

北美纳赫兹引力波天文台

陈思源^{1,†} 黄庆国^{2,††}

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

2024-07-10收到

† email: siyuan.chen@shao.ac.cn

†† email: huangqg@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20240805

The North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves

CHEN Si-Yuan^{1,†} HUANG Qing-Guo^{2,††}

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

(2 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 北美纳赫兹引力波天文台(NANOGrav)是基于美国和加拿大的脉冲星计时阵合作组织, 致力于搜索纳赫兹引力波, 并且是国际脉冲星计时阵联盟的一部分。文章主要介绍该合作组织的历史和取得的重要进展。自2007年以来, 北美纳赫兹引力波天文台已经完成了数据集、分析方法及其解释工作, 促成了2023年6月多个脉冲星计时阵合作组织宣布有引力波背景的证据。利用为期15年的数据集, 北美纳赫兹引力波天文台报告了一个振幅约为 2.4×10^{-15} 的共性红信号, 以及约 3.5σ 的引力波背景的特征空间相关性。预计通过数据集的组合, 例如即将推出的IPTA DR3和未来的数据集, 信号灵敏度将增加, 从而确认信号的引力波来源, 并限制引力波源的性质以及各种引力理论。

关键词 脉冲星, 引力波, 数据分析, 超大质量黑洞, 宇宙学

Abstract The North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav) is a pulsar timing array collaboration based in the USA and Canada, and is part of the International Pulsar Timing Array (IPTA) consortium. In this article we focus on the history of the collaboration and the milestones that have been achieved. Data sets, analysis methods and interpretation have been done by NANOGrav since 2007, leading to the announcement in June 2023 of evidence of a gravitational wave (GW) background by several IPTA members. Using the 15 year data set, NANOGrav has reported a nominal amplitude of around 2.4×10^{-15} for a common red signal and a significance of $\sim 3.5\sigma$ for the characteristic spatial correlations required for a GW background. The expected increase in sensitivity through combination of data sets, such as the upcoming IPTA DR3, and future data sets will confirm the GW origin of the signal, which should constrain the properties of the source and the implications of various theories of gravity.

Keywords pulsar, gravitational wave, data analysis, supermassive black hole, cosmology

北美纳赫兹引力波天文台(NANOGrav)于2007年10月正式成立,其目标是利用毫秒脉冲星探测 nHz 至 μ Hz 范围内的超低频引力波。为了实现这一目标,该合作组从2004年开始收集数据。两个主要使用的望远镜是绿岸望远镜和阿雷西博望远镜(2020年由于倒塌终止了阿雷西博望远镜的使用)。自2015年和2017年起,甚大阵列(VLA)望远镜和加拿大氢强度测绘实验(CHIME)也开始用于观测北美纳赫兹引力波天文台的毫秒脉冲星。自2015年以来,北美纳赫兹引力波天文台一直作为物理前沿中心(PFC)由美国国家科学基金会资助,并在2021年续签。如今,该合作组织在美国和加拿大的70多个机构中拥有超过170名成员。

该合作组织由选举产生的主席、四名选举产生的成员和两名物理前沿中心联合主任组成的管理团队管理。内部委员会负责改善合作组织的公平性和氛围,此外,还有外部咨询委员会和评估员,以及国际脉冲星计时阵(IPTA)指导委员会成员,用于与更广泛的团体交流。科学工作由工作组组织,每个工作组都专注于脉冲星计时阵科学的某一特定方面:包括网络基础设施、脉冲星搜索、计时、噪声估计、引力波探测、天体物理学、教育和公众科普等。每个工作组都有一个最多由三名联席主席组成的选举委员会,他们共同组成了一个主席委员会,以更好地协调不同工作组的科学工作。

每年在具有北美纳赫兹引力波天文台成员的各种机构举办两次合作会议。此外,还有每月的合作和每周的工作组电话会议,以组织日常工作并分享正在进行项目的最新进展。

在国际上,各个脉冲星计时阵团体于2009年作为国际脉冲星计时阵汇聚在一起。北美纳赫兹引力波天文台、欧洲脉冲星计时阵(EPTA)和帕克斯脉冲星计时阵(PPTA)都是资助成员。印度脉冲星计时阵(InPTA)于2021年作为正式成员加入,而中国脉冲星计时阵(CPTA)和基于MeerKAT的脉冲星计时阵合作组(MPTA)则作为观察成员加入。每年在全体脉冲星计时阵的成员中轮流举办一次国际脉冲星计时阵的会议。

1 观测

为了将毫秒脉冲星用作稳定的天文时钟,需要观察很长一段时间,至少几年,以解释长期变化,观察的节奏要足够高,以保持计时模型的稳定性,并在不同的射电频率下观察,以测量脉冲星和地球之间的星际介质的变化。而且我们需要计时大量的脉冲星,以测量Hellings—Downs(HD)空间相关性,这是引力波探测的关键标准。因此,北美纳赫兹引力波天文台已优化观测时间表,尽可能多地计时脉冲星,至少以每月最少一次的节奏,并尽可能长时间地观测所有脉冲星,目前某些毫秒脉冲星的观测时间已超过15年。为了测量色散量随时间的变化,通常会在几天的时间窗口内为同一颗脉冲星安排不同频段的观测。假设星际介质在几天内保持相对不变,两次在不同频率的观测可以用来计算星际介质中的电子数量。然后,这个值可以与一个月后的下一组观测的值进行比较,以构建一个分段模型(DMX)。这种模型一直是北美纳赫兹引力波天文台用来解释长期色散测量量变化的标准方法。一个具有足够灵敏度的大频带宽度的单次观测应该可以得到对色散测量的更好约束。当将来使用更多的宽带接收器和后端系统时,这将成为可能。由于观测不能总是在完全相同的节奏下进行,新的脉冲星被添加,仪器被升级或退役,整个脉冲星计时阵数据集非常不均匀。

1.1 望远镜

绿岸望远镜(GBT,图1(a))是位于美国西弗吉尼亚州的全方位可转动的单口径射电望远镜,直径为100米。它于2000年开始进行观测,覆盖无线电频率范围在100 MHz和116 GHz之间。对于北美纳赫兹引力波天文台的观测,只使用了围绕800、1400 MHz的两个频段。最初在2004年,记录观测的后端仪器是绿岸天文信号处理器(GASP)系统,该系统与阿雷西博望远镜使用的天文信号处理器系统相同。2012年,在绿岸望远镜安装了

波多黎各终极脉冲星处理仪器系统的副本,即绿岸终极脉冲星处理仪器(GUPPI)。2019年,在绿岸望远镜安装了新一代的后端信息记录系统,并正在与绿岸终极脉冲星处理仪器系统进行比较和优化。此外,目前正在规划、开发和测试一种新的超宽带接收器。新的接收器将允许观测从几百MHz到几GHz的完整且连续的无线电频率带。

位于波多黎各的阿雷西博望远镜(图1(b))于1963年投入使用,直到2016年FAST开始观测为止,一直是世界上最大的单口径射电望远镜,其直径为305米。直到2020年倒塌,它仍然是世界第二大的单口径射电望远镜。频率覆盖范围从50 MHz到11 GHz。北美纳赫兹引力波天文台的观测从2004年开始,使用了以327、432、1400和2350 MHz为中心的四个频段。自第一次观测以来,一直使用天文信号处理器(ASP)观测后端系统。它允许形成最多64 MHz带宽的相干消色散观测。2020年,它升级为波多黎各终极脉冲星处理仪器(PUPPI),将观测增加到以1400/2350 MHz为中心观测的600/460 MHz带宽。两个低频段在PUPPI中只略微扩宽。增加的观测带宽和减少的仪器白噪声提供了更多的信息,使得脉冲星无线电信号的到达时间的测量变得更加精确。

新墨西哥州的甚大阵(VLA,图1(c))望远镜是一个射电干涉仪阵列,有28个直径为25米的天线。这些天线位于移动的铁轨上,形成一个Y形结构,可以分隔开36.4 km。该仪器于1980年投入使用,观测能力在1—50 GHz之间。自2015年以来,北美纳赫兹引力波天文台在1.5—3 GHz频段进行了脉冲星计时观测。使用的观测系统被称为“Y”终极脉冲星处理仪器(YUPPI) (“Y”是用于北美纳赫兹引力波天文台观测的甚大阵的形状),它与波多黎各终极脉冲星处理仪器和绿岸终极脉冲星处理仪器是相同的一代。它的相干消色散带宽为1.5/3 GHz观测的800/1700 MHz。

加拿大氢强度测绘实验(CHIME,图1(d)),位于加拿大不列颠哥伦比亚省,于2017年开始观测。四个相邻的圆柱形反射器,每个面积为20 m×100 m,工作频率在400—800 MHz之间。2021年签署了数据共享协议,然而,尚未在北美纳赫兹引力波天文台数据集中包含加拿大氢强度测绘实验数据。北美纳赫兹引力波天文台和加拿大氢强度测绘实验的一组专门的研究人员正在努力合并这两个数据集。其中的挑战包括加拿大氢强度测绘实验的低无线电频率和较低的灵敏度。但每日的观测,特别是,加拿大氢强度测绘实验观测的高频率,显著增加了计算成本。



图1 (a)绿岸望远镜(图源: Jay Young for Green Bank Observatory); (b)阿雷西博望远镜(图源: Arecibo Observatory/NSF); (c)甚大阵(VLA)望远镜(图源: NRAO/AUI/NSF); (d)氢强度测绘实验(CHIME)(图源: The CHIME Collaboration)

1.2 数据集

迄今为止,该合作组织已经发布了五个数据集,每个数据集之间相隔大约3年。这符合以开放、透明和可重复的方式进行科学研究的政策,使得结果可以被外部科学家和公众审查和验证。每个数据集都扩展了总的时间跨度以及观察到的脉冲星的数量。这表明了对纳赫兹引力波以及其他脉冲星研究的灵敏度的稳步提高。

5年数据集^[1]是北美纳赫兹引力波天文台发布的第一个数据

集, 包含了17颗脉冲星大约5年的观测。引力波背景的上限被设定为 7×10^{-15} , 参考频率为1/年(每年一次)。

9年数据集^[2]将观测时间跨度增加到9年, 总共有37颗脉冲星。一致的预测是, 引力波背景的上限得到了改善, 达到 1.5×10^{-15} ^[3]。

11年数据集^[4]增加了8颗脉冲星, 总共有45颗。这是最后一个为引力波背景特征应变设定上限的数据集, 上限为 1.45×10^{-15} ^[5]。这个结果有两个有趣的地方。一方面, 尽管增加了更多的脉冲星和更长的数据集, 但上限几乎保持不变。这可能暗示数据集中存在一个尚未被测量到的隐藏信号。另一方面, 对我们太阳系中的物体在脉冲星计时阵观测时间跨度内的位置和速度有一个好的描述是非常重要的。由于观测被转换到太阳系的质心, 不正确的描述可能会引入额外的噪声, 这种噪声在不同的脉冲星之间呈偶极相关。为了解决这种系统误差, 通过引入一个模型来刻画这种系统误差, 从而得到11年数据集给出的引力波背景的上限。

12.5年数据集^[6, 7]主要增加了观测的时间跨度, 而脉冲星的数量只增加了2颗。使用这个数据集, 北美纳赫兹引力波天文台合作组首次报告发现了一个具有中位数振幅为 1.92×10^{-15} 的共同红信号^[8]。然而, 信号的引力波起源的证据并不明确。

15年数据集(图2)^[9]再次延长了时间跨度, 也增加脉冲星的数量到了68颗。虽然这个数据集包含了甚大阵列的数据, 但没有包含加拿大氢强度测绘实验的数据。这是最新发布的数据集, 经过分析, 显示出显著的证据(约 $3.5-4\sigma$)指向信号的引力波起源的特征空间相关性。在周期为1年的振幅是 2.4×10^{-15} ^[10], 与欧洲脉冲星计时阵+印度脉冲星计时阵、帕克斯脉冲星计时阵和中国脉冲星计时阵在他们各自的独立数据集上同时发布的分析结果一致。

迄今为止, 已经发布了两个由国际脉冲星计时阵成员的数据组合而成的国际脉冲星计时阵数据集。第一次数据发布(IPTA DR1)^[11]包含了北美纳赫兹引力波天文台5年的数据, 第二次数据发

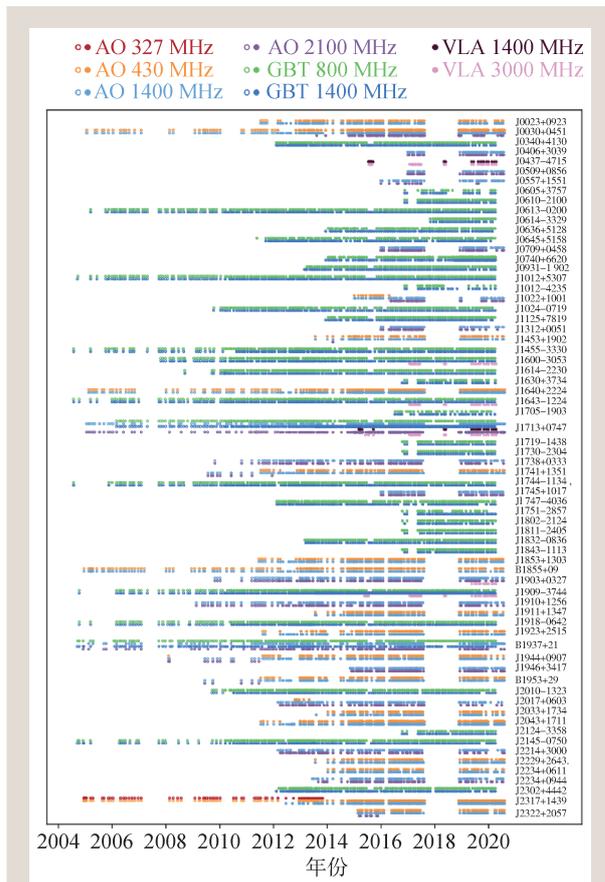


图2 北美纳赫兹引力波天文台15年数据集中的脉冲星观测结果(不同颜色代表使用了不同望远镜和仪器)^[9]

布(IPTA DR2)^[12]包含了北美纳赫兹引力波天文台9年的数据。IPTA DR1包含49颗脉冲星和总共27年的时间跨度, 为引力波背景的特征应变设定了在1/年的上限振幅 1.7×10^{-15} 。在IPTA DR2^[13]上进行了寻找引力波背景信号的全面分析。尽管国际脉冲星计时阵第二次发布的数据是由旧的数据集合并而成, 但发现了一个一致的共同的不相关的红信号, 振幅为 2.8×10^{-15} 。旧数据集发布的上限与最近数据集中检测到的信号之间存在明显的不一致, 但是这种不一致可以用可能存在未知的额外噪声以及不稳定性来解释。国际脉冲星计时阵第三次数据发布的工作正在进行中, 将包括最近的北美纳赫兹引力波天文台15年数据集, 以及欧洲脉冲星计时阵第二次发布的数据、帕克斯脉冲星计时阵第三次发布的数据、印度脉冲星计时阵第一次发布的数据和MeerKAT脉冲星计时阵最近

结果, 预计国际脉冲星计时阵第三次发布的数据将为引力波搜索提供前所未有的灵敏度, 最多可以观测到 115 颗毫秒脉冲星, 观测时间近三十年。观测使用大量不同的望远镜、系统和脉冲星既是组合的挑战, 也是在不同脉冲星计时阵之间交叉检查观测结果的一种方式。

1.3 工具和技术

在小的时间间隔和频率带上, 每颗毫秒脉冲星计时观测都包括对光子强度的测量, 这些光子被转换为电压并进行数字化。对于脉冲星计时阵数据分析方面, 这些数据通过时间加和与平均进行进一步处理, 可能还包括对频率进行处理。这导致了脉冲星观测的强度轮廓, 可以与模板匹配, 找到旋转的数量, 从而找出自上次观测以来经过的时间, 即到达时间(TOA)。它们与观测的仪器和某些无线电频率的不确定性有关。然而, 随着观测频带的扩大和仪器的灵敏度提高, 这个过程将受到频带内轮廓演变、星际介质效应和模式变化等效应的限制。宽带计时是一种可以补救这些效应的方法, 已经有几个团队, 包括北美纳赫兹引力波天文台成员在研究。这个想法是使用具有频率演变的模板轮廓来匹配观测, 除了到达时间、不确定性和频率, 还可以得到轮廓的额外信息。北美纳赫兹引力波天文台开发的方法和工具已经在 12.5 年的数据集中常规应用, 以生成并发布宽带数据集和标准数据集。两个数据集都经过验证, 可以产生相似的结果。

第一个用于模拟脉冲星计时观测的软件包是 TEMPO^[14]。2006 年, TEMPO2 软件包实现了重大修订和升级^[15]。从那时起, TEMPO2 成为该领域中使用的标准计时软件。它一直在维护、更新, 至今仍在使用。北美纳赫兹引力波天文台合作组通过 PINT^[16]软件包, 在现代框架中实现了计时模型的完全替代和独立实现。它基于 Python, 模块化结构, 在未来更容易升级。使用 PINT 可以帮助发现 TEMPO2 中的错误, 反之亦然。这两个独立的软件包增加了人们对观测计时分析的

信心。

计时模型和噪声分析是用 temponest^[17]完成的, 这是一个扩展了 TEMPO2 功能的软件包。北美纳赫兹引力波天文台成员已经开发了一个可以进行脉冲星噪声分析和搜索引力波信号的替代和独立的软件包。几个软件包已经被合并成一个通用的、用户友好的基于 Python 的框架, 即 enterprise^[18]。由于合作组的主要目标是引力波探测, 在北美纳赫兹引力波天文台持续的努力下, enterprise 已经成为引力波搜索的标准, 并被其他所有的脉冲星计时阵使用。

2 科学问题

虽然主要目标是探测引力波, 但北美纳赫兹引力波天文台成员也在一系列科学问题上进行研究, 从脉冲星的无线电信号发射、计时和噪声分析, 到引力波搜索、天体物理和宇宙学的解释。

2.1 脉冲星搜索

为了加强探测引力波的信心, 需要在阵列中对许多毫秒脉冲星进行计时, 并且很好地理解它们的性质。为了实现这一目标, 北美纳赫兹引力波天文台通过巡天寻找新的毫秒脉冲星, 并将这些新发现的毫秒脉冲星添加到观测中。脉冲星搜索大致可以分为两类, 目标搜索和盲搜索。目标搜索关注来自其他仪器和望远镜的某些候选者, 以验证源是否为脉冲星。盲搜索覆盖天空中的一个区域, 寻找新的脉冲星。这通常是用一个新的仪器完成, 该仪器提供了增强的灵敏度, 已知的脉冲星可以作为验证仪器性能的依据。望远镜的每次指向都必须重复至少两次, 以排除仪器噪声。由于源的参数大部分是未知的, 所以必须尝试许多可能的值。这在计算上是昂贵的, 因为每次试验都需要存储和处理大量的数据。产生新发现的主要调查由绿岸北天顶(GBNCC)和阿雷西博脉冲星 L 波段馈源阵列(PALFA)进行, 分别发现了 33 颗、46 颗毫秒脉冲星^[19, 20]。

2.2 脉冲星计时和噪声分析

引力波搜索需要对每个由计时和噪声模型描述的脉冲星系统有良好的了解。随着北美纳赫兹引力波天文台数据集积累的数据越来越多且质量越来越好，对计时模型的约束也有所改善。这体现在更小的计时参数的拟合不确定度，以及对双星系统参数和夏皮罗延迟的测量。随着数据集观测时间达到16年，脉冲星噪声模型与计时模型的内在红噪声越来越协调。因此，需要为每颗脉冲星考虑高级噪声模型。北美纳赫兹引力波天文台已经朝这个方向迈出了步伐，通过扩展简单的幂律噪声模型，并开发工具，允许使用高级模型进行同时的计时和噪声分析。一个重要的领域是色散测量变化，已经通过分段色散测量(DMX)方法进行了建模，该方法可能吸收来自引力波信号的功率。北美纳赫兹引力波天文台正在进行高级噪声模型的工作，并计划在未来的数据集中应用这些模型进行计时和噪声模型的分析以及引力波搜索。

其他的脉冲星科学包括但不限于，测量脉冲星的质量、检验广义相对论和研究星际介质。北美纳赫兹引力波天文台成员已经发表了许多值得关注的结果。例如，找到当时最重的脉冲星 J0740+6620，其质量为2.14个太阳质量，以此为中子星的状态方程设定限制^[21]，或者使用双脉冲星系统 J0737-3039A/B 来约束广义相对论^[22]。

2.3 引力波背景

自从开始以来，随机引力波背景一直是脉冲星计时阵的主要候选对象。预计两个超大质量黑洞的缓慢旋近将在 nHz—mHz 范围内发射引力波，而脉冲星计时阵对此敏感。电磁观测的证据表明，承载这些超大质量双黑洞的星系以分层的方式合并。因此，应当存在一个超大质量双黑洞的种群，并且所有发射的引力波应形成随机引力波背景。其他来源也可能在脉冲星计时阵频段中产生引力波背景(见下面的部分)。

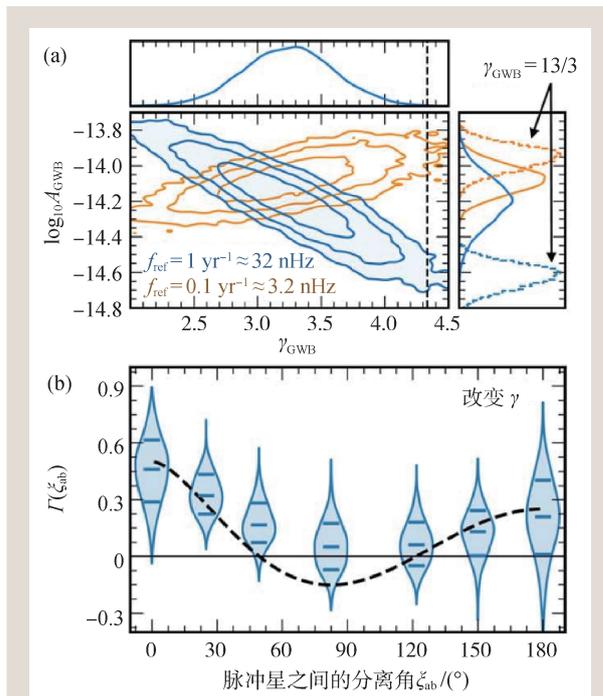


图3 (a) 从对15年数据集分析中得到的疑似引力波背景信号的性质。蓝色和橙色线显示了通过分析归一化为1/(1年)和1/(10年)的15年数据集获得的幂律模型参数的后验分布。中心图显示二维分布，顶部和右侧图显示一维分布；(b) 角度空间相关性的后验分布以蓝色显示，黑色虚线表示HD相关性。蓝色小提琴图和HD相关性(黑色虚线)之间的一致性表明信号可能来自引力波背景^[10]

对5年数据集的分析发现，毫秒脉冲星阵列中没有共同的信号。因此，2013年，北美纳赫兹引力波天文台的第一个引力波背景的上限被设定为 7×10^{-15} ^[11]。随着时间跨度、脉冲星数量和仪器灵敏度上的增加，引力波背景的上限也继续降低到9年的 1.5×10^{-15} ^[3]，以及到11年的 1.45×10^{-15} ^[5]。在合作开始的10多年后，12.5年的数据集显示了一个共同的频谱红信号，振幅为 1.92×10^{-15} ^[8]。然而，没有找到 Hellings—Downs 空间相关性的证据，因此没有迹象表明这个信号是引力波起源的。

15年数据集，以及欧洲脉冲星计时阵+印度脉冲星计时阵、帕克斯脉冲星计时阵和中国脉冲星计时阵同时发表的论文，确认了振幅约为 2.4×10^{-15} 的共同红信号^[10]。此外，15年数据集中用贝叶斯和频域学派分析方法测量到了HD相关性的强烈证据(图3)。为了估计证据的显著性，必须将测量值与零假设可能值的分布进行比较。已

经提出了两种方法来从数据集中创建零假设分布。天空混乱(sky scrambling)方法：通过改变脉冲星在天空中的位置，应该能打破HD相关性。相位移动方法：通过添加随机相位移动，应该能打破共同信号的时间相关性。使用相位移动方法，引力波信号的显著性大于 3.5σ ，被认为更可靠。而使用天空混乱方法，结果的显著性在 $3-4\sigma$ 之间。

如果在12.5年、15年和其他独立数据集中发现的这个共同信号和HD相关性的证据确实是来自超大质量双黑洞的引力波背景，那么其能谱可以用来约束潜在的种群和与合并过程相关的天体物理。北美纳赫兹引力波天文台已经使用新开发的holodeck软件包进行了深入的分析。holodeck的主要目标是提供一个框架，在这个框架中，既可以使用半解析模型，也可以使用宇宙学模拟来计算引力波背景的应变谱，并与脉冲星计时阵的数据集观测到的能谱进行比较。它已经在15年数据集的引力波背景的能谱分析中使用过^[23]。合作组发现，从天体物理观测和模拟中推导得到的幂律约束与15年数据集测量的振幅和谱指数参数广泛一致(图4)。特别是，脉冲星计时阵的引力波背景探测可以帮助约束星系恒星质量函数、星系和

黑洞质量关系以及合并时间尺度。

一个真实的超大质量双黑洞种群可能不会产生各向同性的引力波背景，例如，如果恰好有一个可以分辨的单个超大质量双黑洞在附近产生很强的引力波信号，这个源会在测量引力波背景的各向同性的天空图上显示为一个热点。另一方面，宇宙学源应该也可以产生引力波背景，其在天空上分布的方差非常小。因此，测量显著的各向异性可能是区分引力波背景信号来源的一种手段。北美纳赫兹引力波天文台成员已经在15年数据集的疑似引力波背景信号中寻找各向异性，但没有发现它们存在的显著证据^[24]。

2.4 来自单个源的连续引力波

除了引力波背景，脉冲星计时阵搜索的另一种主要候选信号是单一源。单个超大质量双黑洞对每个脉冲星脉冲信号的到达时间产生确定性效应，这个效应取决于源的性质和脉冲星的距离。由于我们假设超大质量双黑洞处于缓慢吸积阶段，连续引力波波形可以用具有单一特征频率的正弦波近似。一个圆轨道的超大质量双黑洞可以用9个参数来描述：应变振幅、啁啾质量、光度距离、天空位置的两个角度、引力波频率和偏振、轨道相位和倾角。如果所有这些都已知，就可以确定地计算这个源对阵列中每个脉冲星的脉冲信号到达时间的影响。值得注意的是，从单独的计时观测中精确测量阵列中脉冲星的距离是非常困难的。脉冲星计时阵合作组使用频率或贝叶斯方法从数据中约束这些参数，这可能在计算上非常昂贵。北美纳赫兹引力波天文台最近在努力提高软件的效率，使得以前不可行的分析能够运行^[25]。

北美纳赫兹引力波天文台合作组一直在每个发布的数据集中寻找这些信号。虽然连续引力波的上限从5年^[26]到11年的数据集^[27]稳步下降。自12.5年数据集以来，可能源自引力波的共同红信号的探测^[28]增加了疑似引力波背景和单个连续引力波源之间的协方差。到目前为止，还没有找到可以解析的单个引力波源的确凿证据。每个上限相当于在95%的置信水平下排除了连续引力波源

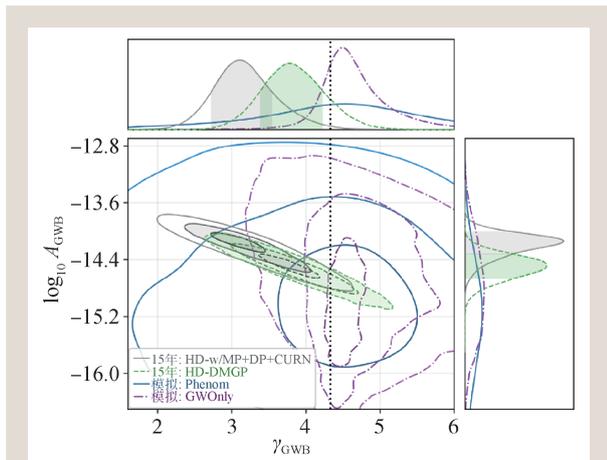


图4 从15年数据集中恢复的幂律参数分布与使用holodeck软件的天体物理模型之间的比较。灰色和绿色线条显示使用两种不同模型对15年数据集进行分析得出的后验分布。相比之下，蓝色和紫色线显示来自holodeck两种不同模型超大质量黑洞双星群的后验分布。中心图显示二维分布，顶部和右侧图显示一维分布。观察到的分布与模型分布之间存在一致性^[23]

到地球的最大距离。在11年之后的数据集中，使用啁啾质量为 1×10^9 太阳质量，引力波频率约为8 nHz的超大质量双黑洞不太可能在距离地球100 Mpc的范围内存在。对15年数据集的分析表明，引力波背景信号可能来自连续引力波源，反之亦然^[29]。这与欧洲脉冲星计时阵的发现一致，可能存在一个频率相似的超大质量双黑洞源，频率约为4.5 nHz。因为单个引力波源的证据并非决定性的，所以为天空中的所有方向设定了上限(图5)。未来的数据集和组合将有助于区分引力波背景和连续引力波。

2.5 早期宇宙和新物理的引力波

在12.5年数据集中发现共同红信号^[30]，以及15年数据集对此信号的引力波起源证据的确认^[31]，由此引发了这个疑似引力波信号的起源问题。超大质量双黑洞是主要的候选者，但不能排除其他来源的可能性。15年数据集的分析包括一个可能的引力波背景对新物理的约束，其中包括宇宙暴胀、标量诱导的引力波、早期宇宙相变、宇宙弦、畴壁和超轻暗物质等。在文献中还有许多其他的理论。

前面各种引力波源已经通过信号的能谱性质进行了研究，而另一个重要的研究是探索HD曲线本身。它的确切形状取决于潜在的引力理论。显著的偏离可能暗示存在其他极化、大质量的引力子和其他破坏性广义相对论的预言。由于当前对HD曲线测量的不确定性远大于宇宙方差，北美纳赫兹引力波天文台的观测并不敏感于相对广义相对论的小偏差。其他替代极化产生的特征相关性与HD曲线非常不同。使用12.5年数据集，首次报告了横向标量极化的证据^[32]。北美纳赫兹引力波天文台的一个独立分析确认了这个发现^[33]。然而，这个信号可能可以被追溯到对单个脉冲星噪声的不当建模。一旦从阵列中移除了这颗脉冲星，尽管横向标量极化仍然比其他极化略有优势，但是它的证据被显著削弱了。15年数据集的分析结果显示，HD相关性与横向标量极化相比较的贝叶斯因子约为2，显示HD相关性略占优势。与此

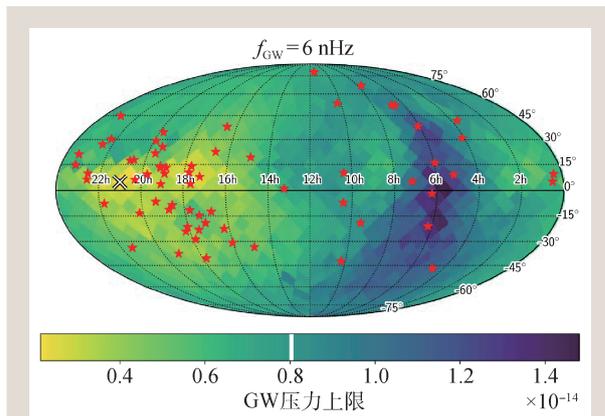


图5 15年数据集中最敏感频率 $f_{\text{GW}} = 6 \text{ nHz}$ 的单个超大质量黑洞双星的引力波应变上限的天图。红色星显示北美纳赫兹引力波天文台观测到的脉冲星位置。在脉冲星数量较多的地方，极限较低^[29]

同时，合作组的结果^[34]和外部组的结果^[35]是一致的。由此可见，横向标量极化并没有被15年数据集排除掉。

3 小结与展望

自2007年成立以来，北美纳赫兹引力波天文台在朝着探测纳赫兹引力波的目标取得了重要的进展。迄今为止，已发布了五个数据集，使用绿岸望远镜、阿雷西博望远镜和甚大阵，未来还计划包括加拿大氢强度测绘实验的数据。前三个数据集极大地提高了对引力波背景强度上限的限制，而最近的两个数据集显示出引力波信号的迹象。该合作组织还努力为国际脉冲星计时阵提供了数据和资源，用于两个数据组合及其分析。北美纳赫兹引力波天文台合作组成员还在解释数据集结果方面发挥了领导作用。多年来，出现了两个广泛的领域：天体物理学中的超大质量双黑洞和早期宇宙中的宇宙学源。

随着2023年6月由CPTA、EPTA+InPTA、NANOGrav和PPTA提出的脉冲星计时阵数据测试引力波信号的证据，合作组织的未来方向是进一步努力探测和表征这一信号。即将推出的国际脉冲星计时阵的第三个数据集，包括最新的北美纳赫兹引力波天文台数据集以及未来的数据集，将使我们进入纳赫兹引力波天文学时代。对引力

波的单个源的可能探测还将为脉冲星计时阵和电磁对应体的多信使天体物理学提供可能。虽然我们已经看到了引力波信号的证据，但这个旅程才刚刚开始。

参考文献

- [1] Demorest P B *et al.* ApJ, 2013, 762:94
- [2] Arzoumanian Z *et al.* ApJ, 2015, 813:65
- [3] Arzoumanian Z *et al.* ApJ, 2016, 821:13
- [4] Arzoumanian Z *et al.* ApJS, 2018, 235:37
- [5] Arzoumanian Z *et al.* ApJ, 2018, 859:47
- [6] Alam Md F *et al.* ApJS, 2021, 252:4
- [7] Alam Md F *et al.* ApJS, 2021, 252:5
- [8] Arzoumanian Z *et al.* ApJ, 2020, 905:34
- [9] Agazie G *et al.* ApJ, 2023, 951:9
- [10] Agazie G *et al.* ApJ, 2023, 951:8
- [11] Verbiest J P W *et al.* MNRAS, 2016, 458:1267
- [12] Perera B B P *et al.* MNRAS, 2019, 490:4666
- [13] Antoniadis J *et al.* MNRAS, 2022, 51:4873
- [14] Nice D *et al.* Astrophysics Source Code Library, 2015, 1509:002
- [15] Hobbs G B, Edwards R T, Manchester R N. MNRAS, 2006, 369:655
- [16] Luo J *et al.* ApJ, 2021, 911:45
- [17] Lentati L *et al.* MNRAS, 2014, 437:3004
- [18] Ellis J *et al.* Astrophysics Source Code Library, 2020, 1912:015
- [19] Stovall K *et al.* ApJ, 2014, 791:67
- [20] Nice D J *et al.* ApJ, 2013, 772:50
- [21] Cromartie H T *et al.* Nat. Astron., 2020, 4:72
- [22] Kramer M *et al.* Phys. Rev. X, 2021, 11:041050
- [23] Agazie G *et al.* ApJ, 2023, 952:37
- [24] Agazie G *et al.* ApJ, 2023, 956:3
- [25] Becsy B, Cornish N J, Digman M C. Phys. Rev. D, 2022, 105:122003
- [26] Arzoumanian Z *et al.* ApJ, 2014, 794:141
- [27] Aggarwal K *et al.* ApJ, 2019, 880:116
- [28] Arzoumanian Z *et al.* ApJ, 2023, 951:28
- [29] Agazie G *et al.* ApJ, 2023, 951:50
- [30] Arzoumanian Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 127:251302
- [31] Afzal A *et al.* ApJ, 2023, 951:11
- [32] Chen Z, Yuan C, Huang Q G. Sci. China Phys. Mech. Astron., 2021, 64:120412
- [33] Arzoumanian Z *et al.* ApJ, 2021, 923:22
- [34] Agazie G *et al.* ApJ, 2024, 964:14
- [35] Chen Z C, Wu Y M, Bi Y C *et al.* Phys. Rev. D, 2024, 109:084045

悟理小言

书写科普文章的理由

人类社会似乎常一厢情愿以为，背诵文言文或顾炎武《廉耻》的心灵，一定比探索自然运行规律或原子结构的心灵，更加美丽？

社会公众仿佛理所当然断定，渴望诵读杜甫诗和苏轼词的心灵，一定比渴求揭示麦克斯韦方程式和薛定谔波动方程的心灵，更加愉悦？

开普勒自撰的墓志铭“昔日曾测量天空的高度，现在要丈量地壳的深度。灵魂遨游苍穹，躯体长眠九泉。”¹⁾岂不如范仲淹“先天下之忧而忧，后天下之乐而乐”的坦荡皎洁？

费曼的“科学宇宙”之宏伟悠长²⁾，岂不及屈原的《天问》，张若虚的“人生代代无穷已，江月年年只相似”，或陈寅恪的“独立之精神，自由之思想”的广阔绵远？

科学家仰望苍穹、俯瞰大地的心灵，有其美丽、愉悦、皎洁、坚毅卓绝和恢弘绵远的精神层面与求真情怀，非文人想当然以为的形而下的知识悸动而

已。这是我们需要书写科普文章的理由之一。

注：

1) 笔者译自英文版：“I measured the skies, Now the shadows I measure. Skybound was the mind, Earthbound the body rests.”

2) 费曼的“科学宇宙”：“费曼想象，没有生命之前的宇宙历史，远比有了生命之后的宇宙历史更加悠久。他想象，所有的生命，包括植物、动物以及人类，都是由原子组成，都遵循着相同的科学(物理、化学、生物学)定律，因此都是平等的。费曼想象，在没有生命作为参与者和观察者之前的宇宙，必定开展着一段段波澜壮阔、狂野与绚丽的演进。他鼓励人类，去大胆想象在没有生命(生物)之前的宇宙的辽阔景象，以及之后出于偶然的生命起源与其演化过程的悠扬和无尽未知奥秘！”——林志忠文章“追求知识，思考人生——《费曼的彩虹》书评及其他”（《物理》2018年47期10月）。

(台湾阳明交通大学 林志忠 供稿)