

一种新的宇宙信使*

邹振隆[†] 译

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

激光干涉仪引力波天文台(LIGO)和室女座引力波探测器(Virgo)最近对两颗并合中子星的引力波进行了第一次观测,连同来自全球多台望远镜和空间卫星的数据,开启了多信使天文学的新纪元。Imre Bartos描述了这个划时代的时刻,这是数十年研究的辉煌成果,也将塑造观测天文学的未来。

再过一周,高新LIGO和Virgo探测器就要完成观测运行,即将关闭一年。我们团队许多同事实际上已经休假,而我正在等待亲戚来访。这时手机铃声响起,一条写着“GWHEN 警报|新事件:G298048|请核对你的电邮!”的短信,促使我奔向电脑,去查看LIGO数据库中的信号。随着合作者一系列激动的电话接踵而至,一个历史性的时刻显然正在到来。我们观测天文学家需要迅速行动,由于这一发现在那时仍然是个秘密,我

甚至不能给在兴奋中到达的亲戚解释,为什么我还得继续工作。

2017年8月17日,路易斯安那州和华盛顿州的LIGO探测器探测到了两颗中子星碰撞产生的引力波,这些超致密的死亡恒星与我们的太阳一样重,但直径只有20 km,大约相当于曼哈顿的大小。几十年来人们一直预期这样的事件,但直到现在才被观察到。在引力波到达LIGO后约两秒钟内,美国宇航局的费米伽马射线太空望远镜探测到了一次短时标伽马射线暴。它更加清楚地告诉我们:这次引力波检测(被称为GW170817)并不是一场虚惊。全球各地的观测设备都需要迅速转到碰撞的方向,否则数据将永远丢失。全球

2018-01-18收到

[†] email: zzl@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20180201

* 本文编译自 Imre Bartos. *Physics World*, 2018, (1): 23.



图1 2017年8月17日LIGO探测到一次来自中子星碰撞的引力波。在12小时内,多个天文台在星系NGC4993中证认出事件GW170817的源(显示于这张哈勃空间望远镜图像内),确定了相关辐射,即“千新星”的位置。哈勃观测到闪光在6天中变暗(见嵌入图中8月22、26、28日拍摄的像)

70多台望远镜和太空中的天文卫星迅速得到通知,以便能够对这次合并及其余辉进行涉及全部电磁波谱(伽马射线、X射线、光波、射电波)和中微子的联测。多信使天文学时代已经开启(图1)。

1 混合信息

直到20世纪初,天文学家只是依靠光来了解宇宙。但自射电天文学在1930年代兴起以来,天文学家扩大了我们对宇宙视野,现在可以通过整个电磁波谱,及其他“宇宙信使”如宇宙线、中微子和最近的引力波来观察宇宙了。多信使天文学的目标,是结合所有这些宇宙信使带来的信息,尽可能多地了解遥远太空发生的现象。一般来说,每种信使都会提供关于源(可以是一颗恒星、类星体或星系等)的补充信息。所以多种信使能提供更全面的了解。

除了我们的太阳,通过多个信使观测到的第一个宇宙现象是1987年的一次超新星爆炸。这一事件名为“超新星1987A”,发生在我们的宇宙后院——约17万光年远的大麦哲伦云。这次爆炸

亮得肉眼都能看见。除可见光外,在日本、俄罗斯、美国和欧洲的4次不同的实验,探测来自产生超新星的死亡恒星坍缩核的25个中微子。

涉及引力波的多信使搜索始于本世纪初,当时美国的两个LIGO观测站开始运行。到2010年,全球天文学界已经形成了一个包括光学望远镜、射电天文台、伽马射线和X射线卫星,以及中微子探测器的广泛网络,以寻找来自引力波源的发射。但是第一次明确的发现,我们不得不等到2017年。

2 大质量双星

中子星是在非常重的恒星灾难性坍缩的过程中诞生的。恒星中的物质经历核聚变,产生各种元素,其中最重的元素是铁,铁沉到中央形成铁芯。这个核心最终会变得非常重,以至在自身重量下坍缩,当原子的电斥力不能再克服核心的引力时,就会发生这种情况。一旦核心的密度达到原子核的密度,核力就会阻止坍缩。最终的结果是非常紧凑,但和太阳一样重的恒星。它本质上是一个主要由中子组成的巨大原子核,因此被命名为中子星。坍缩的恒星的终局往往会产生一颗超新星。

中子星碰撞一直是引力波探测的主要目标之一。首先,它们的体积小,质量大,使其成为非常好的引力波源。其次,基于银河系伽马射线暴和双中子星的观测,科学家已经怀疑这类碰撞会经常发生。有时,两颗中子星配对形成一个由引力束缚的双星,其轨道彼此密切接近。事实上,宇宙中的多数大恒星都是成双诞生的。当双星中的成员坍缩并以超新星的形式爆发时,会各自留下一颗中子星,成为一个双中子星系统。或者,独立形成的中子星可以遇到其他的机会成为引力束缚。后一种情况可能发生在中子星密度大的地方,例如星系中心。

这些束缚的致密星可能会围绕彼此运行数十亿年,但随着时间的推移,由于引力波的发射,绕行轨道会慢慢缩小。这个过程随轨道缩小而加速——就在中子星并合之前,它们以与光速相当的速度,每秒相互绕转大约一千次。就在它们跳

完最后一支舞曲坠入彼此核心前几分钟，产生了强烈的、可由LIGO和意大利的Virgo检测到的引力波信号。当中子星最终并合时，它们形成一个更重、旋转更快的中子星。这个新天体通常都太重，以至于核力和其他任何力均无法支撑它的重量，很快就会进一步坍缩。最终的结果很可能是黑洞。

大多数来自中子星的物质形成了黑洞，但其中一些物质在并合过程中散失，这些物质在中央黑洞周围形成一个土星环似的吸积盘，并慢慢被黑洞消耗掉。的确，当物质被吸入黑洞时，会射出高能粒子喷流，将一些物质向外推，并产生伽马射线暴。当喷流穿过星际气体时，它会减速并产生余辉辐射——首先是X射线，然后是可见光，最后是射电波。

黑洞周围的散射物质还会产生其他更奇异的辐射形式。在并合过程中被撕裂的中子星物质是富中子的重核，它们有利于形成重元素。其中一些元素具有放射性，它们的衰变将产生大量的辐射。这种被称为“千新星”的放射性发射，是从中子星并合观测到的紫外线、可见光和红外辐射的主要来源。

3 多信使的发现

通过引力波和整个电磁波谱来观察双中子星的并合，是一个持续数周的过程，事实上，仍然是一个正在进行的宇宙事件。在第一次探测报告之后，世界各地出现了大量的新闻，为这一新兴现象提供了引人入胜的实时照片。观测信息在参与这项研究的数千名科学家之间分享，合作的天文台站有近100个，其中一台探测器或望远镜收集的数据帮助另一个指向正确的天区。有多达200个电子通知分发了有关这次探测的某种信息(图2)。

到目前为止，我们已经观察到了中子星并合后产生的引力波、伽马射线、X射线、紫外线、光学、红外和射电发射及其后果。但同样有趣的是，我们没有观察到能量在十亿电子伏以上的高能光子和中微子。这种未检测到的信息提供了碰撞之后发生的事情，如中子星留下来的遗骸如何

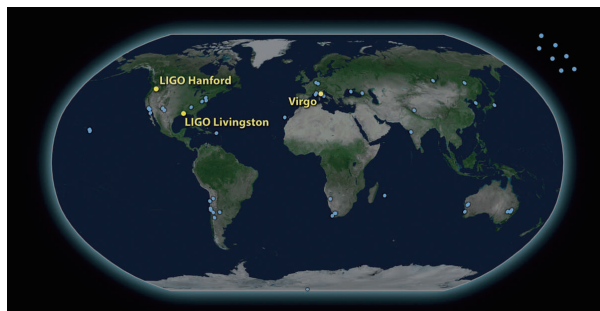


图2 地球上和太空中的70多个天文台研究了中子星碰撞事件GW170817。

- 60秒 来自旋近中子星的引力波开始出现在LIGO和Virgo数据中，可见光尚未看到。
- 0秒 两颗中子星并合。
- 2秒 费米卫星发现一次伽马射线暴。
- 14秒 费米卫星自动地送出检测信息。
- 6分钟 LIGO和Virgo软件识别出一个信号。
- 40分钟 天文界获得检测到引力波的通知。
- 1小时 来自冰立方观测站的首批结果加入，但并没有看到中微子。
- 5小时 结合LIGO和Virgo的引力波数据绘出源的准确方位图。
- 11小时 斯沃普望远镜报道了首个光学检测，也辨认出寄主星系。1小时以内，5个其他天文台独立拍到该事件的光学像。
- 15小时 雨燕伽马射线暴探测器检测出明亮的紫外辐射。
- 17小时 6.5米麦哲伦望远镜首次测量了事件的光谱。
- 9天 钱德拉X射线天文台报道了来自该事件的X射线观测。
- 15天 甚大阵天文台检测到射电辐射。

充当高能粒子加速器。科学家希望花几年时间在碰撞现场继续检测遗骸留下的射电波，所以这个故事还远没有结束。

4 我们学到了什么？

碰撞的中子星距离地球只有1.3亿光年，比我们以前对这类事件的预期要近得多。这样近的距离意味着我们可以更持久地观察辐射，更详细地展示丰富的信息源。科学家们仍在分析大量的观测数据，但一些关键的发现已经很清楚了。

中子星并合可能是宇宙中重元素的主要来源。比铁重的元素，如金和铂，只能在富含中子的等离子体中形成。最新的观测表明，中子星并合是产生大部分最重元素的合适场所。很长一段时间以来，科学家们怀疑超新星是关键的来源，但现在看来这似乎不太可能。

中子星并合可以用来测量宇宙的膨胀。如果

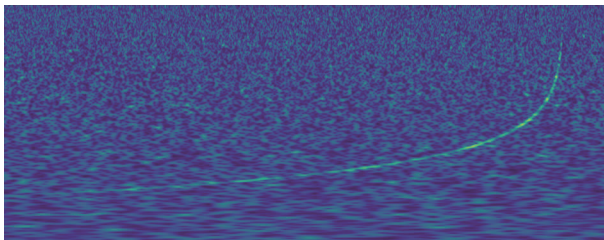


图3 中子啁啾。结合来自两台LIGO探测器信号的频谱，显示出恒星旋近时特征的啁啾信号。随着中子星彼此靠近，转动更快，它们会产生较高频率的引力波，由向上翘的绿线表示

我们知道碰撞有多远，红移有多大，就可以用来测量宇宙膨胀的速度。距离可利用引力波信号测量，红移可通过恒星所在星系的电磁波谱测量。得到的距离—红移关系描述了宇宙膨胀的速度。目前有另外两种测量膨胀的方法：一种是用超新星爆发，而另一种是观测宇宙背景辐射。用这两种方法计算的膨胀率目前不一致，我们不知道何以如此。未来是否能用引力波信号对此进行仲裁，会是令人激动的事情。

中子星的质量有了一个新的上限。我们知道，中子星不能任意大。在某一点，引力强到使整个中子星无法保持平衡，然后就会塌缩成黑洞。然而，目前还不清楚在这种情况下发生之前，中子星恰好能够有多重。之前，科学家们认为该上限是大约2.8倍太阳质量。但是，根据对碰撞及其余辉的观察，以及复杂的数值模拟，我们现在可以说，非旋转中子星的最大质量可能不超过太阳质量的2.2倍。这一限制更有意义，因为它接近迄今探测到的最重中子星的质量。

GW170817里的中子星在碰撞前彼此绕行了数十亿年。发生碰撞的寄主星系NGC4993并没有恒星形成的迹象。这意味着坍缩并产生中子星的恒星，据估计在数十亿年之前就已经诞生了。非常大的恒星寿命短、死得早，而像我们太阳这样的小恒星寿命则很长。

碰撞的中子星产生了伽马射线暴。几十年来科学家们预计，我们观察到的短时标伽马射线暴中至少有一部分是由两颗中子星碰撞产生的。但这是首次明确地建立起这样的联系。

高能喷流有点奇怪。我们从这次并合中观察到的伽马射线暴，与以前的探测相比明显较弱，

但为什么会如此仍是个谜。还有，我们不知道为什么在观察到任何X射线和射电辐射之前有很长的延迟，而通常在伽马射线爆发之后很快就可检测到它们。同样有趣的是，从这样近的事件中没有观测到高能光子或中微子。高能喷流有可能并未指向地球，这样我们只能从“侧面”看它。或者喷流需要穿过并合遗迹周围的残骸。最后结论还有待分晓。

5 再好两倍

LIGO和Virgo要停运大约一年，在此期间将进行彻底的升级，使它们在下一阶段的观测中更加灵敏。这种新的灵敏度最终可能使探测到中子星和黑洞并合的速率达到过去观测期的两倍，带来许多令人兴奋的发现。即便在灵敏度有限的情况下，我们已观察到一次中子星碰撞，当LIGO的灵敏度进一步提高时，可以预期这样的碰撞会观察到更多。

引人注目的是，预期的速率与我们以前从其他观测中预期的速率一致，例如伽马射线暴(其源未知)的速率，或仅仅观察银河系中的双中子星系统(并合之前很久)的速率。一旦LIGO和Virgo被升级且敏感两倍，这些探测器就应该能够在目前距离的两倍处观察碰撞，相当于我们可以检测到并合的宇宙体积扩大约10倍。这意味着可能每个月都可看到中子星碰撞。

大量的检测意味着更多的乐趣，但我们也应该更好地探讨目前围绕中子星的奥秘。更多的检测也意味着我们希望能看到一些不那么常见的事件，比如一颗中子星和一个黑洞并合在一起，这可能为宇宙中的极端现象提供有用的洞见。

发现来自两个中子星碰撞的引力波及其电磁波对应体探测，是一个具有历史意义的科学契机。它结束了几十年来的探索，可视为多信使天文学的发端。幸运的是，接下来的几年越来越多的发现，将扩展我们对最极端宇宙事件和宇宙演化的认知，允许我们探索在地球上难以检验的基本物理学假设。这将是一个伟大的旅程，随着数据共享的进步，任何人都可以近观壮丽的宇宙碰撞。