

中国脉冲星计时阵

胥恒^{1,†} 李柯伽^{1,2,††}

(1 中国科学院国家天文台 北京 100101)

(2 北京大学物理学院 北京 100871)

The Chinese Pulsar Timing Array

XU Heng^{1,†} LEE Ke-Jia^{1,2,††}

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100101, China)

(2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2024-07-10收到

† email: hengxu@bao.ac.cn

†† email: kjlee@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240802

摘要 2016年,激光干涉引力波天文台(LIGO)宣布探测到两个恒星级质量黑洞合并产生的百赫兹引力波,由此打开了引力波天文学时代的序幕。在经过数十年的努力之后,2023年6月,包括中国在内的国际上多个脉冲星计时阵合作组也宣布对宇宙的低频交响——纳赫兹引力波的搜寻取得重要进展。文章将介绍这几个合作组之一——中国脉冲星计时阵合作组的发展历程、观测与数据情况,以及其在纳赫兹引力波探测的进展,最后讨论对未来的展望。

关键词 脉冲星计时阵, 纳赫兹引力波, 引力波天文学

Abstract In 2016, the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) announced the detection of a 100 Hz gravitational wave produced by the merger of two stellar mass black holes, from which the era of gravitational wave astronomy began. After decades of effort, in June 2023, four pulsar time array collaborations around the world reported progress in the search for the low-frequency symphony of the universe—the nanohertz gravitational waves. This paper will describe the history and data of one of these organizations, the Chinese Pulsar Time Array project, as well as its progress in the detection of nanohertz gravitational waves and its future prospects.

Keywords pulsar timing array, nanohertz gravitational wave, gravitational wave astronomy

1 发展历程

纳赫兹引力波是近几十年来天体物理的前沿领域,探测纳赫兹引力波是国际天体物理领域的竞赛焦点之一,全球多个国家和地区都深度参与其中。利用射电望远镜观测一组高精度毫秒脉冲星——脉冲星计时阵(pulsar timing array, PTA),

是直接探测纳赫兹引力波的唯一技术手段^[1]。探测引力波需要极高精度的脉冲星计时数据,而达到引力波探测所需的计时精度又仅能依靠大口径的射电望远镜。高精度的脉冲星计时观测在世界上多个百米级大口径射电望远镜上均有开展,如美国的Arecibo(300米)和Greenbank(100米)望远镜,欧洲Effelsberg(100米),Nançay(94米)望远

镜, 澳洲 Parkes (64 米) 望远镜等。我国由于国内长期缺乏此类大口径射电望远镜, 高精度脉冲星计时及脉冲星计时阵相关观测实验一直没有办法开展, 但是相关的理论研究一直在开展中。在 21 世纪的前十几年, 中国国内天文射电望远镜仅有新疆天文台 25 米射电望远镜, 云南天文台 40 米口径射电望远镜, 国家授时中心 40 米射电望远镜, 上海天文台 65 米口径射电望远镜等口径较小的望远镜。在国际上, 多台大望远镜可以对几颗脉冲星达到 100 ns 的观测精度, 对全天数十颗脉冲星计时也能达到微秒量级精度, 而国内仅有云南天文台 40 米望远镜能够对全天最亮的毫秒脉冲星计时到 600 ns 精度, 且全天能探测的毫秒脉冲星数量也非常有限, 更别说要达到高精度, 国内高精度脉冲星观测实验与国际顶尖水平的差距完全可以用“巨大”来形容。国际高计时精度的领先与国内探测纳赫兹引力波的理想之间, 存在着巨大的鸿沟。这个情况直到“中国天眼”五百米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)的建成才迎来好转, 中国脉冲星计时阵(Chinese Pulsar Timing Array, CPTA)^[2]也应运而生。

在 FAST 建成即将投入使用之际, 从 2019 年 4 月起, FAST 开展了一系列实验性质的高精度脉冲星计时观测, 最终获得的观测数据质量极高, 增强了使用 FAST 探测纳赫兹引力波的信心。在同年 6 月, 中国科学院启动了引力波探测预研究。2019 年 9 月 CPTA 正式成立, 这一合作组主要包括了中国科学院国家天文台、北京大学等国内数十个科研单位和高校的多位研究人员。CPTA 的首要科学目标是使用中国的射电望远镜观测脉冲星从而直接探测到纳赫兹引力波。同年, CPTA 被 FAST 科学委员会从多个项目中遴选为 FAST 的五个优先和重大项目之一。至此, CPTA 在观测时间方面获得了稳定支持, 极大地促进了 CPTA 进行引力波探测。

2 脉冲星观测与数据

纳赫兹引力波的探测需要长期高精度地观测大量的毫秒脉冲星。CPTA 现阶段进行的脉冲星

计时观测主要使用的大型望远镜是位于中国贵州省平塘县的现存世界上最大的单口径射电望远镜——中国“天眼”FAST(图 1)。

CPTA 项目最早于 2019 年 4 月获得观测数据, 本文涉及的引力波探测所使用的数据集的截止日期为 2022 年 10 月 1 日 0 点, 整体时间跨度长达 3 年零 5 个月(数据集 1, Data Release 1, DR1)。在早期的试验观测中, CPTA 仅仅观测了十来颗脉冲星, 而在后续项目正式立项之后, 常规监测的脉冲星数量扩大到了 46 颗——这些脉冲星都是筛选自国际上其他 PTA 组织长期监测的脉冲星列表。在引力波信噪比较低时, 引力波背景(gravitational wave background, GWB)信号的信噪比(signal-to-noise ratio, S/N)受多个因素影响^[3]:

$$\frac{S}{N} \propto N_{\text{psr}} \frac{1}{\Delta T} \frac{A_{\text{GWB}}^2}{\sigma^2} T^{\frac{13}{3}}, \quad (1)$$

其中 N_{psr} 是脉冲星数量, ΔT 是观测时间间隔,



图1 中国“天眼”FAST俯视图

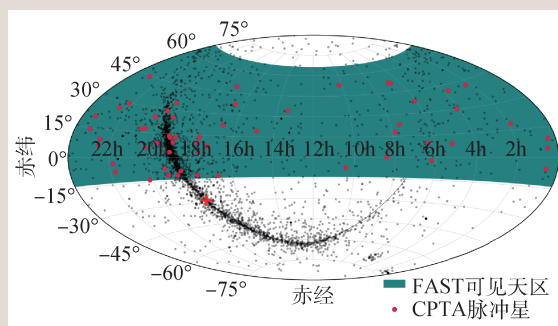


图2 CPTA DR1 中脉冲星(红色点)在全天(赤道坐标系)的分布, 深绿色区域表示 FAST 可见天区, 黑色点代表现在所有的已发现脉冲星, 红色十字表示银河系中心

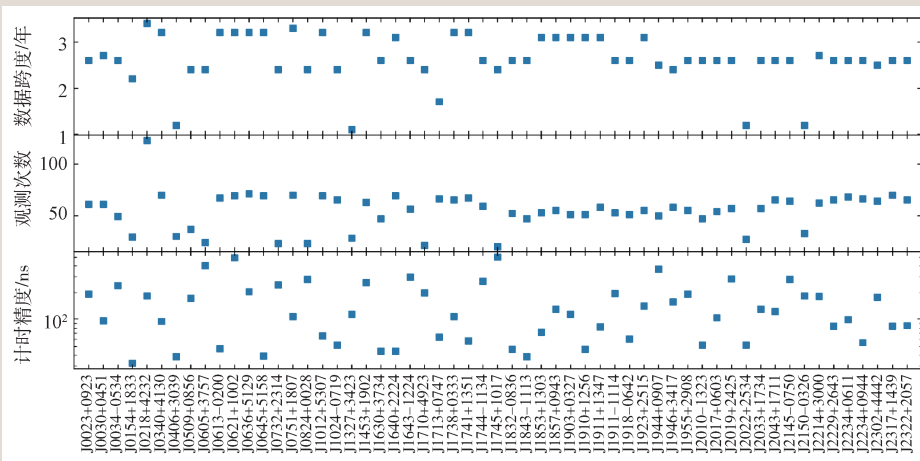


图3 CPTA DR1 数据概况。从上至下分别展示了 CPTA DR1 数据集中 57 颗脉冲星数据的时间跨度、观测次数以及计时精度(又称测时精度)^[4]

A_{GWB} 是 GWB 的幅度, σ 是脉冲星计时残差的均方根(σ 越小, 精度越高), T 是数据整体的时间跨度。可以看出, 增加 CPTA 中毫秒脉冲星的数量对于提高对纳赫兹引力波的探测灵敏度至关重要。鉴于 FAST 的卓越灵敏度, 我们能够观测到一些其他望远镜难以高精度测量的暗弱毫秒脉冲星, 并获得极高的计时精度。因此, 我们也将多颗暗弱的脉冲星加入到 CPTA 的监测列表中。最终, 用于此次引力波分析的数据集中脉冲星数量达到了 57 颗, 图 2 展示了其全天的分布。此外, 这 57 颗毫秒脉冲星的名字以及观测数据跨度列于图 3^[4]。虽然 CPTA 数据在时间上远远短于其他国际合作组, 但计时精度的优势以及脉冲星数量的优势使得 CPTA 在此次引力波探测的国际竞赛中取得一定的突破(这也和公式 1 的理论预期相符合)!

CPTA 利用 FAST 中 19 波束接收机的中心波束进行观测, 覆盖 1.0 GHz 至 1.5 GHz 的观测频率范围(这是观测脉冲星的典型频段)。记录的数据为搜寻模式, 因此目前采用非相干消色散技术进行处理。CPTA 对大多数脉冲星的观测频次大约每两周一次, 每颗脉冲星每次观测 20 分钟至半个小时。由于 FAST 的时间珍贵以及项目总时间限制, 并非所有脉冲星的观测都能达到理想状态, 少部分脉冲星的观测次数和频次相对较低, 这 57 颗脉冲星的观测次数如图 3 所示^[4]。

原始数据在经过脉冲轮廓折叠、偏振校准、

射电干扰去除、时间和频率压缩等数据处理过程之后, 与无噪声的标准轮廓模板进行匹配, 获得脉冲到达时间产品, 这也是后续用于引力波探测的数据。在得到脉冲星的脉冲到达时间之后, 在开展引力波探测分析之前, 还需要对每颗脉冲星进行细致的噪声分析, 包括白噪声、红噪

声以及色散噪声, 这在引力波探测中至关重要。CPTA 合作组分别使用四种独立的噪声分析流程 (TempoNest, Enterprise, 42, 42++)^[5-8] 进行脉冲星噪声分析, 得到了一致的分析结果, 说明 CPTA 所做的噪声分析结果十分可靠。

得益于 FAST 的高灵敏度, CPTA 数据中有约 35 颗毫秒脉冲星的计时精度达到了约 100 ns, 并且超过 50 颗毫秒脉冲星的计时精度达到了 200 ns! 对于相同的脉冲星, 对比国际上最好的观测精度, CPTA 的精度提高了数倍到数十倍! 这 57 颗毫秒脉冲星的计时精度如图 3 第 3 行所示。

值得注意的是, 2005 年人们对纳赫兹引力波的探测做出了预测^[9], 当时估计, 如果能对 20 颗计时精度为 100 ns 的毫秒脉冲星以两周监测一次的频率长期观测 5 年, 人们就能明确地直接探测到纳赫兹引力波。在 CPTA 观测之前, 国际上的脉冲星计时阵普遍只能对几颗毫秒脉冲星的计时精度做到 100 ns 水平, 而 CPTA 将这一精度水平的毫秒脉冲星的数量直接提高到 30 多颗。

3 CPTA 对引力波探测的结果

CPTA 合作组使用 DR1 数据对引力波信号进行了分析。以下分两个部分阐述对于纳赫兹随机引力波背景(GWB, 本文讨论的引力波信号除非特别说明, 均指 GWB)强度和谱形的测量, 以

及对引力波探测关键证据 HD 曲线的探测^[10]，相关分析均使用了 42++ 软件。

3.1 对引力波背景强度的限制

一般认为，随机 GWB 的谱可以用幂律函数表示，即 GWB 的特征强度 $A(f)$ 可以表示为引力波频率 f 的函数： $A(f) = A_c \left(\frac{f}{1 \text{ yr}^{-1}} \right)^\alpha$ ， A_c 是 GWB 频率为 1 yr^{-1} 处的强度， α 是 GWB 的谱指数。对于在宇宙演化历史中，大量的星系合并之后中心的超大质量双黑洞 (supermassive black hole binary, SMBHB) 绕转产生的大量引力波叠加产生的 GWB 而言^[11]，一般认为 $\alpha = -2/3$ 。

我们用标准的贝叶斯方法对 GWB 的强度和谱指数进行参数测量^[5]，并且使用并行退火马尔可夫链蒙特卡罗方法进行后验采样。GWB 强度和谱指数参数的先验范围分别是 $\log_{10} A_c \in [-18, -13]$ 以及 $\alpha \in [-1.8, 1.5]$ ，最后得到结果 $\log_{10} A_c = -14.4_{-2.8}^{+1.0}$ (95% 置信度范围)，参数的后验分布展示在图 4 中。如果将谱指数 α 固定为 $-2/3$ ，也即假设 GWB 主要由 SMBHB 贡献，那么得到 GWB 的幅度是 $\log_{10} A_c = -14.7_{-1.9}^{+0.9}$ (95% 置信度范围)。

从图 4 可以看出，现阶段我们对谱指数 α 的限制还非常不理想，这是由于现阶段的数据跨度非常短，数据仅对最低频率处的引力波信号敏感，

因而无法准确测量信号的谱形。

3.2 探测 Hellings—Downs 曲线

HD 曲线作为引力波探测的决定性证据，一直是纳赫兹引力波探测的关键。正如 3.1 节所述，由于 CPTA DR1 的数据跨度非常有限，在假设 GWB 幂律谱情形下，对引力波幅度和谱指数的限制都比较弱。因此，我们没有在 GWB 幂律谱假设下直接进行 HD 曲线的探测，而是在多个离散的引力波频率下进行 HD 曲线的测量，这样做的好处是，GWB 的谱形不会影响我们的结果。

我们主要在频率 $f_{1.5} = 1.5/T = 14.0 \text{ nHz}$ 附近搜寻 HD 曲线，这里 T 是 CPTA DR1 的数据总长度，为 3.4 年^[1]。所有脉冲星对的相关系数均展示在图 5(a) 中，最终给出 HD 曲线的探测信噪比 $S = 4.6$ 。为了验证这个方法的有效性和测量结果的可靠性，还做了两个模拟：在第一组模拟数据中，完全不注入引力波信号，HD 曲线在频率 $f_{1.5}$ 处探测得到 $S = -0.4$ ，也就是没有探测到引力波信号 (图 5 (b))；在第二组模拟信号中，注入了较强的引力波信号，假设幂律谱中，注入的引力波强度为 $A_c = 10^{-14}$ ，引力波谱指数 $\alpha = -2/3$ ，HD 曲线在频率 $f_{1.5}$ 处探测得到 $S = 8.5$ (图 5(c))。这表明，该方法在有引力波信号时能够明确探测到注入的引力波信号。

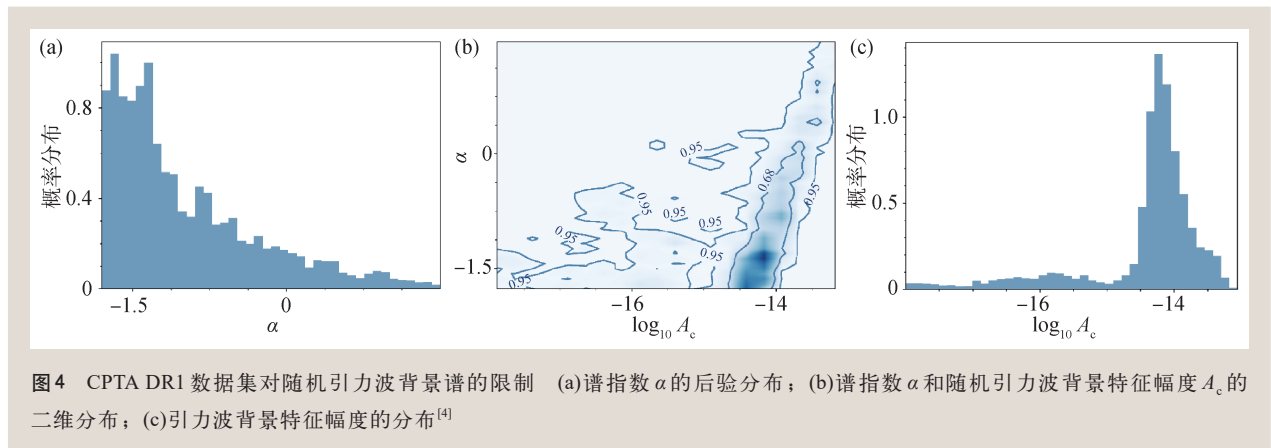


图 4 CPTA DR1 数据集对随机引力波背景谱的限制 (a) 谱指数 α 的后验分布；(b) 谱指数 α 和随机引力波背景特征幅度 A_c 的二维分布；(c) 引力波背景特征幅度的分布^[4]

1) GWB 的谱指数为负数，频率越低，GWB 对应的幅度就越高。虽然 f_1 对应的 GWB 幅度会更高，但是这里之所以选择 $f_{1.5}$ 而不是 CPTA DR1 能够得到的最低频率 f_1 ，原因是 S 内具有系统差，随着频率的增大而减小，在频率 f_1 处约为 80%，而在频率 $f_{1.5}$ 处对应的系统差降到了 10% 以内。由于 GWB 的幂律谱性质，在频率更高时，引力波幅度更低，因此我们对 HD 曲线的探测没有选择 f_2 以及更高频率。

当然，仅通过脉冲星对的相关系数还无法完全区分数据中的空间相关性是HD相关性还是偶极(余弦函数)相关性。利用这些脉冲星对的相关系数，在频率 $f_{1.5}$ 测到的空间偶极相关的信噪比 $S = 4.1$ ，低于对HD相关性的探测信噪比。利用贝叶斯分析方法，我们发现，对于CPTA的数据，HD相关性相较于偶极相关的贝叶斯因子 $B|_{\text{HDdipole}} = 66$ ，也就是说CPTA DR1更加支持HD相关性，也就是纳赫兹引力波起源。

CPTA的相关结果发表在英文天文学术期刊《天文与天体物理研究(RAA)》杂志。对纳赫兹引力波的探测结果的宣布，国际上欧洲EPTA—印度InPTA团队、美国NANOGrav团队、澳洲PPTA团队和中国CPTA团队进行了协调，同步于2023年6月29日在线发表相关研究论文^[12-14]，欧洲EPTA—印度InPTA团队、美国NANOGrav团队和澳洲PPTA团队对HD曲线的探测置信度分别约为 3σ ， $3-4\sigma$ 和 2σ 。

4 总结与展望

纳赫兹引力波天文学研究方兴未艾。随着几个PTA合作组的脉冲星观测持续开展以及计时数据的积累，将会获得越来越高的引力波探测灵敏度，纳赫兹引力波观测宇宙的窗口将被逐渐打开。

而物理学家已经逐渐开始基于这些观测去研究宇宙^[15, 16]，纳赫兹引力波天文学正迎来研究热潮。值得关注的是，对CPTA而言，由于现阶段数据积累时间较短，可以预见在未来的几年内，其对引力波的探测能力将会获得巨大提升(公式(1))。

除了引力波背景之外，人们还没有直接探测到由某个超大质量双黑洞产生的单个纳赫兹引力波^[17]。如果这样的单源引力波能够被探测到，并且通过引力波的定位以及后续从射电到伽马射线的全电磁波谱的后续跟踪，人们将可以直接对超大质量双黑洞展开深入研究。这将在双中子星合并事件之后，开启另一个多信使天文学的新时代^[18]。为了填补这一空白，CPTA团队正积极开展对单源引力波的搜寻工作。对于单源引力波，

PTA的灵敏度正比于 $\frac{A\sqrt{N_{\text{psr}}T/\Delta T}}{\sigma}$ ，因此相较于引力波背景，单源引力波的探测，对于数据长度的依赖没有那么显著，反而更加依赖数据整体的计时精度。这对于数据精度很高但是数据时间积累不够的CPTA而言，显然是一个好消息。

在脉冲星观测设备方面，中国也在发力。现阶段中国正在建设多台大口径全可动射电望远镜，如新疆奇台110米射电望远镜^[19]、云南景东120米脉冲星望远镜^[20]等，这些新的大口径全可动望远镜可以覆盖整个北天天区，而且可以覆盖最南约

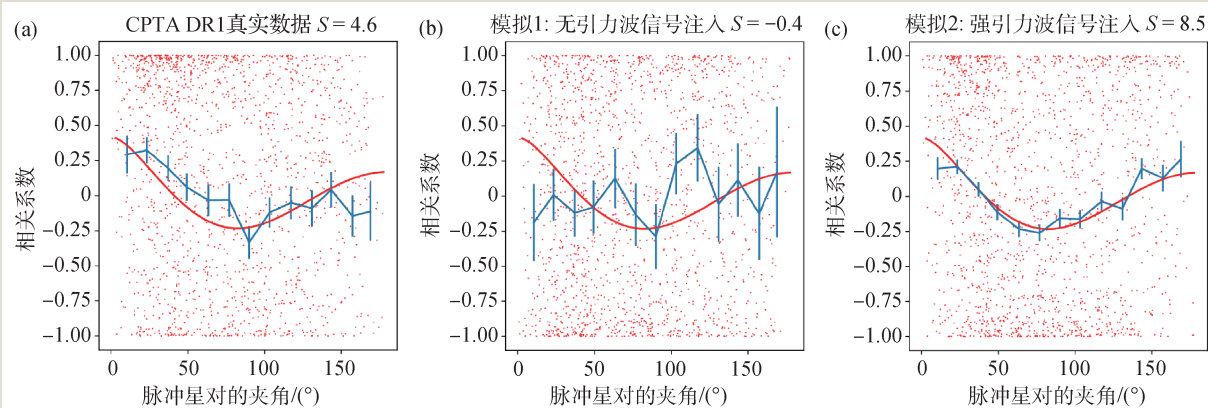


图5 HD曲线的测量结果。红色点表示所有脉冲星对在频率 $f_{1.5}$ 除了自相关外的相关系数，蓝色曲线表示对红色点取平均(仅仅为了帮助肉眼可见)，误差棒代表了对应范围内数据点的标准差，红色实线表示理论上的HD曲线。从左至右依次表示CPTA DR1真实数据(a)，没有引力波信号的模拟数据(b)，以及注入了强引力波信号的模拟数据(c)，三组数据得到的HD曲线信噪比 S 分别是4.6，-0.4和8.5

60°的天区, 届时CPTA可以观测更多的优质毫秒脉冲星, 可以极大增加脉冲星对的数量(现有脉冲星57颗, 脉冲星对数1596, 伴随着这些望远镜的建成, 脉冲星数量可超过110颗, 脉冲星对数也将超过6000对), 从而大大增加对引力波的探测灵敏度, 并且有望精细研究引力波的偏振模式及引力波背景的各向异性等。另一方面, 这些望远镜观测的频率范围也将更大(高达约10 GHz), 数据精度将会进一步增加, 数据中的星际介质噪声也能更好地被抑制, 从而最终将推动CPTA这个纳赫兹引力波天文台获得更高的引力波探测灵敏度, 并促进纳赫兹引力波天文学的蓬勃发展。

参考文献

[1] Foster R S, Backer D C. *ApJ*, 1990, 361: 300
[2] Lee K J. In: *Frontiers in Radio Astronomy and FAST Early Sciences Symposium 2015*, 2016, 502: 19
[3] Siemens X, Ellis J, Jenet F *et al.* *Class. Quantum Grav.*, 2013, 27: 084013
[4] Xu H, Chen S, Guo Y *et al.* *Research in Astronomy and Astro-*

physics, 2023, 23: 075024
[5] Lentati L, Alexander P, Hobson M P *et al.* *MNRAS*, 2014, 437: 3004
[6] nanograv/enterprise. <https://github.com/nanograv/enterprise>
[7] Caballero R N, Lee K J, Lentati L *et al.* *MNRAS*, 2016, 457: 4421
[8] GW data analysis code. <https://psr.pku.edu.cn/index.php/publications/gravitational-wave-data-analysis-code/>
[9] Jenet F A, Hobbs G B, Lee K J *et al.* *ApJL*, 2005, 625: L123
[10] Hellings R W, Downs G S. *ApJL*, 1983, 265: L39
[11] Phinney E S. 2001, arXiv: astro-ph/0108028
[12] Agazie G, Anumarlapudi A, Archibald A M *et al.* *ApJL*, 2023, 951: L8
[13] EPTA Collaboration, InPTA Collaboration, Antoniadis J *et al.* *A&A*, 2023, 678: A50
[14] Reardon D J, Zic A, Shannon R M *et al.* *ApJL*, 2023, 951: L6
[15] Afzal A, Agazie G, Anumarlapudi A *et al.* *ApJL*, 2023, 951: L11
[16] Smarra C, Goncharov B, Barausse E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2023, 131: 171001
[17] Lee K J, Wex N, Kramer M *et al.* *MNRAS*, 2011, 414: 3251
[18] 肖笛, 耿金军, 戴子高. *物理*, 2019, 48(9): 545
[19] Wang N. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*. 2014, 44: 783
[20] Wang M, Xu Y, Wang J *et al.* *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022, 52: 119501f

新书推荐

《得一见机——抱一的原则性意义》是“曹则贤科学教育‘一’字系列”的第四部, 同此前的《一念非凡》《惊艳一击》《磅礴为一》等重点关注具体的科学家或科学知识的著作稍有不同, 这本书更多着墨于科学理念层面的东西, 力求补足我国科学教育中最为缺失的部分。

本书就哲学、数学与物理文献中同 oneness, unit, unity, uniqueness, unitarity, unification, universality 等概念相关的内容展开论述, 试图传达科学发展过程中隐而不宣的抱一原则。“一”让事情变得简单且具有普适性, 找寻系统的一体性就是找寻真理的自洽性。物理学各

领域各有本源、使命与风格上的不同, 但都是关于自然的学问, 而自然是一个整体, 它们必须归于“一体”才能成就个体自身。最终的物理学, 是对自然一体性的展开, 是对实在作为一体的存在的表达。科学的进步经常表现为揭示、解释隐藏的一体性。统一了的学问带来更多拓展的可能性, 物理学史上每一步统一都带来对世界更深刻、更广泛的理解。唯一性与普适性是学问的威力与价值所在。

本书由外语教学与研究出版社编辑出版。若将《一念非凡》《得一见机》《惊艳一击》《磅礴为一》放在一起参校, 或更见作者之用心。

读者和编者



作者: 曹则贤
出版社: 外语教学与研究出版社
出版时间: 2024年8月
页码: 280页
定价: 99元