

欧洲脉冲星计时阵

郭彦君[†]

(中国科学院国家天文台 北京 100101)

2024-07-15 收到

[†] email: guoyj@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20240803

The European Pulsar Timing Array

GUO Yan-Jun[†]

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

摘要 脉冲星计时阵是星系尺度的引力波探测器, 通过对多个毫秒脉冲星进行长期计时观测来探测低频纳赫兹引力波, 可能的引力波源有星系中心超大质量双黑洞的并合和早期宇宙的物理过程等。2023 年, 国际上多个脉冲星计时阵团队宣布发现了纳赫兹引力波存在的证据。在利用脉冲星计时阵探测低频引力波的研究中, 欧洲具有长久的历史和重要的贡献。文章介绍欧洲脉冲星计时阵的发展历程、观测数据、早期科学研究和最新进展。

关键词 脉冲星计时阵, 引力波探测器, 纳赫兹引力波, 黑洞, 毫秒脉冲星

Abstract A pulsar timing array (PTA) is a galaxy-scale detector of gravitational waves (GWs) based on the regular timing of an ensemble of pulsars. Possible sources are low-frequency nano-Hz GWs from the merger of supermassive black hole binaries at galaxy centers or from the physical processes in the early Universe. In 2023, several PTA collaborations around the world reported evidence for nano-Hz GWs. Europe has a long history and plays a crucial role in the global efforts for detecting GWs with PTAs. This article describes the history, data, early scientific results, and recent progress of the European PTA.

Keywords pulsar timing array, gravitational wave detector, nanohertz gravitational wave, black hole, millisecond pulsar

1 发展历程

利用脉冲星计时研究引力波的构想始于 20 世纪 70 年代^[1, 2], 之后在 20 世纪 80 年代人们意识到能够使用一组脉冲星组成脉冲星计时阵(PTA)来直接探测引力波^[3]。20 世纪初, 随着脉冲星巡天的开展和大量毫秒脉冲星的发现, 脉冲星计时阵的建立有了现实的可能性。在利用 PTA 探测纳赫兹引力波的研究中, 欧洲具有长久的历史和重要的贡献。欧洲脉冲星计时阵(EPTA)是欧洲脉冲星天

文学家的多国合作项目, 通过结合各成员机构和望远镜的资源来提高脉冲星科学成果的质量, 首要目标是使用脉冲星计时直接探测引力波^[4]。EPTA 于 2004 年正式成立, 最初的合作机构包括欧洲最大的 5 个射电望远镜的运营单位。EPTA 建立在欧洲脉冲星研究成功合作的历史之上。1994 年, 欧洲脉冲星网络(EPN)获得欧盟资助, 以促进欧洲范围内的合作并建立了 EPN 脉冲星数据档案。随后在 2005 年, EPN 的合作单位因“PulSE——欧洲脉冲星科学”而被欧盟委员会授

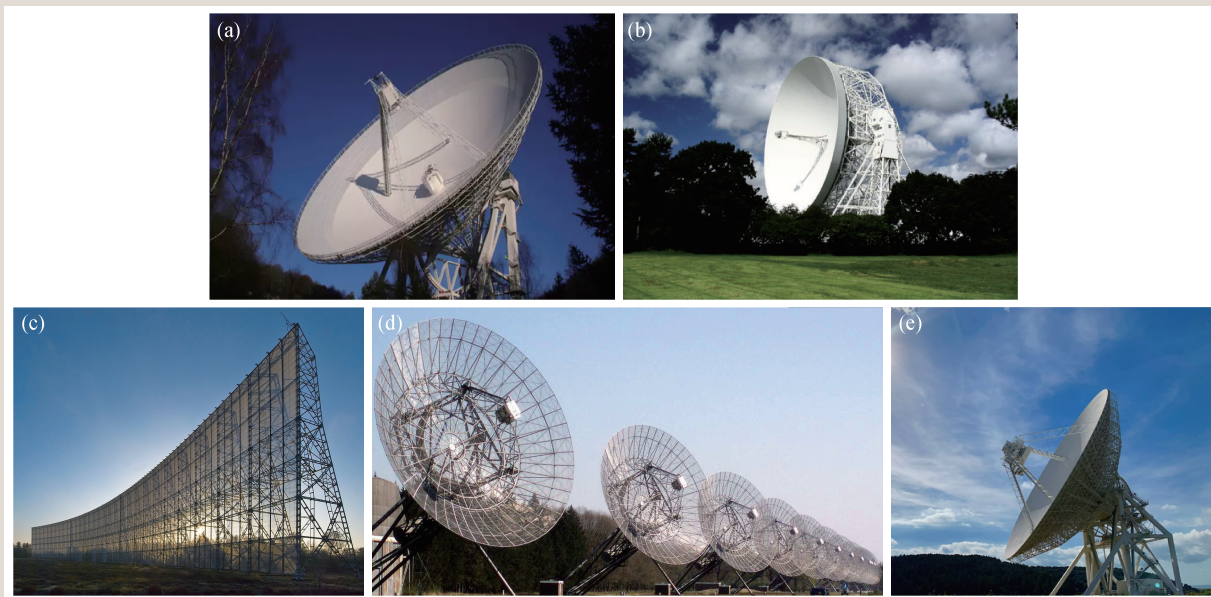


图1 EPTA使用的射电望远镜，分别为德国的Effelsberg望远镜(a)，英国的Lovell望远镜(b)，法国的Nancay望远镜(c)，荷兰的Westerbork望远镜(d)和意大利的Sardinia望远镜(e)。这些望远镜也可以组合成LEAP模式进行共同观测

予笛卡尔奖，以表彰欧洲脉冲星合作研究所取得的成就。在成立之后的几年里，EPTA通过吸纳脉冲星天文学理论方面的合作成员扩大了规模，包括伯明翰大学、剑桥大学和米兰大学，以及位于波茨坦和汉诺威的阿尔伯特·爱因斯坦研究所和巴黎天文台等。

EPTA也使用在其成立之前积累的历史数据，最早可追溯至1994年，这使EPTA拥有最长的数据基线。EPTA主要使用欧洲的5个百米级望远镜进行观测，分别是英国的Lovell望远镜，法国的Nancay望远镜，德国的Effelsberg望远镜，荷兰的Westerbork望远镜和意大利的Sardinia望远镜(图1)。独特的观测条件和长久的数据积累使EPTA具有特殊的优势。多个望远镜提供了更宽的观测频率范围和更短的观测时间间隔，而各种不同的望远镜类型、无线电环境、接收机和后端硬件也提供了发现数据中系统性误差的方法，这对可靠的引力波探测非常重要。从2009年起，LEAP (Large European Array of Pulsars)项目成立，这些望远镜也进行共同观测，通过相位相干叠加组成等效直径为195米的射电望远镜^[5]。

EPTA早期先后发布了两次引力波背景上限，并进行了引力波探测方面的广泛理论研究。

EPTA终于在近期取得了引力波探测的重要进展，EPTA DR2数据中探测到了引力波信号存在的迹象，置信度为 3σ ^[6]。这一结果与CPTA，NANOGrav，PPTA的类似结果同期公布于2023年6月29日。下面将分别介绍EPTA使用的每个望远镜、观测数据和早期科学研究，以及引力波探测的最新进展。

2 观测设备

2.1 Lovell望远镜

英国Jodrell Bank天文台(JBO)的76.2米Lovell望远镜建于1957年，位于曼彻斯特以南约25公里处，由曼彻斯特大学运营。自1968年发现脉冲星以来，Lovell望远镜一直在观测脉冲星，并拥有广泛的脉冲星观测数据库。JBO的脉冲星观测主要使用1.52 GHz的L波段接收机，带宽为384 MHz。脉冲星数据使用数字滤波器组(DFB)和ROACH板处理。DFB观测最初以1400 MHz为中心，带宽128 MHz。从2009年9月起，观测频率覆盖范围增加到以1520 MHz为中心的512 MHz频段。每个源的典型积分时间根据脉

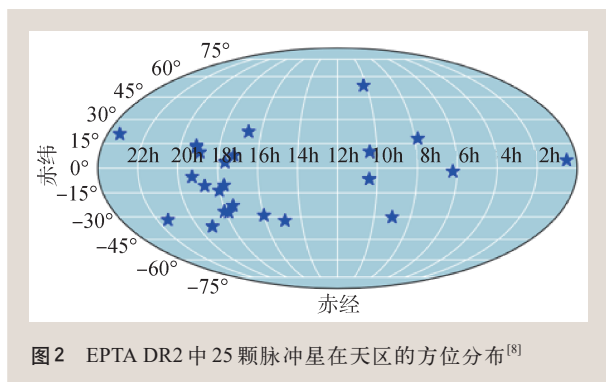


图2 EPTA DR2 中 25 颗脉冲星在天区的方位分布^[8]

冲星和历元而变化, 中位观测时间在 10 分钟到 55 分钟之间。

2.2 Nancay 射电望远镜

法国 Nancay 射电望远镜(NRT)建于 1965 年, 它使用倾斜的平坦主反射镜和球形副反射镜将无线电波聚焦到包含接收机的移动塔上。沿着子午线, 望远镜的接收面积相当于直径 95 m 的圆盘。自 2004 年底, NRT 开始进行定期的 EPTA 计时观测。这些观测是使用望远镜的 L 和 S 波段接收机进行的, 频率覆盖范围为 1.1 GHz 至 1.8 GHz 和 1.7 GHz 至 3.5 GHz。从 2004 年底到 2014 年初, 传统的 Berkeley—Orléans—Nançay (BON) 后端用于记录 EPTA DR1 中包含的脉冲星计时数据。从 2011 年 8 月开始, Nancay Ultimate Pulsar Processor Instrument (NUPPI) 成为主要的脉冲星计时后端, 覆盖 512 MHz 的频率范围, 观测持续时间从 20 分钟到 80 分钟不等。

2.3 Westerbork 综合射电望远镜

Westerbork 综合射电望远镜(WCRT)位于荷兰, 由荷兰射电天文研究所(ASTRON)运营, 于 1970 年开始观测。WCRT 是一台孔径合成干涉仪, 由 14 个东西向配置的 25 m 天线组成, 最大基线为 3 公里, 接收面积相当于 93 m 的单碟天线。阵列配置的优点是可以减少射电干扰的影响。EPTA 观测频段主要在 1.38、2.27 和 0.35 GHz。从 1999 年到 2010 年间, 脉冲星观测使用 PuMa I 后端进行。从 2007 年到 2015 年间, 脉冲星观测则使用相

干消色散后端 PuMa II。脉冲星观测时间通常在 15 到 45 分钟之间。

2.4 Effelsberg 射电望远镜

德国 Effelsberg 100 米射电望远镜于 1971 年建成, 由马克斯·普朗克射电天文研究所运行。该望远镜位于波恩西南约 30 公里处埃菲尔范围内朝南的山谷中, 这有助于保护它免受附近城市的射电干扰, 同时允许观测到低至 -31° 的赤纬。Effelsberg 射电望远镜的大多数脉冲星观测在 1.4 GHz 和 2.6 GHz。从 1996 年到 2010 年, 主要的脉冲星计时观测后端是 Effelsberg—Berkeley Pulsar Processor (EBPP), 带宽 112 MHz。该系统自使用以来唯一的重大变化是 2009 年将中心频率更改为 1.4 GHz 频段以避免射电干扰。自 2010 年以来, 主要计时后端一直是基于 ROACH 的相干消色散系统 Asterix, 带宽 500 MHz。每个源的典型积分长度为 30 分钟。目前, 超宽带接收机(UBB)正在 Effelsberg 投入使用, 它提供了 2.4 GHz 的带宽, 允许同时观测 0.6—3 GHz。

2.5 Sardinia 射电望远镜

意大利的 Sardinia 射电望远镜(SRT)是一个完全可动的 64 m 抛物面天线, 具有活动表面, 可以进行 0.3—110 GHz 的观测。它位于撒丁岛南部, 海拔约 700 m。主要用于 EPTA 观测的接收机是双频段 L/P 接收机(P 频段=305—410 MHz, L 频段=1.3—1.8 GHz)。EPTA 观测期间的数据主要通过 DFB 和 ROACH 后端获取, 两个后端都能够对传入数据执行实时折叠, 带宽均为 500 MHz。EPTA 在 SRT 的观测于 2014 年 3 月开始, 一直持续到 2016 年 7 月, 并于 2018 年 5 月起恢复。之间的中断原因有 L/P 接收机的维修、天线活动表面的整修以及控制室和数字仪器的迁移等。这些观测大部分是作为 LEAP 观测计划的一部分进行的。对于 EPTA DR2, SRT 数据直接集成到 LEAP 数据中, 而不是作为独立的脉冲星计时数据包含

在内。

3 观测数据和早期研究

EPTA的观测在每个望远镜上独立进行,观测频率大约每月一次,NRT的典型观测频率更高。总体而言,对于1.4 GHz左右的标准计时频率,EPTA对于所有优先源的平均观测频率实际上是每周一次。EPTA DR1发布于2015年,包含42颗脉冲星的数据^[7]。早期数据记录系统大多数使用非相干消色散,可实现的计时精度受到了限制。

EPTA DR2增加了来自下一代相干消色散记录系统的数据,显著增加了每个望远镜的带宽和灵敏度^[8]。DR2包括从DR1源列表中选出的25颗脉冲星,在节省计算时间的同时保留了完整阵列对引力波的大部分灵敏度(图2)。DR2数据集中不同脉冲星的观测时间跨度从14年到25年不等。该数据集具有广泛的观测频率覆盖范围,从约300 MHz开始一直到约4 GHz(图3)。经过25年的观测,EPTA的望远镜已累计对这些毫秒脉冲星进行了约65000次观测,从而实现了几天的有效观测间隔,大多数脉冲星的计时精度优于1微秒。值得注意的是,通过对多个望远镜数据的比较,EPTA DR2数据分析发现了Nancay望远镜数据存在的时钟改正误差。这表明了多望远镜数据交叉检验可以有效发现系统误差,以及PTA探测时钟误差的能力。

通过以每周一次的频率监测一系列毫秒脉冲星数年到数十年,PTA可以探测 10^{-9} — 10^{-7} Hz

频率范围内的引力波。在这些频率下,最可能探测到的信号是随机引力波背景(GWB),它是由许多超大质量双黑洞发出的引力波叠加产生的。该信号表现为随机高斯过程,其特征在于脉冲到达时间的变化的功率谱可近似为幂律形式,并且是在所有脉冲星中都存在的公共信号;脉冲星间的相关性在广义相对论下具有Hellings和Downs(1983)确定的特征形式。频谱的幅度和形状与宇宙星系并合率以及并合过程后形成的双星系统的动

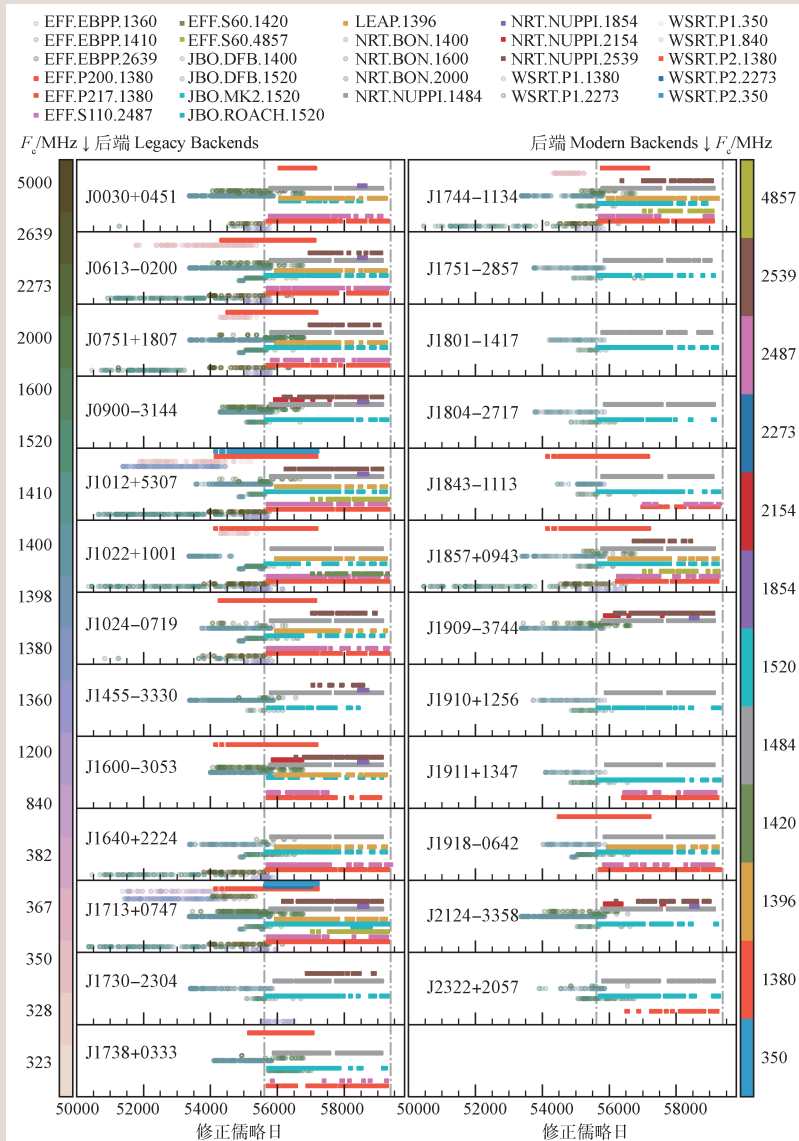


图3 EPTA DR2内25颗脉冲星的数据总览,图中主要展示观测时间和频率的分布^[8]。不同颜色表示不同的观测后端。多个望远镜的观测为大多数脉冲星提供了良好的观测频率覆盖,但同时设备的更新换代导致了仪器后端的复杂性。早期数据仅包含一部分脉冲星,同时频率覆盖较差。竖虚线示意了DR2new的数据范围

力学特性密切相关。因此,如果PTA观测到的信号起源于超大质量双黑洞(SMBHB),将了解这些物体的形成、演化和动力学提供重要信息。此外,这将给SMBHB在自然界中的并合带来决定性的证据,从而克服“最终秒差距问题”,填补星系结构形成之谜中缺失的观测部分。

2011年 van Haasteren 等人发表了使用EPTA数据对随机引力波背景的第一个限制,特征频率 1 yr^{-1} 处 95% 置信度的引力波幅度上限为 6×10^{-15} ^[9]。2015年基于EPTA DR1给出了更低的引力波幅度上限: 3×10^{-15} ^[10]。EPTA的长期数据也用来通过相对论性双星计时进行引力理论检验^[11, 12]。EPTA进行了引力波搜寻方法和基本理论假设方面的广泛研究:比如优化观测计划以提高EPTA对随机引力波背景的灵敏度,根据每个脉冲星的噪声特性以及仪器性能调整分配的观测时间^[13];发展了脉冲星数据分析的贝叶斯方法,如今广泛用来进行噪声分析和引力波搜寻^[14, 15];开发了脉冲星噪声分析软件 TempoNest^[16];发展搜寻引力波背景的各向异性的方法^[17];研究使用PTA探测单个双黑洞系统引力波的可能性^[18];研究与引力波源相关的天体物理情景^[19],使用引力波背景上限对宇宙弦施加限制等^[20]。

最重要的进展是近期在EPTA DR2数据中探测到了引力波信号存在的迹象。EPTA DR2包含5个望远镜和LEAP的数据,在二十多年中经历了数次设备的更新换代。EPTA数据的复杂性为数

据分析带来了很大挑战。早期数据的精度与频率覆盖和近期数据都有较大差别,在数据处理方面也可能存在更多误差。为了排除这些因素的影响,EPTA DR2的数据分析考虑了两组不同的数据,第一组使用所有数据,称为DR2full;第二组仅使用更换现代后端之后的数据,称为DR2new,时间跨度10.3年。下一节重点介绍基于EPTA DR2的引力波探测结果和相关研究。

4 最新进展

4.1 引力波探测

EPTA在2011年和2015年发布过两次引力波背景的幅度上限^[9, 10]。在对EPTA DR1的6颗最灵敏的脉冲星分析中,已经发现了公共信号的迹象,但由于误差较大,这一结果并未发表。从2020年开始,EPTA开始了新一轮使用最新数据探测引力波的努力。使用EPTA DR2对同样6颗脉冲星的分析可以清晰探测到公共信号的存在^[21],但测量相关曲线需要更多脉冲星提供不同角距离的限制。而通过对EPTA DR2 25颗脉冲星数据的分析,在近二十年的努力之后,EPTA数据第一次看到了Hellings—Downs相关曲线的迹象^[6]。这一结果与CPTA, NANOGrav和PPTA的类似结果于2023年6月29日联合公布^[22–24]。

PTA探测引力波的最关键证据是Hellings—Downs曲线。图4展示了EPTA DR2对脉冲星计时残差的相关系数的测量结果。三百个脉冲星对等分到10个角距离间隔中,分别拟合相应角距离处的相关系数。小提琴图代表相关系数的后验概率分布,蓝色和橙色分别对应DR2full和DR2new的结果。DR2new的相关系数更符合Hellings—Downs(HD)曲线,而DR2full的结果相对HD曲线向上偏离。由于早期数据质量的限制,DR2full可能有更多系统误差会干扰相关系数的测量。此外,DR2new中所有脉冲星具有相近的数据长度,而DR2full中不同脉冲星的数据长度有很大差异,这可能导致信号的低频成分仅有少数脉冲星的贡献,

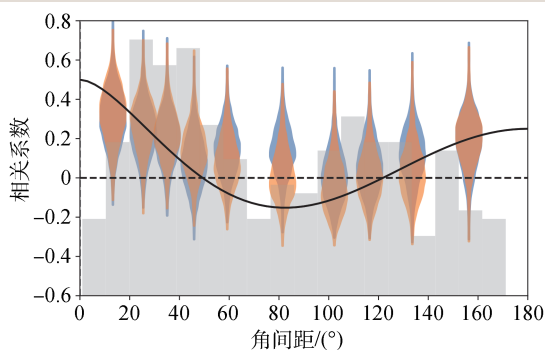


图4 脉冲星之间的相关系数随脉冲星相对地球的角间距的变化^[6]。黑色曲线是理论的Hellings—Downs曲线。蓝色和橙色的小提琴图是DR2full和DR2new的测量结果。灰色的直方图表示脉冲星对的数量随空间角度的分布

不利于限制相关系数。

EPTA 也通过贝叶斯方法对不同模型进行比较来判断数据是否支持引力波的存在。使用 DR2new 数据, 相对于不存在相关性的公共信号模型, 具有 HD 相关的引力波信号模型的贝叶斯因子约为 60, 这表明 DR2new 更支持引力波的存在。定量估计引力波探测的置信度需要进一步的

统计分析。目前主要通过两种方法打乱真实数据中可能存在的 HD 相关性, 即随机移动脉冲星在天空中的位置以及随机扰动脉冲星计时信号的相位, 从而估计引力波探测发生误报的可能性。使用不同方法和统计量得到的引力波置信度略有不同, 但总体在 99.7% 以上, 即三倍标准差。国际上通行的探测标准一般要求 5 倍标准差, 因此目前的置信度还不足以宣称探测到引力波。进一步提高置信度需要更好的数据, 即更多脉冲星、更高的计时精度、更长的数据长度等。

引力波背景探测的另一个重点是其频谱特征, 这与产生引力波的物理过程有关, 可以用来限制有关参数。简单近似下的引力波频谱通常为幂律谱, 由两个参数描述, 特征频率处的幅度 A 和谱指数 γ 。不同物理过程会对应不同的谱指数, 超大质量双黑洞并合产生的引力波背景的特征谱指数为 $13/3$ 。图 5(a) 是假设幂律谱得到的特征幅度和谱指数的二维等值线图, 蓝色和橙色分别对应 DR2full 和 DR2new 的结果。EPTA DR2 两组数据测量的谱参数略有不同, DR2full 的谱指数更接近 $13/3$, 而 DR2new 的频谱更平。主要是由于数据长度差异导致可探测的频率范围不同, 两组数据测量到的引力波功率实际上是一致的。如果把谱指数固定在 $13/3$, 两组数据会得到相同的引力波背景幅度, $\log_{10} A = -14.61$ 。考虑到引力波频谱可能存在对幂律谱的偏离, 我们也直接测量了不同频率成分处的幅度, 如图 5(b) 所示。在低频成分处可以测量到引力波信号, 而高频处由白噪声(脉冲到达时间本身的测量误差)主导。自由谱分析

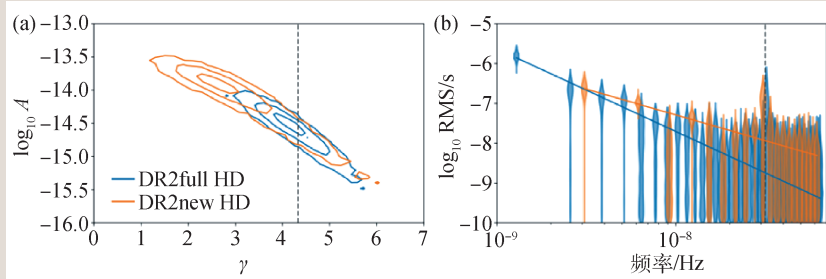


图5 引力波背景的功率谱测量^[6] (a)假设频谱满足幂律谱, 测量特征频率 A 和谱指数 γ (竖虚线标示谱指数 $13/3$ 的位置); (b)独立测量不同频率处的信号强度(竖虚线对应频率 1 yr^{-1})。蓝色和橙色分别是 DR2full 和 DR2new 的结果

的结果基本符合幂律谱, 但在个别频率处有偏离。

目前的数据仅在有限频率成分上对引力波信号有所限制, 这导致了另一个有趣的结果, 即引力波背景和单个引力波源实际上是难以区分的。一般认为脉冲星计时阵最有可能首先探测到的引力波是由很多个超大质量双黑洞的并合信号叠加而成的引力波背景, 但如果存在距离我们较近的双黑洞系统, 其产生的单个引力波源也可能被我们探测到。二者的本质区别是频谱特征, 引力波背景是在一定频率范围内存在的近似幂律谱, 而单个引力波源仅有单频率的信号, 但也可能在倍频探测到。当前数据不足以很好地区分这两种情况。如果对 EPTA DR2new 数据进行单个引力波源搜寻, 也可以测量到特征频率, 但方位等参数的限制较差。探测单个引力波源有独特的物理意义, 如果能更好地限制其方位, 我们可以通过光学观测对相应天区进行搜索, 寻找其光学对应体, 从而实现对双黑洞并合过程的多信使观测。

4.2 天体物理解释

纳赫兹引力波有很多可能的起源, 除了超大质量双黑洞族群, 还有早期宇宙相关的物理过程, 比如宇宙学暴胀、相变、宇宙弦和早期宇宙中标量扰动诱导的引力波等, 此外还有超轻暗物质引起的银河系引力势的振荡等。在目前引力波的证据初步出现的阶段, PTA 数据还不足以区分不同的起源。因此, EPTA 分别考虑每个物理过程, 在假设引力波信号由该特定过程生成的

情况下研究信号的含义^[25]。研究发现该信号与 SMBHB 族群起源一致, 并且其相对较高的幅度可用于对双星并合时间尺度以及超大质量黑洞于宿主星系尺度之间的关系施加限制。如果这个起源得到证实, 这将是 SMBHB 在自然界中并合的第一个直接证据, 为结构形成和星系演化之谜提供重要的观测部分。对于早期宇宙过程, 现有测量将对宇宙弦张力和一阶相变产生的湍流水平施加严格限制, 其他过程将需要非标准的宇宙学场景。最后, 探测到的信号不支持超轻暗物质起源, 这对银河系中的超轻暗物质丰度做出了直接限制。

4.3 后续研究

在 EPTA DR2 的主要文章发表之后, EPTA 也进行了一系列后续研究, 包括信号的时间稳定性、噪声模型、太阳风模型等各个方面^[26–28]。不同于 PPTA 的分析结果, 对 EPTA 的 25 年数据的分段分析发现公共信号是一致存在的, 并没有明确探测

到随时间的演化。更为重要的是理解早期数据和新数据对 HD 相关测量的不同结果, 初步分析发现早期数据的观测波段覆盖范围不足会影响对引力波的探测, 但同时功率谱参数的准确测量仍然需要更长时间跨度的数据。这与之前的猜测符合, 即 DR2full 提供了更好的谱参数测量结果, 而 DR2new 则给出更好的相关曲线测量。EPTA 也在将 LOFAR 低频数据与 DR2 结合, 低频数据的加入可以更好地区分红噪声和色散噪声, 从而更准确地探测引力波信号。

5 小结

经过二十余年的努力之后, 在 EPTA 数据中终于发现了引力波的迹象, 这是激动人心的重要进展。在结果发布之后, EPTA 也在进行进一步的数据分析和准备更新的数据。在世界各个 PTA 组织的共同努力之下, 相信纳赫兹引力波的可靠探测终将实现, 从而打开引力波观测宇宙的新窗口。

参考文献

- [1] Sazhin M V. *Sov. Astron.*, 1978, 22: 36
- [2] Detweiler S. *ApJ*, 1979, 234: 1100
- [3] Hellings R W, Downs G S. *ApJ*, 1983, 265: L39
- [4] Stappers B W *et al.* *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 2006, 6: 298
- [5] Bassa C G, Janssen G H, Karuppusamy R *et al.* *MNRAS*, 2016, 456: 2196
- [6] EPTA Collaboration, InPTA Collaboration, Antoniadis J *et al.* *A&A*, 2023, 678: A50
- [7] Desvignes G, Caballero R N, Lentati L *et al.* *MNRAS*, 2016, 458: 3341
- [8] EPTA Collaboration, Antoniadis J *et al.* *A&A*, 2023, 678: A48
- [9] van Haasteren R *et al.* *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2011, 414: 3117
- [10] Lentati L, Taylor S R, Mingarelli C M F *et al.* *MNRAS*, 2015, 453: 2576
- [11] Lazaridis K *et al.* *MNRAS*, 2011, 414: 3134
- [12] Shao L, Wex N. *Class. Quantum Grav.*, 2012, 29: 215018
- [13] Lee K J *et al.* *MNRAS*, 2011, 414: 3251
- [14] van Haasteren R *et al.* *MNRAS*, 2009, 395: 1005
- [15] van Haasteren R. *MNRAS*, 2013, 429: 55
- [16] Lentati L, Alexander P, Hobson M P *et al.* *MNRAS*, 2014, 437: 3004
- [17] Mingarelli C M F, Sidery T, Mandel I *et al.* *Phys. Rev. D*, 2013, 88: 062055
- [18] Lee K J *et al.* *MNRAS*, 2012, 423: 2642
- [19] Sesana A. *MNRAS*, 2013, 433: L1
- [20] Sanidas S A, Battye R A, Stappers B W. *Phys. Rev. D*, 2012, 85: 122003
- [21] Chen S, Caballero R N, Guo Y J *et al.* *MNRAS*, 2021, 508: 4970
- [22] Xu H, Chen S, Guo Y *et al.* *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, 23: 075024
- [23] Afzal A, Agazie G, Anumalapudi A *et al.* *ApJL*, 2023, 951: L11
- [24] Reardon D J, Zic A, Shannon R M *et al.* *ApJL*, 2023, 951: L6
- [25] EPTA Collaboration, InPTA Collaboration, Antoniadis J *et al.* *A&A*, 2024, 685: A94
- [26] Nitu L C *et al.* *MNRAS*, 2024, 528: 3304
- [27] Falxa M *et al.* *Phys. Rev. D*, 2024, 109: 123010
- [28] Valtolina S, Shaifullah G, Samajdar A *et al.* *A&A*, 2024, 683: A20