

脉冲星阵列探测超低频引力波

王凌风¹ 张鑫^{2,3,4,5}

(1. 海南大学物理与光电工程学院 570228; 2. 东北大学理学院 110819; 3. 辽宁省宇宙学与天体物理重点实验室 110819; 4. 东北大学工业智能与系统优化国家级前沿科学中心 110819; 5. 智能工业数据解析与优化教育部重点实验室 110819)

一、引力波的分类

引力波是时空本身的涟漪,它携带着引力波源的信息,在宇宙空间中自由传播,提供了光无法传递的珍贵信息。根据引力波的频率大致可将其分为几种主要类型:数赫兹至数千赫兹范围内的高频引力波、毫赫兹(10^{-3} Hz)区间的低频引力波,以及纳赫兹(10^{-9} Hz)区间的超低频或极低频引力波。

高频引力波主要来源于恒星质量的致密天体并合事件,如中子星或黑洞,并可通过地面激光干涉测量设备探测。2015年,LIGO科学合作组和Virgo合作组首次成功探测到由两个恒星质量黑洞并合产生的引力波信号,标志着人类首次直接探测到引力波^[1]。目前,由LIGO、Virgo和KAGRA组成

的国际合作团队已探测到数十起这类并合事件,这些探测对验证广义相对论、测量致密天体物理性质以及探索宇宙膨胀历史等方面的研究至关重要。

随着引力波频率的降低,探测器的臂长需求相应增加。对于毫赫兹波段的低频引力波,空间引力波探测器成为了可行方案。这种由三颗卫星构成的太空激光干涉仪相当于将地面探测器搬入太空,从而实现更长的激光干涉仪臂长(可达数百万公里)^[2]。毫赫兹引力波通常由数万至数千万倍太阳质量的大质量黑洞并合或大质量黑洞捕获小型致密天体(即极端质量比旋近)等过程产生。这类探测不仅能帮助我们深入了解星系合并过程和大质量黑洞形成历程,还有助于探测随机引力波背景。

对于质量达到数亿倍太阳质量以上的超大质

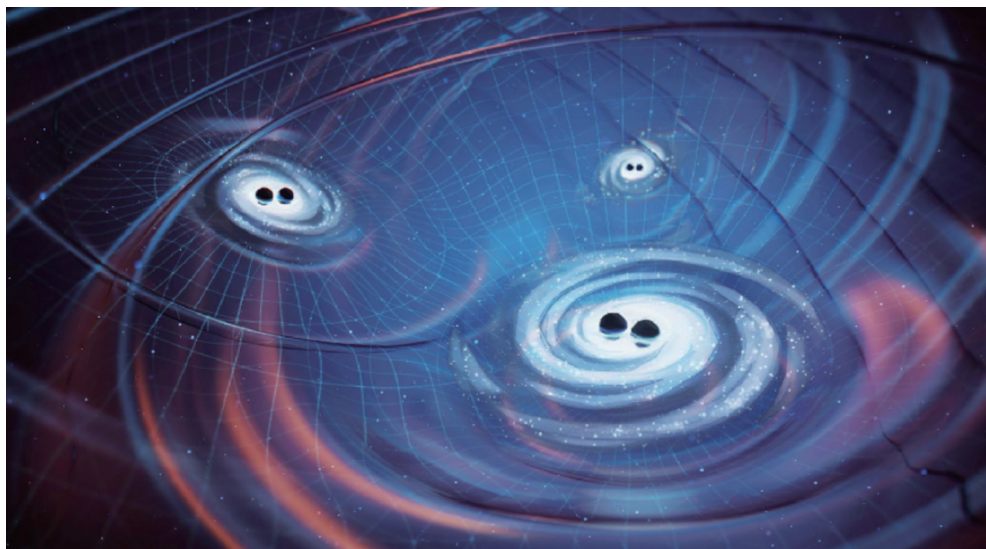


图1 双黑洞绕转并合产生引力波的艺术效果图,图片取自NANOGrav官网

量双黑洞并合事件,其辐射的引力波频率比毫赫兹更低,通常处在纳赫兹波段,因此被称为“超低频”引力波。超低频引力波的波长长达数光年至数十光年,空间引力波探测器也不再适用,而是需要构建一个星系尺度的探测设施,这显然超出了当前人类技术的范畴。但幸运的是,宇宙为我们提供了一种天然的纳赫兹引力波探测器——脉冲星测时阵列(PTA),本文将进一步探讨其概念和功能。

二、随机引力波背景

除了致密星体并合之外,超新星爆发或中子星旋转等过程也会辐射引力波,他们的共同点在于引力波源都是单个的天体系统。除此之外,宇宙中还存在着频率较低且持续辐射的引力波,它们形成了宇宙中持续存在的引力波背景,被称为“随机引力波背景”。关于随机引力波背景的起源,理论上存在多种可能性,主要可以分为宇宙学起源和天文学起源两类。宇宙学起源的引力波背景是指宇宙早期的一些过程(如宇宙暴胀、相变、宇宙弦等)所产生的引力波;天文学起源的引力波背景主要由众多致密双星并合所产生的引力波构成,它们非相干地叠加在一起,形成了引力波的背景信号。

理论上讲,随机引力波背景存在于各个波段。高频波段的随机引力波背景尚未被探测到。LIGO-Virgo-KAGRA 合作组结合其O1—O3的观测数据,对高频引力波背景的信号给出了上限^[3]。若要真正探测到高频引力波背景,一方面需要灵敏度更高的第三代地面引力波探测器,同时也需要发展新技术来去除前景信号。毫赫兹波段的随机引力波背景也尚未被探测到,这要寄希望于正在建设的空间引力波天文台。根据分析,中国的空间引力波天文台(太极计划和天琴计划)在未来有望探测到随机引力波背景^[4,5]。位于纳赫兹波段的随机引力波背景则是脉冲星测时阵列的主要探测对象,也是首次被人类探测到的引力波背景。接下来,我们将着重介绍脉冲星测时阵列在探测超低频引力波背景方面的成就。

三、脉冲星测时阵列

脉冲星测时阵列是宇宙为我们提供了一种“天然”的纳赫兹引力波探测器,这样的探测器是由银河系中众多毫秒脉冲星组成的^[6]。毫秒脉冲星是一种非常稳定的脉冲星,实测结果表明,其20年的测时误差可以小于1微秒。它们自转速度极快,每秒可达数百次,并从两极发射出强烈的电磁辐射。当射电波段的电磁辐射经过地球时,我们可以利用射电望远镜接收到这些具有稳定周期的脉冲信号。由于信号到达时间极为精确,我们可以利用这种方法进行精确测时。

当引力波经过地球和脉冲星时,它们会改变时空的曲率,导致脉冲星与地球之间的距离发生变化,进而影响脉冲信号的到达时间。由于引力波信号具有四极性,当引力波导致一颗脉冲星到达地球的信号变早时,与该脉冲星夹角为90度的另一颗脉冲

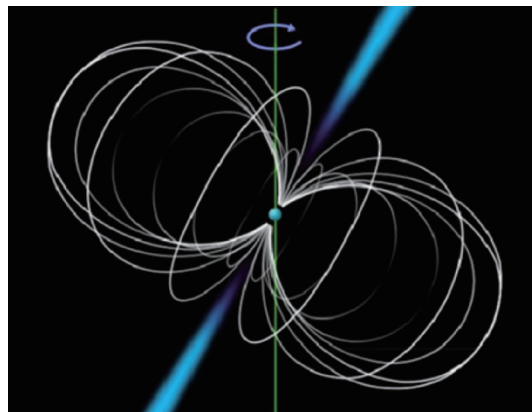


图2 脉冲星艺术效果图(图片来自网络)

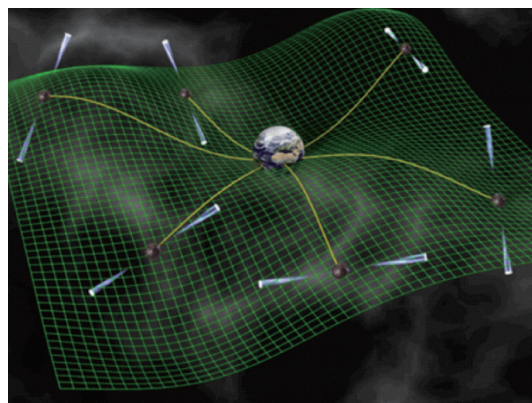


图3 脉冲星测时阵列艺术效果图(图片来自 Physics Today)

星信号会相反地变晚。通过同时监测由许多脉冲星组成的阵列,并分析不同脉冲星信号到达地球时间的相关性,我们可以提取出超低频引力波信号。

自脉冲星测时方法提出以来,过去三十年科学界对使用脉冲星测时探测引力波的研究从未停歇。目前,全球范围内的主要脉冲星测时项目包括:北美纳赫兹引力波天文台(NANOGrav)、欧洲脉冲星测时阵列(EPTA)、澳大利亚 Parkes 脉冲星测时阵列(PPTA)、中国脉冲星测时阵列(CPTA,利用“中国天眼”FAST望远镜的数据)、南非 MeerKAT 脉冲星测时阵列(MPTA)和印度脉冲星测时阵列(InPTA)。这些项目共同构成了国际脉冲星测时阵列(IPTA),是目前探测超低频引力波的重要力量。

四、首次获得超低频引力波的关键证据

2023年6月29日,CPTA、NANOGrav、EPTA和PPTA项目组在arXiv预印本网站上同时发布了相关论文,展示了他们在随机引力波背景探测方面的新发现^[7-10]。这些项目组都观测到了与随机引力波背景相一致的四极空间相关性信号,其置信度水平至少达到2西格玛。其中,CPTA合作组以4.6西格玛的置信度水平(误报率小于五十万分之一)探测到了引力波背景所引起的四极相关信号。

值得一提的是,虽然CPTA在2020年FAST通过验收后才开始脉冲星测时观测,晚于世界上其他



(a)



(b)

图4 脉冲星测时观测的望远镜(a) NANOGrav、EPTA和PPTA项目组的望远镜;(b) 中国天眼FAST(图片来自网络)

的脉冲星观测项目,但在随机引力波背景探测这场竞赛中却后来居上,以更高的测时精度实现了探测目标。这是因为望远镜灵敏度正比于望远镜面积,望远镜大一倍,测量精度能够提升四倍。而中国天眼作为世界上最大的单口径射电望远镜,其灵敏度和世界其他主力脉冲星观测望远镜加起来差不多一样大。自2020年以来,CPTA对超过60颗脉冲星进行了监测,其数据精度和国际上其他数据精度相比提高了4~50倍。CPTA此次测到的引力波背景强度约为 4×10^{-15} ,相当于引力波对一公里长度造成了约为十分之一个氢原子大小的扰动,该观测为纳赫兹随机引力波背景的存在提供了关键性证据。不过,由于CPTA测量时间较短,目前没有得到与引力波谱相关的信息。

引力波背景谱通常用两个参数来描述:引力波特征振幅和特征谱指数。其中,谱指数的值可以用来区分引力波背景的不同起源。例如,如果测得谱指数为 $-2/3$,就能确定引力波背景是由超大质量双黑洞旋近系统所产生的。遗憾的是,当前的脉冲星测时数据只能为振幅提供较好的限制,仍无法为谱指数提供足够可信的测量值(PPTA项目组所给出的谱指数测量值的精度约为40%)。因此,对于此次探测到的引力波背景信号的起源,所有项目组都未能给出确定的答案。想要进一步确定这些信号的起源,需要进一步提升脉冲星测时的能力。

这些论文的结果表明,人类开始了超低频引力波的探测,并且验证了脉冲星测时方法的可靠性。超低频引力波的成功探测为我们了解宇宙历史开启了一扇全新的大门,对于我们了解超大质量黑洞、星系的演化、宇宙大尺度结构形成等具有重要意义。

五、未来展望

影响脉冲星测时能力的主要因素包括:射电望远镜的灵敏度,电子仪器的性能,观测时长,脉冲星的数目和稳定性等。如何针对这几方面来提升脉冲星测时数据的数量和质量,将是PTA探测项目下一步工作的重点。随着观测技术的进步和持续观测的累积,我们期待能够更精确地测量引力波背景的振幅和频谱指数,这对深入理解宇宙演化具有极其重要的意义。

需要说明的是,尽管当前PTA项目的主要目标是探测随机引力波背景,但随着探测技术的不断进步和数据积累,我们也期待未来能探测到由单个超大质量双黑洞并合事件产生的超低频引力波。如果把随机引力波背景比作房间中的背景噪声,那么探测到的单个系统产生的引力波信号就好比是在喧闹环境中识别出某个人的声音。随着时间的推移,我们有望在这一背景噪声中识别出高信噪比的



图5 CPTA项目组展示的引力波四极关联信号(HD曲线)和天眼探测示意图

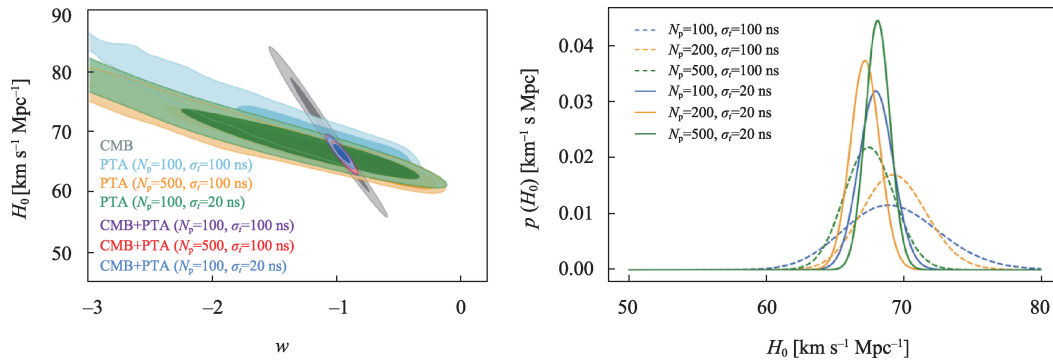


图6 模拟的超低频引力波标准汽笛数据对宇宙学参数的限制结果。左图为亮汽笛数据对暗能量的测量，右图为暗汽笛数据对哈勃常数的测量(图片取自文献[11])

单个超低频引力波信号。

探测这些单个系统的引力波信号将是极具挑战性的,但也将带来丰厚的科学回报。通过探测这些引力波事件,我们可以揭示超大质量黑洞和星系的起源和演化。此外,这些超低频引力波事件的探测还有助于研究宇宙的演化。近期,国内的研究^[11,12]表明,来自超大质量双黑洞的超低频引力波可以用作标准汽笛来测量波源的绝对光度距离。相比于恒星质量双黑洞并合事件,它们的信噪比要高得多。因此,只需少量这样的标准汽笛数据,就可以在暗能量状态方程和哈勃常数的精确测量方面发挥重要作用。

人类已经迈出了探测超低频引力波的重要步伐,这一进展无疑将为天文学的进步注入新的动力。随着引力波探测技术的不断成熟和完善,我们有理由相信,在不远的将来,这些技术将揭开宇宙深处更多未知的秘密。

参考文献

[1] LIGO Scientific & Virgo Collaborations. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Physical Review Letters*, 116 (2016) 6, 061102.
 [2] Yun-Gui Gong, Jun Luo & Bin Wang. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects. *Nature Astronomy*, 5 (2021) 9, 881-889.
 [3] KAGRA & Virgo & LIGO Scientific Collaborations. Upper limits on the isotropic gravitational-wave background from Advanced LIGO and Advanced Virgo's third observing run. *Physical Review*

D, 104 (2021) 2, 022004.
 [4] Gang Wang & Wen-Biao Han. Alternative LISA-TAIJI networks: Detectability of the isotropic stochastic gravitational wave background. *Physical Review D*, 104 (2021) 10, 104015.
 [5] Jun Cheng, En-Kun Li, Yi-Ming Hu, et al. Detecting the stochastic gravitational wave background with the TianQin detector. *Physical Review D*, 106 (2022) 12, 124027.
 [6] R. S. Foster & D. C. Backer. Constructing a Pulsar Timing Array. *Astrophysical Journal*, 361(1990): 300-308.
 [7] Xu H, Chen S Y, Guo Y J, et al. Searching for the nano-Hertz stochastic gravitational wave background with the Chinese Pulsar Timing Array Data Release I. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 23075024.
 [8] Agazie G, Anumalapudi A, Archibald A M, et al. The NANOGrav 15-year Data Set: Constraints on Supermassive Black Hole Binaries from the Gravitational Wave Background. *The Astrophysical Journal Letters*, 951 L11.
 [9] Antoniadis J, Arumugam P, Arumugam S, et al. The second data release from the European Pulsar Timing Array I. The dataset and timing analysis. Published in *Astronomy & Astrophysics*, arXiv: 2306.16214.
 [10] Reardon D J, Zic A, Shannon R M, et al. Search for an isotropic gravitational-wave background with the Parkes Pulsar Timing Array. *The Astrophysical Journal Letters*, 951 L6.
 [11] Ling-Feng Wang, Yue Shao, Jing-Fei Zhang, et al. Ultra-low-frequency gravitational waves from individual supermassive black hole binaries as standard sirens. arXiv: 2201.00607v3.
 [12] Shang-Jie Jin, Shuang-Shuang Xing, Yue Shao, et al. Joint constraints on cosmological parameters using future multi-band gravitational wave standard siren observations. *Chinese Physics C*, 47 (2023) 6, 065104.