確認できる。ACC は計算コストを減らすことができる統計量として十分に最適であることが示された。

2-2 高次元宇宙モデルについて

一般的に背景重力波の起源には、天体起源のものと初期宇宙起源のものと考えられる。それゆえに検出したシグナルが、どちらの起源であるかを識別する問題が重要になるが、背景重力波のスペクトルが宇宙モデルに依存する性質を利用すれば原理的には識別可能である。そこで初期宇宙で生成される背景重力波のスペクトルを定量的に見積もるために、超弦理論などに基づく初期宇宙モデルについて研究を行った。

著者はこれまで、ブレーンワールドと呼ばれる高次元宇宙モデルの中で、バルクインフレーションモデルと呼ばれるインフレーションモデルを提唱した²⁾。高次元宇宙モデルを考える理由は、統一理論の候補とされる超弦理論が高次元時空理論として記述されるからである。またブレーンワールドとは、境界をもつ高次元時空のその境界面上 (ブレーン：膜という意味を持つ membrane の造語) に我々の宇宙が実現されるモデルのことである。実際、超弦理論はこのような宇宙像の存在を示唆する。

今回、超弦理論をより考慮したインフレーションモデルを提唱するために、以下のようなバルクイン

フレーションモデルを拡張したスカラー場と重力場が結合した作用を考え、スカラー重力理論による 5 次元ブレーンワールド インフレーション宇宙の可能性について議論を行った。

$$I_{\text{total}} = \int d^5x \sqrt{-g} \left[F(\phi, R) - \frac{1}{2} g^{ab} \phi_{,a} \phi_{,b} \right] - \int d^4x dz \delta(z) \sqrt{-g^{(4)}} \sigma_0, \\ F(\phi, R) = \frac{1}{2\kappa^2} R - \frac{1}{2} \xi R \phi^2 - V(\phi).$$

ここで、 R : リッチスカラー、 ϕ : スカラー場、 σ_0 : ブレーン張力、 g : メトリック、 z : 余剰次元方向の座標である。結果、ある条件のもとで観測と矛盾しないインフレーション宇宙が再現されることが示された⁴⁾。今後はこのモデルが、初期宇宙起源の重力波信号を引き出すためのテンプレートの一つとなるように、このモデルにおける背景重力波のスペクトルについて定量的に解析を進めていく予定である。

3 まとめ

重力波を使った初期宇宙論の構築のため、観測的もしくは理論的の両側面から研究を行った。今後はこの研究を足がかりに、さらに現実的な状況を考慮して、より実践的なデータ解析の開発や高エネルギー物理により忠実な宇宙モデルを提唱していく所存である。

これまで観測手法に関して、特に統計処理などのソフト面における研究を行ってきたが、今後は検出器のデザインなどハード面に対する提案も行っていく予定である。そのようなアプローチとしては量子光学に基づいた量子限界の可能性やレーザー干渉計の相対的配置の工夫などが挙げられる。将来的な仕事としてこのようなテーマにも挑戦していく気概を表明して本稿を閉じることにする。

- 1) Y.Himemoto, “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”, 日本大学生産工学部第 42 回学術講演会, 2009-12-5, 8-12
- 2) Y.Himemoto, and M.Sakaki, “Brane-world inflation without inflaton on the brane”, Physical Review D63, 2001, p044015
- 3) Y.Himemoto, “Modified cross-correlation analysis for Stochastic Gravitational-Wave Backgrounds”, in preparation
- 4) Y.Himemoto, “Topological inflation from a bulk scalar field”, in preparation