

时空的乐章——引力波 百年漫谈(十)

卢昌海

二十、GW150914——黑洞双星合并的发现

随着针对致密双星合并的理论计算——尤其是关于合并末期的数值相对论计算——的积累,因LIGO而摆在理论物理学家面前的三个理论问题就算全部有了答案。在此期间,名为“高级LIGO”的升级工程也顺利推进着,LIGO对引力波的探测逐渐接近了“万事俱备”的状态。

2014年3月,“高级LIGO”的设备安装大功告成,开始转入漫长而细致的测试、微调和校准阶段。在这一阶段,LIGO间或地处于被称为“工程运行”的非正式运行状态。

经过一年半的努力,到了2015年9月初,LIGO的灵敏度已达预期。按原计划,测试、微调和校准应于此时结束,LIGO将转入被称为“观测运行”的正式运行阶段。然而精益求精的工程人员发现若干附属系统尚有一些小问题要处理,某些测试也尚需一小段时间才能完成。这种小延误对几乎所有大工程都是不鲜见的,于是,在经过一番讨论后,LIGO的“观测运行”起始日期被顺延了一小段时间。

2015年9月14日,原本该处于“观测运行”阶段的LIGO因起始日期的顺延,依然处于所谓的“第八轮工程运行”之中。

没有人意识到,这一天将被载入史册。

这一天的协调世界时(Coordinated Universal Time,简称UTC,是格林尼治标准时间的“现代版”)上午10时56分,LIGO成员之一的意大利博士后德

拉戈(M.Drago)在LIGO的内部邮件系统中发了一封电子邮件,报告了一个“非常有趣的事件”。邮件的内容是:

“在过去的一小时内cWB在GraceDB中存入了一个非常有趣的事件。……………”

经快速研究,我们意识到这未被标注为硬件注入。有人能确认这不是硬件注入吗?”

这封后来变得颇为出名的邮件里提到的“GraceDB”是“引力波候选数据库”(Gravitational Wave Candidate Database)的缩写,该数据库存储的是LIGO探测到的数据之中按各种分析手段筛选出来的可能有价值——即有“候选”价值——的信号。那些信号是通过若干信息传输通道存入的,每个信息传输通道对应于一定的分析手段。邮件里提到的“cWB”便是其中一个信息传输通道的名称缩写。

德拉戈提到的“非常有趣的事件”出现在大约一小时之前——确切地说是协调世界时2015年9月14日上午的9时50分45秒。那一时刻附近,LIGO的两个观测台——利文斯顿观测台和汉福德观测台——在相隔约7毫秒的时间内先后记录下了一组信号。

那两组信号抵达时,分别是利文斯顿观测台的清晨4时50分45秒和汉福德观测台的凌晨2时50分45秒,两个观测台的科学家们除个别值班者外,大都还在睡眠状态。两个观测台的声音警示器——也许是尚未进入“观测运行”之故——当时亦未开启,因此连值班者也并未留意到信号的出现。

但LIGO的自动程序忠实执行着自己的职责。几秒钟后,这两组信号经由“cWB”这一信息传输通道存入了引力波候选数据库。

那么,德拉戈又是如何留意到这两组连值班者也未留意的信号呢?

德拉戈当时其实既不在利文斯顿观测台也不在汉福德观测台,甚至根本不在美国,而是在欧洲。但信息时代的“大科学”项目早已跨越了地域界限,LIGO更是自巴里什对组织架构作出调整(参阅第十三节)之后就成了跨地域科学项目的典范。德拉戈人虽在万里之外,却编了一个小程序“监视”着引力波候选数据库,随时向自己“汇报”可疑事件。因此那两组信号一进入引力波候选数据库,他几乎立即收到了来自自己程序的邮件提醒。而且这时他的不在美国反而成了优势,因为收到邮件提醒时,正是他的中午时分,而不像利文斯顿观测台和汉福德观测台的科学家那样处于睡眠状态。

不过这种邮件提醒德拉戈几乎每天都会收到,本身并不稀奇,而且以往那些都在初步核验之后就被排除了。但这次的信号有所不同,不仅非常鲜明,而且经受住了初步核验,因此他在内部邮件系统中报告了这一事件。

但这一事件的复杂性在于事件发生在“工程运行”而非“观测运行”期间。这两者的一个重大差别在于:“工程运行”期间探测到的信号有可能不是真实信号,而是工程人员出于测试目的为注入的虚假信号——即德拉戈邮件里提到的“硬件注入”,因此德拉戈要在邮件中询问“有人能确认这不是硬件注入吗”。

硬件注入很快就被排除了,9月16日,LIGO高层经过排查,在内部邮件中确认了这一事件并非硬件注入。而LIGO的高度复杂性足以排除个别成员对数据进行秘密“恶搞”的可能性。

排除了硬件注入及秘密“恶搞”的可能性,事件的性质就变得引人注目了。

更重要的是,这一事件所涉及的信号不仅非常鲜明,还被两个观测台同时探测到;信号的波形则

不仅在两个观测台之间有很好的吻合,还跟理论计算定性相符,这一切都非同小可。毫无疑问,这样的事件需要一个专门的标识。按照LIGO的标识规则,它被标记为了GW150914——读者不难猜到,“GW”是“引力波”的英文缩写,“150914”则是事件被记录的日期。为行文简洁起见,在下文中,GW150914(以及诸如此类的标识)除用来标识事件外,还将被用于指代事件中探测到的信号。

虽然对事件的标识明确了引力波(“GW”)这一定性,但有韦伯的前车之鉴,LIGO对GW150914的处理采取了极为谨慎的态度,在9月16日的内部邮件中要求所有成员对GW150914严格保密。9月21日,另一封内部邮件重申了保密要求。LIGO并且向成员提供了一份应对外界询问的标准答案,在不撒谎的前提下,最大限度地利用语言的模棱两可等手段进行规避。

不过LIGO是一个成员上千的大群体,在现代社会,要想严守一个足够多人知道的秘密几乎是不可能的。9月25日,距离LIGO要求成员保密的第二封内部邮件仅隔4天,美国亚利桑那州立大学的物理学家克劳斯(L.M.Krauss)就在推特上发布了一条短讯,表示听到了LIGO探测到引力波的传闻。不过LIGO的保密工作也并非毫无成效,克劳斯虽听到了传闻,却无法确认其可靠性,只表示若传闻属实会发布进一步消息。

LIGO之所以要对GW150914严格保密,一方面是怕轻率发布消息——尤其是倘若消息最终被证实为错误——会损及LIGO乃至科学界的声誉;另一方面,也确实有许多幕后工作要做。我们在第十七节中曾经提到,LIGO相对于“韦伯棒”的一个有着本质意义的优越之处,是LIGO能对信号的具体形式进行检验。因此,LIGO科学家们必不可少的一项幕后工作就是对探测到的信号波形进行复核与分析,并且与引力波“模型库”里的波形进行对比,以进一步判断信号的可信度。

此外,LIGO内部对GW150914还有一种基于概率的疑虑。这种疑虑是这样的:LIGO是从2015

年9月初才展开高灵敏度探测的,却居然在9月14日就快速探测到了第一次信号,似乎过于巧合。与许多其他领域巴不得出现合乎心意的巧合,甚至爱拿巧合做文章不同,科学家对巧合是颇怀戒心的,因为人最容易在合乎心意的巧合面前丧失客观、陷于轻信。因此,许多LIGO科学家在对信号展开复核与分析的同时,也愿意利用这种必要的迟滞,来等待别的信号——因为从概率的角度讲,信号的探测频率越高,快速探测到第一次信号就越远离巧合,从而也越可信;反之,若迟迟探测不到别的信号,则快速探测到第一次信号就越显得巧合,从而也越可疑。这种基于概率的疑虑在一定程度上也体现了科学观测必须能重复的思想,虽然引力波探测并非简单意义上的可重复探测。

幸运的是,在接下来的几个月里,LIGO在若干方面同时取得了成果。首先是探测到的信号与引力波“模型库”里黑洞双星合并的波形比对得出了很正面的结果。这可以从图1中看出:图中(a),(b)两幅小图分别是汉福德观测台和利文斯顿观测台探测到的信号波形,其中的光滑曲线是与之匹配的

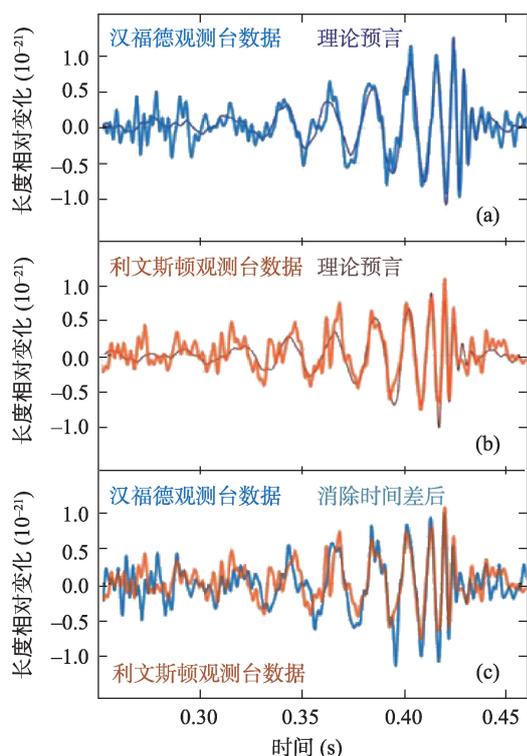


图1 GW150914的波形图

“模型库”里的黑洞双星合并波形——也就是广义相对论的预言;(c)则是消除了引力波抵达两个观测台的7毫秒左右的时间差之后,两个观测台探测到的信号波形的对比。这些图虽噪音明显可见,但同样明显可见的是:信号——尤其是合并末期的信号——远高于噪音,足以很好地显示出两个观测台探测到的信号波形相互匹配,以及跟广义相对论预言的明显吻合。具体的概率分析也显示出观测到的信号是引力波信号的可信度极高,出自巧合的概率小于千万分之二(2×10^{-7}),或者用“行话”来说,对应于 5.1σ (σ 为标准差)。因此,单凭这一条,就可以很有信心地得出结论:GW150914是引力波信号。

另一方面的成果是:同年的12月26日,协调世界日凌晨3时38分53秒,LIGO又探测到了一组较强的信号,被标记为GW151226。这组锦上添花的新信号的出现基本消除了基于概率的疑虑。

随着分析的深入和疑虑的消除,LIGO科学家们的论文也在反复修订中逐渐成形,在这期间,保密工作未再出现明显漏洞,克劳斯的传闻像缺了燃料的火苗,渐渐熄灭了。时间悄然进入了一个新的年头,LIGO科学家们的论文即将完成。

但就在这时,2016年1月11日,消息灵通的克劳斯卷土重来,再次在推特上发布短讯,称先前听到的传闻已得到独立渠道的证实,引力波确实已被发现。英国的《卫报》、《自然》杂志的网站、美国的《天空和望远镜》杂志等也都作了报道。不过LIGO仍不予证实,只宣称正在分析数据。

一个多星期之后,2016年1月21日,著名期刊《物理评论快报》收到了来自LIGO的题为“来自黑洞双星合并的引力波观测”(Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger)的论文。《物理评论快报》不仅是顶尖的物理期刊,而且在保密方面相当配合LIGO,据说LIGO的论文在编辑部内被冠以“大论文”的别称,以避免无意中被人听去(不过这恐怕是幽默意味多于保密——真要保密的话,“小论文”或许是比“大论文”更不引人注目的别称)。

1月31日,LIGO的论文经过同行评议被《物理评论快报》正式接受。从最早的版本算起,此时的论文已是第12次修订版。

2月8日,LIGO正式宣布将在2月11日美国东部时间上午10时30分召开新闻发布会。

2月11日,LIGO的论文正式刊出,新闻发布会也如期召开。这便是我们在本系列开篇介绍过的新闻事件,那一天成了科学界为数不多特别吸引公众眼球的日子。LIGO探测到引力波的消息所激起的广泛兴趣,不仅——如我们在本系列开篇所说的——一度使LIGO网站因访客过多而瘫痪,甚至还殃及了并非以普通大众为服务对象的《物理评论快报》网站,使后者不得不紧急添加服务器。后来的统计显示,新闻发布会当天,LIGO那篇纯学术性的论文被下载了25万次之多。

LIGO那篇论文有大约一千名作者,分布在十几个国家的几十所大学或研究院,截至当时为止,是有史以来作者最多的论文之一。而且对那些作者中的大多数来说,那篇论文也许将是他们一生最重要的论文。一篇论文标志着近千人的学术顶峰,也许是史无前例的。

LIGO探测到引力波的消息正式发布时,二十多年前离开LIGO的早期技术功臣德雷弗已重病在床(忘记了德雷弗的读者请温习第十三节),由他的亲友将消息带给了他。据说看见波形曲线一刹那,德雷弗的眼睛闪了一下。这一刻距离德雷弗的去世只剩一年多的时间,但科学界没有忘记他,他密集地获得了来自五个国家的六个科学奖——其中包括来自中国的邵逸夫奖。

距离爱因斯坦提出广义相对论相隔整整一百年,引力波终于被直接探测到了,这位20世纪最伟大的物理学家的最伟大理论再次得到了验证——而且在很大程度上是对该理论最后一类主要预言的直接验证,也让爱因斯坦本人再次成为了热点。在这之后不久,美国物理学家格林(B. Greene)在一次电视访谈中被问及:隔了这么久还能再次成为热点,是否意味着爱因斯坦比我们曾经以为的还要

“聪明”?格林幽默地表示:爱因斯坦就像无穷大,说他比我们曾经以为的还要“聪明”好比是说比北极点还要北。确实,物理学家们对爱因斯坦的敬意是怎么估计都不过分的——但这绝非盲从,因为若哪个确凿实验能推翻爱因斯坦的某个预言,物理学家们不仅不会沮丧,反而会雀跃,并兴奋地投入新的探索。

除直接探测引力波这一重大成就外,LIGO的这次探测——如下节将会展开说明的——还在几个其他方面推进了人类对物理世界的了解:比如它首次确认了黑洞双星的存在,并且在很大程度上也是首次确认了恒星级黑洞的质量可以超过太阳质量的25倍(此前很多天文学家认为恒星级黑洞的质量上限为太阳质量的25倍)。从某种意义上讲,此次探测还可视为是对黑洞本身的首次直接观测——因为此前有关黑洞的观测证据全都来自黑洞周围的物质,此次探测的引力波却是直接来自黑洞双星,按照光学观测被视为直接观测的传统,引力波探测毫无疑问也是直接观测。

所有这些共同揭开了与电磁波天文学相平行的引力波天文学的序幕——一个崭新时代的序幕。

二十一、比全部星星更“亮”的“黑暗”

讲完了发现故事,接下来我们简略地分析一下GW150914——这同时也是对LIGO分析模式的简略介绍。

通过细致研究GW150914的引力波波形,科学家们提取出了有关引力波频率的许多信息。其中一条是:引力波的频率大体是在 $\tau \approx 0.2$ 秒左右的时间内,从频率 $f_1 \approx 35$ 赫兹增加到了 $f_2 \approx 150$ 赫兹(从上节所附的波形图中可约略看出)。将这一信息代入第十五节的(15.6)式便可得到黑洞双星的“啁啾质量” M 约为太阳质量的27倍,即 $M \approx 27$ 。

不过,“啁啾质量”——按照第十五节的(15.2)式——乃是两个黑洞各自质量的组合,知道了“啁啾质量”并不意味着知道两个黑洞的各自质量。但

即便如此,知道“啁啾质量”依然是大有收获的,因为只要用一点中学数学,我们就能从“啁啾质量”中得出对两个黑洞总质量的简单估计:

$$27 \approx \mathcal{M} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5} \leq [(m_1 + m_2) / 2]^{6/5} / (m_1 + m_2)^{1/5} \\ = (1/2)^{6/5} (m_1 + m_2) \quad (21.1)$$

(21.1)式中间的不等式想必读者都不陌生,乃是中学数学里的算术与几何平均不等式,它表明两个非负实数 m_1 和 m_2 的几何平均 $(m_1 m_2)^{1/2}$ 不大于算术平均 $(m_1 + m_2) / 2$ 。

(21.1)式意味着GW150914背后的黑洞双星的总质量下限为 $27 \times 2^{6/5} \approx 62$,即太阳质量的62倍左右。这比中子星的质量上限大得多,故而应该是黑洞双星。

但细心的读者也许会挑刺说,总质量下限为太阳质量的62倍只能说明双星之中起码有一个是黑洞,却并不能推出两者都是黑洞。GW150914的背后有没有可能是中子星-黑洞双星呢?

这是一根非常好的“刺”,为拔掉这根“刺”,我们需要再用一点中学数学。我们知道,算术与几何平均不等式有一个小特点,那就是等号只在两个非负实数相等时才成立的,否则算术平均就会大于几何平均,两个非负实数若是相差悬殊,算术平均甚至会显著大于几何平均。由于这一特点,GW150914的背后如果是两个质量相近的黑洞,两者的总质量就会接近太阳质量的62倍这一下限;反之,则两者的总质量就会大于甚至远远大于下限。中子星-黑洞双星乃是后一种情形,因此GW150914的背后如果是中子星-黑洞双星,那么中子星的质量哪怕尽可能往黑洞方向靠——即达到太阳质量的3倍左右这一上限,黑洞的质量也绝不会只是总质量下限减去中子星质量——即太阳质量的 $62 - 3 = 59$ 倍左右,而是会大得多。事实上,简单的计算表明,这种情形下的黑洞质量将高达太阳质量的700倍以上——读者可将 $m_1 \sim 3$ 和 $m_2 \sim 700$ 代入“啁啾质量” \mathcal{M} 的定义,验证一下这样组合出来的“啁啾质量”约为太阳质量的27倍。如果中子星的质量比太阳质量的3倍更小,黑洞的质量还将更大。

因此,GW150914的背后如果是中子星-黑洞双星,黑洞的质量将会在太阳质量的700倍以上。那么,GW150914的背后有没有可能存在那样的黑洞呢?答案是否定的。因为从对引力波波形的细致研究中,科学家们提取出的另一条有关引力波频率的信息是:引力波的最高频率约为190赫兹。读者也许还记得,我们通过第十五节的(15.1)式给出过,引力波的频率——确切说是主频率——是双星轨道绕转频率的两倍。因此190赫兹的引力波频率对应于95赫兹的轨道绕转频率。另一方面,质量为太阳质量700倍以上的黑洞的视界周长在13,000公里以上,哪怕以光速绕转也达不到95赫兹的绕转频率。因此GW150914的背后不可能是中子星-黑洞双星,而只能是黑洞双星。

除这条能一锤定音的理由外,还有一条辅助理由也值得一提。我们在第十九节中提到过,中子星-黑洞双星的合并会伴以伽玛射线暴一类的引力波以外的辐射,然而在GW150914发生时,并无常规天文台观测到来自同一天区的足够显著的异常,这虽不构成很强的理由,起码也跟黑洞双星的合并更相容。

因此,GW150914的背后是黑洞双星合并。也因此,人类对引力波的首次直接探测同时也是对常规天文学无法观测的全新天文现象——黑洞双星合并——的首次观测和首次确认。从这个意义上讲,引力波天文学是在常规天文学看不见的“黑暗”里“闪亮登场”的。

这常规天文学看不见的“黑暗”究竟是一种怎样的“黑暗”呢?我们再作一些补充介绍。

我们前面提到过,科学家们对黑洞双星合并已做过大量理论研究,研究结果构成一个引力波“模型库”。这一“模型库”除了能定性确认GW150914是引力波信号外,还可给出更强的推论——因为通过将探测到的信号与“模型库”里的引力波波形相比对,我们可以推算出与观测结果最匹配的黑洞双星的具体参数。推算的结果是:两个黑洞的质量分别约为太阳质量的36倍和29倍——因而是首次确

认了恒星级黑洞的质量可以超过太阳质量的25倍。此外,我们还可推算出合并终了所形成的克尔黑洞的参数。推算的结果是:克尔黑洞的质量约为太阳质量的62倍,角动量约为最大可能值的68%。

细心的读者也许注意到了黑洞双星的初始总质量(即太阳质量的 $36+29=65$ 倍)大于合并终了所形成的克尔黑洞的质量(即太阳质量的62倍),两者大约相差了3个太阳质量。这3个太阳质量哪里去了呢?读者应该能猜到,是以引力波的形式辐射出去了。由于我们在第十八节中介绍过,这部分能量的70%(即约为太阳质量的两倍)是在极为短暂的“死亡终曲”阶段——尤其是“合并”阶段——辐射出去的,而从GW151226的波形图中可以看到,该阶段的历时只有零点零几秒。这意味着GW151226背后的黑洞双星合并末期的引力波辐射功率可以达到每秒上百个太阳质量的量级。LIGO科学家们的分析证实了这一判断。具体地说,分析显示的引力波辐射的峰值功率达到了每秒200个太阳质量或相当于 3.6×10^{49} 瓦。

我们在第六节中提到过,每秒辐射掉一个太阳质量或 10^{47} 瓦的引力波辐射功率就已经可以跟可观测宇宙中所有星星辐射功率的总和相提并论,因此,GW150914背后的引力波辐射的峰值功率比可观测宇宙中所有星星辐射功率的总和还要高出两个数量级。如果说我们在第六节中只是从理论上推测出强引力场天体的引力波辐射功率可以超过可观测宇宙中所有星星辐射功率的总和,那么现在我们是通过实际探测到的引力波验证了这一判断。

当然,对我们这种无法“看”到引力波的生物来说,黑洞双星的合并是完全黑暗的。但假如宇宙的某个角落存在某种能像我们“看”到特定波段的电磁波那样看到引力波的生物,那么对他们来说,这种比全部星星更“亮”的“黑暗”将是宇宙中最耀眼的事件。

知道了黑洞双星的具体参数,我们还可推算出它离我们的距离。这是因为,知道了黑洞双星的具体参数,就可以如上面分析的那样知道引力波的辐射功率,将之与实际探测到的引力波信号的强度相对比,便可推算出引力波源——即黑洞双星——与我们的距离(因为引力波源与我们的距离直接影响到我们探测到的引力波信号的强度)。推算的结果是:GW150914背后的黑洞双星离我们约有440Mpc(约合14亿光年)。

此外,由于有利文斯顿和汉福德两个观测台,我们还可推算出引力波源的大致方位——就像用两只耳朵可以判断出声音方位一样。推算的结果是:GW150914背后的黑洞双星在大麦哲伦星云方向——由于大麦哲伦星云在赤纬较高的南半球星空里,因而纬度偏南的利文斯顿观测台比纬度偏北的汉福德观测台早了7毫秒探测到引力波。

由于黑洞双星离我们如此遥远,因此我们探测到的黑洞双星合并其实早在十几亿年前就已发生。那时地球上的生物还处于细胞层次。在引力波扫过浩瀚空间的十几亿年的时间里,地球上的生物往着越来越复杂的方向进化着,并终于进化成了被称为“人”的智慧生物。当引力波扫过大麦哲伦星云时,地球上的人刚刚披上很原始的“衣服”;当引力波离地球还剩100光年时,地球上一位名叫爱因斯坦的人刚刚预言了引力波的存在;当引力波离地球还剩50光年时,爱因斯坦的追随者们刚刚开始尝试引力波的探测;当引力波离地球还剩20光年时,LIGO的两个观测台刚刚开始建设;当引力波离地球只剩几“光日”时,LIGO刚刚展开高灵敏度的引力波探测……最终,当引力波经过十几亿年的漫长时光,完成了十几亿光年的漫长跋涉抵达地球时,恰好被LIGO探测到。

这也许是对人类首次探测到引力波的最戏剧性——并且也最浪漫——的表述。