

引力波天体波源和引力波探测方法概述

陆由俊

(中国科学院国家天文台 100101; 中国科学院大学天文与空间科学学院 100049)

1. 前言

爱因斯坦于 1915 年发表了石破天惊的广义相对论,认为我们所处的时间和空间为一连续几何系统,其性质由物质的分布决定。广义相对论给出的爱因斯坦场方程将时空与物质优美地连接在一起,通过时空弯曲描述万有引力现象,物质的分布决定时空的弯曲,时空的弯曲决定物质的运动。广义相对论完全不同于牛顿的万有引力理论,相对论时空也全然不同于牛顿的不受物质分布影响的绝对背景时空。爱因斯坦的创举自然地解释了无法以牛顿力学摄动理论来解释的水星近日点的残余进动,预言了诸如光线通过引力场时产生的弯曲效应、红移效应、时间延迟效应等等,并先后被实验和观测一一证实。相对于牛顿的万有引力理论和绝对时空观,广义相对论的伟大意义在于其更准确地阐明了时空本质、预言了膨胀宇宙和奇异天体黑洞,极大地加深了人类对宇宙起源、演化和引力本质的理解。

在真空场线性近似下,由广义相对论场方程可以很自然地导出时空的波动方程及其平面波解,其描述时空度规的微小振荡以波的形式向远处传播。这种时空波动(“涟漪”)被称为引力波,其为无迹横波、传播速度为光速,波幅反比于传播距离^[1]。在垂直于传播方向的平面上,引力波周期性地挤压和拉伸空间,并只有“+”(加)和“×”(叉)两种极化模式,两种模式造成空间的挤压和拉伸方式只相差一个四十五度的转动角(见图 1)。在发表广义相对论一年后,爱因斯坦就率先预言了引力波。然而,由于广义相对论的复杂性,引力波理论预言的正确性经过长期争论和反复探讨,最终在 20 世纪五六十年代物

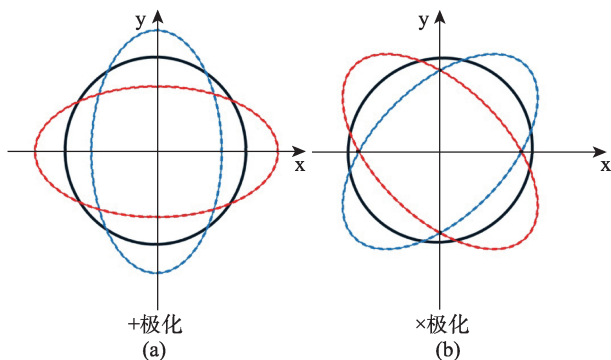


图 1 引力波的“+”(加)极化(a)和“×”(叉)极化(b)两种模式。引力波传播方向垂直于纸面。黑、红和蓝曲线分别示意引力波相位 0 或 π 、 $\pi/2$, 和 $3\pi/2$ 时空间的挤压和拉伸(为示意起见,图中采用的引力波的幅度被极大地夸大了,实际因引力波造成的效应是无法用肉眼鉴别的)

理学家们才开始达成共识,认为由广义相对论预言的引力波真实存在,且可以通过实验探测到并以其精确检验广义相对论。在广义相对论发表百年后,其预言的引力波也被直接探测到,又一次证明了爱因斯坦关于时空深刻而伟大的洞见,同时也提供了人类研究宇宙的崭新工具,驱动时空和引力理论研究的蓬勃发展^[2]。

本文将简要介绍宇宙中的强引力波天体波源(主要是双致密天体的旋近和并合),概述它们的主要探测方法,包括利用激光干涉仪的地基(高频)和空间(中频)引力波探测和利用脉冲星测时阵的甚低频引力波探测。因限于篇幅,对其他利用诸如共振棒、原子干涉仪、空间中频和实验室高频探测装置等探测引力波方法,本文不做一一介绍。

2. 宇宙中的天体引力波源

引力波造成的效应极其微弱,难以测量。通过

测量引力波检验广义相对论和揭示引力本质不仅需要发明极端精密的探测器,还要有适合探测的强引力波源。产生引力波并不难,物体分布的非轴对称变化(质量四极矩或更高阶矩变化)可以产生引力波。一般来说,引力波的发射强度依赖于发射源系统的质量和致密程度,质量越大尺度越小致密度越高的源发射的引力波强度越大。因此,宇宙中的强引力波源应与致密天体相关,这些致密天体包括白矮星、中子星和黑洞。如果这些强引力波源能够被探测到,它们将不仅会提供大量无法用其他手段获得的关于致密天体性质及相关关键物理过程的信息,而且还可以作为无与伦比的探针探测宇宙和检验引力本质,带来人类对宇宙认知的变革。

致密天体为恒星演化终结留下的遗迹天体,不同初始质量的恒星其演化终结时形成的致密天体各不相同(见图2)(相关描述可见综述[3])。

白矮星:质量大约在8倍太阳质量(M_{\odot})及以下的恒星会在其中心聚变反应的燃料耗尽后最终坍缩形成白矮星。白矮星可以由碳氧、氧氖镁或氦原子核积聚构成,其中游离自由电子提供简并压支撑重力以避免进一步的坍缩。理论预期的白矮星的质量上限即钱德拉赛卡极限为 $1.4 M_{\odot}$ 。观测已经发现上万颗白矮星,其质量范围在 $0.1 \sim 1.3 M_{\odot}$,典型质量为 $0.5 \sim 0.6 M_{\odot}$ 。

中子星:质量为 $9 \sim 25 M_{\odot}$ 的恒星演化终结时会产生超新星爆发,留下中子星遗迹。中子星完全由中子构成,中子简并压提供支撑使其成为稳定天体。一些中子星具有超强的磁场,强度可达 $10^8 \sim 10^{15}$ 高斯(地磁场只有 $0.25 \sim 0.65$ 高斯),且磁轴可能与自转轴并不重合。自转磁化中子星在磁轴方向喷射高能粒子并产生包括射电波段在内的多波段集束辐射,辐射束空间指向绕中子星自转轴转动周期性(毫秒-秒级)变化。遥远的观测者可能探测到一些中子星辐射束周期性扫过的脉冲信号,因此这类中子星被称做脉冲星。射电观测已经发现约4000例脉冲星,并且其中一小部分的质量也获得了准确的性质测量。这些中子星的质量在 $1.1 \sim 2.1 M_{\odot}$ 倍太阳质量之间。中子星的质量上限由其物态方程决定,因物态方程的不确定性,理论上非转中子星可高达 $2.5 M_{\odot}$ 。对于典型的 $1.4 M_{\odot}$ 中子星,其致密度(GM/Rc^2 ; M 和 R 分别为质量和半径, G 为引力常数, c 为光速)在 6.1 左右,表面速度为 $0.3 c$ 左右。

黑洞:对于质量大于 $25 M_{\odot}$ 的恒星,其演化终结时没有任何物理机制可抵抗引力坍缩,因此最终只能形成黑洞。根据目前的大质量恒星演化理论,因演化晚期大量的星风质量损失, $25 M_{\odot} \sim 140 M_{\odot}$ 的恒星演化最终形成的遗迹黑洞的质量在 $3 \sim 50/80 M_{\odot}$,而 $140 M_{\odot} \sim 260 M_{\odot}$ 的恒星则在演化晚期因高能光

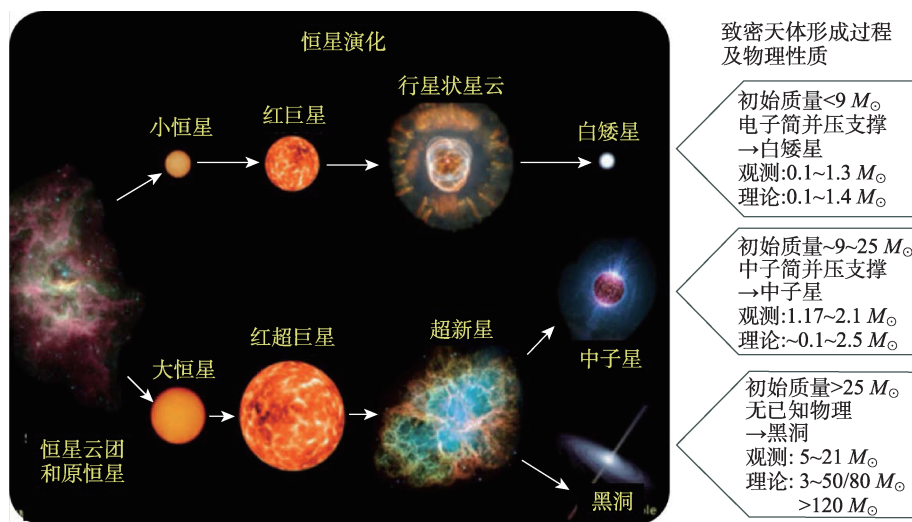


图2 致密天体白矮星、中子星和黑洞的形成及其性质

子相撞产生正负电子对正反过程的不稳定性而整体爆炸不留下任何遗迹。更大的恒星将形成大于 $120 M_{\odot}$ 的黑洞。如此,由恒星演化形成的黑洞会在 $50/80 \sim 120 M_{\odot}$ 间缺失,即形成所谓的质量间隙。电磁波测光测谱观测发现了银河系内数十颗恒星级黑洞,其质量在 $5 M_{\odot} \sim 21 M_{\odot}$ 左右。发现更大和更小质量的恒星级黑洞是当前黑洞搜寻探测最热门的目标,其对揭示黑洞的形成演化或测定中子星物态方程具有重要的意义。

这些致密天体在形成过程中会因非轴对称坍缩发射引力波。比如超新星爆发形成中子星的过程中会发射高频引力波暴,其是被寄以厚望的能对超新星爆发和中子星形成内部过程进行直接探测的探针。另外,中子星在形成后,若其有一定的非轴对称性或其表面有凸起,也会造成高频连续引力波辐射。对于毫秒级脉冲星,这种连续引力波的频率在几百赫兹左右,也是地基引力波天文台探测搜寻的重要目标之一。

双致密天体可由大质量双星演化以及致密星场等特殊环境中恒星间的动力学相互作用形成,它们包括双白矮星、双中子星、中子星-黑洞双星和双黑洞等。这些双致密天体的相互绕转可发射很强的引力波辐射,带走能量和角动量,导致轨道加速

衰减以至于其最终并合,并在并合时发出引力波最强音。如此,双致密天体的绕转和并合成为引力波探测的理想对象(见图3、图4)。圆周轨道运动双致密天体,引力波频率为轨道频率的2倍,若轨道为椭圆,引力波辐射则分布于轨道频率的各不同谐频上。在间距较大时可采用牛顿近似,引力波的幅度正比于啁啾质量的 $5/3$ 幂律、正比于其频率的 $2/3$ 幂律,在间距很近时,则需要以完全相对论数值模拟获得。对于典型的 $30 M_{\odot} + 30 M_{\odot}$ 的双黑洞星并合事件,若位于 400 Mpc 处,其传播到地球的引力波辐射幅度为 10^{-21} 量级。

半长轴较小的孤立大质量双星演化比单星演化要复杂得多,其可能经历潮汐锁定情况下的化学均匀演化或洛西瓣物质交流、潮汐相互作用、公共包层抛射、出生踢出等复杂天体物理过程,影响双星轨道和物理参数的演化,从而决定最终形成的双致密天体的性质和并合率分布。在球状星团、星系核等高密度星场中,三体和多体相互作用可以形成双黑洞、双中子星等,其性质与孤立双星演化有所不同,比如具有较高的偏心率、自旋方向不对齐、更大的质量等。另外,活动星系核气体吸积盘上也可产生双黑洞和双中子星等,其富气体环境会使得它们具有较为复杂的相协电磁信号。

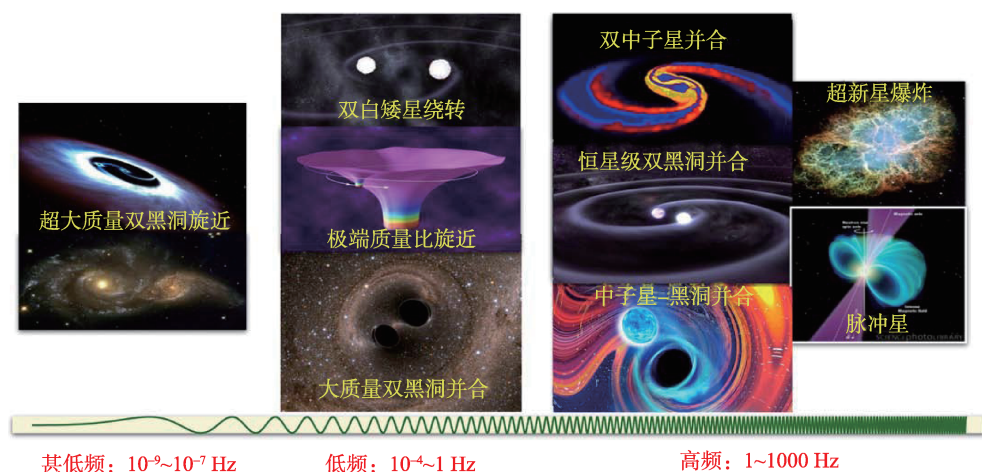


图3 双致密天体绕转并合引力波源。左边为纳赫兹频段的超大质量双黑洞旋近,中间为毫赫兹频段的双白矮星绕转、大质量双黑洞并合和极端质量比旋近,右边为百赫兹频段的恒星级双黑洞、双中子星、中子星-黑洞双星并合,以及非轴对称超新星爆炸和脉冲星

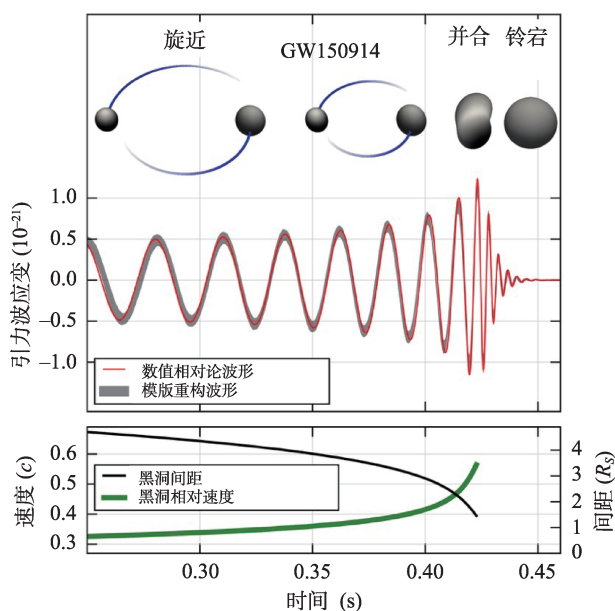


图4 双致密天体并合引力波波形示例:GW150914的引力波信号及其由相对论模版重构的波形。图中,上面部分描述演化的三个阶段,中间部分给出引力波波形,下面部分给出双星间距(单位为史瓦西半径)和速度(单位为光速 c)演化。摘自 Abbott et al. (2016, PRL,116, 061102)^[2]

双白矮星在银河系内广泛存在^[4]。星族合成理论预期银河系中有上千万对双白矮星。电磁观测在银河系内已经发现至少上百对双白矮星,其中 HM Cancri 和 ZTF J1539+5027 的周期只有 5.4 分钟和 6.91 分钟。部分双白矮星的轨道半长轴特别小,其两成分间因一个填满了洛西瓣从而形成洛西超流喂养另一个,并同时产生电磁对应信号,且最终并合。若双白矮星并合质量超过钱德拉赛卡极限($1.4 M_{\odot}$),则产生超新星爆发,并最终形成中子星。它们的绕转可发射引力波,其频率在毫赫兹频段。

银河系中也存在很多双中子星。星族合成理论预言银河系中存在百万对双中子星,其中有近万对含脉冲星组分,可被射电观测发现。目前,射电观测已发现二十余对双中子星^[5]。其中包括 Hulse 和 Taylor 发现的第一例双中子星 PSR J1913+16(轨道周期 7.75 小时),以及周期最短的 J1946+2052(只有 1.87 小时)。这些双中子星的轨道半长轴因引力波辐射而逐渐减小,越来越强的引力波持续辐射会导致它们最终并合,并合时标最短的(J1946+2052)

不到五千万年。Hulse 和 Taylor 通过对 PSR J1913+16 的长期观测发现其轨道衰减与广义相对论预言几乎完全一致,间接证实了引力波的存在^[6]。根据银河系现有双中子星观测,预期银河系中每百万年将有数十对双中子星并合事件发生,这也表明含有数千亿星系的宇宙中会频繁发生双中子星并合事件。

特别值得注意的是,双中子星并合也会产生相协的电磁信号。若双中子星并合形成黑洞,在并合过程中黑洞可吸积残余盘物质产生喷流,从而导致持续时间较短($< 2s$)的伽马射线暴发,即短伽马射线暴(short Gamma Ray Burst, sGRB)^[7]。另外,因中子星碰撞和潮汐作用等抛射出来的中子物质会迅速通过一系列物理过程形成超铁重元素并衰变放热,在光学红外波段产生准黑体辐射且随时间演化衰减,这一现象被称为千新星(kilonova)^[8]。双中子星并合过程中合成大量的镧系和锆系元素,以及金铂等,其可能主导了宇宙中此类重元素的形成。

双黑洞:理论预期宇宙中存在大量的恒星级双黑洞,并且其并合率密度可能高达数十甚至上百例每年每 $10^9 \text{ Mpc}^{3[9]}$ 。然而,孤立恒星级双黑洞系统很可能因无气体吸积而蛰伏在宇宙深处,难以用电磁波段手段探测到。也许,只有少量在特殊气体环境中的恒星级双黑洞才因吸积照亮而有可能被电磁观测发现,比如活动星系核吸积盘上形成的恒星级双黑洞系统。

另外,白矮星-中子星双星、中子星-黑洞双星、白矮星-黑洞双星也都是广泛存在。观测发现的一些极端致密 X 射线源被认为是存在物质交流的白矮星-中子星双星系统,比如,4U1820-30 就是这样的一个系统,其周期只有 685 秒,白矮星成分充满了洛西瓣,其表面物质通过拉格朗日点转移至中子星附近被吸积,并发出大量的 X 射线辐射^[10]。尽管人们也一直期待通过电磁观测发现中子星-黑洞双星和白矮星-黑洞双星,但到目前为止还没有探测到它们。

3. 超大质量黑洞

人们发现在银河系、M87 和其他一些近邻星系

的中心还存在质量为 $10^5 \sim 10^{10} M_{\odot}$ 的超大质量黑洞 (见图 5), 且观测证据表明椭圆星系和有核球成分的星系中心都存在超大质量黑洞。超大质量黑洞吸积周围气体会在射电直至伽马射线波段都变得极其明亮, 成为类星体和活动星系核。在近邻宇宙一直到遥远的红移 10 以上第一代星系刚刚批量形成的早期宇宙, 观测都发现了大量的类星体和活动星系核, 显示超大质量黑洞早在宇宙的黎明时期就已大量形成。这些超大质量黑洞很可能是由质量为 $10^3 \sim 10^5 M_{\odot}$ 的种子黑洞通过并合和气体吸积过程快速形成。超大质量黑洞的种子黑洞有可能是由致密星团演化或宇宙早期大质量云团直接坍缩产生, 其对理解第一代星系、类星体和超大质量黑洞的形成至为关键, 但其究竟是否存在和如何形成还是未解之谜。

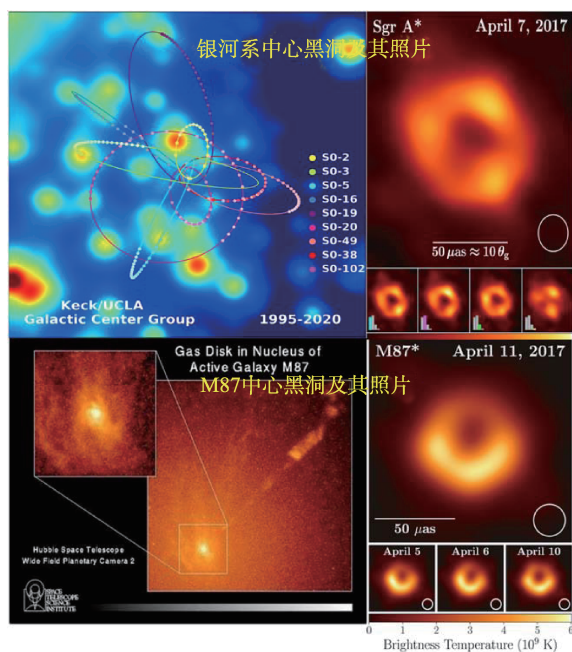


图5 银河系中心和M87星系中心的超大质量黑洞及其黑洞照片。左上为银河系中心黑洞及绕其转动的恒星, 左下为M87星系中心及由中心黑洞产生的喷流, 右上和右下分别为银河系和M87星系中心黑洞的阴影照片。摘自 Akiyama, K., Alberdi, A., et al. (2019, 2022; 右上和右下)^[11, 12]; (左下) <https://science.nasa.gov/asset/hubble/spiral-gas-disk-in-active-galaxy-m87/>; <https://galacticcenter.astro.ucla.edu/images.html>(左上)

在标准的宇宙学常数冷暗物质模型中, 大星系是由小星系并合吸积形成的。这一星系层级形成图景已被包括并合星系在内的大量观测所证实。星系的并合必然导致在其中心的超大质量黑洞相互靠近, 并最终形成引力束缚的双黑洞系统 (参见 Begelman et al. 1980^[13]; Yu 2002^[14])。超大质量双黑洞通过三体相互作用散射进入其周围区域的低角动量恒星, 或者通过与其周围气体(盘)物质的相互作用损失角动量, 导致轨道收缩。当轨道收缩到一定的程度, 引力波辐射迅速增强并主导轨道的快速演化, 最终导致双黑洞并合成为一个新的黑洞。在超大质量双黑洞早期旋近阶段, 若周期在年量级, 其在纳赫兹频段辐射引力波; 在晚期并合阶段, 若系统质量在 $10^7 \sim 10^8 M_{\odot}$ (甚至是 $10^5 \sim 10^4 M_{\odot}$), 则其在毫赫兹频段辐射引力波。不管是在近邻宇宙还是第一代星系刚刚开始形成的宇宙黎明时期, 超大/中等质量双黑洞的并合都会发生, 它们提供了探测宇宙中星系和其中中心黑洞协同演化的理想探针, 且对理解类星体现象具有重要作用。

极端/中等质量比旋近: 星系中心超大质量黑洞周围因质量层析等动力学效应积聚大量致密天体, 包括恒星级黑洞等。致密星团中心若存在中等质量黑洞, 其环境也类似。因两体弛豫相互作用和引力波辐射刹车效应, 不时会有此类致密天体闯入中心黑洞邻域, 其围绕中心黑洞转动, 通过引力波辐射持续损失能量并最终融入中心黑洞 (参见 Amaro-Seoane et al. 2007^[15])。此类系统质量比较小, 若其质量比在 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ 间, 则称为极端质量比旋近 (extreme-mass-ratio inspiral; EMRI), 若在 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 间, 则称为中等质量比旋近 (intermediate-mass-ratio inspiral; IMRI)。旋近体相对质量比较小, 其对中心黑洞度规扰动可忽略, 因此近似于检验质量绕中心黑洞运动。在融入中心黑洞前, 旋近体绕转中心黑洞可高达数万至数十万个轨道周期, 因此其发射的毫赫兹引力波信号富含黑洞度规及其环境相对论性动力学信息, 可用于精确测绘中心黑洞的度规和检验引力。

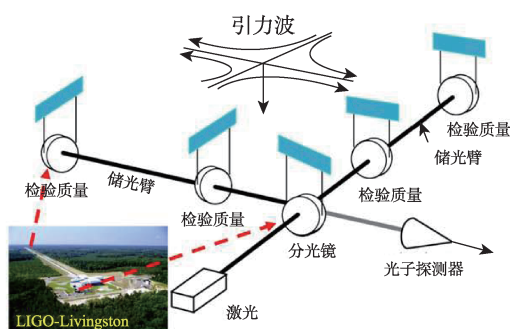
4. 引力波探测

引力波会造成其传播路径上空间的拉伸和挤压。在引力波通过时,空间两点间的间距会产生微小变化,对其探测需要极为精密的测距测时技术和方法。不同天体波源产生的引力波的频率/波长差别很大(见图3),可横跨百赫兹/千公里级(恒星级双黑洞、双中子星等并合)、毫赫兹/亿公里级(大质量黑洞并合)到纳赫兹/百万亿公里级(超大质量双黑洞旋近)。不同波长的引力波需要采用不同的方式去探测。当前,天体波源的引力波探测分为高频地基引力波探测、低频空间引力波探测和纳赫兹脉冲星测时阵甚低频引力波探测(图6)。下面,我们分别简述这几种不同的探测方法。

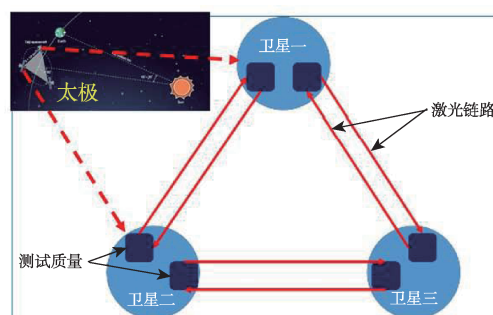
地基引力波探测:针对10~1000赫兹的高频引力波,目前人们已经建成了若干地基激光干涉仪引力波天文台,均采用大型迈克尔逊干涉仪和法布里-珀罗腔技术,由L型两正交真空臂构成。每条真空臂内悬挂一对经过多级减震几乎能够保持不动的

镜子,间距为3~4公里。一初始激光由分光镜分为两束,分别注入两臂中,在两镜间来回反射,再合二为一进行干涉,最终为光子探测器探测。在有引力波穿过探测器时,因两臂中两反射镜间距随引力波变化不同,从而导致干涉结果的明暗变化,由此可以精确探测引力波(原理见图6左子图)。这些地基引力波天文台包括分别位于美国华盛顿州 Hanford 和路易斯安那州 Livingston 臂长为4公里的 LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory; 见图6左子图右下)、位于意大利 Pisa 臂长为3公里的 Virgo 以及日本神冈地下臂长为3公里的 KAGRA。另外,印度也正在建设 Indian-LIGO, 其与 Hanford 的 LIGO 类似。地基引力波天文台以恒星级双黑洞、双中子星、中子星-黑洞双星等致密双星并合事件为主要探测目标。同时,其也探测非轴对称脉冲星旋转产生的连续引力波、超新星爆发生成中子星时产生的引力波,以及宇宙学起源的随机引力波背景等。

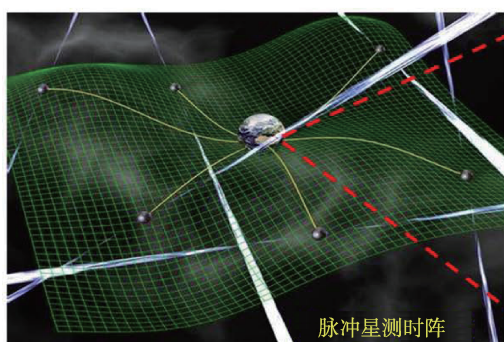
2015年9月14日,LIGO在人类历史上首次直



地基引力波探测激光干涉仪



空间引力波探测激光干涉链路



天眼

图6 地基、空间和脉冲星测时阵探测引力波原理。左上和右上分别为地基激光干涉仪探测引力波原理图、空间引力波探测器激光干涉链路图,下子图则为脉冲星测时阵

接探测到引力波,信号来自距离地球 410 Mpc(百万秒差距,一秒差距为二十万日地距离)处两个质量分别为 $36 M_{\odot}$ 和 $29 M_{\odot}$ 的恒星级黑洞并合(GW150914)^[2]。引力波成功探测是科学史上里程碑式事件,它开启了人类用引力波探测宇宙的新窗口,其重要性媲美 1609 年伽利略首次利用望远镜观测太空。随着探测的逐步展开,LVK 获得了很多惊人的发现,包括首例双中子星并合事件(GW170817)^[16]、首例质量间隙黑洞并合事件(GW190521,质量为 $95.3 M_{\odot} + 69.0 M_{\odot}$)^[17]、首例中子星-黑洞并合事件(GW200115,质量为 $1.91 M_{\odot} + 9.1 M_{\odot}$)^[18]、完全不同于电磁观测发现的银河系内双中子星的中子星并合事件(GW190425,质量为 $2.1 M_{\odot} + 1.3 M_{\odot}$)^[19]、极端小质量比双黑洞并合事件(GW190814,质量为 $23.2 M_{\odot} + 2.59 M_{\odot}$)^[20]等等。截至目前,LVK 共进行了四期观测(O1~O4,其中 O4 还在进行,计划于 2025 年 11 月结束),探测到了超过 200 例双致密天体并合事件,包括两例双中子星、多例中子星-黑洞双星以及两百多例双黑洞并合事件(若干事例的引力波波谱见图 7 左上子图;<https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-publications>)。其中,多波段电磁探测还发现了 GW170817 的从伽马射线到射电波段的电磁对应信号,一举证实了双中子星并合可以产生伽马射线暴和千新星的理论预言,开启了多信使天文学研究的新时代。

目前,LIGO、Virgo 和 KAGRA(LVK)对双中子星并合事件的探测最远距离可达 190 Mpc,对恒星级双黑洞的探测则可达 1000 Mpc。下一期观测 O5 计划于 2027 年开始,其可探测到约 300 Mpc 以内的双中子星并合。数据的进一步累积和随时可能获得的对包括致密天体形成时产生的引力波暴等新型波源的探测都将牵引着引力波天文学的快速和深入发展。

鉴于引力波探测的重大科学意义,人们也在计划建设下一代超大型引力波天文台,包括欧洲的爱因斯坦望远镜(Einstein Telescope; ET)和美国的宇宙勘探者(Cosmic Explorer; CE)。ET 为等边三角形

构型,臂长为 10 公里,将建于地下。CE 则为 L 型构型,臂长为 40 公里。因采用一系列高新技术,下一代引力波天文台探测灵敏度将比当前提高数十倍,探测率提高 3~4 个量级(见图 7 左上)。其几乎可以探测到宇宙中所有的恒星级质量双黑洞并合引力波事件,可以探测到直至红移 2 左右的双中子星并合引力波事件。引力波的持续探测必将革新人类对恒星和致密天体形成演化的认识、带来对宇宙时空的深刻洞见和相关研究的革命性发展。

空间引力波:由于地球物理尺度、地质噪音及其消除技术和地球自转参考系的牛顿力噪声等的限制,地基引力波探测器只能探测几赫兹以上频段的引力波。探测分赫兹-毫赫兹甚至更低频段的引力波需要构建更长臂长的探测器。空间引力波探测就是将激光干涉仪发射到太空中去形成星座,构建臂长为几十万上百万公里甚至更大尺度的激光干涉链路,通过测量干涉臂在引力波影响下的细微变化来探测引力波事件。欧洲和美国规划的空间引力波探测计划 LISA(Laser Interferometer Space Antenna; <https://sci.esa.int/web/lisa>)^[15]已于 2024 立项,计划于 2035 年发射。LISA 由三颗卫星构成边长为 250 万公里的等边三角形星座,位于地球绕日轨道上,落后于地球约 20 度绕日运行。三颗卫星通过微推技术尽力保持其中释放的检验质量静止不动,由各个卫星中的检验质量两两间共建立六条激光链路,通过对不同激光链路间距离微小变化的测量来探测引力波信号。中国空间引力波计划则由日心轨道的太极计划(Hu & Wu 2017)^[21]和地心轨道的天琴计划(Luo et al.2016)^[22]组成。前者由三颗卫星构成边长为 300 万公里的等边三角形星组在地球绕日轨道上运行,原理与 LISA 相似(示意见图 6 左上子图);后者则由绕地运行三颗卫星构成边长为 17 万公里的等边三角形星组,通过两两间的六条激光链路进行干涉测距,提取引力波信号。中国空间引力波探测也计划于 2035 年前发射,探测低频引力波。

LISA、太极和天琴等空间引力波探测器的主要目标波源包括 $10^7 \sim 10^4 M_{\odot}$ 双黑洞的并合事件、极端/

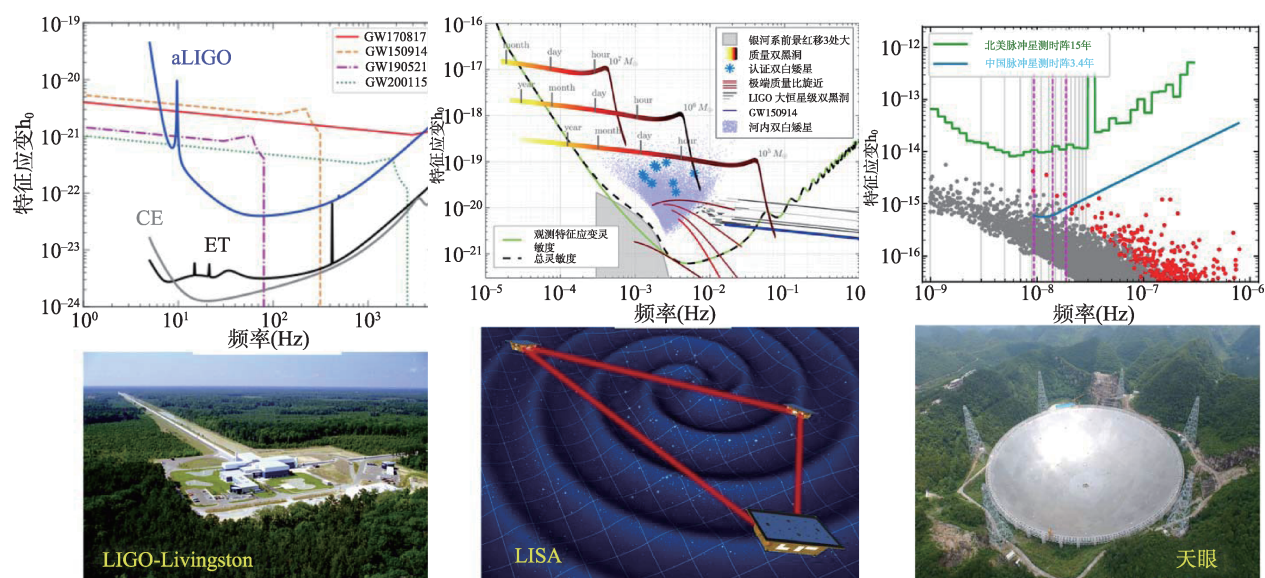


图7 地基引力波天文台(左子图)、空间引力波探测器(中间子图)和脉冲星测时阵(右子图)探测主要目标天体波源和探测灵敏度曲线示意。左子图下为LIGO-Livingston引力波天文台,上部展示LIGO、ET和CE的探测引力波特征应变灵敏度曲线,作为示例也展示了已探测到的首例双中子星合并(GW170817)、中子星-黑洞合并(GW200115)、双黑洞合并(GW150914)以及质量间隙黑洞合并(GW190521)等事件的引力波谱。中下为LISA,中上展示LISA灵敏度曲线及目标波源波谱;右下为天眼,右上为当前NANOGrav和CPTA探测灵敏度曲线及模拟波源(红色点为单个频率区内主导源)。

中上摘自 Amaro-Seoane et al.(2017)^[23],右上改自 Chen, Yu & Lu(2024)^[24]

中等质量比旋近事件、银河系中的双白矮星及由其形成的引力波前景、少量的旋近阶段的恒星级质量双黑洞、河外星系中旋近阶段双致密天体混叠产生天体引力波背景以及宇宙学引力波背景等(见图7中间子图)。其中,一些电磁观测发现的有精确轨道和物理参数测量的已知双白矮星可以作为验证源对引力波探测进行标定。

LISA、太极和天琴空间引力波探测可以测得红移直至20的大质量双黑洞并合事件,可以高精度测定双黑洞的质量、自旋等内禀物理参量,给出中等质量黑洞存在的决定性证据和甄别种子黑洞的形成路径,提供关于双黑洞族群的统计性质分布,帮助揭示超大双黑洞和星系的协同演化。空间引力波探测到的一些较近距离的双黑洞并合事件,其引力波信号如此之强以至于信噪比高达几千甚至上万。探测信号与广义相对论预言信号间即使很微小的差异也会被如此高信噪比的测量分辨,从而可以帮助检验广义相对论和揭示引力本质。

LISA、太极和天琴可以测得极端/中等质量比旋近事件。这些旋近事件,特别是EMRIs因旋近体相对质量比较小而对中心黑洞度规扰动小,其近似于检验质量绕中心黑洞运动,可用于精确测绘中心黑洞的度规和检验引力,并可能带来新物理突破。

LISA、太极和天琴也可探测到高达数万对银河系内双白矮星的引力波信号,以及由不能被单个解析出来的大量河内双白矮星的引力波辐射混叠形成的毫赫兹引力波前景,为双白矮星的形成演化及其中关键物理过程提供无法用电磁波观测获得的信息,同时也提供独立方法限制银河系结构。LISA、太极和天琴还可以探测到至少数十对处于旋近阶段的恒星级双黑洞以及由河外双致密天体旋近形成的引力波背景,由此可与地基引力波探测结合开展多频段引力波研究,包括揭示恒星级双黑洞在内的双致密天体的起源和演化路径。

脉冲星测时阵列:一些射电观测发现毫秒脉冲星具有非常稳定的周期性脉冲辐射,可以当作理想

的时钟。在引力波通过这些脉冲到达地球的路径时会改变脉冲星与地球间的距离,从而导致脉冲到达时间的差异。利用射电望远镜长期监测处于不同空间方向的大量稳定毫秒脉冲星,获得它们的脉冲信号到达时间,从而形成脉冲星测时阵探测引力波(见图 6 下子图)。若有引力波通过,引力波的四极辐射本质可导致不同指向夹角的脉冲星对测时时间残差间存在明显空间角相关性,即所谓的 Hellings-Downs 曲线(1983)^[25],其显著不同于其他噪声情况下的非相关性。Hellings-Downs 角相关曲线为脉冲星测时阵探测引力波提供关键证据。因脉冲星距离地球普遍在几百至几千秒差距间,也即其形成的探测臂长远大于地基和空间引力波探测器臂长,且脉冲星的测时精度可达百纳秒甚至十纳秒。由此,脉冲星测时阵可以很高的灵敏度探测以年周期绕转的 $\geq 10^8 M_{\odot}$ 的超大质量双黑洞个源产生的引力波以及由超大质量双黑洞族群形成的纳赫兹引力波背景(见图 7 右子图)。

当前的脉冲星测时阵包括北美引力波天文台(North American Nanohertz Gravitational wave observatory; NANOGrav)、欧洲脉冲星测时阵(European Pulsar Timing Array; EPTA)、澳大利亚帕克斯脉冲星测时阵(Parkes Pulsar Timing Array; PPTA)、中国脉冲星测时阵(Chinese Pulsar Timing Array; CPTA, 基于天眼)、基于平方公里阵先导项目的脉冲星测时阵(Meertime Pulsar Timing Array; MPTA),以及印度脉冲星测时阵(Indian Pulsar Timing Array; InPTA)。2023 年以来,CPTA、EPTA(+InPTA)、NANOGrav、PPTA 和 MPTA 均于近两年发布了纳赫兹引力波背景的存在证据(Hellings-Downs 空间相关性; 2~4 标准偏差置信水平),其中 CPTA 的置信度超过 4 倍标准偏差(Agazie et al. 2023, Antoniadis, J., et al. 2023, Reardon et al. 2023, Xu et al. 2023, Miles et al. 2025)^[26-30]。大量的研究表明此纳赫兹引力波背景信号与超大质量双黑洞模型的理论预期可以相适应,但并不排除其他诸如起源于宇宙极早期物理过程的可能性。

各脉冲星测时阵都在持续积累数据,预期在近

几年内就会获得纳赫兹引力波背景超过 5 倍标准偏差置信水平的决定性证据,实现纳赫兹引力波探测的重大突破,并打开一个新的引力波探测窗口。同时,若此纳赫兹引力波信号起源于超大质量双黑洞,则个源的纳赫兹引力波辐射也必将很快被探测到,获得超大质量双黑洞存在的决定性证据,并极大地推动多信使超大质量双黑洞研究,解释其与星系的协同演化。

5. 引力波探测和研究展望

引力波非光非物,而是时空结构的颤动。天体波源奏响的引力波交响乐,如宇宙之洪钟大吕,但大音希声,难得耳闻。当前,地基引力波探测已发现大量关于恒星级双黑洞、双中子星、中子星-黑洞双星并合事件,积累了大量的无法以其他手段获得的数据,带动了致密天体研究的蓬勃发展。从地基引力波天文台、空间引力波探测器到脉冲星测时阵,从高频、低频到甚低频,引力波探测技术的快速发展将布下天罗地网,必将将宇宙中各类神奇天体波源谱写的引力波交响乐华章的音符一一捕获,并由这些高精度探测来揭示黑洞、中子星等致密天体的起源、演化和物理本质,提供独特的距离探针来准确丈量宇宙,带来对天体物理、基础物理、宇宙学和时空本质研究的革命性进步。

*本文受中国科学技术部国家重点研发专项“面向空间引力波探测的致密天体波源物理和天文学研究”支持(基金号: 2020YFC2201400)。

参考文献

- [1] Maggiore, M., Gravitational Waves: Volume I: Theory and Experiments[M], 2007, doi:10.1093/acprof:oso/9780198570745.001.0001.
- [2] Abbott, R., Abbott, T. D., et al., Observation of Gravitational Waves from a binary black hole merger[J], PRL, 2016, 116, 6, 061102. doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102.
- [3] Lu, Y., Compact Binary Coalescences: formation, evolution, gravitational wave detection, and applications[J], IJMPD, 2025, 34, 9, 2542003, doi: 10.1142/S0218271825420039.

- [4] Nelemans, G., Yungelson, L. R., & Portegies Zwart, S. F., The Gravitational Wave Signal from the Galactic Disk Population of Binaries Containing Two Compact Objects[J], A&A, 2001, 375, 890. doi:10.1051/0004-6361:20010683.
- [5] Tauris, T. M., Kramer, M., Freire, P. C. C., et al., Formation of Double Neutron Star Systems[J], ApJ, 2017, 846, 2, 170. doi: 10.3847/1538-4357/aa7e89.
- [6] Taylor, J. H., Binary Pulsars and Relativistic Gravity[J], Review of Modern Physics, 1994, 66, 3, 711. doi:10.1103/RevModPhys.66.711.
- [7] Berger, E., Short Duration Gamma Ray Bursts[J], ARA&A, 2014, 52, 43. doi:10.1146/annurev-astro-081913-035926.
- [8] Metzger, B. D., Kilonovae, Living Reviews in Relativity, 2017, 20, 1, 3. doi:10.1007/s41114-017-0006-z.
- [9] Belczynski, K., Holz, D. E., Bulik, T., et al., The First Gravitational-Wave Source from the Isolated Evolution of Two Stars in the 40-100 Solar Mass Range[J], Nature, 2016, 534, 7608, 512. doi: 10.1038/nature18322.
- [10] Stella, L., Priedhorsky, W., & White, N. E., The Discovery of a 685 Second Orbital Period from the X-ray Source 4U1820-30 in the Globular Cluster NGC 6624[J], ApJL, 1987, 312, L17. doi: 10.1086/184811.
- [11] Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, K., Alberdi, A., et al., First M87 Event Horizon Telescope Results: the Shadow of the Supermassive Black Hole, ApJL, 2019, 875, 1, L6. doi: 10.3847/2041-8213/ab1141.
- [12] Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, K., Alberdi, A., et al., First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. the Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way[J], 2022, ApJL, 930, 2, L12. doi:10.3847/2041-8213/ac6674.
- [13] Begelman, M. C., Blandford, R. D., & Rees, M. J., Massive Black Hole Binaries in Active Galactic Nuclei, Nature, 1980, 287, 5780, 307. doi:10.1038/287307a0.
- [14] Yu, Q., Evolution of Massive Binary Black Holes, MNRAS, 2002, 331, 4, 935. doi:10.1046/j.1365-8711.2002.05242.x.
- [15] Amaro-Seoane, P., Gair, J. R., Freitag, M., et al., Topical Review: Intermediate and Extreme Mass-Ratio Inspirals—Astrophysics, Science Applications and Detection Using LISA[J], Classical and Quantum Gravity, 2007, 24, 17, R113. doi:10.1088/0264-9381/24/17/R01.
- [16] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al., GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral[J], PRL, 2017, 119, 16, 161101. doi:10.1103/PhysRevLett.119.161101.
- [17] Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., et al., GW190521: A Binary Black Hole Merger with Total Mass of $150 M_{\text{sun}}$ [J], PRL, 2020, 125, 10, 101102. doi:10.1103/PhysRevLett.125.101102.
- [18] Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., et al., Observations of Gravitational Waves from Two Neutron Star-Black Hole Coalescences[J], ApJL, 2021, 915, 1, L5. doi:10.3847/2041-8213/ac082e.
- [19] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al., GW190425: Observation of a Compact Binary Coalescence with total mass $\sim 3.4 M_{\text{sun}}$ [J], ApJL, 2020, 892, 1, L3. doi:10.3847/2041-8213/ab75f5.
- [20] Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., et al., GW190814: Gravitational Waves from the Coalescence of a 23 Solar Mass Black Hole with a 2.6 Solar Mass Compact Object[J], ApJL, 2020, 896, 2, L44. doi:10.3847/2041-8213/ab960f.
- [21] Hu, W.-R. & Wu, Y.-L., The Taiji Program in Space for Gravitational Wave Physics and the Nature of Gravity[J], National Science Review, 2017, 4, 5, 685. doi:10.1093/nsr/nwx116.
- [22] Luo, J., Chen, L.-S., Duan, H.-Z., et al., Tianqin: a Space Borne Gravitational Wave Detector[J], Classical and Quantum Gravity, 2016, 33, 3, 035010. doi:10.1088/0264-9381/33/3/035010.
- [23] Amaro-Seoane, P., Audley, H., Babak, S., et al., Laser Space Interferometer Antenna[M], 2017, arXiv: 1702.00786. doi: 10.48550/arXiv.1702.00786.
- [24] Chen, Y., Yu, Q., & Lu, Y., Constraining the Origin of the Nano-Hertz Gravitational Wave Background by Pulsar Timing Array Observations of Both the Background and Individual Supermassive Binary Black Holes[J], ApJ, 2024, 974, 2, 261. doi:10.3847/1538-4357/ad7582.
- [25] Hellings, R. W. & Downs, G. S., Upper limits on the Isotropic Gravitational Radiation Background from Pulsar Timing Analysis [J], ApJL, 1983, 265, L39. doi:10.1086/183954.
- [26] Agazie, G., Anumalapudi, A., Archibald, A. M., et al., The NANOGrav 15yr Data Set: Evidence for a Gravitational-Wave Background[J], ApJL, 2023, 951, 1, L8. doi:10.3847/2041-8213/acdac6.
- [27] EPTA Collaboration, InPTA Collaboration, Antoniadis, J., et al., The Second Data Release from the European Pulsar Timing Array. III. Search for Gravitational Wave Signals[J], A&A, 2023, 678, A50. doi:10.1051/0004-6361/202346844.
- [28] Reardon, D. J., Zic, A., Shannon, R. M., et al., Search for an Isotropic Gravitational-Wave Background with the Parkes Pulsar Timing Array[J], ApJL, 2023, 951, 1, L6. doi:10.3847/2041-8213/acdd02.
- [29] Xu, H., Chen, S., Guo, Y., et al., Searching for the Nano-hertz Stochastic Gravitational Wave Background with the Chinese Pulsar Timing Array Data Release I[J], Research in Astronomy and Astrophysics, 2023, 23, 7, 075024. doi:10.1088/1674-4527/acdfa5.
- [30] Miles, M. T., Shannon, R. M., Reardon, D. J., et al., The MeerKAT Pulsar Timing Array: The First Search for Gravitational Wave with the MeerKAT Radio Telescope[J], MNRAS, 2025, 536, 2, 1489. doi:10.1093/mnras/stae2571.