



人类首次探测到中子星-黑洞并合

陆由俊^{1,2*}, 郭潇^{1,2*}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: luyj@nao.cas.cn; guoxiao@nao.cas.cn

2020年1月5日, 美国的地基激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO)探测到首例中子星-黑洞并合事件GW200105. 这是继2015年9月14日探测到双黑洞并合引力波事件GW150914、2017年8月17日探测到双中子星并合事件GW170817之后, 人类首次探测到中子星-黑洞并合事件(图1和2). 自此, 地基引力波探测器集齐了所能探测到的三类致密双星并合的所有拼图. 10天后, LIGO与欧洲室女座地基引力波天文台(Virgo)又联合探测到第二例中子星-黑洞并合事件GW200115. LIGO、Virgo和日本的冈冈引力波探测器(KAGRA)联合工作组于2021年6月29日发表论文^[1], 公布了通过引力波探测到的这两例中子星-黑洞并合事件. 这一长期渴盼但前所未有的发现入选了美国《科学新闻》(Science News)报道的“2021年度突破极限的六大科学纪录”(https://www.sciencenews.org/article/surprising-science-records-superlatives-2021). 本文将简要解读这两例事件以及相关物理问题, 并展望未来发展.

1 GW200105和GW200115的基本性质

致密双星系统(包括双黑洞、双中子星和中子星-黑洞双星)的绕转和并合可发射引力波并向远处传播, 造成时空的扰动, 它们是宇宙中最强的高频引力波波源. 利用激光干涉技术, 地基引力波探测器LIGO、Virgo和KAGRA等通过探测引力波信号经过探测器时造成的时空间距的微小变化来捕捉遥远的致密双星并合事件, 并以此确定波源的物理性质和位置. 引力波信号GW200105由一个约 $8.9^{+1.2}_{-1.5}$ 倍太阳质量(M_{sun})的黑洞与一个约 $1.9^{+0.3}_{-0.2}M_{\text{sun}}$ 的中子星相互绕转并最终并合产生, 其距离地球约9亿光年. 而GW200115则来自一次距地球约10亿光年处的中子星-黑洞合并事件, 其中黑洞和中子星的质量分别约为 $5.7^{+1.8}_{-2.1}M_{\text{sun}}$ 和 $1.5^{+0.7}_{-0.3}M_{\text{sun}}$ ^[1].

对这两例引力波事件性质的确定, 首先是通过将观测的数据与致密双星系统产生的引力波信号模板进行匹配, 找到最佳拟合, 提取物理参数. 然而, 对每个系统中两个组成星性质的界定仍需要有其他判据. 一般而言, 要判断一颗致密星



陆由俊 中国科学院国家天文台研究员、中国科学院大学教授. 主要研究方向为理论天体物理, 包括黑洞物理、引力波天体物理、高能天体物理和星系宇宙学等.



郭潇 中国科学院国家天文台博士研究生. 主要研究方向是引力波源的起源、引力波的引力透镜效应、脉冲星计时阵列探测引力波的理论研究等.

是黑洞、中子星或是其他, 主要是看它的质量处于什么范围: 如果小于目前已知中子星的最大质量(约 $2.2M_{\text{sun}}$)且大于 $1.4M_{\text{sun}}$, 一般就认为是中子星; 如果大于天体起源黑洞的最小质量(约 $3M_{\text{sun}}$), 就认为是黑洞, 但在 $2.2M_{\text{sun}}$ 和 $3M_{\text{sun}}$ 之间, 则并不容易确定. 另外, 如果中子星-黑洞双星系统中的黑洞质量不是太大, 则在并合过程, 与其相伴的中子星会发生潮汐形变甚至撕裂, 因而产生的引力波波波形不同于双黑洞系统. 这两例事件中, 它们主星的质量都较大, 可以肯定是黑洞; 较小的次星的质量都低于电磁观测发现的中子星的最大质量, 通过引力波模板的匹配也发现可能存在潮汐形变, 因此次星被认定为中子星. 如此, 就确定了这两例引力波事件均为中子星-黑洞并合, 达成了前所未有的中子星-黑洞双星系统发现^[1].

另外, 引力波事件的空间定位对揭示引力波源的性质和



图 1 中子星-黑洞并合艺术想象图。中间靠下的黑色椭圆形区域代表黑洞，黑洞的左上蓝色椭圆形区域代表中子星，其他区域黄-红-蓝等颜色代表时空的相对变化。摘自LIGO网站：<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20210629f>

Figure 1 Artistic image of the neutron star-black hole merger. The black elliptical region in the center of the figure represents the black hole, and the blue object at the upper left corner is the neutron star, the colors at other regions reflect the relative changes of the spacetime relative to a flat spacetime. From LIGO website: <https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20210629f>

起源至关重要。然而，不同于电磁波，引力波探测器对来自不同方向的引力波的灵敏度差别不大，导致难以定位引力波源的确切方向。多个探测器可根据引力波信号到达时间差异提

升定位精度。LIGO分别位于汉福德(Hanford)和利文斯顿(Livingston)两地的两个探测器和Virgo探测器均探测到了GW200115信号。3个探测器的数据联合分析将GW200115在天空中的位置限定到约600平方度的范围内(图3(b))。在探测GW200105时，LIGO-Hanford因关机没有观测，Virgo探测到的信号的信噪比则太低，只有LIGO-Livingston以较高的信噪比有效地探测到了信号。因此，对GW200105空间位置的定位精度有限，数据表明其可能来自高达7200平方度的天区范围(占全天的17%)(图3(a))。

中子星-黑洞双星不同于双中子星和双黑洞系统，它们是中子星和黑洞这两类宇宙中最致密天体的结合。对它们并合产生的引力波的探测，既可以揭示和限制中子星的性质，同时也可以检验黑洞的性质，且中子星-黑洞双星的质量差异较大，并合时标较长，利用它们可以很好地检验引力理论。另外，中子星-黑洞系统也可以用来检验引力波更高阶模的辐射^[2]。尽管GW200105和GW200115这两起事件也可被用于检验广义相对论和引力理论，但由于其信噪比不是很高，并不能比之前的观测给出更好的限制。

2 中子星-黑洞双星系统的起源

一般来说，单个恒星在演化到末期的时候，由于燃料耗尽，核聚变停止，不再有足够的热压强维持自引力系统的平衡，进而坍缩成致密星。初始质量介于 $9M_{\text{sun}} \sim 25M_{\text{sun}}$ 的大质量

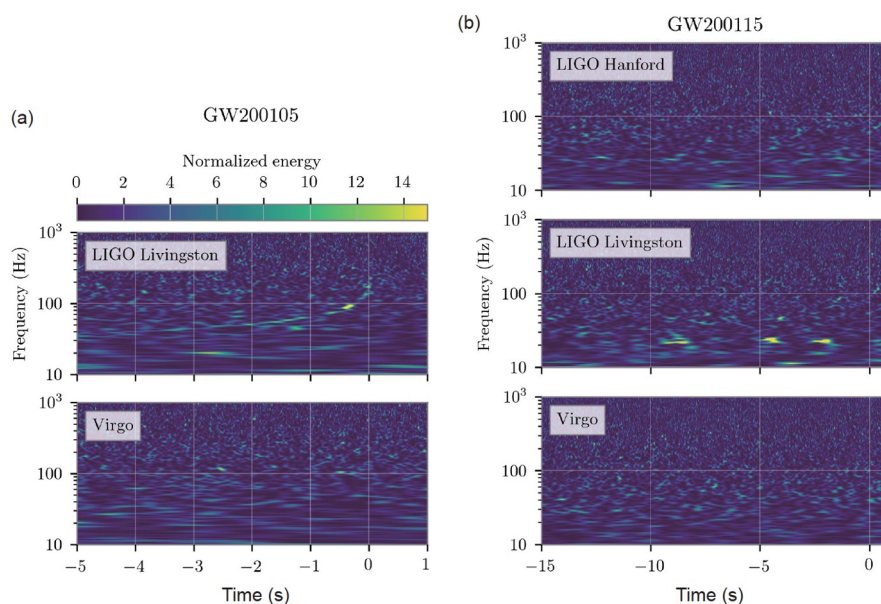


图 2 GW200105 (a)和GW200115 (b)的时间-频率数据图^[1]。横坐标是时间，纵坐标是频率。(a)中，LIGO Livingston的数据显示出一个频率随时间上升的信号，它的颜色偏黄，这就是引力波信号GW200105。而在其他子图的数据中，信号淹没在噪声中并不明显可见，但通过数据分析手段可以确定

Figure 2 The time-frequency diagrams of GW200105 (a) and GW200115 (b)^[1]. The horizontal and vertical axes represent the time and the frequency, respectively. In the panel (a), the data from LIGO Livingston clearly shows a chirping signal with yellow color, which is the GW signal GW200105. In other panels, the GW signal can be revealed by the detailed data analysis though it is not clearly seen

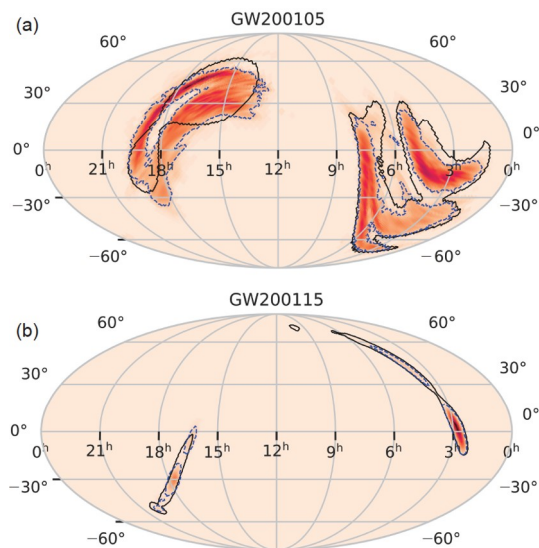


图3 GW200105 (a)与GW200115 (b)在天空中可能的位置^[1]. 横、纵坐标分别代表赤经和赤纬坐标. 实线和虚线分别代表两种不同分析方法估计出来的90%置信区域, 有颜色变化的区域是按虚线采用的分析方法得到的热图, 颜色越深的区域代表概率越大

Figure 3 The sky localizations of GW200105 (a) and GW200115 (b)^[1]. The horizontal and vertical coordinates represent the right ascension and the declination, respectively. The solid and the dashed curves represent the 90% credible region from two different analysis methods. The colorful regions are the heat maps obtained by using the same analysis method as that for the dashed line, and the darker the color, the higher the probability

恒星演化到末期的产物多为中子星, 大于约 $25M_{\text{sun}}$ 的大质量恒星的最终产物大多是黑洞, 具体的结果还可能受金属丰度等因素的影响^[3]. 双星系统中恒星的演化要经历一些更复杂的相互作用过程, 与孤立单星的情况不太一样, 但结局基本上是类似的.

中子星-黑洞系统究竟是如何形成的呢? 目前, 黑洞-中子星双星系统的形成机制主要有3种: (1) 孤立双星演化起源; (2) 星团环境中的动力学起源; (3) 活动星系核中围绕中心超大质量黑洞绕转的气体吸积盘上起源. 宇宙中的恒星一半以上都是双星, 孤立的大质量双星系统经过漫长的演化, 先后依次坍缩形成黑洞与中子星, 这便是孤立双星演化起源^[4,5]. 而在稠密的星团中, 存在着成千上万颗恒星或致密天体, 它们之间频繁地进行三体或四体的相互作用, 交换它们的伴星, 最后变成一颗黑洞与一颗中子星的组合, 这是稠密星团中的动力学起源途径. 其实还有另外一种动力学起源方式, 即在年轻的星团中, 一些致密双星也会经历频繁的动力学相互作用, 其轨道因此收缩并导致双星最终并合. 在这种情况下, 80%的中子星-黑洞双星在并合前都不会发生动力学交换(即伴星不会改变), 这一点与孤立双星演化比较类似. 然而, 如果这对双星一开始是在活动星系核的吸积盘上形成的, 由于盘上气体会加速双星系统损失能量和角动量, 可以导致更多、更快的并合, 这是第三种起源. 此外, 这一双星中的黑洞也可

能不是第一次参与并合, 而其本身就是之前致密双星并合后的产物, 但这种事件发生的概率很低, 几乎可以忽略.

假设不同的中子星-黑洞起源, 通过理论计算可以估计每年在近邻宇宙中单位体积内发生中子星-黑洞并合的数目, 也即中子星-黑洞并合的事件率密度. 因缺少观测定标和模型参数的不确定性, 不同的估计结果可以差好几个数量级^[1]. 其中, 孤立双星演化起源给出的是 $0.1\sim 800 \text{ Gpc}^{-3} \text{ 年}^{-1}$ ^[6,7](Gpc为10亿秒差距, 1秒差距对应3.26光年的尺度), 年轻星团中动力学起源给出的是 $0.1\sim 100 \text{ Gpc}^{-3} \text{ 年}^{-1}$ ^[8,9], 稠密星团中动力学起源的事件率最低(只有 $0.01 \text{ Gpc}^{-3} \text{ 年}^{-1}$ 的数量级^[10,11]), 活动星系核盘上起源的事件率可以高达 $300 \text{ Gpc}^{-3} \text{ 年}^{-1}$ ^[12]. 根据GW200105和GW200115的探测, 也可从观测上直接给出中子星-黑洞并合事件率的约束, 大约是 $7.4\sim 320 \text{ Gpc}^{-3} \text{ 年}^{-1}$ ^[1]. 由此, GW200105和GW200115几乎不可能起源于稠密星团动力学相互作用, 但其他的几种起源机制究竟哪一个主导了类似于GW200105和GW200115这样的中子星-黑洞并合系统的形成, 仍有待进一步的观测来限制.

这里解释下为什么中子星-黑洞双星是3种致密双星并合中最晚被引力波天文台探测到的. 一方面, 中子星-黑洞并合发生的事件率密度较低, 远低于双中子星并合发生的事件率密度(为 $13\sim 1900 \text{ Gpc}^{-3} \text{ 年}^{-1}$)^[4]; 另一方面, 尽管中子星-黑洞并合率并不比双黑洞并合率(为 $17.3\sim 45 \text{ Gpc}^{-3} \text{ 年}^{-1}$)^[4]低, 但通常探测到的双黑洞系统中的黑洞质量为几十倍太阳质量, 比中子星的质量大多了, 因此在同等距离下, 中子星-黑洞双星并合的引力波信号弱于双黑洞并合而更难被探测到. 不过, 实际上探测到的中子星-黑洞并合的事件率是受多种因素影响的综合结果, 而且也有偶然的因素在里面.

3 中子星-黑洞双星系统的演化

一旦中子星-黑洞双星系统形成后, 双星的绕转会辐射引力波从而损失能量和角动量, 进而双星的轨道会收缩, 两颗星会离得越来越近, 绕转速度越来越快, 辐射的引力波变得越来越强, 损失的能量和角动量也越来越多, 将不可避免地、越来越快地走向碰撞与并合, 最终形成一个黑洞, 这个黑洞往往也因双星系统的轨道角动量带入而高速旋转. 因受宇宙有限年龄的约束, 只有形成时间距今较短、并合时标较短的中子星-黑洞系统才会并合并被引力波探测器探测到.

在中子星-黑洞并合形成最终黑洞的过程中, 也可能出现两种不同的结局. 如果初始的黑洞质量小于约 $6M_{\text{sun}}$, 同时中子星的质量小于约 $1.5M_{\text{sun}}$, 有可能中子星在掉入黑洞之前就被黑洞的潮汐力撕裂成碎片, 形成吸积盘, 产生短伽马射线暴和相应的光学余晖等, 部分喷射出的中子物质还会因快速的富中子核反应过程合成镧系和锕系等重元素产生大量的热, 并在光学红外等波段辐射出去, 形成千新星现象^[13]. 在此情况下, 伴随中子星-黑洞并合的引力波事件同时有短伽马射线暴和千新星等短时标瞬变电磁对应体, 可被电磁波的望远镜探测到,

从而可开展多信使研究. 如果黑洞的质量大于约 $6M_{\text{sun}}$ 或者中子星的质量也较大, 黑洞的潮汐力不足以将中子星撕裂, 中子星顶多只是发生一些潮汐形变, 最后完整地被黑洞吞噬. 在此情况下, 中子星-黑洞并合无法产生电磁辐射^[13].

4 电磁波观测中子星-黑洞双星及其并合

除了可以通过中子星-黑洞双星绕转以及并合时产生的引力波信号来探测它们之外, 还可以通过它们产生的电磁波信号来探测. 如上所述, 如果此类双星中的中子星在并合过程中被黑洞的潮汐力撕裂, 黑洞吸积物质和抛射中子物质都会产生电磁辐射. 这两例事件都没有观测到电磁辐射. 这有可能是因为其中的黑洞质量较大, 同时中子星的质量也不小, 中子星未被撕裂而是被黑洞完整地吞噬, 无法产生明显的电磁辐射(例如GW200105). 此外, 由于这两例事件在距离地球9~10亿光年的位置, 相比于之前探测到电磁对应体的双中子星并合事件GW170817(距离地球1.3亿光年), 它们的距离要远得多, 因此即使有类似电磁信号也要暗弱得多. 并且, 它们所在天区的定位误差也比较大, 因此即便产生了电磁信号, 也有可能由于目前望远镜的探测能力不足, 或者望远镜来不及快速覆盖目标源的所在天区范围而错过了目标源, 导致没有探测到这两例事件的电磁信号.

由于中子星很小, 半径只有约10 km大小, 因此中子星的热辐射难以被探测到. 但是, 人们却可能借助射电辐射探测到它. 由于快速旋转的中子星的旋转轴和磁轴的指向一般不同, 磁场的旋转会产生沿磁轴方向的射电辐射, 若正好扫过地球, 就可以探测到周期性射电脉冲, 这就是所谓的脉冲星. 若中子星-黑洞双星中的中子星是脉冲星, 就可以通过射电观测手段来寻找或研究中子星-黑洞双星系统. 首先通过研究脉冲星发射的脉冲到达时间的变化, 推断它是否存在伴星以及伴星的质量, 再根据伴星质量及发光与否等, 可以推断其是中子星、黑洞还是其他类型恒星. 如果它的伴星是黑洞, 那么这就是一个用射电观测发现的黑洞-中子星系统, 此种方法也可以用来寻找双中子星系统. 在此之前, 在银河系内人们已经通过这一方法发现了20多对双中子星, 但还从来没有探测到中子星-黑洞双星系统^[14]. 因此, 这两例中子星-黑洞双星不仅仅是引力波第一次观测到这样的系统, 更是人类目前穷尽各种手段才探测到的第一次. 这也表明引力波在探测中子星-黑洞双星系统方面有优越性. 不过, 人们仍希望利用“中

国天眼”(Five-hundred-meter Aperture radio Telescope, FAST)和未来的平方公里阵(Square Kilometer Array, SKA)等射电望远镜观测、搜寻、发现中子星-黑洞双星系统. 不同于引力波探测, 电磁波观测将可提供对相对间距较大的中子星-黑洞双星的持续观测研究, 从不同的维度上揭示中子星和黑洞的本质以及中子星-黑洞双星系统的起源.

5 未来展望

中子星-黑洞双星将宇宙中最致密的两类天体结合到一起, 比起几乎不会有电磁辐射的双黑洞和几乎必然有电磁辐射的双中子星, 若隐若现的中子星-黑洞双星更增添了一份神秘感. 中子星和黑洞两两组合的3种致密双星并合的拼图被集齐了, 但这只是人类认识宇宙进程中的一个崭新的开始. 引力波探测和多信使天文学研究必将蓬勃发展, 历久弥新.

未来10~20年, 地基引力波天文台, 特别是包括欧洲的爱因斯坦望远镜(Einstein Telescope, ET)^[15]和美国的宇宙勘探者(Cosmic Explorer, CE)^[16]在内的第三代引力波探测器, 将会探测到数以十万计的致密双星并合事件, 其中将会有大量的高信噪比的双中子星和中子星-黑洞并合事件. 这些探测将帮助人们更好地限制代表宇宙中最极端物质密度的中子星的物态方程, 找出中子星与黑洞之间的分界, 揭示大质量(双)恒星的演化和形成黑洞视界的物理过程, 检验广义相对论和引力理论, 甚至取得引力理论的革命性进展等. 另外, 人们也必将发现与中子星-黑洞并合相随的电磁对应体. 未来, 由地面与空间的各个波段的望远镜组成的天地协同联合观测网, 将会共同捕捉引力波事件的电磁对应体, 深入开展结合引力波和电磁波等多种信使的天文学研究. 中国的一些已建、在建和拟建的地基望远镜和空间望远镜也将参与这一征程. 这些望远镜包括地基大视场巡天望远镜、司天工程等, 空间的引力波暴高能电磁对应体全天监测器卫星、爱因斯坦探针和中国空间站工程巡天望远镜等. 对中子星-黑洞双星并合系统的多信使探测将会揭秘中子星-黑洞并合中发生的诸多天体物理过程, 帮助人们解决诸如宇宙中超重元素的起源和形成以及伽马暴和喷流形成机制等重大问题. 同时, 我们期待着未来的电磁波观测也能直接发现中子星-黑洞双星, 为研究中子星-黑洞双星提供新视角, 由其所获的信息将与引力波探测所得互为补充, 更好地限制该类系统的起源、演化及关键物理过程.

致谢 感谢国家重点研发计划(2020YFC2201400)、国家自然科学基金(11690024)和中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB 23040100)资助.

推荐阅读文献

- 1 Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. Observation of gravitational waves from two neutron star-black hole coalescences. *Astrophys J Lett*,

- 2021, 915: L5
- 2 Abbott R, Abe H, Acernese F, et al. Tests of general relativity with GWTC-3. 2021, arXiv: [2112.06861](#)
- 3 Mirabel F. The formation of stellar black holes. [New Astron Rev](#), 2017, 78: 1–15
- 4 Abbott R, Abbott T D, Acernese F, et al. GWTC-3: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run. 2021, arXiv: [2111.03606](#)
- 5 Broekgaarden F S, Berger E. Formation of the first two black hole–neutron star mergers (GW200115 and GW200105) from isolated binary evolution. [Astrophys J Lett](#), 2021, 920: L13
- 6 Belczynski K, Kalogera V, Bulik T. A comprehensive study of binary compact objects as gravitational wave sources: Evolutionary channels, rates, and physical properties. [Astrophys J](#), 2002, 572: 407–431
- 7 Broekgaarden F S, Berger E, Neijssel C J, et al. Impact of massive binary star and cosmic evolution on gravitational wave observations I: Black hole–neutron star mergers. [Mon Not R Astron Soc](#), 2021, 508: 5028–5063
- 8 Fragione G, Banerjee S. Demographics of neutron stars in young massive and open clusters. [Astrophys J Lett](#), 2020, 901: L16
- 9 Hoang B M, Naoz S, Kremer K. Neutron star–black hole mergers from gravitational-wave captures. [Astrophys J](#), 2020, 903: 8
- 10 Clausen D, Sigurdsson S, Chernoff D F. Black hole–neutron star mergers in globular clusters. [Mon Not R Astron Soc](#), 2013, 428: 3618–3629
- 11 Sedda M A. Dissecting the properties of neutron star–black hole mergers originating in dense star clusters. [Commun Phys](#), 2020, 3: 43
- 12 McKernan B, Ford K E S, O’Shaughnessy R. Black hole, neutron star, and white dwarf merger rates in AGN discs. [Mon Not R Astron Soc](#), 2020, 498: 4088–4094
- 13 Zhu J P, Wu S, Yang Y P, et al. No detectable kilonova counterpart is expected for O3 neutron star–black hole candidates. [Astrophys J](#), 2021, 921: 156
- 14 Chu Q, Yu S, Lu Y. Formation and evolution of binary neutron stars: Mergers and their host galaxies. [Mon Not R Astron Soc](#), 2022, 509: 1557–1586
- 15 Hild S. Beyond the second generation of laser-interferometric gravitational wave observatories. [Class Quant Grav](#), 2012, 29: 124006
- 16 Reitze D, Abbott R, Adams C, et al. The US program in ground-based gravitational wave science: Contribution from the LIGO laboratory. 2019, arXiv: [1903.046](#)

Summary for “人类首次探测到中子星-黑洞并合”

The first detection of neutron star-black hole binary mergers

Youjun Lu^{1,2*} & Xiao Guo^{1,2*}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding authors, E-mail: luyj@nao.cas.cn; guoxiao@nao.cas.cn

On June 29, 2021, the LIGO, Virgo, and KAGRA collaboration published a paper to announce the detection of two neutron star-black hole (NS-BH) merger events GW200105 and GW200115 via gravitational waves (GWs). This unprecedented discovery is selected as one of the six surprising records science set in 2021 by *Science News*.

The first event, GW200105, was caused by the merger of a $8.9^{+1.2}_{-1.5}$ solar mass (M_{sun}) BH with a $1.9^{+0.3}_{-0.2} M_{\text{sun}}$ NS at about 900 million light years away from Earth, and the second event, GW200115, was caused by the merger of a $5.7^{+1.8}_{-2.1} M_{\text{sun}}$ BH and a $1.5^{+0.7}_{-0.3} M_{\text{sun}}$ NS at about 1 billion light years away from Earth. The mass of the massive component in each of these two binaries, determined by the GW data, is larger than the minimum mass of all known astrophysical origin BHs ($\sim 5 M_{\text{sun}}$), thus it must be a BH, while the mass of the light one is less than the maximum mass but larger than the minimum mass of known NSs, thus it must be a NS. The detected GW waveform of each binary indicates some tidal deformation of the light component, which is also consistent with a NS nature of that component. The sky localizations of these two events are poorly determined by the GW waveforms, i.e., about 7200 and 600 square degrees for GW200105 and GW200115, respectively.

NS-BH systems can be generated by different mechanisms, including the evolution of isolated binaries, the dynamical interactions in dense star clusters and young star clusters, and the star formation/evolution and interactions in the gaseous accretion disk around supermassive BHs in active galactic nuclei. The NS-BH merger rates resulting from different mechanisms may be different. The inferred NS-BH merger rate from the detection of GW200105 and GW200115 suggests that the dynamic origin in dense star clusters may be ruled out.

Some NS-BH mergers may lead to electromagnetic radiation. If the BH component of a NS-BH merger is small, the NS may be tidally disrupted and an electromagnetic (EM) counterpart, i.e., a kilonova, emerges from the merger. The NS can be directly plunged into the BH without EM radiation, however, if the BH mass is significantly large. No EM counterpart was detected for the two NS-BH merger events. This could be due to that either no EM counterpart is generated from each merger, or the generated EM counterpart is too faint to be detected or simply missed by those telescopes searching for it. In addition, a NS-BH binary may be also directly discovered by monitoring the variation of the arrival time of pulsar pulses with radio telescopes, if the NS component is a pulsar.

The detection of NS-BH systems can be used to not only constrain the evolution of (binary) stars and the nature of NS and BH, but also test the high mode GW radiation and the theory of gravity. In the future, GW and EM waves will inevitably detect a large number of NS-BH binaries and their mergers, which will be of great importance for investigating stellar physics, compact objects, gravity theory, and even cosmology.

gravitational wave, black hole, neutron star, binary star, kilonova

doi: [10.1360/TB-2022-0078](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0078)