

GW230529: 一次中子星和未知致密天体的并合事件

2015年，人类首例直接探测到的引力波事件 [GW150914](#) 标志着引力波天文学新时代的开启。自此，人们更是探测到了越来越多不同类型的天体系统所产生的引力波辐射信号。这些引力波探测事件全部来源于致密双星并合过程，覆盖了中子星和黑洞的各类组合情况。而在此文中，我们将报告引力波观测合作组织（LIGO-Virgo-KAGRA）在第四次观测运行的前半部分（O4a）探测到的一例特殊引力波事件：[GW230529](#)。此例观测于2023年5月29日的致密双星并合事件，其特殊之处在于其中一颗天体的质量大于中子星的预期质量上限，同时又小于黑洞的预期质量下限，使得人们目前还难以确认它的具体分类。

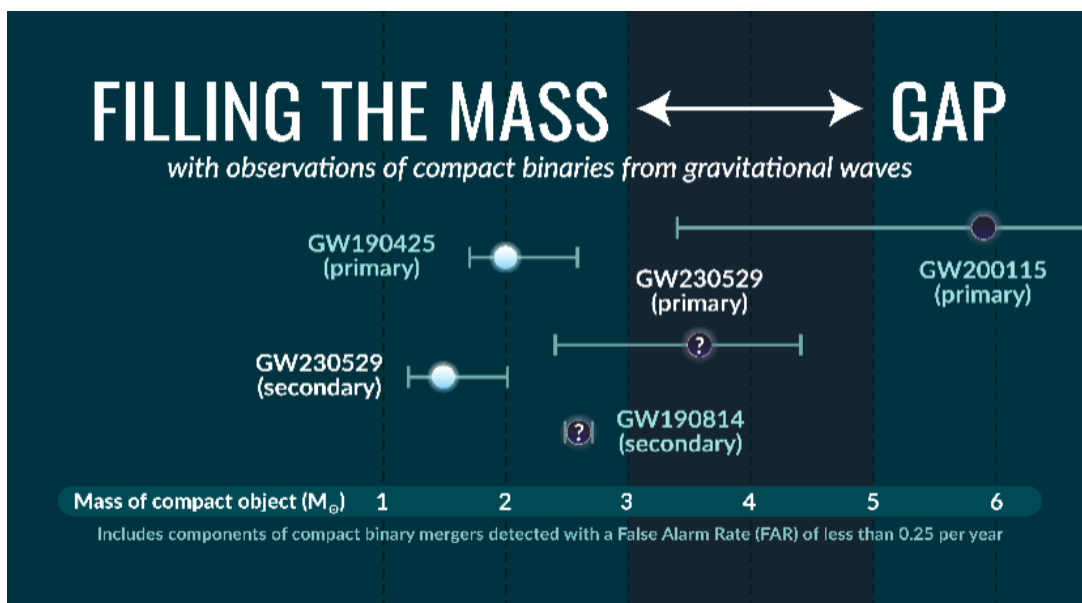


图1: 图中显示了部分引力波探测事件的成员星质量处于（或接近） $3 M_{\odot}$ 至 $5 M_{\odot}$ 的低质量间隙。浅蓝色圆圈和黑色圆圈分别表示中子星和黑洞；具有问号标识的圆圈则表示该天体可能是一颗黑洞，但不能排除为一颗中子星的可能。注意到GW230529事件的主星质量位于该质量间隙内（图片版权：S. Galadage, Observatoire de la Côte d'Azur）

如何探测到此次事件？

我们使用**匹配滤波**技术分析各个探测器中的数据。该技术将探测数据与理论给出的预期信号模板相比较，找出匹配程度最佳的潜在真实引力波信号。人们据此便能够估计出随时间变化的引力波信号强度，或被称作一串信噪比时间序列。如果在引力波探测器的数据中存在来自真实天体物理源的引力波信号，信噪比数值将会非常高；反之则会很低。对于深藏在探测数据中的真实引力波信号，匹配滤波技术已被实践证实为一种十分高效的识别、提取方式。但值得注意的是，鉴于各类复杂的噪声信号会影响真实引力波信号的探测，甚至有些噪声信号同真实的引力波信号高度相似，匹配滤波技术因此也并不是绝对可靠。

如何判断 GW230529 是一例真实的引力波探测事件？

大多数时候，我们会在各个探测器中搜寻时间和源参数一致的信号。但自从提升和改进引力波数据处理的分析方式后，我们不再局限于只搜寻在各个探测器中均需达成一致条件的事件，而是实现了单个探测器也能充分确认天体物理源真实性的探测方法。正是基于此，在仅有位于美国路易斯安那州利文斯顿镇的引力波探测器（[LIGO-Livingston](#)）能够提供 GW230529 事件的可用数据时，我们也得以实现此次事件的成功探测。有三个独立的搜寻算法报告了 GW230529 事件的探测结果。虽然这三个独立搜寻算法全部采用了匹配滤波技术，但各自实现的方式不同，且都开发出了强有力的工具用以区别真实的天体物理源信号与噪声。这些搜寻算法的成熟性足以令我们去充分实现结果之间的交叉比对检查，最终得出结论：探测器中的噪声极不可能产生此次 GW230529 事件的信号。GW230529 事件被探测于探测器数据的实时分析处理过程中，并在观测结束后就获得了证认。该事件的**误报率**为每千年低于一例，这表示在引力波探测器数据中不存在任何真实的致密双星并合信号下，我们预期偶发噪声巧合地产生类似 GW230529 信号的频率低于千年一次。我们在图 2 中展示了 GW230529 同其他引力波事件候选体的显著区别。

文章图示： 更多关于图示的信息和获取细节，请详见[预印本](#)版本。

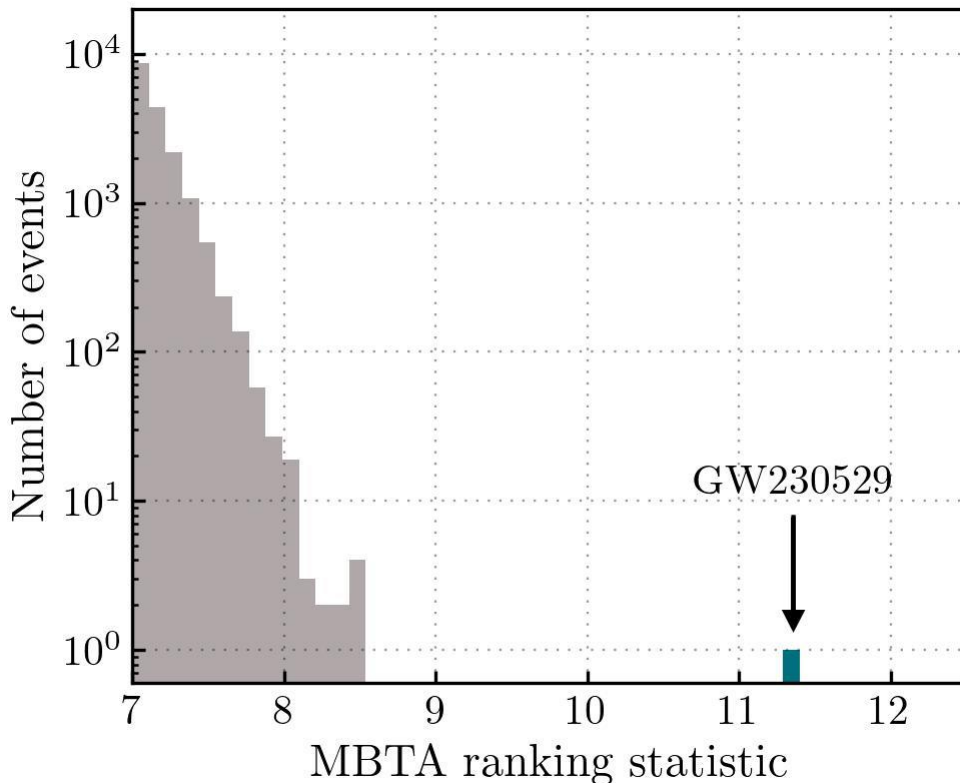


图2: 在 LIGO-Livingston 第四次观测运行的前两周内，所有引力波候选事件的一个搜索算法（称为 MBTA）给出的排序统计量分布。横轴对应排序统计量的数值，表示我们在结合了各种用以区分噪声信号的测试后，对搜索算法的触发事件按照可信程度进行排序。排序统计量的获取源自于信噪比，且排序统计量数值越大，表示该事件的信噪比越强，更符合真实的天体物理源的特征。图中的灰色分布区域显示了不足以被分类为真实天体物理源的候选事件。蓝色的分格表示 GW230529 所处的位置。注意到灰色候选体的排序统计量不超过 8.5，而 GW230529 的排序统计量数值却达到了 11.4，显著大于其他候选体事件。

GW230529 为什么有趣？

科学家们很早之前就提出过致密天体存在**低质量间隙**的概念，指的是人们预期将极少探测到质量在 $3 M_{\odot}$ 至 $5 M_{\odot}$ 之间的致密天体（此处 M_{\odot} 表示**太阳质量**）。然而，最近一些**电磁波**或引力波的观测事实指出，部分双星系统拥有处在低质量间隙的成员星候选体。例如，人们估计 [GW190814](#) 事件中的质量较小的天体，其质量很大概率是处在 $2.50 M_{\odot}$ 至 $2.67 M_{\odot}$ 之间，远大于当时人们已探测到中子星的最大质量数值，且又低于人们所预期的黑洞质量下限。

GW230529 事件中，较大质量的主星被估计拥有 $3.6 M_{\odot}$ 的质量，意味着 GW230529 是首例主星位于低质量间隙的双星候选体事件（如**图 3** 所示）。基于我们对中子星和黑洞族群的现有理解，该事件中主星的质量十分倾向于是一颗质量小于 $5 M_{\odot}$ 的黑洞（具有 99% 的概率）。基于对核物理理论与实验，以及天体物理中的中子星族群的现有认知，我们对于主星是中子星的可能性同样给出了估计结果，并指出主星为中子星的可能性虽然很低，但并不为零。甚至在特定的假设条件下，主星为中子星的可能性能够达到百分之几的水平。据此，我们暂时还无法肯定地排除主星为中子星。但另一方面，GW230529 事件中质量较小的次星有 90% 的概率具有 $1.2 M_{\odot}$ 至 $2.0 M_{\odot}$ 之间的质量。可以几乎肯定地说，GW230529 事件中的次星就是一颗中子星。

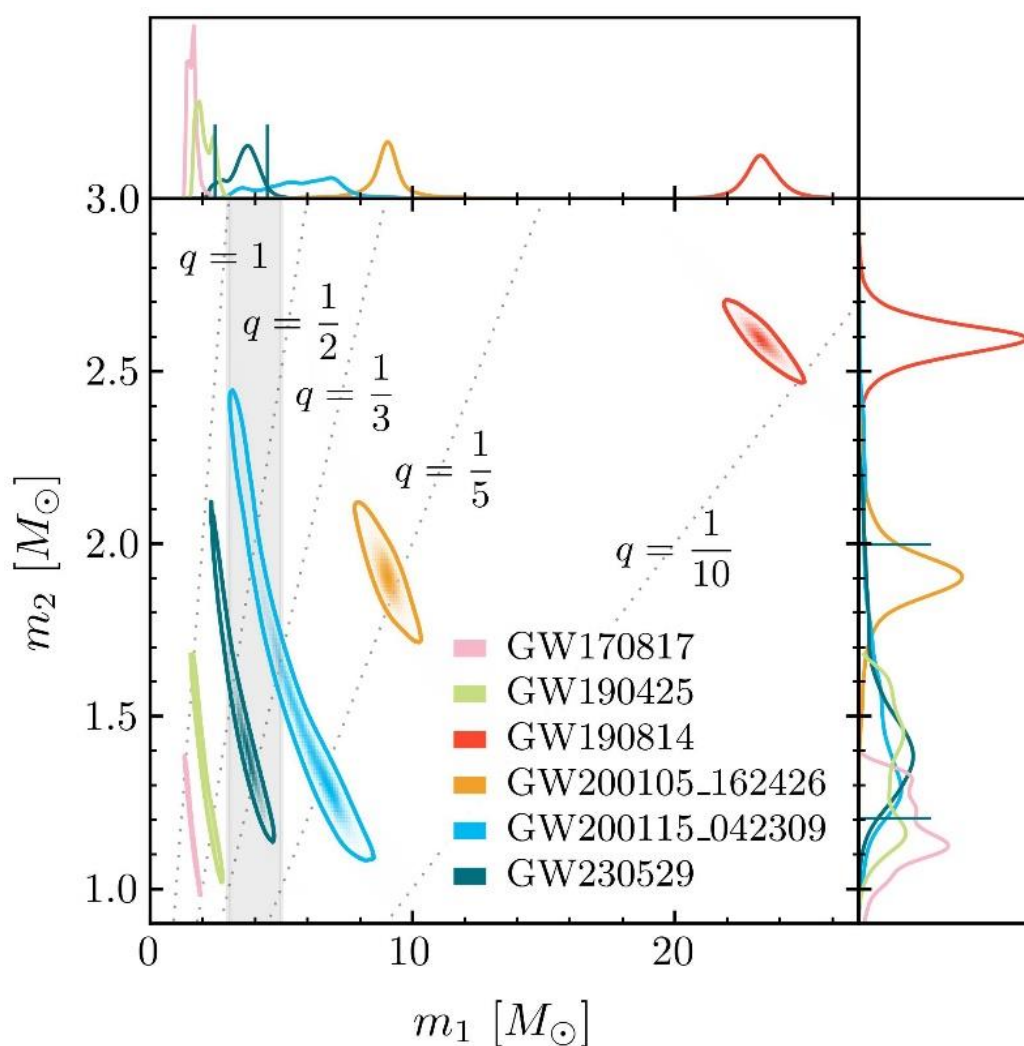


图3: 一些双星系统中的成员星质量的概率分布。质量的最概然数值位于概率分布函数的峰值处。顶部子图表示这些系统中主星质量 (m_1) 的概率分布; 右图则为次星质量 (m_2) 的概率分布情况。图中各条虚线表示次星和主星之间的质量比 ($q = m_2/m_1$)。GW170817 (粉色) 和 GW190425 (绿色) 的质量分布符合双中子星系统的预期; GW200105_162426 (橙色) 和 GW200115_042309 (蓝色) 则符合中子星-黑洞系统的预期。GW190814 (红色) 的次星质量分布显示其存在黑洞或中子星的两种可能性。图中灰色阴影区域表示 $3 M_{\odot}$ 至 $5 M_{\odot}$ 之间的低质量间隙。可见 GW230529 (青色) 正好位于两个双中子星并合事例和两个中子星-黑洞并合事例之间, 且 GW230529 事件中的主星质量处在低质量间隙内。

GW230529 有何启示?

鉴于中子星-黑洞并合事件较为罕见, 每一例此类事件都能为人们研究中子星-黑洞并合事件率提供极具意义的信息, 同时也有助于人们更好地描述黑洞和中子星族群的特性——这也是引力波天文学的重要目标之一。人们需要在该过程中推断中子星与黑洞的质量分布形状, 判断黑洞的质量下限与中子星的质量上限, 并研究具有不同质量的旋转致密天体的丰度。利用此次 GW230529 事件, 我们推测类似事件的并合率约为每年在每 3.5×10^{28} 立方光年的体积内发生 39 次。另一分析则包括了引力波观测合作组织在第三次观测运行 (O3) 时探测到的其他 [中子星-黑洞并合事件候选体](#), 给出的并合率约为每年在 3.5×10^{28} 立方光年的体积内发生 61 次。注意到如若涵盖更多的低可能性候选体事件, 有些分析将给出每年在 3.5×10^{28} 立方光年的体积内发生约 95 次的并合。从这些分析中, 我们还发现类似 GW230529 事件推测的并合事件率, 与第三次观测运行时依据主星被确认是一颗黑洞的推测并合事件率相当。这无疑加强了 GW230529 事件中的主星是一个黑洞的可能。图 4 展示了中子星-黑洞系统并合事件率的概率分布情况。

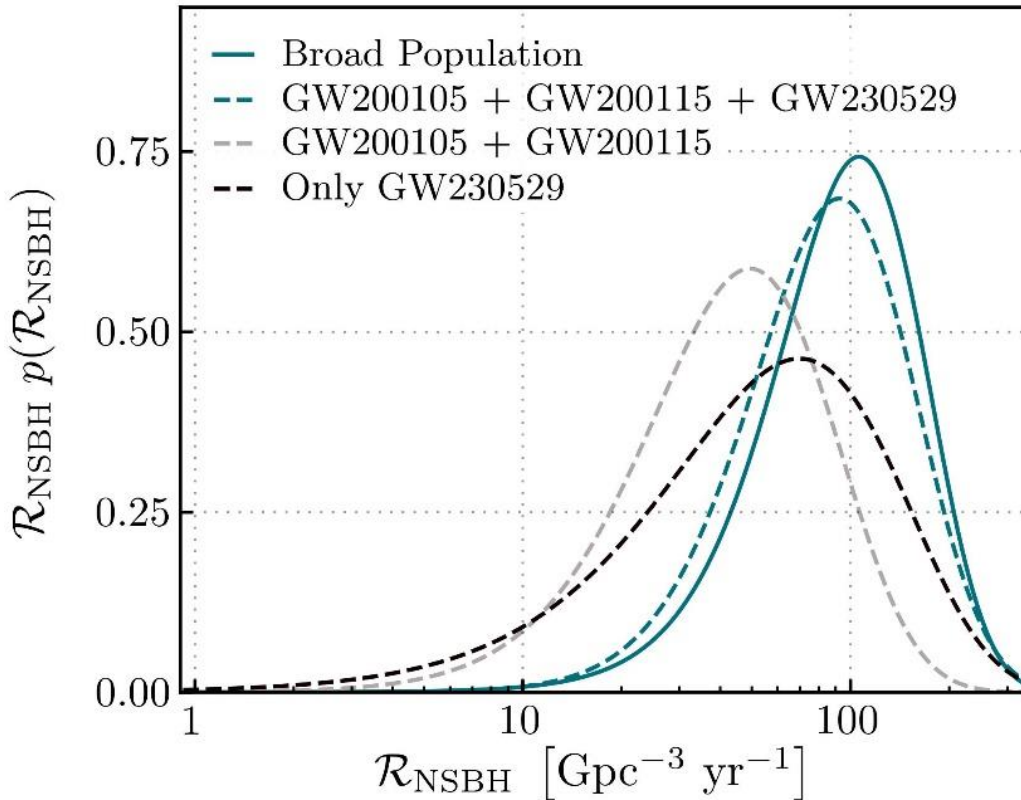


图4: 中子星-黑洞系统的并合事件率的概率分布。概率分布函数的峰值位置对应的横轴数值,即为并合率的最概然数值。不同颜色的虚线,对应我们仅使用在各自图例中所显示的中子星-黑洞事件去推断族群模型的性质。标注了“Broad Population”的实线的概率分布是基于包含了更多的低可能性候选体并合事件的族群模型(更多描述请见正文)。由图可知,不同分布的峰值并合率十分接近,互相之间都有一定程度的重叠特征。值得注意的是,仅考虑 GW230529 事件的分布峰值并合率,与再包含其他中子星-黑洞并合事件的分布峰值并合率相当。

鉴于 GW230529 事件的主星质量很可能位于低质量间隙,该事件将成为修正族群模型的重要候选体。我们考虑了三类族群模型,并研究了 GW230529 事件分别对其会有怎样的影响。前两类族群模型均涵盖了所有的致密双星天体组合情况(指双中子星系统、双黑洞系统以及中子星-黑洞系统);第三类族群模型仅考虑中子星-黑洞族群。我们发现,将此次 GW230529 事件的观测计入前两类族群模型之中,并不会显著改变它们的结果,这意味着 GW230529 事件并不太可能是这些模型的离群情况。然而,对第三类模型而言,图5显示了计入 GW230529 事件会显著影响该模型得出的结果。其中,低质量黑洞的丰度会被显著提高,且黑洞的质量下限也会被推至更小:由先前未计入 GW230529 事件时的约 $6.04 M_{\odot}$ 的质量下限,会在第三类模型计入 GW230529 事件后减小至 $3.36 M_{\odot}$ 。

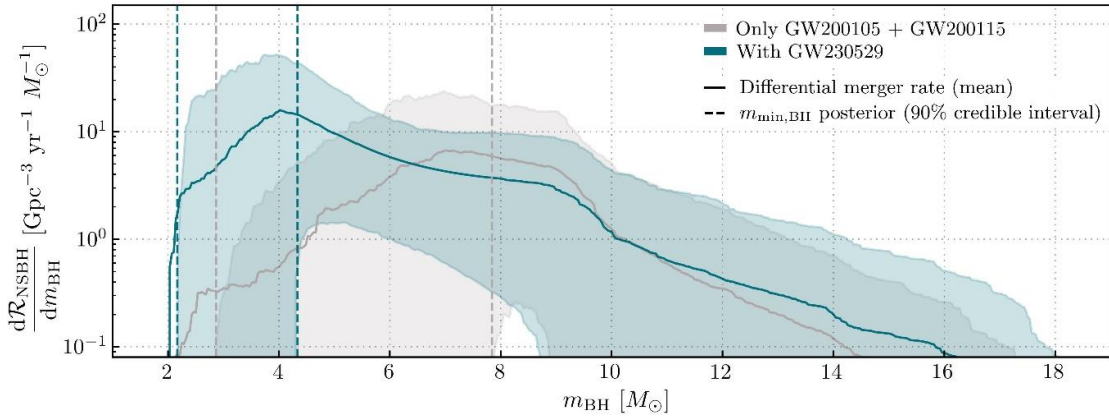


图5: 中子星-黑洞双星系统并合率(纵轴)与黑洞质量(横轴)的关系。实线表示两种模型下(见图例)并合率随质量变化的函数关系,阴影区域则表示模型对应的不确定度。竖直虚线展示了90%置信度区间内的黑洞质量下限范围。图中灰色区域表示不计入 GW230529 事件时,中子星-黑洞族群的并合率随质量变化的函数关系;蓝色区域对应的中子星-黑洞族群模型则计入了 GW230529 事件。图中显示,计入 GW230529 事件将会显著提高拥有低质量黑洞的双星丰度,且黑洞的质量下限也会被推至更小的数值。

事实上, GW230529 事件的形成机制暂时还存在较大的不确定性。对现有的关于大质量恒星核心坍缩形成超新星的理论来说,此次事件的主星质量较低,无法得到令人信服的解释。一个更为合理的形成解释是回落过程,指在超新星事件之后,由中心天体吸积其附近的残留物质进而产生此次事件中的黑洞主星。最近的一些结果已有迹象表明, $3-6 M_{\odot}$ 的黑洞可能诞生于回落过程。对氦星核心坍缩的模拟也已预言过产生的黑洞质量能够低至中子星的最大质量,尽管得到质量小于 $5 M_{\odot}$ 的黑洞数目较少。时至今日,核心坍缩模型的产物仍具有较大的不确定性,人们据此更是难以准确判断出产物生成时的临界质量。因此, GW230529 事件能够为人们限制这些模型提供十分宝贵的信息。

另外一种此次事件中的主星的可能起源是双中子星的并合。在此物理图景下,我们设想该事件中的次星最初可能是一个三体或四体系统中的成员星;又或者,次星是在一个年轻星

团或者活动星系核内被 GW230529 事件中的主星所捕获。当然，我们也不能排除非恒星演化起源的可能性，如该事件中的主星实际上可能为一颗**原初黑洞**。

更多关于类似 GW230529 事件的、处在质量间隙的系统的深入研究，能够让我们不断修正对黑洞和中子星族群的认识。这同时也将反过来允许我们去更好地理解它们背后的形成机制，以及在中子星研究领域内十分重要的内部物质结构等问题。

更多信息： 请访问我们的网站：www.ligo.org，www.virgo-gw.eu，gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

免费的完整科学论文预印本阅读：[点击此处](#)

词汇表：

致密双星并合：通常简称为“CBC”，指两颗黑洞，或两颗中子星，或一颗中子星与一颗黑洞这样的双星系统，相互绕转并最终并合的过程。由于两个天体之间的间距逐渐减小、相互绕转越来越快，该过程中将一直存在引力波的辐射，且其频率和振幅将逐渐增大。并合后的残骸天体可以是一颗中子星，亦或一颗黑洞，取决于系统初始的参数情况。组成该双星系统的两个天体被称作是该双星系统的成员星。人们通常指代较大质量的成员星为主星（另一颗为次星）。

黑洞：一类极其致密的天体，致密到在其附近逃脱引力束缚的速度要求将超过光速。因此，来自黑洞附近的光线无法抵达远处的观测者，意味着黑洞对远处的观测者来说表现为空间中一块不发光的区域。

中子星：一类极其致密的天体，致密到原子结构无法抵抗其内部压力，致使中子星几乎全部由中子组成，并混合有少量的质子和电子成分。在大质量恒星的塌缩过程中，中子星诞生于核心坍缩超新星过程。人们预期中子星的质量上限约为 $3 M_{\odot}$ 。

原初黑洞：一类在理论上形成于宇宙大爆炸很小时标后的早期宇宙中的黑洞。预期的质量范围大致位于 $10^{-18} M_{\odot}$ 至 $10^{36} M_{\odot}$ 。

引力波观测合作组织 (LIGO-Virgo-KAGRA)：拥有位于美国、意大利和日本的引力波探测设备。这些探测器的基本框架均由两个拥有公里长度的激光干涉臂构成“L”形状。在臂的两端设置有大型的悬挂镜面，且激光在臂的内部循环照射。当引力波扫过地球时，我们利用臂内的激光测量臂长的相对变化。每个探测器中的臂长变化被不间断的实时监测记录下来，构成了我们搜寻引力波信号的原始数据。

匹配滤波：一种用于分析引力波探测器数据和探测致密双星并合事件的搜寻方法。它利用探测器得到的实时数据与理论预期的引力波信号模板之间的比较来搜寻相关性。其中，引力波信号模板依赖双星系统的有关参数。当真实的引力波扫过地球时，我们预期将找到探测器数据中与引力波理论信号中匹配最好的部分。

低质量间隙：我们预期很少或没有致密天体所存在的质量范围。该质量间隙大致从中子星的质量上限 $3 M_{\odot}$ ，延伸至黑洞的质量下限 $5 M_{\odot}$ 。

太阳质量或 M_{\odot} ：太阳的质量大小，通常作为天文学上的一个质量单位，大约等于 2×10^{30} 千克。

光年：长度单位。1 光年表示光在真空中一年时间内所走过的距离，大约等于 9.5×10^{12} 千米。

族群模型：一类提供特定类型致密天体数目的理论模型，常用双星系统的众多参数的函数形式加以表示。

核心坍缩超新星：在主序恒星内部，气体压力与内部核心的引力作用相互抵消。但当恒星接近生命末期，气体压力下降至不足以支撑引力的坍缩效果时，恒星将迎来剧烈向内部核心快速收缩的过程，并导致内部核心多种可能的结局。此般快速的恒星塌缩过程能够在恒星内部产生巨大的压强，并使其爆炸成一例超新星事件。这样一种超新星爆发机制被称为核心坍缩超新星。超新星事件过后，人们预期残留天体可能为一颗中子星，或借助回落过程导致一颗黑洞的产生。注意如果一颗恒星的初始质量过大，它能够直接塌缩形成一个黑洞并跳过超新星爆发这一阶段。

回落：核心坍缩超新星过程所产生的单颗中子星能够吸积附近“回落”的残留物质。该回落吸积过程能够增加中子星的质量，并在其质量超过中子星质量上限后，产生一个新的黑洞天体。

搜寻算法：一套包含了多个处理进程所组成的数据流计算程序。搜寻算法按各类条件对数据展开分析，筛选数据并计算各类数值，以实现尽可能地拒绝噪声事件与合理评估候选天体物理事件的可能性。有些搜寻算法会在引力波探测过程中实时运行；有些则是线下运行。还有一些能做到两者兼顾。更多的相关信息请见 IGWN 公共预警用户的指导手册。

线下搜寻：在先前的观测周期完成后所完成的数据分析工作，通常会执行于探测器维修或升级的宕机时期中。线下搜寻与在引力波观测中所执行的实时数据分析（或被称作在线分析）互补。

误报率：用来量化一次探测事件有多大的概率是由于偶发噪声所导致。通过模拟噪声信号所产生的事件并统计其强度大小，我们能够获得在给定信号强度的条件下，由噪声产生探测事件的概率。具体而言，如果探测事件的误报率为一天一次，这意味着我们预期探测器中的噪声信号将会以大约每日一次的频率产生对应的事件信号，因此我们难以将每天观测到的此类事件归类于真实的天体物理源。

（简体中文翻译：康亚城，邵立晶）

访问我们的网站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

