



パルサータイミングアレイ信号と整合するインフレーションモデルの解析

川俣 蒼生（福島大学共生システム理工学研究科）

パルサータイミングアレイ(PTA)観測により得たナノヘルツ帯の背景重力波に、インフレーションが関わっているかを考察する。本研究では、観測で指摘された青く傾いたスペクトルを持つ、アクシオンゲージダイナミクスを含むインフレーションモデルを用いる。このモデルから得られる重力波のエネルギー密度を観測と重ね、妥当性を見る。

研究背景

現在パルサータイミングアレイ(PTA)により背景重力波の観測が行われている [図1]。2023 年、国際共同研究グループ NANOGravらにより背景重力波の証拠が得られたと報告された [図2]。背景重力波はナノヘルツ帯に存在し、青く傾いたスペクトルを持つといった特徴がある。この背景重力波の起源については、超巨大ブラックホール連星による天体物理学的な説が主流であるが、インフレーションや宇宙弦のような宇宙論的な説も注目されている。

先行研究

Ryo Namba らにより発表されたアクシオン-ゲージダイナミクスをスペクテイター場として含む特殊なインフレーションモデルを用いる。スペクテイター場とは、インフラトンと直接的には相互作用を起こさないインフレーション中に存在する補助的な場を表し、インフレーション終了と同時に消滅する。本モデルでは、アクシオンがスペクテイター場として存在し、U(1)ゲージ場と相互作用する。この相互作用により、右巻きの円偏波成分が増幅され、青く傾いたスペクトルを持つ原始重力波が生成される。

1. 作用

ラグランジアン密度は以下のように与えられる

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{GW}} + \mathcal{L}_{\text{inflaton}} + \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{spectator}}$$

$$\mathcal{L}_{\text{spectator}} = -\frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - U(\sigma) - \lambda \frac{\sigma}{4f_a} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

$\mathcal{L}_{\text{spectator}}$ はアクシオン-ゲージダイナミクスを表す項で、従来のインフレーション理論にはない、本研究特有のものである。 σ はアクシオン、 f_a はアクシオンの崩壊定数、 λ は結合定数を表す。 $F_{\mu\nu}$ は場の強さで、 $\tilde{F}^{\mu\nu}$ はその双対である。ポテンシャルについては、 $V(\phi)$ は任意、 $U(\sigma)$ はナチュラルインフレーション型ポテンシャル $U(\sigma) = \Lambda^4 [1 + \cos(\sigma/f_a)]$ を仮定する。

2. アクシオンの運動方程式

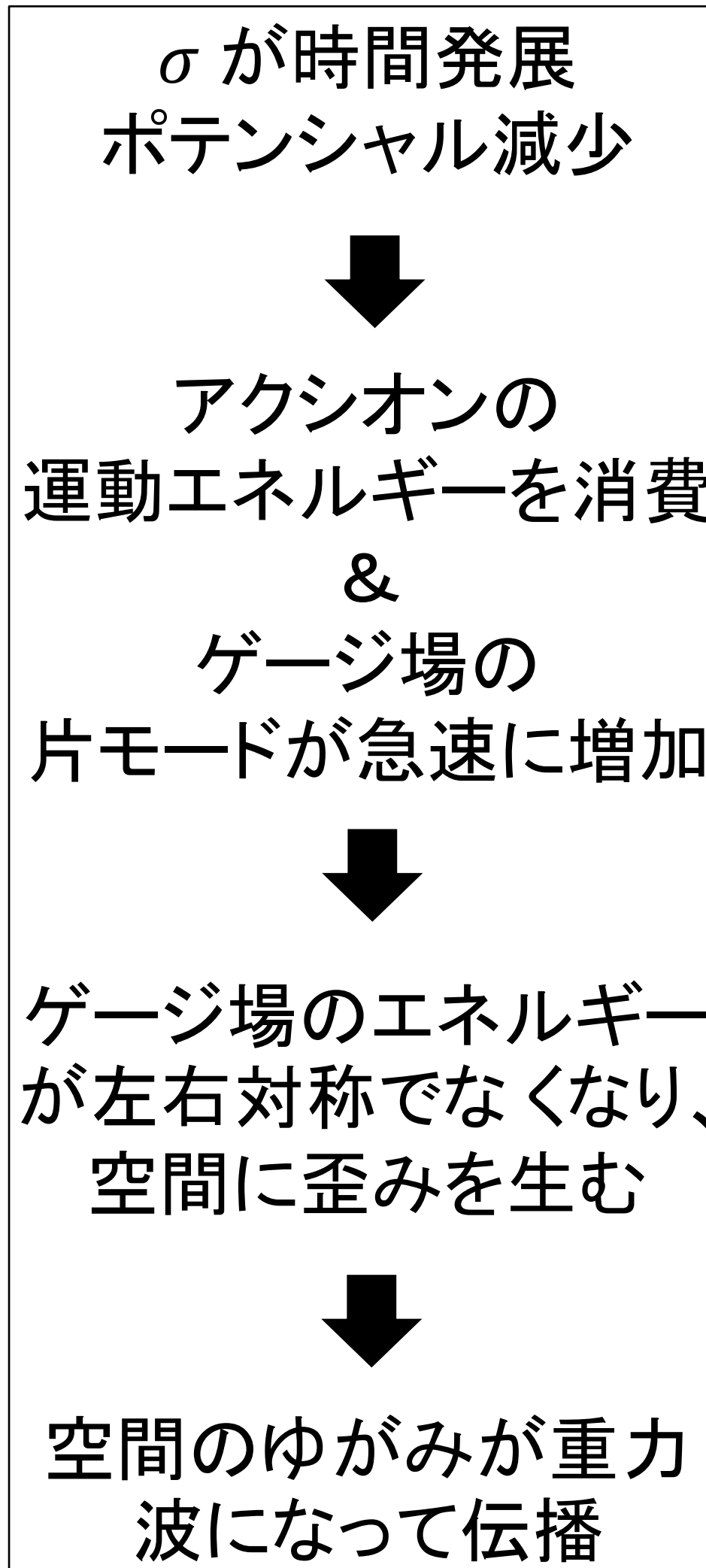
$$\ddot{\sigma} + 3H\dot{\sigma} + \frac{\partial U(\sigma)}{\partial \sigma} = \frac{\lambda}{4f_a} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

一般的には0となる右辺に、ゲージ場の強度テンソルの積が現れる。これはアクシオンの運動で増幅されたゲージ場から、アクシオンにエネルギーが逆流する、**逆反応**を示す。

3. ゲージ場の運動方程式

$$\frac{d^2 A_k^\pm}{dx^2} + \left(1 \mp \frac{2\xi}{x}\right) A_k^\pm = 0 \quad \xi \equiv \frac{\lambda \dot{\sigma}}{2f_a H}$$

ξ は**増幅制御パラメータ**と呼ばれ、逆反応のスケールやタイミングを決定する無次元パラメータである。



研究手法

3.3 パワースペクトル

本モデルから想定されるパワースペクトル $\mathcal{P}(k)$ は以下のように与えられる。これはスカラー曲率の二点相関関数をとること得られ、本研究の主要な解析対象である。 $\mathcal{P}_\zeta^{(0)}(k)$ は真空でのパワースペクトル、 $\mathcal{P}_\zeta^{(1)}(k)$ は本研究による摂動項を表す。このパワースペクトルを用いて重力波のエネルギー密度を算出する。

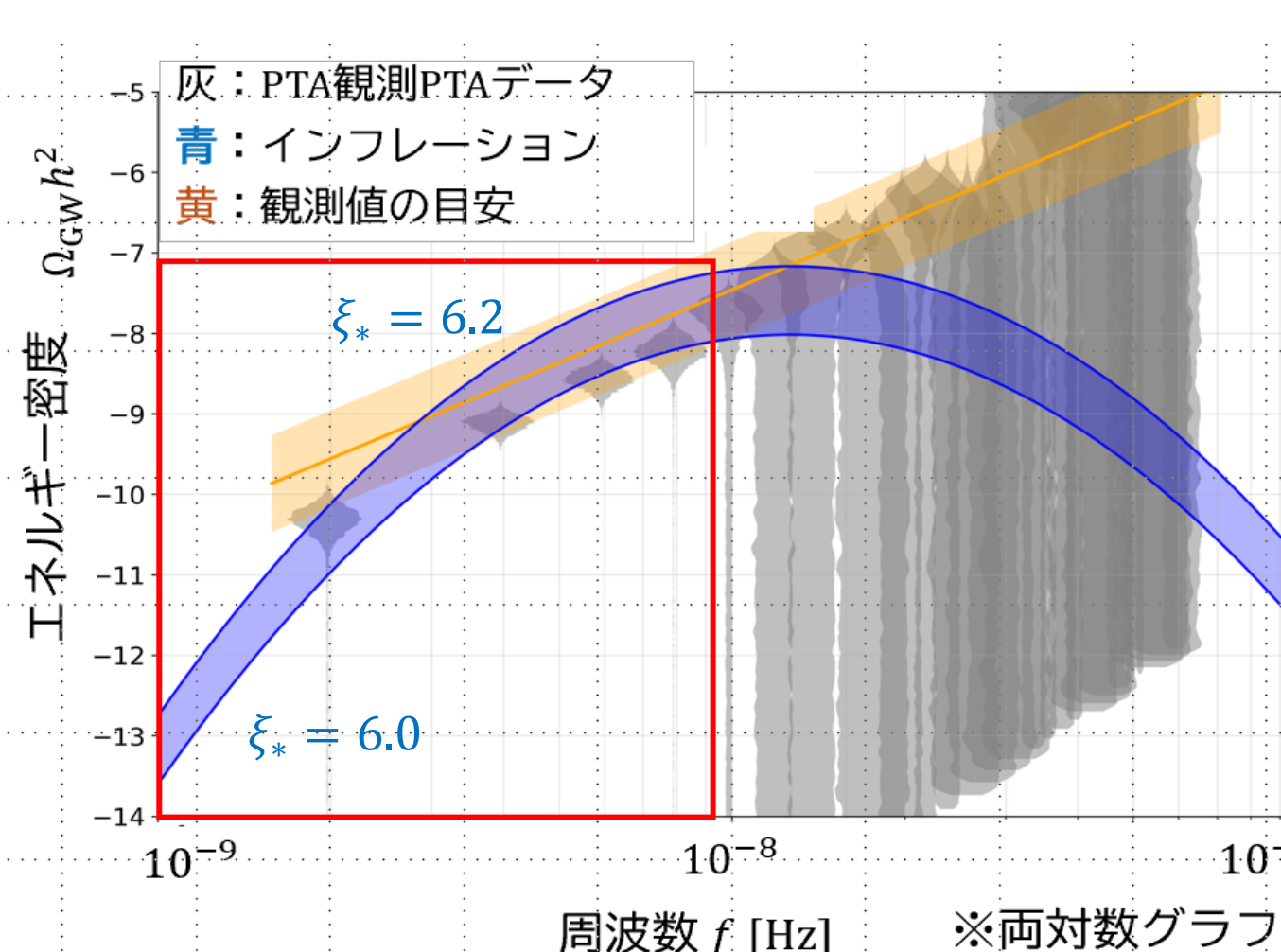
$$\mathcal{P}_\zeta^{(0)}(k) = \frac{H^2}{8\pi^2 \epsilon_\phi M_p^2} \quad \mathcal{P}_\zeta^{(1)}(k) = [\epsilon_\phi \mathcal{P}_\zeta^{(0)}(k)] f_{i,j} \left(\frac{k}{k_*}, \xi_*, \delta \right)$$

ここで、 $f_{i,j} \left(\frac{k}{k_*}, \xi_*, \delta \right)$ は、対数正規分布で近似したフィッティング関数であり、パンプの位置を決める数値計算で与えられる関数である。以下で与えられる

$$f_{i,j} \left(\frac{k}{k_*}, \xi_*, \delta \right) \simeq f_{i,j}^c[\xi_*, \delta] \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_{i,j}^2[\xi_*, \delta]} \ln^2 \left(\frac{k}{k_* x_{i,j}^c[\xi_*, \delta]} \right) \right]$$

本研究では簡単のため先行研究にならい、振幅 $f_{i,j}^c[\xi_*, \delta]$ を ξ_* のみの関数とし、 $A_i = \exp[-6.85 + 9.05\xi_* + 0.0596\xi_*^2]$ として解いた。逆反応によるゲージ生成がピークとなるときの増幅制御パラメータ ξ_* については、他の観測による制限を考慮し $\xi_* = 6.0$ と $\xi_* = 6.2$ の2つを用いた。ガウス幅 $\sigma = 0.55$ とした。

結果と考察



(図1) インフレーションによる重力波と観測値された背景重力波の比較

右は、NANOGrav によるPTA観測で得られた背景重力波と本モデル重力波のエネルギー密度を比較したグラフである。グラフから、観測と理論とのオーダーは概ね一致すること、特にナノヘルツ帯での一致率が高いことが分かった。このことから、今回観測された背景重力波は原始重力波である可能性がある。

結論

本モデルと観測の関係を可視化することができた。また、ナノヘルツ帯で青く傾いたスペクトルであることを確認できた。従って、PTA観測ではインフレーション由来の重力波が観測されている可能性があることが示唆された。本研究では、インフレーションにより形成される重力波のみを扱ったが、観測された背景重力波は様々な起源の重力波の組み合わせである可能性が指摘されている。今後は、他の起源による重力波と本モデルから得られる重力波の総和を考慮し、観測データと比較する必要がある。

- G. Agazie et al., The Astrophysical Journal Letters 951: L8 (2023)
- R. Namba et al., JCAP 01: 041 (2016), arXiv:1509.07521 [astro-ph.CO]
- C. Ünal, A. Papageorgiou, and I. Obata, Physics Letters B 856: 138873 (2024)
- 高橋慶太郎「パルサー観測がつかんだ背景重力波の証拠」日本物理学会誌 78: 690-691 (2023)