引力波事件GW170817的电磁对应体

耿金军^{1,2*}, 肖笛^{1,2}, 王善钦^{1,2,3}, 戴子高^{1,2*}

1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210046;

2. 南京大学教育部现代天文与天体物理重点实验室, 南京 210046;

3. Department of Astronomy, University of California, Berkeley 94720-3411, USA

*联系人, 耿金军, E-mail: gengjinjun@nju.edu.cn; 戴子高, E-mail: dzg@nju.edu.cn

收稿日期: 2018-04-02; 接受日期: 2018-05-03; 网络出版日期: 2018-06-11

国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845800)、国家自然科学基金(编号: 11573014)、博士后创新人才支持计划(编号: BX201700115)和博士后面上基金(编号: 2017M620199)资助

摘要 2017年8月17日, 激光干涉引力波天文台(LIGO)首次探测到来自双中子星合并的引力波GW170817. 伴随GW170817的短伽玛射线暴与千新星也分别在1.74 s后和10.9 h后被伽玛射线卫星和光学望远镜探测到. 对这些电磁对应体的观测与研究首次证实双中子星并合会产生大量重元素并形成千新星. 通过相关理论与观测的比较, 人们对于双中子星并合的中心引擎、短伽玛暴喷流的特性以及并合产生的抛射物性质等一系列重要的天体物理学问题进行了空前深入的研究. 本文介绍伴随GW170817的各类电磁波对应体的性质, 并探讨这些电磁波对应体的物理起源.

关键词 伽玛射线暴, 黑洞, 中子星, 辐射机制, 引力波

PACS: 04.30.Tv, 26.30.Hj, 94.05.Dd, 95.30.Lz, 95.85.Sz

1 引言

伽玛射线暴(Gamma-Ray Bursts, 伽玛暴或GRBs)是在宇宙空间发生的剧烈的伽玛射线(光子能量在10 keV以上)爆发现象. 一个典型伽玛暴的持续时间从几毫秒(ms)到数千秒(s)不等, 累计流量为 10^{-7} – 10^{-4} erg cm⁻², 其光变曲线呈复杂多异的单脉冲或者多脉冲形状. 伽玛暴最初于1967年被美国的军事卫星Vela探测到, 相关观测结果由于军事原因推迟到1973年才发表^[1]. 伽玛暴的持续时间一般用 T_{90} 来量化, 其定义为辐射流量从5%累积至95%之

间的时间间隔. 康普顿伽玛射线天文台(Compton Gamma Ray Observatory, CGRO)上的仪器BATSE(简称Compton GRO/BATSE)发现了伽玛暴 T_{90} 的分布呈双峰结构^[2]. 基于此, 人们将伽玛暴分为两类, 长暴($T_{90} > 2$ s)和短暴($T_{90} < 2$ s).

此后的理论与观测, 建立了伽玛暴瞬时辐射、余辉理论、爆发机制的标准模型: (1) 喷流内部通过内激波^[3–9]、磁重联耗散机制^[10–12]或光球辐射^[13–19]产生短伽玛暴的瞬时辐射. 由于相对论集束效应, 只有观测角小于喷流的半张角 θ_j 时, 我们观测到伽玛射线辐射的可能性才较大. (2) 喷流与外部介

引用格式: 耿金军, 肖笛, 王善钦, 等. 引力波事件GW170817的电磁对应体. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 079802
Geng J J, Xiao D, Wang S Q, et al. Electromagnetic counterparts to the gravitational wave event GW170817 (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 079802, doi: 10.1360/SSPMA2018-00096

质的相互作用会产生非热的余辉辐射 [20–26]. 一般来说, X射线余辉一般持续几天, 光学余辉一般持续几天到几周, 观测角不能太大 ($\theta_{\text{obs}} \lesssim 2\theta_j$) [27–30]. 射电余辉则能在更大角度上被观测, 持续时间更长, 一般为几个月到年的量级, 此时喷流已经减速到中等相对论甚至非相对论阶段 [24, 31]. (3) 长暴大多数源自大质量恒星坍缩, 因为一些长暴被发现与 Ic 型超新星相关联 [32–34]. 有些长暴则在暴后晚期 (10 d 量级) 观测到了超新星光变形态的鼓包, 同时还伴随着色演化, 这表明晚期的超新星辐射流量超过了伽玛暴余辉流量 [35, 36]. (4) 短暴可能起源于致密星 (如中子星与黑洞、中子星与中子星) 的并合 (早期的研究工作见文献 [3, 13, 37]). 2004 年升空的 Swift 卫星发现一些短暴位于椭圆星系, 与年老的恒星团成协 [38, 39], 与短暴的致密星并合起源推论一致. 然而, 这些间接证据并不能让人们确信短暴起源于致密星并合.

以上 4 个重要结论中, 前 3 个已经获得了直接的强有力证据 (仅对于瞬时辐射的具体机制还有一些问题需要澄清), 但第 4 个结论在 2017 年之前还没有直接证据. 这使得“短暴是否起源于致密星并合”这个问题尤其引人注目. 此外, Eichler 等人 [4] 不仅首次详细讨论了双中子星作为短暴的前身星的可能性, 还指出双中子星并合过程中会同时产生短暴、引力波辐射、中微子爆发, 而且合成大量超重元素. 随着理论研究的不断深入, 高能天体物理学家逐渐取得一个共识: 双中子星并合或者黑洞-中子星并合会产生非常丰富的现象. 首先, 并合产生的中心致密天体 (通常是黑洞, 在某些情况下是大质量中子星) 的吸积驱动一个高度准直的喷流 (Jet), 形成短伽玛暴; 喷流与星际介质相互作用, 产生多波段余辉; 并合过程中抛出的几乎各向同性的富中子抛射物 (Ejecta), 通过快中子俘获反应产生大量不稳定放射性重核, 衰变产生大量能量, 加热抛射物, 使其发出一种独特的紫外-光学-近红外辐射, 其峰值光度约为普通新星 (Novae) 的一千倍, 因此被称为“千新星 (Kilonova)” [40–45]. 另外, 抛射物与外部介质的相互作用在晚期也可能产生可观测的射电辐射, 一般在并合事件发生几年后 [46]. Metzger 等人 [27] 总结了双中子星并合或中子星-黑洞并合事件的可能的电磁对应体, 如图 1 所示. 根据观测角 θ_{obs} 的不同, 观测

图 1 (网络版彩图) 双中子星并合或中子星黑洞并合的电磁对应体示意图. 图片取自文献 [27]

Figure 1 (Color online) Summary of potential electromagnetic counterparts of NS-NS/NS-BH mergers. The figure is taken from ref. [27].

者会看到致密星并合产生的不同的电磁波对应体.

如果双中子星并合的产物不是黑洞, 而是稳定的毫秒级磁星 [47–49], 则电磁对应体的种类会比中心天体为黑洞的情形时更丰富. 这种情形下, 中心引擎会产生磁能主导的喷流, 由于中心磁星的旋转减速, 短暴余辉的光变曲线在能量注入时可能出现平台 (Plateau) 或耀发 (Flare) [49–51]. 另外, 各向同性的磁星风能量耗散可能产生持续时间在 10^4 s 左右的 X 射线辐射 [52, 53]. Yu 等人 [54] 指出, 由于中心磁星额外的能量注入, 此时抛射物的辐射可能达到更高亮度, 他们称之为“并合新星 (Mergernovae)”. 类似的, 磁星能量注入也可能将亚相对论的抛射物驱动至相对论速度, 抛射物与外部介质作用产生远比中心黑洞情形更加明亮的射电、光学甚至 X 射线辐射 [55–57]. 在双中子星并合事件足够近时, 不仅有可能观测到上述各种现象, 还会观测到伴随它们的引力波. 通过研究引力波与伴随的这些现象, 可以同时验证以上模型.

2015 年 9 月 14 日, 美国的激光干涉引力波天文台 (The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO) 首次直接探测到引力波 GW150914, 随后的分析表明, 这个引力波事件来自两个质量约为 $30M_{\odot}$ 的双黑洞并合事件 [58]. 这是人类首次直接探测到引力波辐射, 标志着天文学的引力波天文

学正式到来. 至今为止, LIGO正式公布了5个双黑洞并合事件. 其中Fermi卫星的GBM探测器曾宣称在GW150914 0.4 s后同一天区内探测到了一个持续时间为1 s的弱X射线暂现源(误报率为0.0022, 2.9σ). 该暂现源的持续时间、能谱与弱短伽玛暴性质相近, 疑似为GW150914的电磁对应体^[59]. 理论上双黑洞并合产生伽玛射线辐射的模型也被提出, 如带电黑洞模型等^[60–62]. 此外, 后续有一些相关研究对此疑似电磁对应体存在一些争议^[63–66]. 通常认为由于双黑洞并合没有喷射物, 因此无法产生丰富的电磁波辐射现象. 所以, 人们等待着观测双中子星并合与黑洞-中子星并合事件的机会.

2017年8月17日, LIGO和Virgo同时探测到首例由双中子星合并事件产生的引力波事件, GW170817^[67](详见图2). 与GW170817成协的短伽玛暴GRB170817A被Fermi卫星探测到^[68]. 在此基

础上, 天体物理学界对GRB 170817A的中心引擎以及瞬时辐射、余辉进行了密集观测, 获得了大量数据. 在暴后仅10.9 h, Swope望远镜就在GW170817所在的星系中探测到一个光学爆发, 此后对这个对应体的紫外/光学/近红外的多波段后续观测^[69–74]也立即启动, 获得了大量有价值的观测资料, 并证实该对应体的光学/紫外/近红外对应体的光变曲线与光谱与理论预言的双中子星并合所产生千新星(Kilonova)^[40,42,45,75]的性质一致. 这些观测事实, 确认了短伽玛暴GRB 170817A起源于双中子星合并过程. 综合这些强有力的分析, 人们终于证实了以下几个重要结论: 至少一部分短暴确实源自双中子星的并合; 双中子星并合可以产生千新星, 也是重元素核的重要来源. 2017年10月16日, LIGO组为首的多个研究机构同时宣布了这个重大突破, 引起天文学界与大众的密切关注.

本文评述GW170817的各种电磁波对应体性质、模型和存在的关键科学问题. 我们在第2–5节分别讨论GRB170817A的中心引擎、瞬时辐射、多波段余辉和千新星/巨新星AT2017gfo的物理性质与理论模型, 并在第6节进行简短的总结与展望.

2 伽玛暴的中心引擎

2.1 GW170817的并合产物

对于双中子星合并, 其遗留的天体可能是黑洞、短暂存在的大质量中子星或者长期稳定中子星^[76]. 如果两个中子星并合之后的总质量(M_{tot})小于TOV方程计算(无转动情形下)得到的最大质量 M_{TOV} , 那么并合产生一个稳定的中子星; 如果两个中子星并合之后的总质量大于有较差转动且高速自转的中子星的最大允许质量($M_{\text{DR,K,max}}$), 那么并合直接产生一个黑洞; 而对于中间的情形, 由于并合前较大的轨道角动量能够使得合并后的天体高速自转($M_{\text{K,max}}$)甚至有较差转动, 这两种形式的转动提供的离心力能够维持形成的大质量中子星不是一开始就坍缩成黑洞, 而是在转动减慢后再坍缩成黑洞. 如果 $M_{\text{DR,K,max}} > M_{\text{tot}} > M_{\text{K,max}}$, 这样的中子星被称为巨超质量(Hypermassive)中子星, 将在几十到几

图2 (网络版彩图)GW170817的引力波信号频率随时间演化图. 图中数据从上到下分别来源于LIGO-Hanford探测器、LIGO-Livingston探测器以及Virgo探测器. 横坐标所示时间零点为2017年8月17日12:41:04(世界协调时间). 图片取自文献^[67]

Figure 2 (Color online) The evolution of the frequency of the gravitational signal from GW170817. From top to bottom, the data are from the LIGO-Hanford detector, LIGO-Livingston, and Virgo detectors respectively. Times are shown relative to August 17, 2017 12:41:04 UTC. The figure is taken from ref. ^[67].

百毫秒内坍缩成黑洞; 而如果 $M_{K,\max} > M_{\text{tot}} > M_{\text{TOV}}$, 这样的中子星被称为超大质量(Supramassive)中子星, 靠刚体转动来维持其不坍缩. 这些不同的结果, 强烈依赖于中子星的状态方程 [77]. 对于相对较硬(Stiff)的状态方程, 并合后天体可能为长期稳定存在的中子星, 而对于相对较软(Soft)的状态方程, 并合后天体可能为短暂存在的大质量中子星或者黑洞 [78–83](如图 3 所示).

图 3 (网络版彩图) 双中子星合并天体的直方图. 每幅子图左侧的分布代表中子星初始重子质量, 右侧的分布代表合并后天体的重子质量. 从上到下对应不同颜色分布分别对应不同的状态方程(H4, APR4, GM1, MS1, SHT). 竖直虚线分隔的区域分别代表了合并后天体的类型, NS为稳定中子星, sNS为超大质量中子星(Supramassive Neutron Star), BH代表黑洞. 图片取自文献[78]

Figure 3 (Color online) Histograms of the initial (left distribution) and final (right distribution) baryonic masses of NSs. The different colors correspond to different EOSs as noted in each panel (H4, APR4, GM1, MS1, SHT). Vertical dashed lines indicate boundaries where the final remnant will either be an NS, supra-massive NS (labeled as “sNS”), or BH. The figure is taken from ref. [78].

根据引力波的波形数据分析, LIGO组限制出GW170817合并前中子星的潮汐形变度的上限为800 [67], 也即是中子星的状态方程不能太硬. 其他观测表明宇宙中存在质量大于 $2M_{\odot}$ 的中子星 [84], 说明中子星的状态方程也不能太软. 根据目前引力波数据的限制, GW170817的合并后天体可能为短暂存在的大质量中子星, 但是也不能排除遗留的天体为黑洞或者稳定存在的中子星. 下面我们将分别讨论中心天体为黑洞以及中子星时产生的GRB 170817A的物理过程.

2.2 黑洞驱动喷流

从理论角度看, 驱动伽玛暴喷流的中心引擎有可能是黑洞加吸积盘系统. 对于这样的系统, 根据不同的驱动机制, 可以将喷流称为中微子驱动的喷流 [4, 13, 85–87] 与磁过程驱动的喷流 [5, 8, 88]. 如果伽玛暴是被恒星质量黑洞吸积驱动的, 那么伽玛暴的高光度要求其吸积率很高. 在高吸积率下, 等离子体的温度非常高, 从而在中心黑洞附近形成一个厚盘或者厚环. 由于光子在吸积流中被禁闭(光学厚), 因此中微子冷却是合并后一段时间内有效带走能量的方式. 在非常靠近吸积盘内半径的时候, 极高的温度使得中微子冷却变得有效. 在这种情况下, 盘的温度会降低, 密度增高, 盘的几何厚度变薄, 从而形成中微子主导的吸积流(简称NDAF, 如参考文献[89]). NDAF盘的吸积率为

$$\begin{aligned} \dot{M}_{\text{acc}} = & 0.6 \left(\frac{\alpha}{0.1} \right) \left(\frac{M_{\text{BH}}}{3M_{\odot}} \right)^{-13/7} \left(\frac{M_d}{0.1M_{\odot}} \right)^{9/7} \\ & \times \left(\frac{R_d}{10R_s} \right)^{-3/2} M_{\odot} \text{ s}^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 α 为黏滞参数, M_{BH} 为黑洞的质量, M_d 为盘的质量, R_d 为盘的半径, R_s 为施瓦西半径. 数值模拟双中子星合并后形成的盘质量 M_d 大约为 $0.03\text{--}0.3M_{\odot}$ [90, 91], 其对应的持续吸积时标为

$$t_{\text{acc}} = 0.2 \left(\frac{\alpha}{0.1} \right) \left(\frac{M_{\text{BH}}}{3M_{\odot}} \right)^{13/7} \left(\frac{M_d}{0.1M_{\odot}} \right)^{-2/7} \left(\frac{R_d}{10R_s} \right)^{3/2} \text{ s}, \quad (2)$$

这个时标也刚好与短暴的典型持续时间相近.

磁过程驱动喷流的产生机制是通过黑洞周围的电磁过程从黑洞能层中提取能量. 该喷流产生机制也称为Blandford-Znajek (BZ)机制[88]. 从唯象的角度类比, 从黑洞能层取能量可以类比法拉第盘发电过程, 其产能率可以表示为[92]

$$P_{\text{BZ}} = 1.7 \times 50 a_*^2 \left(\frac{M_{\text{BH}}}{1 M_{\odot}} \right) \left(\frac{B}{10^{15} \text{ G}} \right)^2 f(h) \text{ ergs}^{-1}, \quad (3)$$

其中 a_* 为黑洞的自旋参数, B 为黑洞周围的平均磁场强度, $f(h)$ 为一几何函数. 如果黑洞周围的磁场足够强($\geq 10^{14} \text{ G}$), 则BZ机制提供的产能率也足够解释短暴的光度.

2.3 中子星驱动喷流

如果并合后的天体是一颗中子星, 则可分为短暂存在的中子星以及稳定存在的中子星两种情形. 其中, 短暂的中子星又包括巨超质量中子星以及超大质量中子星[93–96]. 巨超质量中子星以及超大质量中子星依靠快速自转产生的离心力来支持其自引力, 以避免坍缩成黑洞. 巨超质量中子星由于存在较差自转, 所以其质量可以比超大质量中子星更大. 随着中子星自转减慢, 它们最终还是会坍缩成黑洞. 对于较差自转的中子星, 其内部的磁场在较差自转情形下会被扭曲上浮到子星表面[47,49,97], 然后通过磁重联过程释放磁场能量, 从而驱动短暴辐射(见图4)[97–99].

当状态方程较硬时, 并合可能产生一颗稳定的中子星甚至奇异物[47,48,50,51]. 与黑洞类似, 稳定中子星及其周围中微子主导盘(图4), 也可能驱动相对论性喷流[100–103], 从而产生短伽玛暴.

3 GRB 170817A的瞬时辐射

大约在引力波事件GW170817之后1.74 s, 在Fermi卫星上的伽玛射线暴监测器(GBM)探测到了一个持续时间约为2 s的短暴GRB 170817A[68,104], 其时间积分流量约为 $2 \times 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2}$, 后期的多波段观测发现其寄主星系的光度距离为40 Mpc[105]. 因此GRB 170817A的各向同性能量为 $4 \times 10^{46} \text{ erg}$, 比典型的短暴各向同性能量(10^{50} erg)低三到四个量

图4 中子星驱动伽玛暴喷流的物理图景. (a) 中子星内部磁场浮出中子星表面并释放能量的过程, 详见文献[97]; (b) 展示了中子星的磁层与周围吸积盘的相互作用, 吸积过程可以加速或者减慢中心磁星, 具体过程详见文献[98,99]

Figure 4 The GRB jets driven from central neutron stars. (a) shows that internal magnetic fields are wound up to the neutron star surface and trigger the magnetic reconnection (see ref. [97] for details). (b) shows that the interaction between the magnetosphere and the surrounding disk, which could spin-up or spin-down the neutron star (see ref. [98,99] for details).

级. 该暴的光变曲线主要包含两个脉冲成分, 一个是早期的主暴, 另一个是稍后的弱暴. 对于能谱的拟合发现, 主暴的最佳拟合能谱为指数截断的幂律谱, 谱指数为 -0.6 , 峰值能量 E_p 为185 keV; 而弱暴的最佳拟合能谱为黑体谱, 温度为38 keV.

3.1 喷流模型

如果采用传统的观点, 伽玛暴的辐射起源于相

对论性喷流, 那么如此低的能量说明我们的视线方向是偏离喷流轴方向的. 另外, 理论上我们观测到偏轴喷流的概率要比正轴的要大. 早期的低流量X射线/光学余辉也支持GRB 170817A 的瞬时辐射起源于偏轴喷流^[73]. 先考虑一个top-hat形式(均匀喷流且有陡变边缘)的偏轴喷流, 其喷流的半张角为 θ_j , 观测视线偏离喷流轴为 θ_{obs} , 则正轴与偏轴情形下的各向同性能量以及谱峰值能量关系可以近似为^[106]

$$\frac{E_p(\theta_{\text{obs}})}{E_p(0)} = a \sim (\Gamma\Delta\theta)^{-2}, \theta_{\text{obs}} > \theta_j, \quad (4)$$

$$\frac{E_{\text{iso}}(\theta_{\text{obs}})}{E_{\text{iso}}(0)} = a^2 \sim (\Gamma\Delta\theta)^{-4}, 1 < \frac{\theta_{\text{obs}}}{\theta_j} < 2, \quad (5)$$

其中 $\Delta\theta = \theta_{\text{obs}} - \theta_j$. 取 $E_{\text{iso}}(\theta_{\text{obs}}) = 4 \times 10^{46}$ erg以及典型的 $E_{\text{iso}}(0) = 10^{50}$ erg, 则对应可得 $a \approx 0.02$. 另外一方面, 能谱拟合给出 $E_p(\theta_{\text{obs}}) \approx 185$ keV, 典型的短暴 $E_p(0)$ 为500 keV, 对应 $a \approx 0.4$. 可以发现, 公式(4)与(5)对应比值 a 是不相符的. 这一矛盾被一些作者指出, 认为该矛盾可以排除偏轴的top-hat喷流模型^[73, 106, 107]. 然而, 这一矛盾不能排除结构化喷流^[108–110]以及后面提到的茧(Cocoon)模型.

3.1.1 结构化喷流光球模型

考虑到GRB 170817A的稍后弱暴能谱接近黑体谱, 并且对应的喷流可能为结构化喷流, Meng等人^[111]最近提出了结构化喷流的光球模型来解释这个暴的能谱. 首先假设喷流光度以及洛伦兹因子随角度的分布为

$$\begin{aligned} L(\theta) &= \frac{L_0}{[(\theta/\theta_{c,L})^{2q} + 1]^{1/2}}, \\ \eta(\theta) &= \frac{\eta_0}{[(\theta/\theta_{c,\Gamma})^{2p} + 1]^{1/2}} + 1.2, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\theta_{c,L}$ 与 $\theta_{c,\Gamma}$ 分别为中心区域的半张角(计算中取 $\theta_{c,L} = \theta_{c,\Gamma}$), 对应的中心值为 L_0 与 η_0 , q 和 p 为中心区域外的分布指数. 在光球模型框架下, 光子在半径 r 以及方位角 Ω 位置处被最终散射的概率为

$$P_1(r, \Omega) = (1 + \beta)\mathcal{D}^2 \times \frac{R_{\text{ph}}}{r^2} \exp\left(-\frac{R_{\text{ph}}}{r}\right), \quad (7)$$

其中 R_{ph} 为传统光球半径, $\mathcal{D}$ 为多普勒因子, β 为喷流的速度. 另一方面, 能量为 $h\nu$ 的光子, 从温度为 T^{ob} 的等离子体中辐射的概率为

$$P_2(r, \Omega, h\nu) = \frac{1}{2.40[kT^{\text{ob}}(r, \Omega)]^3} \times \frac{h^2\nu^2}{\exp[h\nu/kT^{\text{ob}}(r, \Omega)] - 1}. \quad (8)$$

对辐射空间进行积分, 就可以得到理论观测到的能谱, 即

$$F_{h\nu}^{\text{ob}}(\theta_v) = \frac{1}{4\pi d_L^2} \iint \frac{d\dot{N}_\gamma}{d\Omega} \times P_1(r, \Omega) \times P_2(r, \Omega, h\nu)(h\nu)d\Omega dr, \quad (9)$$

其中 $d\dot{N}_\gamma/d\Omega$ 为单位立体角的光子发射率. 另外, 上式积分计算还需考虑偏轴效应以及喷流的动力学(详见文献^[111]).

传统的光球辐射模型, 其理论的低能谱指数要比GRB 170817A的主暴谱指数硬, 而引入结构化喷流后, 由于喷流轴处于相对于视线方向高纬度的位置, 因此较低的多普勒因子使得这部分高光度的光子贡献在观测能谱的低能段, 进而使得观测能谱变软(谱指数可达到-0.5). 结合蒙特卡罗-马尔柯夫链方法, Meng等人进一步利用该模型拟合了GRB 170817A主暴的能谱(见图 5). 拟合结果显示结构化喷流的光球辐射确实能够很好解释该暴的能谱.

3.1.2 同步辐射模型

过去的研究表明电子的同步辐射也可能是一种伽玛暴的瞬时辐射机制. 在快冷却情形下, 同步辐射理论给出的低能谱指数一般为-1.5, 明显低于GRB 170817A的-0.6. 为了达到更硬的低能谱, 近几年研究者提出了两种方案, 一是辐射区域中的磁场在衰减^[112]; 二是辐射区域中的电子冷却可能是由同步自康普顿散射主导^[113–116]. 在Meng等人^[111]的文中, 在考虑磁场衰减效应后, 也尝试用同步辐射模型来解释该暴能谱.

假设辐射区域的电子能谱为 $\frac{dN_e}{d\gamma_e}$, 则其随时演化可求解以下连续性方程得到

$$\frac{\partial}{\partial t'} \left(\frac{dN_e}{d\gamma_e} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma_e} \left[\gamma_e' \left(\frac{dN_e}{d\gamma_e} \right) \right] = Q(\gamma_e', t'), \quad (10)$$

其中 $Q(\gamma'_e, t') = Q_0(t')(\gamma'_e/\gamma'_m)^{-p}$, $\gamma'_e > \gamma'_m$ 为注入电子的分布, 电子的冷却率为

$$\dot{\gamma}'_e = -\frac{\sigma_T B'^2 \gamma'^2_e}{6\pi m_e c}. \quad (11)$$

考虑喷流共动系中的磁场随着半径的演化为

$$B' = B'_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-1}. \quad (12)$$

利用方程(10)中计算得到的电子谱, 就可以进一步得到相关的辐射能谱. 同步辐射模型的拟合结果见图 5, 对比光球模型的拟合统计量, 同步辐射模型

的拟合稍差一点, 但是这个微小差别并不能肯定哪个模型更好.

3.2 茧突破模型

除了偏轴喷流的模型之外, 目前人们也提出 GRB 170817A 很有可能起源于喷流茧(Cocoon)物质突破外部抛射物过程. 茧物质的产生最初在长暴喷流的研究中被提出 [117–122]. 长暴起源于大质量恒星坍缩, 中心形成的黑洞驱动相对论性喷流, 喷流不可避免地会穿越大质量恒星包层. 相对论性喷流在穿越过程中, 与周围的星包层物质相互作用, 将其激波化, 变成热的茧物质(详见文献[121]). 这一理论在随后的一系列数值模拟结果中得到支持. 类似地, 在双中子星合并过程中, 也有相关理论和数值模拟表明了茧物质的存在 [123–127]. 双中子星合并过程中, 一开始由于潮汐作用甩出一部分抛射物. 中心产生的喷流在穿越过程中与周围物质相互作用, 会产生中等相对论的茧物质. Nakar 等人 [128] 早在 2010 年就提出, 内部产生的茧物质会在后面追上外围的抛射物, 当茧物质突破抛射物时候会产生相关的辐射. 考虑一个球型的相对论性激波突破过程(如图 6 所示), 其洛伦兹因子为 Γ_s , 在 Nakar 等人 [128] 模型框架下, 辐射主要分为两个阶段. 在一开始的激波突破阶段, 突破的物质壳层的厚度比突破半径 R_{bo} 要小, 在共动系中约为 R_{bo}/Γ_s . 这种情况下, 内层区域的光子在扩散过程中, 壳层厚度变化不明显, 因而光子在这期间有机会辐射出来. 这一阶段的特点是: 辐射光度较高, 温度随着扩散时间的增长而下降, 呈现的能谱为多温度叠加的非热谱. 在第二阶段中, 随着半径的增加, 光深减小, 光子从内层区域扩散出来更加有效. 由于这个期间辐射的壳层会经过绝热冷却, 因此这个阶段也称为冷却阶段. 相应地, 辐射光度随时间缓慢下降, 而辐射壳层由于偏离热平衡明显, 温度随时间在早期下降迅速. 最近, 人们将这一茧突破模型用于解释 GRB 170817A 的光变及能谱特征 [129]. 计算表明, 壳层共动系的光子温度为 50 keV, 茧的洛伦兹因子约为 2–3, 两者乘积刚好能够对应观测到的主暴 E_p . 而后面的冷却阶段对应的低温黑体谱, 也能刚好与弱暴辐射的黑体谱一致(如图 7 所示).

图 5 (网络版彩图)结构化喷流光球模型(a)以及同步辐射模型(b)对 GRB 170817A 主暴瞬时辐射能谱的拟合结果. 图片取自文献[111]

Figure 5 (Color online) The fitting results for the prompt spectrum of GRB 170817A using the photosphere model (a) and the synchrotron model (b). The figure is taken from ref. [111].

图 6 (网络版彩图) 激波突破外部抛射物前(a)后(b)的能量密度(每图左侧半图)以及速度(每图右侧半图)的对数值在空间位置上的分布. 当中心引擎停止时, 尽管正向激波突破了抛射物, 反向激波后的喷流物质依然被束缚在抛射物内部. 图片取自文献[129]

Figure 6 (Color online) Maps of the logarithmic energy density excluding the rest-mass energy (left) in c.g.s units and logarithmic velocity (right). (a) is taken before the breakout of the forward shock from the core ejecta and (b) is taken after the breakout. The figures are taken from ref. [129].

值得指出的是, 茧突破模型要求伽玛暴喷流发射比中子星合并时刻延迟1 s量级. 此延迟时间需要引入其他物理过程来解释, 如合并产物开始为中子星, 后坍缩为黑洞产生喷流. 在磁化喷流模型中, 由于喷流运动到耗散半径处才产生同步辐射, 因此可以自然解释该时间延迟 [104].

4 短暴的余辉辐射

双中子星合并产生的双极喷流, 除了内激波或磁耗散机制产生我们能观测到的GRB瞬时辐射之外, 在其向外运动过程中会扫过星际介质. 这些外部介质会使喷流减速, 产生正反外激波, 被激波加速后的电子通过同步加速辐射以及逆康普顿散射等机

图 7 (网络版彩图) 茧模型给出的偏轴观测者($\theta_{\text{obs}} = 0.7$)观测到的理论光变曲线(a)以及相应的能谱(b). (a)图表明2.5 s后激波突破产生的光度开始快速下降. (b)图中的蓝色实线代表2.5 s前的能谱, 红色实线代表2.5 s后的观测能谱. 图片取自文献[129]

Figure 7 (Color online) The light curve (a) and spectrum (b) of the γ -ray signal for an observer at $\theta_{\text{obs}} = 0.7$. The spectrum is divided at $t = 2.5$ s (earlier in blue and later in red), where the sharp drop in the luminosity begins. The figures are taken from ref. [129].

制产生可观测的非热GRB余辉辐射, 如图 8 所示 [130]. 长暴的余辉在1997年就被观测所证认 (GRB 970228) [131, 132], 而短暴的余辉直到Swift卫星才第一次被看到 [24–26].

4.1 余辉的理论

观测到的GRB晚期余辉普遍存在拐折现象 [133–135], 间接说明GRB是由高度集束的喷流产生, 这个拐折被称为喷流拐折 (Jet Break). 喷流内禀能量和洛伦兹因子可能随角度存在一个分布, 称为喷流结构 (Jet Structure), 而均匀喷流是最简单的一种考虑 [133, 134, 136–138], 即单位立体角的能量以及喷流洛伦兹因子在有限张角 θ_j 内是均匀分布的, 而在 θ_j 以外陡降至零. 而实际上, 由中心引擎发出的喷流在穿越星包层 (Envelope, 适用于长暴) [122, 139] 或双

图8 (网络版彩图)伽玛暴内外激波示意图. 图片取自文献[130]

Figure 8 (Color online) The schematic of gamma-ray burst internal and external shocks. The figures are taken from ref. [130].

致密星并合的抛射物(Ejecta, 适用于短暴)[123,140]时, 由于喷流头与介质的相互碰撞会形成正反激波, 被反向激波扫过的喷流物质与被正向激波扫过的外部介质流向两侧包裹住喷流, 所形成的结构分别称为内茧(Inner Cocoon)和外茧(Outer Cocoon)[126,127,141,142]. 虽然内外茧物质可能存在一定程度的混合[141], 然而最新数值模拟表明, 从介质穿出之后喷流+茧的结构远不是均匀的[126,141], 存在一种角度分布(结构化喷流)[143]. 如果假设喷流核心和外部茧分别是均匀的, 我们可以将这种结构称为双成分喷流(Two-Component Jet)[144,145], 可以用如下公式描述:

$$\varepsilon(\theta) = \begin{cases} \varepsilon_{\text{in}}, & \text{if } \theta \leq \theta_c, \\ \varepsilon_{\text{out}}, & \text{if } \theta_c < \theta < \theta_m, \end{cases} \quad (13)$$

$$\Gamma_0(\theta) = \begin{cases} \Gamma_{\text{in}}, & \text{if } \theta \leq \theta_c, \\ \Gamma_{\text{out}}, & \text{if } \theta_c < \theta < \theta_m, \end{cases} \quad (14)$$

其中 ε_{in} , ε_{out} 以及 Γ_{in} , Γ_{out} 分别代表内部较快速的脊(Spine)与外部较慢的鞘(Sheath)的动能与初始洛伦兹因子, θ_c 代表中心Spine张角, θ_m 代表外部Sheath的最大张角.

更进一步, 如果假设茧不是均匀的, 而是随角度以幂律衰减, 则这种结构称为普遍结构化喷流(Universal Structured Jet)[108,146-148], 可用如下表达式描述:

$$\varepsilon(\theta) \equiv \frac{dE}{d\Omega} = \begin{cases} \varepsilon_0, & \text{if } \theta \leq \theta_c, \\ \varepsilon_0(\theta/\theta_c)^{-k}, & \text{if } \theta_c < \theta < \theta_m, \end{cases} \quad (15)$$

$$\Gamma_0(\theta) = \begin{cases} \Gamma_0, & \text{if } \theta \leq \theta_c, \\ \Gamma_0(\theta/\theta_c)^{-s}, & \text{if } \theta_c < \theta < \theta_m, \end{cases} \quad (16)$$

其中 k 和 s 两个指数的相关性可以由观测的经验关系推导[110,149-151]. 例如, 幂指数 k 可由GRB本地事件率密度 $\rho_0(>L)$ 得出: 观测得到事件率可用 $\rho_0(>L) \propto L^{-\lambda}$ 来描述[152], 由于 $\rho_0(>L) \propto \Omega(>E) \simeq \pi\theta^2$, 另一方面 $L \propto 4\pi \times dE/d\Omega \propto \theta^{-k}$, 因此 $k = 2/\lambda$ [110]. 不同于均匀喷流模型中拐折时间 t_b 主要由喷流张角决定, 在普遍结构化喷流模型中, 不同 t_b 是由不同观测角导致[146,147].

喷流穿出包层或抛射物后, 在向外运动的过程中, 会扫过外部星际介质产生激波. 冲击波的动力学早在1976年由Blandford与McKee(BM)首次详细研究, 他们讨论了在极端相对论情形下球形激波在介质中减速的过程, 得到了相关物理量(激波半径、洛伦兹因子等)随时间的自相似演化关系[153]. 但是, 冲击波演化到晚期会进入Sedov-Taylor(ST)非相对论阶段, 而此时BM1976的结果不再适用. 于是, Huang等人[154]在1999年根据演化过程中的能量守恒提出了余辉演化的统一动力学模型, 可以很好地连接BM阶段和ST阶段. 值得一提的是, 在早期BM阶段, 必须考虑等时面效应[22,155,156], 即高纬度的光子由于光行差, 到达观测者会有一个时间延迟, 等时面是一个关于视线旋转对称的曲面[157,158], 在进入ST阶段后等时面逐渐接近于球面[157,158].

在激波扫过介质减速的过程中, 被激波加热的电子呈幂律分布, 电子集体的同步辐射形成了观测到的GRB余辉. 相对论的电子有3个特征洛伦兹因子: 最小洛伦兹因子 γ_m , 最大洛伦兹因子 γ_{max} 以及冷却洛伦兹因子 γ_c , 它们所对应的特征同步辐射频率分别为 ν_m , ν_{max} , ν_c . 根据特征频率的相对大小, 我们可以分情形得到同步辐射能谱[23]:

(1) 若 $\nu_m > \nu_c$, 所有电子都能冷却到洛伦兹因子趋近 γ_c , 称之为快冷却, 其能谱为

$$F_\nu^{\text{syn}} = \begin{cases} F_{\nu_{\text{max}}}^{\text{syn}}(\nu/\nu_c)^{1/3}, & \text{if } \nu < \nu_c, \\ F_{\nu_{\text{max}}}^{\text{syn}}(\nu/\nu_c)^{-1/2}, & \text{if } \nu_c < \nu < \nu_m, \\ F_{\nu_{\text{max}}}^{\text{syn}}(\nu_m/\nu_c)^{-1/2}(\nu/\nu_m)^{-p/2}, & \text{if } \nu_m < \nu < \nu_{\text{max}}, \end{cases} \quad (17)$$

其中 $F_{\nu, \max}$ 为峰值流量等于总电子数乘以单电子同步辐射流量.

(2) 若 $\nu_m < \nu_c$, 只有洛伦兹因子大于 γ_c 的那部分电子会冷却, 这种情形称为慢冷却, 其能谱为

$$F_{\nu}^{\text{syn}} = \begin{cases} F_{\nu, \max}^{\text{syn}} (\nu/\nu_m)^{1/3}, & \text{if } \nu < \nu_m, \\ F_{\nu, \max}^{\text{syn}} (\nu/\nu_m)^{-(p-1)/2}, & \text{if } \nu_m < \nu < \nu_c, \\ F_{\nu, \max}^{\text{syn}} (\nu_c/\nu_m)^{-(p-1)/2} (\nu/\nu_c)^{-p/2}, & \text{if } \nu_c < \nu < \nu_{\max}. \end{cases} \quad (18)$$

当然, 在低频区域, 相对论电子的同步自吸收效应变得重要, 从而会引入一个新的特征频率即自吸收频率 ν_a [23, 159], 可令同步辐射流量等于黑体辐射在 Rayleigh-Jeans 端的流量从而求得. 考虑自吸收后同步辐射能谱需要分为更多情形讨论, 详细的能谱讨论可查阅 [159].

以上讨论是仅考虑正向激波扫过介质产生的同步辐射. 在某些情况下, 反向激波对余辉的贡献也不可忽视, 可能产生较强的光学闪和射电耀发 [20, 160]. 当反向激波穿越抛出物壳层时, 会将其中的电子加热. 由于壳层密度较大, 因此反向激波产生的同步辐射的特征频率比正向激波要低, 典型辐射频率在光学波段. 部分观测到的余辉中的光学闪可以用反向激波很好地解释, 例如 GRB 990123 [161–163]. 另外, 这个暴射电耀发的观测数据也可以同时用反向激波成分拟合 [161, 164].

由于大部分 GRB 喷流不是直接朝向我们观测者, 也就是说, 大部分 GRB 属于偏轴观测情形 [106]. 较大的偏轴角度会显著降低观测到的流量, 因此不容易观测到偏轴的 GRB 瞬时辐射 [106, 109]. 然而, 假如偏轴角度相对较小, 即使看不见 GRB, 等到喷流充分减速到中等相对论或非相对论阶段后, 我们仍有可能看见它的余辉辐射 [165], 这被称为“孤儿余辉”. 早在 BeppoSAX 发现余辉后不久, 人们就开始试图寻找孤儿余辉 [166–169], 然而到目前为止没有一个确证的事件. 对于偏轴余辉辐射的流量计算, 一般处理方式是在球坐标系下, 考虑不同方位角的辐射单元的. 假设观测角为 θ_v , 则在 (r, θ, ϕ) 处的辐射微分元与视线的夹角 α 为 [109]

$$\cos \alpha = \cos \theta_v \cos \theta + \sin \theta_v \sin \theta \cos \phi. \quad (19)$$

最终观测者能观测到的余辉辐射即是这些小辐射单元的流量投影到视线方向的叠加, 即对立体角进行积分.

4.2 GW170817/GRB 170817A 事件的余辉辐射

GW170817 对应的多波段电磁对应体均被观测到, 其中并合后 10.9 h 即观测到光学对应体 [69–71, 74, 170–173], 后来被证认为千新星 (Kilonova), 在本文下一节详细讨论. 另外, X 射线对应体在并合后 9 d 首次被 Chandra 卫星探测到 [174], 射电辐射在并合后 16 d 左右被 VLA 观测到 [107]. 最新的后续观测表明 X 射线和射电辐射仍在持续变亮 [175, 176], 而且 X 射线到射电的谱指数在 15.6 和 109.2 d 时基本一致 [176], 说明 X 射线和射电对应体很可能是同一起源, 即来自于 GRB 170817A 的余辉辐射. 目前已有不少工作对这些观测进行了拟合. 由于早期并没有观测到 X 射线余辉辐射 [177], 因此 GRB 170817A 普遍被大家认为是偏轴的 [178], 而且观测对于喷流的结构有很强的限制 [179, 180]. Granot 等人 [106] 认为均匀的 top-hat jet 模型与观测到的 E_p 和 E_{iso} 有矛盾, 另外也无法很好拟合 X 射线和射电的上升. Lamb 与 Kobayashi [143, 181] 和 Xiao 等人 [110] 分别从理论上讨论了几种不同的喷流结构模型, 而 Xiao 等人 [110] 发现偏轴情形下的双成分喷流可能会更好地符合观测. Lazzati 等人 [182] 则根据自己数值模拟得到的喷流结构, 对其余辉辐射进行了拟合. 不同于喷流模型, Gottlieb 等人 [129] 提出喷流茧的激波突破能解释 GRB 170817A, 后续一些工作也在这种模型下对电磁对应体进行了拟合 [183, 184], 最新的 X 射线以及射电观测也能在这种模型下被很好拟合 [175, 176]. 而前不久哈勃望远镜在并合后 110 d 左右也观测到了对应的光学辐射, 此时理论预言千新星光度已经显著下降, 因此它必为 GRB 余辉辐射. Lyman 等人 [185] 指出用高斯型结构化喷流的余辉模型可以很好拟合晚期 X 射线, 光学以及射电辐射. Geng 等人 [186] 考虑中子星的正负电子对星风与喷流相互作用, 其产生的反向激波辐射也能解释多波段的余辉数据. 目前对于余辉的后续观测仍在继续, 多波段余辉的未来观测结果可能会对理论模型

有更进一步的限制. 但是由于各个模型中的自由参数比较多, 模型之间也存在比较强的简并(如结构化喷流与茧模型), 因此余辉起源的争议或许还会持续一段时间.

5 千新星/巨新星AT2017gfo

除了获得伴随GW170817的伽玛暴和多波段余辉之外, 紫外-光学-红外观测还确认出伴随这个引力波的千新星/巨新星AT2017gfo. 这也是人类首次明确观测到千新星/巨新星.

5.1 千新星理论与观测的发展

1974年, Lattimer与Schramm^[187]提出, 黑洞与中子星并合后, 被抛出的中子星抛射物内部会发生快速中子俘获过程(简称 r 过程), 形成大量重元素. 此后, 人们认为, 中子星与中子星的并合也会产生同样的过程. 数值模拟表明, 中子星并合之后抛出的物质大约为 10^{-4} – $10^{-2}M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ 表示太阳的质量)^[188, 189], 速度约为真空中光速的0.1–0.3倍. 除了这些最终会逃逸的抛射物之外, 还有一部分物质会围绕合并后的中心产物, 形成吸积盘, 吸积盘会发出物质流(“风”), 其质量约为 $10^{-2}M_{\odot}$ ^[190]. 此外, 对于双中子星并合的情形, 如果并合后产生了超大质量中子星, 则并合后的粘滞过程也会导致喷射物, 即粘滞驱动的喷射物, 其质量可以达到 $0.17M_{\odot}$ ^[191]. 上述的各类抛射物与盘风都有可能产生辐射.

1998年, Li与Paczynski^[40]提出了简单的千新星模型, 首次计算了中子星并合之后抛出的抛射物能够产生的辐射现象. 他们发现, 由于碎片中的放射性元素衰变与裂变产生大量能量会将抛射物加热, 使其发出大量紫外线与可见光, 其行为类似于超新星, 但持续时间短得多, 只有1 d左右. 他们在计算中假设抛射物的不透明度为铁族元素的不透明度($0.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$)并假设能量转化效率为 10^{-3} , 计算出的“类超新星”现象的峰值亮度甚至比普通超新星更亮. 2005年, Kulkarni^[41]也研究了中子衰变供能和中心引擎供能的现象, 并将其称为“巨新星(Macronovae)”.

2010年, Metzger等人^[42]仔细计算了这类现

象, 认为能量转化因子大约为 10^{-6} , 因此其亮度大约为Li和Paczynski^[40]计算出的亮度的1/1000, 是普通的“新星(Novae)”的1000倍, 他们将其称为“千新星(Kilonovae)”. 然而, 正如Wang等人^[192]所指出, 中子星并合后的喷射物的峰值绝对星等存在较大范围, 从–12等到–16等之间都有可能, 差异可以达到几十倍, 并不一定都等于新星亮度的1000倍.

2013年, Kasen等人^[43]指出, 中子星抛射物中富含镧系元素和锕系元素, 这类元素导致抛射物的不透明度最高可以达到 $100 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ 左右, 典型值可以取为 $10 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ (具体数值取决于镧系元素与锕系元素的含量), 从而使得光子辐射的扩散时标大大增大(扩散时标与不透明度的平方根成正比, 不透明度增加到100倍, 扩散时标就增大到10倍), 因此其持续时间可以达到10 d左右. 不透明度增加, 还会导致千新星的辐射主要集中于红外和红色波段.

2014年, Metzger与Fernández^[193]用轴对称流体动力学模型研究了双中子星并合之后形成的吸积盘吹出的风. 他们发现: 如果并合之后形成的巨超质量中子星的寿命小于100 ms, 则盘风富含镧系元素, 其辐射以红外辐射(红光)为主, 这些偏红的辐射与抛射物发出的偏红辐射叠加, 形成的辐射也是偏红的; 如果并合后形成的超大质量中子星的寿命超过100 ms, 则盘风中几乎没有镧系元素, 以中等元素为主, 这些元素发出的辐射以蓝色光为主, 这些蓝光与抛射物发出的偏红辐射叠加, 导致千新星的辐射同时包含红色与蓝色辐射.

以上这些模型基本上没有考虑中心引擎的作用, 唯一的例外是Kulkarni^[41], 他指出了中心中子星的可能贡献. Yu等人^[54]首次通过定量计算表明, 双中子星并合后如果形成的遗迹不是黑洞, 而是磁星, 那么磁星风会加热并合后的抛射物, 可以使其亮度提高到不考虑磁星贡献时的几百倍, 他们称其为“合并新星(Merger-novae)”. 广义上说, 千新星属于特殊的合并新星.

在理论不断取得进展的同时, 对千新星的观测也在不断进行, 但直到2013年, Tanvir等人^[44]才在一个短暴GRB130603B的光学-近红外对应体中寻找到了千新星的候选体. 由于近红外波段只有一个数据点, 且没有任何光谱, 这个候选体是否是

千新星, 还不能完全确定. 此后, Jin等人^[194,195]、Yang等人^[196]和Gao等人^[197,198]研究了另外一些短暴和“长短暴”(其持续时间超过2 s, 它们属于长暴; 但它们的具体物理性质类似于短暴, 因此被称为“长短暴”), 从中发现了另外一些千新星候选体. 其中Gao等人^[198]发现的候选体千新星峰值亮度与AT2017gfo更为接近. 需要再次强调的是, 这些候选体还不是真正被确认的千新星.

5.2 第一个被完全确认的千新星AT2017gfo

在GW170817被LIGO探测之后, 南半球的多个光学望远镜就立即开始搜寻其可能的光学对应体(因为GW170817位于南天且并不接近赤道, 因此只有南半球的光学望远镜才可以对其进行有效的后续观测), 最早成功探测到光学对应体的是1 m口径的Swope望远镜. 在入夜之前, 这个望远镜就进行了充分的准备, 在入夜后仅用了20 min就获得了成功(如图9所示), 此时距离引力波被探测到的时间仅10.9 h. Swope望远镜以及此后其他望远镜的观测表明这个光学暂现源迅速变红. 这个千新星被命名为SSS17a或AT2017gfo, 以下我们采用后一个命名. 值得一提的是, 我国南极天文中心安装在南极的AST3也获得了这个千新星的图像^[199].

此后, 多个光学望远镜、光学-近红外望远镜、Swift卫星上的哈勃太空望远镜(HST)以及紫外-光学望远镜(UVOT)都启动对AT2017gfo的密集观测, 获得了大量的测光数据(如图10所示). 多个小组的观测都表明, AT2017gfo的峰值亮度超过了

图9 (网络版彩图)千新星爆发后不同时期的图像. 图片取自文献^[74]

Figure 9 (Color online) The images of the kilonova at two epoches. The figure is taken from ref. ^[74].

图10 (网络版彩图)千新星的多波段(紫外、光学、红外)光变曲线. 图片取自文献^[74]

Figure 10 (Color online) The multi-band (UV, optical, and IR) light curves of the kilonova. The figure is taken from ref. ^[74].

$10^{42} \text{ erg s}^{-1}$, 大约是千新星典型亮度($10^{41} \text{ erg s}^{-1}$)的10倍. 这进一步说明千新星本身不是一个非常精确的名称, 只能作为一个方便的名称. “并合新星”或者“巨新星”可能是更加适合的名称.

在Swope望远镜首先观测到千新星之后, Magellan望远镜等望远镜在立即启动了光谱观测, 此后VLT等大型望远镜也纷纷投入观测, 获得了多个时期的多条光谱. Pian等人^[70]将获得的多条光谱与理论进行了比较, 发现每个时期的光谱都很好地与理论符合(如图11所示).

在获得大量数据的情况下, 多个小组利用这些数据限制了AT2017gfo的物理性质. Arcavi等人^[69]首先根据Las Cumbres天文台的多个望远镜观测到的AT2017gfo的多波段光变曲线, 推断出其喷射物的平均不透明度约为 $1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$, 镧系元素含量约为 $10^{-4.5}$. Drout等人^[74]分析并拟合了AT2017gfo的多波段光变曲线、热光变曲线、温度、光球半径和谱能分布, 发现AT2017gfo在爆发后11 h的温度超过了10000度, 并在此后几天内迅速降低到2500度. 他们还发现, AT2017gfo的光球半径在爆炸后6 d达到最大(如图12所示), 此后光球开始后撤, 他们认为这

图 11 (网络版彩图)观测到的不同时期的千新星的光谱(黑色)与模型(红色)得到的光谱. 图片取自文献[70]

Figure 11 (Color online) The spectra (black) of the kilonova observed at different epochs and the theoretical spectra (red) reproduced by kilonova models. The figure is taken from ref. [70].

图 12 (网络版彩图)对千新星的热光变曲线、温度演化与半径的拟合. 图片取自文献[74]

Figure 12 (Color online) Fitting for the bolometric light curve, the temperature evolution, and the photospheric radius of the kilonova. The figure is taken from ref. [74].

可能由再复合效应引起.

Villar等人^[200]搜集了所有波段的所有测光数

据,对这些数据构成的多波段光变曲线的分析表明,这个千新星包含了3种成分:蓝色成分、紫色成分与红色成分.其中,蓝色成分是缺乏镧系元素组成的物质发出的,这些物质的不透明度约为 $0.5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$,质量约为 $0.016 M_{\odot}$,速度约为 $0.27c$;紫色成分是中等质量元素组成的物质发出的,这些物质的不透明度约为 $3 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$,质量约为 $0.040 M_{\odot}$,速度约为 $0.14c$;红色成分是富含镧系元素的物质发出的,这些物质的不透明度约为 $10 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$,质量约为 $0.009 M_{\odot}$,速度约为 $0.08c$.这3种物质的总质量达到了 $0.065 M_{\odot}$.

Yu和Dai^[201]提出,AT2017gfo的光变曲线中可能包含一个磁星的贡献.这个可能性是无法被排除的^[202].此外,Ai等人^[203]用观测数据限制了可能长时间存在的中子星的参数空间.

对AT2017gfo的多波段光变曲线和多时期的光谱的及时而密集的观测,使得它在彻底变暗前就获得了极好的观测覆盖,不仅证明着此前对千新星的辐射理论是正确的,而且也证明这个紫外/光学/近红外暂现源确实是千新星.因此,这是第一个被确认的千新星.此后的深入分析则以前所未有的精度揭示了它的物理本质并限制了一些有趣的参数,提出了一些可能的假说.AT2017gfo的观测与理论的密切结合,为此后类似事件的研究提供了极好的典范.

6 总结与展望

GW170817/GRB170817A/AT2017gfo的发现是时域天文领域、多信使天文学的重大里程碑^[67],同时对中子星物理学、核物理学等学科产生了深远影响.通过对这个事件的密集观测,人们不仅首次直接证明至少一部分短暴起源于双中子星并合,还首次观测到理论预言的千新星,首次证明中子星并合是重元素产生的重要场所.另外,对GW170817的观测表明中子星物质的状态方程既不能太硬也不能太软.

不过,关于GW170817的引力波电磁对应体物理起源,目前依然存在一些争议.首先,关于GRB 170817A的瞬时辐射,目前至少有结构化喷流模型(分为光球辐射模型以及同步辐射模型)、茧模型以及散射辐射模型等三个模型能够解释.一方面,

我们对短暴的中心引擎到底是黑洞还是中子星依然不确定; 另一方面, 我们对短暴喷流/茧/抛射物的性质以及其动力学演化的认识也需进一步提高. 而瞬时辐射的物理起源, 与这些课题是紧密相关的. 这意味着我们对GRB 170817A瞬时辐射的研究依然有很长的路需要走. 其次, GRB 170817A的余辉到底起源于伽玛暴喷流还是茧物质, 目前也没有定论. 好在持续观测发现X射线以及射电波段的余辉流量至今依然在上升, 将来新的观测限制, 或许能够给出一些线索.

些线索.

随着引力波窗口的打开, 未来会有更多的引力波事件以及其电磁对应体被发现. 这些观测将极大地推动天体物理学的研究进展, 尤其是伽玛暴、千新星、致密星等领域. 引力波电磁对应体将毫无疑问是未来研究的热门课题. 我国已经上天运行的慧眼望远镜(HXMT)^[204,205], 以及正在进行中的一些项目, 都有望在引力波电磁对应体的搜寻、观测等方面一展身手.

参考文献

- 1 Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. Observations of gamma-ray bursts of cosmic origin. *Astrophys J*, 1973, 182: L85
- 2 Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. Identification of two classes of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1993, 413: L101–L104
- 3 Paczynski B. Gamma-ray bursters at cosmological distances. *Astrophys J*, 1986, 308: L43–L46
- 4 Eichler D, Livio M, Piran T, et al. Nucleosynthesis, neutrino bursts and gamma-rays from coalescing neutron stars. *Nature*, 1989, 340: 126–128
- 5 Narayan R, Paczynski B, Piran T. Gamma-ray bursts as the death throes of massive binary stars. *Astrophys J*, 1992, 395: L83–L86
- 6 Rees M J, Meszaros P. Relativistic fireballs-energy conversion and time-scales. *Mon Not R Astron Soc*, 1992, 258: 41P–43P
- 7 Rees M J, Meszaros P. Unsteady outflow models for cosmological gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1994, 430: L93–L96
- 8 Mészáros P, Rees M J. Poynting jets from black holes and cosmological gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1997, 482: L29–L32
- 9 Rezzolla L, Giacomazzo B, Baiotti L, et al. The missing link: Merging neutron stars naturally produce jet-like structures and can power short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2011, 732: L6
- 10 Zhang B, Yan H. The internal-collision-induced magnetic reconnection and turbulence (ICMART) model of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2011, 726: 90
- 11 Beniamini P, Giannios D. Prompt gamma-ray burst emission from gradual magnetic dissipation. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 468: 3202–3211
- 12 Lazarian A, Zhang B, Xu S. Gamma-ray bursts induced by turbulent reconnection. ArXiv: 1801.04061
- 13 Goodman J. Are gamma-ray bursts optically thick? *Astrophys J*, 1986, 308: L47–L50
- 14 Meszaros P, Rees M J. Steep slopes and preferred breaks in gamma-ray burst spectra: The role of photospheres and comptonization. *Astrophys J*, 2000, 530: 292–298
- 15 Ryde F. Is thermal emission in gamma-ray bursts ubiquitous? *Astrophys J*, 2005, 625: L95–L98
- 16 Pe'er A, Ryde F. A theory of multicolor blackbody emission from relativistically expanding plasmas. *Astrophys J*, 2011, 732: 49
- 17 Lundman C, Pe'er A, Ryde F. A theory of photospheric emission from relativistic, collimated outflows. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 428: 2430–2442
- 18 Deng W, Zhang B. Low energy spectral index and E_p evolution of quasi-thermal photosphere emission of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2014, 785: 112
- 19 Gao H, Zhang B. Photosphere emission from a hybrid relativistic outflow with arbitrary dimensionless entropy and magnetization in GRBs. *Astrophys J*, 2015, 801: 103
- 20 Meszaros P, Rees M J. Optical and long-wavelength afterglow from gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1997, 476: 232–237
- 21 Wijers R A M J, Rees M J, Meszaros P. Shocked by GRB 970228: The afterglow of a cosmological fireball. *Mon Not R Astron Soc*, 1997, 288: L51–L56
- 22 Sari R. The observed size and shape of gamma-ray burst afterglow. *Astrophys J*, 1998, 494: L49–L52
- 23 Sari R, Piran T, Narayan R. Spectra and light curves of gamma-ray burst afterglows. *Astrophys J*, 1998, 497: L17–L20
- 24 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
- 25 Fox D B, Frail D A, Price P A, et al. The afterglow of GRB 050709 and the nature of the short-hard gamma-ray bursts. *Nature*, 2005, 437: 845–850

- 26 Hjorth J, Watson D, Fynbo J P U, et al. The optical afterglow of the short gamma-ray burst GRB 050709. *Nature*, 2005, 437: 859–861
- 27 Metzger B D, Berger E. What is the most promising electromagnetic counterpart of a neutron star binary merger? *Astrophys J*, 2012, 746: 48
- 28 Berger E. A short gamma-ray burst “no-host” problem? investigating large progenitor offsets for short GRBs with optical afterglows. *Astrophys J*, 2010, 722: 1946–1961
- 29 Fong W, Berger E, Chornock R, et al. The optical afterglow and $z=0.92$ early-type host galaxy of the short GRB 100117A. *Astrophys J*, 2011, 730: 26
- 30 van Eerten H, Zhang W, MacFadyen A. Off-axis gamma-ray burst afterglow modeling based on a two-dimensional axisymmetric hydrodynamics simulation. *Astrophys J*, 2010, 722: 235–247
- 31 Soderberg A M, Berger E, Kasliwal M, et al. The afterglow, energetics, and host galaxy of the short-hard gamma-ray burst 051221a. *Astrophys J*, 2006, 650: 261–271
- 32 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
- 33 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
- 34 Campana S, Mangano V, Blustin A J, et al. The association of GRB 060218 with a supernova and the evolution of the shock wave. *Nature*, 2006, 442: 1008–1010
- 35 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
- 36 Woosley S E, Bloom J S. The supernova gamma-ray burst connection. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 507–556
- 37 Blinnikov S I, Novikov I D, Perevodchikova T V, et al. Exploding neutron stars in close binaries. *Soviet Astron Letters*, 1984, 10: 177
- 38 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
- 39 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
- 40 Li L X, Paczyński B. Transient events from neutron star mergers. *Astrophys J*, 1998, 507: L59–L62
- 41 Kulkarni S R. Modeling supernova-like explosions associated with gamma-ray bursts with short durations. ArXiv: [astro-ph/0510256](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0510256)
- 42 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
- 43 Kasen D, Badnell N R, Barnes J. Opacities and spectra of the r -process ejecta from neutron star mergers. *Astrophys J*, 2013, 774: 25
- 44 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
- 45 Metzger B D. Kilonovae. *Living Rev Relativ*, 2017, 20: 3
- 46 Nakar E, Piran T. Detectable radio flares following gravitational waves from mergers of binary neutron stars. *Nature*, 2011, 478: 82–84
- 47 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
- 48 Dai Z G, Lu T. γ -ray bursts and afterglows from rotating strange stars and neutron stars. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 4301–4304
- 49 Dai Z G. X-ray flares from postmerger millisecond pulsars. *Science*, 2006, 311: 1127–1129
- 50 Gao W H, Fan Y Z. Short-living supermassive magnetar model for the early X-ray flares following short GRBs. *Chin J Astron Astrophys*, 2006, 6: 513–516
- 51 Fan Y Z, Xu D. The X-ray afterglow flat segment in short GRB 051221A: Energy injection from a millisecond magnetar? *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 372: L19
- 52 Dai Z G. Relativistic wind bubbles and afterglow signatures. *Astrophys J*, 2004, 606: 1000–1005
- 53 Zhang B. Early X-ray and optical afterglow of gravitational wave bursts from mergers of binary neutron stars. *Astrophys J*, 2013, 763: L22
- 54 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
- 55 Gao H, Ding X, Wu X F, et al. Bright broadband afterglows of gravitational wave bursts from mergers of binary neutron stars. *Astrophys J*, 2013, 771: 86
- 56 Wang L J, Dai Z G. PTF11agg as the first evidence for reverse shock emission from a post-merger millisecond magnetar. *Astrophys J*, 2013, 774: L33

- 57 Wu X F, Gao H, Ding X, et al. A double neutron star merger origin for the cosmological relativistic fading source PTF11agg? *Astrophys J*, 2014, 781: L10
- 58 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
- 59 Connaughton V, Burns E, Goldstein A, et al. Fermi GBM observations of LIGO gravitational-wave event GW150914. *Astrophys J*, 2016, 826: L6
- 60 Zhang B. Mergers of charged black holes: Gravitational-wave events, short gamma-ray bursts, and fast radio bursts. *Astrophys J*, 2016, 827: L31
- 61 Loeb A. Electromagnetic counterparts to black hole mergers detected by LIGO. *Astrophys J*, 2016, 819: L21
- 62 Perna R, Lazzati D, Giacomazzo B. Short gamma-ray bursts from the merger of two black holes. *Astrophys J*, 2016, 821: L18
- 63 Xiong S. Is the GW150914-GBM really associated with the GW150914? ArXiv: 1605.05447
- 64 Greiner J, Burgess J M, Savchenko V, et al. On the Fermi-GBM event 0.4 s after GW150914. *Astrophys J*, 2016, 827: L38
- 65 Ackermann M, Ajello M, Albert A, et al. Fermi-LAT observations of the LIGO Event GW150914. *Astrophys J*, 2016, 823: L2
- 66 Connaughton V, Burns E, Goldstein A, et al. On the interpretation of the Fermi-GBM transient observed in coincidence with LIGO gravitational-wave event GW150914. *Astrophys J*, 2018, 853: L9
- 67 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
- 68 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
- 69 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
- 70 Pian E, D'Avanzo P, Benetti S, et al. Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger. *Nature*, 2017, 213: 67–70
- 71 Smartt S J, Chen T W, Jerkstrand A, et al. A kilonova as the electromagnetic counterpart to a gravitational-wave source. *Nature*, 2017, 116: 75–79
- 72 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, 192: 80–84
- 73 Kasliwal M M, Nakar E, Singer L P, et al. Illuminating gravitational waves: A concordant picture of photons from a neutron star merger. *Science*, 2017, 358: 1559–1565
- 74 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
- 75 Rosswog S. Mergers of neutron star-black hole binaries with small mass ratios: Nucleosynthesis, gamma-ray bursts, and electromagnetic transients. *Astrophys J*, 2005, 634: 1202–1213
- 76 Faber J A, Rasio F A. Binary neutron star mergers. *Living Rev Relativ*, 2012, 15: 8
- 77 Lattimer J M, Prakash M. Neutron star structure and the equation of state. *Astrophys J*, 2001, 550: 426–442
- 78 Piro A L, Giacomazzo B, Perna R. The fate of neutron star binary mergers. *Astrophys J*, 2017, 844: L19
- 79 Shibata M, Fujibayashi S, Hotokezaka K, et al. Modeling GW170817 based on numerical relativity and its implications. *Phys Rev D*, 2017, 96: 123012
- 80 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
- 81 Lü H J, Zhang B, Lei W H, et al. The millisecond magnetar central engine in short GRBs. *Astrophys J*, 2015, 805: 89
- 82 Gao H, Zhang B, Lü H J. Constraints on binary neutron star merger product from short GRB observations. *Phys Rev D*, 2016, 93: 044065
- 83 Li A, Zhang B, Zhang N B, et al. Internal X-ray plateau in short GRBs: Signature of supramassive fast-rotating quark stars? *Phys Rev D*, 2016, 94: 083010
- 84 Özel F, Freire P. Masses, radii, and the equation of state of neutron stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2016, 54: 401–440
- 85 Narayan R, Piran T, Kumar P. Accretion models of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2001, 557: 949–957
- 86 Di Matteo T, Perna R, Narayan R. Neutrino trapping and accretion models for gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2002, 579: 706–715
- 87 Liu T, Lin Y Q, Hou S J, et al. Can black hole neutrino-cooled disks power short gamma-ray bursts? *Astrophys J*, 2015, 806: 58
- 88 Blandford R D, Znajek R L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Mon Not R Astron Soc*, 1977, 179: 433–456
- 89 Chen W X, Beloborodov A M. Neutrino-cooled accretion disks around spinning black holes. *Astrophys J*, 2007, 657: 383–399

- 90 Rosswog S, Liebendörfer M, Thielemann F K, et al. Mass ejection in neutron star mergers. *Astron Astrophys*, 1999, 341: 499
- 91 Rosswog S, Davies M B, Thielemann F K, et al. Merging neutron stars: Asymmetric systems. *Astron Astrophys*, 2000, 360: 171
- 92 Lee H K, Wijers R A M J, Brown G E. The Blandford-Znajek process as a central engine for a gamma-ray burst. *Phys Rep*, 2000, 325: 83–114
- 93 Baumgarte T W, Shapiro S L, Shibata M. On the maximum mass of differentially rotating neutron stars. *Astrophys J*, 2000, 528: L29–L32
- 94 Shapiro S L. Differential rotation in neutron stars: Magnetic braking and viscous damping. *Astrophys J*, 2000, 544: 397–408
- 95 Shibata M, Duez M D, Liu Y T, et al. Magnetized hypermassive neutron-star collapse: A central engine for short gamma-ray bursts. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 031102
- 96 Duez M D, Liu Y T, Shapiro S L, et al. Collapse of magnetized hypermassive neutron stars in general relativity. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 031101
- 97 Kluźniak W, Ruderman M. The central engine of gamma-ray bursters. *Astrophys J*, 1998, 505: L113–L117
- 98 Ghosh P, Lamb F K. Accretion by rotating magnetic neutron stars. III. Accretion torques and period changes in pulsating X-ray sources. *Astrophys J*, 1979, 234: 296–316
- 99 Dai Z G, Liu R Y. Spin evolution of millisecond magnetars with hyperaccreting fallback disks: Implications for early afterglows of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2012, 759: 58
- 100 Rosswog S, Ramirez-Ruiz E. Jets, winds and bursts from coalescing neutron stars. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 336: L7–L11
- 101 Zhang D, Dai Z G. Hyperaccretion disks around neutron stars. *Astrophys J*, 2008, 683: 329–345
- 102 Zhang D, Dai Z G. Hyperaccreting neutron star disks and neutrino annihilation. *Astrophys J*, 2009, 703: 461–478
- 103 Zhang D, Dai Z G. Hyperaccreting disks around magnetars for gamma-ray bursts: Effects of strong magnetic fields. *Astrophys J*, 2010, 718: 841–866
- 104 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
- 105 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. (LIGO Scientific Collaboration & Virgo Collaboration). LIGO/Virgo G298048: Identification of a binary neutron star candidate coincident with Fermi GBM trigger 524666471/170817529. The Gamma-ray Coordinates Network, 2017, 21509
- 106 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
- 107 Hallinan G, Corsi A, Mooley K P, et al. A radio counterpart to a neutron star merger. *Science*, 2017, 358: 1579–1583
- 108 Dai Z G, Gou L J. Gamma-ray burst afterglows from anisotropic jets. *Astrophys J*, 2001, 552: 72–80
- 109 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
- 110 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
- 111 Meng Y Z, Geng J J, Zhang B B, et al. Origin of the prompt emission for short GRB170817A: Photosphere emission or synchrotron emission? *ArXiv*: 1801.01410
- 112 Uhm Z L, Zhang B. Fast-cooling synchrotron radiation in a decaying magnetic field and γ -ray burst emission mechanism. *Nat Phys*, 2014, 10: 351–356
- 113 Bošnjak Ž, Daigne F, Dubus G. Prompt high-energy emission from gamma-ray bursts in the internal shock model. *Astron Astrophys*, 2009, 498: 677–703
- 114 Wang X Y, Li Z, Dai Z G, et al. GRB 080916C: On the radiation origin of the prompt emission from keV/MeV to GeV. *Astrophys J*, 2009, 698: L98–L102
- 115 Daigne F, Bošnjak Ž, Dubus G. Reconciling observed gamma-ray burst prompt spectra with synchrotron radiation? *Astron Astrophys*, 2011, 526: A110
- 116 Geng J J, Huang Y F, Wu X F, et al. Low-energy spectra of gamma-ray bursts from cooling electrons. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 234: 3
- 117 Mészáros P, Rees M J. Collapsar jets, bubbles, and Fe lines. *Astrophys J*, 2001, 556: L37–L40
- 118 Ramirez-Ruiz E, Celotti A, Rees M J. Events in the life of a cocoon surrounding a light, collapsar jet. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 337: 1349–1356
- 119 Zhang W, Woosley S E, MacFadyen A I. Relativistic jets in collapsars. *Astrophys J*, 2003, 586: 356–371
- 120 Zhang W, Woosley S E, Heger A. The propagation and eruption of relativistic jets from the stellar progenitors of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2004, 608: 365–377
- 121 Bromberg O, Levinson A. Recollimation and radiative focusing of relativistic jets: Applications to blazars and M87. *Astrophys J*, 2009, 699: 1274–1280

- 122 Bromberg O, Nakar E, Piran T, et al. The propagation of relativistic jets in external media. *Astrophys J*, 2011, 740: 100
- 123 Nagakura H, Hotokezaka K, Sekiguchi Y, et al. Jet collimation in the ejecta of double neutron star mergers: A new canonical picture of short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2014, 784: L28
- 124 Murguia-Berthier A, Montes G, Ramirez-Ruiz E, et al. Necessary conditions for short gamma-ray burst production in binary neutron star mergers. *Astrophys J*, 2014, 788: L8
- 125 Duffell P C, Quataert E, MacFadyen A I. A narrow short-duration GRB jet from a wide central engine. *Astrophys J*, 2015, 813: 64
- 126 Lazzati D, Deich A, Morsony B J, et al. Off-axis emission of short γ -ray bursts and the detectability of electromagnetic counterparts of gravitational-wave-detected binary mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 471: 1652–1661
- 127 Gottlieb O, Nakar E, Piran T. The cocoon emission—an electromagnetic counterpart to gravitational waves from neutron star mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 473: 576–584
- 128 Nakar E, Sari R. Early supernovae light curves following the shock breakout. *Astrophys J*, 2010, 725: 904–921
- 129 Gottlieb O, Nakar E, Piran T, et al. A cocoon shock breakout as the origin of the gamma-ray emission in GW170817. ArXiv: 1710.05896
- 130 Piran T. Astronomy: Glowing embers. *Nature*, 2003, 422: 268–269
- 131 Costa E, Frontera F, Heise J, et al. Discovery of an X-ray afterglow associated with the γ -ray burst of 28 February 1997. *Nature*, 1997, 387: 783–785
- 132 van Paradijs J, Groot P J, Galama T, et al. Transient optical emission from the error box of the γ -ray burst of 28 February 1997. *Nature*, 1997, 386: 686–689
- 133 Rhoads J E. How to tell a jet from a balloon: A proposed test for beaming in gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1997, 487: L1–L4
- 134 Sari R, Piran T, Halpern J P. Jets in gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1999, 519: L17–L20
- 135 Frail D A, Kulkarni S R, Sari R, et al. Beaming in gamma-ray bursts: Evidence for a standard energy reservoir. *Astrophys J*, 2001, 562: L55–L58
- 136 Rhoads J E. The dynamics and light curves of beamed gamma-ray burst afterglows. *Astrophys J*, 1999, 525: 737–749
- 137 Panaitescu A, Meszaros P. Dynamical evolution, light curves, and spectra of spherical and collimated gamma-ray burst remnants. *Astrophys J*, 1999, 526: 707–715
- 138 Kumar P, Panaitescu A. Steepening of afterglow decay for jets interacting with stratified media. *Astrophys J*, 2000, 541: L9–L12
- 139 Matzner C D. Supernova hosts for gamma-ray burst jets: Dynamical constraints. *Mon Not R Astron Soc*, 2003, 345: 575–589
- 140 Hotokezaka K, Kyutoku K, Tanaka M, et al. Progenitor models of the electromagnetic transient associated with the short gamma ray burst 130603B. *Astrophys J*, 2013, 778: L16
- 141 Nakar E, Piran T. The observable signatures of GRB cocoons. *Astrophys J*, 2017, 834: 28
- 142 Lazzati D, López-Cámara D, Cantiello M, et al. Off-axis prompt X-ray transients from the cocoon of short gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2017, 848: L6
- 143 Lamb G P, Kobayashi S. Electromagnetic counterparts to structured jets from gravitational wave detected mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 472: 4953–4964
- 144 Vlahakis N, Peng F, Knigl A. Neutron-rich hydromagnetic outflows in gamma-ray burst sources. *Astrophys J*, 2003, 594: L23–L26
- 145 Huang Y F, Wu X F, Dai Z G, et al. Rebrightening of XRF 030723: Further evidence for a two-component jet in a gamma-ray burst. *Astrophys J*, 2004, 605: 300–306
- 146 Zhang B, Meszaros P. Gamma-ray burst beaming: A universal configuration with a standard energy reservoir? *Astrophys J*, 2002, 571: 876–879
- 147 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
- 148 Kumar P, Granot J. The evolution of a structured relativistic jet and gamma-ray burst afterglow light curves. *Astrophys J*, 2003, 591: 1075–1085
- 149 Zhang B, Meszaros P. An analysis of gamma-ray burst spectral break models. *Astrophys J*, 2002, 581: 1236–1247
- 150 Liang E W, Yi S X, Zhang J, et al. Constraining gamma-ray burst initial lorentz factor with the afterglow onset feature and discovery of a tight $\Gamma_0 - E_{\gamma, \text{iso}}$ correlation. *Astrophys J*, 2010, 725: 2209–2224
- 151 Lü J, Zou Y C, Lei W H, et al. Lorentz-factor-isotropic-luminosity/energy correlations of gamma-ray bursts and their interpretation. *Astrophys J*, 2012, 751: 49
- 152 Sun H, Zhang B, Li Z. Extragalactic high-energy transients: Event rate densities and luminosity functions. *Astrophys J*, 2015, 812: 33
- 153 Blandford R D, McKee C F. Fluid dynamics of relativistic blast waves. *Phys Fluids*, 1976, 19: 1130–1138
- 154 Huang Y F, Dai Z G, Lu T. A generic dynamical model of gamma-ray burst remnants. *Mon Not R Astron Soc*, 1999, 309: 513–516
- 155 Waxman E. Angular size and emission timescales of relativistic fireballs. *Astrophys J*, 1997, 491: L19–L22
- 156 Panaitescu A, Mészáros P. Rings in fireball afterglows. *Astrophys J*, 1998, 493: L31–L34

- 157 Moderski R, Sikora M, Bulik T. On beaming effects in afterglow light curves. *Astrophys J*, 2000, 529: 151–156
- 158 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
- 159 Granot J, Sari R. The shape of spectral breaks in gamma-ray burst afterglows. *Astrophys J*, 2002, 568: 820–829
- 160 Sari R, Piran T. Predictions for the very early afterglow and the optical flash. *Astrophys J*, 1999, 520: 641–649
- 161 Sari R, Piran T. GRB 990123: The optical flash and the fireball model. *Astrophys J*, 1999, 517: L109–L112
- 162 Mészáros P, Rees M J. GRB 990123: Reverse and internal shock flashes and late afterglow behaviour. *Mon Not R Astron Soc*, 1999, 306: L39–L43
- 163 Kobayashi S. Light curves of gamma-ray burst optical flashes. *Astrophys J*, 2000, 545: 807–812
- 164 Kobayashi S, Sari R. Optical flashes and radio flares in gamma-ray burst afterglow: Numerical study. *Astrophys J*, 2000, 542: 819–828
- 165 Granot J, Panaitescu A, Kumar P, et al. Off-axis afterglow emission from jetted gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2002, 570: L61–L64
- 166 Greiner J, Hartmann D H, Voges W, et al. Search for GRB X-ray afterglows in the ROSAT all-sky survey. *Astron Astrophys*, 2000, 353: 998
- 167 Rykoff E S, Aharonian F, Akerlof C W, et al. A search for untriggered GRB afterglows with ROTSE-III. *Astrophys J*, 2005, 631: 1032–1038
- 168 Malacrino F, Atteia J L, Boër M, et al. The CFHTLS real time analysis system: “Optically selected GRB afterglows”. Overview and performance. *Astron Astrophys*, 2006, 459: 465–475
- 169 Gal-Yam A, Ofek E O, Poznanski D, et al. Radio and optical follow-up observations of a uniform radio transient search: Implications for gamma-ray bursts and supernovae. *Astrophys J*, 2006, 639: 331–339
- 170 Andreoni I, Ackley K, Cooke J, et al. Follow up of GW170817 and its electromagnetic counterpart by australian-led observing programmes. *Publ Astron Soc Aust*, 2017, 34: e069
- 171 Coulter D A, Foley R J, Kilpatrick C D, et al. Swope supernova survey 2017a (SSS17a), the optical counterpart to a gravitational wave source. *Science*, 2017, 358: 1556–1558
- 172 Kilpatrick C D, Foley R J, Kasen D, et al. Electromagnetic evidence that SSS17a is the result of a binary neutron star merger. *Science*, 2017, 358: 1583–1587
- 173 Shappee B J, Simon J D, Drout M R, et al. Early spectra of the gravitational wave source GW170817: Evolution of a neutron star merger. *Science*, 2017, 358: 1574–1578
- 174 Troja E, Piro L, van Eerten H, et al. The X-ray counterpart to the gravitational-wave event GW170817. *Nature*, 2017, 551: 71–74
- 175 Mooley K P, Nakar E, Hotokezaka K, et al. A mildly relativistic wide-angle outflow in the neutron-star merger event GW170817. *Nature*, 2017, 119: 207–210
- 176 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
- 177 Evans P A, Cenko S B, Kennea J A, et al. Swift and NuSTAR observations of GW170817: Detection of a blue kilonova. *Science*, 2017, 358: 1565–1570
- 178 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
- 179 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
- 180 Ioka K, Nakamura T. Can an off-axis gamma-ray burst jet in GW170817 explain all the electromagnetic counterparts? ArXiv: [1710.05905](https://arxiv.org/abs/1710.05905)
- 181 Lamb G P, Kobayashi S. GRB 170817A as a jet counterpart to gravitational wave trigger GW 170817. ArXiv: [1710.05857](https://arxiv.org/abs/1710.05857)
- 182 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. ArXiv: [1712.03237](https://arxiv.org/abs/1712.03237)
- 183 Piro A L, Kollmeier J A. Evidence for cocoon emission from the early light curve of SSS17a. *Astrophys J*, 2018, 855: 103
- 184 Wang X Y, Huang Z Q. Early soft X-ray to UV emission from double neutron star mergers: Implications from the long-term observations of GW170817. *Astrophys J*, 2018, 853: L13
- 185 Lyman, J D, Lamb G P, Leva A J, et al. The optical afterglow of the short gamma-ray burst associated with GW170817. ArXiv: [1801.02669](https://arxiv.org/abs/1801.02669)
- 186 Geng J J, Dai Z G, Huang Y F, et al. Brightening X-ray/optical/radio emission of GW170817/SGRB 170817A: Evidence for an electron-positron wind from the central engine? *Astrophys J*, 2018, 856: L33
- 187 Lattimer J M, Schramm D N. Black-hole-neutron-star collisions. *Astrophys J*, 1974, 192: L145–L147
- 188 Goriely S, Bauswein A, Janka H T. r-process nucleosynthesis in dynamically ejected matter of neutron star mergers. *Astrophys J*, 2011, 738: L32
- 189 Piran T, Nakar E, Rosswog S. The electromagnetic signals of compact binary mergers. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 430: 2121–2136

- 190 Grossman D, Korobkin O, Rosswog S, et al. The long-term evolution of neutron star merger remnants. II. Radioactively powered transients. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 439: 757–770
- 191 Radice D, Perego A, Bernuzzi S, et al. Long-lived remnants from binary neutron star mergers. ArXiv: [1803.10865](#)
- 192 Wang S Q, Dai Z G, Wu X F. Research developments in Li-Paczyński Novae (I): Theoretical aspect. *Chin Astron Astrophys*, 2016, 40: 141–175
- 193 Metzger B D, Fernández R. Red or blue? A potential kilonova imprint of the delay until black hole formation following a neutron star merger. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 441: 3444–3453
- 194 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
- 195 Jin Z P, Hotokezaka K, Li X, et al. The Macronova in GRB 050709 and the GRB-macronova connection. *Nat Commun*, 2016, 7: 12898
- 196 Yang B, Jin Z P, Li X, et al. A possible macronova in the late afterglow of the long-short burst GRB 060614. *Nat Commun*, 2015, 6: 7323
- 197 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
- 198 Gao H, Zhang B, Lü H J, et al. Searching for magnetar-powered merger-novae from short GRBs. *Astrophys J*, 2017, 837: 50
- 199 Hu L, Wu X, Andreoni I, et al. Optical observations of LIGO source GW 170817 by the Antarctic Survey Telescopes at Dome A, Antarctica. *Sci Bull*, 2017, 62: 1433–1438
- 200 Villar V A, Guillochon J, Berger E, et al. The combined ultraviolet, optical, and near-infrared light curves of the kilonova associated with the binary neutron star merger GW170817: Unified data set, analytic models, and physical implications. *Astrophys J*, 2017, 851: L21
- 201 Yu Y W, Dai Z G. A long-lived remnant neutron star after GW 170817 inferred from its associated kilonova. ArXiv: [1711.01898](#)
- 202 Li S Z, Liu L D, Yu Y W, et al. What powered AT2017gfo associated with GW170817? ArXiv: [1804.06597](#)
- 203 Ai S, Gao H, Dai Z G, et al. The allowed parameter space of a long-lived neutron star as the merger remnant of GW170817. ArXiv: [1802.00571](#)
- 204 Li T P. HXMT: A Chinese high-energy astrophysics mission. *Nucl Phys B-Proc Supplements*, 2007, 166: 131–139
- 205 Xie F, Zhang J, Song L M, et al. Simulation of the in-flight background for HXMT/HE. *Astrophys Space Sci*, 2015, 360: 47

Electromagnetic counterparts to the gravitational wave event GW170817

GENG JinJun^{1,2*}, XIAO Di^{1,2}, WANG ShanQin^{1,2,3} & DAI ZiGao^{1,2*}

¹*School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China;*

²*Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics (Nanjing University), Ministry of Education, Nanjing 210046, China;*

³*Department of Astronomy, University of California, Berkeley 94720-3411, USA*

The gravitational wave (GW) signal from a binary neutron star (NS) merger was detected by the LIGO/virgo detectors on August 17th 2017 for the first time. A short gamma-ray burst (GRB) and a kilonova were detected 1.74 s and 10.9 h after the GW signal, respectively. These detections confirm the hypothesis that at least some short gamma-ray bursts (GRB) originate from binary neutron star mergers. Furthermore, it is clear that r-process nucleosynthesis should occur in NS-NS mergers and then power a kilonova. Observations on its multi-wavelength counterparts (including the prompt gamma-ray emission, kilonova, and afterglow) make us be able to investigate their physical origins as a whole for the first time. Comparisons between the theories and observations would greatly help answer questions such as the binary NS merger remnant, the characteristics of the GRB jet, and the characteristics of the ejecta. This paper summarizes these electromagnetic counterparts to GW170817 from the NS-NS merger and provides theoretical interpretations for them.

gamma-ray bursts, black holes, neutron stars, radiation mechanisms, gravitational waves

PACS: 04.30.Tv, 26.30.Hj, 94.05.Dd, 95.30.Lz, 95.85.Sz

doi: [10.1360/SSPMA2018-00096](#)