双致密星并合引力波事件中的伽马射线暴

俞云伟^{1*}, 李永森¹, 谈伟伟², 戴子高³

1. 华中师范大学天体物理研究所, 武汉 430079;

2. 湖北第二师范学院物理与机电工程学院, 武汉 430205;

3. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023

*联系人, E-mail: yuyw@mail.ccnu.edu.cn

收稿日期: 2019-12-06; 接受日期: 2020-01-07; 网络出版日期: 2020-09-18

国家自然科学基金(编号: 11822302, 11833003, 11803007)和中央高校基本科研业务费(编号: CCNU18ZDPY06)资助项目

摘要 中子星-中子星、中子星-黑洞和黑洞-黑洞并合事件是宇宙中高频引力波的主要来源。同时, 短伽马暴GRB 170817A和引力波信号GW170817的成协也表明, 双致密星并合事件有可能同时造成丰富的电磁对应体辐射, 使之成为了多信使天文学研究的重要对象。本文简要综述了以短伽马暴为代表的引力波事件电磁对应体的研究现状, 包括它们的瞬时辐射、前兆辐射、延展辐射、余辉辐射、千新星/并合新星辐射, 讨论了中微子辐射、宿主星系性质、双中子星并合产物、相对论性喷流结构和短伽马暴的爆发率与光度函数等相关研究内容。在对现有主要认知进行描述的基础上, 指出了仍然存在的一些重要开放性问题, 比如伽马暴的完整爆发过程和中心能源性质、喷流的结构和能量耗散方式、粒子的加速和辐射机制等。这些问题一定程度上代表着未来进一步研究的方向。针对我国即将发射的致力于短伽马暴观测的引力波暴高能电磁对应体全天监测器(Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor, GECAM)卫星项目, 本文对其观测前景做出了预估和展望。

关键词 伽马射线暴, 引力波, 致密星

PACS: 98.70.Rz, 95.85.Sz, 97.60.Jd

1 引言

1975年, Hulse等人^[1]和Taylor等人^[2]第一次发现了双脉冲星系统, 并通过它们的轨道变化间接证明了引力波辐射的存在。2015年, 人类首次探测到了来自一对双黑洞并合的引力波信号^[3], 从此为天文学研究打开了一扇全新的窗口。2017年, 引力波和电磁波联合探测的实现更是开启了多信使天文学

研究的新时代^[4,5]。中子星-中子星、中子星-黑洞乃至黑洞-黑洞等双致密星系统的并合事件, 由于其物质的高度致密性和轨道的快速变化, 是宇宙中高频引力波辐射的主要来源^[6]。其中, 对于至少有一个中子星参与并合的情况, 部分中子星物质可能通过多种途径被抛射而脱离系统的引力束缚, 从而有望产生足够明亮的电磁辐射信号(如图1所示), 更是成为了引力波和电磁波联合探测的首选目标^[7]。首先,

引用格式: 俞云伟, 李永森, 谈伟伟, 等. 双致密星并合引力波事件中的伽马射线暴. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129502

Yu Y-W, Li Y-S, Tan W-W, et al. Gamma-ray bursts associating with gravitational waves from compact binary mergers (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 129502, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0400](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0400)

由于抛射物的丰中子性质, 快中子俘获核反应过程很可能得以顺利发生, 从而形成大量超铁元素^[8,9]. 这些元素的放射性衰变将有效加热抛射物, 使其发出集中于紫外-光学-红外波段的热辐射, 通常被称为千新星辐射^[10-12]. 与此同时, 并合过程中系统引力势能的释放或旋转能的提取将可能导致具有极端相对论性速度的喷流形成^[13-16]. 喷流能量的内部耗散将引发强烈的伽马射线辐射^[17,18], 造成伽马射线暴现象(简称伽马暴). 而喷流与环境物质的持续相互作用也将很自然地造成多波段的外激波余辉辐射^[19-21]. 此外, 如果并合后的致密天体(特别是中子星)还能够通过某些机制更长久地释放能量, 那么它将对前述这些电磁辐射产生重要的影响^[22-24], 甚至可能直接贡献新的辐射成分^[25]. 相比较而言, 在各种可能的引力波电磁对应体当中, 伽马暴辐射是最为明亮的, 与引力波辐射之间的时间差原则上也最短, 并且伽马射线的强穿透力也使其不易受到光路介质的影响. 因此, 伽马暴对双致密星并合引力波事件而言具有重要的电磁对应体观测价值, 它将是建设中的引力波暴高能电磁对应体全天监测器(Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor, GECAM)的最主要观测对象. GECAM项目由两颗分处地球两侧的同轨道卫星组成, 具有全天视场, 观测能段为6 keV–5 MeV, 计划将于2020年发射运行.

图1 双中子星并合后的物质抛射和电磁辐射示意图

Figure 1 An illustration of the material ejection and electromagnetic radiation from a neutron star merger.

从观测上讲, 伽马暴是发生在天空中的一种短时标、高流量的伽马射线辐射瞬时增亮现象, 辐射持续时间从零点几秒到数百秒不等. 这种现象的发现其实远远早于引力波的探测. 早在1967年, 美国的军事卫星Vela就探测到了一些未知的伽马射线爆发现象, 并在1973年被确认为一种全新的天文现象^[26]. 自Vela卫星以后, 人们还先后发射了一系列的空间高能探测器, 包括Compton卫星(1991)、Wind卫星(1994)、BeppoSAX卫星(1996)、HETE-II卫星(2000)、Swift卫星(2004)和Fermi卫星(2008)等, 致力于研究伽马暴的各种辐射性质以揭示其物理起源和具体的辐射机制. 总的来说, 伽马暴在天空中的分布具有均匀各向同性, 流量分布偏离欧几里得空间的幂律形式, 表现出宇宙学距离的分布特性. 1997年, 余辉辐射的发现终于使伽马暴红移测量成为可能, 从而确认了伽马暴的宇宙学起源^[27]. 基于此, 人们可以计算出单次伽马暴事件所释放的总能量可能高达 $E_{\text{iso}} \sim 10^{51} - 10^{54} \text{ erg}$ ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$), 因而可以称得上是宇宙中最为剧烈的爆发现象.

伽马暴的瞬时辐射时间呈明显的双峰分布, 人们据此将伽马暴分为短暴($T_{90} < 2 \text{ s}$)和长暴($T_{90} > 2 \text{ s}$)两大类^[28]. 此处 T_{90} 是指辐射的累积流量从占总流量5%持续到95%之间的时间. 除了辐射持续时间, 这两类暴还在多个观测性质上存在不同. 一是短暴的能谱较硬, 而长暴的能谱较软^[29,30]; 二是长暴有一些明显的谱延迟(在10 MeV以下能段软光子的到达时间晚于硬光子的现象), 而在短暴中则没有发现这种现象^[31,32]; 三是短暴的各向同性能量较之长暴要更低一些(约低2–3个量级)^[33,34]. 这些差异说明这两类暴很可能具有截然不同的物理起源. 一般认为, 长伽马暴来自大质量恒星的塌缩. 1998年, 人们从GRB 980425的光学余辉中第一次发现了超新星SN1998bw的辐射成分, 很好地证实了这一观点^[35,36]. 五年后的GRB 030329与SN2003dh成协事件则提供了更具有代表性的证据^[37,38]. 与此同时, 长暴的爆发位置一般都处于恒星形成区, 这也与它们的大质量恒星塌缩起源相一致^[39]. 因此, 与本文重点关注的致密星并合引力波事件相关的伽马暴显然不是长暴, 而应该是短暴. 短暴的短时标很自然地对应了致密星并合过程的快速发生.

鉴于短伽马暴的持续时间很短、定位不太容易, 因此对它们余辉辐射的成功观测要晚于长伽马暴, 直到2005年才首次实现^[40]. 在此之后, 有关短伽马暴宿主星系的性质、爆发位置以及红移分布的统计均在一定程度上支持了短伽马暴的致密星并合起源. 2017年, Fermi卫星在GW170817引力波事件1.7 s后捕捉到了GRB 170817A的伽马暴辐射, 首次确认了短伽马暴和致密星并合之间的关联^[4,5,41]. 当前, 面向越来越多的针对致密星并合的引力波探测, 很有必要对它们的电磁对应体的可能性质进行全面的回顾. 本文将简要综述人们对短伽马暴现象的现有认知, 包括它们的瞬时辐射、前兆辐射、延展辐射、余辉辐射、千新星/并合新星辐射、中微子辐射、宿主星系以及GW170817/GRB 170817A事件等, 并讨论并合产物对这些辐射现象的可能影响. 最后, 基于对Swift和Fermi卫星累积的短伽马暴样本的统计和GRB 170817A对喷流结构的限制, 我们也将对GECAM卫星对引力波成协短伽马暴的探测前景作出展望.

2 主要辐射特征

2.1 瞬时辐射

短伽马暴瞬时辐射的观测流量分布如图2所示, 处于 $\sim 0.3 \sim 300 \text{ photon s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. 具体针对Swift BAT和Fermi GBM探测器的观测能段: 15–150 keV和8 keV–30 MeV, 在确定了辐射能谱形式的情况下, 其相应的观测流量范围可分别写为 $\sim (1.82\text{--}116) \times 10^{-8} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 和 $\sim (2.78\text{--}838) \times 10^{-7} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. 虽然短暴与长暴具有截然不同的天体起源并在辐射性质上存在差异, 但因它们均直接来自相对论性喷流的内部能量耗散而仍然具有一些共同的特征. 比如, 两类伽马暴的能谱通常都可以被一个光滑的分段幂律函数(称为Band函数)加以拟合^[42], 其函数形式如下:

$$N(E) = \begin{cases} AE^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), & (\alpha - \beta)E_0 \geq E, \\ A[(\alpha - \beta)E_0]^{\alpha - \beta} \exp(\beta - \alpha)E^\beta, & (\alpha - \beta)E_0 < E, \end{cases} \quad (1)$$

其中 α 和 β 分别为低能和高能谱指数(均为负值). 此外, 在探测器能段较窄或伽马暴不够明亮时, 人们也会采用截断幂律(PLE)函数来拟合能谱^[43], 即

$$N(E) = AE^\alpha \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right). \quad (2)$$

通常而言, 一方面, 截断幂律谱很可能仅仅是Band谱在能段观测缺失情况下的一种唯象表现. 比如, 在观测能段很窄时, 不难想象观测到的能谱将完全表现为一条单一的幂律谱. 但是, 另一方面, 因为Band函数的高能谱指数常常很难通过观测确定, 因此不排除很多伽马暴能谱本质上的确就是截断幂律谱的可能性. 无论如何, GECAM设计中跨越三个量级的宽能段对于确定伽马暴的能谱是非常有利的. 对于上述这些能谱, 其 $E^2N(E)$ 谱的峰值能量均可表示为

$$E_p = (2 + \alpha)E_0. \quad (3)$$

短伽马暴低能谱指数和峰值能量的观测值分布如图3所示^[44], 其均值与长伽马暴存在明显的差异. 不过, 如果仅考虑长伽马暴最初1 s的能谱性质, 这种差异将显著减小^[29]. 这似乎意味着能谱性质的差异可能仅是伽马暴喷流在不同辐射阶段的不同表现, 而不一定是短暴与长暴之间的本质差异.

尽管伽马暴的能谱普遍表现为非热谱形式, 但仍然有不少人相信其中可能存在热谱的成分, 这在一些观测样本特别是Fermi LAT样本中明显可见, 比如短暴GRB 090510. Fermi LAT的观测还揭示,

图2 短伽马暴峰值光子流量的分布

Figure 2 The distribution of the peak photon fluxes of SGRBs.

除了Band谱和热谱成分, 某些伽马暴能谱中还可能存在额外的幂律谱成分, 其高能端可延伸到100 MeV以上、低能端则可能延伸到X 射线波段, 这一特征同样见于短暴GRB 090510. 该额外幂律成分具有正的 νF_ν 谱指数, 因此在高能端必然会出现反转以避免发散, 这也就意味着这些伽马暴应该具有第二个峰值能量. 如图4^[45]中的GRB 090510时间解析能谱所示, 额外的高能(>100 MeV)辐射相比于Band谱的辐射存在明显的时间滞后(这与长暴10 MeV以下能段的谱延迟趋势相反). 该高能辐射滞后的原因可能与辐射的不同产生过程有关, 也可能与不同能量光子的传播速度差异(真空的量子化等原因)有关. 此外, 值得一提的是, 如果瞬时辐射可以一直延伸至数百GeV能段, 那么这些甚高能光子将

图3 短伽马暴低能谱指数(a)和峰值能量(b)的分布. 数据取自参考文献^[44]

Figure 3 The distributions of the low-energy spectral indices (a) and spectral peak energies (b) of SGRBs. The data are taken from ref. ^[44].

图4 GRB 090510瞬时辐射的时间积分(a)和解析(b)能谱. 图片取自参考文献^[45]

Figure 4 The time-integrated (a) and time-resolved (b) spectral energy distributions of the prompt emission of GRB 090510. This figure is taken from ref. ^[45].

很容易与传播路径上的宇宙红外背景光子湮灭形成正负电子对. 而后, 这些次级带电粒子将可以通过逆康普顿散射把一些宇宙微波背景辐射光子的能量提升到MeV–GeV能段, 造成滞后的高能辐射^[46]. 由于星系际磁场对带电粒子的运动偏转作用, 这些滞后MeV–GeV辐射的方向将一定程度地偏离瞬时辐射原有的方向.

短伽马暴瞬时辐射的某些内禀属性之间可能存在相关性, 如谱峰值能量 E_p 与各向同性爆发能量 E_{iso} 之间的Amati关系^[47]

$$E_p = 10^{-28.01 \pm 2.91} E_{\text{iso}}^{0.60 \pm 0.06}, \quad (4)$$

谱峰值能量 E_p 与爆发光度 $L_{p,\text{iso}}$ 之间的Yonetoku关系^[48]

$$E_p = 10^{-22.98 \pm 1.81} L_{p,\text{iso}}^{0.49 \pm 0.03}. \quad (5)$$

如图5^[49]所示, 对于Yonetoku关系, 短暴与长暴之间是基本一致的. 而对于Amati关系, 两者之间存在明显的偏离, 但其相关趋势仍然基本平行. 更有意思的是, E_p – $L_{p,\text{iso}}$ 之间的相关性实际上在同一个暴的不同辐射阶段也始终成立(如图6^[50]所示). 这些结果似乎说明爆发光度与峰值能量之间的相关性更具有本质性, 而两组Amati关系之间的偏离则完全是因为短暴和长暴在辐射持续时间上的差异所致. 不过, 总体来说, 这些经验相关性常常都比较弥散, 因此无法使伽马暴成为一种理想的标准烛光而应用于宇宙学研究. Ghirlanda等人^[51]提出, 如果考虑喷流张角对爆发能量的修正, 那么修正后的爆发能量将可能与谱峰值能量表现出更好的相关性, 一般称为Ghirlanda关系(本质上是一种三参量关系). 不过, 这里的困难是需要通过余辉观测来事先测量喷流的张角大小, 而能够这样做的短暴样本实际上并不多. 无论如何, 多参量关系应该是人们寻找标准烛光关系的一个方向, 它们很可能比双参量关系更具有紧致性.

虽然观测揭示了如上丰富的信息, 但人们对瞬时辐射的发生机制仍未形成清晰的认识, 一些关键科学问题目前仍然悬而未决. 比如, 喷流的组成成分主要是什么, 喷流的能量是如何耗散的, 以及带电

图 5 短伽马暴瞬时辐射若干属性之间的经验相关性. (a) Amati关系; (b) Yonetoku关系. 数据取自参考文献[49]

Figure 5 Empirical correlations between some emission properties of SGRBs. (a) Amati relation; (b) Yonetoku relation. The data are taken from ref. [49].

图 6 短伽马暴谱峰值能量与辐射流量随时间的协同演化(a)及两者之间的相关性(b)(以GRB 110705A为例). 图片取自参考文献[50]

Figure 6 The synergetic temporal evolution of the spectral peak energy and the flux of GRB 110705A (a) and the correlation between them (b). This figure is taken from ref. [50].

粒子是如何被加速和产生辐射的等等. 在最为传统的火球模型下, 喷流主要通过辐射压强加速. 在重力负载较低的情况下, 火球可较快转变为光学薄从而使剩余的热光子得以在光球面泄露. 光球辐射可以很好地解释瞬时辐射中的热成分. 并且考虑到后续可能的逆康普顿散射和观测的等时面效应, 观测到的Band能谱有可能正是光球辐射热谱自然“展宽”的结果, 是一种准热谱[52,53]. 不过, 观测到的一些相对较低或较高的 E_p 数值以及单个暴的 E_p 存在明显时间演化的现象, 却是单纯用火球温度难以解释的. 所以, 另一种更流行的观点认为, 除了那些明显的热谱成分外, 瞬时辐射总体上仍然是一种本质上的非热辐射, 比如同步辐射以及相应的逆康普顿散射[18,54]. 特别是在瞬时辐射可以一直延伸到GeV能段的情况下, 其非热辐射的属性就显得更加确定.

不过, 简单的同步辐射模型同样面临着一些较大的困难, 比如它所预言的低能谱指数 -1.5 相比于观测值 -1 而言明显太软. 为了避免这种电子过快冷却的情况, 可能要求辐射区的磁场存在显著的衰减, 而这完全取决于喷流具体的能量耗散机制. 两种应用最广泛的耗散机制是内激波和磁重联, 其中后者要求爆发所产生的抛射物不是火球而是磁能主导的玻印廷外流. 不同的耗散机制具有十分不同的耗散半径和辐射效率, 在解释观测时各有优劣. 为了各取所长, Zhang和Yan[55]提出了一个由内碰撞过程诱发的磁重联和湍流(ICMART)模型. 在这个模型中, 一些磁能主导的相对论性运动壳层发生了剧烈的相互碰撞, 辐射半径就决定于碰撞发生的位置, 而碰撞引发的等离子体湍动和快速磁重联则可使同步辐射的效率较高, 且有助于产生复杂的光变.

无论如何, 揭示瞬时辐射的发生机制无疑是伽马暴研究自始至终的核心目标之一. 未来, 我们既需要积累更多的观测样本、了解更多的辐射特性, 比如对瞬时辐射偏振度的测量就是一种鉴别喷流组成成分和耗散机制的有效途径[56], 也需要更加紧密地结合其他相关的观测限制, 详见后续几节内容.

2.2 前兆辐射

有些短伽马暴, 在其瞬时辐射之前还可能观测到一个时间上明显分离的前兆辐射(辐射流量低于主暴), 分离期间不具有明显超出背景水平的辐射[57–59]. 根据最新的统计[59], 前兆辐射的典型持续时间约在0.1 s, 其与主暴的时间间隔大概有0.5 s (与短暴持续时间的典型值相当). 这三个时间之间不存在明显的相关关系, 它们的具体分布情况如图7[59]所示. 从能谱角度, 平均来讲前兆辐射可能比主暴更软, 但也应注意到实际上大概一半样本的前兆辐射硬度高于其主暴硬度. 对于前兆辐射能谱的拟合显示, 截断幂律谱总体上优于黑体谱, 表现出非热辐射的特性.

前兆辐射的起源目前尚不明确. 一方面, 它们可能与短暴喷流从并合抛射物中的突破过程有关, 具体来源于包裹在相对论性喷流周围的高温物质的辐射. 另一方面, 前兆辐射甚至可能发生于双中

子星的并合之前, 比如来自两个中子星磁层之间的相互作用^[60]. 因此, 将来对前兆辐射和引力波信号之间时间序列关系的确定将能够有效鉴别有关前兆辐射起源的不同理论猜想.

2.3 延展辐射

2001年, Lazzati等人^[61]在对Compton BATSE观测到的76个短伽马暴进行数据分析时, 首次发现部分短暴在伽马射线瞬时辐射之后约数十秒到上百秒的时间内存在硬X射线流量超出的现象, 怀疑是这些短暴的X射线余辉辐射. Mazets等人^[62]从Konus-Wind的130个短暴样本中也发现了11个这种具有持续较软伽马射线辐射的事例. 2006年, Norris等人^[63–65]更为系统性地分析了BATSE, HETE-2和Swift卫星的短暴观测数据. 他们认为, 这些短暴主脉冲后的持续软伽马射线/硬X射线辐射因具有多脉冲的光变形态而不太像是一般的外激波余辉辐射, 却更类似于余辉X射线耀发这种中心能源能量释放现象. 因此, 他们把这种主暴后数十秒到上百秒的持续辐射称为延展辐射. 主暴和延展辐射之间常常有一个明显的间断(但不是总有), 表明这些样本并不是长伽马暴. 根据粗略统计, 在大约四分之一的短暴中观测到了延展辐射, 它们的主暴持续时间比没有延展辐射的情况长约2–3倍^[64,65]. 目前尚不清楚, 有无延展辐射的两类短暴是否具有本质的不同, 抑或是所有的短暴其实都具有延展辐射, 只不过有些未能被观测到.

短伽马暴主脉冲辐射的流量往往在延展辐射流量的 10^4 倍之上, 但总的时间积分流量则相当(后者还可能更多一些). 比如, GRB 050709和GRB 050724是两个比较著名的具有延展辐射的短伽马暴, 瞬时辐射时间分别为0.07和3 s. 前者有一段长达130 s的延展辐射, 辐射能段在2–25 keV, 释放的能量比瞬时辐射阶段高两倍多^[66]. 后者延展辐射时长约100 s, 释放的能量仅为瞬时辐射阶段的十分之一^[67](如图8^[68]所示). 此外, GRB 060614是一个充满争议的伽马暴, 按照常规的定义其瞬时辐射持续时间可达102 s, 明显属于长暴范畴. 但是, 观测确认GRB 060614不与超新星成协, 其宿主星系的恒

星形成率也较其他长暴更低. 这些特征似乎表明, GRB 060614有可能是一个短暴, 具有持续约5 s的主暴和一段长达100 s的延展辐射^[69,70].

有关延展辐射的起因, 目前还存在许多争议. 一方面, 长时标和软伽马光子辐射表明它们不是主暴的一部分. 另一方面, 相比于余辉, 它们的能量又显得过高^[71]. 一种观点认为, 延展辐射可能反映了短暴中心引擎(比如大质量磁星)的持续活动^[72,73]. 不过, 也有人提出, 具有延展辐射的短暴有可能只是一种对长暴进行大角度偏轴观测的结果^[74].

图7 短伽马暴前兆辐射和瞬时辐射持续时间及两者之间间隔时间的分布. 图片取自参考文献^[59]

Figure 7 The distributions of the durations of the precursor and prompt emissions of SGRBs and, as well as, of the time intervals between the two emission components. This figure is taken from ref. ^[59].

图8 GRB 050724瞬时辐射和延展辐射光变曲线. 图片取自参考文献^[68]

Figure 8 The light curve of the prompt and extended emission of GRB 050724. This figure is taken from ref. ^[68].

2.4 多波段余辉

短伽马暴辐射的持续时间短、光子数量少, 因此不易对它们进行定位而捕捉到余辉辐射. 这一状况直到2005年具有快速响应能力的Swift卫星上天后才得以改观. 最先观测到余辉的短伽马暴有GRB 050509B, GRB 050709和GRB 050724 [40, 66, 67]. 通过X射线余辉观测, 人们实现了对它们的精准定位, 引导了随后的光学余辉监测和宿主星系的确定, 从而实现了对它们红移的测量. 利用余辉的能谱和光变曲线, 人们还进一步实现了对短伽马暴的爆发能量、环境物质密度、喷流张角、视线方向乃至中心能源性质的重要观测限制 [75, 76]. 鉴于短暴的环境物质相对于长暴来说常常更为稀薄, 因此由喷流外激波所产生的余辉辐射会相对较弱. 并且在致密星并合之前, 双星的自转和轨道运动原则上有可能驱动一股强脉冲星风从而在环境中吹出一个星风云泡 [77, 78]. 因此, 只有当喷流和泡壁发生碰撞时, 才可能出现余辉流量的急剧上升. 不过, 这个过程的发生很可能早于余辉的观测 [79].

总的来说, 从观测数据较为丰富的短伽马暴来看, 其余辉的光变特征与长暴情形存在诸多相同之处, 反映出相同的产生机制. Fong 等人 [75] 统计了从2004–2015年间的103个短暴, 其余辉观测结果如图9所示. 总体上, 在 $t \geq 1000$ s的阶段, 大多数短暴的X射线余辉表现出了幂率衰减的特征, 大致可通过外激波标准模型进行拟合 [75]. 当然一些额外的光变行为也仍然在一些短暴的X射线余辉中出现.

如图10 [80]所示, 这些特征包括陡降-变平、剧烈耀发和快速衰减, 展现出了余辉辐射的复杂性 [81, 82]. 特别是, 其中的平台和耀发成分被普遍认为有可能由中心能源持续能量输出乃至直接辐射所造成的 [83, 84]. 在此设想下, 人们有望通过短暴余辉揭示其中心能源(并合产物)的若干性质. 相比于X射线余辉, 短暴的光学余辉观测样本很少, 观测时间一般在暴后几小时到几天不等. 由于观测数据太少, 且离散度较大, 目前还无法对短暴的光学余辉进行统一概括和分类. 但总体而言, 光学余辉和X射线余辉很可能在大多数时候是线性相关的 [85]. 值得注意的是, 光学余辉观测和千新星观测密切相关. 如果在较晚的光学辐射中发现明显的流量超出, 就有可能是来自千新星的贡献. 射电余辉持续时间最长, 可以持续几天到几个月甚至几年, 但它们的光变曲线常常较为简单, 主要反映了外激波的演化而与中心能源关联较小, 可用于较好地限制外激波能量和喷流张角的大小.

在外激波洛伦兹因子足够大时, 其同步辐射有可能导致能量 > 0.1 GeV的高能余辉辐射, 如图11 [86]所示. 并且, 考虑到外激波作用可能在瞬时辐射期间既已发生, 则2.1节中提到的瞬时辐射期间的额外高能辐射成分便有一定可能来自外激波的贡献. 此外, 来自MAGIC和HESS的最近观测结果还显示, 发生在外激波中的逆康普顿散射过程还将导致甚高能(> 100 GeV)余辉辐射 [87, 88], 尽管目前尚未有针对短暴的此类报道.

图9 短伽马暴的X射线(a)、光学(b)和射电(c)余辉观测数据汇总. 图片取自参考文献[75]

Figure 9 A collection of the X-ray (a), optical (b), and radio (c) afterglow data of SGRBs. This figure is taken from ref. [75].

图 10 X射线余辉的几种特征光变行为. (a) 长暴; (b) 短暴. 图片取自参考文献[80]

Figure 10 Characteristic light curves of X-ray afterglows. (a) Long GRBs; (b) short GRBs. This figure is taken from ref. [80].

图 11 GRB 090510 的高能(0.1–100 GeV)余辉光变曲线. 图片取自参考文献[86]

Figure 11 The high-energy (0.1–100 GeV) afterglow light curve of GRB 090510. This figure is taken from ref. [86].

2.5 千新星/并合新星

千新星的基本理论框架由Li和Paczynski^[10]在1998年提出, 并由Metzger等人^[11]在2010年做了细致的完善. 2013年, 哈勃望远镜在短伽马暴GRB 130603B发生约一周后观测到了一个明亮的近红外辐射, 其流量明显超出了该暴近红外余辉辐射的理论预期^[89], 从而被认为是第一例千新星候选体. 受此启发, 人们对2013年之前观测到的短伽马暴余辉进行了仔细的检查, 从中又发现了多例疑似的候选体^[90–92]. 此后, 在新的短伽马暴(如GRB 140903A和GRB 160821B)观测中, 类似的候选体仍然在不断地被发现^[93,94]. 当然, 被完全确认的第一例千新星无疑是与GW170817引力波事件成协的AT2017gfo光学暂现源^[95,96].

从理论上讲, 千新星来自双致密星并合所导致的高速抛射物的辐射. 不同于短伽马暴辐射, 并合

抛射物的亚相对论性速度并不会引起辐射的集束效应, 因而千新星辐射常被简单假设为具有近似各向同性的性质. 不过, 严格来讲, 并合抛射物可产生于潮汐离心、碰撞挤压和吸积反馈等十分不同的物理过程, 因此其不同的组成成分实际上具有十分不同的质量和速度, 从而可造成抛射物几何结构的各向异性. 如果这种各向异性非常显著, 则仍会一定程度地造成千新星辐射对观测方向的依赖. 当然, 更重要的是, 不同抛射物成分的电子丰度也可能存在显著的差异, 从而使它们具有截然不同的物理属性. 对于电子丰度 $Y_e < 0.2$ 的并合抛射物, 快中子俘获过程能够有效发生, 形成大量质量数 $A \gtrsim 110$ 的重元素^[97]. 这些重元素的放射性衰变将加热抛射物使其产生辐射, 相应的单位质量能量释放率为

$$\dot{\epsilon} = 4 \times 10^{18} \left(0.5 - \frac{1}{\pi} \arctan \left[\frac{(t - t_0)}{\sigma} \right] \right)^{1.3} \text{ erg s}^{-1} \text{ g}^{-1}, \quad (6)$$

这里 $t_0 = 1.3 \text{ s}$ 和 $\sigma = 0.11 \text{ s}$. 但是, 如果抛射物的电子丰度相对较高(处于 $0.2 < Y_e < 0.4$), 则 $A > 130$ 的元素将难以形成, 重元素的种类将变得分立而不再连续^[12]. 在这种情况下, 加热率将不再具有简单的随时间幂律衰减行为, 而是会出现鼓包和波浪状的衰减. 重元素的放射性衰变主要以 β 衰变、 α 衰变和裂变等形式发生, 因此所释放的能量将由电子、 α 粒子、MeV的 γ 光子和中微子携带, 它们之间的能量占比情况决定了能量可能被热化的效率.

依赖于抛射物的组分和结构, 千新星可以具有多个不同的辐射成分, 比如在一天左右出现的偏蓝辐射和一周左右的偏红辐射, 如图12^[98]所示. 对于不同方向的观测者而言, 不同辐射成分的占比情况可能发生变化. 物理上决定辐射时间和颜色的一个重要因素是物质不透明度对电子丰度的依赖. 对于低电子丰度的情况, 并合抛射物中将出现相当数量的镧系和锕系元素, 其非常复杂的价电子结构将使抛射物在紫外光学近红外波段的不透明度达到 $\sim 10\text{--}100 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 的量级^[12], 远高于由铁族元素组成的物质(比如普通的超新星抛射物). 对于高电子丰度的情况, 镧系和锕系元素的形成被抑制, 不透明

图 12 不同镧系元素含量下模型预言的千新星热光度光变曲线. 图片取自参考文献[98]

Figure 12 Theoretical bolometric light curves of kilonovae for different lanthanide fractions. This figure is taken from ref. [98].

度可能与普通超新星的抛射物差别不大[99, 100].

此外, 千新星的辐射还很可能受到并合产物(特别是大质量中子星)的显著影响[101]. Yu等人[24]提出, 一方面, 来自中子星星风的高能辐射可能使部分抛射物物质发生电离, 从而改变其不透明度. 另一方面, 中子星星风通过辐射注入到抛射物的能量将提升并合抛射物的热辐射, 使其光度可能显著高于 $10^{41} \text{ erg s}^{-1}$, 甚至在某些情况下达到与超新星相当的程度. 因此, Yu等人建议将并合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名称——并合新星(Mergernova), 其中可包含由放射性能源主导的情形(作为一个子类型, 仍可称为千新星).

2.6 中微子辐射

首先, 双中子星并合所产生的高温致密吸积盘和大质量中子星将通过 β 衰变和逆 β 衰变过程产生大量的热中微子以释放并合过程所累积的大量热量(来自引力势能). 其次, 爆发过程中的若干激波作用过程还将导致大量高能中微子的辐射(如图13[102]所示). 特别是, 短伽马暴喷流在并合抛射物中的传播、喷流物质内部的相互碰撞等过程将使

激波后的物质热化和使带电粒子加速. 一方面, 如果喷流能够成功从抛射物中穿出, 它便将以通常的喷流内耗散机制产生伽马暴辐射. 而如果喷流最终未能穿出, 包裹在喷流外围的高温茧状物质也可能产生一种特殊类型的短伽马暴辐射(尽管还有待证明)[103]. 因此, 无论如何, 被激波加速的极高能质子都将与足够的光子发生 $p\gamma$ 反应生成大量 π^+ , π^0 介子, 其中 π^+ 介子的衰变将最终导致高能中微子辐射[104]. 由于中微子极强的穿透力, 它们总是能够成功地从系统中穿出而有望被IceCube等探测器捕捉到(如果流量足够高), 因而原则上是一种非常可靠的引力波多信使对应体.

2.7 宿主星系

大部分短伽马暴的红移是通过观测它们的宿主星系而获得的, 但总的样本数目不多, 其平均红移约为 $z \approx 0.614$ (如图14所示), 远低于长暴的 $z \approx 2.09$. 相比于长暴大多数较暗的、质量和金属丰度都比较低的不规则或者旋涡宿主星系, 短暴宿主星系明显具有更高的亮度、更高的质量和更高的金属丰度[33, 105]. 从星系类型来看, 也比较复杂, 既有恒星形成星系也有椭圆星系. 但共同之处是, 所有短伽马暴在其宿主星系中所处位置的恒星形成率都很低, 相对于星系中心都有较大的偏离[106, 107]. 如图15所

图 13 理论计算的短伽马暴高能中微子辐射能谱. 图片取自参考文献[102]

Figure 13 Theoretical spectral energy distribution of the high-energy neutrino emission of SGRBs. This figure is taken from ref. [102].

图 14 短伽马暴的红移分布

Figure 14 The redshift distribution of SGRBs.

图 15 短伽马暴对宿主星系中心偏离量的累积分布. 图片取自参考文献[33]

Figure 15 The cumulative distribution of the offsets of SGRBs from the center of their host galaxies. This figure is taken from ref. [33].

示, 短暴的偏移量跨度在0.5–75 kpc范围内, 中值约为4.5 kpc,这大约是长暴的3.5倍, 是核塌缩型或Ia型超新星的1.5倍. 此外, 约有25%的短暴偏移量 ≥ 10 kpc, 在这一位置上已经不可能发现长暴[108]. 短暴宿主星系及爆发区域的这些性质为它们的双致密星并合起源提供了强有力的证据. 因为中子星诞生时往往会具有一个较大的自行速度, 所以在双星轨道的引力波衰减时标上, 双星系统很可能要漂移到非常远离星系中心的区域才能发生并合.

3 GW170817/GRB 170817A事件

2017年8月17日, LIGO和Virgo探测了一个持续时间长达一百多秒的引力波信号——GW170817,

距离地球40 Mpc, 来自两个质量处于 $1.17M_{\odot}$ – $1.6M_{\odot}$ 之间的致密天体的并合. 该质量区间符合中子星质量的范围[4]. 在探测到引力波事件1.7 s后, Fermi卫星在相关区域探测到了一个短伽马暴(GB 170817A)的辐射, 持续时间约为2 s[41]. GB 170817A是历史上第一个被探测到的引力波电磁对应体(如图16所示). 引力波信号与伽马暴辐射之间的时间差为理解伽马暴喷流的驱动机制、传播过程和辐射机制提供了全新的重要观测限制, 也可用于检验引力波的传播速度[109].

GRB 170817A的辐射大致可分为两个阶段, 包括一个0.83 s的非热辐射脉冲(峰值频率 $E_p = 149.1^{+29.4}_{-24.2}$ keV)和一个0.84 s的具有疑似黑体辐射性质的脉冲(黑体温度 $kT = 11.3^{+3.8}_{-2.4}$ keV). 两个阶段辐射能谱的可能差异仍是一个有待探索的重要问题[110]. GRB 170817A的辐射总流量为 $2.24^{+3.51}_{-0.51} \times 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2}$, 对应总辐射能量 $4.17^{+6.54}_{-0.99} \times 10^{46} \text{ erg}$, 相应的峰值光度为 $1.6^{+2.5}_{-0.4} \times 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$. 该辐射能量和

图 16 GRB 170817A和GW 170817的联合观测. 图片取自参考文献[5]

Figure 16 The joint observation of GRB 170817A and GW 170817. This figure is taken from ref. [5].

光度显著低于已知的其他所有短暴. 一种观点认为, GRB 170817A本质上就是一个具有极低光度的伽马暴, 可能是因为喷流未能非常成功地穿出抛射物而仅造成了一个具有轻度相对论性速度的喷流茧^[103]. 不过, 更多的人认为, GRB 170817A更可能是对一个正常的短伽马暴在大角度上进行侧向观测的结果, 该暴喷流的能量随角度具有衰减分布(一定程度上也许可看作是突破后的喷流和它周围茧状包裹物的复合体)^[111, 112].

GW170817/GRB 170817A事件后, 世界各地不同波段的望远镜都对这个源进行了快速的跟踪和持续的观测, 记录下了大量的观测数据. 其中, 位于智利的Swope望远镜在10.9 h后第一个发现了光学暂现辐射^[95, 96]. 后经大量望远镜的联合观测, 确定该光学暂现源(后被正式命名为AT2017gfo)的辐射特征基本符合千新星(并合新星)的理论预言, 其光变和谱的特征如图17所示, 证明了并合抛射物的存在^[113, 114]. 不过对其具体的建模特别是辐射能量的主要来源仍然存在一些争议^[115, 116]. 此外, 从第9天和第16天开始, 人们还分别在X射线和射电波段观测到了持续上升的非热辐射^[117, 118], 两者之间可以用同一个幂律能谱很好地相连接, 意味着它们具有相同的起源^[119]. 关于这些多波段非热辐射最为合理的解释, 便是喷流在环境物质中减速所导致的外激波余辉辐射. 而至于辐射流量持续上升的原因,

一种可能是喷流能量在径向有急剧的衰减, 越往喷流内部, 能量越大^[120, 121]. 另一种可能则是, 随着喷流的减速, 偏轴观测者的可观测范围越来越大, 逐渐接近喷流中心位置. 越靠近喷流中心, 能量越大, 辐射流量也就越高^[122–124]. 在这种情况下, 我们可以通过拟合余辉光变曲线了解喷流的角向结构, 甚至可进一步限制喷流在抛射物中的传播过程. 此外, 还有一个有意思的现象是, X射线余辉在大概150 d时出现了一次疑似耀发的现象^[125]. 如果这一现象确实, 那对并合产物的性质将提供关键性的限制.

4 并合产物

对各类引力波事件电磁对应体的观测是揭示双致密星组成属性和并合产物属性的一个重要途径. 对于中子星和黑洞的并合, 产物无疑将是一个黑洞. 但对于双中子星的并合而言, 情况却要复杂很多, 因为迄今为止人们尚不能对中子星(广义概念)的质量上限给出确切的物理界定^[126–128]. 对这一问题的解决, 实际上也是引力波及其电磁对应体观测的一个重要目标, 因此有必要专门做一点讨论.

较具体地说, 记静态中子星的质量上限为 M_{TOV} , 考虑到并合后星体的快速旋转, 最大极限质量可以写为 $M_{\text{max}} = bM_{\text{TOV}}$, 这里系数 b 决定于旋转的频率以及是否存在较差旋转. 若并合产物的质量为 M_{rem} , 当 $M_{\text{rem}} > M_{\text{max}}$ 时, 并合产物将直接塌缩为黑洞. 当 $M_{\text{TOV}} < M_{\text{rem}} < M_{\text{max}}$ 时, 中子星将短暂存在一段时间. 更具体一点, 由均匀极限旋转支撑的中子星常被称为超大质量(Supramassive)中子星, 而超过均匀极限旋转支撑、必须再引入较差旋转离心效应的中子星则被称为极大质量(Hypermassive)中子星. 最后, 当 $M_{\text{rem}} < M_{\text{TOV}}$ 时, 中子星将长期稳定存在. 遗憾的是, GW170817/GRB 170817A/AT2017gfo的联合观测未能对此次双中子星并合事件的产物性质给出确切的判断, 尽管AT2017gfo辐射和150 d左右的疑似X射线耀发都一定程度地指向一个稳定大质量中子星的存在^[115, 116, 129].

如前述章节所提到的, 大质量中子星的可能存在将对各类电磁对应体辐射产生深刻的影响, 需要人们高度重视. 1998年, Dai和Lu^[130]首次提出暴后

图 17 千新星/并合新星AT 2017gfo的多色光变曲线(a)和时间解析光谱(b). 图片取自参考文献^[113].

Figure 17 The multi-band light curves (a) and time-resolved spectra (b) of kilonova/mergernova AT 2017gfo. This figure is taken from ref. ^[113].

中子星的自转能损将为伽马暴喷流持续注入能量, 从而使余辉辐射的早期衰减变缓. 这一机制可有效解释观测到的大量余辉光变曲线早期变平现象. 同时, 鉴于中子星所释放的能量很可能以相对论性星风的形式向外传输, 而星风的直接辐射很可能穿过喷流物质而被直接观测到, 因而成为一种可能的延展辐射来源和额外的余辉辐射成分^[25]. 所以, 从这个角度来讲, 延展辐射和内耗散起源的余辉辐射之间可能存在着自然的过渡关系. 此外, 中子星星风辐射和外激波辐射的叠加为观测到的余辉辐射多样性提供了一种自然的合理解释. 大质量中子星对千新星/并合新星的可能影响在GW170817/GRB 170817A事件中也有一定程度的体现. 对光学暂现源AT2017gfo的建模实际上对辐射能量的来源、抛射物的质量提出了十分苛刻的要求, 因而存在争议. 而如果引入额外的中子星能源供给, 则可以有效改善模型所面临的困难^[115, 116, 129].

基于并合后中子星对各类电磁辐射的重要影响, 人们得以能够通过拟合电磁观测数据来论证大质量中子星的存在性、揭示这些中子星一些基本性质(比如旋转周期和偶极磁场强度), 以及限制中子星的物态^[131-133]. 更具体地, 通过余辉数据, 我们可以知道并合后中子星往往具有毫秒旋转周期和高达 $\sim 10^{14-15}$ G的偶极磁场(至少在数小时时间内)^[134]. 不过, 对AT2017gfo的拟合又显示, 其中心中子星的表面偶极磁场在天量级的时标上可能已衰减到 $\sim 10^{12}$ G左右^[115, 116], 展现了并合后中子星性质的复杂性和可能的时间演化特性. 无论如何, 对双中子星并合引力波电磁对应体的观测将为我们研究新诞生大质量中子星的一些物理属性提供宝贵的机会.

5 爆发率、光度函数和探测率

鉴于短伽马暴的致密星并合起源, 其爆发率 $\dot{R}_{\text{SGRB}}(z)$ 与宇宙恒星形成率 $\dot{\rho}_*(z)$ 之间的关系原则上可以通过一个服从一定分布的延迟时间 τ 相关^[135, 136]:

$$\dot{R}_{\text{SGRB}}(z) \propto (1+z) \int_{\tau_{\min}}^{\tau(z)-t(z_b)} \frac{\dot{\rho}_*[t(z)-\tau]}{1+z[t(z)-\tau]} P(\tau) d\tau$$

$$\propto (1+z) \int_{z[t(z)-\tau_{\min}]}^{z_b} \frac{\dot{\rho}_*(z')}{1+z'} P[t(z)-t(z')] \frac{dt}{dz'} dz', \quad (7)$$

延迟时间 τ 的具体数值决定于双星系统的形成过程和它们轨道能量的引力波衰减时标. 对于服从幂律分布的轨道半径和固定的轨道椭率, 时间延迟的分布函数可以写为 $P(\tau) \propto \tau^{-1}$.

为了计算具体的短暴观测数目并与观测相比较, 还需要进一步知道爆发率在不同爆发能量或爆发光度上的分布. 一方面, 不同短暴的本征爆发能量很可能存在区别, 具有一定的分布区间和分布形式. 另一方面, 对于单个短暴而言, 恰如GRB 170817A所显示的, 其辐射光度在喷流的不同角度方向也存在着明显的差异(即具有喷流角向结构). 不妨记喷流中心的光度为 L_c 及其所满足的分布函数为 $\Phi(L_c)$ (称为短伽马暴的本征光度函数), 则可计算在一定流量范围或一定红移范围内的短伽马暴可观测数目为

$$N(P_1, P_2) = \frac{\Delta\Omega}{4\pi} T \int_0^{z_{\max}} \int_{P_1}^{P_2} \int_0^{\theta_{v,\max}} \dot{R}_{\text{SGRB}}(z) \Phi(L_c) \times \eta(P) \sin \theta_v d\theta_v dP \frac{dV(z)}{1+z}, \quad (8)$$

和

$$N(z_1, z_2) = \frac{\Delta\Omega}{4\pi} T \int_{z_1}^{z_2} \int_0^{P_{\max}} \int_0^{\theta_{v,\max}} \dot{R}_{\text{SGRB}}(z) \Phi(L_c) \times \eta(P) \vartheta_z(z, P) \sin \theta_v d\theta_v dP \frac{dV(z)}{1+z}, \quad (9)$$

其中 $\Delta\Omega$ 为探测器的视场大小, T 为探测器的有效观测时间, $\theta_{v,\max}$ 为最大可观测角度(其值决定于探测器的性能), $\eta(P)$ 为探测器的触发函数, $\vartheta_z(z, P)$ 为红移探测效率. 上述计算中涉及的辐射流量决定于表观各向同性光度 $L_{\text{iso}} = 4\pi d_l^2 P$, 而表观光度与 L_c 之间的关系则决定于短伽马暴喷流的具体结构和相对于喷流中轴的观测角 θ_v . 基于一定的喷流结构, 再利用(8)和(9)式对短伽马暴观测样本的流量和红移分布进行拟合, 原则上便可限定模型(方程)中的未定参数, 特别是本征光度函数的形式.

文献中常见的喷流结构主要有三种: 一是顶帽式(Top-hat)结构, 二是单一高斯^[137, 138]或者单一幂律衰减结构^[137, 139], 三是完全分立的双成分结

构^[140]. 不过, 对于喷流结构的观测限制其实是非常困难的, 因为涉及的模型参数较多且参数的简并性大而可用的观测结果却十分稀少. Tan和Yu¹⁾最近研究发现, 为了同时说明GRB 170817A所反映的短暴本地爆发率和GRB 170817A的瞬时和余辉辐射性质, 在较大角度范围内其喷流结构最可能具有近似双高斯的轮廓(可视为是上述几种喷流结构的综合和细化). 从喷流经抛射物传播并突破的过程来看, 形成这种双高斯喷流结构还是比较自然的(如图18^[141]右下所示). 在这种喷流结构下, 可以发现本征光度函数 $\Phi(L_c)$ 的形式可能相对比较简单, 大体可用单一幂律函数给予有效的表达:

$$\Phi(L_c) = \Phi_* \left(\frac{L_c}{L_c^*} \right)^{-\gamma} \exp \left(-\frac{L_c}{L_c^*} \right), \quad (10)$$

其中 γ 为幂指数. 在早先的研究中, 人们常常忽略了短伽马暴光度对观测方向的依赖, 把观测得到的光度分布全部归结于光度函数的因素, 从而得到了分段幂律的函数形式^[142, 143](不妨称之为表观光度函数). 因此, 一方面, 在相对较高的光度范围内($\geq 10^{50} \text{ erg s}^{-1}$), 这种分段幂律的表观光度函数恰是单一幂律本征光度函数和观测方向随机分布相耦合的结果. 另一方面, 表观光度函数的低光度部分($\leq 10^{50} \text{ erg s}^{-1}$)则将完全反映喷流辐射随角度的分布情况. 对于大角度的喷流辐射, 由于光度较低, 通常只有在足够近的距离上才能看到(如GRB 170817A), 但好在它们的事件率要比喷流核心附近的高光度辐射高很多. 所以, 如果将来能够通过引力波引领的方式在近距离范围内发现较大数目的类似于GRB 170817A的短暴, 将对确定短暴喷流的大角度结构提供重要帮助. 考虑到光度与光子能量之间的相关性, 可以相信喷流大角度辐射的光子能量是比较低的, 因而可能更适合使用能段偏软的探测器对它们进行观测.

在一定的距离范围内, 引力波探测器LIGO和Virgo原则上可以捕捉到来自宇宙几乎各个方向上的引力波信号, 而GECAM也可以全天候监测宇宙中的伽马暴. 所以, 只要某个双致密星并合事件发生得足够近, 那么由它所导致的引力波和短伽

马暴辐射就可以被LIGO/Virgo和GECAM同时捕捉到. 对于双中子星并合而言, 在假定引力波信噪比需大于8的情况下, aLIGO在2019–2020年O3阶段的有效探测距离约为110–130 Mpc, 在2021/2022–2022/2023年O4阶段为160–190 Mpc, 在2024/2025–2026年O5阶段将达到330 Mpc^[144]. 基于这些引力波探测的预期, 利用Tan等人¹⁾得到的有关模型参数(模型A和B), 我们计算了GECAM未来每年能够探测到的与引力波事件成协的短伽马暴数目, 具体如表1¹⁾所列. 这里, GECAM的观测能段取为6 keV–5 MeV, 流量阈值为 $P_{\text{th}} = 2 \times 10^{-8} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 并考虑其具有全天视场.

图 18 短伽马暴喷流结构的数值模拟结果(a)和不同观测方向对应的余辉光变曲线(b). 图片取自参考文献^[141]

Figure 18 Numerical simulation of a SGRB jet (a) and the afterglow light curves from different viewing angles (b). This figure is taken from ref. ^[141].

表 1 预期GECAM每年可探测到的与引力波成协的短伽马暴数目¹⁾

Table 1 The detectable number per year of the GW-associated SGRBs for GECAM¹⁾

Model	<100 Mpc	<200 Mpc	<300 Mpc
A	$0.9^{+0.6}_{-0.4}$	$7.9^{+4.7}_{-3.3}$	$20.9^{+15.4}_{-10.7}$
B	$0.4^{+0.4}_{-0.2}$	$3.3^{+2.8}_{-1.4}$	$9.3^{+9.1}_{-4.4}$

1) Tan W W, Yu Y W. The jet structure and the intrinsic luminosity of short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, submitted

6 总结和展望

短伽马暴研究迄今已历时半个世纪,特别是在它们的余辉辐射被发现以来的十余年间更是获得了长足的发展,从余辉流量、宿主星系性质、红移分布等多个方面暗示着它们的致密星并合起源. 2017年,短伽马暴GRB 170817A和引力波信号GW 170817的成协事件更是为关于短暴起源的世纪猜想提供了一个坚实的证据,并极大地丰富了人们对短伽马暴爆发特性的认识,特别是对喷流结构和千新星/并合新星现象的认识. 后者的发现证实了并合抛射物的存在并使我们一定程度地了解了它的物质组成,有力地促进了宇宙中超重元素起源之谜的破解.

时值当下,回顾短伽马暴研究的这些历程、现状和成就,我们也可以看到仍然存在着一系列重大的问题有待进一步的探索和回答. GRB 170817A辐射性质的特殊之处是否恰如现在所理解的完全来自观测方向的大角度? 如若确实如此,其喷流结构究竟是怎样的且是如何形成的? 在与喷流形成相对应的爆发过程中,短伽马暴的前兆辐射、瞬时辐射、延展辐射等不同的辐射阶段分别对应了怎样的物理过程和辐射机制? 其中,并合产物可能扮演了什么角色、具有什么性质? 回答这些问题无疑需要我们观测到更多的与引力波成协的短伽马暴事例. 在

更多的观测下,我们也将有更大的希望去进一步发现或检验中子星-黑洞并合乃至双黑洞并合产生短伽马暴辐射的能力,这将极大地促进我们对中子星物态、双致密星系统的形成和环境以及广义相对论下的时空观的理解. 此外,更鉴于引力波信号的标准汽笛性质,更多的引力波-短伽马暴观测样本还将有助于我们更好地限制哈勃常数,促进宇宙学研究^[145, 146].

面向这些重大的科学需求和短伽马暴的辐射特性,我们十分有必要建设一个具有宽(能够横跨伽马射线和X射线)且偏软观测能段和较高灵敏度的探测器. 既能使我们更好地确定伽马暴的能谱以理解其辐射机制,更使我们具有观测更多延展辐射和大角度喷流辐射等较软伽马射线辐射的机会,从而可以更好地定位短伽马暴特别是近邻宇宙中的样本. 因此,我国GECAM卫星项目的提出和建设十分必要,尤其契合未来几年aLIGO等引力波探测器的重要观测时期. 为了应对引力波事件在时间和空间上的随机性, GECAM的背对背双卫星设计更将使其具备全天候的监测能力,有望每年发现上百例短伽马暴,其中可有数例落于aLIGO的探测视界之内. 因此,可以相信, GECAM将成为观察双致密星并合事件的一个重要窗口,从而使我们有幸触及引力波和短伽马暴研究的下一个激动人心的重大发现.

参考文献

- 1 Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys J*, 1975, 195: L51
- 2 Taylor J H, Weisberg J M. Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16. *Astrophys J*, 1989, 345: 434–450
- 3 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102
- 4 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101
- 5 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 848: L13
- 6 Thorne K S. 300 Years of Gravitation. In: Hawking S W, Israel W, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 330–458
- 7 Bartos I, Brady P, Márka S. How gravitational-wave observations can shape the gamma-ray burst paradigm. *Class Quantum Grav*, 2013, 30: 123001
- 8 Lattimer J M, Schramm D N. Black-hole-neutron-star collisions. *Astrophys J*, 1974, 192: L145
- 9 Rosswog S, Liebendörfer M, Thielemann F K, et al. Mass ejection in neutron star mergers. *Astron Astrophys*, 1999, 341: 499–526
- 10 Li L X, Paczyński B. Transient events from neutron star mergers. *Astrophys J*, 1998, 507: L59–L62

- 11 Metzger B D, Martínez-Pinedo G, Darbha S, et al. Electromagnetic counterparts of compact object mergers powered by the radioactive decay of r-process nuclei. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 406: 2650–2662
- 12 Barnes J, Kasen D. Effect of a high opacity on the light curves of radioactively powered transients from compact object mergers. *Astrophys J*, 2013, 775: 18
- 13 Blinnikov S I, Novikov I D, Perevodchikova T V, et al. Exploding neutron stars in close binaries. *Soviet Astron Lett*, 1984, 10: 177–179
- 14 Paczynski B. Gamma-ray bursters at cosmological distances. *Astrophys J*, 1986, 308: L43
- 15 Eichler D, Livio M, Piran T, et al. Nucleosynthesis, neutrino bursts and γ -rays from coalescing neutron stars. *Nature*, 1989, 340: 126–128
- 16 Narayan R, Paczynski B, Piran T. Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars. *Astrophys J*, 1992, 395: L83
- 17 Paczynski B, Xu G. Neutrino bursts from gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1994, 427: 708
- 18 Rees M J, Meszaros P. Unsteady outflow models for cosmological gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1994, 430: L93
- 19 Meszaros P, Rees M J. Optical and long-wavelength afterglow from gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1997, 476: 232–237
- 20 Sari R, Piran T, Narayan R. Spectra and light curves of gamma-ray burst afterglows. *Astrophys J*, 1998, 497: L17–L20
- 21 Huang Y F, Gou L J, Dai Z G, et al. Overall evolution of jetted gamma-ray burst ejecta. *Astrophys J*, 2000, 543: 90–96
- 22 Dai Z G, Lu T. γ -ray bursts and afterglows from rotating strange stars and neutron stars. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 4301–4304
- 23 Zhang B, Mészáros P. Gamma-ray burst afterglow with continuous energy injection: Signature of a highly magnetized millisecond pulsar. *Astrophys J*, 2001, 552: L35–L38
- 24 Yu Y W, Zhang B, Gao H. Bright “merger-nova” from the remnant of a neutron star binary merger: A signature of a newly born, massive, millisecond magnetar. *Astrophys J*, 2013, 776: L40
- 25 Yu Y W, Cheng K S, Cao X F. The role of newly born magnetars in gamma-ray burst X-ray afterglow emission: Energy injection and internal emission. *Astrophys J*, 2010, 715: 477–484
- 26 Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. Observations of gamma-ray bursts of cosmic origin. *Astrophys J*, 1973, 182: L85
- 27 Metzger M R, Djorgovski S G, Kulkarni S R, et al. Spectral constraints on the redshift of the optical counterpart to the γ -ray burst of 8 May 1997. *Nature*, 1997, 387: 878–880
- 28 Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. Identification of two classes of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1993, 413: L101
- 29 Ghirlanda G, Nava L, Ghisellini G, et al. Short versus long gamma-ray bursts: Spectra, energetics, and luminosities. *Astron Astrophys*, 2009, 496: 585–595
- 30 Goldstein A, Burgess J M, Preece R D, et al. The Fermi GBM gamma-ray burst spectral catalog: The first two years. *Astrophys J Suppl Ser*, 2012, 199: 19
- 31 Norris J P, Marani G F, Bonnell J T. Connection between energy-dependent lags and peak luminosity in gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2000, 534: 248–257
- 32 Chen L, Lou Y Q, Wu M, et al. Distribution of spectral lags in gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2005, 619: 983–993
- 33 Fong W, Berger E. The locations of short gamma-ray bursts as evidence for compact object binary progenitors. *Astrophys J*, 2013, 776: 18
- 34 Nakar E. Short-hard gamma-ray bursts. *Phys Rep*, 2007, 442: 166–236
- 35 Galama T J, Vreeswijk P M, van Paradijs J, et al. An unusual supernova in the error box of the γ -ray burst of 25 April 1998. *Nature*, 1998, 395: 670–672
- 36 Bloom J S, Kulkarni S R, Djorgovski S G, et al. The unusual afterglow of the γ -ray burst of 26 March 1998 as evidence for a supernova connection. *Nature*, 1999, 401: 453–456
- 37 Hjorth J, Sollerman J, Møller P, et al. A very energetic supernova associated with the gamma-ray burst of 29 March 2003. *Nature*, 2003, 423: 847–850
- 38 Stanek K Z, Matheson T, Garnavich P M, et al. Spectroscopic discovery of the supernova 2003dh associated with GRB 030329. *Astrophys J*, 2003, 591: L17–L20
- 39 Bloom J S, Kulkarni S R, Djorgovski S G. The observed offset distribution of gamma-ray bursts from their host galaxies: A robust clue to the nature of the progenitors. *Astron J*, 2002, 123: 1111–1148
- 40 Gehrels N, Sarazin C L, O’Brien P T, et al. A short gamma-ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift $z = 0.225$. *Nature*, 2005, 437: 851–854
- 41 Goldstein A, Veres P, Burns E, et al. An ordinary short gamma-ray burst with extraordinary implications: Fermi-GBM detection of GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 848: L14
- 42 Band D, Matteson J, Ford L, et al. BATSE observations of gamma-ray burst spectra. I-Spectral diversity. *Astrophys J*, 1993, 413: 281
- 43 Ghirlanda G, Ghisellini G, Celotti A. The spectra of short gamma-ray bursts. *Astron Astrophys*, 2004, 422: L55–L58

- 44 Sakamoto T, Yoshida Y, Serino M. Investigation of similarity in the spectra between short- and long-duration gamma-ray bursts. *Galaxies*, 2018, 6: 106
- 45 Ackermann M, Asano K, Atwood W B, et al. Fermi observations of GRB 090510: A short-hard gamma-ray burst with an additional, hard power-law component from 10 keV to GeV energies. *Astrophys J*, 2010, 716: 1178–1190
- 46 Dai Z G, Lu T. Spectrum and duration of delayed MeV-GeV emission of gamma-ray bursts in cosmic background radiation fields. *Astrophys J*, 2002, 580: 1013–1016
- 47 Amati L, Frontera F, Tavani M, et al. Intrinsic spectra and energetics of BeppoSAX gamma-ray bursts with known redshifts. *Astron Astrophys*, 2002, 390: 81–89
- 48 Yonetoku D, Murakami T, Nakamura T, et al. Gamma-ray burst formation rate inferred from the spectral peak energy-peak luminosity relation. *Astrophys J*, 2004, 609: 935–951
- 49 Nava L, Salvaterra R, Ghirlanda G, et al. A complete sample of bright Swift long gamma-ray bursts: Testing the spectral-energy correlations. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 421: 1256–1264
- 50 Lu R J, Wei J J, Liang E W, et al. A comprehensive analysis of Fermi gamma-ray burst data. II. E_p evolution patterns and implications for the observed spectrum-luminosity relations. *Astrophys J*, 2012, 756: 112
- 51 Ghirlanda G, Ghisellini G, Lazzati D. The collimation-corrected gamma-ray burst energies correlate with the peak energy of their νF_ν spectrum. *Astrophys J*, 2004, 616: 331–338
- 52 Pe'er A. Temporal evolution of thermal emission from relativistically expanding plasma. *Astrophys J*, 2008, 682: 463–473
- 53 Beloborodov A M. Radiative transfer in ultrarelativistic outflows. *Astrophys J*, 2011, 737: 68
- 54 Daigne F, Mochkovitch R. Gamma-ray bursts from internal shocks in a relativistic wind: Temporal and spectral properties. *Mon Not R Astron Soc*, 1998, 296: 275–286
- 55 Zhang B, Yan H. The Internal-collision-induced magnetic reconnection and turbulence (ICMART) model of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2011, 726: 90
- 56 Zhang S N, Kole M, Bao T W, et al. Detailed polarization measurements of the prompt emission of five gamma-ray bursts. *Nat Astron*, 2019, 3: 258–264
- 57 Troja E, Rosswog S, Gehrels N. Precursors of short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2010, 723: 1711–1717
- 58 Minaev P Y, Pozanenko A S. Precursors of short gamma-ray bursts in the SPI-ACS/INTEGRAL experiment. *Astron Lett*, 2017, 43: 1–20
- 59 Zhong S Q, Dai Z G, Cheng J G, et al. Precursors in short gamma-ray bursts as a possible probe of progenitors. *Astrophys J*, 2019, 884: 25
- 60 Wang J S, Yang Y P, Wu X F, et al. FAST radio bursts from the inspiral of double neutron stars. *Astrophys J*, 2016, 822: L7
- 61 Lazzati D, Ramirez-Ruiz E, Ghisellini G. Possible detection of hard X-ray afterglows of short gamma-ray bursts. *Astron Astrophys*, 2001, 379: L39–L43
- 62 Mazets E P, Aptekar R L, Frederiks D D, et al. Third Rome workshop on gamma-ray bursts. In: Proceedings of the Afterglow Era ASP Conference Series. Feroci M, Frontera F, Masetti N, et al., eds. Rome, 2004. 312: 102
- 63 Norris J P, Bonnell J T. Short gamma-ray bursts with extended emission. *Astrophys J*, 2006, 643: 266–275
- 64 Norris J P, Gehrels N, Scargle J D. Threshold for extended emission in short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2010, 717: 411–419
- 65 Norris J P, Gehrels N, Scargle J D. Heterogeneity in short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2011, 735: 23
- 66 Villaseñor J S, Lamb D Q, Ricker G R, et al. Discovery of the short gamma-ray burst GRB 050709. *Nature*, 2005, 437: 855–858
- 67 Barthelmy S D, Chincarini G, Burrows D N, et al. An origin for short gamma-ray bursts unassociated with current star formation. *Nature*, 2005, 438: 994–996
- 68 Barthelmy S D. Swift-BAT results on the prompt emission of short bursts. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2007, 365: 1281–1291
- 69 Price P A, Berger E, Fox D B. GRB 060614: Redshift. GRB Coordinates Network, 2006, 5275: 1
- 70 Gal-Yam A, Fox D B, Price P A, et al. A novel explosive process is required for the gamma-ray burst GRB 060614. *Nature*, 2006, 444: 1053–1055
- 71 Berger E. Short-duration gamma-ray bursts. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2014, 52: 43–105
- 72 Metzger B D, Quataert E, Thompson T A. Short-duration gamma-ray bursts with extended emission from protomagnetar spin-down. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 385: 1455–1460
- 73 Bucciantini N, Metzger B D, Thompson T A, et al. Short gamma-ray bursts with extended emission from magnetar birth: Jet formation and collimation. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 419: 1537–1545
- 74 Lazzati D, Morsony B J, Begelman M C. Short-duration gamma-ray bursts from off-axis collapsars. *Astrophys J*, 2010, 717: 239–244
- 75 Fong W, Berger E, Margutti R, et al. A decade of short-duration gamma-ray burst broadband afterglows: Energetics, circumburst densities, and

- jet opening angles. *Astrophys J*, 2015, 815: 102
- 76 Rossi E, Lazzati D, Rees M J. Afterglow light curves, viewing angle and the jet structure of γ -ray bursts. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 332: 945–950
- 77 Medvedev M V, Loeb A. On poynting-flux-driven bubbles and shocks around merging neutron star binaries. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 431: 2737–2744
- 78 Medvedev M V, Loeb A. Dynamics of astrophysical bubbles and bubble-driven shocks: Basic theory, analytical solutions, and observational signatures. *Astrophys J*, 2013, 768: 113
- 79 Li Y S, Chen A, Yu Y W. Observational signature of a wind bubble environment for double neutron star mergers. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 115
- 80 Gehrels N, Ramirez-Ruiz E, Fox D B. Gamma-ray bursts in the swift era. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2009, 47: 567–617
- 81 Zhang B, Fan Y Z, Dyks J, et al. Physical processes shaping gamma-ray burst X-ray afterglow light curves: Theoretical implications from the swift X-ray telescope observations. *Astrophys J*, 2006, 642: 354–370
- 82 Ellis J, Olive K A, Sandick P. What if supersymmetry breaking appears below the GUT scale? *Phys Lett B*, 2006, 642: 389–399
- 83 Dai Z G. X-ray flares from postmerger millisecond pulsars. *Science*, 2006, 311: 1127–1129
- 84 Yu Y W, Dai Z G. Shallow decay phase of GRB X-ray afterglows from relativistic wind bubbles. *Astron Astrophys*, 2007, 470: 119–122
- 85 Gehrels N, Barthelmy S D, Burrows D N, et al. Correlations of prompt and afterglow emission in swift long and short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2008, 689: 1161–1172
- 86 Ghisellini G, Ghirlanda G, Nava L, et al. GeV emission from gamma-ray bursts: A radiative fireball? *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 403: 926–937
- 87 Acciari V A, et al. (MAGIC Collaboration). Teraelectronvolt emission from the γ -ray burst GRB 190114C. *Nature*, 2019, 575: 455–458
- 88 Veres P, Bhat P N, Briggs M S, et al. Observation of inverse Compton emission from a long γ -ray burst. *Nature*, 2019, 575: 459–463
- 89 Tanvir N R, Levan A J, Fruchter A S, et al. A “kilonova” associated with the short-duration γ -ray burst GRB 130603B. *Nature*, 2013, 500: 547–549
- 90 Gao H, Ding X, Wu X F, et al. GRB 080503 late afterglow re-brightening: Signature of a magnetar-powered merger-nova. *Astrophys J*, 2015, 807: 163
- 91 Jin Z P, Li X, Cano Z, et al. The light curve of the macronova associated with the long-short burst GRB 060614. *Astrophys J*, 2015, 811: L22
- 92 Gao H, Zhang B, Lü H J, et al. Searching for magnetar-powered merger-novae from short GRBs. *Astrophys J*, 2017, 837: 50
- 93 Troja E, Sakamoto T, Cenko S B, et al. An achromatic break in the afterglow of the short GRB 140903A: Evidence for a narrow jet. *Astrophys J*, 2016, 827: 102
- 94 Troja E, Castro-Tirado A J, Becerra Gonzalez J, et al. The afterglow and kilonova of the short GRB 160821B. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 489: 2104
- 95 Arcavi I, Hosseinzadeh G, Howell D A, et al. Optical emission from a kilonova following a gravitational-wave-detected neutron-star merger. *Nature*, 2017, 551: 64–66
- 96 Smartt S J, Chen T W, Jerkstrand A, et al. A kilonova as the electromagnetic counterpart to a gravitational-wave source. *Nature*, 2017, 551: 75–79
- 97 Freiburghaus C, Rosswog S, Thielemann F K. r-process in neutron star mergers. *Astrophys J*, 1999, 525: L121–L124
- 98 Kasen D, Metzger B, Barnes J, et al. Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational-wave event. *Nature*, 2017, 551: 80–84
- 99 Surman R, McLaughlin G C, Ruffert M, et al. process nucleosynthesis in hot accretion disk flows from black hole-neutron star mergers. *Astrophys J*, 2008, 679: L117–L120
- 100 Rosswog S, Korobkin O, Arcones A, et al. The long-term evolution of neutron star merger remnants-I. The impact of r-process nucleosynthesis. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 439: 744–756
- 101 Kulkarni S R. Modeling supernova-like explosions associated with gamma-ray bursts with short durations. arXiv: astro-ph/0510256
- 102 Kimura S S, Murase K, Bartos I, et al. Transejecta high-energy neutrino emission from binary neutron star mergers. *Phys Rev D*, 2018, 98: 043020
- 103 Gottlieb O, Nakar E, Piran T, et al. A cocoon shock breakout as the origin of the γ -ray emission in GW170817. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 479: 588–600
- 104 Waxman E, Bahcall J. High energy neutrinos from cosmological gamma-ray burst fireballs. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 2292–2295
- 105 Fong W, Berger E, Fox D B. Hubble space telescope observations of short gamma-ray burst host galaxies: Morphologies, offsets, and local

- environments. *Astrophys J*, 2010, 708: 9–25
- 106 Berger E, Price P A, Cenko S B, et al. The afterglow and elliptical host galaxy of the short gamma-ray burst GRB 050724. *Nature*, 2005, 438: 988–990
- 107 Berger E. The host galaxies of short-duration gamma-ray bursts: Luminosities, metallicities, and star formation rates. *Astrophys J*, 2009, 690: 231–237
- 108 Fong W, Berger E. The locations of short gamma-ray bursts as evidence for compact object binary progenitors. *Astrophys J*, 2013, 776: 18
- 109 Shoemaker I M, Murase K. Constraints from the time lag between gravitational waves and gamma rays: Implications of GW170817 and GRB 170817A. *Phys Rev D*, 2018, 97: 083013
- 110 Zhang B B, Zhang B, Sun H, et al. A peculiar low-luminosity short gamma-ray burst from a double neutron star merger progenitor. *Nat Commun*, 2018, 9: 447
- 111 Granot J, Guetta D, Gill R. Lessons from the short GRB 170817A: The first gravitational-wave detection of a binary neutron star merger. *Astrophys J*, 2017, 850: L24
- 112 Kathirgamaraju A, Barniol Duran R, Giannios D. Off-axis short GRBs from structured jets as counterparts to GW events. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2018, 473: L121–L125
- 113 Drout M R, Piro A L, Shappee B J, et al. Light curves of the neutron star merger GW170817/SSS17a: Implications for r-process nucleosynthesis. *Science*, 2017, 358: 1570–1574
- 114 Pian E, D’Avanzo P, Benetti S, et al. Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger. *Nature*, 2017, 551: 67–70
- 115 Yu Y W, Liu L D, Dai Z G. A long-lived remnant neutron star after GW170817 inferred from its associated kilonova. *Astrophys J*, 2018, 861: 114
- 116 Li S Z, Liu L D, Yu Y W, et al. What powered the optical transient AT2017gfo associated with GW170817? *Astrophys J*, 2018, 861: L12
- 117 Troja E, Piro L, van Eerten H, et al. The X-ray counterpart to the gravitational-wave event GW170817. *Nature*, 2017, 551: 71–74
- 118 Hallinan G, Corsi A, Mooley K P, et al. A radio counterpart to a neutron star merger. *Science*, 2017, 358: 1579–1583
- 119 Ruan J J, Nynka M, Haggard D, et al. Brightening X-ray emission from GW170817/GRB 170817A: Further evidence for an outflow. *Astrophys J*, 2018, 853: L4
- 120 Mooley K P, Nakar E, Hotokezaka K, et al. A mildly relativistic wide-angle outflow in the neutron-star merger event GW170817. *Nature*, 2018, 554: 207–210
- 121 Lamb G P, Kobayashi S. Electromagnetic counterparts to structured jets from gravitational wave detected mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 472: 4953–4964
- 122 Margutti R, Berger E, Fong W, et al. The electromagnetic counterpart of the binary neutron star merger LIGO/Virgo GW170817. V. Rising X-ray emission from an off-axis jet. *Astrophys J*, 2017, 848: L20
- 123 Xiao D, Liu L D, Dai Z G, et al. Afterglows and kilonovae associated with nearby low-luminosity short-duration gamma-ray bursts: Application to GW170817/GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 850: L41
- 124 Alexander K D, Berger E, Fong W, et al. The electromagnetic counterpart of the binary neutron star merger LIGO/Virgo GW170817. VI. Radio constraints on a relativistic jet and predictions for late-time emission from the kilonova ejecta. *Astrophys J*, 2017, 848: L21
- 125 Piro L, Troja E, Zhang B, et al. A long-lived neutron star merger remnant in GW170817: Constraints and clues from X-ray observations. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 483: 1912–1921
- 126 Faber J A, Rasio F A. Binary neutron star mergers. *Living Rev Relativ*, 2012, 15: 8
- 127 Lattimer J M, Prakash M. Neutron star structure and the equation of state. *Astrophys J*, 2001, 550: 426–442
- 128 Piro A L, Giacomazzo B, Perna R. The fate of neutron star binary mergers. *Astrophys J*, 2017, 844: L19
- 129 Lü H J, Shen J, Lan L, et al. Diagnosing the remnants of binary neutron star merger from GW170817/GRB170817A event. *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 486: 4479–4484
- 130 Dai Z G, Lu T. Gamma-ray burst afterglows and evolution of postburst fireballs with energy injection from strongly magnetic millisecond pulsars. *Astron Astrophys*, 1998, 333: L87–L90
- 131 Yu Y W, Cao X F, Zheng X P. The newly born magnetars powering gamma-ray burst internal-plateau emission: Are there strange stars? *Astrophys J*, 2009, 706: L221–L225
- 132 Lasky P D, Haskell B, Ravi V, et al. Nuclear equation of state from observations of short gamma-ray burst remnants. *Phys Rev D*, 2014, 89: 047302
- 133 Gao H, Zhang B, Lü H J. Constraints on binary neutron star merger product from short GRB observations. *Phys Rev D*, 2016, 93: 044065

- 134 Lü H J, Zhang B, Lei W H, et al. The millisecond magnetar central engine in short GRBs. *Astrophys J*, 2015, 805: 89
- 135 Guetta D, Piran T. The BATSE-Swift luminosity and redshift distributions of short-duration GRBs. *Astron Astrophys*, 2006, 453: 823–828
- 136 Regimbau T, Siellez K, Meacher D, et al. Revisiting coincidence rate between gravitational wave detection and short gamma-ray burst for the advanced and third generation. *Astrophys J*, 2015, 799: 69
- 137 Kumar P, Granot J. The evolution of a structured relativistic jet and gamma-ray burst afterglow light curves. *Astrophys J*, 2003, 591: 1075–1085
- 138 Rossi E M, Lazzati D, Salmonson J D, et al. The polarization of afterglow emission reveals γ -ray bursts jet structure. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 354: 86–100
- 139 Dai Z G, Gou L J. Gamma-ray burst afterglows from anisotropic jets. *Astrophys J*, 2001, 552: 72–80
- 140 Berger E, Kulkarni S R, Frail D A. A standard kinetic energy reservoir in gamma-ray burst afterglows. *Astrophys J*, 2003, 590: 379–385
- 141 Lazzati D, Perna R, Morsony B J, et al. Late time afterglow observations reveal a collimated relativistic jet in the ejecta of the binary neutron star merger GW170817. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 241103
- 142 Wanderman D, Piran T. The rate, luminosity function and time delay of non-Collapsar short GRBs. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 448: 3026–3037
- 143 Ghirlanda G, Salafia O S, Pescalli A, et al. Short gamma-ray bursts at the dawn of the gravitational wave era. *Astron Astrophys*, 2016, 594: A84
- 144 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA. *Living Rev Relativ*, 2018, 21: 3
- 145 Schutz B F. Determining the Hubble constant from gravitational wave observations. *Nature*, 1986, 323: 310–311
- 146 Holz D E, Hughes S A. Using gravitational-wave standard sirens. *Astrophys J*, 2005, 629: 15–22

Gamma-ray bursts associating with gravitational waves from compact binary mergers

YU Yun-Wei^{1*}, LI Yong-Sen¹, TAN Wei-Wei² & DAI Zi-Gao³

¹*Institute of Astrophysics, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;*

²*School of Physics and Mechanical Electrical & Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, China;*

³*School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

Neutron star-neutron star, neutron star-black hole, and black hole-black hole mergers are the most promising sources of high-frequency gravitational waves (GWs) in the universe. Simultaneously, these compact binary mergers can also produce various electromagnetic emission represented by short gamma-ray burst (SGRB) phenomena, which had been confirmed by the discoveries in the GW170817/GRB 170817A event. Therefore, these merger events are undoubtedly one of the most important targets of the multi-messenger astronomical researches. We provide a brief review on the state of art of the SGRB studies. First of all, the emission properties during the prompt, precursor, extended, and afterglow phases of SGRBs are described subsequently by following a theoretical understanding for relativistic jets. For completeness, we also pay many attentions to the associated kilonova/mergernova emission from a quasi-isotropic merger ejecta, the potential neutrino production, and the host galaxies of SGRBs, which can provide independent constraints on the origin of SGRBs. The observations in the GW170817/GRB 170817A event are specially introduced, in particular, focusing on the implications for the merger product and the jet structure. Finally, by considering of the viewing angle-dependence of SGRB emission, we discuss a new understanding of the luminosity function of SGRBs. Then, we can prospect the future observation by the GECAM satellites, which are specially designed to monitor the GW-associated SGRBs and planned to be launched in 2020.

gamma-ray bursts, gravitational waves, compact stars

PACS: 98.70.Rz, 95.85.Sz, 97.60.Jd

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0400](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0400)