

用脉冲星捕获背景引力波

(北京大学 徐仁新 编译自 Matteo Rini. *Physics*, June 29, 2023)

四个独立的合作组检测到了银河系所处的背景引力波，从而为研究低频引力波的天体物理和宇宙学的起源开辟了新的观测窗口。

我们的银河系航行于一片引力波汪洋之中，这种背景引力波在几年到几十年的时间尺度上拉伸和压缩时空。该结论由四个独立的“脉冲星计时阵列(PTA)”合作组得出，它们将银河系当作一个探测纳赫兹低频引力波的巨大天线。北美的NANOGrav、欧洲/印度的EPTA/InPTA、中国的CPTA和澳大利亚的PPTA，这四个独立的合作组分别发表了4篇论文，报道了背景引力波的存在证据。

PTA将开辟新的窗口来探索背景引力波的源头。研究人员认为，此类引力波很可能源自若干星系核心的超大质量双黑洞。两个星系合并后，其中心超大质量黑洞会形成一个双黑洞系统：彼此绕转数千或数百万年之后合并。超大质量双黑洞绕转时会产生纳赫兹引力波。不过，背景引力波也可能源于早期宇宙的暴涨或其他过程，甚至与暗物质相关的新物理。但是，目前的数据还无法以高置信度区分这些物理起源。

脉冲星是快速旋转的中子星，射电束位于磁极附近。当辐射束扫过地球时，射电望远镜就会探测到有规律的信号，其精度可媲美原子钟。这一精准周期性是引力波探测的关键。引力波在脉冲星和地球之间传播时，会引起时空的微小扭曲，导致探测到的脉冲星信号到达地球的时间稍微加快或减慢。不

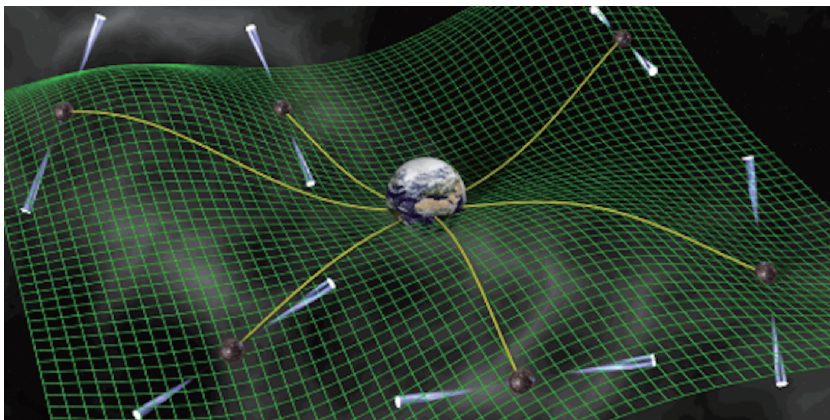
过，脉冲信号还受到脉冲星自转不稳定性以及与星际介质相互作用的影响。为了可靠地探测引力波，天文学家将银河系中数十颗脉冲星的观测数据结合起来进行研究——这就构成了PTA。

各个PTA合作组分别使用澳大利亚、北美、欧洲/印度和中国的射电望远镜进行脉冲星观测，已经积累了时间跨度不等的数据(从EPTA的25年到CPTA的41个月)。当北美NANOGrav在2020年首先发布探测到与背景引力波一致的信号，并且澳大利亚PPTA和欧洲EPTA在2021年也发布类似的结果时，人们对背景引力波的探测寄予厚望。研究人员发现，PTA数据中的噪声不是在所有频率上都具有相等强度的“白噪声”，而是在低频率端强度更高，表现为“红噪声”。这种红噪声信号很像是人们所预期的具有几十

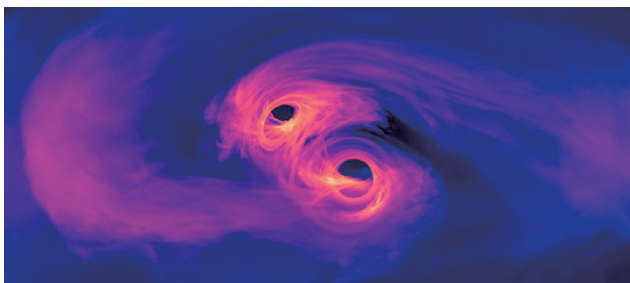
年振荡周期的引力波信号。

将PTA观测结果归因于引力波需要更强的证据。特别地，不同脉冲星的计时波动应该显示出与角度关联的相关性。天空中角向彼此靠近的脉冲星的信号受到引力波的影响应该比较类似，比离得远的脉冲星之间的相关性更强。理论预期的这一角度相关性由Hellings—Downs曲线(1983年提出)所描述。基于引力波的一种偏振模式，1983年美国加州理工大学的Hellings与Downs提出了利用脉冲星计时阵列PTA测量纳赫兹背景引力波的想法：将地球和若干脉冲星作为探测引力波的基线，经过统计平均后可得到一对脉冲星的脉冲到达时间的相关性。

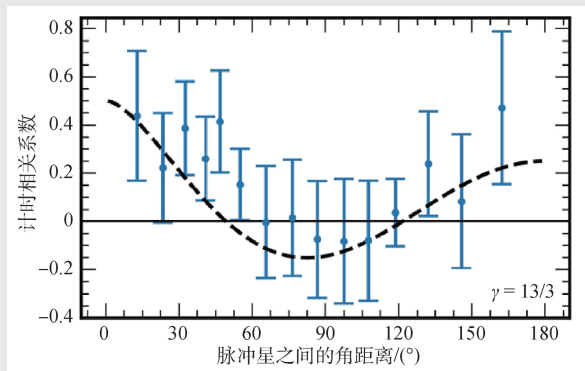
四组PTA合作组独立提供了关键证据：探测到的角度相关性跟理论预期的Hellings—Downs曲线相符。“这是背景引力波的确凿



脉冲星计时阵列(PTA)利用银河系内一组脉冲星来监测引力波对脉冲星射电信号的调制。四个独立的PTA合作组分别宣布了纳赫兹背景引力波的存在证据



观测到的背景引力波信号很可能来源于超大质量双黑洞(计算机模拟图)



两颗脉冲星之间的计时相关性取决于它们在天空中的角距离。这里展示了NANOGrav的数据(蓝色圆点和误差线)与理论预期的Hellings—Downs曲线(虚线)的对比

特征”，NANOGrav成员Michele Vallisneri说道。每个合作组分别给出引力波解释的统计置信度，其中北美NANOGrav为3至4倍标准差，欧洲和印度EPTA/InPTA声称约大于3倍标准差，而中国CPTA的结果较优，高达4.6倍标准差置信度。

人们将超过3倍标准差的置信水平称为“证据”，而不是“发现”。Vallisneri表示：“当达到5倍标准差的黄金标准时，我们将宣布成功探测”。意大利物理学家、EPTA成员Alberto Sesana则表示，“通过四个不同的合作组，使用不同的望远镜和分析方法对结果进行了交叉验证，使得这个证据非常可信”。

虽然PTA探测到的信号很可能是由引力波引起，但确定这些波的

万个这样的双黑洞系统可以准确再现观测结果。

Charisi表示：如果PTA信号归因于超大质量双黑洞系统，那将对天体物理学产生深远影响。观测信号可限制超大质量双黑洞系统的性质，意味着超大质量双黑洞系统比此前预期的更普遍或更重。她补充说，这将解决一个长期存在的问题：超大质量双黑洞系统能否最终并合。若要相互绕转的两颗超大质量黑洞靠近且并合，它们的轨道能量必须被转移到其他物质上。虽然恒星和气体可以提供这样的能量耗散途径，但一些研究人员质疑这种耗散能否使黑洞靠得足够近从而最终并合。如果纳赫兹背景引力波明确起源于这些超大质量黑洞，那意味着双黑洞的轨道已经很致密了，

源头是一个更具挑战性的课题。合作组内的成员已经对从粒子物理标准模型扩展开来的“新物理”进行建模，包括暴涨、暗物质以及被称为畴壁和宇宙弦的拓扑缺陷等若干方面。“当然，超大质量双黑洞系统提供了一个可信且自然的解释”，NANOGrav成员Maria Charisi说道。Charisi及其合作者的模拟显示，数百

引力波辐射强，因此注定要并合。

随着观测的持续，PTA将会变得更灵敏，可以界定引力波的波源。例如，对天空中不同位置的引力波振幅的测量将是区分宇宙学和超大质量双黑洞解释的关键——宇宙学波源应该各向同性，而超大质量双黑洞波源则应该来自特定的方向。“最终，PTA测量应该会足够灵敏，使得人们可以从背景引力波中挑选出单个超大质量双黑洞系统产生的引力波”，Charisi说道。这将会打开新的令人激动的多信使天文学观测窗口——类似于2017年发现的双中子星并合那样，将引力波和电磁波观测相结合。与LIGO探测到的中子星和黑洞合并事件产生的引力波不同，超大质量双黑洞产生的引力波信号不是持续几毫秒，而是持续数千年甚至更长时间。Charisi说：“一旦探测到一个超大质量双黑洞系统产生的引力波，那么我们将能够在电磁波段获得海量的数据进行深入研究”。

“观测到随机背景引力波是革命性的”，宇宙学家Chiara Caprini表示。她虽然同意超大质量双黑洞的解释最佳，但也对其他可能的宇宙学起源感到兴奋。她还说，“原初宇宙中的许多过程都可以产生纳赫兹背景引力波”。相比于微波背景辐射，纳赫兹背景引力波可以让人们窥视更早期的宇宙，远早于微波背景辐射刻画的大爆炸后38万年。LIGO合作组成员Chad Hanna认为，发现背景引力波与LIGO/Virgo首次探测到黑洞并合事件同等重要。“LIGO曾经在千赫兹波段打开了利用引力波探索浩瀚宇宙之门，如今PTA开启了全新的纳赫兹低频引力波领域”，他说道。