

千新星(并合新星)研究回顾*

俞云伟[†]

(华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079)

摘要 中子星-中子星或中子星-黑洞的并合可以导致强烈的高频引力波辐射,同时它们也可以通过向外抛射物质发出多种类型的电磁辐射信号,因而是当前多信使天文学研究的主要对象之一. 在各种电磁辐射信号中,由抛射物所发出的热暂现源辐射被称为千新星,或可更广义地称为并合新星,其辐射能量来源主要是抛射物中放射性重元素的衰变和中心并合产物的持续能量输出(如自转能损). 这种现象最早由Li和Paczynski在1998年从理论上预言提出,并最终在2017年的引力波事件GW170817中被观测证实. 千新星(并合新星)观测在GW170817事件中发挥了关键性的电磁对应体作用,帮助人们精确定位引力波信号、证认其天体物理起源乃至限制并合产物的性质. 从宇宙中重元素的起源这一研究背景出发,循着历史发展的脉络,分别对千新星(并合新星)模型的提出、发展、并合产物的性质、相关候选体的发现以及GW170817引力波事件等不同的研究阶段和研究专题进行简要的回顾,以梳理这一方向上研究思路的历史变迁,展现理论和观测的相互作用及其对研究进程的影响和促进.

关键词 千新星(并合新星), 伽马射线暴: 普通, 中子星, 引力波

中图分类号: P144; **文献标识码:** A

1 引言

中子星-中子星或中子星-黑洞双星系统在发生并合的时候可以通过潮汐、碰撞挤压、吸积反馈等过程向外抛射物质. 这些物质常常具有丰中子的属性,可使大量比铁更重的元素通过快中子俘获过程(r过程)得以形成,是宇宙中大部分超铁元素的主要产地. 与此同时,这些放射性重元素的衰变以及中心并合产物(特别是大质量中子星)可能的持续能量释放将使并合抛射物被显著加热. 千新星便是由加热后的并合抛射物所发出的一种热辐射,观测上表现为一种紫外-光学-近红外波段的暂现源现象,具有从天到星期量级的典型光变时标,其光度则决定于能源的具体属性. 千新星也可被更广义地称为并合新星(见第5章),为尊重历史发展和方便读者理解,本文将根据上下文混用这两个名称. 作为致密星并合的一个后续过程,千新星(并合新星)辐射自然成为了此类引力波事件的一种重要电磁对应体.

2018-08-13收到原稿, 2018-10-01收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11473008、11822302、11833003)资助

[†]yuyw@mail.ccnu.edu.cn

有关千新星(并合新星)的理论预言最早在1998年被提出,其模型框架在2010年得到了关键性的完善和实质性的补充,并在随后数年内获得了快速的发展和多方面的深化(比如对r过程元素的合成和衰变加热率、不透明度和辐射转移、抛射物成分组成、并合产物性质和能量输出等问题的理论分析和数值模拟).特别是从2013年起,随着理论研究的深入,观测方面也陆续取得了一些突破性的进展,发现了一些可能的候选体(如GRB130603B事例),极大地提升了人们对这一研究方向的关注度.最终,在2017年,伴随着双中子星并合引力波信号(GW170817)的首次发现,人们成功观测到了与引力波信号相伴随的千新星(并合新星)辐射,从而确切证实了这一项理论预言.相关观测在定位和证认引力波源、揭示并合抛射物性质、确认宇宙中r过程元素起源以及限制并合产物性质与致密物质物态等方面发挥了关键性的作用,淋漓展现了引力波电磁对应体研究的重大科学价值.毫无疑问,千新星(并合新星)这种全新的天文现象,将是未来引力波电磁对应体监测和光学暂现源巡天最为重要的对象之一.本文将简要回顾千新星(并合新星)研究历程中的一些重要背景和关键进展,以展现这一方向上的研究思路变迁及其内在缘由,展现天文学理论和观测研究的相辅相成.读者阅读本文时可同时参考其他相关综述性文献,如文献[1-4]等.

2 宇宙中重元素的起源

宇宙中存在着百余种不同的化学元素以及为数众多的同位素.这些元素来自何方?它们又是如何形成的?对这些问题的终极思考,最终必将溯及整个宇宙的起源问题.1915年, Einstein提出了广义相对论,并于两年后发表了《基于广义相对论的宇宙学考察》一文,开启了现代宇宙学的大门.1929年, Hubble通过对螺旋星云(河外星系)的红移测量和造父变星测距发现了哈勃定律,显示宇宙正处于膨胀状态.第2次世界大战后, Gamow^[5]和Alpher等^[6]开始在膨胀的宇宙框架下考虑元素的合成问题,并于1948年做出了详细的理论计算,试图一次性解释现在宇宙中各种元素的丰度(根据太阳系内观测),但这需要对初始条件进行特殊的设置.对于这个被称之为大爆炸核合成或原初核合成的过程,目前一致认为,它能够合成的其实几乎只有氢、氦、锂以及氢的同位素这些最轻的元素,其中前两者占比超过99%.

人们很快意识到,宇宙中的元素应该不是一次性合成的,发生在恒星内部持续的核合成过程将可能对宇宙中重元素丰度的塑造发挥重要的作用,因为恒星至少可以通过持续的物质抛射和超新星爆发等反馈机制改变星际介质中元素的丰度.1957年, Burbidge夫妇、Fowler和Hoyle 4人(B²FH)成功建立了恒星核合成理论,以解释宇宙中元素丰度曲线的诸多特征^[7].同年, Cameron也发表了类似的工作^[8]. B²FH理论详细考虑了发生在恒星中的氢燃烧、氦燃烧、 α 粒子俘获、电子俘获、质子俘获、慢中子俘获(s过程)和r过程等一系列核反应过程,其中特别是r过程的提出对解释超铁元素的形成具有至关重要的作用. Fowler也因相关的研究获得了1983年的诺贝尔物理学奖.但是,所谓r过程,即原子核俘获自由中子的时间要远短于原子核本身衰变时标的反应过程,往往要求该过程发生在中子丰度非常高的条件下(对应电子丰度 $Y_e \lesssim 0.2$).在恒星内部,这种丰中子条件也许可以通过 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 和 $^{21}\text{Ne}(\alpha, n)^{24}\text{Mg}$ 这样的反应在局部实现^[7],但总体上是难以实现的.

因此, 相对而言, r 过程被认为更有可能发生在恒星的超新星爆发过程中^[9-10]. 特别是在上世纪90年代, 人们普遍相信, 超新星爆发过程中诞生的原中子星可以驱动由中微子加热的高熵星风, 那里应该是最可能的 r 过程发生场所^[11-13]. 不过, 2000年之后, 更详细的计算发现原中子星星风几乎不可能同时满足丰中子和高熵两个性质, 因此最多只能形成原子质量数 $A < 110$ 的元素^[14-16], 除非加入一些极为特殊的假设^[17].

作为另一种可能途径, Lattimer和Schramm曾在1974年提出, 一个中子星和一个黑洞发生碰撞的过程中, 由于碰撞之前的潮汐作用, 离心力将会使质量十分可观的物质(他们粗略估计为 $0.05 M_{\odot}$)以极高的速度抛射出来^[18]. 这种抛射物因为直接来自于中子星而具有天然的丰中子性质(电子丰度 $Y_e \sim 0.1$), 将是发生 r 过程的理想场所^[18]. 类似的现象同样可能出现在中子星-黑洞双星系统发生灾难性并合的过程中^[19]. 不过, 需要注意的是, 如果系统中黑洞质量过大或者它的旋转过慢, 都可能将中子星直接吞噬, 而没有潮汐瓦解过程发生. 1975年, Hulse和Taylor发现了第1个双脉冲星系统¹, 极大地提升了对致密星并合事件进行研究的现实意义和必要性^[20]. 很快, Symbalisty和Schramm便在1982年讨论了双中子星并合和 r 过程元素起源的关联性^[21]. 不过, 对这些并合过程所能够产生的抛射物进行精确的性质描述始终是半解析模型无法完成的任务, 有赖于更为强大的计算机数值模拟, 这一步一直要到上世纪90年代才得以实现. 有关抛射物性质的流体力学模拟结果最早见于上世纪90年代的3篇文献^[22-24]. 在这些工作基础上, 1999年Freiburghaus等人进一步计算了发生在抛射物中的核反应过程, 并将其数值结果(r 过程元素丰度分布)与实际观测数据进行了比较, 第1次直观显示了致密星并合过程对理解宇宙中 r 过程元素起源的重要价值^[25].

3 千新星模型的提出和建立

除了合成大量 r 过程元素外, 致密星的并合特别是双中子星的并合还可能导致其他多种天文观测效应. 比如, 自1973年首次公布伽马射线暴的发现以来, 人们在很长一段时间内对这种奇特天文现象的产生原因众说纷纭、莫衷一是. 基于宇宙学起源假设, Blinnikov等^[26]和Paczynski^[27]分别在1984年和1986年率先将它们(目前认为主要是短时限标的伽马暴)和双中子星并合事件相联系. 之后, Eichler等人在1989年系统性地分析了双中子星并合可能引起的多种天文观测效应^[28]. 他们指出, 当一颗中子星的物质被另外一颗吸积的时候, 引力势能的释放将导致大量的中微子辐射. 因此, 来自于两个星体的正反电子中微子将相互碰撞产生正负电子对, 进而与次生光子耦合形成一个火球. 该火球演化最终可产生伽马暴辐射. 基于伽马暴和引力波事件的可能成协, 他们进一步提出可以通过伽马暴的观测事件率来限制双中子星的并合率, 从而为引力波探测率的估计提供依据. 同时, 还可通过考察限制得到的双中子星并合率能否与 r 过程元素丰度的观测值相吻合和自洽, 来验证 r 过程元素的起源假说. Eichler等人所提出的这一系列观点, 均被后来的研究所证实或践行, 尽管某些物理细节可能存在一些差异. 不过, 此处仍然有一个重要的问题没有引起足够的重视, 那就是双中子星并合中形成的 r 过程元素是否可能具有某种更为直接的观测效应?

这个问题直到伽马暴余辉被发现^[29-31]后的第2年(1998年), 才被Li和Paczynski提出

¹Hulse和Taylor通过该系统间接证明了引力波的存在, 获得了1993年诺贝尔物理学奖.

来加以认真考虑^[32]. 不过, 迫使他们考虑这个问题的一个动机竟然是: 他们认为伽马暴的致密星并合起源似乎被当时的观测排除了(因为长暴位于恒星形成区!), 所以需要考虑并合过程还有没有其他的可观测信号. 不管怎样, 他们认为中子星-中子星或中子星-黑洞并合产生的大量r过程元素一定是很不稳定的, 会以各种时标进行放射性衰变. 因此, 类似于 ^{56}Ni 和 ^{56}Co 衰变会导致超新星辐射一样², 致密星并合也很可能会产生一个显著的暂现源辐射, 可作为引力波事件的电磁对应体信号. 不过, 对于具体的计算而言, 这里存在两个主要的不确定因素: 一个是r过程元素的种类及其比例分布情况, 另一个是每种元素衰变时可以有能量被释放. Li和Paczynski假设各种元素的数目相对于它们衰变时标的对数具有平权的分布, 并假设所有元素具有一个相同的能量释放效率因子 f , 从而为并合抛射物给出了一个总的放射性加热率 $\mathcal{E} = fM_{\text{ej}}c^2/t$, 其中 M_{ej} 是抛射物的质量, c 是光速, t 是时间. 在此基础上, 再考虑抛射物的绝热膨胀和辐射损失, 他们最终得到了抛射物的热辐射光变曲线. 结果显示, 对应于抛射物的质量 $M_{\text{ej}} = 0.01 M_{\odot}$, 速度 $0.3c$ 以及不透明度 $\kappa = 0.2 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 辐射的峰值将出现在并合发生后1 d左右. 同时, 依据通常的核反应能量释放效率, 他们取 f 的特征值为0.001, 从而得到辐射的峰值光度高达 $\sim 10^{44} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应温度 $2.5 \times 10^4 \text{ K}$ (辐射主要在紫外波段). 这个辐射信号比普通的超新星更亮更热, 且变化更快. 因此, 这项工作预言了一种全新的天文现象, 可以说是开创了一个新的研究方向.

2005年, Swift卫星首次观测到了短伽马暴的X射线余辉^[34–36], 实现了对短暴的精确定位, 从而引导了后随的紫外光学观测. 短暴所处位置远离宿主星系的特征使其明显不同于长暴, 从而为其致密星并合起源提供了强烈支持. 但是, 后随观测并没有发现Li和Paczynski所预言的那个明亮的紫外光学信号, 其原因在于他们当时尚缺乏可作为参数取值依赖的关于抛射物性质的数值模拟结果, 而过分高估了r过程元素能量释放的效率. 遗憾的是, 尽管相关的数值模拟结果实际上在1998年当年及次年便很快出现^[24–25], 但在之后的10余年时间里, 一直没有人尝试去把这些模拟结果引入到Li和Paczynski的模型当中, 甚至是一般性的模型发展都很少. 仅有Kulkarni在2005年做了一些发散性的探讨, 比如讨论了中子衰变加热的情况, ^{56}Ni 衰变加热的情况, 还讨论了双中子星并合后可能产生一个大质量中子星的情况^[37]. 基于观测的限制, Kulkarni给出的辐射峰值光度在 $\sim 10^{41} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 并且他建议将这种热暂现源辐射命名为巨新星(macronova), 目前仍有不少研究者采用此命名法(为简单起见, 本文不再使用此名称).

2010年之后, 随着美国激光干涉引力波天文台(LIGO)和欧洲引力波探测器Virgo的建设和升级, 引力波探测的实现逐渐成为一件看上去指日可待的事情. 但是, 因为引力波探测器的空间定位能力较差, 迫切需要与之协同的电磁波观测提供定位信息以及天体物理起源证认信息. 因此, 人们对引力波电磁对应体的研究热情日渐高涨. 从Eichler等人的工作开始^[28], 特别是2005年后, 短伽马暴一直是人们讨论最多的一种电磁对应体. 但是, 考虑到短伽马暴喷流的相对论性运动和辐射的准直性, 人们对是否有很大的机会同时观测到引力波和短伽马暴实际上不无担心. 退而求其他, 人们希望存在基本不具方向性的电磁辐射, 这时Li和Paczynski的工作开始受到重视. 为此, Metzger³等^[43]一方面

²1979年, Arnett首次确认 $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ 衰变链是Ia型超新星辐射的能量来源^[33]

³从2007年开始, Metzger一直关注伽马暴的中心能源机制问题, 开始是原中子星的星风^[38–39], 其后是含时吸积盘的演化^[40–41]. 在这个过程中, 开始涉及丰中子物质中的r过程加热^[42].

基于Rosswog等^[24]给出的抛射物密度、温度、电子丰度、种子原子核类型等的分布, 利用r过程动态网格计算方法, 得到了抛射物的放射性能源功率. 综合所有 β 衰变、 α 衰变和原子核裂变过程, 能源功率的时间演化的确表现为幂律衰减的形式: $\mathcal{E} \propto t^{-1.3}$. 另一方面, 利用Kasen等^[44]开发的动态辐射转移程序计算了辐射产生的多波段光变曲线. 结果, Metzger等^[43]发现超铁元素衰变的能量释放效率比Li和Paczynski采用的典型值低很多, 仅为 $f \sim 10^{-6}$ 的量级. 因此, 辐射的峰值光度只有几倍于 $10^{41} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ (与Kulkarni设想的相当), 辐射主要集中在光学波段. 这个光度大概是中子星爱丁顿光度的1000倍, 因此他们建议将这种光学暂现源辐射命名为千新星(kilonova). 鉴于该项工作的重要性和完善程度, 目前千新星一词已被学界普遍使用.

Metzger等^[43]的数值计算结果和其他半解析结果(相关方法可参考文献[3,45-47])的对比表明, 辐射后期的光谱将会明显偏离黑体辐射近似. 但同时, 这个对比也表明, 半解析方法在总体上能够反映辐射的基本特征, 是一种简便合理的近似计算方法.

4 千新星模型的完善和发展

2010年后, 逐渐有多个研究小组在流体动力学抛射、核合成反应以及辐射转移等课题上对千新星模型开展了深入广泛的研究, 特别是在2013年达到了一个研究的高潮. 比如, 考察了中子星物态以及质量比对抛射物性质的影响, 考察了激波加热和中微子照射对核合成过程的影响等^[48-58]. 这些研究揭示, 双中子星并合潮汐抛射物的质量大概在 $\sim (10^{-4} - 10^{-2}) M_{\odot}$ (依赖于星体质量比、双星轨道偏心率等), 速度为 $\sim (0.15 - 0.35)c$. 对于中子星-黑洞并合, 如果两者质量比较大(但不能太大), 潮汐抛射物的质量可能可以接近 $\sim 0.1 M_{\odot}$ ^[59].

2013年, Kasen等人指出当r过程可以跨过位于原子质量数 $A = 130$ 的第2个丰度分布峰的时候, 并合抛射物中将出现相当数量的镧系和锕系元素, 它们具有非常复杂的价电子结构^[60]. 通过计算这些元素的上千万条原子跃迁谱线的发生率, 他们发现抛射物的不透明度将主要决定于这些元素的束缚-束缚跃迁过程, 紫外光学波段不透明度高达 $\sim (10 - 100) \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 的量级, 远高于由铁族元素组成的物质(比如普通的超新星抛射物). 随后, Barnes和Kasen计算了相应的千新星辐射光谱和光变曲线. 由于更高的不透明度阻碍了辐射的扩散, 辐射峰值出现的时间将被显著滞后(约为一个星期)^[61]. 此时, 辐射光球面积也已显著扩大, 因此主要辐射波段将从可见光转移到近红外波段. 在同一篇文章中, 他们还粗略考虑到, 除了由于潮汐作用产生的部分外, 并合抛射物还可能部分来自于吸积盘的盘风(外流), 其性质与潮汐抛射物有所不同. 由于中微子照射导致中子的 β 衰变, 盘风的电子丰度可能较大($Y_e \gtrsim 0.4$), 因此不利于r过程的发生. 但是, 如果它可以合成较大质量的 ^{56}Ni (如文献[40])且不透明度由铁族元素主导的话, 那么这个盘风成分将能够贡献一个峰值出现在1 d左右的额外辐射成分. 同年, Tanaka和Hotokezaka还进一步考察了所有r过程元素对抛射物不透明度的贡献及对辐射造成的影响^[62].

并合发生后, 在并合产物(大质量中子星或黑洞)周围会存在一个质量约为 $(10^{-3} - 0.1) M_{\odot}$ 的物质环. 并合产物对这些物质的快速吸积, 一直被认为是驱动短伽玛暴的引擎机制^[63-65]. 不过, 由吸积所导致的具体的物质外流和能量释放过程应该比文献[61]中考虑的更为复杂: (1)在最初的0.1 s内, 来自吸积盘和中心大质量中子星(如

果存在)的中微子辐射将加热吸积盘表面的物质,形成盘风^[40,66–69].这个由中微子驱动的盘风,电子丰度较高 $Y_e \sim 0.3 - 0.4$,无法合成原子质量数 $A > 130$ 的元素,但可能合成一定质量的 $50 < A < 130$ 元素(但 ^{56}Ni 的比例可能很小甚至没有)^[70–73].由于中微子将主要沿着光深较小的方向(轴向)逃逸,所以中微子驱动的盘风将主要沿轴向传播.同时,中微子辐射对赤道方向上物质(比如潮汐抛射物)的电子丰度影响较小;(2)大概1 s时,由于粘滞耗散和 α 粒子与自由核子的复合将进一步加热吸积盘(从10 ms开始就逐渐超过中微子加热),可能驱动更加强烈的物质外流(约占吸积物质的百分之几)^[41,74–76].这个外流原则上具有较低电子丰度 $Y_e \sim 0.2$,可使r过程有效发生,因此它的元素组成与潮汐抛射物可能差别不大,最大的不同是盘风中可能出现1%的氦物质^[77].但是,这些结论实际上高度依赖于并合后产生的大质量中子星的存在时间.一方面,中子星辐射中微子的加热效应会提高吸积盘外流的质量.另一方面,只要中子星的存在时间超过了0.1 s,中子星的中微子辐射就可以有效提升(第2种)盘风的电子丰度,抑制镧系元素的生成,从而降低不透明度^[78–79].不过,这个时候 $A < 130$ 的元素仍然可以在盘风中大量合成.总的说来,最终大概有20%的吸积盘物质可以通过盘风的形式被抛射出去,其质量可能会超过动力学抛射物.但是,盘风物质的速度偏低,约为 $\sim (0.03 - 0.1)c$ ^[80].由于轴向(主要是 30° 内)盘风很可能具有较低的不透明度,因此在由潮汐抛射物和赤道方向盘风贡献的偏红色辐射出现之前,可能存在一个偏蓝色的辐射成分,峰值时间约在1 d左右(该辐射成分与最初的模型预言类似).

对于动力学抛射物,两个中子星并合的情况要比中子星-黑洞并合更为复杂一些.因为除了潮汐抛射物外,两个中子星碰撞到一起的一刹那,在其接触面发生的挤压作用将产生一对强大的激波,也可以加热相当一部分物质.在热压作用下,这些物质将沿着垂直轨道平面的方向抛射^[49,53–54].对于这个挤压抛射物,其质量和速度与潮汐抛射物相当.但是,由于激波加热和中微子照射,它的电子丰度可能较大(也许 $Y_e > 0.25$)^[55–58],因此镧系元素含量应该也是非常低的,具有蓝色辐射的特性.当然,如果并合产物从一开始就变成了黑洞的话,那么这个轴向的挤压抛射物也有可能不会出现^[48].

经过上述这些研究,人们在2014至2015年间逐渐形成一个共识,即千新星辐射可能包含一个1 d左右的蓝色辐射成分和一个一星期左右的红色辐射成分^[81].而蓝色成分的出现,无论是盘风还是挤压抛射物,都要求并合产物至少在一段时间(比如0.1 s)内是一个大质量中子星,而没有瞬时形成黑洞.因此,原则上,可以通过观测蓝色成分与红色成分的比例来限制并合后中子星存在的时间^[4]、帮助判断前身星是一对中子星还是一个中子星和一个黑洞.不过,考虑到潮汐抛射物的速度往往是最大的,因此红色成分很容易遮挡蓝色成分.蓝色成分即便存在,要能够被显著看到,也要求观测方向不能太靠近系统的轨道平面.此外,考虑到抛射物(特别是挤压动力学成分)最外层的自由中子可能在被原子核捕获之前发生衰变,因此也预期在并合后数小时可能出现一个紫外波段的前兆辐射信号^[82].

5 并合产物和中心能源

基于现有的物理理论,人们对双中子星并合产物的认识仍然存在很大的不确定性^[83],一个关键的考察指标是中子星(广义概念)的可能质量上限.考虑到并合后星体

的快速旋转, 其最大极限质量可以写为 $M_{\max} = bM_{\text{TOV}}$, 其中 M_{TOV} 是静态中子星的质量上限、系数 b 则决定于旋转的频率以及是否存在较差旋转. 将并合产物的质量记为 M_{rem} , 若 $M_{\text{rem}} > M_{\max}$, 则并合产物直接为黑洞. 若 $M_{\text{TOV}} < M_{\text{rem}} < M_{\max}$, 则中子星将短暂存在一段时间. 具体而言, 由较差旋转支撑的中子星常被称为极大质量(hypermassive)中子星, 而由均匀旋转支撑的中子星则称为超大质量(supermassive)中子星. 最后, 若 $M_{\text{rem}} < M_{\text{TOV}}$, 则中子星将长期稳定存在. 考虑到并合产物对抛射物性质的重要影响, 人们相信可以通过对千新星的观测来限制中子星的质量上限, 从而对其物态做出限制.

类似和相关的研究思路实际上早在千新星被观测之前就已经被广泛讨论. 1998年, Dai和Lu提出, 伽马暴的暴后产物如果是中子星的话, 该中子星的自转能损将为伽马暴喷流物质持续注入能量, 从而使其早期余辉辐射的衰减变缓^[84–85]. 从2005年开始, 这个预言中的余辉变平特征被Swift卫星大量观测到, 特别是在短伽马暴的余辉中也同样被发现^[86–87]. 与此同时, Swift卫星还在短暴X射线余辉中发现了显著的耀发现象^[88–89], 表明并合产物可以存在长期的活动性, 这可以被视为是其中子星属性的一个强有力证据^[90–91]. 于是, 后来有更多的研究基于伽马暴余辉观测进一步探讨了暴后中子星的可能性质, 指向于它们很可能是一种具有毫秒旋转周期的高度磁化中子星(磁星)^[92–99].

与短暴相关的暴后中子星研究, 实际上着重强调了它作为暴后持续能源的重要属性. 这种效应当然也可能对并合抛射物的辐射造成影响. 2005年, Kulkarni简单讨论过这种的效应^[37], 但是他所采用的中子星自转频率(10 Hz)较低, 不太符合双中子星并合产物处于极限旋转状态的性质. 2013年, Yu等人在并合形成了一颗毫秒磁星的考虑下, 详细研究了该中子星对并合抛射物动力学和辐射的重要影响, 揭示中子星能源在某些情况下比放射性能源更为重要^[100]. 这里, 不同于光学薄的伽马暴喷流物质, 并合抛射物的质量较大, 在相当一段时间(1 d到一个星期)内是光学厚的. 因此, 从中子星注入到抛射物的能量将被首先热化, 提升并合抛射物的热辐射, 使其光度可能显著高于 $10^{41} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, 甚至达到与超新星相当的程度. 当然, 考虑到中子星参数包括其存在寿命的不确定性, 统计上辐射光度应该具有一个比较宽的变化范围. 因此, Yu等人建议将抛射物的热暂现源辐射重新命名为一个更为广义的可以涵盖各种能源机制和光度数值的称呼: 并合新星(mergernova), 其中可包含由放射性能源主导的部分(作为一种子类型, 仍可称为千新星).

并合后中子星主要的连续能量输出方式很可能是其自转能的损失(间歇性能量释放则有可能来自于磁能), 但具体的能量传输以及注入到并合抛射物的过程是复杂的. 原则上讲, 中子星的自转减慢将首先驱动一个携带大量正负电子对的坡印廷外流. 坡印廷流中发生的磁重联将逐渐加速物质, 使其形成具有相对论性速度的星风. 该星风打到并合抛射物的底部, 将形成一对正反激波^[101–102]. 其中反向激波向内运动热化星风物质, 正向激波在抛射物中传播并最终从抛射物表面穿出, 在星风光度足够高的情况下可能产生可观测的X射线激波突破辐射^[101]. 在相对更长的时标上, 从星风与抛射物的接触面开始, 已被热化的星风的热量将通过热传递逐渐向抛射物外部扩散. 在接触面两边形成热和力学(压强)平衡, 在抛射物中形成热梯度和压强梯度. 热传递的一个重要/主要途径是光子的扩散, 因此热梯度和压强梯度的消除时间决定于光子扩散的时标 t_d . 这些光

子最初来自于热星风区域电子的同步辐射和逆康普顿散射, 然后一部分进入抛射物后被吸收, 另一部分反射回到星风区域. 在 $t < t_d$ 时, 所有光子都将被热化为热光子, 因此粗略模型下可以不必十分在意热星风区域的具体非热辐射过程, 甚至不必区分星风和抛射物(可视为一个整体的火球). 不过, 考虑到X射线波段的光子在被抛射物吸收热化之前可部分用于电离抛射物中的原子^[103], 因此对星风非热光子的产生和辐射转移过程的计算仍然是细致模型所需要的.

近来, 受中子星方案的启发, 也有作者考虑在并合产生黑洞的情况下, 如果存在一定的回落吸积过程, 那么吸积的反馈机制也将可能为并合抛射物提供额外的能源^[104–105]. 但是, 由于吸积的时标一般显著短于热扩散时标, 这种能源造成的热辐射将具有非常快速的衰减, 后期的辐射很可能仍由放射性能源主导.

6 发现候选体

2013年不仅是千新星理论获得大发展的一年, 也是千新星观测的突破年. 2013年6月3日, Swift卫星上的BAT探测器被短暴GRB130603B触发, 该暴的瞬时辐射时间为0.18 s. 一周后, 在该暴发生的位置, 哈勃望远镜发现了一个明亮的近红外辐射源^[106–107]. 相比于理论预期的GRB130603B近红外余辉, 该近红外源的辐射流量具有显著的超出, 因而被认为是千新星辐射的一个重要信号. 尽管如此, 其能源是否就是放射性重元素的衰变仍是有待商榷的, 因为GRB130603B的X射线余辉在最初1000 s具有明显变平的特征, 说明暴后中子星的能量注入很可能发挥了重要的作用. 因此, Fan等人研究认为相应的近红外超出辐射也很有可能是中子星供能的并合新星辐射^[108]. 2016年, Troja等人报道, GRB140903A的余辉中也出现了额外的光学红外暂现源信号, 与GRB130603B的情况非常类似^[109].

实事求是地讲, 2013年人们对GRB130603B事件的关注及对其近红外辐射超出的理论解释, 一定程度上正是当年千新星理论研究高潮影响下的一个结果. 实际上, 在此之前的历史观测中, 很有可能存在类似的观测事例, 只是当时未能引起足够的重视. 因此, 紫金山天文台的一个研究小组对短伽马暴余辉的历史数据开展了系统性的回顾审视, 相继发现了两个疑似具有千新星信号的观测样本: GRB060614^[110–111]和GRB050709^[112]. 在这两个样本的红外光学余辉中都出现了热辐射成分的超出. 另一方面, 基于中子星作为能源的考虑, 星风的X射线辐射(如有)在并合抛射物逐渐变为光学薄后将可能被直接观测到, 即在红外光学超出辐射的同时, 可能出现X射线的光变鼓包. 根据这一特点, Gao等人发现了更多的中子星供能的并合新星候选体: GRB050724、GRB061006、GRB070714B、GRB080503^[113–114].

考虑到并合新星(千新星)辐射的近似各向同性和短伽马暴辐射的方向性, 理论上可以期待能够观测到独立的并合新星(千新星)辐射现象, 而不与短伽马暴成协. 随着一些快速响应的光学巡天项目⁴的开展, 一类非常明亮的又具有快速光变特征的光学暂现源被陆续发现^[115–116]. 这些源可能是一类非常奇特的超新星(如包层被深度剥离的恒星的

⁴如All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN)、Zwicky Transient Facility (ZTF)、Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS)和Robotic Optical Transient Search Experiment (ROTSE)等.

爆发),但也很有可能就是由并合后中子星供能的并合新星辐射^[47],或者各种物理起源都有. 类似的暂现源现象近年来还在不断地被发现^[117–119].

7 GW170817事件

从2015年9月14日LIGO探测到第1例双黑洞并合引力波事件开始,人们正式进入了具有引力波探测能力的多信使天文学时代^[120]. 2017年8月17日, LIGO探测到了第1例双中子星并合的引力波事件,严格地讲,是两个具有中子星质量的致密天体的并合^[121]. 此事件发生时, Virgo也已处于工作状态,其零探测结果帮助人们大大缩小了对该次引力波信号的空间定位误差. GW170817事件1.7 s后, Fermi卫星上的GBM探测器在相同区域探测到了一个短伽马暴^[122–125],确切证实了短伽马暴的致密星并合起源,并极大地提高了该次并合事件中有中子星参与的可能性. 通过对引力波空间误差范围和距离范围内已知近邻星系的小视场搜寻,位于智利Las Campanas天文台的1 m口径Swope望远镜率先在10.9 h后在星系NGC4993附近发现了一个光学暂现源(SSS17a)^[126]. 星系NGC4993的距离与引力波信号的光度距离(40 Mpc)基本一致,支持了两者之间的相关性. 在发现SSS17a后的1 h内,还有其他5个小组也先后独立做出了同样的发现,分别是DECAM^[127], DLT40^[128], LCO^[129], VISTA^[130]和MASTER^[131]. 随后,总计70架红外、光学、紫外望远镜包括中国南极天文中心安装在南极冰穹的AST3望远镜陆续加入到后随观测中,为这个紫外-光学-红外暂现源记录下了十分丰富的观测数据^[130,132–147],详细介绍见文献[148]. 目前,这个暂现源被正式命名为AT2017gfo.

AT2017gfo的辐射至少在最初几天表现出了良好的黑体辐射特征,峰值位于紫外光学波段^[137,142]. 之后辐射慢慢进入近红外,大概一个星期后光谱开始偏离黑体谱^[130,133,143]. 因此,对于后期热光度的估计,不同的文献基于不同的假设可能给出截然不同的结果. 但无论如何,人们发现,如果仅用一套参数,千新星模型无法完美解释所有的AT2017gfo观测结果. 因此,在几乎所有文献的理论解读中,人们大多采用了具有不同不透明度的两个辐射成分相叠加的方案^[135–136,139,149–151]. 这一方案与2013至2015年间建立起来的千新星标准模型是一致的,即由挤压抛射物和盘风贡献早期蓝色辐射,由潮汐抛射物贡献后期红色辐射. 其中对盘风成分的归属可能存在不同见解,因为红色成分所要求的质量较大,是潮汐抛射物单独不能解释的. 最后,通过协调不同观测小组之间的观测定标和利用最大数据量限制模型参数, Villar等人从拟合角度发现3个辐射成分可以获得更好的拟合结果^[152],具体的参数为: 蓝色 $\kappa = 0.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $M_{\text{ej}} = 0.016 M_{\odot}$ 、 $v = 0.27c$; 紫色 $\kappa = 3 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $M_{\text{ej}} = 0.04 M_{\odot}$ 、 $v = 0.14c$; 红色 $\kappa = 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $M_{\text{ej}} = 0.009 M_{\odot}$ 、 $v = 0.08c$, 3个成分叠加的总质量为 $0.065 M_{\odot}$. 无论如何,低不透明度抛射物成分的显著存在,表明此次引力波事件应该是两个中子星并合的结果,并且并合后的中子星至少存在了一定的时间. 比铁族元素更高的不透明度以及具体的光谱特征也明确表明抛射物中存在r过程元素.

但是,尽管单纯由放射性供能的模型看上去可以为AT2017gfo观测提供较好的拟合结果,但拟合所需要的参数数值实际上仍然存在一些不尽合理的地方并指向了并合后中子星的长时间存在. 首先,由于AT2017gfo峰值光度和峰值时间的限制,其抛射物的质量被要求不得低于 $\sim 0.06 M_{\odot}$. 考虑到双中子星并合可能的事件发生

率 $\sim 1500 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[121], 这一抛射物质量很可能使得宇宙中r过程元素的丰度高于目前的观测值^[153]. 其次, 对于双中子星的并合而言, 其实并不容易产生这么多的抛射物^[145], 除非并合产物是长时间存在的中子星并且驱动了很大的吸积盘风^[154–155]. 相对而言, 动力学抛射物是次要的. 再次, 仅具有中等甚至较低数值的不透明度也强烈要求抛射物受到了并合后中子星中微子辐射的长时间照射. 这里, 还需要注意的是, 在镧系元素的形成受到抑制的同时, 其他r过程元素的产量也会受到不同程度的抑制^[55,72], 因此对抛射物质量的要求可能会进一步提高. 最后, 观测给出的抛射物速度似乎比理论预期要高不少, 至少对于盘风成分而言.

从上面的分析来看, 并合产物一定没有马上变成黑洞, 而应该是一个大质量的中子星. 不少人认为, 随着星体的自转减慢, 这个中子星还是会非常快地塌缩为黑洞, 并可以由此得到中子星的最大质量^[156–158]. 但是, 一定程度上讲这种观点只是人们的一种主观判断, 实际上并没有证据可以排除这个大质量中子星可以一直稳定存在. 相反, 在长期存在的情况下, 它能够通过提供额外的能源供给使模型变得更为自洽. 具体来说, 一种情况是, AT2017gfo的所有辐射可能均由中子星供能, 而抛射物仍然具有两种主要的不透明度^[159]. 这种情况下, 抛射物的质量可以远低于 $0.01 M_{\odot}$. 另一种情况是, AT2017gfo具有混合型能源, 即其早期辐射由放射性能源供给, 而后期辐射则由中子星能源供给, 这也可以适当降低对抛射物质量的要求^[160]. 这里, 中子星辐射成分的滞后是其全部能量均从抛射物底部开始扩散的自然结果. 换句话说, 抛射物总体上只要一个基本均匀的中等数值不透明度. 该不透明度的造成可能是中子星中微子辐射和星风X射线辐射电离效应共同作用的结果.

当然, 无论是上述哪种情况, 这个长期存在的中子星很可能具有较为奇特的物理属性, 比如具有 $\sim 2.6 M_{\odot}$ 以上的质量, 具有毫秒量级的旋转周期, 具有相对较低的磁偶极辐射光度 $\sim (10^{41} - 10^{42}) \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ (对应于 $\sim (10^{11} - 10^{12}) \text{ Gs}$ 的表面偶极磁场有效强度), 并且其自转减慢很可能由持续的引力波辐射主导等. 这些特殊性质将对中子星物理(如物态方程、磁场结构等)提供强烈的限制^[161].

8 结语

AT2017gfo的发现及其与GW170817引力波事件的联合观测翻开了多信使天文学研究的新篇章, 也正式开启了并合新星研究的新时代. 在这样一个时刻, 温故而知新. 当我们回顾过去数十年特别是过去20 yr的研究历程, 不难发现, 每一次重大理论创新的背后, 无不有着观测上获得突破的深刻背景, 从双脉冲星系统的发现、伽马暴余辉的发现、短暴余辉的发现、引力波探测器的成功升级、并合新星候选体的发现、再到AT2017gfo的发现, 莫不如此. 而与此同时, 理论研究对于天文观测的指导意义也同样举足轻重. 从GRB130603B事件到GW170817事件, 不能不说已有的理论预期深刻地影响了人们对观测结果的思考解读方向, 使得人们在观测永远存在局限哪怕是极为匮乏的情况下也能迅速揭示出其中蕴含的重大科学意义. 窥一斑而见全豹, 从并合新星的研究, 使我们可以清楚地看到天文学科所具有的这种理论和观测紧密结合、相辅相成的发展道路.

对AT2017gfo乃至GRB130603B等候选体的理论分析可能仍然存在着一些有待深入的地方, 但只基于少量个体的认识始终可能是带有偏见乃至误入歧途的. 并且, 毫无疑

问, 并合新星的研究并不是孤立的, 它们与短伽马暴及其余辉、引力波事件的关联性, 无论对于观测还是理论而言都是至关重要的, 相关问题可参见Geng等人最新的综述^[162]. 我们甚至还可以期待未来或许能够观测到由并合抛射物本身与星际介质相互作用所产生的余辉辐射^[163–167]. 无论如何, 除了更加细致的理论模拟外, 并合新星研究的未来无疑还要依靠更多的观测、更快的观测. 令人感到振奋的是, 我国正在大力推动或建设中的两个雄心勃勃的暂现源全天候监测项目(引力波事件高能电磁对应体全天监测器GECAM和光学司天工程)有望为整个天空留下一份宝贵的监测记录, 将能够帮助我们去发现探测能力范围内的任何一次并合新星及成协短伽马暴事件.

此外, 借助于“慧眼”硬X射线调制望远镜(insight-HXMT)、中法空间变源监视卫星(SVOM)及其地面光学探测系统GWAC、爱因斯坦探针(EP)、X射线时变和偏振探测器(eXTP)等一系列暂现源捕捉设备, 以并合新星等为代表的时域天文将很可能是中国天文学家逐鹿世界天文舞台的一个重要方向.

致谢 本文由作者在2018年暑期访问香港大学物理系期间写作完成, 感谢郑广生教授的接待和讨论. 感谢李少泽和匿名审稿人对文章的仔细阅读和修改, 感谢刘建峰在文稿排版方面给予的帮助.

参考文献

- [1] Berger E. *ARA&A*, 2014, 52: 43
- [2] Fernández R, Metzger B D. *ARNPS*, 2016, 66: 23
- [3] Metzger B D. *LRR*, 2017, 20: 3
- [4] Metzger B D. *arXiv:1710.05931*
- [5] Gamow G. *Nature*, 1948, 162: 680
- [6] Alpher R A, Bethe H, Gamow G. *PhRv*, 1948, 73: 803
- [7] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A, et al. *RvMP*, 1957, 29: 547
- [8] Cameron A G W. *PASP*, 1957, 69: 201
- [9] Schramm D N. *ApJ*, 1973, 185: 293
- [10] Sato K. *PThPh*, 1974, 51: 726
- [11] Meyer B S, Mathews G J, Howard W M, et al. *ApJ*, 1992, 399: 656
- [12] Woosley S E, Wilson J R, Mathews G J, et al. *ApJ*, 1994, 433: 229
- [13] Takahashi K, Witt J, Janka H T. *A&A*, 1994, 286: 857
- [14] Martínez-Pinedo G, Fischer T, Lohs A, et al. *PhRvL*, 2012, 109: 251104
- [15] Roberts L F, Reddy S, Shen G. *PhRvC*, 2012, 86: 065803
- [16] Wanaajo S, Janka H T, Müller B. *ApJ*, 2011, 726: L15
- [17] Winteler C, Käppeli R, Perego A, et al. *ApJ*, 2012, 750: L22
- [18] Lattimer J M, Schramm D N. *ApJ*, 1974, 192: L145
- [19] Lattimer J M, Schramm D N. *ApJ*, 1976, 210: 549
- [20] Hulse R A, Taylor J H. *ApJ*, 1975, 195: L51
- [21] Symbalisty E, Schramm D N. *ApJ*, 1982, 22: 143
- [22] Davies M B, Benz W, Hills J G. *ApJ*, 1993, 411: 285
- [23] Ruffert M, Rampp M, Janka H T. *A&A*, 1997, 321: 991
- [24] Rosswog S, Liebendörfer M, Thielemann F K, et al. *A&A*, 1999, 341: 499
- [25] Freiburghaus C, Rosswog S, Thielemann F K. *ApJ*, 1999, 525: L121
- [26] Blinnikov S I, Novikov I D, Perevodchikova T V, et al. *SvAL*, 1984, 10: 177
- [27] Paczynski B. *ApJ*, 1986, 308: L43

- [28] Eichler D, Livio M, Piran T, et al. *Natur*, 1989, 340: 126
- [29] Costa E, Frontera F, Heise J, et al. *Natur*, 1997, 387: 783
- [30] Van Paradijs J, Groot P J, Galama T, et al. *Natur*, 1997, 386: 686
- [31] Galama T, Groot P J, Van Paradijs J, et al. *Natur*, 1997, 387: 479
- [32] Li L X, Paczyński B. *ApJ*, 1998, 507: L59
- [33] Arnett W D. *ApJ*, 1979, 230: L37
- [34] Fox D B, Frail D A, Price P A, et al. *Natur*, 2005, 437: 845
- [35] Hjorth J, Watson D, Fynbo J P U, et al. *Natur*, 2005, 437: 859
- [36] Berger E, Price P A, Cenko S B, et al. *Natur*, 2005, 438: 988
- [37] Kulkarni S R. *arXiv:astro-ph/0510256*
- [38] Metzger B D, Thompson T A, Quataert E. *ApJ*, 2007, 659: 561
- [39] Metzger B D, Quataert E, Thompson T A. *MNRAS*, 2008, 385: 1455
- [40] Metzger B D, Piro A L, Quataert E. *MNRAS*, 2008, 390: 781
- [41] Metzger B D, Piro A L, Quataert E. *MNRAS*, 2009, 396: 304
- [42] Metzger B D, Arcones A, Quataert E, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 2771
- [43] Metzger B D, Martínez-Pinedo G, Darbha S, et al. *MNRAS*, 2010, 406: 2650
- [44] Kasen D, Thomas R C, Nugent P. *ApJ*, 2006, 651: 366
- [45] Arnett W D. *ApJ*, 1982, 253: 785
- [46] Kasen D, Bildsten L. *ApJ*, 2010, 717: 245
- [47] Yu Y W, Li S Z, Dai Z G. *ApJ*, 2015, 806: L6
- [48] Shibata M, Taniguchi K. *PhRvD*, 2006, 73: 064027
- [49] Oechslin R, Janka H T. *MNRAS*, 2006, 368: 1489
- [50] Roberts L F, Kasen D, Lee W H, et al. *ApJ*, 2011, 736: L21
- [51] Goriely S, Bauswein A, Janka H T. *ApJ*, 2011, 738: L32
- [52] Korobkin O, Rosswog S, Arcones A, et al. *MNRAS*, 2012, 426: 1940
- [53] Bauswein A, Baumgarte T W, Janka H T. *PhRvL*, 2013, 111: 131101
- [54] Hotokezaka K, Kiuchi K, Kyutoku K, et al. *PhRvD*, 2013, 87: 024001
- [55] Wanaajo S, Sekiguchi Y, Nishimura N, et al. *ApJ*, 2014, 789: L39
- [56] Goriely S, Bauswein A, Just O, et al. *MNRAS*, 2015, 452: 3894
- [57] Sekiguchi Y, Kiuchi K, Kyutoku K, et al. *PhRvD*, 2016, 93: 124046
- [58] Radice D, Galeazzi F, Lippuner J, et al. *MNRAS*, 2016, 460: 3255
- [59] Kyutoku K, Ioka K, Okawa H, et al. *PhRvD*, 2015, 92: 044028
- [60] Kasen D, Badnell N R, Barnes J. *ApJ*, 2013, 774: 25
- [61] Barnes J, Kasen D. *ApJ*, 2013, 775: 18
- [62] Tanaka M, Hotokezaka K. *ApJ*, 2013, 775: 113
- [63] Narayan R, Paczyński B, Piran T. *ApJ*, 1992, 395: L83
- [64] Narayan R, Piran T, Kumar P. *ApJ*, 2001, 557: 949
- [65] Rosswog S, Ramirez-Ruiz E, Davies M B. *MNRAS*, 2003, 345: 1077
- [66] McLaughlin G C, Surman R. *NuPhA*, 2005, 758: 189
- [67] Dessart L, Ott C D, Burrows A, et al. *ApJ*, 2009, 690: 1681
- [68] Kizivat L T, Martínez-Pinedo G, Langanke K, et al. *PhRvC*, 2010, 81: 025802
- [69] Wanaajo S, Janka H T. *ApJ*, 2012, 746: 180
- [70] Surman R, McLaughlin G C, Ruffert M, et al. *ApJ*, 2008, 679: L117
- [71] Rosswog S, Korobkin O, Arcones A, et al. *MNRAS*, 2014, 439: 744
- [72] Grossman D, Korobkin O, Rosswog S, et al. *MNRAS*, 2014, 439: 757
- [73] Perego A, Rosswog S, Cabezón R M, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 3134
- [74] Lee W H, Ramirez-Ruiz E. *NJPh*, 2007, 9: 17
- [75] Beloborodov A M. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 1054: 51
- [76] Lee W H, Ramirez-Ruiz E, López-Cámara D. *ApJ*, 2009, 699: L93
- [77] Fernández R, Metzger B D. *MNRAS*, 2013, 435: 502

- [78] Metzger B D, Fernández R. MNRAS, 2014, 441: 3444
- [79] Martin D, Perego A, Arcones A, et al. ApJ, 2015, 813: 2
- [80] Siegel D M, Metzger B D. PhRvL, 2017, 119: 231102
- [81] Kasen D, Fernández R, Metzger B D. MNRAS, 2015, 450: 1777
- [82] Metzger B D, Bauswein A, Goriely S, et al. MNRAS, 2015, 446: 1115
- [83] Piro A L, Giacomazzo B, Perna R. ApJ, 2017, 844: L19
- [84] Dai Z G, Lu T. A&A, 1998, 333: L87
- [85] Dai Z G, Lu T. PhRvL, 1998, 81: 4301
- [86] Zhang B, Fan Y Z, Dyks J, et al. ApJ, 2006, 642: 354
- [87] Fan Y Z, Xu D. MNRAS, 2006, 372: L19
- [88] Burrows D N, Romano P, Falcone A, et al. Sci, 2005, 309: 1833
- [89] Nousek J A, Kouveliotou C, Grupe D, et al. ApJ, 2006, 642: 389
- [90] Dai Z G, Wang X Y, Wu X F, et al. Sci, 2006, 311: 1127
- [91] Gao W H, Fan Y Z. ChJAA, 2006, 6: 513
- [92] Lyons N, O'Brien P T, Zhang B, et al. MNRAS, 2010, 402: 705
- [93] Yu Y W, Cheng K S, Cao X F. ApJ, 2010, 715: 477
- [94] Rowlinson A, O'Brien P T, Tanvir N R, et al. MNRAS, 2010, 409: 531
- [95] Bucciantini N, Metzger B D, Thompson T A, et al. MNRAS, 2012, 419: 1537
- [96] Rowlinson A, O'Brien P T, Metzger B D, et al. MNRAS, 2013, 430: 1061
- [97] Gompertz B P, O'Brien P T, Wynn G A, et al. MNRAS, 2013, 431: 1745
- [98] Gompertz B P, Van der Horst A J, O'Brien P T, et al. MNRAS, 2015, 448: 629
- [99] Lü H J, Zhang B, Lei W H, et al. ApJ, 2015, 805: 89
- [100] Yu Y W, Zhang B, Gao H. ApJ, 2013, 776: L40
- [101] Li S Z, Yu Y W. ApJ, 2016, 819: 120
- [102] Siegel D M, Cioffi R. ApJ, 2016, 819: 14
- [103] Metzger B D, Piro A L. MNRAS, 2014, 439: 3916
- [104] Ma S B, Lei W H, Gao H, et al. ApJ, 2018, 852: L5
- [105] Song C Y, Liu T, Li A. MNRAS, 2018, 477: 2173
- [106] Tanvir N R, Levan A J, Fruchter A S, et al. Natur, 2013, 500: 547
- [107] Berger E, Fong W, Chornock R. ApJ, 2013, 774: L23
- [108] Fan Y Z, Yu Y W, Xu D, et al. ApJ, 2013, 779: L25
- [109] Troja E, Sakamoto T, Cenko S B, et al. ApJ, 2016, 827: 102
- [110] Jin Z P, Li X, Cano Z, et al. ApJ, 2015, 811: L22
- [111] Yang B, Jin Z P, Li X, et al. NatCo, 2015, 6: 7323
- [112] Jin Z P, Hotokezaka K, Li X, et al. NatCo, 2016, 7: 12898
- [113] Gao H, Ding X, Wu X F, et al. ApJ, 2015, 807: 163
- [114] Gao H, Zhang B, Lü H J, et al. ApJ, 2017, 837: 50
- [115] Drout M R, Chornock R, Soderberg A M, et al. ApJ, 2014, 794: 23
- [116] Vinkó J, Yuan F, Quimby R M, et al. ApJ, 2015, 798: 12
- [117] Pursiainen M, Childress M, Smith M, et al. MNRAS, 2018, 481: 894
- [118] Rest A, Garnavich P M, Khatami D, et al. NatAs, 2018, 2: 307
- [119] Prentice S J, Maguire K, Smartt S J, et al. ApJ, 2018, 865: L3
- [120] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. PhRvL, 2016, 116: 061102
- [121] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. ApJ, 2017, 848: L13
- [122] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. PhRvL, 2017, 119: 161101
- [123] Goldstein A, Veres P, Burns E, et al. ApJ, 2017, 848: L14
- [124] Savchenko V, Ferrigno C, Kuulkers E, et al. ApJ, 2017, 848: L15
- [125] Zhang B B, Zhang B, Sun H, et al. NatCo, 2018, 9: 447
- [126] Coulter D A, Foley R J, Kilpatrick C D, et al. Sci, 2017, 358: 1556
- [127] Allam S, Annis E, Berger D, et al. GCN, 2017, 21530

- [128] Yang S, Stefano V, David S, et al. GCN, 2017, 21531
- [129] Arcavi I, Hosseinzadeh G, Howell D A, et al. Natur, 2017, 551: 64
- [130] Tanvir N R, Levan A J, González-Fernández C, et al. ApJ, 2017, 848: L27
- [131] Lipunov V M, Gorbovskoy E, Korniov V G, et al. GCN, 2017, 21546
- [132] Andreoni I, Ackley K, Cooke J, et al. PASA, 2017, 34: e069
- [133] Chornock R, Berger E, Kasen D, et al. ApJ, 2017, 848: L19
- [134] Covino S, Wiersema K, Fan Y Z, et al. NatAs, 2017, 1: 791
- [135] Cowperthwaite P S, Berger E, Villar V A, et al. ApJ, 2017, 848: L17
- [136] Drout M R, Piro A L, Shappee B J, et al. Sci, 2017, 358: 1570
- [137] Evans P A, Cenko S B, Kennea J A, et al. Sci, 2017, 358: 1565
- [138] Hu L, Wu X F, Andreoni I, et al. Science Bulletin, 2017, 62: 1433
- [139] Kasliwal M M, Nakar E, Singer L P, et al. Sci, 2017, 358: 1559
- [140] Kilpatrick C D, Foley R J, Kasen D, et al. Sci, 2017, 358: 1583
- [141] Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. ApJ, 1973, 182: L85
- [142] Nicholl M, Berger E, Kasen D, et al. ApJ, 2017, 848: L18
- [143] Pian E, D'Ávanzo P, Benetti S, et al. Natur, 2017, 551: 67
- [144] Shappee B J, Simon J D, Drout M R, et al. Sci, 2017, 358: 1574
- [145] Shibata M, Fujibayashi S, Hotokezaka K, et al. PhRvD, 2017, 96: 123012
- [146] Smartt S J, Chen T W, Jerkstrand A, et al. Natur, 2017, 551: 75
- [147] Soares-Santos M, Holz D E, Annis J, et al. ApJ, 2017, 848: L16
- [148] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. ApJ, 2017, 848: L12
- [149] Kasen D, Metzger B, Barnes J, et al. Natur, 2017, 551: 80
- [150] Murguia-Berthier A, Ramirez-Ruiz E, Kilpatrick C D, et al. ApJ, 2017, 848: L34
- [151] Tanaka M, Utsumi Y, Mazzali P, et al. PASJ, 2017, 69: 102
- [152] Villar V A, Guillochon J, Berger E, et al. ApJ, 2017, 851: L21
- [153] Wang H, Zhang F W, Wang Y Z, et al. ApJ, 2017, 851: L18
- [154] Radice D, Perego A, Bernuzzi S, et al. MNRAS, 2018, 481: 3670
- [155] Metzger B D, Thompson T A, Quataert E. ApJ, 2018, 856: 101
- [156] Rambaux N, Baguet D, Chabbat F, et al. ApJ, 2017, 850: L9
- [157] Rezzolla L, Most E R, Weih L R. ApJ, 2018, 852: L25
- [158] Ruiz M, Shapiro S L, Tsokaros A. PhRvD, 2018, 97: 021501
- [159] Li S Z, Liu L D, Yu Y W, et al. ApJ, 2018, 861: L12
- [160] Yu Y W, Liu L D, Dai Z G. ApJ, 2018, 861: 114
- [161] Ai S, Gao H, Dai Z G, et al. ApJ, 2018, 860: 57
- [162] Geng J J, Xiao D, Wang S Q, et al. SSPMA, 2018, 48: 079802
- [163] Nakar E, Piran T, Natur, 2011, 478: 82
- [164] Metzger B D, Berger E. ApJ, 2012, 746: 48
- [165] Wang L J, Dai Z G. ApJ, 2013, 774: L33
- [166] Gao H, Ding X, Wu X F, et al. ApJ, 2013, 771: 86
- [167] Wu X F, Gao H, Ding X, et al. ApJ, 2014, 781: L10

A Brief Review on Kilonovae or Mergernovae

YU Yun-wei

(College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079)

ABSTRACT While mergers of neutron star-neutron star and neutron star-black hole binaries can radiate intense high-frequency gravitational waves (GWs), they can also produce various electromagnetic emission by ejecting material outwards. Therefore, these merger events are the most important targets of current multi-messenger astronomical studies. The thermal transient emission from a merger ejecta is called a kilonova or, more generally, a mergernova, which is powered by the radioactive decays of r-process elements, and the energy injection from the central merger product. This phenomenon was first predicted theoretically by Li and Paczynski in 1998, and confirmed by the optical-infrared observations in the GW170817 event in 2017. As a result, the kilonova/mergernova observation had played a crucial role in locating GW170817, identifying its astrophysical origin, and even constraining the nature of the merger product of this event. This paper briefly reviews the primary progress of kilonova/mergernova researches, including the initiative, improvements, and developments of the model and the observational discoveries of candidates and the optical electromagnetic counterpart of GW170817.

Key words kilonova (mergernova), gamma-ray burst: general, stars: neutron, gravitational wave