

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.03.04

Li-Paczyński 新星的研究进展(II): 观测

王善钦^{1,2}, 戴子高^{1,2}, 吴雪峰^{3,4,5}

(1. 南京大学 天文与空间科学学院, 南京 210093; 2. 现代天文与天体物理教育部重点实验室, 南京 210093; 3. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008; 4. 中国科学院中国南极天文中心, 南京 210008; 5. 紫金山天文台-南京大学粒子、核物理和宇宙学联合研究中心, 南京 210008)

摘要: 在Li-Paczynski 新星(LP 新星)模型被提出以及短暴的余辉被确认后,人们就积极地在短暴的光学(或光学-近红外)对应体中寻找LP 新星存在的证据。第2章总结2013年之前的观测结果。第3、4章分别介绍短暴GRB 130603B、GRB 060614的基本性质与它们的近红外对应体的解释,它们的近红外超可能是LP 新星存在的信号。第5章介绍短暴GRB 080503的基本性质以及它的光学对应体与X射线对应体的解释,它的光学与X射线光变曲线的晚期再增亮被解释为中子星并合之后的磁星加热的喷射物辐射(Merger-Nova 辐射)。如果对于以上短暴伴随的光学-近红外对应体的解释正确,那么它们就给出了短暴与一些特殊的长暴来自致密星并合的第一批证据。除产生LP 新星(与Merger-Novae)外,致密星并合之前的高速轨道运动与并合自身都将产生强烈的引力波暴(Gravitational-Wave Bursts, GWBs)。随着引力波时代的到来,致密星并合对应的各种电磁波现象的理论研究与观测受到更加密集的关注。由于引力波暴定位的不确定性较大,因此伴随引力波暴的LP 新星可以作为引力波暴精确定位的最佳候选者之一。正在快速发展的高频度宽场光学-近红外巡天将对LP 新星等现象进行富有成效的探索,并与引力波探测研究互相影响。因此,我们在最后介绍未来探测LP 新星的方法及其多信使探测的前景。

关键词: 伽玛射线暴; Li-Paczyński 新星; r 过程; 磁星; 黑洞

中图分类号: P172.3 **文献标识码:** A

1 引 言

在《Li-Paczyński 新星的研究进展(I): 理论》一文^[1]中,我们介绍了Li-Paczyński 新星(简称为“LP 新星”)的理论部分。致密星并合之前的高速轨道运动与并合自身都将产生强烈

收稿日期: 2014-03-20; 修回日期: 2015-07-03

资助项目: 973 项目(2014CB845800); 国家自然科学基金(11033002, 11322328)

通讯作者: 戴子高, dzg@nju.edu.cn

的引力波暴 (Gravitational-Wave Bursts, GWBs), 随着引力波时代的到来, 致密星并合对应的各种电磁波现象的理论研究与观测受到更加密集的关注。由于引力波暴定位的不确定性较大, 因此伴随引力波暴的 LP 新星可以作为引力波暴精确定位的最佳候选者之一。

致密星并合必然产生引力波, 并可能产生短暴与 LP 新星, 因此探测 LP 新星有 3 种基本方式^[2]: 跟随引力波探测、跟随短暴探测、盲巡天。由于伽玛暴的集束特征, 即使所有致密星并合都产生短暴 (这显然不可能), 它们中的大部分仍然不能被地球上的观测者观测到; LP 新星的辐射几乎是各向同性的, 因此将来的宽场光学—近红外巡天很可能看到大量不伴随短暴的 LP 新星, 这种巡天在致密星并合的框架内被称为“盲巡天”。

由于引力波探测时代尚未来临, 盲巡天尚未发现可能的 LP 新星候选物。至今为止, 唯一被认为可能是 LP 新星的暂现源是从短暴的光学—近红外对应体中分解出来的, 因此, 尽管致密星并合会产生多种暂现源, 但至今被观测到并被深入研究的可能与致密星并合有关的暂现源却只有短暴。所以, 我们在第 2 章、第 3 章与第 4 章对 LP 新星观测的介绍仅限于“跟随短暴探测”的方式, 分别介绍早期的 LP 新星观测与最近的 LP 新星观测。第 6 章介绍未来观测 LP 新星的 3 种手段。

2 LP 新星的早期观测

伽玛暴的致密星并合模型认为: 致密星并合将形成磁星或者黑洞—吸积盘系统, 喷发出相对论性喷流; 内激波加速电子, 产生伽玛暴; 外激波加速电子, 产生多波段余辉。

在发现短暴余辉并确认它们不伴随超新星之后, 人们建立短暴的致密星并合模型的信心得以确立^①, 由于 Li 与 Paczyński^[3] (以下简称“LP98”) 预言致密星并合将产生类似超新星的紫外—光学暂现源的辐射, 因此, 人们开始致力于从短暴的紫外—光学对应体中搜寻 LP 新星信号^[4-7]。

Hjorth 等人^[4]对 GRB 050509B ($z = 0.225$) 的光学对应体进行了分析, 用 LP98 模型拟合数据上限, 假定喷射物动能为 10^{44} J 量级, 将能量转换因子 f 的上限限制到 10^{-5} 量级。此后陆续有小组对一些短暴进行类似探测, 但都未获得肯定的结果, 只获得一些物理量的上限。这些探测对于限定参数与模型都有一定的参考价值, 因此接下来我们先介绍这些探测结果。

2.1 GRB 050509B 的光学对应体的研究

2005 年 5 月 9 日 04:00:19.23 (UT), Swift-BAT 探测到 GRB 050509B, 它的 $T_{90} = 30 \sim 40$ ms, 峰值流强为 2100 s^{-1} ($15 \sim 350$ keV), 红移 $z = 0.225$ 。

Bersier 等人^[8]观测了 GRB 050509B 的视场, 得出结论: 可能对应的未消光的超新星的亮度上限至少比 SN 1998bw 暗 4 mag。进一步分析得出两者的差别为 6 mag。这个结果排除了 GRB 050509B 伴随正常核坍缩型超新星的可能性; 即使它伴随暗的核坍缩型超新星, 也

^①建立致密星并合模型的信心还来自当时对宿主星系的研究, 当时发现大部分短暴宿主星系为早型星系, 这些星系没有活跃的恒星形成活动。但必须指出的是, 这个观测结果是选择效应造成的。近些年统计的短暴宿主星系中, 晚型星系比例大约是早型星系 2 倍, 但因为暴源地点与星系中心的偏离相比长暴情形大得多, 这个结果依然支持短暴来自致密星并合的假想。

比目前所发现的最暗的核坍缩型超新星暗, 因此其前身星基本上不可能为大质量恒星。

Hjorth 等人^[4]测定了这个暴可能的光学对应体约 20 d, 得到了观测上限: V 波段暗于 26.5 mag, R 波段暗于 25.1 mag, 由此得出 GRB 050509B 对应的光学暂变源亮度最多为 SN 1998bw 1/100 (如图 1), 比至今发现的所有核坍缩型超新星以及热核爆炸超新星都暗。因此, GRB 050509B 对应的 LP 新星 (如果有的话) 未被确认。

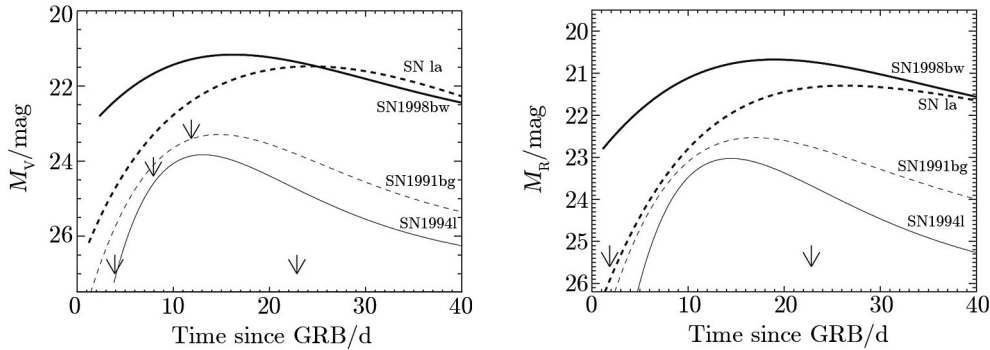


图 1 GRB 050509B 的光学对应体上限与典型的超新星的比较^[4]

2.2 GRB 060505 光学对应体的研究

2006 年 5 月 5 日 06:36:01 (UT), Swift-BAT 探测到 GRB 060505, $T_{90} = (4 \pm 1) \text{ s}$, 流量为 $(6.2 \pm 1.1) \times 10^{-13} \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($15 \sim 150 \text{ keV}$)^[9, 10]。GRB 060505 与附近的星系 2dFGRS S173Z112 相距约 $4''$, 2dFGRS S173Z112 的红移 $z = 0.0894$ 。

Swift-XRT 的进一步观测表明, 大约 5 d 后, X 射线源变暗^[11]。Swift-UVOT 未探测到光学对应体^[12], Ofek 等人^[13]观测到光学对应体与附近星系的光谱($\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$, OI, OII, OIII 与 SII 发射线以及 CaII H 吸收线)。进一步的观测^[14]证实了光学对应体的存在。

因为 GRB 060505 红移仅为 0.089, 因此即使在本地系中, 其持续时间也依然超过传统的 2 s 分界, 所以被认为属于长暴, 但细致的观测未发现亮于 -14 mag 的超新星与其成协^[15]。Ofek 等人^[5]将 GRB 060505 可能成协的超新星的亮度上限又降低了 3 mag, 即可能存在的超新星暗于 -11 mag (不考虑消光), 这比任何一个已经发现的核坍缩型超新星都暗; Ofek 等人^[5]认为这个上限可能与 Macronova (巨新星, 即 LP 新星) 吻合, 对应的前身星属于致密星系统。

由于 GRB 060505 爆发 1.1 d 后的光学余辉稍微偏红, Ofek 等人^[5]认为这个特征可能源自红化或者其他与余辉无关的机制, 中子物质放射性衰变的贡献是可能的一个解释。利用 LP98 模型和 Kulkarni^[16]的模型, Ofek 等人^[5]拟合了光学数据 (见图2), 粗略拟合了光变曲线, 认为这可能源自一个由自由中子喷射物驱动的 Macronova, 其参数为 $M_{\text{ej}} \approx 3 \times 10^{-2} M_{\odot}$, $v = 0.6 c$ 。但因为观测数据太少, 因此无法获得真正的确认。如果光变曲线偏红的现象可以用 Macronova 解释, 那么对应的前身星很可能属于致密星系统。

Thöne 等人^[17]对 GRB 060505 的宿主星系进行研究之后, 认为其前身星为质量约 $32 M_{\odot}$ 。

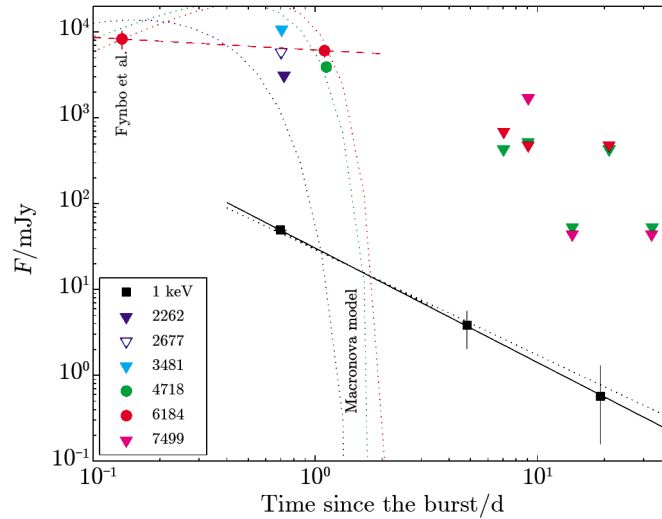


图 2 用 Macronova (巨新星, 即 LP 新星) 拟合 GRB 060505 的光学对应体^[5]

灰色四边形为 GRB 060505 的 X 射线余辉数据点, 彩色圆与彩色三角分别为 GRB 060505 光学数据测量点与上限。2262、2677、3481、4718、6184 与 7499 分别对应于 UM2、UW1、U、g、r 与 i 波段。红色划线表示与早期 r 波段测量拟合的幂律衰减线(衰减值数为 -0.15) 红、绿、蓝点线分别表示采用 Kulkarni^[16] 的模型、假定参数 $M_{ej} \approx 3 \times 10^{-2} M_{\odot}$ 、速度 $\beta = 0.6$ ($\beta = v/c$, c 为光速) 时计算出的 UM2 (2262)、g (4718) 与 r (6184) 波段的 LP 新星光变曲线。

的大质量恒星, 这与致密星并合模型相对立^①。如果不考虑 Thöne 等人^[17] 的结果, 将 GRB 060505 前身星确定为致密星并合, Ofek 等人^[5] 给出的结果也仅仅是一个上限, 而非准确的观测。

2.3 GRB 070724A 光学对应体的研究

GRB 070724A 于 2007 年 7 月 24 日 10:53:50 (UT) 被 Swift 发现, $T_{90} \approx (0.40 \pm 0.04) \text{ s}$ ^[23], 在暴后 72 s, XRT 探测到 X 射线余辉, UVOT 没有探测到紫外—光学对应体。Swift 在最初 100 s 内探测到两次 X 射线耀发。

X 射线余辉与光学—近红外余辉先后证实余辉与 $z = 0.457$ 处的恒星形成星系重合^[7, 24, 25]。GRB 070724A 的宿主星系为蓝星系^[26, 27], 进一步的定位证实它在星系的外缘, 偏离中心 $(4.8 \pm 0.1) \text{ kpc}$ 。

Kann^[28] 对 BAT 数据的分析表明, GRB 070724A 是一个相当软的短暴, E_p 仅为 41 keV, 光子指标 $\Gamma = -2.2$, 是第一个被发现的“短/软暴 (short/soft GRB)”。

GRB 070724A 的余辉在暴后 2.3 h 后开始被观测到, 使用 i、J、H、K_s 滤光片。K_s 星等为 $(19.59 \pm 0.16) \text{ mag}$, i 波段星等为 $(23.79 \pm 0.07) \text{ mag}$, 在 1.3 a 后消失, K_s 波段亮度在

^①Maeda 等人^[18] 认为, 核坍缩型超新星峰值星等从 -14 mag 到 -21 mag 都有可能, 如峰值星等约 -14 mag 的 SN 2008ha 虽然有 Ia 型超新星的特征, 但其谱特征却与 Ia 型超新星不同, 因此可能是核坍缩型超新星, 因此他们支持 ^{56}Ni 回落导致超新星太暗的看法。但 SN 2008ha 虽与典型的 Ia 型超新星不同, 却更可能属于与 SN 2002cx 类似(“SN 2002cx-like”)的事件^[19], 这类超新星被归为 Iax 型超新星(Ia 型超新星的一个变种), 很可能是因为白矮星爆发不完全导致的现象^[20-22], 相比正常的 Ia 型超新星, 喷射物与 ^{56}Ni 质量都小得多, 因此亮度也低得多。

2.8~3.7 h 之间也衰减, 置信度为 4σ 。

光学-近红外谱指标 $\beta_{\text{O,NIR}} \approx -2$, 远红于标准余辉模型的预期, 这可能是由于严重的尘埃消光引起, 宿主星系消光 $A_{\text{V}}^{\text{host}} \approx 2 \text{ mag}$; 或由于非余辉起源的近红外发射。GRB 070724A 的近红外对应体是当时最亮的, 同时, 它的光学发射是当时最暗之一。

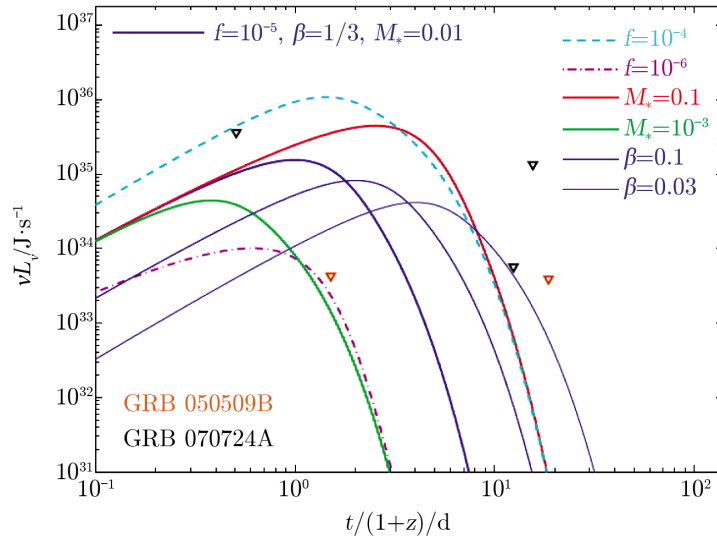


图 3 用 LP 新星拟合 GRB 070724A 的光学对应体^[7]

利用 LP98 的模型, 给定不同的喷射物质量 M_{ej} 、速度 β ($\beta = v/c$, c 为光速)、能量转化因子 f , 得出的 LP 新星的理论光变曲线。R 波段数据上限以黑色点表示, 橙色点表示 GRB 050509B 的上限^[4]。

相对于标准余辉模型而言, 光学-近红外光谱异常红, 因此, Berger 等人^[6] 猜测它可能来自 LP 新星辐射, 并推断出对应的喷射物质量 M_{ej} 和对应的辐射能释放效率 f 分别约为 $10^{-4}M_{\odot}$ 和约 5×10^{-3} (速度 $v \approx 0.3c$)。然而, 当时的 LP 新星模型预测光谱在紫外波段而非近红外处达到峰值, Berger 等人^[6] 认为这意味着以下两种可能: (1) 红外超不是来自 LP 新星; (2) 微超新星模型需要修改。在 LP98 的原始模型中, LP 新星光谱峰在紫外波段, 但在 Metzger 等人的模型 (Met10 模型)^[29] 中, 光谱峰已经移向红端; Barnes 与 Kasen 的模型 (BK13 模型)^[30] 和 Tanaka 与 Hotokezaka 的模型 (TH13 模型)^[31] 中, 光谱峰都处于近红外波段。因此, 现在看来, 近红外的结果正是更真实模型所要求的, 当年的模型确实需要修改, 而且事实上在此后很快就被修改。

Kocevski 等人^[7] 用 LP98 模型对 GRB 070724A 的光学对应体进行拟合, 如图 3 所示。然而, 即使考虑光谱红化, 也不能说明 GRB 070724A 的光学-近红外超是由 LP 新星引起, 因为推断出的 $f \approx 5 \times 10^{-3}$, 比 Met10 模型中的 f 值大 1000 倍。因此, GRB 070724A 的光学-近红外对应物在光学-近红外波段上的超更可能是余辉辐射被尘埃红化 (reddening) 之后产生的。

3 第一个可能的 LP 新星:GRB 130603B 的光学—近红外观测

从 2005 年到 2013 年春, LP 新星的早期观测都只获得零结果, 这是因为这些观测都集中于光学波段。BK13 模型表明, 在 LP 新星辐射中, 光学波段的辐射受到严重禁戒, 存在时间很短, 亮度很低, 如 I 与 B 波段仅持续 3 d 与 1 d, 其峰值星等仅分别约为 -13 mag 与 -11 mag, 亮度都在过去的几次探测极限之下。LP 新星的早期观测虽然未获得正面结果, 但却基本排除了短暴伴随超新星的可能性, 且给出了可能存在的 LP 新星的物理参数上限。

由于不透明度的影响, LP 新星在 J 波段的绝对星等 $M_J \approx -15$ mag, 持续约 7 d, 这意味着近红外观测最有可能发现 LP 新星。GRB 130603B 的近红外对应体的观测结果可能证实了这一点^[32, 33]。对 GRB 130603B 的 X 射线余辉的研究^[34, 35]进一步限制出前身星和并合后可能存在的磁星的一些性质, 甚至引力波辐射的性质^[34]。因此, GRB 130603B 对于短暴、LP 新星和引力波等多领域研究都有重大的甚至关键性的意义。

GRB 130603B 于 2013 年 6 月 3.659 日 (UT) 触发 Swift-BAT^[36], BAT 测出的光变曲线表明 GRB 130603B 是个单峰暴 (见图 4), 峰值计数率为 $6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ($15 \sim 350 \text{ keV}$)。GRB 130603B 的 $T_{90} = (0.18 \pm 0.02) \text{ s}$ ($15 \sim 350 \text{ keV}$)^[37]。数据分析^[38]表明, GRB 130603B 的谱延迟为 $(0.6 \pm 0.7) \text{ ms}$ ($15 \sim 25 \text{ keV}$ 对 $50 \sim 100 \text{ keV}$) 与 $(-2.5 \pm 0.7) \text{ ms}$ ($25 \sim 50 \text{ keV}$ 对 $100 \sim 350 \text{ keV}$), 截断幂律谱 ($20 \sim 1.5 \times 10^4 \text{ keV}$) 拟合指数为 $\alpha = (-0.73 \pm 0.15)$, 未发现 GRB 130603B 有延展发射成分。以上性质表明 GRB 130603B 是一个典型的短暴。

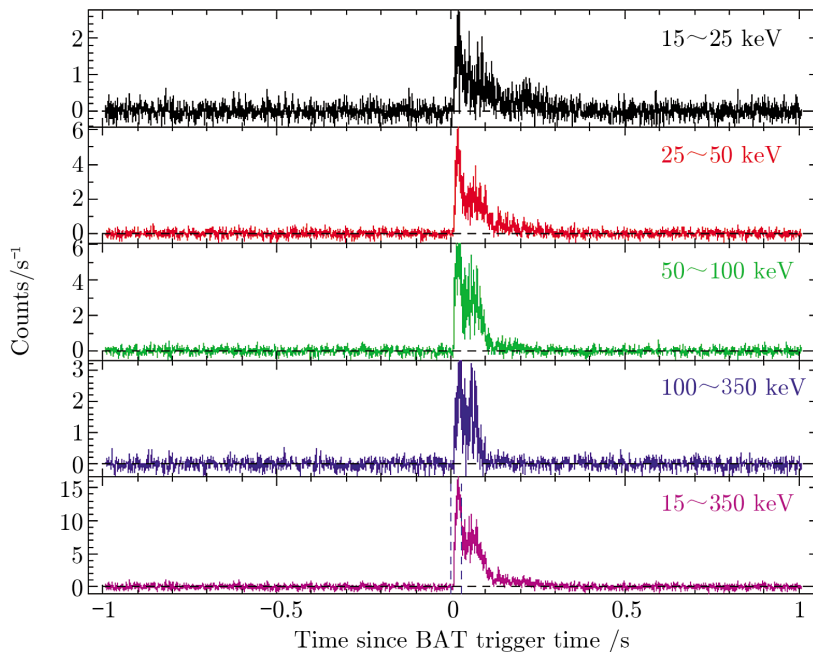


图 4 Swift-BAT 探测到的 GRB 130603B 的光变曲线^[37]

GRB 130603B 被探测到 59 s 后, Swift-XRT 开始观测它的 X 射线对应体。Swift 虽然在 GRB 130603B 被探测之后 59 s 就转向它的位置, 但 UVOT 的观测并未观测到光学对应体^[36], 光学—近红外对应体的性质由地面望远镜和哈勃太空望远镜(Hubble Space Telescope, HST) 观测获得。

赫歇尔望远镜 (William Herschel Telescope, WHT) 在 GRB 130603B 被探测到 5.8 h 后在其视场内探测到一个 r 波段星等为 20.94 mag 的星系, 并在 XRT 的误差圆内确认了一个点源^[39], 这个点源是 GRB 130603B 的光学对应体的候选者。

加那利大型望远镜 (Gran Telescopio Canarias, 简称 GTC) 探测到 GRB 130603B 余辉的 3 条光谱^[40], 光谱显示了 CaII 双线、MgII、MgI 吸收线, 这些吸收线叠加了宿主星系的 [OII]、[OIII]、H β 与 H γ 发射线, 吸收线与发射线的共同红移 $z = 0.356$, 这就是 GRB 130603B 及其宿主星系的红移值。南双子望远镜 (Gemini-S) 上的 GMOS 观测到 GRB 130603B 余辉的光谱^[41], 根据 CaHK 线与几条发射线, 确认 GRB 130603B 的红移 $z = 0.356$ 。GRB 130603B 是第一个探测到光谱并根据光谱确定出红移的短暴。

根据 GRB 130603B 的流量与红移, 可计算出它的各向同性能量 $E_{\gamma, \text{iso}} \approx 2.1 \times 10^{44}$ J (20 ~ 10⁴ keV, 静止参照系内)。Fong 等人^[35] 计算出 GRB 130603B 的各向同性动能 $E_{\text{K}, \text{iso}} \approx (0.6 \sim 1.7) \times 10^{44}$ J, 星周介质密度约为 $5 \times 10^{-3} \sim 30 \text{ cm}^{-3}$ 。

3.1 GRB 130603B 的红移测定与宿主星系观测

天文学家利用 GMOS 对与 GRB 130603B 位置重叠的星系进行了观测, 对这个星系的性质做进一步研究^[42], 并得到这个星系与 GRB 130603B 在视线上重叠的概率为 0.000 64。结合吸收线分析的结果, 可以断定所观测的星系是 GRB 130603B 的宿主星系, 其红移精确值为 0.3568 ± 0.0005 ; 暴源距离宿主星系核的角距离为 $0.9''$, 根据红移 $z = 0.3568$, 可以算出对应的投影距离约 4.8 kpc, 大于短暴前身星与宿主星系核的平均距离 (约为 4.5 kpc), 处于宿主星系的外围。

观测表明, GRB 130603B 的宿主星系是一个中等亮度的恒星形成星系, $M_B = -20.96$ mag, $L \approx 0.8 L_B^*$, 恒星形成率也中等, $\text{SFR} = 1.84 M_{\odot} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[42]。

HST 也对 GRB 130603B 的宿主星系进行了观测。HST/ACS 与 WFC3/IR 的两次 (2013 年 6 月 13 日, 2013 年 7 月 3 日) 观测表明, GRB 130603B 的宿主星系是一个受扰动的晚型星系, GRB 130603B 的位置微微偏离被潮汐力扭曲的旋臂上^[33], 旋臂似乎被附近一个更小的星系的引力作用所扭曲或者拉长^[43], 其位置与宿主星系的成像减除见图 5。

晚期多波段测光与分析表明, GRB 130603B 的宿主星系质量 $M \approx 5.0 \times 10^9 M_{\odot}$, 金属丰度与太阳的金属丰度几乎相等^[42], 与其他短暴的宿主星系性质相近。

3.2 GRB 130603B 的余辉以及光学—近红外对应体的观测

GRB 130603B 有丰富的多波段余辉观测, 它是第 3 个探测到射电余辉的短暴, 根据光学余辉与射电余辉光变曲线在暴后约 0.47 d 时的拐折 (这是首次在短暴的射电余辉光变曲线中发现拐折), Fong 等人^[35] 推断出喷流半张角 $\theta_j \approx 4^\circ \sim 8^\circ$, 因此其集束因子 $f_b \equiv 1 - \cos(\theta_j) = (2.4 \sim 9.7) \times 10^{-3}$, $E_{\gamma} = f_b E_{\gamma, \text{iso}} \approx (0.5 \sim 2) \times 10^{42}$ J, $E_{\text{K}} = f_b E_{\text{K}, \text{iso}} \approx (0.1 \sim 1.6) \times 10^{42}$ J。

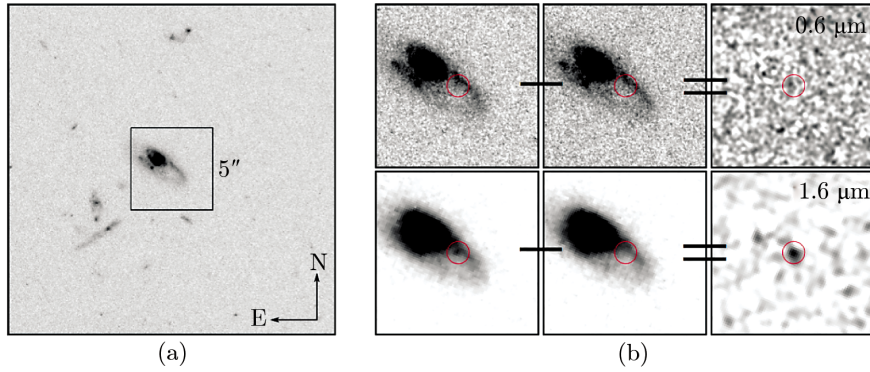


图 5 GRB 130603B 的位置(红圈内部)及其宿主星系的 HST 光学—近红外成像^[33]

(a) GRB 130603B 的宿主星系及其周围视场的高分辨率成像。(b) 上排是两个时期的 F606W 光学成像及其减除之后的结果; (b) 下排是两个时期的 F160W 近红外成像及其减除之后的结果。虽然近红外成像质量比光学成像质量低, 但近红外探测到一个明显的点源, 光学波段没有探测到这个点源。

Fong 等人^[35] 还发现了暴后约 1 d 后, X 射线余辉显著超出, 这些超出的能量可能与回落吸积或者毫秒级磁星的自转能输出有关。

6.5 米麦哲伦/巴德 (Magellan/Baade) 望远镜上的 IMACS 于 6 月 3.996 日与 4.992 日 (UT) 对 GRB 130603B 余辉进行了 r 波段观测, 发现了正在变暗的余辉。

Berger 等人^[32] 根据暴后 9.4 d HST 对 GRB 130603B 位置处的光学与近红外观测结果, 确认出一个暗淡的红色点源, $m_{F160W} = (25.8 \pm 0.2)$ AB mag, 对应于静止参照系中绝对星等 $M_J \approx -15.2$ mag, HST 光学波段探测的上限是 $m_{F606W} \gtrsim 27.7$ AB mag (3σ), 相当于 $M_V \gtrsim -13.3$ mag, $V - H \gtrsim 1.9$ mag, 这意味着点源异常红。

GRB 130603B 光学—近红外对应体在暴后约 8 ~ 32 h 内快速衰减, 衰减指数 $\alpha \lesssim -2.6$, 谱指数 $\beta \approx -1.5$ ($F_\nu \propto t^\alpha \nu^\beta$), 根据这个衰减率, 在第 9.4 天的 HST 观测得到点源的近红外亮度应为 $m_{F160W}(t = 9.4 \text{ d}) \gtrsim 29.3$ AB mag^[32], 明显暗于实际观测到的亮度 ($m_{F160W} = (25.8 \pm 0.2)$ AB mag)。这意味着点源的近红外发射存在余辉无法解释的成分, 这个成分导致近红外对应体在暴后 8.4 h~9.4 d 出现晚期增亮(见图 6)。

3.3 GRB 130603B 近红外对应体的辐射超出与 LP 新星解释

Tanvir 等人^[43] 分析了 HST 的观测数据, 证实 GRB 130603B 位置处存在一个点源, 其 F606W 极限星等大于 27.6 mag, 对应 $M_V \approx -14.3$ mag, 亮度小于 SN 1998bw 的 1/100 左右, 因此 GRB 130603B 不与超新星成协。

Tanvir 等人的研究表明, 在约 0.3 d 后, 光学对应体亮度快速下降, 表现为光滑的转折幂律曲线, 晚期光学发射完全消失, 这对 ^{56}Ni 产量给出了一个上限。0.3~10 keV 的 X 射线数据点也给出了类似的速度降特征。近红外光变曲线需要余辉之外的额外辐射来解释。

Tanvir 等人将 GRB 130603B 光学—近红外对应体的光变曲线分解为一个幂律下降的光学余辉成分与一个鼓包成分, 如图 6 所示。在图 6 中, Tanvir 等人给出了 GRB 130603B 的光学—近红外对应体 (左轴) 与 X 射线 (右轴) 余辉的光变曲线, 以及近红外超与理论模型的拟

合。上限为 2σ , 误差棒为 1σ 。g、r、i 波段的光学数据被内插到 F606W 波段, 近红外数据用约 0.6 d 的平均谱能分布外插到 F160W 波段。HST 第 1 阶段的点用黑体表示^[33]。

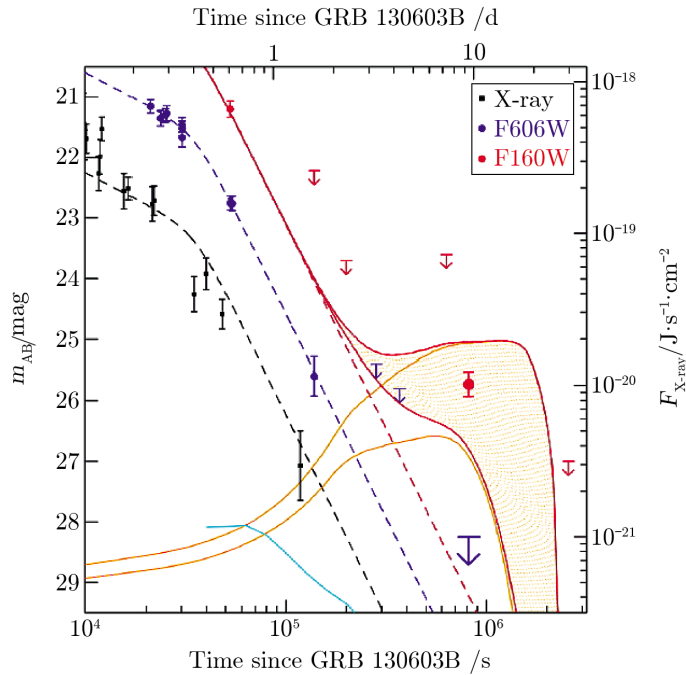


图 6 GRB 130603B 的光学-近红外对应体(左轴)与X射线(右轴)余辉的光变曲线及近红外超与理论模型的拟合^[33]

蓝色划线表示光学余辉光变曲线, 黑色点表示X射线数据点, 黑色线表示光学余辉重新标度之后与 X 射线数据点的拟合。红色划线表示近红外光变曲线。上下两条橙色线分别对应于 $M_{ej} = 10^{-1} M_{\odot}$ 与 $M_{ej} = 10^{-2} M_{\odot}$ 的 LP 新星(kilnova)所驱动的光变曲线, 观测到的红外超在这个范围内。蓝绿色线表明最亮的 LP 新星(kilnova)所能驱动的光学光变曲线。由图可见, 近红外波段的光变曲线可以分解为余辉与 LP 新星(kilnova)的贡献之和, LP 新星(kilnova)在光学波段的辐射可忽略不计。

Tanvir 等人认为, 这些观测表明存在一个与短暴伴随的 r 过程 LP 新星存在, 确认了短暴前身星来自致密星并合。由于推断出的值(或上限)约 $10^{-2} M_{\odot}$, 与中子星-中子星并合的数值模拟结果符合得很好, 他们认为这个 LP 新星事件源于中子星-中子星并合而不源于中子-黑洞双星并合。

Berger 等人^[32]也将近红外超解释为 LP 新星(“kilonova”)的贡献, 通过与 BK13 模型比较, 发现当喷射物质量 $M_{ej} \approx 0.03 \sim 0.08 M_{\odot}$, 速度 $v_{ej} \approx 0.1 \sim 0.3 c$ 时, 对应的 LP 新星可与残余的近红外绝对星等吻合。

Tanvir 等人与 Berger 等人的分析都表明, GRB 130603B 在爆发后, 伴随着 r 过程元素为主的喷射物, 而后者是致密星并合的必然产物, 因此, GRB 130603B 来自于致密星并合。即使不用 LP 新星模型解释红外超, 而假定余辉主导了探测到的源的光变曲线, 据此推断出的喷射物质量也能被提供一个上限^[32]。

为比较 BK13 模型与 F160W 观测, Berger 等人^[32]根据 BK13 模型内推并构造出一个喷

射物质量 M_{ej} 与喷射物速度 v_{ej} 的参数空间, 将模型与 WFC3/F160W 观测到的星等比较拟合, 可以得出, GRB 130603B 的近红外超必须用 $M_{ej} = 0.03 \sim 0.08 M_{\odot}$, $v_{ej} = 0.1 \sim 0.3 c$ 的 r 过程喷射物拟合。用 TH13 模型给出的结果与用 BK13 给出的结果类似, 都与中子星—中子星并合的数值模拟^[44, 45]的结果($M_{ej} \approx (0.5 \sim 5) \times 10^{-2} M_{\odot}$)吻合。因此 GRB 130603B 可能源于双中子星并合, 假如这个结果可靠, 那么将是短暴起源的第一个正面的、直接的、定量的检验。但由于缺乏光谱证据, 我们至今无法给出定论。

3.4 GRB 130603B 可能伴随的 LP 新星的进一步分析与讨论

从以上分析可以看出, 由于 GRB 130603B 的近红外对应体的峰值绝对星等 $M_J \approx -15.7$ AB mag, 可以很好地用 BK13 模型拟合, 但与 Grossman 等人的模型(GKRP14 模型)^[46]的典型值存在一些差异。GKRP14 模型的原子核加热率比较低, 因此产生的 LP 新星各个方向观测的平均亮度比 GRB 130603B 近红外对应体暗约 2 mag。由于伴随着伽玛暴的观测, 因此这个可能的 LP 新星的观测是“顶端观测”。这种情形下的观测亮度比平均情形下亮约 1 mag, 但依然比观测者暗约 1 mag, 这意味着实际上的 LP 新星在近红外波段的亮度可能普遍高于 GKRP14 模型的 1 mag (顶端观测)到 2 mag (非顶端观测); 这说明 GKRP14 模型依然有改进的可能性, 也说明其他的不确定性可能会提高 LP 新星的亮度上限。

GKRP14 认为, 这些不确定因素可能来自动力学喷射物质量的提高或电子丰度的提高。假如喷射物质量提高, 那么可能涉及到黑洞—中子星并合而不是中子星—中子星并合, 换言之, 根据 BK13 模型的拟合, GRB 130603B/近红外暂现源可能来自中子星—中子星并合; 但根据 GKRP14 模型, 近红外暂现源的亮度超出中子星—中子星并合后放射性物质能够提供的亮度的上限, 有可能来自黑洞—中子星并合。如果并合时被撕裂的中子星的质量特别小, 壳特别厚, 撕裂后抛出的喷射物的电子丰度可能比较高, 暂现源亮度可能因此而提高。

无论采用哪一种解释, 我们可以确定的是, 真实的 LP 新星的亮度可以比 GKRP14 模型给出的最大值亮 1 mag 以上, 这使得 GKRP14 模型预测的超低探测率不再成为问题, 对于将来的巡天观测, 意义非常重大。

Berger 等人^[32]将 GRB 130603B 的光学—近红外对应体星等与其他与伽玛暴成协的超新星(GB-SNe)以及 Ic、Ib 型超新星进行了比较, 我们将结果整理为表1。由表 1 可见, GRB 130603B 的光学—近红外对应体明显暗于 GB-SNe 以及普通的 Ic 型超新星, 虽然看似与 SN 2008D 的星等接近, 但因为 SN 2008D 辐射受到严重的红化($E(B - V) \approx 0.6$), 所以不能认为 GRB 130603B 的光学—近红外对应体的亮度可以与 SN 2008D 真实亮度相比。

但仅凭此还无法排除光学—近红外对应体为超新星的可能性, 因为暗的核坍缩型超新星的峰值绝对星等可以大于 -15 mag。我们只能说, 这个光学—近红外对应体暗于所有已发现的与伽玛暴成协的超新星和典型的 Ib/c 型超新星, 而不能说它暗于所有核坍缩型超新星。

能够为我们提供更有利证据的是辐射波段的分析: 核坍缩型超新星的辐射大部分集中于可见光波段, 少部分集中于紫外与近红外; 而 GRB 130603B 的光学—近红外对应体的辐射大部分集中于近红外, 其可见光亮度远低于核坍缩型超新星。这个比较意味着我们不能仅仅凭借热亮度来区分核坍缩型超新星与 LP 新星, 根据多波段亮度的分别对应比较可以解除亮

表 1 典型的 Ib/c 型超新星与可能伴随 GRB 130603B 的 LP 新星的绝对星等的比较

天体	种类	M_B/mag	M_J/mag	参考文献
GRB 130603 近红外对应体	LP 新星	—	约 -15	[32]
SN 1998bw	GRB-SN	约 -18.2	—	[47]
SN 2003lw	GRB-SN	—	约 -17.8	[48]
SN 2006aj	GRB-SN	约 -18.4	约 -17.9	[49, 50]
SN 2002ap	SN Ic	约 -16.5	约 -16.3	[51]
SN 2008D	SN Ib	约 -13.4	约 -15.6	[52]

的 LP 新星与暗的核坍缩型超新星在亮度上的“简并性”，而热亮度的比较无法有效破除这种亮度简并性。

除了比较亮度之外，我们还要考虑光变曲线分解方法的可靠性。利用光变曲线的鼓包判定非余辉成分为超新星光变曲线，曾经在 1998—2003 年之间作为确认长暴—超新星成协的主要手段之一^[53, 54]，然而，也有超新星之外的其他模型可以解释光变曲线的鼓包^[55, 56]，最终使长暴—超新星成协得到确认的依然是光谱分析。

对于 GRB 130603B，情况可能稍有不同。Berger 等人^[32]的观测表明，暴后 8.4 h，点源的 F606W 星等 m_{F606W} 与 F160W 星等 m_{F160W} 相差约 1.6 mag，9.4 d 后差值超过 1.9 mag 左右；说明红化变得更加严重，星等差异随时间变大与理论符合，这意味着这个红化可能来自点源自身辐射，而非尘埃等外在环境导致。因此，虽然没有光谱方面的证据，测光方面的观测与理论计算的吻合以及红化程度的变化也倾向于支持这是一个 r 过程元素驱动的 LP 新星的结论。但是，因为没有光谱方面的证据且测光数据过于稀少(仅有一个数据点)，我们还难以完全确定这是一个短暴—LP 新星成协事件，因此 GRB 130603B 光学—近红外对应体的红外超还无法被认为是 LP 新星存在的“Smoking-gun”级别的证据。只有在获得与理论符合的光谱的情形下，我们才能够给出定论。

如果 GRB 130603B 的光学—近红外对应体的近红外超确实源自 LP 新星，那么就首次直接证实至少有一部分甚至一大部分短暴源于致密星并合，直接证明致密星并合是 r 过程元素的主要来源之一，也首次证明 LP 新星理论的正确性。对于 GRB 130603B 的光学—近红外对应体的观测可以算得上探测此类事件的一个典范，对于它的研究，为将来的巡天观测指明了方向，具有里程碑式的意义。虽然我们尚未获得光谱上的证据，却依然在确认短暴起源、r 过程元素来源、LP 新星理论正确性以及中子星物态方程具体性质等方面踏出了一大步。随着光学—近红外巡天的蓬勃发展，将来的观测有望通过光变曲线与光谱的分析进一步确认这个结果，并获取众多获得光谱确认的“黄金事件”。

3.5 GRB 130603B 光学—近红外对应体与余辉观测对前身星系统及中子星物态方程的限制

GRB 130603B 的光学—近红外对应体的红外超的观测与研究推断出的喷射物质量对致密星并合种类以及中子星物态方程的限制有重要的意义。

数值模拟表明^[57], 对于中子星—中子星并合情形, 在状态方程较软时, 喷射物质量 $M_{ej} \approx 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2} M_{\odot}$; 在状态方程较硬时, $M_{ej} \approx 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} M_{\odot}$ 。如果并合后形成寿命 $t \gtrsim 10$ ms 的超大质量中子星, 则双星总质量越大, 喷射物质量越大; 如果并合后形成寿命 $t \lesssim 10$ ms 的超大质量中子星或者黑洞, 则双星总质量越大, 喷射物质量越小。对于黑洞—中子星并合, 假设黑洞与中子星质量比值在 3 ~ 7 之间, 黑洞自转参数 χ 为 0.75, 则在状态方程较软时, $M_{ej} \approx 5 \times 10^{-4} \sim 10^{-2} M_{\odot}$; 在状态方程较硬时, $M_{ej} \approx 4 \times 10^{-2} \sim 7 \times 10^{-2} M_{\odot}$ ^[57]。当 χ 为 0.5 时, M_{ej} 的值会下降。

Hotokezaka 等人^[57]对多种情形下的致密星并合进行数值模拟, 得到了一系列光变曲线, 与 GRB 130603B 的光学—近红外对应体亮度进行比较, 根据中子星—中子星与中子星—黑洞两种并合情形下各自可能的喷射物质量范围, 限定了两种并合情形时中子星的物态方程软硬。

根据 Hotokezaka 等人^[57]的计算与分析, 如果 GRB 130603B 的前身星为中子星—中子星, 由于喷射物质量大于 $0.02 M_{\odot}$ 左右, 因此要求中子星状态方程较软; 而对于硬的状态方程, 喷射物质量小于 $5 \times 10^{-3} M_{\odot}$ 左右, 显然与观测推断出的喷射物质量无法符合。

如果 GRB 130603B 的前身星为中子星—黑洞双星系统, 黑洞与中子星质量比在 3 ~ 7 之间, 黑洞无量纲自转值 $\chi = 0.5 \sim 0.75$, 那么: 如果中子星的状态方程较软, $M_{ej} \lesssim 10^{-2} M_{\odot}$, 因此可被排除; 如果中子星的状态方程较硬, M_{ej} 为 $10^{-2} M_{\odot}$ 量级, 因此符合观测推断值。

由以上分析可知, 中子星—中子星并合与中子星—黑洞并合都有可能制造出 GRB 130603B 的红外超辐射。如果 GRB 130603B 前身星为中子星—中子星系统, 则中子星物态方程较软; 如果 GRB 130603B 前身星为中子星—黑洞双星系统, 则中子星物态方程较硬。Hotokezaka 等人^[57]认为, 对前身星种类与中子星物态方程软硬的更严格限制需要借助引力波探测与研究, 这是未来多信使观测的一大任务。

但是, 结合 GRB 130603B 的多波段余辉尤其是 X 射线余辉的研究, 有可能进一步限定出前身星系统类型。Fong 等人^[35]与 Fan 等人^[34]分别独立地研究了 GRB 130603B 的早期 (小于 1000 s 左右) X 射线余辉, 都认为平缓衰减可能由磁星能量注入导致。因此, GRB 130603B 的前身星只能是中子星—中子星系统, 而不可能是中子星—黑洞系统, 因为后者并合后的中心致密天体只能是黑洞而不可能是磁星。

为了使大质量磁星寿命超过 1000 s 左右, 要求其物态方程较硬。因此, 结合以上研究, 我们可以推断出, GRB 130603B 的前身星系统并合后形成的超大质量磁星的状态方程较硬。

由于中子星—中子星并合之后形成的磁星并持续约 1000 s, 在磁星存活的时间内, 磁星风对 r 过程喷射物有一定的加速与加热作用, 使得喷射物加速并辐射出更多能量。采用 Yu 等人的模型 (YZG13 模型)^[58], Fan 等人^[34]拟合了 LP 新星的动力学演化和亮度演化, 假定喷射物质量 $M_{ej} \approx 0.02 M_{\odot}$ 、初速度 $v_{ej,i} = 0.2 c$, 磁星坍缩时标 (寿命) t'_{end} (即 YZG13 模型中的 t_{col}) 约 1000 s, 喷射物不透明度为 $\kappa \approx 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。这些喷射物最终被加速到 $0.36 c$, 因此具有的动能约为 10^{44} J ^[34]。

此外, Fan 等人^[34]推断, GRB 130603B 的前身星并合后形成的毫秒级磁星转动动能约

为 10^{45} J。结合推导出的相对论性喷流动能值 (约 10^{44} J) 与喷射物动能值 (约 10^{44} J), 他们认为磁星的大部分转动能以引力波形式损耗, 磁星的椭率 $\epsilon = 2(I_{xx} - I_{yy})/(I_{xx} + I_{yy})$ (I_{xx} 与 I_{yy} 为磁星主惯量) 满足下式^[34]:

$$\epsilon \approx 0.0034 \left(\frac{I}{10^{45.2} \text{ g} \cdot \text{cm}^2} \right)^{-1/2} \left(\frac{P_0}{1 \text{ ms}} \right)^2 \left(\frac{t'_{\text{end}}}{10^3 \text{ s}} \right)^{-1/2}. \quad (1)$$

如此巨大的椭率超过了一般中子星弹性四极形变的最大可能值, Fan 等人^[34] 给出了两个可能性: (1) 磁星不是一般的中子星而是结晶色超导 (crystalline color-superconducting) 夸克星; (2) 内部超强磁场 (大于 $10^{12} \sim 10^{13}$ T 左右) 诱导出巨大的扁长形变。中子星到夸克星的相变同时也是驱动伽玛暴的一个可能机制^[59-64], 因此这个由引力波耗散引发的一系列猜测是值得注意的, 将来的更多类似观测, 尤其是引力波探测器对致密星并合产生的引力波的直接观测, 有望对这些猜测进行直接验证。

4 GRB 060614 的光学—近红外对应体的研究

GRB 0606014 是一个很著名而特殊的长暴, 它不伴随超新星, 但却是长暴, 对于它的性质, 一直存在争议。最近, GRB 0606014 的近红外对应体的光变曲线也被证实存在一个不能用余辉解释的鼓包, 它也可以用 LP 新星解释^[65]。

4.1 GRB 060614 的瞬时辐射性质

2006 年 6 月 14 日 12:43:48 (UT), Swift-BAT 探测到 GRB 060614, 它的 $T_{90} \approx 102$ s, 峰值流强为 10^4 s^{-1} ($15 \sim 350 \text{ keV}$)^[66]。图 7 为 GRB 060614 在各能量区的光变曲线^[67]。从图中可以看出, GRB 060614 的光变曲线可以分为两部分, 前一部分为短暂的尖峰部分, 辐射较硬; 后一部分为持续时间很长的延展辐射部分, 辐射较软。

在 GRB 060614 触发 Swift-BAT 后 91 s, Swift-XRT 开始观测其视场, 在 BAT 确定的误差圆内发现了一个非常明亮的 X 射线暂现源; 在 GRB 060614 触发 Swift-BAT 后 102 s, Swift-UVOT 开始观测其视场, 发现了一个视星等约为 18.4 mag 的光学暂现源 (误差约为 0.5 mag)^[66]。

光谱分析表明 GRB 060614 的红移 $z = 0.125$ ^[68]。由于它的流量为 $2.17 \times 10^{-12} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$, 结合其红移值, 可得到其各向同性能量 $E_{\text{iso}} = 8.4 \times 10^{43} \text{ J}$, 远低于长暴各向同性能量的典型值 ($10^{45} \sim 10^{47}$ 量级)。

4.2 GRB 060614 的光学—近红外对应体的分析

对于如此近距离的长暴, 人们本期望可以发现伴随它的超新星, 但深入的观测却未发现亮于 -14 mag 的超新星与 GRB 060614 成协^[15] (见图 8), 即它的光学—近红外对应体中未发现超新星成分。

Fynbo 等人^[15] 将 GRB 060614 与 GRB 060505 都称为“无超新星的伽玛暴(SN-less GRBs)”, 它们的特征与坍缩星模型^[69] 的预测相矛盾。由于其起源尚未被确认, 因此可以称

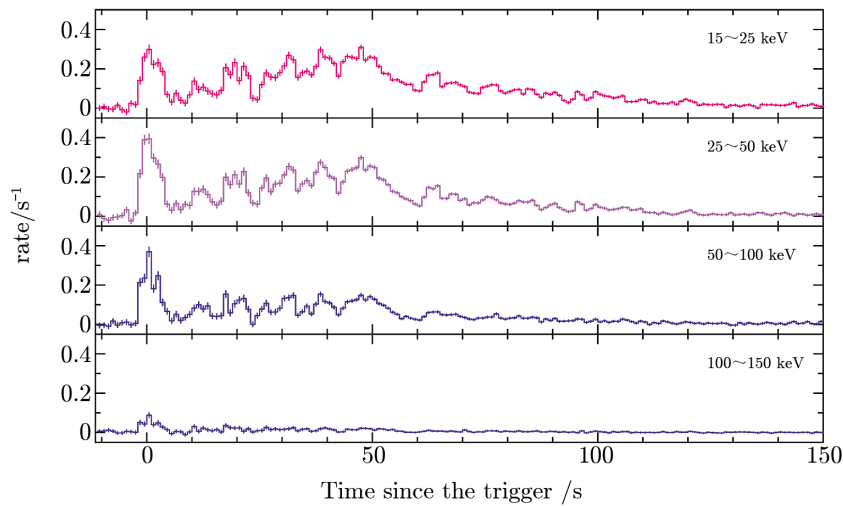


图 7 Swift-BAT 探测到的 GRB 060614 的光变曲线^[67]

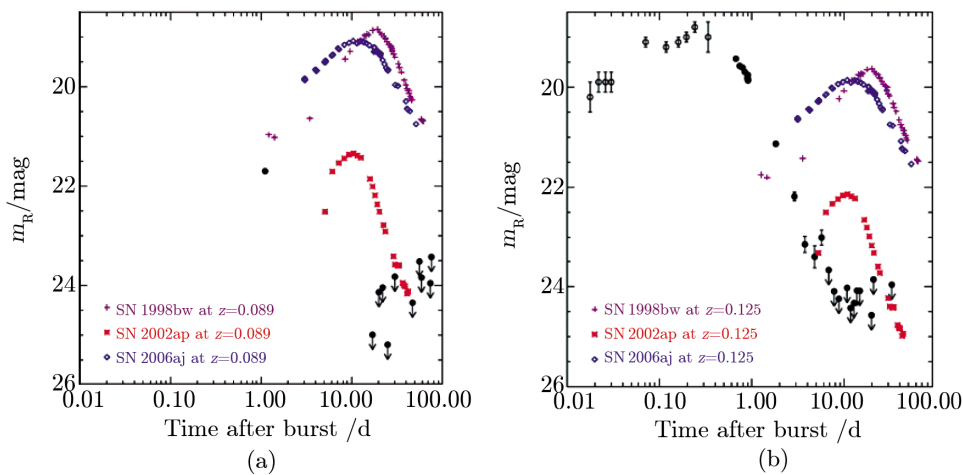


图 8 GRB 060505 (图(a))与 GRB 060614 (图(b))可能不伴随超新星^[15]

之为“长—短暴”(long-short burst)^[65], 对于此类事件的本质, 至少有 3 种完全不同的模型解释: 超新星爆发后喷射物大量回落^[15, 70, 71]、致密星并合^[72, 73]与中等质量黑洞撕裂类太阳恒星(针对 GRB 060614)^[74] ①。

4.3 GRB 060614 的光学—近红外对应体的 LP 新星解释

最近, Yang 等人^[65]重新研究了 GRB 060614 的光学—近红外对应体 3 个波段的光变曲线。他们发现: F814W 波段在暴后 13.6 d 比幂律光变曲线明亮, 很可能来自余辉之外的辐射; R 波段与 F606W 波段同一时期的亮度与幂律光变曲线很符合, 无亮度过剩(见图9)。

①中等质量黑洞撕裂模型不仅被用于解释不伴随超新星的伽玛暴, 也被 Shcherbakov 等人^[75]用以解释 GRB 060218/SN 2006aj。

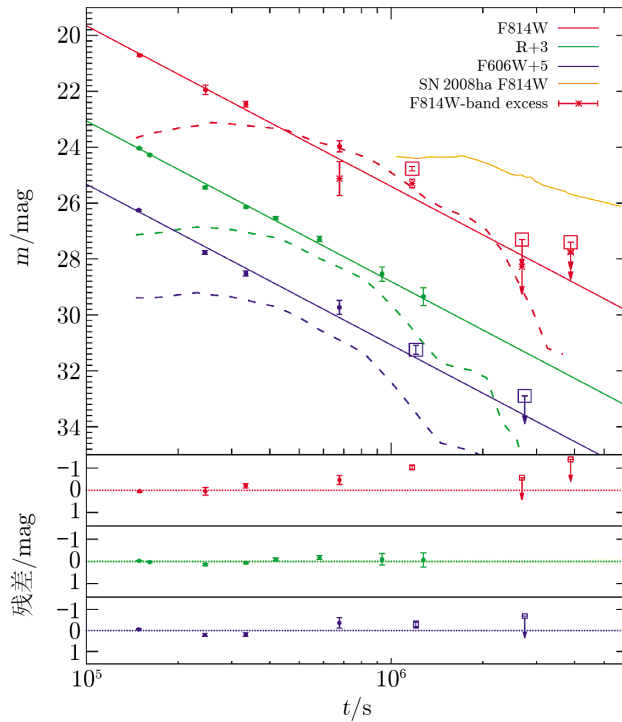


图 9 GRB 060614 的光学—近红外对应体在 3 个波段上的光变曲线^[65]

虚线分别为致密星并合后产生的 LP 新星的可能的光变曲线。F814W 波段的超出还可以从残差图中看出。数据分析表明, 红外超的置信度达到了 6σ ^[65]。

Yang 等人^[65]认为, F814W 波段的过剩可以用 LP 新星解释, 并推断出这个假想中的 LP 新星的质量与速度分别为: $M_{ej} = 0.13 M_{\odot} (L/10^{34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1})(t/13.6 \text{ d})^{1.3}$, $v = 0.1 c (L/10^{34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1})^{1/2} (T_{\text{eff}}/2000 \text{ K})^{-2} (t/13.6 \text{ d})^{-1}$ 。他们据此推断出, 喷射物质量约为 $0.1 M_{\odot}$, 喷射物速度约 $0.2 c$, 显著地大于超新星速度(超新星喷射物速度一般不超过 $0.07 c$); 他们推断出红外暂现源的晚期温度仅为 2000 K 左右, 显著低于超新星光球温度(超新星光球温度一般为 6000 K 以上)。Yang 等人^[65]还研究了 GRB 060614 的光学—近红外对应体在暴后 13.6 d 时的 F606W 星等与 F814W 星等之差, 并与几个比较典型的超新星在各时刻的星等差进行比较, 发现前者比后者大得多(如图 10), 因此具有不同起源, 即 GRB 060614 的光学—近红外对应体的鼓包很难用(暗)超新星解释, 从而更有利于 LP 新星的解释。

4.4 GRB 060614 的光学—近红外对应体的分析结果对前身星系统的限制

Yang 等人^[65]认为, 如果 GRB 060614 的光学—近红外对应体的亮度超出部分确实可以用 LP 新星解释, 那么就说明“长—短暴” GRB 060614 在本质上确实是短暴, 来自致密星并合, 而不是来自坍缩星。更进一步, 由于中子星—中子星并合产生的喷射物不超过 $0.1 M_{\odot}$, 而黑洞—中子星并合可以产生超过 $0.1 M_{\odot}$ 的喷射物, Yang 等人^[65]的分析得到的喷射物质量超过了 $0.1 M_{\odot}$, 因此, 他们认为, GRB 060614 可能来自于黑洞—中子星并合, 这样的系

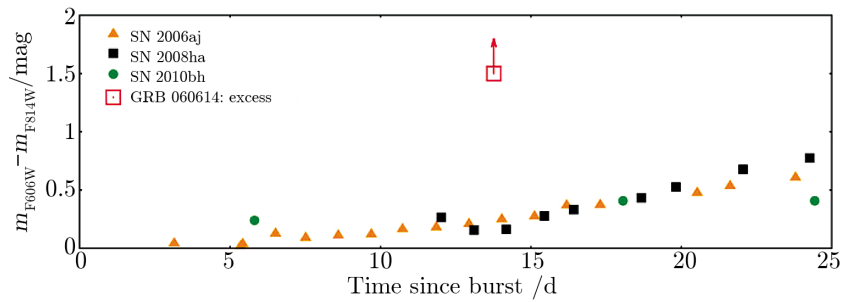


图 10 GRB 060614 的光学—近红外对应体在暴后 13.6 d 时的 F606W 星等与 F814W 星等之差^[65] 作为比较, 另外几个比较典型的超新星在各时刻的星等差也被标出。从中可见, GRB 060614 的光学—近红外对应体的星等差比超新星的星等差大得多, 因此与超新星有不同的起源。

统可以成为短暴甚至一些特殊长暴的前身星。但 Yang 等人^[65] 也指出, 他们的数值模拟忽略了放射性元素的裂变产能, 如果将这个产能考虑进去, 则需要的喷射物质量可能就只要 $0.03 \sim 0.05 M_{\odot}$, 因此中子星—中子星并合的起源无法排除。

显然, 考虑裂变提供的能量, 才是更合理的。由于裂变产能的比例未被作者们计算出来, 因此, 喷射物的真实质量无法确定, 前身星系统也因此无法限定到黑洞—中子星或中子星—中子星系统, 只能说可能起源于这两个系统之一。必须强调的是, 即使无法更具体判断出 GRB 060614 来自黑洞—中子星系统还是中子星—中子星系统, 仅判断出它有可能来自两者之一, 这个发现就已足够重要, 它说明一些长暴确实来自致密星并合。

5 GRB 080503 光学与 X 射线对应体晚期再增亮现象的研究

GRB 080503 也曾被认为是有望与 LP 新星成协的短暴, 对其光学对应体的研究大致上可以分为两个阶段: 第一个阶段是在其被发现(2008 年)后不久, 得到的是负面的结果^[76]; 第二个阶段在 2015 年, 得到的是比较正面的结果^[77]。看似矛盾的结果主要因为物理假设不同: 前者集中于放射性物质的衰变, 后者用到了磁星能量注入。

5.1 GRB 080503 的瞬时辐射性质

GRB 080503 于 2008 年 5 月 3 日 12:26:13 (UT) 被 Swift-BAT 探测到, 尖峰辐射的 $T_{90} = (0.32 \pm 0.07) \text{ s}$ ($15 \sim 150 \text{ keV}$), 经过约 10 s 后, 延展发射开始出现, 持续 200 s 以上, 整个瞬时辐射的 T_{90} 为 232 s, 从 5 s 到 140 s 测出的 GRB 080503 延展发射的流量为 $(1.86 \pm 0.14) \times 10^{-13} \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($15 \sim 150 \text{ keV}$), 与尖峰部分流量($15 \sim 150 \text{ keV}$)的比值约为 30。这个比值远超过一般的具有延迟发射的短暴的对应比值, 大部分情况下, 短暴的延展发射仅占总流量的 $5\% \sim 20\%$ ^[78]; 但 GRB 080503 的延展发射与尖峰发射的比例并不是最极端的, 因为 BATSE 时代的 GRB 931222 的延展发射流量是尖峰发射流量的 40 倍左右^[78]。因此, GRB 080503 既是一个典型的短暴, 又是一个带有延展发射(Extended emission)的短暴^[76]。GRB 080503 的光变曲线与 GRB 060614 的光变曲线存在一定的类似性^[79], 见图 11。

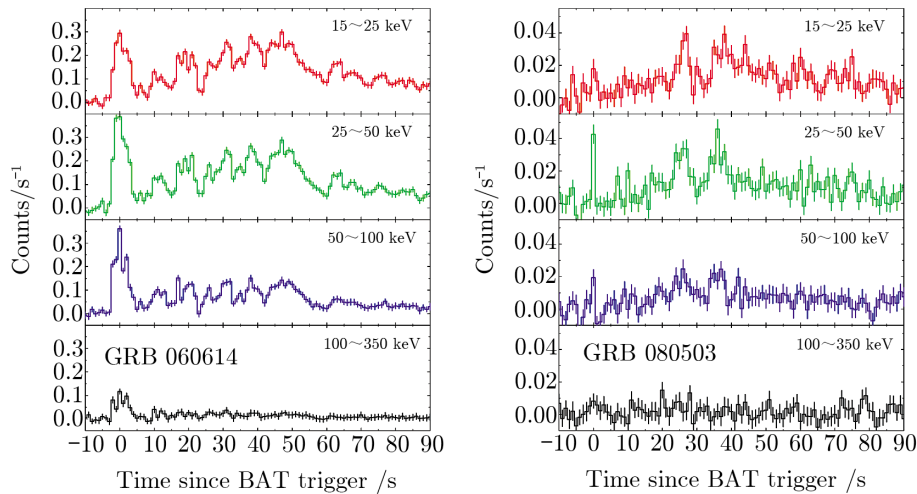


图 11 Swift-BAT 探测到 GRB 080503 与 GRB 060614 的光变曲线^[79]

5.2 GRB 080503 的光学对应体与 LP 新星成分的搜寻

Swift-UVOT 在 BAT 被触发 83 s 后开始观测 GRB 080503 视场, 各滤光片都未发现光学对应体。此后, Keck-I 望远镜, Gemini-N 望远镜与 HST 相继观测了 GRB 080503 的光学与近红外对应体, Chandra X 射线望远镜观测了 GRB 080503 的 X 射线对应体。

GRB 080503 的光学对应体的光变曲线在大约 1 d 后上升, 达到峰值后迅速降低^[76]。Perley 等人^[76] 采用两种模型, 用 LP 新星成解释光学对应体的再增亮, 第一个模型 (见图 12 中的实线) 假设红移 $z = 0.03$, ^{56}Ni 质量、喷射物总质量与物质外流速度分别约为 $2 \times 10^{-3} M_{\odot}$ 、 $0.4 M_{\odot}$ 与 $0.1 c$ 。第二个模型假设 (见图 12 中的点线) 红移 $z = 0.5$ 处的纯 ^{56}Ni 爆炸, 质量与喷射物速度分别约为 $0.3 M_{\odot}$ 与 $0.2 c$ 。这两个假设得到的光变曲线与观测大致符合。由于高红移模型要求的喷射物质量过高, Perley 等人^[76] 排除了高红移 ($z = 0.5$) 的可能性。

但根据 Chandra 的观测, 光学辐射的增亮可能只是由于余辉的非热辐射导致, 而非 LP 新星的贡献。理论上的分析也可以发现这个拟合并不可靠, 因为 LP 新星的能源并不以 ^{56}Ni 为主, 即使在 BK13 模型中, ^{56}Ni 质量的典型值也不超过 r 过程重元素质量的典型值。此外, LP 新星的辐射集中于红外区, 光学波段的辐射比较弱, 这些情况都是当时无法考虑到的, 所以得出的结果被 Chandra 的推论否决, 这与真实的模型相符。

5.3 磁星驱动喷射物辐射对 GRB 080503 的光学对应体光变曲线的解释

Gao 等人^[77] 重新分析了 GRB 080503 的光学对应体与 X 射线对应体, 采用 YGZ13 模型, 假定它爆发之后留下一个高速自转的磁星, 拟合了 GRB 080503 的光学对应体与 X 射线对应体的光变曲线。虽然 GRB 080503 的红移未知, 但因为其宿主星系很暗, 可以推断出其距离很大。Gao 等人^[77] 假定其红移 $z = 1$ 。在此基础上, 他们进行拟合。

Gao 等人^[77] 采用的参数如下: 磁星风中大约 30% 的能量被喷射物吸收, 磁星初始自转

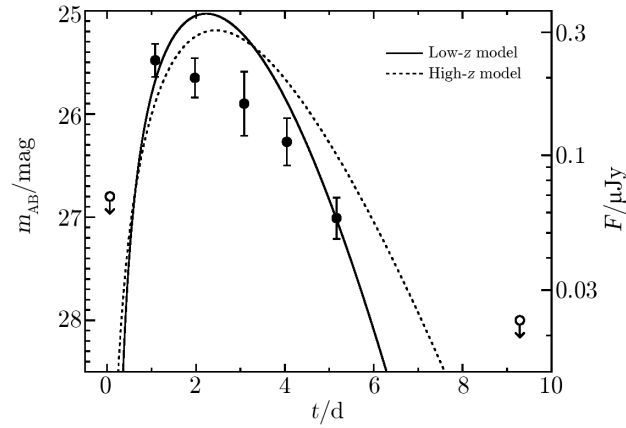


图 12 GRB 080503 的光学对应体再增亮成分与 LP 新星的拟合^[76]

这个拟合采用 ^{56}Ni 驱动 LP 新星模型, 采用两个假设的红移。实线表示红移 $z = 0.03$, ^{56}Ni 质量约 $2 \times 10^{-3} M_{\odot}$, 喷射物总质量约 $0.4 M_{\odot}$, 外流速度约 $0.1 c$ 。点线表示红移 $z = 0.5$ 处的纯 ^{56}Ni 驱动的光变曲线, 质量约 $0.3 M_{\odot}$, 速度约 $0.2 c$ 。北双子 r 波段观测与 HST 的 F606W 观测及上限也表示在图中。

周期、磁场、半径分别为 2 ms 、 $6 \times 10^{11} \text{ T}$ 与 $1.2 \times 10^6 \text{ cm}$; 喷射物不透明度、质量与初始速度分别为 $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $3 \times 10^{-3} M_{\odot}$ 与 $0.2 c$; 伽玛暴喷流各向同性动能、初始洛伦兹因子与喷流半张角分别为 10^{44} J 、200 与 0.1 rad ; 星周介质密度为 0.001 cm^{-3} ; 激波能量密度转化为磁能与电能的比例分别为 0.001 与 0.01; 电子能谱指数为 2.3。采用以上参数之后, 计算出的磁星加热喷射物辐射与余辉辐射的合成光变曲线与 GRB 080503 的光学对应体的光变曲线符合得很好; 与此同时, X 射线对应体的光变曲线也得到了很好的拟合, 如图 13 所示。

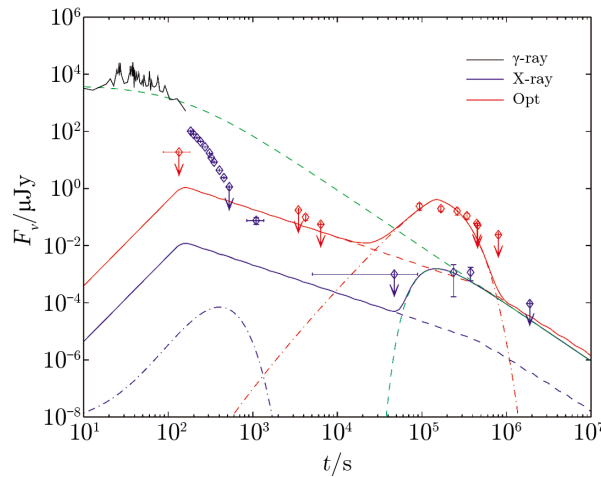


图 13 用 Merger-Nova 模型与余辉模型拟合 GRB 080503 的光学与 X 射线再增亮现象^[77]

灰色实线为 γ 波段的光变曲线; 蓝色与红色点分别为 X 射线波段与光学波段观测数据点(带箭头的表示亮度上限); 蓝色与红色点划线分别为 X 射线波段与光学波段的余辉; 蓝色与红色点线分别 Merger-Nova 贡献的 X 射线波段与光学波段的光变曲线; 蓝色与红色实线分别为 X 射线波段与光学波段的理论光变曲线, 它们为余辉与 Merger-Nova 光变曲线之和。绿色划线表示磁星 spin-down 功率输出随着时间的演化。

必须注意的是, 早期 X 射线辐射很可能来自磁星风直接耗散^[80], 而非来自磁星风加热后的喷射物, 也不来自喷流与星周介质相互作用产生的余辉, 因此 Gao 等人^[77] 不拟合这些早期 X 射线数据。根据这个拟合结果, 可以得到结论: “余辉+ Merger-Nova” 模型可以很好地解释 GRB 080503 光学/X 射线对应体的光变曲线。虽然它未必是唯一模型, 但却是至今为止最合理的模型。在这个模型中, 富含重元素的喷射物必然释放的放射性衰变与裂变能量被忽略。由于放射性重元素释放能量(驱动的是 LP 新星)的辐射主要集中于近红外波段, 在光学波段的贡献相对较小, 因此可以忽略, 这一点在 GRB 130603B 与 GRB 060614 的光学—近红外对应体的研究中也得到了体现: 它们都在近红外波段显著超出了余辉幂律光变曲线, 而在光学波段没有偏离余辉幂律光变曲线。

Gao 等人^[77] 对 GRB 080503 的光学与 X 射线再增亮现象的解释进一步支持了短暴源自致密星并合的模型。这个结果还表明, 一些短暴的前身星在并合之后并不立即形成黑洞, 而是形成大质量磁星。

6 未来的观测

6.1 未来的短暴—LP 新星成协的观测

研究短暴与 LP 新星成协有重要的意义, 证实它们成协, 不仅证实了 LP 新星理论的正确性, 也直接证实了至少一部分短暴源自致密星并合^①。假如短暴正对着地球, 未来的宽场浅光学巡天很有希望观测到近距离处伴随着短暴的较明亮的 LP 新星(假如确实存在的话), 从而验证 LP 新星与短暴成协。

由于 LP 新星的持续时间较短且光谱偏红/近红外, 因此可以比较容易区分出它们与低亮度超新星以及大质量恒星坍缩大量回落而形成的低亮度、短时间的超新星。对于一些无法确定起源的长暴, 证认其中伴随的光学—近红外成分中包含的是 LP 新星还是超新星, 可以作为判断其前身星的方案之一。

如果致密星并合产生短暴且喷流方向基本上正对地球, 那么短暴光学余辉(强烈依赖于周围介质的密度)污染对探测 LP 新星造成了比较大的障碍, 这一点与长暴—超新星成协的情形类似, 但由于短暴余辉普遍偏蓝, 而 LP 新星辐射普遍偏红外, 因此余辉污染的严重性会降低许多。

由于短暴的喷流角限制, 伴随短暴的 LP 新星探测比盲巡天探测率低, 但是根据 GKRP14 模型的三维模拟, 各个方向的观测亮度不同, 沿着短暴喷流方向(顶端观测方向)的观测亮度比沿其他视线的观测亮度高约 2 mag, 这是短暴—LP 新星成协观测的一大优点。其次, 与短暴成协的观测可以有效提高暂现源证认的可信度, 因为短暴自身可能就是致密星并合产物, 因此伴随的近红外源辐射来自 LP 新星的可能性也将得到很大提高。

GRB 130603B、GRB 060614 的近红外对应体与 GRB 080503 的光学对应体的探测, 为

^①就如我们在一些长暴的光学对应体中发现超新星成分, 证实至少一部分长暴源自大质量恒星坍缩。

未来的短暴—LP 新星或短暴—Merger-Novae 的探测提供了很好的典范。将来的多波段巡天观测尤其是光学—近红外宽场浅巡天有望发现此类成协现象，并将其从其他光学暂现源中分辨出来。虽然伴随短暴的 LP 新星的存在性至今尚未被完全确定，但将来启用的光学—近红外观测设备有望改变这个状况。今后的类似探测将致力于积累更大的样本及获取 LP 新星存在的光谱证据。

6.2 LP 新星光学—近红外盲巡天

致密星并合率与短暴观测率存在一定差异，这是因为：首先，致密星并合并不一定形成产生短暴所需要的吸积盘/环^[81, 82]；其次，观测表明至少一部分短暴与宇宙学长暴一样存在喷流拐折现象^[83-85]，喷流半张角 θ_j 不小于 7° 左右(对应的喷流修正因子不大于 100 左右)^[86]，由于喷流角的限制，即使致密星并合后形成短暴，大部分情况下，喷流也并不沿着视线方向，因此无法观测到短暴，而可能只观测到孤儿余辉、LP 新星与引力波暴，这类类似于一些伴随离轴长暴的宽线 Ic 型超新星^①。因此，短暴观测率比致密星并合率低得多。

LP 新星的观测不受以上限制，因为 LP 新星能源直接来自喷射物中的放射性重核的衰变与少量 ^{56}Ni 的衰变，不需要激波加速机制且辐射近似各向同性，只要有富中子喷射物喷发出来且膨胀速度不过快(过快碰撞会使高能 γ 光子在热化并软化为光学—近红外光子前就逃逸出来)，都有可能形成 LP 新星辐射，其辐射强弱取决于喷射物质量和膨胀速度；因此其观测率与致密星并合率相差不大，即使考虑到观测距离的限制，观测率也依然比短暴的观测率高。所以，不借助短暴定位，直接通过光学—近红外巡天观测致密星并合导致的 LP 新星是未来巡天观测的重要课题。Metzger 与 Berger^[2] 给出了余辉与 LP 新星的亮度对观测者与喷流之间的夹角的依赖性，见图 14，从中也可以看出，LP 新星受观测角的影响忽略不计。

由于短暴喷流修正因子约为 100，因此最近的离轴短暴距离约为最近的被观测到的短暴的距离的 $1/100^{1/3} \approx 1/5$ ，这对于 LP 新星的巡天观测与引力波的探测都具有重要意义，因为它们的探测距离都比较小，事件发生距离的缩短对于实现高置信度的探测有重要意义。

Metzger 与 Berger^[2] 研究了致密星并合后最有可能被探测到的暂现源，提出 4 个基本判据(“四德”，Four Cardinal Virtues)：(1) 可以被当前或者将来的望远镜探测到；(2) 伴随引力波事件；(3) 能被明确确认；(4) 位置可以在数角秒误差半径内被确定。根据这 4 个基本判据，他们认为 LP 新星被发现的可能性最大。

在 Met10 模型中，Palomar 暂现源工厂(the Palomar Transient Factory, PTF)^[87, 88] 每年可以发现大约 1 个 LP 新星，大口径全景巡天望远镜(The Large Synoptic Survey Telescope, LSST)^[89, 90] 每年可以发现约 1000 个 LP 新星。在 BK13 模型中，LP 新星辐射集中于近红外区，光学波段辐射被削弱，R 波段峰值星等 $M_R = -13$ mag，Pan-STARRS 与 PTF 探测的 R 波段峰极限视星等约为 21 mag，因此只能探测到约 60 Mpc，这个距离内的体积比引力波探测器 Advanced LIGO/VIRGO 能达到的探测体积小得多，因此光学巡天不是非常有效。

LSST 探测的 R 波段峰极限视星等约 24 mag，可以探测到约 250 Mpc 的 LP 新星的 R 波段辐射，使得光学巡天证认 LP 新星的概率降低，近红外巡天将是搜寻 LP 新星效率最高

^①至今尚未在观测上确认出有伴随离轴长暴的宽线 Ic 型超新星，也未确认出长暴与短暴的孤儿余辉。

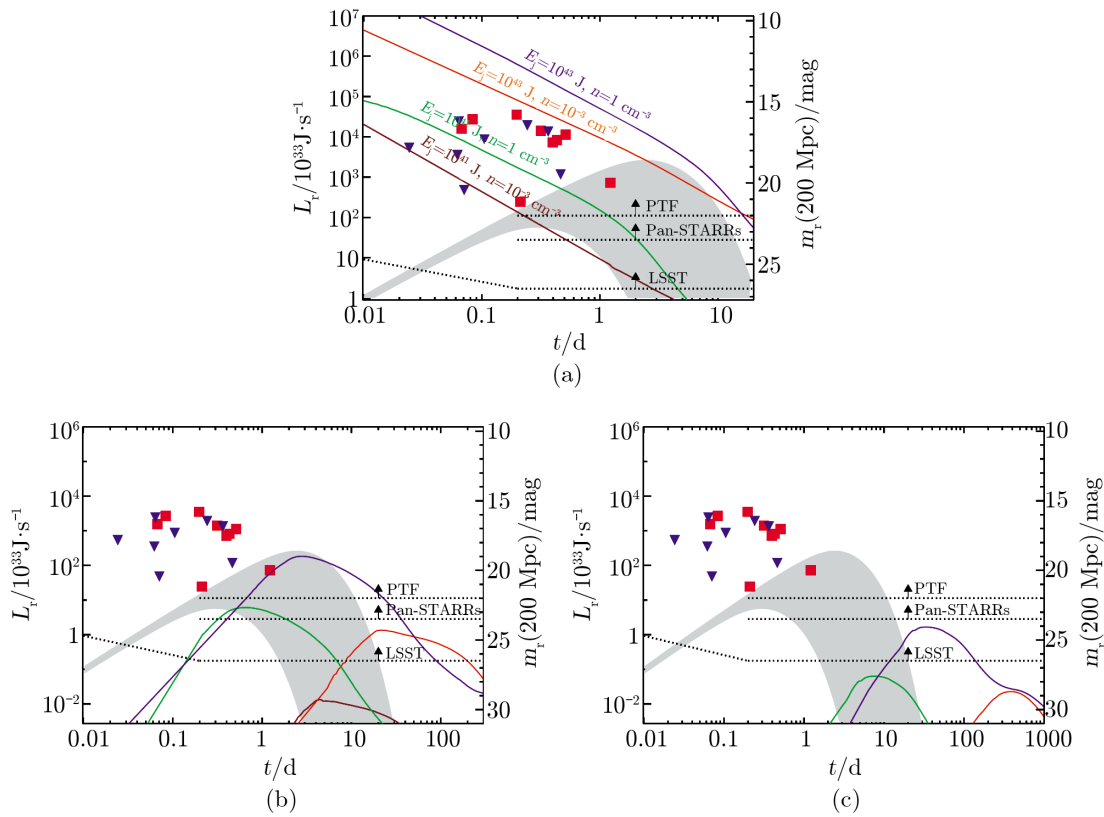


图 14 致密星并合可能后的伽玛暴余辉与 LP 新星观测限制^[2]

(a)在轴情形, $\theta_{\text{obs}} < \theta_j = 0.2$; (b)离轴情形, $\theta_{\text{obs}} \approx 2 \theta_j$; (c)高度离轴情形, $\theta_{\text{obs}} \approx 4 \theta_j$ 。LP 新星光变与亮度范围以灰色区域表示, 由于 LP 新星近于各向同性, 因此在 3 种情形下没有区别。但是随着观测角的增大, 余辉探测越来越困难, 当 $\theta_{\text{obs}} \approx 4 \theta_j$ 时, 当前与未来的望远镜都无法观测到余辉成分。

的。如果利用更蓝的滤光片如 U 波段与 B 波段滤光片, 探测则极为困难, 因为蓝端辐射受到的禁戒比 R 波段更严重。

由于红外波段辐射的峰值亮度亮于可见光波段约 1 mag 以上, 将来的地基与空间红外望远镜在探测 LP 新星时将更有优势。如宽场红外巡天望远镜(The Wide-Field Infrared Survey Telescope, WFIRST)^① 与 Euclid 红外卫星^②, 它们在 H 波段探测极限约 25 mag, BK13 模型给出的 H 波段峰值绝对星等为 $M_H \approx -15$ mag, 因此可以探测到约 1000 Mpc, 这个距离覆盖了 LIGO/VIRGO 对致密星并合产生的引力波的极限探测距离(小于 650 Mpc 左右)。

近年来, PS1 巡天发现了一些光变曲线快速上升并快速下降的明亮光学暂现源(我们简称其为“明亮光学快变源”)^[91]。Drout 等人^[91] 的研究表明, 这类现象很难用传统的

^①WFIRST是NASA计划发射的一个大空间望远镜, 其任务包括系外行星探测和暗能量探测以及星系巡天。
<http://wfirst.gsfc.nasa.gov/about/>。

^②Euclid卫星计划于 2020 年发射, 计划运行时间为 6 年, 望远镜口径为 1.2 m, 焦距为 24.5 m, 覆盖波长为 550~900 nm (可见光/近红外)与 920~2000 nm (近红外)。

^{56}Ni 驱动的超新星解释, 而可以用超新星前身星包层的冷却辐射机制解释。Yu 等人^[92] 认为, 这些明亮光学快变源中的一部分成员可能是双中子星并合后, 磁星风加热抛射物而产生的 Merger-Novae。如果它们中确实有一部分是 Merger-Novae, 就意味着, 未来的 LP 新星/Merger-Novae 的盲巡天观测结果是很乐观的。

6.3 跟随引力波的 LP 新星探测

引力波探测器 Advanced LIGO^[93] 与 Advanced VIRGO^[94, 95] 可以覆盖约 100 平方度的天区, 并可以探测到约 300~650 Mpc 远的 kHz 的引力波信号。

虽然 Advanced LIGO 与 Advanced Virgo 可能会达到每年探测约 40 个中子星—中子星并合的探测率, 但是引力波自身难于精确定位, 位置不确定度达到 10~100 平方度^[96]; 因此寻找对应的光学—近红外对应体对于引力波源的精确定位非常重要。伴随致密星并合产生的短暴/LP 新星/早期 X 射线余辉/喷射物与星周介质作用产生的多波段余辉等电磁波暂现源都是引力波定位的有力候选者。反之, 如果能够同时探测到引力波与以上的电磁波暂现源, 也可以确认这些电磁波暂现源的本质。在这些暂现源中, LP 新星因为其近似各向同性分布以及对星周介质没有依赖性, 且不受并合后瞬间中心致密星体种类影响等优点^①, 成为最有希望被发现的暂现源之一。

对于一个典型的中子星—中子星并合喷射物($M_{\text{ej}} \approx 10^{-2} M_{\odot}$), Advanced LIGO 探测到引力波的范围可到达 200 Mpc 左右, 爆发后第 7 天的光学 I 波段星等将达到约 23.5 ~ 24.5 mag, J 波段峰值将达到约 21.5 mag^[30], 这都在当前重要的巡天探测器探测极限之上。

由于短暴的探测率约为 $10 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$, 这意味着, 短暴发生率约为 $700 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$, 因此在 200 Mpc 内的短暴的发生率约为 $20 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[35]。

由于光学巡天仪器的探测能力足以保证在足够大距离内探测到 LP 新星, 我们唯一要关心的就是这些仪器的定位速度与精确度。2013 年 7 月, Fermi-GBM 探测到 GRB 130702A, 给出的误差圆面积约为 71 平方度, iPTF 首先精确确定了这个暴的光学对应体, 这为将来引力波光学对应体的精确定位树立了一个重要的里程碑^[98]; 因为引力波的不确定范围约为 10 ~ 100 平方度, iPTF 有能力在这个范围内迅速确定引力波对应的光学对应体。虽然 iPTF 的工作波段在光学波段, LP 新星在光学波段的星等较低, 存在时间较短, 衰减迅速, 但在 60 Mpc 左右的范围内, iPTF 依然可以在引力波探测器提供粗略位置之后, 迅速探测到 LP 新星的光学对应体的精确位置。

6.4 未来的伽玛暴卫星与光学—近红外巡天望远镜

LP 新星观测的 3 种方式 (跟随短暴, 跟随引力波, 盲巡天) 都需要强大的观测仪器作为基础。

至今获得 LP 新星存在的可能证据的 2 个事件是根据短暴的光学—近红外对应体的观测获得的, 因此将来对于短暴的探测依然是重点。Swift 与 Fermi 在未来数年依然可以高

^①LP 新星仅受到喷射物质量和速度的影响, 对于中心天体是磁星还是黑洞, 星周介质的高低都不敏感, 其他的电磁波暂现源有的要求喷射物质量极小, 有的要求星周介质密度足够高, 有的要求并合后的致密星为大质量磁星, 有的同时要求以上几点, 因此探测率低于/远低于 LP 新星。虽然如此, 这些暂现源被发现的频率仍然较大, 如 Wu 等人^[97] 将 PTF11agg 解释为磁星驱动的低质量喷射物与星周物质相互作用产生的余辉辐射。

效地探测到各类伽玛暴, 中法合作研制的天基多波段空间变源监视器^[99-101] (Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor, SVOM)可以对各种伽玛暴进行快速定位与观测。这3个卫星将是未来探测伽玛暴的主导仪器。由于Swift与SVOM可以提供快速精确的定位, 因此地面望远镜与HST在后继观测中依然会起到决定性作用。

LP新星的盲巡天需要各种宽场光学—近红外巡天望远镜的高效率运作。国外的宽场巡天望远镜有Catalina实时暂现源巡天^[102] (Catalina Real-time Transient Survey, CRTS)、全景式巡天望远镜和快速反应系统望远镜^[103] (Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System, Pan-STARRS1, PS1, 极限星等为24.6 mag, 视场面积为3平方度)、LSST、可见与红外巡天天文望远镜^[104] (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, VISTA, 世界上最大的红外望远镜, 极限星等为21.5 mag)、Subaru望远镜(极限星等为25 mag, 视场面积为1.5平方度)、PTF及作为其升级的Zwicky暂现源工厂^[105] (Zwicky transient factory, ZTF, 极限星等为21 mag, 视场面积为30平方度)等功能强大的光学—近红外巡天望远镜。

除了以上国外仪器之外, 中国南极天文中心(Chinese Center for Antarctic Astronomy, CCAA)^①正计划在南极冰穹A上安装的3台有效观测口径50 cm的大视场南极Schmidt巡天望远镜(three Antarctic Schmidt Telescopes, AST3)^[106-109]^②也将在未来参与到地基望远镜宽场巡天的观测竞争之中。此外, 由中国南极天文中心负责、美国与澳大利亚参与合作研究的口径更大的光学红外巡天望远镜“‘昆仑’暗宇宙巡天望远镜”(Kunlun Dark Universe Telescope, KDUST)^[110]也将安装于南极, 对暗物质、暗能量等进行探索; 由于它的工作波段在红外区, 因此对于光谱偏红外的LP新星的探测也将起到重要作用。AST3与KDUST可以利用极夜条件下连续数月的夜空观测以及极好的视宁度, 对一些暂现源进行持续多天甚至数月的观测, 对于获取高质量光变曲线和光谱具有重大的意义。

7 结 论

经过多年的努力, LP新星理论与观测都获得了重要的进展和突破, 可能伴随短暴的LP新星的重要参数得到了很好的限制。GRB 130603B与GRB 060614的光学—近红外对应体中近红外超被解释为LP新星贡献, 虽然尚未以光谱学的方法确认, 但却是首次获得LP新星存在的正面证据; 假如类似的事件在未来得到更可靠的证实, 就可以直接证实至少一部分短暴源自致密星并合。LP新星与短暴成协的最终证实将直接表明短暴源自致密性并合。

假如我们观测到有些短暴与典型的Ib/c型超新星成协, 那么就说明这些短暴源自大质量恒星坍缩。至今的观测尚未发现短暴与Ib/c型超新星成协, 但却发现了短暴与LP新星或

^①中国南极天文中心由紫金山天文台、南京天文光学技术研究所、国家海洋局中国极地研究中心、国家天文台共建, 上海天文台、高能物理研究所、北京大学、南京大学、中国科学技术大学、清华大学、天津师范大学、云南天文台以及美国、澳大利亚、日本等国家的天文机构和高校参与合作研究。

^②AST3的3台望远镜分别配有不同滤光片, 可对超新星、新星、LP新星、伽玛暴的光学余辉、太阳系内小天体等天体物理暂现源进行多波段观测。

者磁星驱动的 Merger-Nova 成协的迹象；这说明短暴源自大质量恒星爆发的可能性小到接近于零，来自致密星并合的可能性则很大。LP 新星的辐射主要集中于近红外，由放射性元素驱动；磁星风加热的喷射物则在光学波段有较显著辐射。将来的观测如果具有丰富的近红外数据，则有利于 LP 新星的证认；如果仅具有光学波段的数据，则有利于 Merger-Novae 的证认。两者在某种意义上互补。

在未来的观测中，国内外的伽玛暴探测卫星以及 CRTS、Pan-STARRS、LSST、VISTA、Subaru、PTF、ZTF、AST3 与 KDUST 等正在运行，或者即将运行的功能强大的光学—近红外巡天望远镜，将在未来数年内 LP 新星/Merger-Nova 盲巡天方面展开激烈的竞争和有效的合作，并取得重要突破。

除了传统的 γ 射线探测卫星之外，X 射线探测卫星也可以对致密星并合的电磁波对应体进行有效探测并引导后续观测。中国科学院国家天文台、高能物理研究所与上海微小卫星工程中心共同研发的小型科学探测卫星——Einstein 探测器(Einstein Probe, EP) 卫星^①，在将来的时域天文学和高能天体物理多个领域(黑洞、中子星、LP 新星、超新星激波突破、活动星系核、伽玛暴/XRFs、恒星冕活动等)的研究中都将起到重要作用，也将在探测 LP 新星/Merger-Novae 以及为引力波的精确定位和研究提供重要的信息。这些研究将有望逐步揭开短暴与 LP 新星的本质，并走进引力波时代。

必须特别提及的是，AST3 与 KDUST 因为拥有南极穹顶 A 独特而优越的观测条件(低温、光污染小，等等)，有能力独立进行盲巡天，发现 LP 新星，与国外的巡天望远镜展开有力的竞争。AST3 与 SVOM 协同观测将对短暴—LP 新星/Merger-Novae 成协的探测做出贡献。这些方式各异的探测将为我们进一步研究 LP 新星性质、短暴—LP 新星/Merger-Novae 成协以及引力波定位等方向提供有力的观测支持，也必将大大缩小中国的时域天文学与国际领先国家的差距。与国外先进的伽玛暴探测卫星和宽场巡天望远镜的竞争交流也必将大大加深我们对 LP 新星/Merger-Novae、伽玛暴及其多波段余辉、超新星以及其他被预测与未被预测的天体物理暂现现象的认识。

由于理论表明 LP 新星的辐射将主要集中于红外波段，对 GRB 130603B 与 GRB 060614 的观测也初步表明可能存在的 LP 新星辐射集中于红外区，这对于未来的宽场巡天光学望远镜的探测是一个挑战，我们必须寄希望于强大的地面望远镜的红外观测与未来的太空红外望远镜项目。如果致密星并合之后形成大质量磁星，则磁星风加热之后的喷射物会辐射出较强的光学辐射(Merger-Nova 辐射)，这又给未来的宽场巡天望远镜提供了很好的观测对象，GRB 080503 的光学对应体再增亮成分与 X 射线再增亮成分的 Merger-Nova 解释，支持了这个想法。但 Merger-Novae 要求前身星系统必须是双中子星且并合后形成的不是黑洞，而是大质量磁星，因此其产生率与探测率都将显著低于 LP 新星。

^①<http://hea.bao.ac.cn/ep/abstract.html>

参考文献:

- [1] 王善钦, 戴子高, 吴雪峰. 天文学进展, 2015, 33: 205
- [2] Metzger B D, Berger E. *ApJ*, 2012, 746: 48
- [3] Li L-X, Paczyński B. *ApJL*, 1998, 507: L59
- [4] Hjorth J, Sollerman J, Gorosabel J, et al. *ApJL*, 2005, 630: L117
- [5] Ofek E O, Cenko S B, Gal-Yam A, et al. *ApJ*, 2007, 662: 1129
- [6] Berger E, Cenko S B, Fox D B, et al. *ApJ*, 2009, 704: 877
- [7] Kocevski D, Thöne C C, Ramirez-Ruiz E, et al. *MNRAS*, 2010, 404: 963
- [8] Bersier D, Fruchter A, Rhoads J, et al. *GRB Coordinates Network*, 2005, 3521: 1
- [9] Palmer D, Cummings J, Stamatikos M, et al. *GRB Coordinates Network*, 2006, 5076: 1
- [10] Hullinger D, Barbier L, Barthelmy S, et al. *GRB Coordinates Network*, 2006, 5142: 1
- [11] Conciatore M L. *GRB Coordinates Network*, 2006, 5115: 1
- [12] Brown P J, Palmer D. *GRB Coordinates Network*, 2006, 5082: 1
- [13] Ofek E O, Cenko S B, Gal-Yam A, et al. *GRB Coordinates Network*, 2006, 5123: 1
- [14] Thöne C C, Fynbo J P U, Sollerman J, et al. *GRB Coordinates Network*, 2006, 5161: 1
- [15] Fynbo J P U, Watson D, Thöne C C, et al. *Nature*, 2006, 444: 1047
- [16] Kulkarni S. <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0510256v1.pdf>, arXiv:astro-ph/0510256, 2005
- [17] Thöne C C, Fynbo J P U, Östlin G, et al. *ApJ*, 2008, 676: 1151
- [18] Maeda K, Moriya T, Kawabata K, et al. *Mem. S.A.It.* 2012, 83: 264
- [19] Li W, Filippenko A V, Chornock R, et al. *PASP*, 2003, 115: 453
- [20] Foley R J. *Central Bureau Electronic Telegrams*, 2008, 1576: 2
- [21] Foley R J, Chornock R, Filippenko A V, et al. *AJ*, 2009, 138: 376
- [22] Foley R J, Brown P J, Rest A, et al. *ApJ*, 2010, 708: 61
- [23] Ziaeepour H, Barthelmy S D, Parsons A, et al. *GRB Coordinates Network*, 2007, 74: 1
- [24] Cucchiara A, Fox D B, Cenko S B, et al. *GRB Coordinates Network*, 2007, 6665: 1
- [25] Covino S, Piranomonte S, Vergani S D, et al. *GRB Coordinates Network*, 2007, 6666: 1
- [26] Bloom J S. *GRB Coordinates Network*, 2007, 6658: 1
- [27] Bloom J S, Butler N R. *GRB Coordinates Network*, 2007, 6661: 1
- [28] Kann D A, Klose S, Zhang B, et al. *ApJ*, 2011, 734: 96
- [29] Metzger B D, Martínez-Pinedo G, Darbha S, et al. *MNRAS*, 2010, 406: 2650
- [30] Barnes J, Kasen D. *ApJ*, 2013, 775: 18
- [31] Tanaka M, Hotokezaka K. *ApJ*, 2013, 775: 113
- [32] Berger E, Fong W, Chornock R. *ApJL*, 2013, 774: L23
- [33] Tanvir N R, Levan A J, Fruchter A S, et al. *Nature*, 2013b, 500: 547
- [34] Fan Y Z, Yu Y W, Xu D, et al. *ApJL*, 2013, 779: L25
- [35] Fong W, Berger E, Metzger B D, et al. *ApJ*, 2014, 780: 118
- [36] Melandri A, Baumgartner W H, Burrows D N, et al. *GRB Coordinates Network*, 2013, 14735: 1
- [37] Barthelmy S D, Baumgartner W H, Cummings J R, et al. *GRB Coordinates Network*, 2013, 14741: 1
- [38] Norris J, Gehrels N, Barthelmy S D, et al. *GRB Coordinates Network*, 2013, 14746: 1
- [39] Levan A J, Tanvir N R, Wiersema K, et al. *GRB Coordinates Network*, 2013, 14742: 1
- [40] Thöne C C, de Ugarte Postigo A, Gorosabel J, et al. *GRB Coordinates Network*, 2013, 14744: 1
- [41] Cucchiara A, Perley D A, Cenko S B. *GRB Coordinates Network*, 2013, 14748: 1
- [42] Cucchiara A, Prochaska J X, Perley D, et al. *ApJ*, 2013, 777: 94
- [43] Tanvir N R, Levan A J, Fruchter A S, et al. *GRB Coordinates Network*, 2013a, 14893: 1
- [44] Goriely S, Bauswein A, Janka H T. *ApJL*, 2011, 738: L32
- [45] Piran T, Nakar E, Rosswog S. *MNRAS*, 2013, 430: 2121
- [46] Grossman D, Korobkin O, Rosswog S, et al. *MNRAS*, 2014, 439: 757
- [47] Galama T J, Vreeswijk P M, van Paradijs J, et al. *Nature*, 1998, 395: 670

- [48] Gal-Yam A, Moon D S, Fox D B, et al. *ApJL*, 2004, 609: L59
- [49] Ferrero P, Kann D A, Zeh A, et al. *A&A*, 2006, 457: 857
- [50] Kocevski D, Modjaz M, Bloom J S, et al. *ApJ*, 2007, 663: 1180
- [51] Yoshii Y, Tomita H, Kobayashi Y, et al. *ApJ*, 2003, 592: 467
- [52] Soderberg A M, Berger E, Page K L, et al. *Nature*, 2008, 453: 469
- [53] Bloom J S, Kulkarni S R, Djorgovski S G, et al. *Nature*, 1999, 401: 453
- [54] Zeh A, Klose S, Hartmann D H. *ApJ*, 2004, 609: 952
- [55] Esin A A, Blandford R. *ApJL*, 2000, 534: L151
- [56] Waxman E, Draine B T. *ApJ*, 2000, 537: 796
- [57] Hotokezaka K, Kyutoku K, Tanaka M, et al. *ApJL*, 2013, 778: L16
- [58] Yu Y W, Gao H, Zhang B. *ApJL*, 2013, 776: L40
- [59] Haensel P, Paczyński B, Amsterdaamski P. *ApJ*, 1991, 375: 209
- [60] Cheng K S, Dai Z G. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 77: 1210
- [61] Dai Z G, Lu T. *Phys. Rev. Lett.*, 1998b, 81: 4301
- [62] Wang X Y, Dai Z G, Lu T, et al. *A&A*, 2000, 357: 543
- [63] Paczyński B, Haensel P. *MNRAS*, 2005, 362: 4
- [64] Chen A B, Yu T H, Xu R X. *ApJL*, 2007, 668: L55
- [65] Yang B, Jin Z P, Li X, et al. *Nature communication*, 2015, 6: 7323
- [66] Parsons A M, Cummings J R, Gehrels N, et al. *GRB Coordinates Network*, 2006, 5252: 1
- [67] Mangano V, Holland S T, Malesani D, et al. *A&A*, 2007, 470: 105
- [68] Price P A, Berger E, Fox D B. *GRB Coordinates Network*, 2006, 5275: 1
- [69] MacFadyen A I, Woosley S E. *ApJ*, 1999, 524: 262
- [70] Della Valle M, Chincarini G, Panagia N, et al. *Nature*, 2006, 444: 1050
- [71] Gal-Yam A, Fox D B, Price P A, et al. *Nature*, 2006, 444: 1053
- [72] Zhang B. *Nature*, 2006, 444: 1010
- [73] Gehrels N, Norris J P, Barthelmy S D, et al. *Nature*, 2006, 444: 1044
- [74] Lu Y, Huang Y F, Zhang S N. *ApJ*, 2008, 684: 1330
- [75] Shcherbakov R V, Pe'er A, Reynolds C S, et al. *ApJ*, 2013, 769: 85
- [76] Perley D A, Metzger B D, Granot J, et al. *ApJ*, 2009, 696: 1871
- [77] Gao H, Ding X, Wu X F, et al. *ApJ*, Accepted, <http://arxiv.org/pdf/1506.0681v1.pdf>, arXiv:1506.0681, 2015
- [78] Norris J P, Bonnell J T. *ApJ*, 2006, 643: 266
- [79] Xu D, Starling R L C, Fynbo J P U, et al. *ApJ*, 2009, 696: 971
- [80] Zhang B. *ApJL*, 2013, 763: L22
- [81] Janka H T, Ruffert M. *ASPC*, 2002, 263: 333
- [82] Rosswog S, Speith R, Wynn G A. *MNRAS*, 2004, 351: 1121
- [83] Burrows D N, Grupe D, Capalbi M, et al. *ApJ*, 2006, 653: 468
- [84] Racusin J L, Liang E W, Burrows D N, et al. *ApJ*, 2009, 698: 43
- [85] De Pasquale M, Schady P, Kuin N P M, et al. *ApJL*, 2010, 709: L146
- [86] Fong W, Berger E, Margutti R, et al. *ApJ*, 2012, 756: 189
- [87] Law N M, Kulkarni S R, Dekany R G, et al. *PASP*, 2009, 121: 1395
- [88] Rau A, Kulkarni S R, Law N M, et al. *PASP*, 2009, 121: 1334
- [89] Ivezic Z, Tyson J A, Abel B, et al. <http://arxiv.org/pdf/0805.2366v4.pdf>, arXiv:astro-ph/0805.2366, 2008
- [90] LSST Science Collaborations. <http://arxiv.org/pdf/0912.0201v1.pdf>, arXiv:astro-ph/0912.0201, 2009
- [91] Drout M R, Chornock R, Soderberg A M, et al. *ApJ*, 2014, 794: 23
- [92] Yu Y W, Li S Z, Dai Z G. *ApJL*, 2015, 806: 6
- [93] Abbott B P, Abbott R, Adhikari R, et al. *Reports on Progress in Physics*, 2009, 72: 076901
- [94] Acernese F, Alshourbagy M, Amico P, et al. *Classical and Quantum Gravity*, 2008, 25: 114045
- [95] Accadia T, Acernese F, Antonucci F, et al. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28: 114002

- [96] Fairhurst S. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28: 105021
- [97] Wu X F, Gao H, Ding X, et al. *ApJL*, 2014, 781: L10
- [98] Singer L P, Cenko S B, Kasliwal M M, et al. *ApJL*, 2013, 776: L34
- [99] Gotz D, Paul J, Basa S, et al. *AIPC*, 2009, 1133: 25
- [100] Schanne S, Paul J, Wei J, et al. Proc. of the conference “The Extreme sky: Sampling the Universe above 10 keV”, Otranto (Lecce) Italy (accepted for publication by PoS) October 13-17, 2009
- [101] Paul J, Wei J, Basa S, et al. *Comptes Rendus Physique* “GRB studies in the SVOM era”, F. Daigne, G. Dubus, Eds. 2011, 12: 298
- [102] Drake A J, Djorgovski S G, Mahabal A, et al. *ApJ*, 2009, 696: 870
- [103] Kaiser N, Burgett W, Chambers K, et al. In: *Ground-based and Airborne Telescopes III*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 2010, 77330E: 1
- [104] Emerson J, McPherson A, Sutherland W. *The Messenger*, 2006, 126: 41
- [105] Kulkarni S R. <http://arxiv.org/pdf/1202.2381v1.pdf>, arXiv:astro-ph/1202.2381, 2012
- [106] Cui X Q, Yuan X Y, Gong X F. *SPIE*, 2008, 70122D: 1
- [107] Yuan X Y, Cui X Q, Gong X F, et al. *SPIE*, 2010, 77331V: 1
- [108] Wen H K, Gong X F, Zhang R. *SPIE*, 2012, 84445F: 1
- [109] Li X Y, Wang D X, Xu L Z, et al. *SPIE*, 2012, 84445M: 1
- [110] Zhao G B, Zhan H, Wang L F, et al. *PASP*, 2011, 123: 725

Research Developments in Li-Paczyński Novae (II): Observational Aspect

WANG Shan-qin^{1,2}, DAI Zi-gao^{1,2}, WU Xue-feng^{3,4,5}

(1. School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics, Ministry of Education, Nanjing 210093, China; 3. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008, China; 4. Chinese Center for Antarctic Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008, China; 5. Joint Center for Particle Nuclear Physics and Cosmology of Purple Mountain Observatory-Nanjing University, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: After the LP-Nova models have been proposed and short gamma-ray burst (SGRB) afterglows have been discovered, dedicated searches for LP-Novae from SGRB optical (and near-infrared) afterglows have been actively carried on. In this paper, we summarize these observational progresses until 2012 in the first part. In the second part, we conclude the basic properties of GRBs 130603B and 060614 as well as the theoretical interpretations for their optical - near infrared counterparts whose near infrared excess can be indicative of the signatures of LP-Novae. In the third part, we conclude the basic properties of GRB 080503 and the theoretical interpretations for its optical and X-ray counterparts whose lightcurves can be decomposed into two components originated from afterglow emission and the ejecta heated by a magnetar leaved after double neutron star merger, the latter is nicknamed

“Merger-Nova”. If the interpretations for the SGRB-associated optical–infrared counterparts are correct, they may provide the first direct evidences showing that short bursts are from compact star mergers and some special long bursts are also from compact star mergers. Besides LP-Novae (and Merger-Novae), the high speed orbital motions of the compact binary just before the merger as well as the merger itself can produce strong Gravitational-Wave Bursts (GWBs). As the era of gravitational wave detection comes soon, the theoretical studies and observational searches of the electromagnetic counterparts of neutron star - neutron star or neutron star- black hole mergers have received more attentions. Since the gravitational wave positioning has larger uncertainty, observation of the associated LP-Novae can be the best way to precisely locate the GWB. The fast-developing high-cadence wide-field optical - near infrared surveys will explore transients such as LP-Novae efficiently, and mutually promote gravitational wave detections and studies. Therefore, in the last part we present the methods for future searches of LP-Novae, and the prospect of the multi-messenger detections.

Key words: gamma-ray bursts; Li-Paczyński novae; r-process; magnetars; black holes