

时空的乐章——引力波 百年漫谈(十一)

卢昌海

二十二、更小、更远、更准

GW150914是一个里程碑式的成就,不过LIGO的成功不能只靠一次成就。事实上,如我们在第二十章中提到的,探测到GW150914之后的一段时间内,LIGO内部对GW150914有一种基于概率的疑虑,消除这一疑虑的则是三个多月后探测到的另一组信号:GW151226。

经过与GW150914类似的分析,科学家们判断出了GW151226背后也是黑洞双星的合并——但规模比GW150914小,两个黑洞的质量分别约为太阳质量的14倍和7.5倍。在合并过程中,约有一个太阳质量以引力波的形式辐射了出去。GW151226相比于GW150914的一个特殊之处,是合并前的两个黑洞中至少有一个具有显著的角动量——很可能不小于最大可能值的20%,合并终了所形成的克尔黑洞的角动量则高达最大可能值的74%左右。GW151226与我们的距离跟GW150914差不多,也是约440Mpc(约合14亿光年)。由于双星规模比GW150914小,距离却差不多,因此GW151226的信号没有GW150914的那样强。事实上,GW150914在截至2017年年底前LIGO探测到的所有引力波信号中是最强的,这一特点最大限度地成就了初次探测的轰动效应,对LIGO来说无疑是幸运的——因为否则的话,无论可信度还是对广义相对论的验证程度都会有所降低,初次探测到引力波的轰动效应也会打上折扣。

2016年6月15日,LIGO正式发表了有关GW151226的论文。

探测到GW151226之后不久的2016年1月19日,LIGO的“第一轮观测运行”结束,转入了为期十个月左右的新一轮设备维护和更新。然后,从2016年11月30日到2017年8月25日,LIGO展开了“第二轮观测运行”,继续倾听时空的乐章……

“第二轮观测运行”展开一个月零五天之后,2017年1月4日,LIGO第三次探测到了引力波信号:GW170104。这组信号来自一对质量分别约为太阳质量31倍和19倍的黑洞双星的合并。在合并过程中,约有两个太阳质量以引力波的形式辐射了出去。GW170104在截至2017年年底前LIGO探测到的所有引力波信号中,是引力波源离我们最远的,距离约为880Mpc(约合29亿光年)。

2017年6月1日,LIGO正式发表了有关GW170104的论文。

有关GW170104的论文发表后仅隔了一个星期,2017年6月8日,LIGO第四次探测到了引力波信号:GW170608。这组信号来自一对质量分别约为太阳质量12倍和7倍的黑洞双星的合并。在合并过程中,约有一个太阳质量以引力波的形式辐射了出去。在截至2017年年底前LIGO探测到的所有源自黑洞双星合并的信号中,GW170608也有自己的“之最”,且有两项之多:一项是所涉及的黑洞双星的总质量最小;另一项是引力波源离我们最近——相距约为340Mpc(约合11亿光年)。

2017年11月16日,LIGO正式发表了有关GW170608的论文。

以上四次探测都是LIGO的“独角戏”,但从

2017年8月1日开始,情形有了变化:欧洲也有一座引力波观测台投入了观测运行。那座观测台被称为Virgo(图1),名字来源于距我们约5000万光年的室女座星系团(Virgo Cluster)——因建设之初的目标是能探测到远在室女座星系团的超新星爆发。在引力波探测的舞台上,LIGO几乎占尽了光芒,但其实,Virgo的开工建设只比LIGO晚了两年——也就是1996年开工建设的。Virgo毗邻伽利略的出生地、意大利名城比萨,附近的山峦曾为文艺复兴时期的著名雕刻家米开朗基罗(Michelangelo)提供过雕刻石材,可谓是与悠久而灿烂的文化比邻而栖。如今,新兴的Virgo引力波观测台正式加盟到了前沿科学探索中,开始谱写新的文化篇章。Virgo的探测臂长度约为3000米,比LIGO的稍短。

Virgo投入观测运行几乎才刚满两星期,就于2017年8月14日跟LIGO一同探测到了一组引力波信号:GW170814——这也是LIGO第五次探测到引力波信号。GW170814来自一对质量分别约为太阳质量31倍和25倍的黑洞双星的合并。在合并过程中,约有2.7个太阳质量以引力波的形式辐射了出去。GW170814的引力波源离我们约有540Mpc(约合18亿光年)。由于被三座引力波观测台——即两座LIGO观测台外加Virgo——同时探测到,信号源的定位精度大为提高,由以往的数百乃至上千平方度缩小到了60平方度,遥遥领先地拿下了截至当时



图1 Virgo引力波观测台

为止的定位精度之最。不仅如此,Virgo的加盟与LIGO共同组成了一个能对引力波偏振状态进行检验的探测网,而GW170814则成为了第一组能对引力波偏振状态进行检验的引力波信号。检验结果很好地支持了广义相对论。

2017年9月27日,LIGO和Virgo正式发表了有关GW170814的论文。

不过最令人激动的不是以上这些探测,而是——GW170814发现后的第三天,2017年8月17日,LIGO和Virgo迎来了一次更重大的发现:GW170817。

二十三、GW170817——中子星双星合并的发现

GW170817之所以被称为“更重大的发现”,是因为它是中子星双星合并。

当然,“重大”是一个容易有歧义的概念,发现中子星双星合并是否真的比发现黑洞双星合并“更重大”是很难说的。不过科学家是一群爱追“新”的人,在陆续发现了五组黑洞双星合并之后,黑洞双星合并的新颖性多少有些褪色,对其他类型致密双星合并的期待则有所增加,其“重大”程度也相应地攀升了。

而更重要的则是,黑洞双星合并乃是一种“黑暗”的爆炸,除引力波这单一渠道外无迹可寻。虽然同类结果的反复出现,以及与广义相对论的高度相符,足以抵消单一渠道在可靠性上的先天不足,但科学家们对多渠道交互验证无疑是非常期待的,中子星双星合并恰恰在这一点上是突破性的,它的“重大”也就理所当然了。

GW170817的引力波信号持续了大约100秒的时间(比以往任何一次都长得多),其中双星的合并出现在协调世界时2017年8月17日中午的12时41分04秒左右。Virgo及两座LIGO观测台程度不同地探测到了引力波,其中Virgo最早,LIGO的利文斯顿观测台滞后22毫秒,汉福德观测台再滞后3

毫秒。

对黑洞双星合并而言,以上就该是探测故事的全部,然而对GW170817来说,它们仅仅是一场观测盛宴的开始……

比通过引力波信号所确定的双星合并时刻晚了约1.74秒,一组新的信号以伽玛射线的形式抵达了地球附近。遨游在外层空间的美国费米伽玛射线太空望远镜(Fermi Gamma-ray Space Telescope,简称FGST)记录下了这组历时约两秒的信号,并自动发布了初步的伽玛射线暴警示。

这一来自传统天文学的警示也传给了LIGO和Virgo。我们在第十三节中提到过,LIGO在筹备期间曾与传统天文学发生过经费之争,不过科学界毕竟远比一般世俗机构更富合作精神,经费之争虽是相互拆台,却也不无“亲兄弟明算账”的意味,算账归算账,兄弟依然是兄弟。事实上,LIGO——以及Virgo——建成之后,跟传统天文学保持着非常紧密的“战略伙伴”关系,彼此共享着信息。虽然此前几次探测到的都是黑洞双星合并,是“黑暗”的爆炸,传统天文学鞭长莫及,只能旁观,但两边的科学家们都期待着引力波天文学与传统天文学交相辉映的那一天,并为此做好了充分准备。

那一天终于到来了。

40分钟后,即协调世界时2017年8月17日下午的1时21分42秒,LIGO和Virgo向“战略伙伴”们发布了初步的引力波警示,并指出了引力波源与中子星双星合并的特征相一致,时间上则与费米伽玛射线太空望远镜探测到的伽玛射线暴显著相关。

这些警示让欧洲国际伽玛射线天体物理实验室(INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory,简称INTEGRAL)的科学家们忙碌了起来。国际伽玛射线天体物理实验室也是“太空望远镜”,也是旨在探测伽玛射线暴的,并且比费米伽玛射线太空望远镜更“资深”(因为早了六年发射)。不过在日新月异的科研领域,“资深”有时免不了成为某些方面陈旧的代名词,国际伽玛射线天体物理实验室在灵敏度和信息处理速度方面,都比费米伽玛射线太

空望远镜逊色,经过约40分钟的“手动”排查,才终于证实了费米伽玛射线太空望远镜探测到的伽玛射线暴。

这之后又过了将近4个小时,即协调世界时2017年8月17日下午的5时54分51秒,LIGO和Virgo将引力波源的方位确定到了南半球天空中一个范围约31平方度的区域内,并将这一方位信息发送给了所有“战略伙伴”。引力波源的距离则被估计为是40MPC(约合1.3亿光年)左右。

跟以往不同的是,对GW170817的探测哪怕在这一早期阶段,也同时包含了引力波和伽玛射线暴这两个独立渠道,那么,对引力波源的这一早期定位究竟仰赖了哪个渠道呢?答案是引力波。这可以从图2给出的引力波和伽玛射线暴这两个渠道在定位中的作用清晰地看出:图中两个细长浅绿色区域是LIGO给出的定位;深绿色区域是LIGO和Virgo的联合定位;浅蓝色带状区域是费米伽玛射线太空望远镜与国际伽玛射线天体物理实验室的探测时间差给出的定位;深蓝色椭圆形区域是费米伽玛射线太空望远镜给出的定位。很明显,LIGO和Virgo的联合定位是所有定位中最精准的,而且完全没有被费米伽玛射线太空望远镜与国际伽玛射线天体物理实验室的定位所加强(后两者在定位上所起的作用仅仅是确认了彼此相容)。因此对引力波源的这一早期定位的可以完全归功于引力波,归功于LIGO和Virgo。

方位信息的发布迅速引发了一场全球性的光

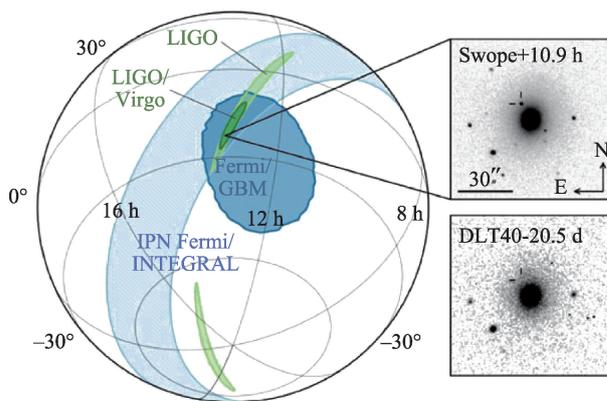


图2 GW170817的定位

学搜索。

跟引力波的探测不同,对光学搜索来说,地球是不透明的,因此位于南半球天空中的引力波源使南半球天文台占了地利之便(北半球的天文台即便能观测,也往往会受到苛刻得多的时段等条件限制)。8月17日那天的下午,大批天文学家一边等待南半球的日落,一边忙碌地从事着观测前的准备。大规模的搜索于黄昏时展开。由于有LIGO和Virgo联合定位的引导,在接下来的若干小时内,多个观测组在光学波段上找到了GW170817的波源。其中拔得头筹的是以美国加州大学圣克鲁兹分校的天文学家福利(R.Foley)为“核心”的观测小组。

福利当时在南半球国家智利的拉斯坎帕纳斯天文台从事观测。8月17日下午,他恰好忙里偷闲地给自己放了半天假,一位研究生却忽然发来短信,称LIGO和Virgo探测到了中子星双星合并,且伴有伽玛射线暴。福利后来回忆说,他起初以为研究生在开玩笑,想要破坏他的休假,但很快搞清了不是玩笑,于是火速赶回天文台,开始制定观测方案及进行观测前的其他准备。黄昏后,福利的研究组利用口径一米的“斯沃普超新星巡天望远镜”(图3)在LIGO和Virgo的联合定位区域中展开了搜索,并且在拍摄到第9张相片时,在椭圆星系NGC4993

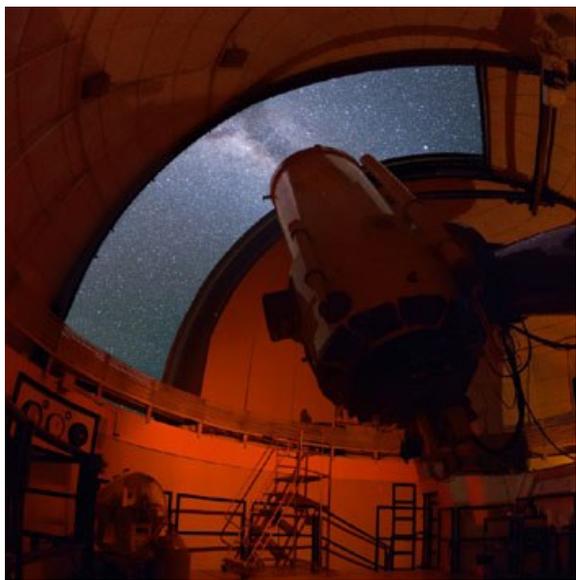


图3 斯沃普超新星巡天望远镜

中发现了一个以往不存在的亮度为17等的新光点(参阅图2的GW170817的定位图示右侧的放大框——其中右上框标示的是新光点,右下框则是同一天区数周前的相片,该光点尚不存在)。除位置与LIGO和Virgo的联合定位相一致(这是显而易见的,因搜索区域就是由此而来的)外,该新光点所属的椭圆星系NGC4993与我们的距离恰好是40MPC(约合1.3亿光年),也跟LIGO和Virgo的估计相一致(但误差小得多)。这些,以及陆续出现的更多证据,很快证实了这个新光点正是GW170817的光学影像。

光学波段的观测是最古老、最传统的天文学,然而其优势并未因历史的久远而丧失——因为跟引力波信号及伽玛射线暴的稍纵即逝不同,中子星双星合并的光学波段的辐射虽也会快速衰减,持续时间毕竟长得多。而且一旦观测到光学影像,定位精度立刻有了巨幅提高——因为LIGO和Virgo联合定位的面积相当于150个满月,光学影像却是点状的。

定位精度的巨幅提高大大降低了搜索难度,从而便利了更大规模的搜索。

在接下来的时间里,各种波段的观测遍地开花,持续时间从数小时、数日,到数周,乃至更久,参与观测的天文台多达70余个,遍及包括南极洲在内的全球七大洲,以及外层空间。以参与观测的设备而论,称得上是“十八般兵器齐上阵”——其中包括中国南极昆仑站的巡天望远镜AST3-2。从观测渠道上讲,则由低频至高频,涵盖了包括射电、红外、可见光、紫外、X射线、伽玛射线在内的整个电磁波段。这一切再加上引力波,构成了一个近乎完美的观测链。

经过这种大规模的搜索和观测,可以相当有把握地确定:GW170817是大约1.3亿年前发生在椭圆星系NGC4993内的一次中子星双星合并。

在这种大规模的搜索和观测中,天文学家们对GW170817的光谱变化和亮度衰减等特征都作了细致记录,汇集了丰富的数据。初步的分析显示,这些数据跟中子星双星合并的理论预期相一致。当然,这绝不是说一切问题都已经有了答案,事实上,对于规模如此宏大,离我们如此遥远的天文事件,

毫无疑问会有大量细节有待进一步探索,科学家们在这场观测盛宴中斩获的成果,如同一座巨大的宝藏,在未来很长的时间内都有细细发掘的余地。

2017年10月16日,有关GW170817的消息被正式发布。

跟一年多之前首次探测到引力波的GW150914不同,此次消息的“封锁”力度弱得多,泄密从观测到GW170817的第二天——即8月18日——就开始了,堪称“猖獗”。到后来,距离消息发布还差十几天的时候,就连“LIGO之父”韦斯在麻省理工学院为他获得诺贝尔物理学奖举办的新闻发布会上,也隐晦而公开地泄了密。这一方面固然是因为经过一年多的时间及五组成功的引力波探测,科学家们对此类探测的信心有了显著增加,害怕泄密的程度大为降低;另一方面,则是因参与观测的人员实在太多,使保密变得更为困难了。

不过尽管消息已在一定程度上遭到泄漏,事件的轰动性也因为第六次而非第一次探测到引力波而有所降低,引力波和电磁波的双管齐下,以及人类终于在真正视觉的意义上“看见”引力波源这一新特点,依然使消息的发布变得非同小可。这一点对学术界自身而言尤其如此。10月16日这一天,LIGO、Virgo以及数十个天文台有关GW170817的不下于数十篇的联合论文、论文预印本及通讯“井喷”般地同时发表,其中发表在《天体物理学杂志通信》上的一篇题为“中子星双星合并的多信使观测”(Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger)的长篇论文的署名作者多达3600人左右,来自900多个科研院所,占全球天文学家总数的1/3左右,其规模之空前不仅大幅超越了一年半以前有关GW150914的论文,以占全球天文学家总数的比例而论甚至有可能是绝后的。观看GW170817的新闻发布会,看到一个个观测台的科学家报告他们的发现,以及发现的经过,分享他们的兴奋、欣喜和幽默,很难不被一种见证历史的激动所感染。

接下来我们略谈几句GW170817背后的物理。

跟黑洞双星合并是一种首次发现的全新现象

不同,GW170817并不是人类首次发现中子星双星合并。比GW170817早了四年,一次标记为GRB130603B的伽玛射线暴被很多天文学家认为是首次发现中子星双星合并。不过对GRB130603B的观测跟GW170817相比是极为薄弱的,对其作为中子星双星合并的性质认定也是相当间接的。相比之下,受到近乎完美的观测链支持的GW170817的性质认定则明确得多,这其中引力波探测不仅通过早期定位为后续观测提供了引导,而且提供了电磁波天文学无法提供的重要信息:双星质量。

针对引力波信号的分析表明,GW170817的引力波源的“啾啾质量”仅为太阳质量的1.2倍,远比以前探测到的任何引力波源都小得多(这一点从此次信号的持续时间比以往任何一次都长得多就能定性地看出——看不出的读者请温习第十五节)。与针对中子星双星合并的数值相对论计算所做的比较给出的进一步结论则是:双星的总质量略小于太阳质量的3倍,双星各自的质量则约为太阳质量的1-2倍。这种质量远小于迄今发现的黑洞双星中的黑洞质量,与已知的中子星质量却符合得很好。这一点,以及在黑洞双星合并中缺席的各种电磁辐射的出现,彻底排除了引力波源是黑洞双星的可能性,与中子星双星的契合度最高。另一方面,LIGO探测到的引力波的最大频率达数百赫兹,从而其中任何一个致密天体都不可能是白矮星。由此得出的有较大把握的结论是:GW170817的背后是中子星双星合并。这一结论不仅适用于GW170817,也有助于人们以较大的把握回溯性地重新确认四年前的伽玛射线暴GRB130603B源自中子星双星合并。这些都是“引力波天文学”的重要贡献。

除对引力波源的性质认定外,科学家们在综合了各类观测——即所谓“多信使观测”——之后,对合并过程终了后的情形也有了一定的认识。比如通过光谱分析,科学家们在双星合并产生的物质喷流中直接证认出了金、铂、铀等重元素,从而为中子星合并是产生恒星内部“反应炉”无法有效合成的重元素的主要机制这一理论猜测提供了很强的直接证据。LIGO主管雷茨在GW170817的新闻发布

会上介绍到这一点时,特意从兜里拿出了一块金表,风趣地表示其中的金子很可能就是中子星合并的产物。对物质喷流的进一步分析还估计出了此次中子星双星合并所产生的重元素数量约为地球质量的16000倍左右,其中仅金和铂这两种被人类视为贵重的金属就有十来个地球那么多。科学家们并且估计出了物质喷流的喷射速度高达每秒数万公里,足可见出双星合并过程之剧烈。

物质喷流只是中子星的“碎片”,中子星双星的主体部分在合并后的结局又是什么呢?对这一问题,目前尚无定论,一种推测是:合并产物是一个质量约为太阳质量2.74倍的延迟坍塌的黑洞。之所以认为合并产物是黑洞,是因为合并产物只有两种可能性,要么是黑洞,要么是高速转动的超大质量中子星,但高速转动的超大质量中子星会产生一系列可辨识的现象,与实际的观测不甚相符,因此黑洞的可能性更大;之所以认为黑洞是延迟坍塌而非立即形成的,则是因为基于后者的模型所预言的物质喷流规模较小,与目前的估计不甚相符。当然,这都只推测,因为无论观测、估计还是模型,在这些方面都还不足以起到确凿的筛选作用。不过有一点可以肯定,此次中子星双星合并的产物假如是黑洞,将是目前已知最小的黑洞之一,假如是中子星,则是目前已知最大的中子星之一。

除提供有关中子星双星合并本身的丰富信息外,GW170817的发现还具有更广泛层面上的重要意义。比如在经过了长达1.3亿光年的跋涉后,引力波与伽玛射线暴的抵达时间只差1.7秒,这给引力波速度与光速的可能差异设置了远比以往苛刻得多的上限。更何况,从物理上讲,双星合并过程中引力波最强的时刻大致是两个中子星相互接触的时刻,伽玛射线暴则被认为是出现在两个中子星相互“挤压”到一定程度,乃至出现物质喷流之后,前者理应略早于后者。而且跟引力波的不受阻隔不同,伽玛射线暴还有可能暂时受阻于双星外围的物质。考虑了这些因素后,引力波与伽玛射线暴的抵达时间只差1.7秒很可能根本就不是问题,广义相对论预言的引力波速度为光速则可被认为是得

到了极强的支持。

如果说,第一次黑洞双星合并的发现揭开了引力波天文学的序幕,那么中子星双星合并的发现则是标志着引力波天文学与电磁波天文学的联手。引力和电磁是目前已知的自然界仅有的两种长程基本相互作用,基于这两种相互作用的天文学的联手,使天文学进入了一个“多信使”的新纪元。从某种意义上讲,得到电磁波天文学的交互验证,也在更确凿的程度上——用LIGO前任主管巴里什的话说——“确立了作为新领域的引力波天文学”。LIGO现任主管雷茨则将引力波天文学与电磁波天文学的联手比喻为由无声电影过渡到有声电影,其中电磁波天文学提供“图像”,引力波天文学提供“声音”。由于这种重大意义,GW170817的发现被《科学》杂志评为了2017年的年度突破奖,并被一语双关地称为了“宇宙交汇”——既是两颗中子星的交汇,也是引力波天文学与电磁波天文学的交汇。

二十四、未来的乐章

GW170817的发现为一周后——即2017年8月25日——落幕的LIGO的“第二次观测运行”划下了漂亮的句号,也让我们的引力波百年漫谈可以愉快地结束。

对于介绍一个方兴未艾的新领域来说,结束之前,照例得展望一下未来。因此最后要提及的,是未来的引力波天文台建设。

如果说昔日LIGO的建设在很多人乃至很多同行眼里是“前途莫测、形同赌博”的风险投资,如同“黑夜打靶”(忘了这些评语的读者请温习第十三节),那么在见证了过去两年的六次成功探测之后,引力波天文学已树立了必要的声望,引力波天文台的建设则已有望在一定程度上加入常规科学基础设施建设的行列。

在图4中,我们可以看到目前已建成、在建及拟建的引力波天文台的位置——黄色为“已建”,绿色为“在建”,橙色为“拟建”。

图中被标记为“已建”的除LIGO和Virgo外,还有一个GEO600,这是位于德国的引力波天文台,开

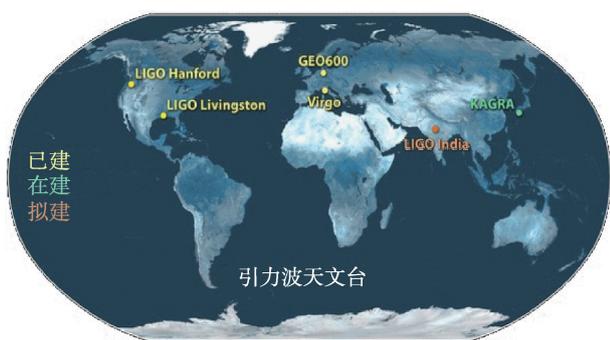


图4 引力波天文台

工建设于1995年,2006年就已基本完工。但GEO600的探测臂长度只有600米,而且激光束只反射一次(作为比较,LIGO的激光束反射次数——如第十四节所介绍的——达280次,探测臂有效长度几乎是GEO600的1000倍),因此灵敏度远逊于LIGO和Virgo,迄今尚无斩获,也因此不曾进入我们的漫谈。不过GEO600对引力波天文学的发展有自己的一份贡献,比如某些光学新技术是首先由GEO600进行研发和尝试,然后才被用于LIGO和Virgo的。

图中标记为“在建”的KAGRA是日本的“神冈引力波探测器”。KAGRA是一座地下引力波天文台(别忘了对引力波来说地球是透明的),这座跟著名的“超级神冈”中微子探测器比邻而居的引力波天文台的探测臂长度跟Virgo相近,约为3000米,预计于2018或2019年完工。

图中标记为“拟建”的LIGO India顾名思义,是印度的LIGO,其拟议中的探测臂长度跟LIGO相近,约为4000米。LIGO India的筹划起步于2009年,但经费迟迟没有落实。不过LIGO的成功看来对LIGO India起到了刺激作用,LIGO探测到引力波的消息正式发布后仅隔六天,2016年2月17日,印度总理就亲自宣布LIGO India已获得“原则上”的批准。LIGO India预计于2024年完工。

上述引力波天文台都是“陆基”的,彼此的规模、探测频率范围及探测能力都很相近。除这类天文台外,欧洲航天局有一个计划,在太空中建一个引力波天文台,称为激光干涉空间天线,简称LI-

SA。LISA将由三颗组成等边三角形、彼此相距250万千米的卫星组成。LISA适合于探测低频——低至毫赫兹(mHz)量级——的引力波。我们在前文中曾经说过,LIGO的探测频率范围跟人耳能听到的声音频率范围有很大的重叠,如果说,这相当于开启了电磁波天文学中的可见光天文学的话,那么LISA的低频探测能力就好比开启了射电天文学。在电磁波天文学的发展史上,每一个新波段的开启,往往都是领域性的突破,也往往意味着新发现,从这个意义上讲,LISA是非常令人期待的。从具体现象上讲,LISA的低频探测能力使它适合于探测星系中心的巨型黑洞吞并恒星时发射的引力波(这已不再属于致密双星合并的范围,因为恒星不致密,星系中心的巨型黑洞则不是“星”——即不是恒星级黑洞)。LISA预计于21世纪30年代投入使用。

当然,蓝图归蓝图,从现实的角度讲,所有在建和拟建的工程都会受到各种因素影响,从而在真正完工之前谁也说不准是否会半途而废。不过另一方面,像引力波天文学这样方兴未艾的新领域应该有足够强烈而持久的魅力,吸引有志于科技发展的国家或组织参与。任何个别工程的上马和下马也许会有偶然性,对整个领域的发展却是有理由乐观的。有幸处在引力波天文学的发展初期,是年轻读者们的幸运——他们中的某些人,也许会成为未来引力波天文学的主力军。

这个系列到这里就正式结束了。人类探索引力波的百年征程,折射出一个小小蓝色星球上的智慧生物对广袤宇宙的无尽探索。回望这一切,不能不让我们在感慨宇宙浩瀚和人类渺小的同时,为人类的探索精神感到自豪。电磁波天文学在伽利略以来的四百年间已取得无数进展,新兴的引力波天文学将带来的未来的乐章会是什么样的呢?让我们拭目以待。

最后,我愿用一句动人——虽不免也有些老套——的歌词来形容引力波天文学的未来,那就是——明天会更好!

(完)