

GW170817: 双中子星旋近并合的引力波观测

阅读科学总结 [PDF版本]:

2017年8月17日，UTC时间12:41:04（北京时间晚上20:41:04），LIGO-Virgo引力波探测器网络捕获了一个来自两个致密恒星遗迹（“中子星”）旋近的引力波信号。这一事件发生在LIGO-Virgo首次联合探测到双黑洞并合（GW170814）之后仅仅三天（参见[GW170814科学总结](#)）。

引力波天文学家们一直期望着双中子星并合的引力波信号，这是因为中子星在宇宙中很常见并且双中子星系统在使用射电望远镜之前就已经被探测到。最著名的例子就是1974年被发现的赫尔斯-泰勒（Hulse-Taylor）脉冲双星。射电天文学家们到目前为止已经绘制了40年它的轨道曲线，显示着这两颗星体正慢慢互相旋近。在大约3亿年后，赫尔斯-泰勒脉冲双星将会并合，并产生一个类似于LIGO刚刚观测到的GW170817那样的信号。

探测器网络当时正处在第二次观测运行（被称为O2）。两个LIGO探测器在2016年11月30日启动，Virgo则在2017年8月1日刚刚加入。多个探测器同时运行使得引力波天文学家们能够分析测量信号来自天空的哪个位置。探测器数量越多，定位越精准。对于这个事件而言，定位是大约2度宽15度长覆盖28平方度的一个椭圆的区域（被称为“误差椭圆”）看上去大约是一臂距离外一个香蕉的形状和大小。天空中的这个区域位于长蛇座，该星座的中心位于肉眼可见恒星长蛇座 ψ 的附近。

其他探测：多信使天文学

仅仅在引力波网络观测到这个信号后的1.7秒，命名为GRB170817A的伽玛射线暴被费米伽马射线暴监视系统探测到。像GW170817或者GRB170817A这样的强信号可以引发其他天文探测活动，因而常常被称作“触发器”。在这次的事件中，引力波和伽马射线触发器生成了发送给天文界的警报，发起了一场对后续追踪运动，最终探测到了许多来自这一事件的邻近NGC 4993星系的衰退的光信号。关于这场结合使用光和引力波的“多信使”观测运动的更多细节，请参见相关科学总结（[LINK MMA SCIENCE SUMMARY HERE](#)）。

引力波信号

双中子星系统产生的引力波可以在探测器可见范围内持续一分多钟。在GW170817的信号中，在两星并合前的大约100秒，它们相距400公里，却在每秒内绕了12圈。每转一圈，引力波的辐射迫使它们越发接近。随着轨道的收缩，它们速度越来越快，引力波的强度和频率也

不断增加。轨道的逐渐收缩过程被称为“旋近”，而频率的提升被称作“啁啾”信号。这一过程逐渐加快直到双星并合而形成单个残留产物。

引力波天文学家发现，将探测器的数据转换为频谱的形式有助于信号可视化。这是一幅彩色的图像，横向坐标轴表示时间，纵向坐标轴显示的是探测器中测量到的扰动的频率（低频区域靠近纵坐标的底部，高频靠近顶部）。来自双中子星的“啁啾”信号频谱图看起来像一条又长又细的线，起先在低频处相当平缓，随着时间推移，越来越急速地变陡，直到并合前一刻那鲜明的激增。

这一信号在两个LIGO探测器的频谱中都清晰可见，但在Virgo中却不然。这恰恰是空中定位的很重要的一点。对每个探测器而言，总有某个天空区域，来自那里的信号不容易被探测到。由于这个信号在两个LIGO探测器中轻易可见，但Virgo却观测不到，这意味着信号来自天空中的某个位置，在那一刻刚好Virgo很难探测。这一事实对于定位起到了至关重要的作用。

清除短时噪声干扰

尽管这一信号人眼可见，但LIGO的自动软件系统起先并没有在利文斯顿探测器的数据中检测到信号。问题出在旋近和“啁啾”的过程中，爆发了噪声干扰，类似于音响里静电干扰的突发噪声。这种爆发的噪声被探测器科学家们称为“短时噪声干扰”，并且必须在分析信号之前从数据里被清除掉。这一细致的清除过程必须只扫除噪声，而不影响信号，被称为“消减措施”。

短时噪声干扰在引力波探测器中常有发生，这个从GW170817数据中清除掉的干扰每几个小时就会发生一次。若对LIGO中短时噪声干扰感兴趣，推荐访问我们的公民科学项目GravitySpy <http://gravityspy.org>。在这个项目里，全世界的民众科学家都可以来看LIGO频谱数据，帮助识别短时噪声干扰并进行分类。这些信息将会帮助LIGO的成员更好地理解探测器行为，并用于在今后改进我们的分析流程。

引力波源的属性

取决于系统的天体属性，每个源都会产生不同的引力波信号。重要的属性包括单个物体的质量，自旋的速度，被挤压形变的难易度，双星轨道的大小，轨道相对视线的倾角，等等。所有这些属性结合起来将决定引力波信号的总体形状，强度，和每一刻的变动。引力波天文学家们极尽所能测量信号中的变化，然后反推出天体源的各种属性。

这一过程并非完美，因为信号并不是被完美测量的。因此我们给双中子星系统的属性赋予的是一个较小范围的数值，能够相对较好地来描述这个源（科学家们通常称之为“误差范围”，在LIGO-Virgo合作组织惯用的分析中，分析后所得的值域范围被称为“后验值”。）

通过对这个引力波的分析得知，双星系统中单个星体的质量在0.86个太阳质量到2.26个太阳质量之间。对这一事件我们很难对自旋做出很好的测量，而且不同的自旋和不同的质量会对

信号有相似的影响。如果我们假定这两个物体自旋很慢，那所观测到的数据也能很好地以质量位于1.17到1.60个太阳质量之间来阐释。无论是哪种情况，这些质量值都和目前已知的所有中子星质量范围相符合，这也是我们认为这是一个双中子星系统的原因之一。

另一个可以通过引力波很好地进行测量的属性是到源的距离（或者以天文学家的语言更恰当地来说，光度距离）。从引力波信号得出的光度距离是40百万秒差距（约1.3亿光年），与NGC 4993星系的距离相符合。有了距离测量和对该星系的光学测定，使得我们首次能够对哈勃常数进行联合测量。（[link to Hubble Constant Science Summary](#)）。

中子星是由超致密的物质构成，因而它们并非像我们所见的地球上的普通物体。这意味着天体物理上的观测就像是研究超致密物质的实验室。物理学家用一种关联压力和密度的叫做“状态方程”的关系来描述超致密物质，类似于我们更熟悉的“理想气体定律” $PV=nRT$ 。有许多种不同的状态方程，天文学家们想知道哪一种最适用来描述中子星。对中子星而言，其质量和状态方程决定了星体的大小，以及当它被临近的伴星的引力所挤压的时候，引力势如何变化（被称为“潮汐形变”）。而这将反过来改变引力波信号。对GW170817的分析为中子星的潮汐形变设了一些有意义的限定，但还不足以明确告诉我们该符合什么样的状态方程。

还可能会是什么？

如同天文学上的一切重大发现，我们对很多事情有了认识，但同时也还有很多未得到解答的问题。对于GW170817存在的两个最大的疑问与这两个物体的本质有关。相关的电磁信号告诉我们双星系统中的至少一个物体是中子星，但并不表示两个都是。即便它们两个的质量都和已知中子星类似，仍有可能其中之一是一个黑洞。天文学家从未观测到与中子星有着相似质量的黑洞，但他们也没有可靠的观测证据证明它们不存在，因此GW170817也有可能是一个中子星黑洞系统。然而，鉴于与已知中子星的质量相类似，我们仍然偏向这是双中子星系统的解释。另一个未解答的问题是GW170817并合之后变成了什么？有两种可能性：一种是变成了非常大质量的中子星（那将是已知的最大的中子星），另一种是变成了黑洞（那会是已知的质量最小的黑洞）。两种可能性都很诱人，但我们的数据还不足以告诉我们究竟是哪一种。我们所能知道只有，这并合后残留的产物，不管它是什么，大约具有2.74个太阳的质量。

了解更多：

- 访问我们的网站: <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- [点击此处阅读全文](#)，发表于**Physical Review Letters**。

术语表

- 黑洞：由极其致密质量导致的一个时空区域，其引力极强以致于包括光在内一切物质都无法逃离。
- 伽马射线：电磁波谱上最高能的电磁辐射。
- 中子星：大质量恒星坍缩之后残留的极其致密物体。

图1：这些图显示了GW170817信号在每个LIGO和Virgo探测器中的频谱。水平轴是时间，垂直轴是频率。双星的“啾啾”信号从左侧靠低处开始，提升至右侧的陡峭曲线。“短时噪声干扰”已经从LIGO利文斯顿探测器频谱中消减，因而并不在图中显示。

图2：顶部的图显示的是LIGO利文斯顿数据中的短时噪声干扰，同时也清晰地显示了双星“啾啾”信号。底部的图显示了时序中该噪声干扰产生的应变（我们用来描述LIGO和Virgo中信号强度的量）。它很窄（仅仅持续大约1/4秒），但非常强。消减过程将噪声干扰降至橙色带的强度，也就是像LIGO这样的探测器中一直存在的背景噪声。

图3：显示由LIGO和Virgo推定的GW170817位置的天球地图。两个椭圆（蓝色和绿色）分别显示了两种不同LIGO分析代码得出的定位。十字符号显示了天蛇座中NGC 4993星系的位置。右侧底部的图显示了我们通过分析引力波估算出的到源的距离。

图4：该图显示了我们对于双星系统中两个成员质量的最佳估算。对角长条区域内的任何值都是可能的。从这个等高线区域内的任何一点，画一条到左侧的水平线以及一条到底部的垂直线，即得出该引力波数据的解所对应的质量值。蓝色和红色分别表示低自旋和高自旋的情况下得出的结果。

图5：这些图显示的是双星的“潮汐形变”。每个坐标轴对应两个星体中的一个，以及其易形变的程度。GW170817系统位于这张图上的某处。标示了90%和50%的虚线表示该系统位于该线左下侧的可能性。左图和右图分别表示高自旋和低自旋的情况。