

重力波宇宙論の進展

—背景重力波の証拠と新物理による解釈—

寺田 隆広 (Institute for Basic Science)

猪又氏、郡氏との共同研究 2306.17834
張ヶ谷氏、猪又氏との共同研究 2309.00228 に基づきます。

概要とまとめ

六月末に世界中のパルサー・タイミング・アレイ (PTA) 観測の最新結果が公開され、ナノヘルツ帯の宇宙背景重力波の証拠が見つかりました。最も無難な解釈は超巨大ブラックホール連星の衝突合体に伴う重力波ですが、一次相転移・位相欠陥・二次重力波/原始ブラックホール・アクシオン模型など様々な宇宙論的解釈が可能です。我々は二次重力波の解釈に焦点を当て、信号の周波数依存性を理論的に説明する方法を三通り提案しました。この内の一部では将来の重力波観測で検証が可能です。

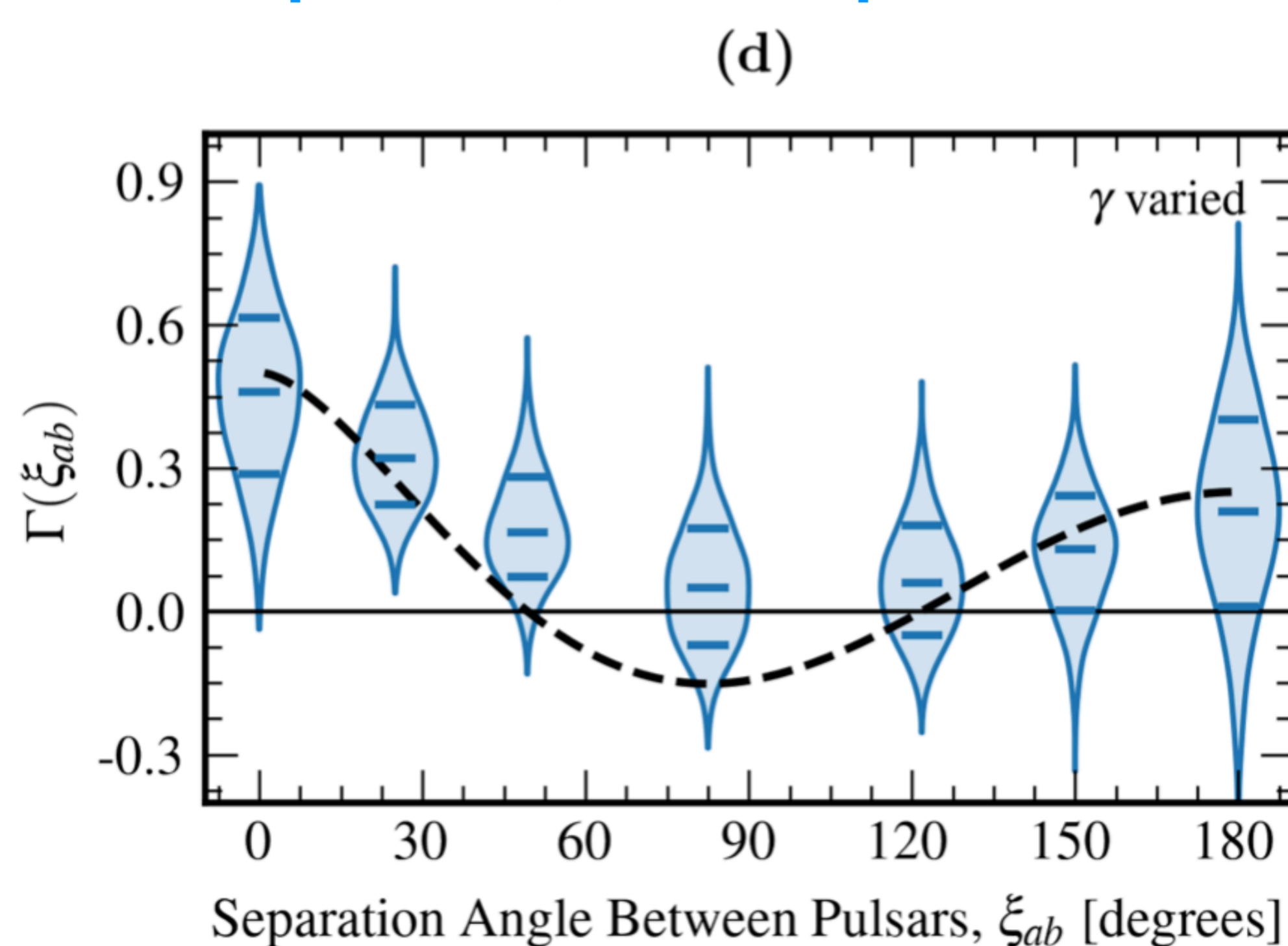
PTA・観測事実



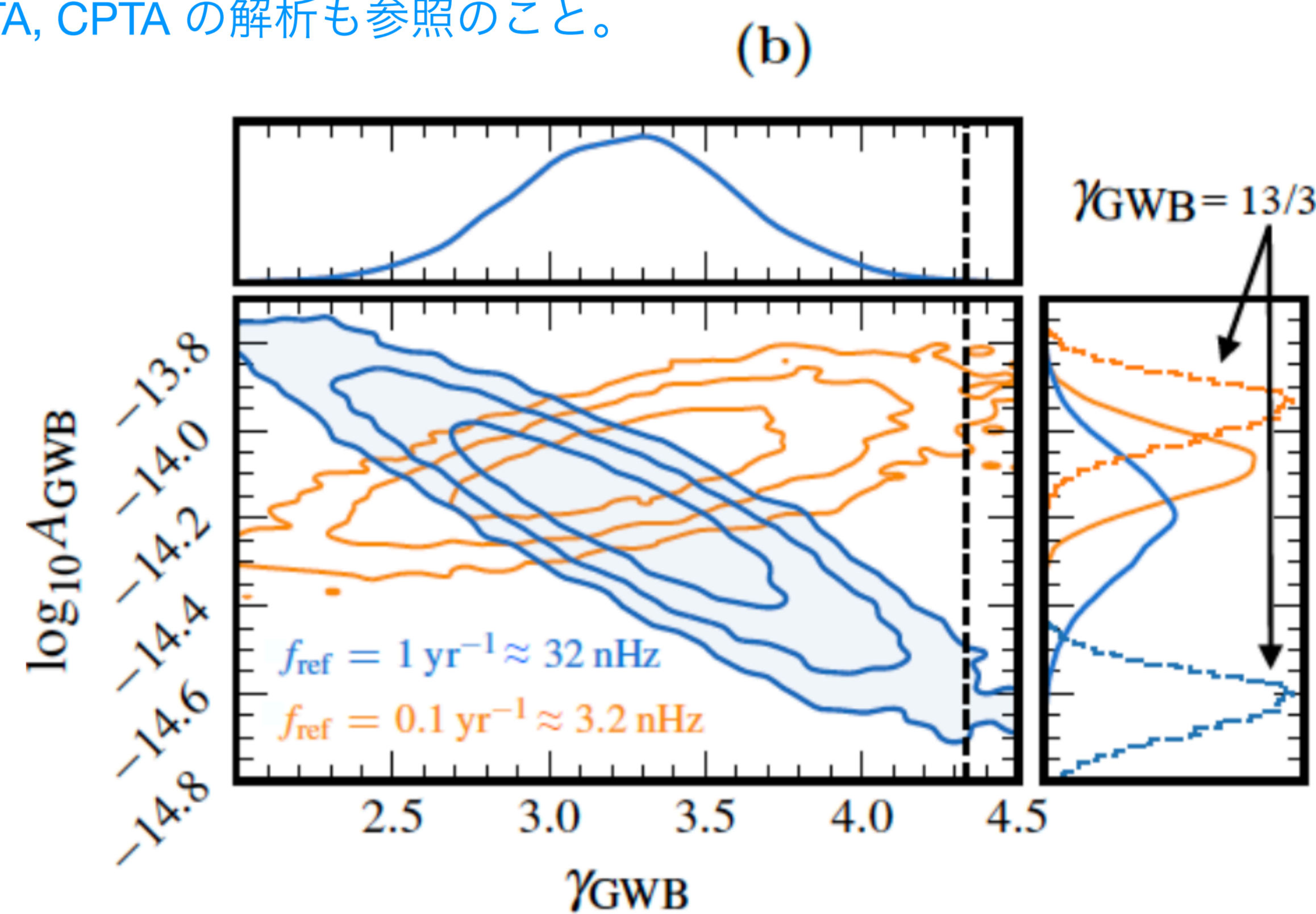
Illustration credit: Tonia Klein / NANOGrav

PTA概念図

[NANOGrav, 2306.16213]. EPTA/InPTA, PPTA, CPTA の解析も参照のこと。



Hellings-Downs 曲線との比較



重力波スペクトルのパワーローフィット

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{2\pi^2 f_{\text{yr}}^2}{3H_0^2} A_{\text{GWB}}^2 \left(\frac{f}{f_{\text{yr}}}\right)^{5-\gamma}$$

新物理による解釈の比較

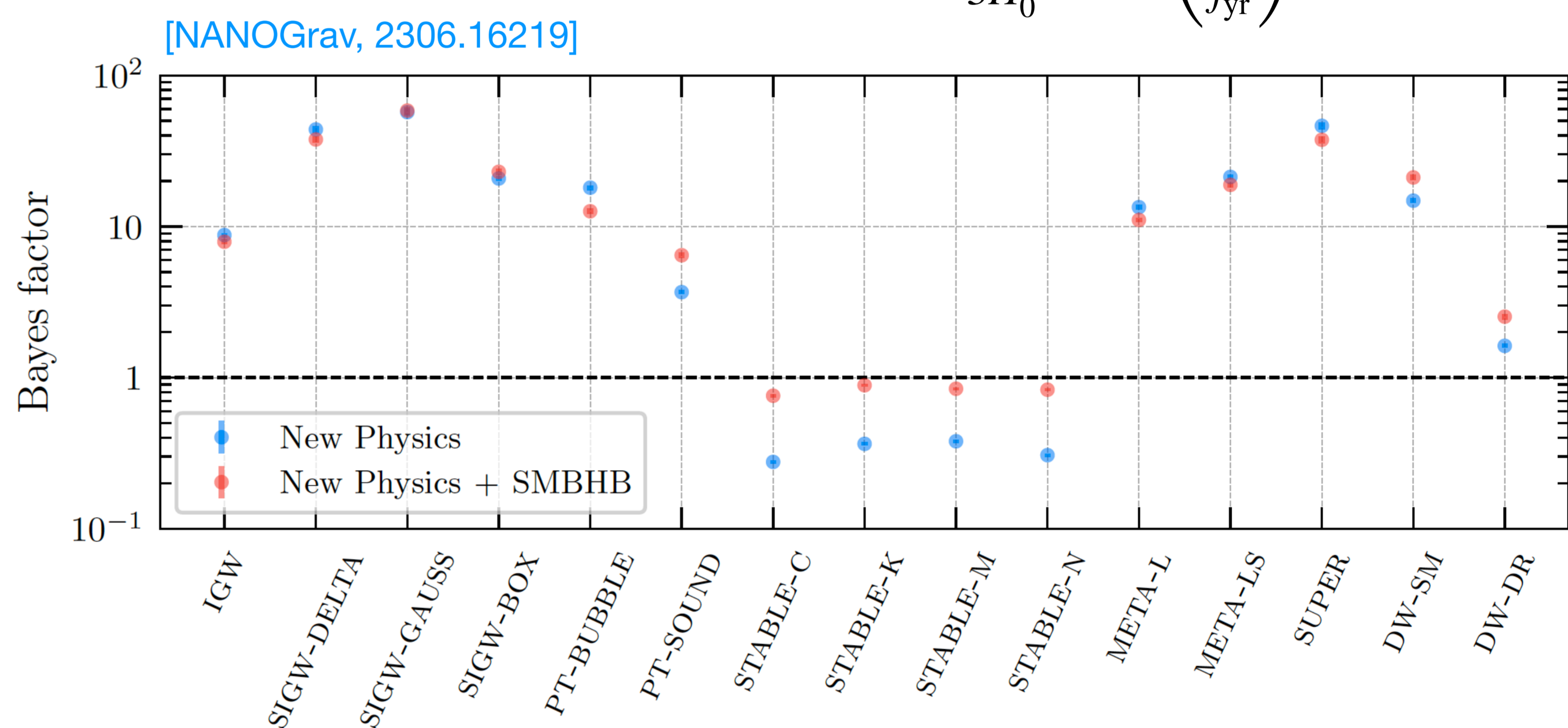
NANOGrav の解析によると、二次重力波(SIGW)と宇宙超弦からの重力波(SUPER)のフィットが超巨大ブラックホール連星(SMBHB)より良いです (右図参照)。

* 多少異なる結果を出しているグループもあり、注意が必要です。

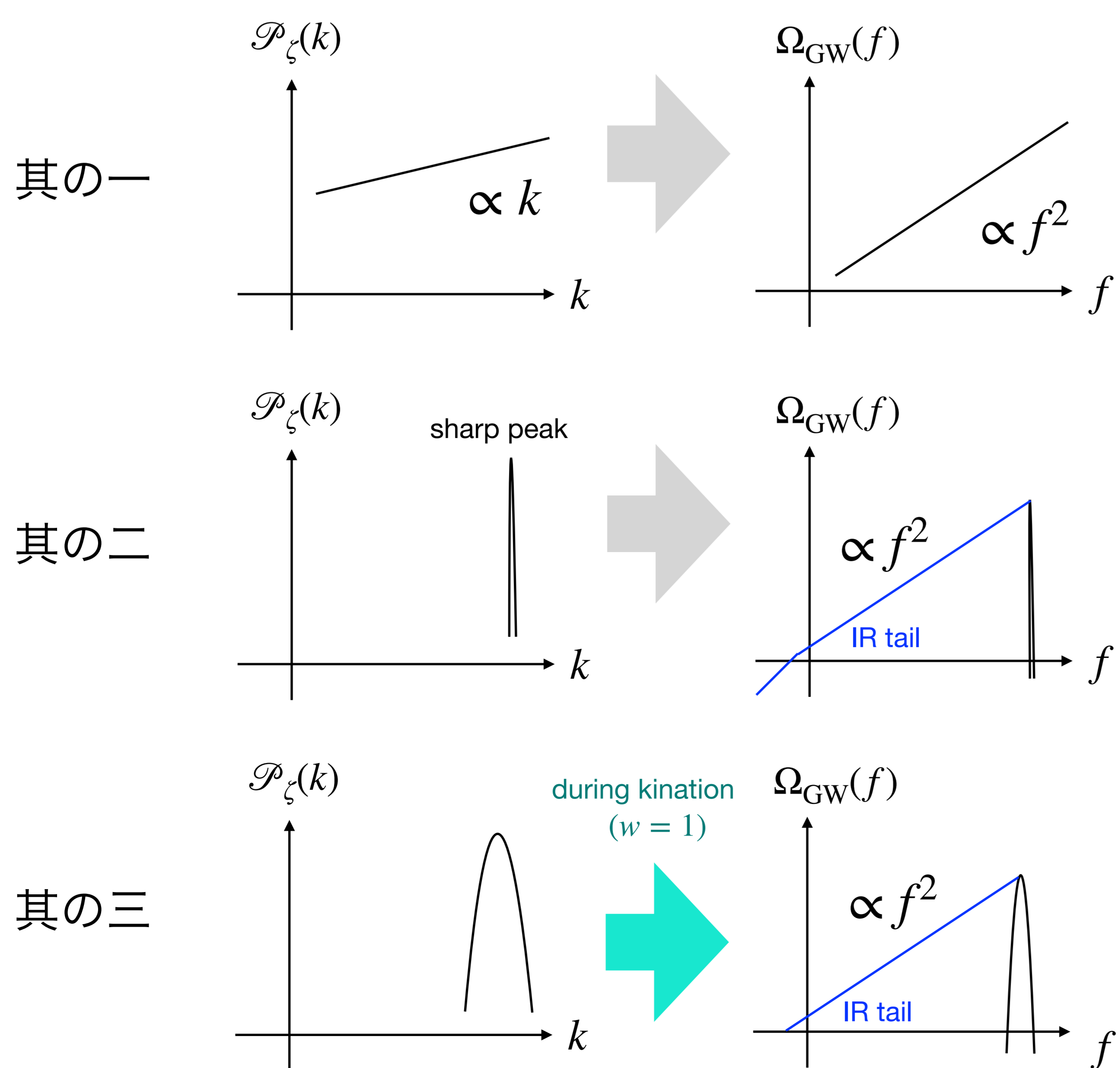
[Bian, Ge, Shu, Wang, Yang, and Zong, 2307.02376]

[Figuroa, Pieroni, Ricciardone, and Simakachorn, 2307.02399]

[Ellis, Fairbairn, Franciolini, Hütsi, Iovino, Lewicki, et al., 2308.08546]



二次重力波による解釈



二次重力波とは、一般相対論に内在する相互作用によって宇宙論的摂動論の二次で曲率揺らぎから誘起される重力波です。基本的に曲率揺らぎのスペクトルを二乗したような波数依存性を持ちます (左図其の一参照) が、低周波数側に模型の詳細に依らない裾野(IR tail)が現れます (其の二、三)。

この裾野は通常、周波数の3乗の依存性を持ちますが、デルタ関数の様に非常に細いピークを持ったスペクトルの場合は観測で支持される2乗のスペクトルが得られます。PTAデータをフィットすると、 $\mathcal{O}(10^{-4})$ 太陽質量の原始ブラックホール(PBH)が予言されます。このシナリオはPBH連星衝突合体からの重力波の観測によって将来検証できる可能性があります。しかし、PBHの量は不定性が大きく、超過生成を指摘するグループや、そうとは限らないと主張するグループがあります。

スカラー場の運動項が宇宙の支配的なエネルギー成分である時期に二次重力波が生成されると、観測で支持されている周波数依存性が自動で説明されます。更に、原始ブラックホールの超過生成の心配が大幅に (数十桁の規模で) 軽減されます。

左図は模式図ですが、実際の重力波スペクトルに興味を持たれた方は論文をご参照ください。