

帕克斯脉冲星计时阵

朱兴江[†]

(北京师范大学文理学院 珠海 519087)

2024-07-10收到

[†] email: zhuxj@bnu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240804

The Parkes Pulsar Timing Array

ZHU Xing-Jiang[†]

(Faculty of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China)

摘要 2023年,国际上几个脉冲星计时阵团队同时独立宣布发现了纳赫兹引力波背景信号的证据。这预示着一扇全新的引力波天文学观测窗口即将打开。帕克斯脉冲星计时阵是第一个正式运行的脉冲星计时阵实验,在研发先进的脉冲星观测仪器和高效的数据处理软件、发展脉冲星计时噪声分析和引力波搜寻方法等方面做出了开创引领性贡献。文章将介绍帕克斯脉冲星计时阵的发展历程、对领域的独特贡献和最新的研究成果。

关键词 帕克斯脉冲星计时阵, 纳赫兹引力波, 脉冲星计时噪声分析, 引力波搜寻

Abstract In 2023, several international pulsar timing array teams independently announced evidence for a nanohertz gravitational wave background. This implies that a new gravitational wave observational window will become available soon. The Parkes Pulsar Timing Array was the first pulsar timing array experiment to have made pioneering contributions in developing advanced instrumentation for pulsar observations, efficient data reduction software, methods for pulsar timing noise analysis, and gravitational wave searches. This article presents an overview of the Parkes Pulsar Timing Array project, its unique contribution to the field, and latest research results.

Keywords The Parkes Pulsar Timing Array, nanohertz gravitational wave, pulsar timing noise analysis, gravitational wave search

帕克斯是一个位于澳大利亚新南威尔士州首府城市悉尼以西350公里的偏远小镇¹⁾,它最出名的地方也许就是帕克斯射电望远镜(图1)。建成于1961年、直径64米的帕克斯射电望远镜发现了半数的已知脉冲星,可以说是享誉世界的一台望远镜。帕克斯还是澳大利亚的一个科技符号,其外形被印在了第一版流通的50澳元纸钞背面。此外,人类在月球上迈出的第一步正是通过帕克斯向全世界电视直播,这一经典故事也被拍成了电影。

1) 帕克斯镇的名称源于19世纪新南威尔士州政府首脑、有着澳大利亚“联邦之父”之称的亨利·帕克斯爵士。

休伊什和贝尔发现第一颗脉冲星的论文于1968年2月24日发表^[1],仅两周后帕克斯望远镜就开始了脉冲星的观测(部分脉冲星数据也印在了50澳元纸钞的背面,如图2所示)。利用帕克斯望远镜观测和搜寻脉冲星的开创性人物是澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的天文学家曼彻斯特(Richard N. Manchester)。曼彻斯特和美国天文学家泰勒(Joseph H. Taylor, 1993年度诺贝尔物理学奖得主)、英国天文学家莱恩(Andrew G. Lyne, Jodrell Bank天文台前台长)并称脉冲星天文

学三大“教父”。巧合的是，曼彻斯特于1968年2月12日开始在CSIRO工作，和脉冲星发现的公布日期仅相隔12天。



图1 1960年代的帕克斯望远镜。帕克斯望远镜建成于1961年，1968年起用于观测和搜寻脉冲星(图源:CSIRO)



图2 澳大利亚第一版50澳元纸币(1973—1995年间流通)，背面印有帕克斯射电望远镜和使用帕克斯记录的脉冲星数据(图源:RBA)

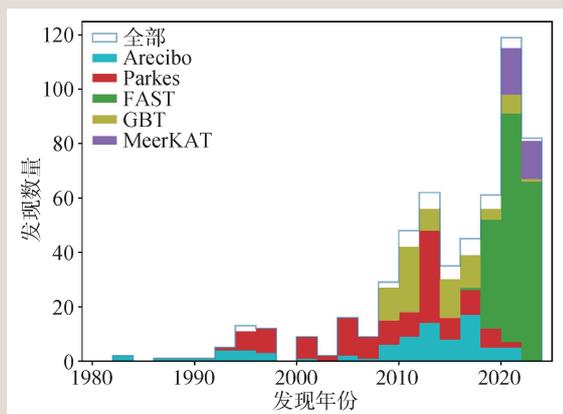


图3 毫秒脉冲星的发现数量根据发表年份和发现所使用的望远镜的统计情况^[6]

2) 数据来源: <https://www.astro.umd.edu/~eferrara/pulsars/GalacticMSPs.txt>

3) 澳大利亚研究基金会联邦学者(Australian Research Council (ARC) Federation Fellowship), 后改名为桂冠学者(ARC Laureate Fellowship)。

1 帕克斯脉冲星计时阵——第一个脉冲星计时阵

引力波对脉冲星的脉冲到达时间的影响在1970年代末由Sazhin^[2]和Detweiler^[3]独立计算出来。很显然，对于一颗脉冲星而言，引力波的影响和脉冲星计时数据中的各种噪声无法区分。1983年，Hellings和Downs计算出不同脉冲星对于一个随机引力波背景的响应函数^[4]：两个脉冲星计时数据之间的关联程度与它们相对地球的夹角有关。

脉冲星计时阵探测引力波的关键在于高精度地测量脉冲到达时间(TOA)。1982年，Backer等人发现了第一颗毫秒脉冲星^[5]，这类脉冲星TOA的测量精度远远超过了“正常”脉冲星。1990年左右，脉冲星计时阵的概念正式被提出来，但是长时间没有付诸实践，这是因为毫秒脉冲星数量太少了。这一局面在90年代中期开始的一系列帕克斯脉冲星巡天实施后得到了改变。图3展示了目前已知的毫秒脉冲星根据发现年份和相应的望远镜的统计情况^{2)[6]}。可以看出，从90年代到21世纪第一个十年，大部分毫秒脉冲星由帕克斯望远镜发现。这得益于帕克斯位于南半球的独特优势，可以观测到大部分银盘包括银河系中心方向。此外，值得一提的是，帕克斯脉冲星巡天的最大功臣是帕克斯20厘米多波束接收机。该接收机也是世界上最高产的一个脉冲星搜寻机器，发现了超过一千颗脉冲星。

成功的帕克斯脉冲星巡天很自然地孕育了第一个脉冲星计时阵项目——帕克斯脉冲星计时阵(PPTA)。PPTA于2003年启动，当年曼彻斯特获得了澳大利亚研究基金会联邦学者³⁾的资助。PPTA最初是CSIRO和斯威本科技大学之间的合作项目，后来慢慢扩展到包括澳大利亚和国际上十余所大学和科研机构几十名研究人员的合作组。PPTA于2004年2月6日开始对20颗左右脉冲星进行长期的规律性的计时观测。直至MeerKAT脉冲星计时阵项目MeerTime启动(2019年)⁴⁾，PPTA一直是南半球唯一的脉冲星计时阵项目。在此，笔

者直接翻译曼彻斯特于2006年发表在 *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics* 杂志⁵⁾上一篇文章^[7]的部分内容,以回顾PPTA设立之初的科学目标。

PPTA的主要目标如下:

- (1) 探测天体波源的引力波;
- (2) 建立一个脉冲星的时间基准;
- (3) 研究太阳系星历表中可能的

误差。

为了完成这些总体目标,众多的次级或中间目标需要完成,包括:

- 开发用于帕克斯射电望远镜的高精度脉冲星计时观测的仪器;
- 在3个频段:700、1400、3100 MHz,对约20颗毫秒脉冲星以2—3周的间隔进行计时观测,持续5年以上;
- 对超过10颗毫秒脉冲星获得精度优于100 ns的计时观测,其余脉冲星计时精度优于1 μ s;
- 对脉冲星计时数据中的引力波效应进行研究和建模;
- 开发可以分析多颗脉冲星计时数据且系统误差小于2 ns的软件;
- 开发引力波探测的方法并用于实际数据;
- 开发研究地球时不稳定性的方法,并在实践中建立基于脉冲星的时间标准;
- 开发研究太阳系星历表误差的方法,用于实际数据并改进太阳系星历表;
- 研究星际介质对脉冲星计时观测的影响,并尽可能修正这一影响;
- 开发(并在实践中使用)消除脉冲星计时数据中射频干扰的方法;
- 与国际上其他团队建立联系,促进合作和协同观测。

即使以今天的眼光来看,上述细致又全面的“任务表”依然具有极强的指导意义,每一项仍然是脉冲星计时阵探测引力波所面临的关键问题。



图4 2000年代和现在的帕克斯望远镜(图源:CSIRO)

作为这一领域的先行者,帕克斯团队在诸多方面做出了开创引领性的工作。下面一节着重介绍这些独特的贡献,最后一节介绍最新的研究结果。

2 PPTA的独到贡献

(1) 先进的仪器

从2004年2月到2018年5月,PPTA在三个射电波段进行观测:10 cm,20 cm,50 cm。20 cm波段采用帕克斯多波束(multi-beam)接收机(1.2—1.5 GHz),偶尔在多波束接收机不可用的时候,则使用H-OH接收机(1.2—1.8 GHz)。另一方面,10/50接收机是一个双频同轴系统,可以同时观测10 cm和50 cm两个波段。2009年,为了避开帕克斯以南200千米的一个数字电视信号基站的射频干扰,最低频的50 cm波段被迫移到了40 cm。2018年开始,PPTA采用了全新的超宽带低频接收机(ultra-wide-bandwidth low-frequency receiver, UWL)⁶⁾,单次观测可以覆盖700 MHz至4 GHz的范围,可以同时获得脉冲到达时间和频散量(dispersion measure)的高精度测量。类似的接收机也于近期被Effelsberg(埃菲尔伯格望远镜)和GBT(绿岸射电望远镜)采用,但是还没有产生PTA的数据。因此,帕克斯的UWL接收机可以说是脉冲星计时阵先进仪器的代表(图4展示了2000年代和现在的帕克斯望远镜,图5展示超宽带接收机的脉冲星观测数据)。

(2) 标准的数据处理软件

脉冲星的观测从原始数据到获得脉冲到达时间(TOA)常用的软件为PSRCHIVE^[8],数据通常以PSRFITS格式存储,而分析TOA数据拟合脉冲星

4) <http://www.meertime.org/>

5) 该杂志自2009年起已更名为 *Research in Astronomy and Astrophysics*。

6) 与之对应的超宽带高频接收机目前正在开发之中。

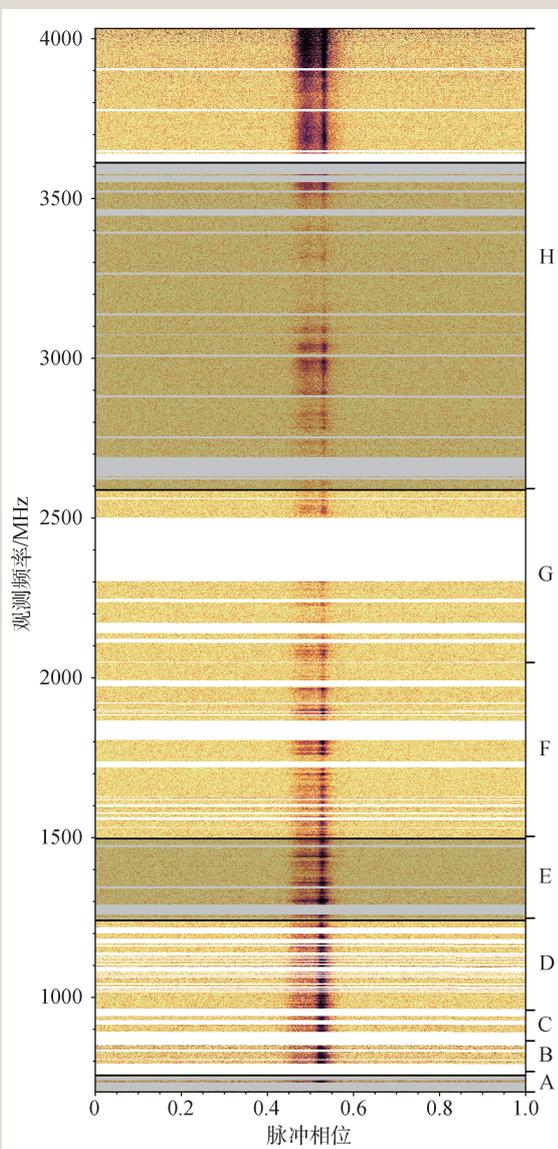


图5 脉冲星 J1600-3053 的帕克斯超宽带接收机(UWL)观测结果^[17]。图中颜色代表归一化强度随观测频率和脉冲相位的变化。阴影部分代表 PPTA 之前观测的三个波段，空白区域代表由于射频干扰而去除的频率。纵轴右边标示了 UWL 分成的 8 个子波段，由字母 A 至 H 表示

计时模型和处理计时噪声等需要用到的软件是 TEMPO2^[9]，这两个软件均由 PPTA 团队成员开发。其中，TEMPO2 长期以来都是脉冲星计时数据分析唯一的标准软件，直至后来北美团队主导开发的基于 Python 语言的软件包 PINT^[10] 出现。

(3) 修正频散量变化引起的噪声

目前 PTA 数据中一个已知的重要噪声成分由脉冲星的频散量随时间变化引起。这是由于地球

和脉冲星在银河系中的相对运动，导致脉冲星发出的光子所经历的自由电子柱密度随时间变化。PPTA 团队在国际上率先研究了频散量变化对高精度脉冲星计时的影响，并且发展了一种可以估计并修正频散量变化的方法^[11, 12]。

(4) 脉冲星计时数据中的红噪声处理

脉冲星计时模型的确立通常采用最小二乘拟合的方法，并且假定计时残差中的噪声为白噪声——残差在时间域互不相关。但是在脉冲星早期观测中就已经发现这一假设并不成立。这种所谓的“红噪声”给脉冲星计时模型参数估计带来系统误差。如何正确刻画红噪声并评估其对脉冲星计时数据相关科学应用的影响成了一个关键的问题。2011 年，Coles 等人发表了一种估计脉冲星计时残差的协方差矩阵(或称噪声功率谱密度)的方法^[13]，可以处理不均匀采样和随时间变化的 TOA 误差等情况。通过对协方差矩阵进行 Cholesky 分解，并对计时残差和计时模型同时白化，Coles 等人的工作解决了一个脉冲星计时观测领域熟知但悬而未决的问题。后来国际上其他团队也发展了功能类似的贝叶斯方法^[14]。

(5) 测量太阳系行星系统的质量

脉冲星计时观测中，TOA 的参考点从地球上的望远镜所在地转换到太阳系质心，依赖于太阳系天体的质量和位置以及它们随时间的变化。通常这些由所谓的太阳系星历表提供，最常见的为美国宇航局喷气推进实验室(JPL)的 DE 系列太阳系星历表。脉冲星计时阵受益于其高精度和长周期的数据，可以用来独立测量太阳系天体的质量。2010 年，Champion 等人使用 PPTA 中计时精度最高和数据最长的四颗脉冲星，在国际上首次使用脉冲星计时数据独立测量了从水星到土星的质量，并且得到的木星及其卫星系统的质量测量精度超过了一些人造航天器的测量^[15]。

(6) 构造一个脉冲星时间基准

脉冲星的 TOA 测量通常使用的是地球时，比如国际原子时。但是毫秒脉冲星自转稳定性极高，其脉冲 TOA 可以进行高精度的预报，因此从一开始脉冲星计时阵的一大科学目标就是建立一个脉冲星的时间基准。2012 年，Hobbs 等人发表了第一

个脉冲星时间基准“TT PPTA11”，并探测到当时最新的地球时“TT BIPM11”可能存在的误差^[16]。

(7) 远程观测和科普教育

PPTA 团队成员主导发起了帕克斯的一个科普教育项目，名为 PULSE@Parkes。这个项目面向澳大利亚和全球⁷⁾的高中生，让学生远程实时操控帕克斯望远镜、进行脉冲星观测、学习射电天文知识并处理脉冲星数据。在进行科普教育的同时，这一项目在早期也为帕克斯望远镜于2013年转向全远程观测模式积累了丰富经验。同时，该项目自2007年底启动至今，为包括PPTA项目在内的众多脉冲星观测项目积累了大量可以直接用于科学研究的数据。

3 PPTA 最新结果

3.1 数据集和全面的噪声分析

PPTA-DR3 数据集包含了32颗脉冲星最长达18年的计时数据^[17]。图6展示了其中12颗脉冲星的数据。由图6(a)可知，大部分脉冲星的观测始于2004年初，每一次观测分布在三个观测频率：中心波长分别为10 cm、20 cm和40/50 cm。2018年5月开始，观测采用了超宽带接收机，在图6(a)中超宽带数据被分成了8个子波段^[17]。在图6(b)中，超宽带数据部分已经对8个子波段做平均处理，得到10 cm、20 cm和40 cm波段数据。可以看出，脉冲星计时残差包含了TOA测量误差以外的众多噪声。

简单而言，计时残差中的噪声可以分成两类：与观测频率有关的 chromatic 噪

声和与观测频率无关的 achromatic 噪声。前者最典型的代表是频散量变化引起的噪声；后者则可能有多种起源，其中一种跟脉冲星自转的不稳定性有关。不同脉冲星计时阵对于噪声的处理方式并不一样，一个主要区别在于PPTA考虑了最全面的噪声模型，包括特定的观测频率或观测系统上独有的噪声，分别称为 band noise 和 system noise，姑且翻译成频带噪声和系统噪声^[18]。Goncharov 等人在 PPTA-DR2 数据集中发现所有26颗脉冲星中有10颗展示了明显的频带噪声或系统噪声^[19]。

3.2 引力波背景存在的证据

纳赫兹引力波探测的一大目标是随机引力波背景，其关键证据是不同脉冲星对的计时数据具有服从 Hellings—Downs(HD)曲线的相关性。

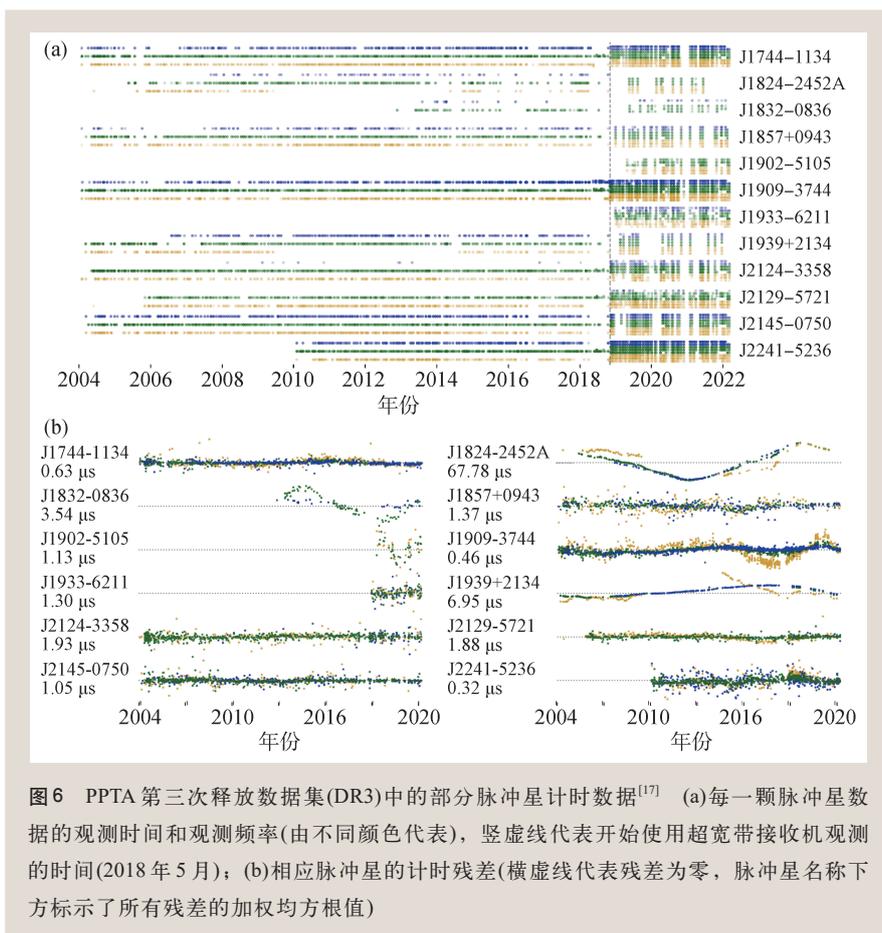


图6 PPTA 第三次释放数据集(DR3)中的部分脉冲星计时数据^[17] (a)每一颗脉冲星数据的观测时间和观测频率(由不同颜色代表)，竖虚线代表开始使用超宽带接收机观测的时间(2018年5月)；(b)相应脉冲星的计时残差(横虚线代表残差为零，脉冲星名称下方标示了所有残差的加权均方根值)

7) 该项目团队曾于2015年12月到访广州大学附属中学 (<https://blog.csiro.au/pulseparkes-in-china/>)。

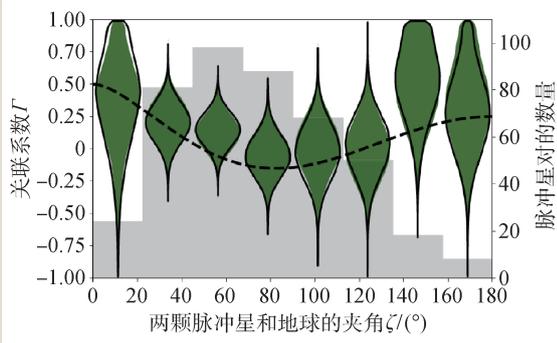


图7 PPTA-DR3数据测量的HD曲线^[20]：脉冲星对的计时数据相关性和两颗脉冲星与地球的夹角之间的关系，理论曲线由黑色虚线表示。绿色填充和黑色未填充的“小提琴图”(violin plot)基于引力波背景强度的不同假设。灰色的直方图表示PPTA脉冲星对随空间角度的分布

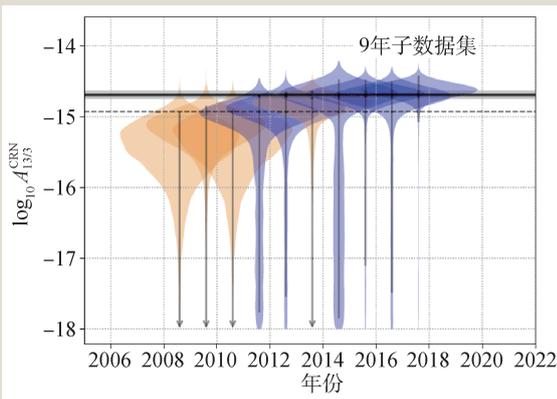


图8 共谱信号强度随时间的变化^[20]。“小提琴图”代表谱指数为13/3的共谱信号强度的后验概率密度。将PPTA-DR3数据切分成9年长度的子数据集，共10块；橙色对应于信号强度参数限制较弱，也就是说数据中没有很强的证据支持存在一个共谱信号(向下的灰色箭头表示95%置信度上限)，蓝色对应于数据对信号强度参数有限制的情况(灰色竖线代表95%置信区间)。横虚线代表由第一块9年数据得到的信号强度上限为 1.2×10^{-15} ，横实线和灰色区域代表整个DR3数据集得到的中值和1倍标准差置信区间

与两年前几个PTA的分析结果一致，PPTA在DR3数据中发现不同的脉冲星计时数据存在一个共同的噪声成分，且这一“共谱噪声”与一个随机引力波背景的影响是一致的。在最新的一轮数据分析中，几大脉冲星计时阵(欧洲、北美和帕克斯团队)在更高置信度探测到了这一共谱噪声：如果用幂律谱描述的话，这一随机信号的特征与超大质量双黑洞并合形成的引力波背景理论预期一致。但是，为了确定这一信号确实是引力波背

景，需要找到HD关联证据。

在PPTA-DR3的引力波搜寻工作中，考虑了30颗脉冲星：排除一颗红噪声特别强且位于球状星团的脉冲星和另一颗只有UWL观测的脉冲星，这些脉冲星组成了435对。根据相对地球的夹角，这些脉冲星对被均匀地分在了8个盒子(bin)。图7中灰色直方图代表每个盒子中脉冲星对的数量。绿色填充和黑色未填充的“小提琴图”均假定引力波背景可以由一个指数为13/3的幂律谱描述，其中绿色代表假定幂律谱的强度服从对数正态分布(由共谱噪声的测量给出)，黑色代表幂律谱强度固定在共谱噪声测量值的中值^[20]。可以看出，两种情况下得到的HD测量曲线与理论预期吻合得很好。由于具体的相关分析中假定不同的脉冲星对的观测完全独立，因此图7中的小提琴图的误差可能被低估了。为了估计HD关联的置信度，Reardon等人采用了一种随机移动脉冲星天空位置的方式，计算了得到图7的HD关联测量的统计置信度：其由噪声引起的概率小于2%，大约相当于2倍标准差^[20]。

3.3 随时间变化的引力波背景强度？

PPTA-DR3数据的纳赫兹引力波背景搜寻最引人注目的一个结果是发现信号强度似乎随时间变化^[20]。这一研究的动机在于最新的数据中找到共谱信号强度明显强于2015至2018年左右各个脉冲星计时阵得到的引力波背景强度的上限。因为拥有最长的数据，PPTA最适合研究引力波背景信号的非平稳性(non-stationarity)。图8展示了以9年为窗口，将PPTA-DR3切分成连续的10块，每一块数据得到的引力波背景强度估计(固定幂律谱的谱指数为13/3)。很明显，信号强度在随时间增加。特别地，第一块数据估计出的信号强度在95%置信概率下低于 1.2×10^{-15} ，然而，整个数据估计出的信号强度是 $(2.0 \pm 0.2) \times 10^{-15}$ ；两者在99.8%的概率上存在冲突。

根据当前的数据无法判断是什么原因导致了这种共谱信号的非平稳性。一个各向异性的随机

背景或者近邻宇宙中的一些椭圆轨道的超大质量双黑洞也许可以解释这一特征。总而言之，纳赫兹引力波探测依然需要更多脉冲星和更长时间的数据来确切无疑地探测到HD关联曲线、更高精度地测量引力波背景谱，并研究背景信号的特征

和起源。在不久的将来，对国际脉冲星计时阵IPTA-DR3的数据分析后也许会有答案。同时，我们也期待下一代的射电脉冲星望远镜，如MeerKAT、平方公里阵SKA、中国天眼FAST等以更高精度的数据助力纳赫兹引力波天文学的进步。

参考文献

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H *et al.* *Nature*, 1968, 217: 709
- [2] Sazhin M V. *Sov. Astron.*, 1978, 22: 36
- [3] Detweiler S. *ApJ*, 1979, 234: 1100
- [4] Hellings R W, Downs G S. *ApJ*, 1983, 265: L39
- [5] Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C *et al.* *Nature*, 1982, 300: 615
- [6] Liu X J, You Z Q, Chen Z C *et al.* *ApJ*, 2024, 962: 80
- [7] Manchester R N. *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 2006, 6: 139
- [8] Hotan A W, van Straten W, Manchester R N. *PASA*, 2004, 21: 302
- [9] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. *MNRAS*, 2006, 369: 655
- [10] Luo J, Ransom S, Demorest P *et al.* *ApJ*, 2021, 911: 45
- [11] You X P, Hobbs G B, Coles W A *et al.* *ApJ*, 2007, 671: 907
- [12] Keith M J, Coles W, Shannon R M *et al.* *MNRAS*, 2013, 429: 2161
- [13] Coles W, Hobbs G, Champion D J *et al.* *MNRAS*, 2011, 418: 561
- [14] van Haasteren R, Levin Y. *MNRAS*, 2013, 428: 1147
- [15] Champion D J, Hobbs G B, Manchester R N *et al.* *ApJ*, 2010, 720: L201
- [16] Hobbs G B, Coles W, Manchester R N *et al.* *MNRAS*, 2012, 427: 2780
- [17] Zic A, Reardon D J, Kapur A *et al.* *PASA*, 2023, 40: e049
- [18] Reardon D J, Zic A, Shannon R M *et al.* *ApJL*, 2023, 951: L7
- [19] Goncharov B, Reardon D J, Shannon R M *et al.* *MNRAS*, 2021, 502: 478
- [20] Reardon D J, Zic A, Shannon R M *et al.* *ApJL*, 2023, 951: L6

· 物理新闻和动态 ·

带色荷的原初黑洞

在早期宇宙的致密区域内因引力坍缩而形成原初黑洞(PBH)，它被看作是潜在的暗物质候选体。若PBH要构成所有的暗物质，则它们可能要比小行星还轻。最近麻省理工学院 Alonso-Monsalve 和 Kaiser 认为，这些微型 PBH 很可能如夸克和胶子那样具有净的“色荷”。Kaiser 说，这种带色荷的 PBH 可能会留下可观测的特征。

观测已经排除了暗物质完全由恒星级质量的 PBH 构成的可能性，但质量处于 10^{17} 和 10^{22} g 之间的 PBH 仍

有可能。在宇宙早期的不同时期会诞生不同质量的 PBH，而可能作为暗物质的这些 PBH 应该形成于大爆炸后仍处于解禁状态的夸克和胶子等离子体阶段。大多数 PBH 通过吞噬大量具有色荷的夸克和胶子形成，它们一般为色中性，并且质量足够大，可存活至今。然而，Kaiser 等人的计算表明，某些微型 PBH 形成于很小的区域，以至于吞进 PBH 的胶子的色荷会相互关联，从而导致 PBH 带净的色荷。

Kaiser 说，此前人们只在数学上讨论可能的带色黑洞，而他们的研究首次给出了一种现实的产生机制。当然，太小质量的 PBH 将会蒸发。然而，在宇宙早期核合成阶段，尚未完全蒸发的、带色荷的 PBH 可能显著地影响质子和中子的分布，从而最终导致元素丰度的微妙变化。

更多内容详见：Alonso-Monsalve E, Kaiser D I. *Phys. Rev. Lett.*, 2024, 132: 231402.

(徐仁新 编译自 *Physics*, June 6, 2024)

