

青年科学基金项目申请书

在国际脉冲星计时阵列数据中搜寻标量诱导引力波

Zu-Cheng Chen (陈祖成)

湖南师范大学物理与电子科学学院

2024 年 1 月 19 日 @ 2024 年量子结构与调控前沿研讨会



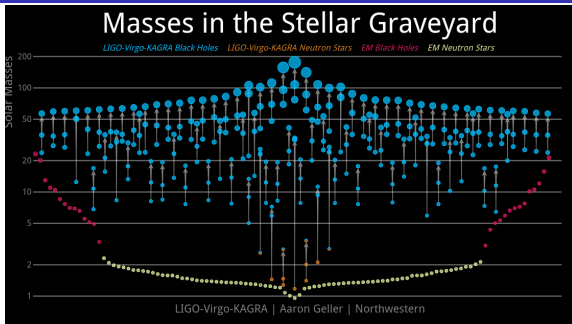
湖南師範大學
HUNAN NORMAL UNIVERSITY

提纲

- 1 5 篇代表作
- 2 立项依据与研究内容
- 3 研究基础与工作条件

- ① **Pulsar Timing Array Constraints on Primordial Black Holes with NANOGrav 11-Year Dataset**
Physical Review Letters 124.25 (2020): 251101
Zu-Cheng Chen, Chen Yuan, Qing-Guo Huang[†]
- ② **Non-tensorial Gravitational Wave Background in NANOGrav 12.5-Year Data Set**
Science China Physics, Mechanics & Astronomy 64.12 (2021): 1-6
Zu-Cheng Chen, Chen Yuan, Qing-Guo Huang[†]
- ③ **Search for the Gravitational-Wave Background from Cosmic Strings with the Parkes Pulsar Timing Array Second Data Release**
The Astrophysical Journal 936.1 (2022): 20
Zu-Cheng Chen, Yu-Mei Wu[†], Qing-Guo Huang
- ④ **Probing the equation of state of the early Universe with pulsar timing arrays**
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 11 (2023) 071, [arXiv:2307.14911](#)
Lang Liu, **Zu-Cheng Chen**[†], Qing-Guo Huang[†]
- ⑤ **Search for Stochastic Gravitational-Wave Background from Massive Gravity in the NANOGrav 12.5-Year Data Set**
Physical Review D 107.4 (2023): 042003
Yu-Mei Wu, **Zu-Cheng Chen**[†], Qing-Guo Huang[†]

项目的立项依据



The Nobel Prize in Physics 2017



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Rainer Weiss
Prize share: 1/2

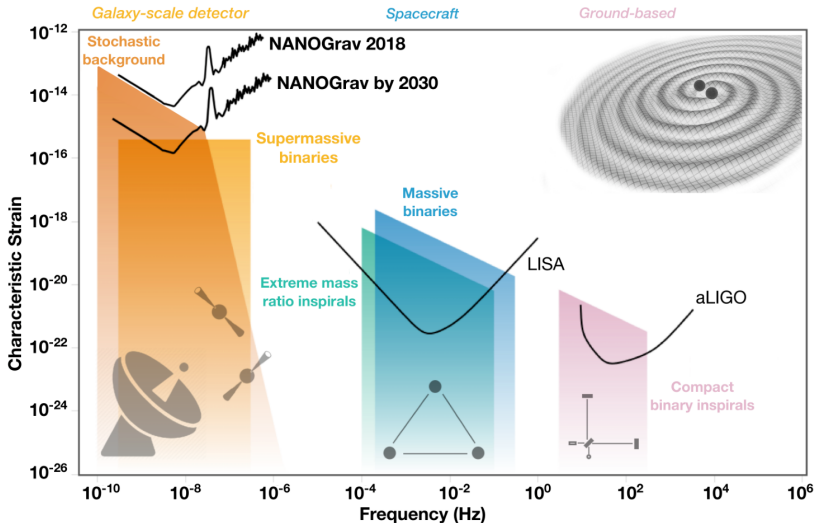


© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Barry C. Barish
Prize share: 1/4

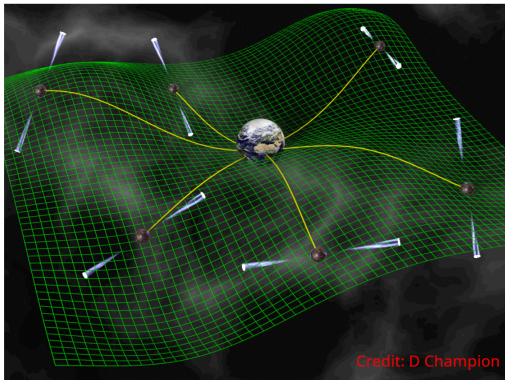
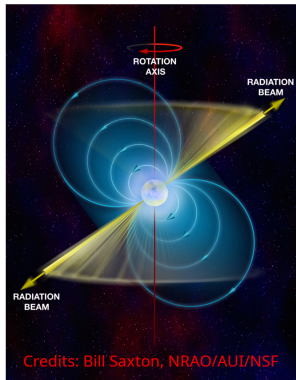


© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Kip S. Thorne
Prize share: 1/4

- 引力波天文学的新时代
- 多信使天文学

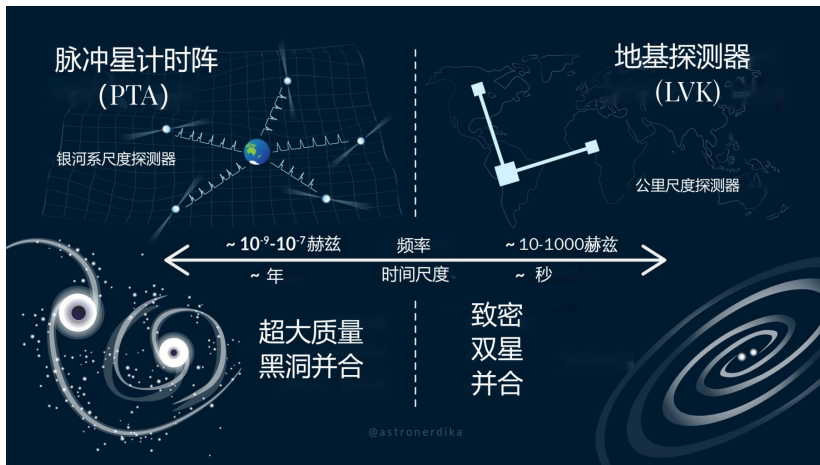


脉冲星计时阵列 (PTA)



- 脉冲星是高度磁化、旋转的中子星，它们发出电磁辐射脉冲可以定期地扫过地球。
- 引力波可以引起时空的扭曲，导致脉冲到达时间的微小变化。
- PTA 旨在通过定期监测一系列旋转稳定的毫秒脉冲星的到达时间来探测纳赫兹级的引力波。

脉冲星计时阵列 (PTA)

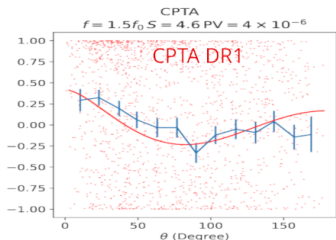
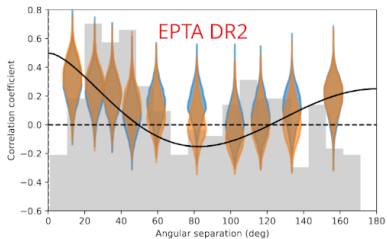
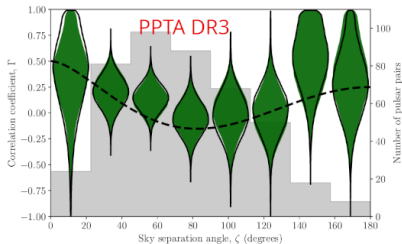
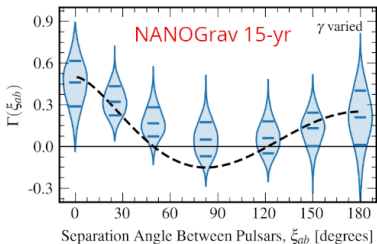


运行中的 PTA



$$\text{IPTA} = \text{PPTA} + \text{EPTA} + \text{NANOGrav} + \text{InPTA}$$

随机引力波背景的关键性证据



Gabriella Agazie, et al., *ApJL* (2023); Daniel Reardon, et al. *ApJL* (2023)

J. Antoniadis, et al., *A&A* (2023); Heng Xu, et al., *RAA* (2023)

标量诱导引力波 (SIGW) 可以解释 PTA 信号

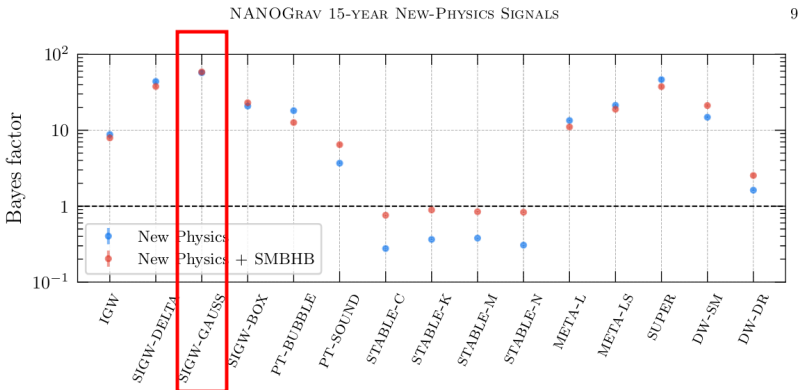


Figure 2. Bayes factors for the model comparisons between the new-physics interpretations of the signal considered in this work and the interpretation in terms of SMBHBs alone. Blue points are for the new physics alone, and red points are for the new physics in combination with the SMBHB signal. We also plot the error bars of all Bayes factors, which we obtain following the bootstrapping method outlined in Section 3.2. In most cases, however, these error bars are small and not visible.

Adeela Afzal, *ApJL* (2023)

see also *Zhi-Qiang You, Zhu Yi, You Wu, 2307.04419*

项目的研究内容

- IPTA DR3 的数据集正在制作中，预计今年发布。
- IPTA DR3 将包含所有 EPTA、NANOGrav、PPTA 和 MPTA 的观测数据，总共有 115 颗脉冲星。
- IPTA 已经制作了一个包含 20 颗脉冲星的子数据集，并完成了初步分析。
- IPTA 将分析各种引力波源，申请者是 IPTA 搜寻新物理项目的领导者之一。
- 本项目将利用 IPTA DR3 的数据，限制标量诱导引力波，包括：
 - ① 限制原初非高斯性
 - ② 限制宇宙早期（重加热时期的）物态方程参数、重加热的温度
 - ③ 标量诱导引力波的传播速度

项目的研究目标

- 获得 IPTA DR3 各脉冲星的噪音成分
- 不考虑具体的引力波源，获得自由谱的引力波强度
- 获得对原初非高斯性的限制、重加热时期的物态方程参数的限制
- 获得对引力波传播速度的限制

拟解决的关键科学问题

- 如何分析和确定每一颗脉冲星的噪声成分？

- 脉冲到达时间 $\tau = \tau^{\text{TM}} + n = \tau^{\text{TM}} + \tau^{\text{RN}} + \tau^{\text{DM}} + \tau^{\text{WN}} + \tau^{\text{GW}}$

- 通过贝叶斯方法确定每一颗脉冲星的噪声

- 如何加快标量诱导引力波谱的计算速度？

- 需要在数百至上千维参数空间随机采样，耗时数周至数月
 - 标量诱导引力波能谱的计算需要数值计算二重积分，成为数据分析的瓶颈
 - 利用高性能编程语言，例如 julia 提高计算速度
 - 通过插值拟合等方法，缩短诱导引力波能谱的计算时间

拟采取的研究方案：1，计算标量诱导引力波的能谱

- 暴胀期间的量子涨落可以产生原初扰动

- 牛顿规范下的度规扰动

$$ds^2 = a^2 \left\{ -(1 + 2\phi)d\eta^2 + \left[(1 - 2\phi)\delta_{ij} + \frac{h_{ij}}{2} \right] dx^i dx^j \right\}, \quad (1)$$

其中 $\phi \equiv \phi^{(1)}$ and $h_{ij} \equiv h_{ij}^{(2)}$ 分别是标量和张量扰动。

非高斯性

- 局域非高斯曲率扰动

$$\mathcal{R}(\vec{x}) = \mathcal{R}_G(\vec{x}) + F_{\text{NL}} \left(\mathcal{R}_G^2(\vec{x}) - \langle \mathcal{R}_G^2(\vec{x}) \rangle \right). \quad (2)$$

- 等效曲率扰动功率谱

$$P_{\mathcal{R}}^{\text{NG}} = P_{\mathcal{R}}(k) + F_{\text{NL}}^2 \int_0^\infty dv \int_{|1-v|}^{1+v} du \frac{P_{\mathcal{R}}(uk) P_{\mathcal{R}}(vk)}{2u^2 v^2}. \quad (3)$$

- 标量诱导引力波的能谱

$$\Omega_{\text{GW}}(k) = \int_0^\infty dv \int_{|1-v|}^{1+v} du \mathcal{T}(u, v) P_{\mathcal{R}}^{\text{NG}}(vk) P_{\mathcal{R}}^{\text{NG}}(uk), \quad (4)$$

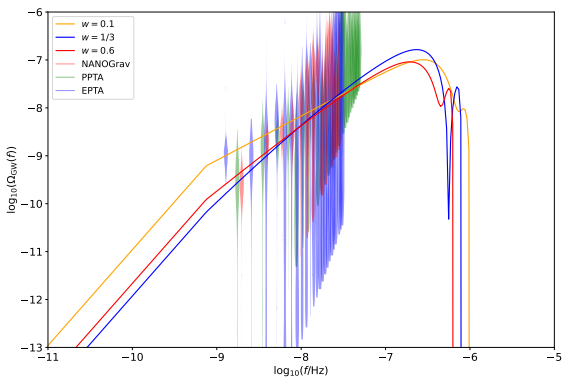
传播函数

$$\begin{aligned} \mathcal{T}(u, v) = & \frac{3}{1024v^8u^8} \left[4v^2 - (v^2 - u^2 + 1)^2 \right]^2 (v^2 + u^2 - 3)^2 \\ & \times \left\{ \left[(v^2 + u^2 - 3) \ln \left(\left| \frac{3 - (v+u)^2}{3 - (v-u)^2} \right| \right) - 4vu \right]^2 \right. \\ & \left. + \pi^2 (v^2 + u^2 - 3)^2 \Theta(v + u - \sqrt{3}) \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Lang Liu, ZCC, Qing-Guo Huang, PRDL accepted

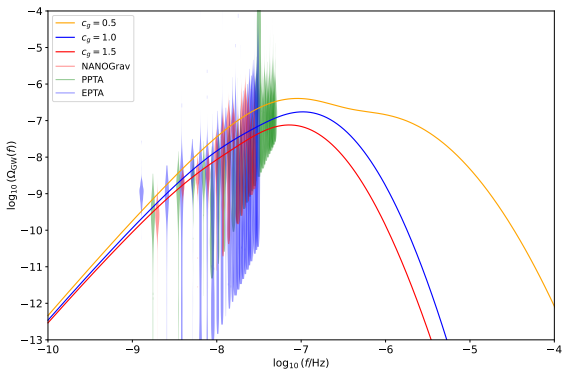
早期宇宙的物态方程

$$\Omega_{\text{GW}} = \left(\frac{k}{k_{\text{rh}}} \right)^{-2(1-3w)/(1+3w)} \int_0^\infty dv \int_{|1-v|}^{1+v} du \mathcal{T}(u, v, w) \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(ku) \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(kv), \quad (6)$$



标量诱导引力波的传播速度

$$\Omega_{\text{GW}} = \int_0^\infty dv \int_{|1-v|}^{1+v} du \mathcal{T}(u, v, c_g) \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(ku) \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(kv), \quad (7)$$



ZCC, Jun Li, Lang Liu, Zhu Yi, 2024.xxxx

拟采取的研究方案：2，贝叶斯统计方法

- 似然函数

$$p(\delta\tau|\phi) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\delta\tau^T C^{-1}\delta\tau\right]}{\sqrt{\det 2\pi C}}$$

- 贝叶斯定理

$$p(H|D) = \frac{p(D|H)p(H)}{p(D)}$$

Diagram illustrating the components of Bayes' Theorem:

- $p(H|D)$ is labeled as the **posterior**.
- $p(D|H)$ is labeled as the **likelihood**.
- $p(H)$ is labeled as the **prior**.
- $p(D)$ is labeled as the **normalization factor**.

可行性分析

- 标量诱导引力波能谱的计算
 - 本项目拟采用高性能科学计算语言 `julia` 来做数值积分。
 - 利用插值拟合等方法提高计算速度。
- 贝叶斯统计方法
 - 利用 `Enterprise` 以及 `Enterprise_extensions` 等 PTA 数据分析软件包
 - 申请人是开发者之一
 - 申请人熟练掌握这些软件工具，得到的系列研究结果被 `NANOGrav`、`IPTA` 等合作组所证实和引用

本项目的特色与创新之处

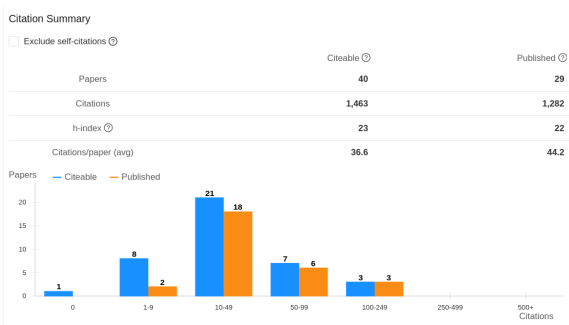
- 本项目所使用的数据—IPTA DR3 是迄今为止最精确的 PTA 数据，将包含 115 颗脉冲星以及约 35 年的观测时长。信噪比 $\text{SNR} \propto N_{\text{psr}} \sqrt{T}$ 。作为对比
 - NANOGrav 15 年数据有 65 颗脉冲星的 15 年观测数据。
 - PPTA DR3 数据有 30 颗脉冲星的 18 年观测数据。
 - EPTA+InPTA DR2 数据有 25 颗脉冲星的约 25 年观测数据。
- 本项目将对 IPTA DR3 所有单颗脉冲星的噪声做全面且细致的分析。
- 本项目将同时考虑引力波传播速度对引力波能谱和脉冲星计时残差空间关联的影响。以往的研究只考虑其中的某一方面。

年度研究计划

- 2025 年 1 月-2025 年 12 月，对 IPTA DR3 中所有脉冲星，逐颗分析其噪声成分。
- 2026 年 1 月-2026 年 12 月，利用 IPTA DR3 数据得到自由谱的信号强度，并限制原初非高斯性参数。
- 2027 年 1 月-2027 年 12 月，利用 IPTA DR3 数据限制早期宇宙的物态方程以及引力波的传播速度。

预期研究结果

- 得到 IPTA DR3 中所有脉冲星的噪声成分。
- 得到自由谱的引力波强度。
- 得到对早期宇宙状态，例如原初非高斯性和物态方程的限制。
- 得到标量诱导引力波的传播速度的限制。



- 申请人在 PTA 和标量诱导引力波领域完成系列研究工作，例如：
 - 利用 NANOGrav 11 年的数据限制标量诱导引力波
PRL 124.25 (2020): 251101, **ZCC**, Chen Yuan, Qing-Guo Huang
 - 利用 PTA 数据限制原初非高斯性
PRDL 接受, Lang Liu, **ZCC**, Qing-Guo Huang
 - 利用 PTA 数据限制早期宇宙的物态方程
JCAP, 11 (2023) 071, Lang Liu, **ZCC**, Qing-Guo Huang
- 申请人的工作被 NANOGrav 和 IPTA 等合作组证实和引用。

研究基础

- NANOGrav (Astrophys.J.Lett. 923 (2021) 2, L22) 将我们的结果与 LIGO 合作组相提并论, 认为我们第一次用 PTA 数据来检验引力理论。三篇都是我们的文章!

LIGO has already made possible a number of GW tests of General Relativity (Abbott et al. 2021, 2019, 2018). Until very recently ([Chen et al. 2021b](#); [Wu et al. 2021](#); [Chen et al. 2021a](#)), PTA data had not been used to perform GW tests of gravity due to the absence of a strong signal that can be attributed to GWs. However,

翻译: 直到最近 (Chen 等人 2021b; Wu 等人 2021; Chen 等人 2021a), PTA 数据才被用于检验引力理论……

- NANOGrav (Astrophys.J.Lett. 923 (2021) 2, L22) 证实了我们的结果

As shown in Fig. 10, the most favored Bayesian model is a GWB with GW-like monopolar correlations of Eq. (25) with a Bayes factor greater than 100. Additionally, as a cross-check, we have reproduced the results of Chen et al. (2021), where a model with ST correlations with a spectral index of 5, [ST]M3A[5], was compared to a model without correlations and a spectral index of 13/3, M2A[13/3]. We obtain a Bayes factor of

翻译: 此外, 作为交叉验证, 我们重现了 Chen 等人 (2021) 的结果……

工作条件

- 申请人是 PPTA 和 IPTA 等国际科学合作组成员，可以第一时间获得各 PTA 组的数据并进行分析。
- 申请人是 IPTA 搜寻新物理项目的共同领导者之一。
- 申请人长期与北京并行科技公司保持合作关系，能够方便地使用广州、北京等地的国家超算中心的计算资源。