

脉冲星计时阵探测引力波

朱兴江

(西澳大学物理学院 6009)

一、引言

一百年前，爱因斯坦发表了著名的广义相对论并预言了引力波的存在。在广义相对论中，引力被描述成时空弯曲的几何效应。物质和能量的分布引起时空的弯曲；这种时空的曲率反过来“指导”身处其中的物体如何运动。一般来说，加速运动的物体会引起时空曲率的扰动，而且这种扰动将以光速传播出去。这种现象就是引力波，可以形象地称之为时空的“涟漪”。

四十年前，泰勒（J. Taylor）和赫尔斯（R. Hulse）发现了脉冲双星 PSR B1913+16。根据广义相对论，两个相互绕转的物体会辐射引力波。这种辐射将带走系统的能量，使得其公转轨道衰减，周期变短。

泰勒等人在此后十余年的观测结果与广义相对论的预言高度吻合。这精确地检验了广义相对论，并间接证实了引力波的存在。因此泰勒和赫尔斯荣获了 1993 年度的诺贝尔物理学奖。

2015 年 9 月 14 日，美国的激光干涉仪引力波天文台（以下简称 LIGO）分别位于路易斯安那州的利文斯顿和华盛顿州的汉福德的两个探测器几乎同时捕捉到一个引力波信号。这个被命名为 GW150914 的事件来自于距离地球十几亿光年之外的两个恒星量级黑洞的并合。这是人类历史上首次直接探测到引力波和首次观测到黑洞的碰撞与并合。这个重大发现打开了一扇观测宇宙的新窗口，意味着引力波天文学时代的到来。

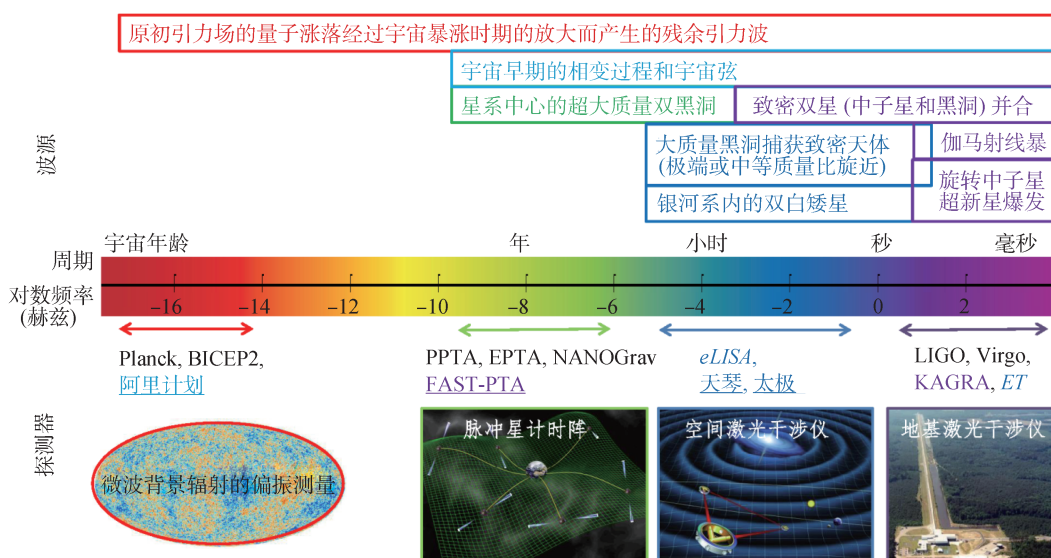


图1 引力波谱。上下分别列出了主要的引力波源和引力波探测的四个主要频段及其对应的探测器或探测实验。各个波源所在的边框范围大致体现了引力波频率的范围。探测项目名称黑色字体代表正在运行，紫色代表即将运行，蓝色斜体代表处于计划阶段，下划线标出的是由中国主导的项目或计划

图 1 描绘了引力波天文学的一个全景概貌。当前正在实施或者处于计划阶段的引力波探测实验主要关注以下四个频段：①高频（约为十至几千赫兹），对应的探测器是以 LIGO 为代表的地基激光干涉仪；②低频（0.1~100 毫赫兹），对应空间激光干涉仪；③甚低频（1~100 纳赫兹），对应脉冲星计时阵；④极低频（ 10^{-18} ~ 10^{-15} 赫兹），探测方式为宇宙微波背景辐射的偏振测量。

本文接下来将介绍如何利用脉冲星计时阵来探测引力波，值得期待的引力波源有哪些以及这种探测实验的发展历史、现状和前景。

二、脉冲星和脉冲星计时观测

中子星是大质量恒星演化晚期经历超新星爆发的产物；它通过中子的简并压与自身引力相抗衡达到流体静力学平衡态。脉冲星是带有磁场的旋转中子星，于 1967 年被贝尔（J. Bell）和休伊什（A. Hewish）首次在射电天文观测中发现。通常认为，脉冲星在磁场两极发出电磁辐射；它的自转使得辐射束周期性地扫过地球，就像宇宙中的灯塔一样。

目前已知的脉冲星有 2500 余颗，其自转周期从 1.4 毫秒至 8.5 秒不等。一般认为脉冲星在出生时都是快速旋转的，周期在毫秒量级。但是很快各种因素导致它们自转变慢，周期增加到秒的量级。自转减速的原因包括磁偶极辐射、磁层的粒子加速甚至是引力波的辐射（注：中子星只要偏离一点轴对称，其快速旋转就会辐射引力波）。当自转慢到一定程度之后，连发出电磁辐射的能量都不够用了。这相当于脉冲星这个灯塔被“熄灭”了，消失在了天文学家的视野中。不过某些位于双星系统中的脉冲星却有着“翻身”的机会。它们可以通过吸积伴星的物质，带走角动量，实现自转再加速。这就是“毫秒脉冲星”的起源。目前已知的自转周期小于 20 毫秒的脉冲星有 300 余颗。毫秒脉冲星是极其稳定的天然时钟，周期变化率一般在 10^{-20} 量级。

脉冲星计时观测的主要任务是测量脉冲信号的到达时间。单个脉冲通常很不稳定而且非常微弱；观测表明大量的脉冲叠加在一起具有非常稳定的轮廓。利

用射电望远镜进行脉冲星计时观测的步骤如下。首先通过后端设备对原始数据进行消色散，目的是消除由于电离的星际介质引起的电磁波传播时间延迟。然后利用已知的自转周期对数据进行折叠以得到一个平均的脉冲轮廓。将这个平均轮廓跟一个样板轮廓做交叉相关，就可以得到由天文台本地的时钟测得的脉冲到达时间。最后利用地球上某个时间标准（例如国际原子时）和所谓的太阳系星历表（即任意时刻太阳系内主要天体的位置和质量），我们记录下以太阳系质心为参考点的脉冲到达时间。接下来我们可以构造计时模型来拟合测量的脉冲到达时间。这个模型考虑了脉冲星自转周期、周期变化率、脉冲星的空间位置和（对于双星系统中的脉冲星来说）双星轨道参数，等等。将计时模型预言的脉冲到达时间与测量的时间相比较便得到了计时残差。

脉冲星计时观测有个基本的“鸡和蛋”的问题。为了测量脉冲到达时间我们必须折叠大量脉冲以得到一个高信噪比的平均轮廓。这要求有个模型来告诉我们如何进行折叠操作；但是为了得到模型我们必须首先探测到脉冲。事实上这个问题是逐步得到解决的。脉冲星被发现的时候，观测者可以估计出它大致的自转周期。这个周期可以用来积累少量的单脉冲信号，然后模型可以得到改进，进而越来越多的参数就能被确定下来。对于少数几颗毫秒脉冲星，当前的观测已经达到了好于 100 纳秒的精度。

三、脉冲星计时阵探测引力波

引力波的影响是引起其所传播之处的时空的变形。但是这种效应是微乎其微的！引力波的强度可以用一个应变振幅 h 来表示。我们定义 $h=\Delta L/L$ 其中 L 和 ΔL 分别是两个自由落体的粒子之间的固有距离和由引力波引起的距离变化。对于 LIGO 探测器而言，可探测的引力波振幅在 10^{-21} 量级；对脉冲星计时阵来说，可期待的引力波强度可能小于 10^{-15} 。

当有引力波通过地球与脉冲星之间的时候，脉冲星发出的射电波所经过的路径就时而被压缩时而被拉长了。这导致我们的望远镜接收到的脉冲信号有时候比预计的早到一些，有时候比期望的迟到一点。对脉

冲到达时间进行长期地监测,就有希望捕捉到引力波信号!显然,仅仅观测一颗脉冲星是不够的,因为太多的噪声可能“伪装”成引力波信号而无法区分。不过单颗脉冲星的观测可以用来限制可能存在于数据中的引力波信号强度。一个很巧妙的想法是同时监测多颗脉冲星,寻找引力波对不同脉冲星造成的相互关联的影响。这就是脉冲星计时阵的概念(图2)。

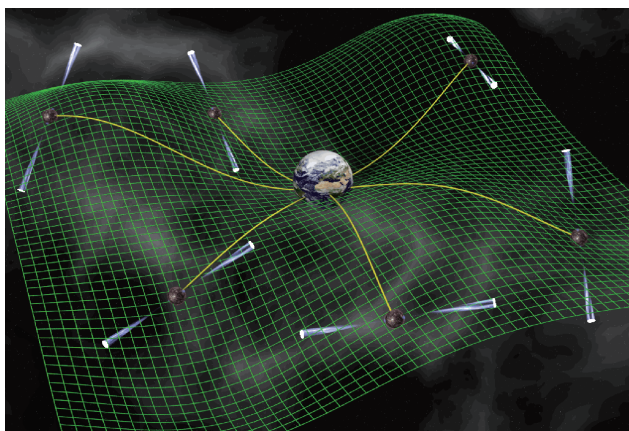


图2 脉冲星计时阵的艺术想象图。利用天上的脉冲星,摆出计时阵以捕捉经过的引力波信号(图片来源:David Champion)

引力波探测的主要挑战是期待中的信号太弱,通常被掩藏于各种噪声之中。对于某一个脉冲星而言,这些噪声包括来自望远镜观测系统自身的噪声(即辐射计噪声)、射频干涉、脉冲轮廓“抖动”噪声、“计时”噪声、星际介质引起的噪声,等等。这其中脉冲轮廓“抖动”噪声,顾名思义,就是由于脉冲轮廓自身的不稳定性造成的。形象地说,叠加大量单个脉冲形成的平均脉冲轮廓虽然比较稳定,但是仔细观察可以发现这个轮廓在随机地抖动。当我们用一个固定的样板轮廓来获得脉冲到达时间,这些随机性自然而然地就残留在了计时残差中。“计时”噪声通常认为跟脉冲星自转的不稳定性有关,所以也被称为“自转”噪声。星际介质通过散射和色散来影响脉冲星发出的射电波的传播,所以星际介质的不均匀性和地球与脉冲星相对于星际介质的运动也会导致计时残差中出现额外的噪声。

对于脉冲星计时阵而言,时间标准的不稳定性和太阳系星历表的不准确都会导致观测数据中出现相互

关联的噪声。所幸的是,引力波引起的计时残差的相关性是可以跟这些噪声区分开来。例如,时间标准出现的误差对所有的脉冲星计时观测的影响都是完全一致的;而太阳系星历表的误差的影响简单来讲就是太阳系质心位置的不准确。通过观测足够多的脉冲星,这些影响都可以很好地跟引力波信号区分开来。这里值得一提的是,脉冲星计时阵的目标就是为了寻找不同脉冲星的计时数据中出现的相关信号,所以除探测引力波外,还可以用来建立一个独立的时间标准、搜寻太阳系内的未知天体和深空导航,等等。但是目前而言,探测引力波是最主要的任务,因为脉冲星计时阵仍然是探测纳赫兹引力波独一无二的手段!

四、引力波源

脉冲星计时观测通常为每两到三个星期观测一次,持续观测几年甚至几十年的时间。这两个时间尺度决定了脉冲星计时阵所能探测的引力波的周期范围,也就是频率大约为1至100纳赫兹。下面我们简单介绍这个频段的引力波源(图1)。

原初引力场的量子涨落经过暴涨时期的放大和宇宙早期的相变过程将产生一种随机的引力波信号。宇宙弦被认为是一种在早期宇宙相变过程中产生的拓扑缺陷,同时它们也可以是超弦理论中被“拉扯”到了宇宙学尺度的弦。一般认为漫步于宇宙中的宇宙弦网络将产生一个随机背景,同时弦的尖端以接近光速运动也可以产生引力波暴。引力波探测提供了一个检验这些宇宙早期物理学过程的极好的手段。

脉冲星计时阵关注的最主要的引力波源是位于星系中心的超大质量黑洞的并合。这些黑洞质量在几百万到几十亿倍的太阳质量之间。大量的天文观测表明几乎每一个星系中心都存在一个如此大质量的黑洞,比如我们所在的银河系。当两个星系并合时,位于其中的黑洞也很可能走到一块,互相绕转并最终并合。这一过程伴有很强的引力辐射。宇宙中众多的超大质量双黑洞并合产生的引力波信号叠加在一起可以形成一个引力波背景。同时那些距离地球很近的或者质量特别大的双黑洞并合事件也有可能被脉冲星计时阵独立地分辨出来。此外,双黑洞并合也会产生所谓

的“记忆”信号。黑洞并合这种剧烈的时空震颤可以导致时空的永久形变（相当于时空对该事件有了记忆）。这种效应将引起脉冲星自转周期的“跃变”。

引力波背景在观测数据上表现为一种额外的“噪声”，需要对不同脉冲星的数据做相关性分析来探测。引力波背景引起的计时残差相关性与两个脉冲星之间的夹角有关（图3）。孤立的引力波事件引起的计时残差的大小与引力波源的方向和脉冲星方向的夹角有关，而且这种信号可能具有某些特定的波形。例如处于圆轨道的超大质量双黑洞引起的计时残差通常可以看成是正弦信号。这是因为超大质量双黑洞从进入纳赫兹频段开始到最终并合至少需要耗费数百万年的时间，而它们在脉冲星观测的时间范围内（目前至多为几十年）的轨道演化通常可以忽略不计。总而言之，对信号特征的了解帮助我们采取最优的数据分析策略。

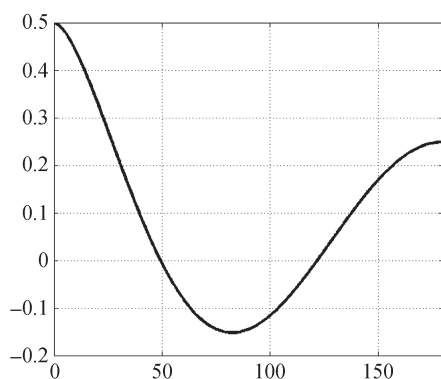


图3 黑林斯-当斯曲线。横轴是两个脉冲星之间的夹角（单位：度），纵轴是由一个随机引力波背景引起的脉冲星计时残差的相关系数

五、脉冲星计时阵的历史、现状和未来

1957年的教堂山引力物理会议是引力波研究历史上的一个重大事件。在这里物理学家们终于清楚地认识到引力波是真实存在的。皮拉尼（F. Pirani）和邦迪（H. Bondi）证明了引力波携带能量。这使人们看到了通过实验来直接探测引力波的希望。韦伯（J. Weber）于20世纪60年代建成了第一个引力波探测器——韦伯共振棒探测器，以检测引力波通过巨大的

金属棒时引起的共振效应。1969年他宣称两个相隔1000千米的探测器同时探测到了一个引力波信号。这掀起了一波又一波引力波探测的热浪。尽管后来科学界几乎一致认为韦伯所探测到的信号不可能是引力波造成的，引力波探测却得到了几十年的长足发展。

通过脉冲星计时观测来探测引力波的想法是由萨辛（M. Sazhin）和德特威勒（S. Detweiler）于20世纪70年代末提出来的。当时激光干涉仪探测器的实验设计取得了阶段性的成果，1972年韦斯（R. Weiss）完成了LIGO探测器原型的设计工作。同一时期，通过发送（并收回）电磁波信号到人造卫星上来探测引力波的想法也被提了出来。脉冲星因为其良好的守时性，很自然的也可以用来探测引力波。这些探测手段的基本原理比较相似，主要区别在于所寻找的引力波波长不一样。

脉冲星计时探测引力波的研究在20世纪80年代取得了一系列的关键突破。1982年，贝克尔（D. Backer）等人发现了第一颗毫秒脉冲星PSR B1937+21，其周期仅为1.56毫秒。毫秒脉冲星自转周期稳定性极高，远远超过了正常脉冲星。这个发现大幅提升了脉冲星计时探测引力波的灵敏度。1983年，黑林斯（R. Hellings）和当斯（G. Downs）首次推导出不同脉冲星计时观测对一个随机引力波背景的相关响应曲线（图3），并且利用四颗（正常）脉冲星的数据得到了引力波背景的能量密度上限。毫秒脉冲星的观测在这之后的几年内将引力波背景的上限提高了两个数量级。1990年，罗马尼（R. Romani）、福斯特（R. Foster）和贝克尔正式提出了脉冲星计时阵的概念，明确了三大科学目标：探测引力波、建立时间标准和测量太阳系星历表的误差。

随着新的毫秒脉冲星的发现以及对引力波源认识的加深，脉冲星计时阵引力波探测的目标逐渐明确起来。2005年，吉内特（F. Jenet）等人指出以100纳秒的计时精度持续观测20颗左右的毫秒脉冲星达五年以上，就有希望探测到超大质量双黑洞形成的引力波背景。

2004年，曼彻斯特（R. Manchester）基于澳大利亚新南威尔士州的帕克斯望远镜（图4），启动了

表 1 脉冲星计时阵项目的基本情况。成立年份为项目正式开始时间，注意有些脉冲星的观测始于二十世纪八九十年代。我们列出了每个项目当前监测的脉冲星数目，括号内为截至 2013 年底至少有五年观测数据的脉冲星数目。需要注意的是有些脉冲星为两个或者三个计时阵共同观测，有个别脉冲星由于表现不佳被中途放弃了，也有新的脉冲星不断地被添加到计时阵观测中。目前三个计时阵项目一共观测 70 余颗毫秒脉冲星。这些项目采用了世界上最灵敏的厘米波段射电望远镜。南赛和韦斯特博克望远镜口径为等效的球面天线口径

项目名称	成立年份	脉冲星数目	望远镜	口径（米）	国家
PPTA	2004	24（20）	帕克斯	64	澳大利亚
			艾菲尔伯格	100	德国
			洛弗尔	76.2	英国
EPTA	2005	42（22）	南赛	94	法国
			韦斯特博克	96	荷兰
			撒丁岛	64	意大利
NANOGrav	2007	37（22）	阿雷西伯	305	美国
			绿堤望远镜	100	



图 4 位于澳大利亚新南威尔士州的帕克斯望远镜建成于 1961 年。目前已知的 2500 余颗脉冲星中超过一半由它首先发现 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

第一个脉冲星计时阵观测项目——帕克斯脉冲星计时阵（PPTA）。随后，类似项目陆续在世界范围内开展起来，即北美纳赫兹引力波天文台（NANOGrav）和欧洲脉冲星计时阵（EPTA）。表 1 列出了这些项目的基本情况。2010 年，三个计时阵项目达成了共享数据和协同观测的初步协议，成立了国际脉冲星计时阵。2015 年，PPTA 项目在分析了 11 年的数据后没有发现引力波，但是得到了一个引力波背景的最强限制。这一结果表明超大质量双黑洞并合形成的引力波背景应该弱于先前的理论估计。鉴于超大质量双黑洞存在的确切证据十分匮乏，引力波的搜索结果可以说一定程度上改进了我们对这种引力波

源的认识。

我们可以通过多种方式来提高脉冲星计时阵探测引力波的灵敏度，例如提高计时精度或降低噪声水平、采集更多的计时数据点和观测更多的脉冲星，等等。因此将不同的计时阵数据组合到一个国际脉冲星计时阵数据提供了最直接的好处。2016 年，国际脉冲星计时阵合作组发布了第一次数据释放，意味着纳赫兹引力波探测向前迈出了非常重要的一步。着眼未来，即将投入使用的 500 米口径球面射电望远镜（FAST）和计划中的平方公里阵（SKA）将极大提高纳赫兹引力波探测灵敏度。预计在未来 10 至 20 年，人类不仅有望探测到第一个纳赫兹引力波信号，还能真正聆听低频的宇宙交响乐！

