

文章编号: 1000-8349(2008)01-0041-21



Swift 时代伽马暴的观测及研究进展

董云明^{1,2}, 陆 焱²

(1. 四川师范大学 物理与电子工程学院, 成都 610066; 2. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008)

摘要: Swift 卫星从 2004 年 11 月 20 日升空开始运转到现在已有 2 年多时间。到目前为止, 它一共观测到了 200 多个伽马暴及其余辉现象。由于 Swift 观测到了早期 X 射线余辉、短暴余辉和高红移伽马暴等新的重要现象, 伽马暴研究进入了新的时代。该文首先对伽马暴的研究历史做简短回顾, 然后简要介绍伽马暴的物理图像和 Swift 卫星的构成及特点, 最后全面评述 Swift 的观测成就及由此引起的理论挑战。

关键词: 天体物理学; 伽马暴; Swift 卫星; 余辉

中图分类号: P172.3

文献标识码: A

1 研究历史

伽马暴 (Gamma-Ray Burst, GRB) 是一种短时标的高能伽马射线爆发现象, 具有高能、强爆发和瞬时等特征, 是自宇宙大爆炸以来人们所能观测到的宇宙中的最强烈的恒星级爆发现象^[1]。该现象在 20 世纪 60 年代首次被美国的 Vela 卫星在监测前苏联核试验时偶然观测到, 并在 1973 年被 Klebesadel 等人^[2] 公布在美国《天体物理杂志快讯》上。随后, 该现象被美国的 IMP-6 卫星和前苏联的 GGS-wind 太空船上的仪器 Konus 所证实^[3,4]。很多其他的探测器 (PVO、HEAO1、HEAO3、SMM、ICE、GINGA) 之后都探测到了伽马暴现象^[5]。

天体物理的研究和突破与新型的探测仪器的使用紧密相关。按照伽马暴观测卫星的不同, 伽马暴研究可以分为 4 个阶段, 这 4 个阶段对应于伽马暴理论研究的不同发展时代。第一阶段是从伽马暴的发现到 1991 年康普顿卫星 (CGRO) 上天以前。这段时间观测到的伽马暴事例较少, 理论上倾向于伽马暴起源于银河系内中子星的模型, 坚持宇宙学起源的理

收稿日期: 2007-05-05; **修回日期:** 2007-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10473023); 四川省教育厅资助科研项目; 中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金资助; 江苏省博士后科研资助计划项目

论学家很少^[6-8]。该时期伽马暴的研究没有大的进展和突破,可以称为伽马暴研究上的“黑暗时期”^[9]。

第二阶段是从康普顿卫星 (CGRO) 上天到意大利-荷兰的 BeppoSAX 卫星上天发现余辉之前,时间为 1991—1997 年,该阶段伽马暴的研究集中在瞬时辐射阶段,是伽马暴研究的“黎明时期”。该时期天文学家取得了一些反映伽马暴物理本质的结果,例如:伽马暴的能谱为非热分段幂律连续谱,可用 Band 函数拟合^[10,11];伽马暴按照持续时间可以分为长暴和短暴,长暴和短暴性质有很多不同^[12-21];伽马暴在空间分布均匀而径向分布不均匀,表明伽马暴不可能是起源于银河系的源,而极有可能是起源于宇宙学距离上^[22-28];提出了火球内外激波模型,为伽马暴的标准模型奠定了基础,并且预言了余辉的存在。

第三阶段是从余辉发现到 Swift 卫星上天之前,时间为 1997—2004 年 11 月之后。该阶段伽马暴研究进入了余辉研究时期和伽马暴理论快速发展时期。该阶段完成了伽马暴的标准余辉理论模型以及后标准效应,同时还推断出伽马暴具有喷流结构,开始了伽马暴宇宙学的相关研究等^[29-83]。该时期伽马暴理论取得巨大成功,外激波的同步辐射模型很好地解释了当时观测到的余辉现象。第三阶段是伽马暴发展的关键时期,是伽马暴理论的创建时代,特别是标准化模型和后标准效应的发现和建立。

第四阶段是 Swift 卫星上天后至今。Swift 卫星发现了新的早期余辉现象,因此伽马暴研究进入了早期余辉的研究时期^[84-86]。同期,Swift 观测到了红移等于 6.29 的高红移伽马暴^[87]以及短暴(持续时标短于 2 s)的早期余辉^[88],这些观测揭开了利用伽马暴对早期宇宙的研究以及利用余辉对短暴进行研究的序幕。第四阶段是第三阶段伽马暴研究的延续,是对标准化模型和后标准效应的重要补充和发展,早期余辉、短暴余辉实质上是后标准效应的补充,而闪耀和耀发现象则是能量持续注入效应的重要补充。尽管该时期发现了很多现在无法理解和预测的新的观测现象,但随着对这些新现象的不断研究,伽马暴的神秘面纱将会被人类最终揭开。

2 伽马暴基本物理图像

按照目前的理解,伽马暴是由恒星量级的致密中心天体毁灭性的灾变过程产生出来的极其强烈的爆发现象。原因是:已经观测到的伽马暴的光变时标 (δt) 是毫秒量级,典型值为 10 ms^[89]。由毫秒量级的光变时标可估算爆发源的尺度为: $R \simeq c\delta t \simeq 3 \times 10^8$ cm, 这么小的尺度,说明爆发源只能是恒星层次上的天体,并且应该是致密星层次上的天体。而伽马暴各向同性释放的能量为 $E_{\gamma,iso} = 4\pi D_L^2 S_{\gamma}/(1+z)$, 计算能量约为 10^{46} J^[90] 左右。这么高的能量从恒星量级的天体释放出来只能理解为灾变过程,表明不可能是普通的天体物理过程。

现在认为有两种基本过程可以产生伽马暴如此高的能量,一个是大质量星的坍缩^[91,92],一个是双致密星的并合^[93,94],前者通常对应长暴,后者对应短暴。不论是坍缩还是并合,中心最后一般都会形成若干太阳质量大小的黑洞加吸积盘系统^[85,95]。

如此巨大的辐射能量产生在如此狭小的空间,必然产生“球”^[96]。由于火球的辐射压远大于自引力,因此火球要向外以相对论速度膨胀^[97-99]。另外由于我们观测到的伽马光子能谱是非热谱,并且观测到的大部分的伽马光子能量大于 0.5 MeV,部分伽马光子

能量达到 1 GeV, 而双光子湮灭为正负电子对的能量为 0.511 MeV^[94]。为了避免电子对湮灭现象而能辐射出我们观测到的极高能伽马光子, 火球或者喷出物也必须以相对论速度运动。根据不同的计算和推测, 现在可以定量地计算出伽马暴火球的洛仑兹因子大于 100^[85,95,100-102]。

假定中心能源的能量释放不是一次性的, 而是间歇性的, 所形成的伽马暴火球物质在径向上将形成速度不同的许多物质壳层。当火球向外作相对论的高速膨胀运动, 由于不同壳层的速度不同, 后面速度快的将追上前面速度慢的, 从而发生碰撞产生内激波, 这就是内激波模型^[103-105]。我们观测到的伽马暴瞬时辐射就是由内激波产生的。内激波的辐射机制一般认为是同步辐射或者是同步辐射加逆康普顿辐射, 也有可能是多种辐射并存, 到目前为止, 该问题还没有定论。利用内激波模型可以很好地模拟观测到的伽马暴光变曲线^[105]。

当伽马暴的瞬时辐射结束后, 残留下来的火球物质以相对论速度在星周介质中继续膨胀运动不断扫过外部介质时也会产生激波, 这就是外激波^[106-108]。伽马暴的余辉就是外激波产生的。外激波系统可以分为 4 个区域 (见图 1)。没有受到激波影响的外部介质 (用 1 表示), 被激波化的外部介质 (用 2 表示), 两者以正向激波 (用 FS 表示) 分界; 受到激波影响的相对论流体 (用 3 表示), 它和 2 区具有同样的速度和压强, 但两者密度不同, 由接触不连续面 CD 分界; 未受激波影响的相对论流体 (用 4 表示) 和 3 区之间由反向激波 (RS) 分界。

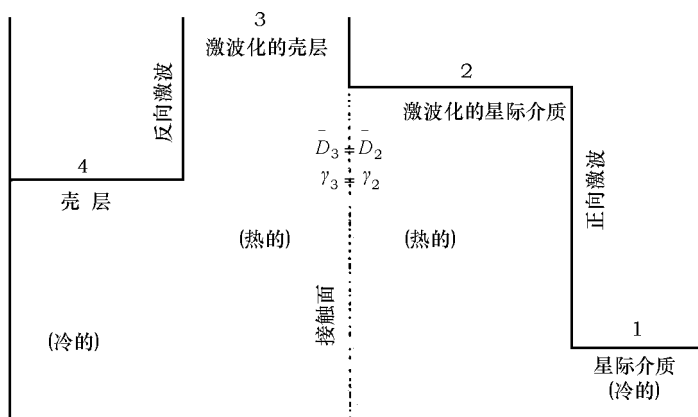


图 1 火球物质与外界介质形成的激波示意图^[109]

外激波产生后, 由于外部介质的作用使外激波的速度逐渐降低, 这样外激波就会经历从相对论运动到非相对论运动的过程^[110], 该过程的动力学方程可描述为^[52]:

$$\frac{d\gamma}{dm} = -\frac{\gamma^2 - 1}{M_{ej} + \epsilon m + 2(1 - \epsilon)\gamma m}, \quad (1)$$

这里 ϵ 为辐射效率 (辐射出去的能量占被外激波产生的内能的比率), M_{ej} 为火球初始抛射出来的物质静止质量, m 为扫过的外部介质质量。

当外激波发生后, 激波内的非热电子的同步辐射就会产生我们观测到的余辉能谱和光变曲线^[34], 具体详细的推导可见参考文献^[34,36,111]。

伽马暴周围的介质情况千变万化, 尽管如此, 在理论研究上研究最多的是下面两种情

况：一种是均匀的星际介质，该情况下产生的余辉理论称为余辉标准模型^[34]，而另外一种则是星风环境，是由戴子高等人^[42]最先发现并提出的。与余辉标准模型不同的余辉理论一般统称为后标准效应。在余辉的标准模型中，一般假定冲击波是球形的，但后来的观测证据（个别伽马暴各向同性能量太高，很多光学余辉中光变曲线在暴后 0.5~5 d 有明显拐折变陡现象等）却显示冲击波是喷流而非球形，这样又产生了伽马暴的喷流模型，详细的论述见参考文献^[95, 102]。但是，由于 Swift 并没有观测到大量的暴在 X 波段存在喷流的拐折变陡现象，因此，伽马暴的喷流存在与否在 Swift 时代已经成为一个有争议的话题，有关该方面的研究情况在后文将详细阐述。按照目前对伽马暴的认识，伽马暴以及余辉产生的整体物理图像为（见图 2）：在宇宙学距离上的某类恒星级天体由于演化到生命晚期或者与其他星体的相互作用，释放出巨大的能量，产生了相对论膨胀运动的火球（可能以相对论运动的喷流的形式存在），火球向外运动过程中由于内激波产生我们观测到的伽马暴现象，然后高速运动的火球物质与外部介质发生相互作用形成外激波，产生我们观测到的余辉现象。有关伽马暴的综述可以参看文献^[95, 102]。

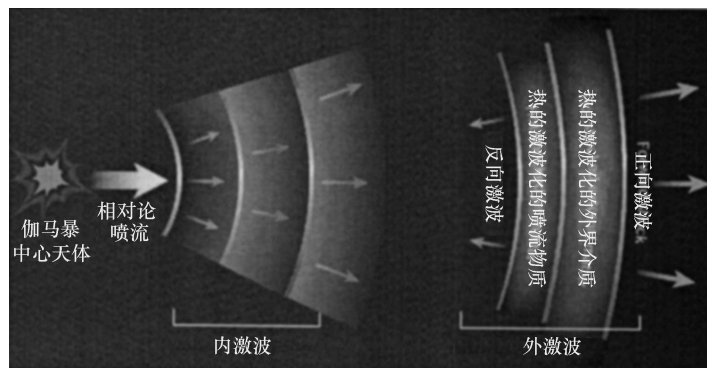


图 2 火球模型示意图^[112]

3 Swift 卫星的目标及特点

Swift 卫星是第一个具有自动定位和快速转向功能、具有多波段探测能力的观测暂现源的探测卫星，主要用于伽马暴探测以及早期余辉多波段同时观测。它属于低轨道地球卫星，设计寿命大约为 7 年。Swift 携带三个探测器：爆警望远镜 (BAT)、X 射线望远镜 (XRT) 和紫外/光学望远镜 (UVOT)。它的主要工作波段是伽马射线、X 射线、光学和紫外波段。Swift 卫星的科学目标有以下几个方面^[113]：确定伽马暴的起源；对伽马暴进行分类并探测新的伽马暴种类；研究激波的演化过程以及和周围外部介质的相互作用；利用伽马暴研究早期宇宙；在硬 X 波段对天空进行巡天。

爆警望远镜 (BAT) 是 Swift 卫星用于触发伽马暴瞬时辐射信号的探测器，具有高灵敏度和大视场的特点，精确探测能量波段是 15~150 keV，但对于 150~500 keV 波段的光子也有反应能力^[114]。在探测到伽马暴几秒钟之内，BAT 会自动地计算出伽马暴的位置，然后判断这

个暴的观测价值, 决定是否让 XRT 和 UVOT 来进行后续观测。BAT 探测的视场覆盖了 XRT 和 UVOT 的视场, 因此, 在对一个伽马暴进行 X、光学和紫外波段观测时, 我们可以同时观测伽马暴的瞬时辐射。BAT 具有两种工作模式: 伽马暴模式和巡天模式。伽马暴模式可以获得伽马暴的位置, 巡天模式可以获得硬 X 射线数据。

X 射线望远镜 (XRT) 是用来测量伽马暴 X 射线辐射的流量、能谱和光变曲线的仪器, 它的探测能量范围为 0.2~10 keV^[115]。它对流量的测量范围可达 7 个量级。XRT 可以在伽马暴触发后 10 s 之内对它精确定位到 5 个角秒, 并且在主暴触发后 20~70 s 的时间内迅速找到伽马暴的 X 射线对应体, 进行早期的 X 射线余辉观测。

紫外 / 光学望远镜 (UVOT) 的波段范围为 170~650 nm, 通过对定位范围为 0.3~2.5'' 的伽马暴进行观测, 获得该暴余辉的光学图象和相关的光谱^[116]。它的敏感度很高, 可以在曝光 17 分钟之内观测到白光星等为 24 等的光学暗源, 对红移小于 3.5 的源, 可以通过光谱直接得到该源的红移。

与以前的探测器相比, Swift 卫星具有以下几个基本特点^[117]: 1) 它的灵敏度高, 比 BATSE 灵敏度高三倍左右; 2) 定位范围准, 可以将每个探测到的伽马暴的空间方位确定在 0.3~5'' 范围以内; 3) 反应时间快, 在暴触发后的 20~70 s 很短的时间内, Swift 就自动地把 BAT、XRT 和 UVOT 望远镜对准伽马暴的方位, 探测它的瞬时辐射、X 射线辐射以及紫外和光学辐射; 4) 可以直接测定红移。在表 1 和表 2 中我们给出 Swift 卫星与其他的一些探测器的主要方面的比较, 相关数据来自其主页网站。

表 1 Swift 卫星和其他探测器在伽马波段的比较

| 项 目 | Swift(bat) | BATSE | Beppo-SAX(pds) | HETE-2(FREGATE) |
|--|------------|--------------------|----------------|--------------------|
| 有效探测面积 cm ² | 5 200 | 2 025 | 600 | 120 |
| 视场立体角 | 1.4 | 4 π | | 3 |
| 能量范围 keV | 15~150 | 20~10 000 | 60~600 | 6~400 |
| 探测率个·年 ⁻¹ | >100 | $\simeq 800$ | | |
| 灵敏度 10 ⁻⁷ J·cm ⁻² ·s ⁻¹ | | 3 $\times 10^{-8}$ | | 3 $\times 10^{-8}$ |

表 2 Swift 卫星和其他探测器在 X 波段的比较

| 项 目 | Swift(xrt) | Beppo-SAX(WFC) | HETE2 |
|---|---------------------|----------------|---------------------------|
| 有效探测面积 /cm ² | 110 | 140 | 175 |
| 能量范围 /keV | 0.2~10 | 2~30 | 2~25 |
| 灵敏度 /10 ⁻⁷ J·cm ⁻² ·s ⁻¹ | 2 $\times 10^{-14}$ | | $\simeq 8 \times 10^{-9}$ |

由于 Swift 卫星在设计上的特点, 从它上天以后, 伽马暴的观测取得了极大的进展和突破。截止到 2007 年 5 月 23 日, BAT 已经观测 250 个伽马暴, 大约每周探测到两个伽马暴, 其中有 15 个暴的 T₉₀(伽马暴的持续时标) 小于 2 秒, 其他的都属于长暴。在这 250 个暴中, 根据我们掌握的资料有 222 个暴有 X 射线辐射观测时间, 这其中有 91 个暴在爆发后 100 s 开始 X

射线余辉观测 (其中 77 个在 1 小时后有确定的流量数据), 有 70 个暴在爆发后 100~200 s 开始观测到 X 射线辐射 (其中 54 个在 1 小时后有确定的流量数据), 有 9 个暴的 X 余辉起始时间为 200~400 s (其中 6 个暴在 1 小时后有确定的流量数据), 剩余的 52 个暴其 X 余辉起始观测时间都大于 1 000 s。在 Swift 所探测到的暴中, 有 205 个有光学或者紫外观测, 其中有 70 个在爆发后 100 s 内开始光学观测, 70 个在 100~200 s 内开始观测, 9 个开始于 200~400 s, 共有 57 个暴确定了星等, 其他的大多确定了星等下限。在 15 个短暴中, 有 12 个暴的 X 射线起始观测时间都在爆发后 100 s 之内, 有 9 个探测到了早期的 X 射线余辉, 有 4 个探测到了红移, 有 12 个进行了光学或紫外的观测, 其中有 2 个确定了星等, 其他的确定了星等的下限。另外, Swift 卫星还探测到了一个红移为 6.29 的高红移伽马暴^[87]。以上分析内容来自 Swift 官方网站^[118], 更详细的内容请参见该网站。

4 X 射线早期余辉

Swift 卫星上天后探测到了 X 射线早期余辉, 这样, 结合 Swift 上天前其他卫星得到的 X 射线中晚期余辉数据, 我们可以获得从触发很短时间到很长时间的 X 射线余辉的完整光变曲线。有关早期余辉的光变曲线和数据可以从文献^[119]提供的相关网址获得。对大量的暴进行研究并结合晚期余辉的观测数据, 张冰等人^[121]和 Nousek 等人^[122]认为伽马暴的 X 射线余辉是由五个不同的部分构成 (见图 3)。图 3 中的五个部分分别是: I 快速衰减阶段; II 平缓

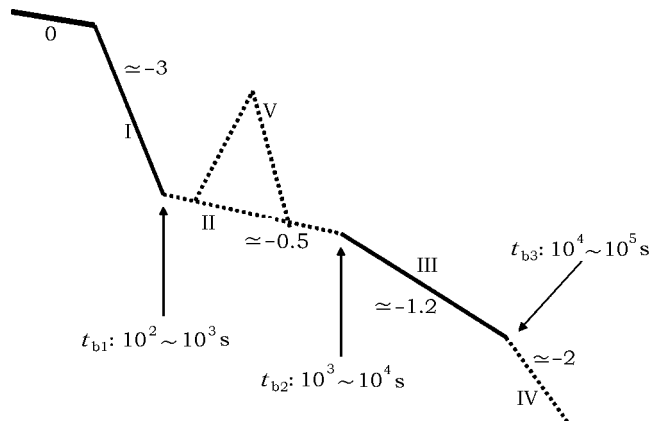


图 3 X 射线余辉完整光变曲线示意图^[121]

“0”代表瞬时辐射阶段

衰减阶段; III 正常衰减阶段; IV 转折后的喷流阶段; V 闪耀现象。I、II 和 V 属于早期余辉阶段, 是 Swift 卫星观测到的; III 和 IV 是在 Swift 上天前由其他卫星 (如 BeppoSAX) 发现的, 可以用标准余辉模型及后标准效应^[32-34,40,41]和喷流模型^[38,53-55,70,71,123]加以解释。I 和 III 是大部分暴都能观测到的成分, 闪耀现象在近一半的暴中观测到, II 和 IV 则不是每个暴都能观测到的。一般取 X 射线余辉的流量 F_x 与时间 t 、频率 ν 的关系为

$$F_x(\nu, t) \propto \nu^{-\beta} t^{-\alpha}, \quad (2)$$

则这五个阶段的基本特征如下^[84-86,124,125]: I $3 \leq \alpha \leq 5$, $1 \leq \beta \leq 2(300 \text{ s} \leq t \leq 500 \text{ s})$; II $0.2 \leq \alpha \leq 0.8$, $0.7 \leq \beta \leq 1.2(10^3 \text{ s} \leq t \leq 10^4 \text{ s})$; III $1.1 \leq \alpha \leq 1.7$, $0.7 \leq \beta \leq 1.2(t \leq 10^5)$; IV $2 \leq \alpha \leq 3(t \geq 10^5 \text{ s})$ 。而对 V 而言, 闪耀现象是快速上升和快速下降的外形, 给定一个参考时间 t_0 , 则其上升、下降表达式可表示为: $F_x(t) \propto (t - t_0)^{\pm\alpha}$, 并且 $3 \leq \alpha \leq 6$ 。

4.1 快速衰减阶段

现在对快速衰减阶段的最自然解释是瞬时辐射的最后一个脉冲或者是余辉阶段的一个闪耀的高纬度辐射(也称曲率效应), 也就是来自张角大于 $1/\gamma$ 部分的辐射^[126-130]。高纬度辐射或曲率效应的基本图像可以这样理解: 由于伽马暴火球做相对论运动, 相对论集束效应占主导, 也就是说, 伽马暴瞬时辐射时观测到的只是我们正对的相对论火球张角 $1/\gamma$ 以内部分的辐射。张冰等人^[121]给出了因曲率效应而产生快速衰减过程的基本理论和基本应用的论述, 下面我们简要地加以叙述。

假定喷流的张角为 θ_j , 在火球半径为 R 处, 视角为 $\theta(\theta < \theta_j)$ 的部分发出的辐射被接收到的时间为 $t \simeq (1+z)(R/c)(\theta^2/2)$, 这样总的辐射持续时间为

$$t_{\text{cur}} = (1+z)(R/c)(\theta_j^2/2) \simeq 330 \left(\frac{R\theta_j^2}{10^{13}} \right) \left(\frac{1+z}{2} \right) \text{ s}. \quad (3)$$

如果运动物质的洛伦兹因子为 $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, 则多普勒因子为 $\delta = 1/[\gamma(1-\beta \cos \theta)]$ 。当 $\theta \ll 1/\gamma$ 时, $\delta \simeq 2\gamma$; 而当 $\theta \gg 1/\gamma$ 时, $\delta \simeq 2/(\gamma\theta^2)$ 。我们知道 $t \propto \theta^2$, 于是当 $\theta \gg 1/\gamma$ 时, 得到 $\delta \propto t^{-1}$ 。

我们知道观测到的流量 F_ν 和内秉流量 F'_ν 符合关系 $F_\nu \propto \delta^2 F'_\nu$, 而且 $\nu = \delta\nu'$ 。假定内秉流量符合简单的幂律关系 $F'_\nu \propto \nu'^{-\beta}$, 则有:

$$F_\nu \propto \nu'^{-\beta} \delta^2 \propto \nu^{-\beta} \delta^{2+\beta} \propto \nu^{-\beta} t^{-2-\beta}. \quad (4)$$

由流量表达式, 我们可以得到由曲率效应而产生的快速衰减阶段的一个基本的关系式:

$$\alpha = 2 + \beta. \quad (5)$$

该关系式可以检验我们观测到的快速衰减阶段是不是由于曲率效应引起的。梁恩维等人^[130]利用曲率效应对 36 个伽马暴的快速衰减进行了相关检验, 发现大部分的伽马暴的快速衰减可以用曲率效应来解释。若快速衰减确实是由曲率效应引起, 则意味着瞬时辐射和余辉辐射是来自不同的区域。同时, 我们还可以利用快速衰减阶段辐射的 X 流量大于余辉辐射的 X 流量来确定瞬时辐射过程释放的能量和总能量的关系。但研究发现, 用曲率效应来解释快速衰减, 则要求在瞬时辐射阶段有很高的能量释放机制, 而根据以前的内激波理论模型无法达到这么高的能量释放效率。这是当前曲率效应解释遇到的一个暂时无法解决的困难。

除了用曲率效应来解释早期余辉的快速衰减, 还有一个比较合理的解释就是产生瞬时辐射的电子在其绝热冷却过程中辐射^[85]。张彬彬等人^[131]对快速衰减阶段的能谱进行研究, 有些伽马暴在该阶段存在很强的谱演化, 说明这些伽马暴的快速衰减阶段可能是来自瞬时辐射区域的冷却过程。对于杂乱或横向磁场情况^[132], 可以求得慢冷却情况下的辐射光变

曲线的时间指数为 -5 或 -3.25 ，而对快冷却情况下则为 -7 或 -2.75 。但这样的时间指数以及对应的谱指数只适应于极少数的暴，而对大部分的暴是不合适的。

在对早期余辉快速衰减的解释中，还有很多的理论模型也在尝试解释该现象，这些理论模型分别有：在喷流周围蚕茧状的热等离子体相对论膨胀的辐射^[133]、塌缩情况下的热成团气体的辐射^[134,135]、中心天体喷出物在光学薄时的光球辐射^[136,137]、补丁壳层模型^[138,139]以及考虑了逆康普顿效应的反向激波辐射^[140]等。但不论哪种模型，都不能同时解释所有观测到的暴。因此，按照现在的理论模型，我们可以猜想：早期余辉的快速衰减过程或许是多种机制并存共同作用的结果。在大部分的暴中曲率效应的辐射占主导地位，而对一些极少数特殊的暴则由于环境或者中心天体的不同，也许存在其他的产生机制。

4.2 缓慢衰减阶段

在瞬时辐射的延续效应结束或者在延续效应不再明显的时候，外激波辐射开始发挥作用了。但是单纯的按照外激波的正向激波的理论，产生的光变曲线无法形成图 3 中的缓慢衰减的部分。因此就很自然地想到在早期余辉阶段，中心天体的作用或者内激波产生的后续效应应该还在影响向外高速运动的物质，这样在外激波过程中就会出现有能量注入的情况。如果有外在能量的注入，那么余辉流量快速衰减的情况就会发生改变，变成平缓衰减的情形，也就出现了缓慢衰减的阶段。如果由于中心天体很小，在瞬时辐射阶段就把能量消耗光，或者其他的一些未知原因，使得早期余辉阶段外激波没有能量注入，则不会出现缓慢衰减状态，那样就会出现正常的衰减光变曲线，因此有些暴没有观测到缓慢衰减状态。同时，这样也给了我们一个考察中心天体后期演化的一个手段，那就是利用缓慢衰减的能量注入函数来了解中心天体后期的演化规律。能量或者物质注入到外激波，会再次形成正反激波，这被称为再次激波化过程^[141-143]。

再次激波化(能量或者物质注入)加外激波中的正向激波一般是我们认为造成早期余辉缓慢衰减的基本机制。参考文献^[121]介绍了三种能量注入方式，而参考文献^[122]介绍了两种能量注入方式。在本文中我们根据参考文献^[121]来介绍主要的两种能量注入方式。

第一种是纯能量注入^[143-146]。假定中心天体的活动持续时间足够长，该情况适用于中心天体为快速旋转的中子星^[41,75,147,148]或者是长时间存在的黑洞加环的系统^[149]，如果中心天体的各向同性光度变化关系式为^[147]

$$L(t) = L_0(t/t_0)^{-q}, \quad (6)$$

则再次激波化过程使得外激波的各向同性总能量随时间的关系为

$$E_{\text{iso}} \propto t^{1-q}, \quad (7)$$

然后按照余辉的动力学方程可以解得最后的光变曲线和能谱。为了使中心能源能够持续对外激波注入能量，中心能源后期喷出的能流的速度应比外激波的速度大，否则就无法注入能量。如果中心能源产生的能流是以坡印亭流量为主，这一要求很容易满足。数值模拟的结果也证实了这种模型可以拟合观测到的一些早期余辉的光变曲线^[148,150]。

第二种情况是物质注入^[141]。假定中心天体的活动时间极其短暂，但是在主暴结束后，形成的喷发物质具有连续的洛仑兹因子分布。对于洛仑兹因子大于 Γ 的物质分布可认为遵循

下面的规律:

$$M(> F) \propto F^{-s}, \quad (8)$$

于是总能量的表达式为

$$E_{\text{iso}} \propto F^{1-s}. \quad (9)$$

根据理论推导和计算, 可以得到 s 和 q 关系。取特定的 s 和 q 值, 能量注入和物质注入对外激波的影响是等效的, 都可以形成观测到的缓慢衰减的光变曲线。如图 3 所示的早期余辉的基本特征我们看到从 II 向 III 过渡时, 能谱指数没有发生变化。结合以上模型和观测数据, 我们可以得到 q 的值一般为 0.5 左右。而且注入过程非常平滑, 没有什么大的涨落。这几个特点是任何一个理论模型都需要解释的。X 射线能谱在光变曲线 II 到 III 的转折时刻没有发生变化, 意味着该转折现象极有可能是动力学过程造成的, 但具体什么动力学过程却不知道。另外, 注入过程平滑要求中心天体的光度变化是平滑的, 这与传统上认为中心天体不规则释放能量产生伽马暴是相矛盾的。中心天体释放能量可能有两个方式: 一种形成热的火球从而产生伽马暴, 另外一种释放冷的坡印亭能流从而形成平缓的能量注入。

通过对 48 个长暴的平缓阶段的分析, 梁恩维等人^[151]发现大部分的伽马暴的平缓阶段可以用能量注入的外激波模型来解释, 但有 3 个源 (GRB 060413、GRB 060607A、GRB 070110) 无法用该模型来解释。某些伽马暴的 XRT 的光变曲线可以用脉冲星模型 ($q = 0$) 很好地拟合, 说明这些伽马暴的中心也可能是脉冲星^[152-154], 例如对于 GRB 070110, Troja 等人^[154]通过研究则认为其中心是一个旋转的脉冲星, 其平缓衰减部分是来自于中心天体的持续辐射。通过数值模拟, Zhang 等人^[155]发现在中心天体坍缩过程中, 物质被吸积到吸积盘上而产生的辐射过程可以产生 $q=0.5$ 且持续时间可达 10^5 秒的早期余辉辐射。张冰^[84]最近还列举了其他一些可以解释余辉缓慢衰减的模型, 如偏轴喷流模型^[156,157]、双成分喷流模型^[158,159]、微观物理参量随时间变化的模型^[160-162]等。总之, 有关平缓衰减的成因现在还在继续探索中, 对该阶段的研究必然会极大地促进我们对伽马暴中心机制的认识。

4.3 闪耀现象

Swift 卫星最早是在 GRB 050406^[163] 和 GRB 050502B^[164] 这两个伽马暴的早期 X 射线余辉中发现 X 射线闪耀现象。到目前为止, Swift 探测到的伽马暴中有一半存在闪耀现象^[165-167], 闪耀现象的光变曲线。现在长暴和短暴都观测到了闪耀现象, 说明闪耀现象是伽马暴早期余辉的一个显著特征。有的伽马暴只观测到一个闪耀现象, 如 GRB 050406^[163]; 而有的伽马暴则观测到多个闪耀现象, 例如 GRB 050502B。闪耀现象具有如下特点^[84]: 快速上升快速下降; 在闪耀前和闪耀后余辉的外形不变; 同一个暴观测到的多个闪耀现象具有类似的性质; 闪耀中的流量变化很大; 闪耀的总能流和瞬时辐射的能流差不多; 闪耀随着时间其能谱变软; 发生在后面的闪耀现象比早发生的半宽要宽, 且能量低; 另外, Chincarini 等人^[168]通过研究 33 个伽马暴的 69 个闪耀发现, 越强的闪耀发生的时间越早, 闪耀的峰值强度和闪耀发生的时间成正比关系; 用高斯函数拟合每个闪耀, 发现宽度和闪耀发生时间的比值为 0.13 左右, 但分散比较大; 同时还发现 X 波段的闪耀数目和瞬时辐射的脉冲数目没有任何关联; 对瞬时辐射的强度分布和闪耀的强度分布的比较发现, 两者是一致, 可以推测闪耀和瞬时辐射的脉冲是同一起源; 所有证据都支持闪耀是来与标准火球框架下的中心天体有关, 是内激波辐射产生的, 而不是来自于外激波的辐射。但

同时还发现有 29 个闪耀也可以用再次激波化来解释,但是在这 69 个闪耀中,有 10 个闪耀只能用中心天体的活动性来解释。现在,有关该现象最可能的理论模型是中心天体后期的间歇性喷发而产生的后期内激波模型。在这个模型中,中心天体在后期喷出有快有慢的多个壳层,这些速度不同的壳层在主暴对应的早期余辉阶段发生碰撞产生内激波,从而产生了早期余辉阶段的 X 射线闪耀现象^[121,122,169-174]。对大量的数据进行分析,发现大部分的闪耀现象符合中心天体的后期活动性理论解释^[151,168]。在后期内激波模型中,中心天体的后期活动性的产生是该模型不可回避的问题。不论对长暴还是短暴,有种观点认为中心天体在后期吸积来自其周围不同的物质,从而导致中心天体在后期产生间歇性的喷发活动^[175-177]。其他一些不同的观点,比如毫秒脉冲星交差自转放大磁场产生磁重联过程^[175-177]。另外再次激波化也可以产生闪耀现象^[180]。该模型认为主暴阶段产生的速度比较慢的喷出物最后会追上产生余辉的外激波,产生闪耀现象。

5 光学早期余辉

在 Swift 发射前,已经观测到一些早期光学余辉现象,例如 GRB 990123^[181], GRB 021004^[182], GRB 021211^[183] 等。早期余辉现象一般解释为来自反向激波的同步辐射^[36,61,62,184,186]。根据伽马暴是否观测到光学余辉,伽马暴分为光学亮和光学暗两类^[187]。由于 Swift 携带有光学和紫外望远镜,理论上讲,对大部分的暴而言,如果在暴触发后的 100 s 的时间内有光学辐射,都应该被探测到。但实际上,Swift 的 UVOT 探测器在比较早的时间内对大部分暴并没有探测到对应的光学辐射,即没有探测到早期的光学余辉。这说明 Swift 探测到的伽马暴,其中大部分是光学暗暴。导致该现象的原因有以下几种可能^[188]:前景吸收、环境吸收、高红移、比较低的外界介质密度、快速的瞬时辐射阶段的衰减和反向激波比较弱等原因。对大部分的暴,也许前景吸收、环境和高红移的原因是没有探测到早期光学余辉的最佳解释^[188]。同时,没有早期光学余辉的现象也说明在大多数情况下,在早期余辉阶段,产生早期余辉现象的反向激波过程是被压制的或者不存在的。张冰等人^[189]通过研究发现,在定义一个绝对的 σ 参量的情况,只有在该参量近似等于 1 的时候,才最有可能产生早期光学余辉现象。该参量太大或者太小,都会影响反向激波的形成,从而无法形成早期光学余辉。另外,其他一些机制也可能影响到早期余辉的形成,例如瞬时辐射的 MeV 光子对电子的康普顿冷却效应^[190]、在反向激波区存在的占主导的同步自康普顿过程^[191]以及电子对丰富的反向激波也只能产生很弱的光学辐射^[192,193]等。总之,观测不到早期余辉现象有两个可能:一个就是伽马暴在该时期根本就没有光学辐射,另外一个就是有光学辐射,但强度比较弱,或者因为环境因素、距离的原因,我们观测不到。

尽管如此,在 Swift 上天后,还是观测到了几个比较明显的早期光学余辉的例子,例如 GRB 041219A、GRB 050401、GRB 050820A、GRB 050904、GRB 060108、GRB 060111B、GRB 060117、GRB 061007、GRB 060418、GRB 060607A 等,这些源有的可以单纯地认为是来自反向激波辐射产生,有的则认为只来自于正向激波的辐射,而有的则比较复杂,是其他机制产生。另外,光学余辉还存在震荡和鼓包现象,一般被解释为与外激波有关的过程引起的,包括再次激波化、介质密度震荡、非均匀性喷流和多分量喷流等。早期光学余辉可还能包含有中子衰减信息。但早期的光学震荡现象很难用与外激波有关的过程来解释,而更适合用中心天体的后期活动性来解释,也就是说 X 射线的早期闪耀和光学波段的震荡是同一起源,例如韦大明等

人^[194,195]利用中心天体的后期活动性已经成功解释了几个早期光学闪的例子。对早期光学余辉的详细的论述可参看参考文献[84]。

6 高红移伽马暴

从伽马暴的光度-时间延迟关系可以求得伽马暴的红移, 这样我们就会发现大量的伽马暴的红移大于 6^[196]; 另外数值模拟的结果显示第一代恒星形成于红移为 20 左右的时代^[197,198], 因此理论上高红移伽马暴是大量存在的。同时, 根据 k 修正效应和时间膨胀效应, 伽马暴在红外和射电波段的瞬时辐射和余辉辐射非常强^[199,200]。因此, 在现有的观测条件下, 高红移伽马暴是可以被大量观测到。Swift 上天后也已经探测到几例高红移伽马暴事件, 它们分别是: GRB 050814 ($z = 5.3$), GRB 050904 ($z = 6.29$), GRB 060522 ($z = 5.11$) 和 GRB 060927 ($z = 5.6$)。高红移伽马暴的发现揭开了利用伽马暴研究早期宇宙和宇宙再电离时期的序幕。

观测到高红移伽马暴 GRB 050904 是 Swift 上天后的非常重要的成果。GRB 050904 是在 2005 年 9 月 4 日被 Swift BAT 观测到, 随后 XRT 和 UVOT 以及地面的观测设备对它进行了后续观测。该暴的 T_{90} 为 225 秒, 其伽马波段辐射很强, 伽马波段能流为 $5.07 \times 10^{-13} \text{ J/cm}^2$, 对应的伽马波段的各向同性能量达到了 10^{47} J 。后续在 X 波段的观测发现, 该暴的 X 射线的流量也很强, 在触发后 1 个小时时刻测得的 X 射线流量为 $1.8 \times 10^{-16} \text{ J/cm}^2$, 且持续时间很长。在爆后 1 天左右, X 射线波段的亮度比目前观测到的最亮最远的类星体 SDSS J0130+0524 还要亮, 并且在第 1 分钟其亮度是后者的 10^5 倍^[201]。在 X 射线波段它的光变剧烈, 有多次闪耀。另外它的红外辐射很强, 在爆发后的一次红外闪耀时其星等达到 14 mag^[202]。该闪耀的峰值时间为暴后 470 s 左右, 并且该闪耀和伽马波段、X 射线波段闪耀同时发生^[203]。

对 GRB 050904 的谱的研究揭示宇宙在红移为 6.3 时就已经大量电离^[204]。韦大明^[194]和 Gou 等人^[205]的研究认为该暴周围存在致密的介质环境, 光学和红外闪耀则来自于反向激波的不同步辐射, 而正向激波的不同步自康普顿辐射产生 X 波段的闪耀现象, X 波段的闪耀也说明晚期的中心活动持续时间很长。另外还可以推断出 GRB 050904 的周围介质密度和喷出物的初始动能远大于低红移伽马暴。

高红移伽马暴可以直接作为了解早期宇宙再电离时期的环境以及星际介质的探针, 探测早期宇宙的物理环境及其状态。伴随着红移大于 6 的高红移伽马暴的不断发现, 我们将对宇宙“黑暗时期”和再电离时期的宇宙环境、相关的物理状况, 以及星系际介质的物理状况等获得充足的感性和理性认识, 并对宇宙演化和大尺度结构的形成等提供有力的观测基础, 使伽马暴在宇宙学领域的研究也将越来越深入和广泛。

7 短暴余辉

截止到 2007 年 5 月 23 日, Swift 一共探测到 15 个短暴^[206], 它们分别为 GRB 070429B、GRB 070406、GRB 070209、GRB 061217、GRB 061201、GRB 060801、GRB 060313、GRB 051221A、GRB 051210、GRB 051105A、GRB 050925、GRB 050906、GRB 050813、

GRB 050509B、GRB 050502。其中有 4 个探测到红移值，分别是 GRB 061217 ($z=0.827$)，GRB 051221A ($z=0.547$)，GRB 050813 ($z=1.8$) 和 GRB 050509B ($z=0.225$)。另外 HETE-2 探测到 2 个短暴余辉，GRB 050709^[207] ($z=1.6$)^[208] 和 GRB 040924^[209] ($z=0.86$)^[210]。这些短暴大部分都观测到了早期 X 射线余辉和光学余辉。短暴早期余辉的光变曲线和长暴的一样，也呈幂律衰减。短暴的宿主星系大部分为早型星系（椭圆星系），也有一些为不规则矮星系^[211]，而短暴一般发生在它们宿主星系的外围。按照宿主星系的性质和短暴的产生位置，短暴很可能起源于双致密星（如双中子星或中子星-黑洞双星系统）的并合^[86]，数值模拟显示双致密星的并合有利于产生短暴^[212]。

第一个被明确探测到有余辉的短暴是 GRB 050509B。该短暴的 T_{90} 为 0.04 秒，伽马波段的能流为 $1.3 \times 10^{-15} \text{ J/cm}^{-2}$ ，对应的伽马总能量为 10^{41} J 左右，远低于长暴各向同性能量。在爆触发后第 62 秒开始对它进行 X 射线余辉观测，暴后 1 小时的 X 射线流量为 $1.0 \times 10^{-19} \text{ J/cm}^{-2}$ ^[206]。它的 X 射线流量遵循简单的幂律衰减关系，可探测的持续时间约为 10^4 秒^[88]。

由于探测到余辉的短暴数目还太少，短暴余辉的研究还处于起步阶段。总体来说，短暴的爆发能量要弱于长暴，红移也小于长暴，而且大多位于没有恒星形成的比较亮的椭圆星系外围，这些特点符合短暴双致密星起源的假说。如果这样，那长暴和短暴就是完全起源不同的两类，按照暴持续时标以 2 秒为分界线的定义就不具有本质的物理意义，因为这只是外在的观测特征。因此，如何物理地定义长暴和短暴，反映它们的本质，需要在以后掌握了长暴和短暴更本质的区别后给出，现在 Norris 和 Bonnel^[213] 将以前的短暴定义修改为：在 25 keV 能量以上的第 1 个脉冲的表现没有能谱演化。有关短暴余辉更详细的叙述可参见文献 [85, 214]。

8 其他重要进展

在 Swift 发射前，在光学波段发现的喷流拐折是一个很重要的发现。该现象被解释为当火球的洛伦兹因子的倒数大于喷流的张角时，观测到的光变曲线将出现拐折，拐折后的指数在 $-1 \sim -2$ 范围内^[38]。由于喷流拐折纯粹是动力学效应，因此这个拐折应该是同时发生在所有波段，并且拐折前后的能谱不变^[84]。因此，Swift 上天以后，人们希望可以观测到在 X 射线波段的喷流拐折现象，但结果是令人失望的。Burrows 等人^[215] 经检验发现，大部分的 Swift 观测到的伽马暴的 X 余辉并没有呈现喷流拐折，只有很少的一部分暴才有拐折现象，并且这些拐折除了可以用喷流拐折来解释外，并不排除其他的产生可能。Panaitescu^[216] 检查了最新的 Swift 样本，在 236 个暴中，只有 100 个左右的暴有比较长的 X 余辉观测，并且在这些观测时间足够长的暴中，他们认为有 57 个暴有拐折现象，并且拐折发生在 $0.1 \sim 10 \text{ d}$ 的范围，拐折后的指数为 1.5 左右；有 37 个暴则是完全没有拐折的。对 57 个暴的拐折经过研究，他们认为这些拐折可以用喷流模型进行解释，但同时也不排除其他的产生机制。他们推断 Swift 观测到的可能具有喷流的暴占数据齐全的暴的总数的 61%，而 Swift 以前的显示有喷流的暴占总数的比率为 75%。但他们只检查了 X 波段的数据，而没有其他波段的数据。如果是真实的喷流拐折，那么其他波段的光变曲线在 X 波段出现拐折的时候，也该出现拐折现象，但由于没有其他波段的数据支持，因此这些拐折是否是喷流造成的，还是一个很大的疑问。另外他们还检测了 Ghirlanda 关系和 Amati 关系，发现 Ghirlanda 关系可以完全从 Amati 关系得到，也就是说利用喷流张角而得到的 Ghirlanda 关系并

不是一个严格的与喷流张角有关的关系。因此, 到现在为止, 有关伽马暴的喷流存在与否, 以及大部分暴是否都存在喷流, 已经成为一个很大的疑问。这需要对以后的更多的各个波段的数据进行最终检验。

另外, Swift 时代, 过去发现的一些经验关系被证实仍旧有效^[84], 例如光度 - 时间延迟关系^[217,218], 光度 - 变化率关系^[219-221], 峰值强度和各向同性能量关系^[222] 以及峰值强度和各向同性光度关系^[223] 等。另外, Firmani 等人^[224] 新发现了一个包含峰值光度、峰值强度和持续时间的关系。而与喷流有关的一些经验关系 (frail 关系^[225], Ghirlanda 关系^[226], 梁 - 张关系^[227], Willingale 关系^[228]) 等, 由于喷流存在与否已经成为一个疑问, 因此与喷流有关的关系则需要未来的研究中进行进一步的检验, 来保证这些关系的有效性。

长暴一般是大质量星的坍缩形成的, 伴随着超新星的辐射成分; 而短暴则来自于双中子星或者中子星与黑洞的并合, 是伽马暴起源的基本理论假说。可是, Swift 发现 GRB 060614 和 GRB 060505 没有观测到超新星辐射的成分^[229], 该现象与长暴都是起源于大质量恒星的坍缩并伴随超新星辐射成分的基本理论相冲突。因此, 对于这 2 个暴 (或许以后还会发现类似的暴) 我们只得考虑它属于另外的产生机制, 也就是长暴也许还有别的产生机制, 即大质量星坍缩产生伽马暴但不伴随超新星成分或者其他的中心引擎^[229,230]。同时还发现 GRB 060614 的寄主星系 ($z=0.125$) 也有别于普通的长暴的寄主星系, 这也要求该伽马暴有新的产生机制^[231]。King 等人^[232] 则认为 GRB 060614 是由大质量的白矮星和中子星并合产生, 并且认为这样的并合机制可以形成长暴, 这类长暴和单纯由大质量星坍缩形成的长暴在性质上有明显不同, 并且寄主星系也不在恒星形成区, 该理论还有待以后的观测进一步地证实。同时, 通过数值模拟也发现大质量的双星系统可以形成长暴^[233]。而张冰等人^[234] 则推断 GRB 060614 应该从属于短暴, 并建议用伽马暴 I 型和 II 型来代替短暴和长暴的分类。伽马暴 I 型的特点为: 持续时间一般较短、谱比较硬、很短的时间延迟和与超新星成协, 它们一般发生在任意星系的比较老的恒星区域, 典型的处于低恒星形成区, 一般是在寄主星系的外围区域, 它们的前身星是致密星并合。伽马暴 II 型的特点则是: 持续时间一般较长, 谱比较软, 具有比较长的时间延迟和与超新星成协, 它们的寄主星系一般是晚型的、非规则的矮星系, 发生位置一般在寄主星系的恒星形成区的中心, 该类伽马暴是大质量星的坍缩而产生的^[84]。因此, 有关伽马暴的分类问题现在也已经进入了一个崭新的时期, 如何科学地对伽马暴分类, 将是伽马暴研究的一个重要问题, 这涉及到伽马暴的物理本质问题。

GRB 060218 和超新星 SN2006aj 成协, 但其光度却比正常的伽马暴低 10^5 J, 对其光变曲线进行分析, 可以推断其前身星的质量不大; 并且坍缩后形成的中心天体并不是黑洞, 而更可能是一个中子星。因此低光度的伽马暴作为一个单独的一类, 很可能产生于大质量星坍缩后形成中心为中子星且产生中等相对论的喷流, 而典型的伽马暴则产生于大质量星坍缩后形成中心为黑洞的过程, 并且产生极端相对论喷流^[235-239]。

对 Swift 时代发现的 24 个伽马暴的寄主星系进行分析发现^[240], Swift 时代发现的伽马暴的寄主星系要比 Swift 时代以前发现的伽马暴的寄主星系弱, 这也许是因为 Swift 探测到的伽马暴一般要比以前探测到的伽马暴的距离更远。Prochaska 等人^[241] 利用伽马暴能

谱的 Ly α 丛林对伽马暴周围的星际介质的研究发现, 当红移大于 2, 伽马暴周围的星际介质的金属和氢的比值 (M/H) 要比宇宙中的金属和氢的比值 (M/H) 的平均值大; 并且锌和铁的比值以及 α 与铁的比值都比较大, 而 C⁰/C⁺ (小于 10⁻⁴) 则比较小; 与类星体相比, 伽马暴的氢的柱密度, α /Fe, Zn/Fe 的值以及金属丰度都比较大。说明伽马暴周围的星际介质和类星体周围的星际介质是不同的。Price 等人^[242] 通过对 GRB 060510B(z=4.941) 的光谱分析, 发现弱金属线硅、硫、铁、镍的强度都非常大, 并且 Fe/H 的比值也远大于平常的数值, 这些强度比较大的金属给利用伽马暴来推断恒星形成提出了一个严肃的问题。

在前面我们介绍了可以利用高红移伽马暴研究早期的宇宙以及宇宙的再电离时期等, 其实, 早在 2004 年, 戴子高等人^[49] 首先利用伽马暴的经验关系进行宇宙学的相关研究, 现在随着各种统计关系的发现, 利用这些统计关系限制宇宙学常数, 进行宇宙学研究已经成为伽马暴研究的一个重要方面, 被成为伽马暴宇宙学。但是这方面的研究面临着一个关键的问题, 那就是这些统计关系的可靠性以及实质的物理解释, 现在已经发现与喷流有关的统计关系面临着极大的不确定性, 那么利用这些关系进行进一步的宇宙学研究也就失去了基础。其实这儿涉及到一个能否把伽马暴看作标准烛光的问题, 这个问题还需要在未来的研究中进一步进行确认, 比较详细的介绍可以见参考文献 [243]。

9 总结及展望

到目前为止, 对伽马暴及余辉的探测和研究主要集中在伽马射线的中、低能波段, 以及能量更低的 X 射线、光学和射电波段。现在我们已经知道伽马暴还存在极高能伽马光子辐射^[244], 例如 EGRET 探测器就探测到了十几例伽马暴的高能现象。因此伽马暴极高能光子的产生及辐射将是未来伽马暴研究的一个重要问题, 极高能光子辐射将涉及到伽马暴源的物理性质和伽马暴中心的活动性, 对极高能光子的研究将加深我们对伽马暴的物理本质的认识。德国和美国联合研制的高能卫星 (GLAST) 将预计在 2007 年秋发射。它的主要仪器为大面积望远镜 (LAT), 工作波段主要集中在高能伽马射线波段, 覆盖的能量范围为 20 MeV~300 GeV, 有效面积大于 8 000 cm², 灵敏度比 EGRET 高 30 倍, 观测视场为 2~3 个立体角。设计目的是探测活动星系核、背景辐射、伽马暴、太阳耀斑、分子云、超新星遗迹、不规则星系、中子星和黑洞、某些没有确认的伽马射线源以及暗物质等产生的高能伽马射线辐射。同时, 该高能卫星上还专门携带对伽马暴进行探测的仪器 GBM, 探测能量范围为 10 keV~25 MeV。对伽马暴而言, LAT 的响应时间为 100 微秒左右, 定位精度小于 10 个角分, 能量分辨率为 20% 左右; 对单光子的分辨率为 10 角分左右, 可以在小于 5 秒的时间内辨认和定位伽马暴; 该探测器预计 1 年可探测到 100 个左右的极高能伽马暴事件。而 GBM 的视场为 8 个立体角, 覆盖了低轨道运行时能观测到的全部天空, 包含 LAT 的视场范围; 可以在小于 2 秒的时间确定和定位伽马暴事件, 然后使 LAT 进行后续的极高能伽马光子探测, 预计该探测器一年可以探测到 200 个伽马暴事件。GLAST 高能卫星可以在小于 7 秒的时间把观测到的伽马暴的对应体传回地面, 使地面对之进行其他波段的同时观测^[245]。因此, 我们可以预计当 GLAST 正式运转后, 伽马暴的研究重点将分为三个大的方向: 一个是早期余辉以及晚期余辉的观测和研究, 另外一个就是伽马暴本身的研究, 最后一个就是伽马暴的高能辐射研究。其实这些研究只是一个事物的不同方面, 我们的最终目的还是要解决是什么现象导致了伽马暴事件的发生? 是大质量星坍塌

还是双中子星并合? 还是其他的未知的宇宙过程产生的极端强烈的伽马射线爆发现象? 它们的具体物理过程是怎样的, 辐射机制又是如何的? 在神秘伽马暴现象中, 是否蕴藏着我们现在还未知的物理规律? 等。

总之, Swift 上天后, 我们观测到了许多新的现象, 加深了对伽马暴的认识, 例如知道了长暴和短暴的寄主星系的差异, 探测到了红移大于 6 的伽马暴, 使伽马暴成为研究早期宇宙的强有力的探针, 而早期余辉现象又把伽马暴的瞬时辐射和后期余辉结合起来, 使我们可以有机会完整地了解伽马暴形成后的演化情况等。尽管这些问题还没有最终解决, 但是随着研究的深入, 随着新的高分辨率高性能的探测器的陆续投入运用, 我们对这些问题可望取得最终的答案。同时随着观测和理论研究的深入, 我们相信已经看到了彻底揭开伽马暴之谜的曙光。由于伽马暴属于极端物理现象, 在它产生过程中还将有高能宇宙线、中微子、引力波等产生, 因此, 随着伽马暴的研究深入, 这些相关现象也将得到进一步的认识和理解。总之, 伽马暴是一扇通向众多未知领域的大门, 通过它, 我们可以获得对宇宙中的许多现象的更进一步的理解。

致谢 非常感谢戴子高教授、韦大明研究员、黄永峰教授、吴雪峰博士、王祥玉博士、黎卓博士和范一中博士等给予本文有意义的建议, 这些建议使本文在内容上更加全面和详实。

参考文献:

- [1] Kurt W W. *Lecture Notes in Physics: Supernovae and Gamma-Ray Bursters*, Berlin: Springer, 2003: 1
- [2] Klebesadel R, Strong I, Olson R. *ApJ*, 1973, 182: L85
- [3] Mazets E P, Golenetskii S V, Ilinskii V N. *JETP Lett.*, 1974, 19: 77
- [4] Cline T. *ApJ*, 1973, 185: L1
- [5] 陆 琰. *天文学进展*, 2001, 19(2): 103
- [6] Mazets E P, Golenetskii S V, Ilinskii V N, et al. *Soviet Ast Lett*, 1979, 5: 163
- [7] Murakami T, Fujii M, Hayashida K, et al. *Nature*, 1988, 335: 23
- [8] Harding A K. *Phys. Rep.*, 1991, 206: 327
- [9] 吴雪峰, 陆 琰. *物理学进展*, 2006, 26(1): 1
- [10] Schaefer B E, Teegarden B J, Fantasia S F, et al. *ApJS*, 1994, 92: 285
- [11] Band D, Matteson J, Ford L, et al. *ApJ*, 1993, 413: 281
- [12] Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. *ApJ*, 1993, 413: L101
- [13] Lamb D Q, Graziani C, Smith I A. *ApJ*, 1993, 413: L11
- [14] Norris J P, Scargle J D, Bonnell J T. *HEAD*, 2000, 5: 3402
- [15] Mao S, Narayan R, Piran T. *ApJ*, 1994, 420: 171
- [16] Katz J I, Canel L M. *ApJ*, 1996, 471: 915
- [17] Fishman G J. *A&AS*, 1999, 138: 395
- [18] Qin Y P, Xie G Z, Xue S J, et al. *PASJ*, 2000, 52: 759
- [19] Qin Y P, Xie G Z, Liang E W, et al. *A&A*, 2001, 369: 537
- [20] Dong Y M, Qin Y P. *MNRAS*, 2005, 358: 1267
- [21] Qin Y P, Dong Y M. *MNRAS*, 2005, 358: 1320
- [22] Schmidt M, Higdon J C, Hueter G. *ApJ*, 1988, 329: L85
- [23] Meegan C A, Fishman G J, Wilson R B, et al. *Nature*, 1992, 355: 143
- [24] Chuang K W, White R S, Klebesadel R W, et al. *ApJ*, 1992, 391: 242
- [25] Wickramasinghe W A D T, Nemiroff R J, Norris J P, et al. *ApJ*, 1993, 411: L55
- [26] Pendleton G N, Mallozzi R S, Paciesas W S, et al. *ApJ*, 1996, 464: 606
- [27] Hakkila J, Meegan C A, Horack J M, et al. *ApJ*, 1996, 462: 125

- [28] Horvath I, Meszaros P, Meszaros A. *ApJ*, 1996, 470: 56
- [29] Costa E, Frontera F, Heise J, et al. *Nature*, 1997, 387: 783
- [30] Van Paradijs J, Groot P, Galama T, et al. *Nature*, 1997, 386: 686
- [31] Frail D, Kulkarni S, Nicastro L, et al. *Nature*, 1997, 389: 261
- [32] Rees M J, Mészáros P. *MNRAS*, 1992, 258: 41
- [33] Mészáros P, Rees M J. *ApJ*, 1997, 476: 232
- [34] Sari R, Piran T, Narayan R. *ApJ*, 1998, 497: L17
- [35] Sari R. *ApJ*, 1998, 494: L49
- [36] Sari R, Piran T. *ApJ*, 1999, 517: L109
- [37] Rhoads J. *ApJ*, 1997, 487: L1
- [38] Rhoads J. *ApJ*, 1999, 525: 737
- [39] Panaitescu A, Kumar P. *ApJ*, 2001, 560: L49
- [40] Dai Z G, Lu T. *MNRAS*, 1998, 298: 87
- [41] Dai Z G, Lu T. *A&A*, 1998, 333: 87
- [42] Dai Z G, Lu T. *ApJ*, 1999, 519: L155
- [43] Dai Z G, Huang Y F, Lu T. *ApJ*, 1999, 520: 634
- [44] Dai Z G, Lu T. *ApJ*, 2000, 537: 803
- [45] Dai Z G, Gou L J. *ApJ*, 2001, 552: 72
- [46] Dai Z G, Huang Y F, Lu T. *MNRAS*, 2001, 324: 11
- [47] Dai Z G, Lu T. *ApJ*, 2002, 565: 87
- [48] Dai Z G, Wu X F. *ApJ*, 2003, 591: 21
- [49] Dai Z G, Liang E W, Xu D. *ApJ*, 2004, 612: 101
- [50] Dai Z G, Wu X F, Wang X Y, et al. *ApJ*, 2005, 629: 81
- [50] Huang Y F, Dai Z G, Lu T. *A&A*, 1998, 336: 69
- [52] Huang Y F, Dai Z G, Lu T. *MNRAS*, 1999, 309: 513
- [53] Huang Y F, Dai Z G, Lu T. *A&A*, 2000, 355: 43
- [54] Huang Y F, Gou L J, Dai Z G, et al. *ApJ*, 2000, 543: 90
- [55] Huang Y F, Dai Z G, Lu T. *MNRAS*, 2000, 316: 943
- [56] Huang Y F, Tan C Y, Dai Z G, et al. *ChA&A*, 2002, 26: 414
- [57] Wang X Y, Dai Z G, Lu T. *MNRAS*, 2000, 317: 170
- [58] Wang X Y, Dai Z G, Lu T. *ApJ*, 2001, 546: 33
- [59] Wang X Y, Dai Z G, Lu T. *Ap&SS*, 2005, 297: 155
- [60] Gou L J, Dai Z G, Huang Y F, et al. *A&A*, 2001, 368: 464
- [61] Fan Y Z, Dai Z G, Huang Y F, et al. *ChJAA*, 2002, 2: 449
- [62] Wu X F, Dai Z G, Huang Y F, et al. *MNRAS*, 2003, 342: 1131
- [63] Wu X F, Dai Z G, Huang Y F, et al. *ChJAA*, 2004, 4: 455
- [64] Wu X F, Dai Z G, Huang Y F, et al. *MNRAS*, 2005, 357: 1197
- [65] Zou Y C, Wu X F, Dai Z G. *MNRAS*, 2005, 363: 93
- [66] Xu D, Dai Z G, Liang E W. *ApJ*, 2005, 633: 603
- [67] Wang F Y, Dai Z G. *MNRAS*, 2006, 368: 371
- [68] Wang F Y, Dai Z G. *ChJAA*, 2006, 6: 561
- [69] Wei D M, Lu T. *ApJ*, 1998, 499: 754
- [70] Wei D M, Lu T. *ApJ*, 2000, 541: 203
- [71] Wei D M, Lu T. *MNRAS*, 2001, 320: 37
- [72] Wei D M, Lu T. *MNRAS*, 2002, 332: 994
- [73] Wei D M, Jin Z P. *A&A*, 2003, 400: 415
- [74] Wei D M, Lu T. *ApJ*, 1998, 505: 252
- [75] Dai Z G, Lu T. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81: 4301

- [76] Wijers R, Rees M J, Mészáros P. MNRAS, 1997, 288: 51
- [77] Waxman E. ApJ, 1997, 485: 5
- [78] Mészáros P, Rees M J, Wijers R. ApJ, 1998, 499: 301
- [79] Chevalier R A, Li Z Y. ApJ, 1999, 520: 29
- [80] Chevalier R A, Li Z Y. ApJ, 2000, 536: 195
- [81] Panaitescu A, Kumar P. ApJ, 2002, 571: 779
- [82] Zhang B, Mészáros P. ApJ, 2002, 571: 876
- [83] Rossi E, Lazzati D, Rees M J. MNRAS, 2002, 332: 945
- [84] Zhang B. ChJAA, 2007, 7: 1
- [85] Mészáros P. Rep. Prog. Phys., 2006, 69: 2259
- [86] Fox D B, Mészáros P. New J. Phys., 2006, 8: 199
- [87] Kawai N, Kosugi G, Aoki K, et al. 2006, Nature, 440: 184
- [88] Gehrels N, Sarazin C L, O'Brien P T, et al. Nature, 2005, 437: 851
- [89] Dermer C. ApJ, 1998, 501: L157
- [90] Bloom J S, Frail D A, Sari R. AJ, 2001, 121: 2879
- [91] Woosley S E. ApJ, 1993, 405: 273
- [92] Vietri M, Stella L, ApJ, 1998, 507: L45
- [93] Eichler D, Livio M, Piran T, et al. Nature, 1989, 340: 126
- [94] Paczynski B. Acta Astronomica, 1991, 41: 257
- [95] Piran T. Rev. Mod. Phys., 2004, 76: 1143
- [96] Cavallo G, Rees M J, MNRAS, 1978, 183: 359
- [97] Goodman J. ApJ, 1986, 308: L47
- [98] Paczyński B. ApJ, 1986, 308: L43
- [99] Harding A, Baring M. AIPC, 1994, 307: 520
- [100] 吴雪峰. 博士学位论文, 南京: 南京大学天文系, 2005: 43
- [101] Piran T. Phys. Rep., 1999, 314: 575
- [102] Zhang B, Mészáros P. Int. J. Mod. Phys. A, 2004, 19: 2385
- [103] Paczyński B, Xu G H. ApJ, 1994, 427: 708
- [104] Rees M J, Mészáros P. ApJ, 1994, 430: L93
- [105] Kobayashi S, Piran T, Sari R. ApJ, 1997, 490: 92
- [106] Katz J. ApJ, 1994, 422: 248
- [107] Mészáros P, Rees M J. MNRAS, 1992, 257: 29
- [108] Rees M J, Mészáros P. MNRAS, 1992, 258: 41
- [109] 范一中. 硕士学位论文, 南京: 南京大学天文系, 2003: 24
- [110] Huang Y F, Cheng K S. MNRAS, 2003, 341: 263
- [111] Sari R, Piran T. ApJ, 1995, 455: L143
- [112] Piran T. Nature, 2003, 422: 268
- [113] Gehrels N, Chincarini G, Giommi P, et al. ApJ, 2004, 611: 1005
- [114] Barthelmy S D, Barbier L M, Cummings J R, et al. Space Science Reviews, 2005, 120: 143
- [115] Burrows D N. Space Science Reviews, 2005, 120: 165
- [116] Roming P W, Kennedy T E, Mason K O, et al. Space Science Reviews, 2005, 120: 95
- [117] http://Swift.gsfc.nasa.gov/docs/Swift/about_Swift/, 2007
- [118] http://Swift.gsfc.nasa.gov/docs/Swift/archive/GRB_table/, 2007
- [119] Butler N R, Kocevski D. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0612/0612564v3.pdf, astro-ph/0612564, 2006
- [120] Evans P A, Beardmore A P, Page K L, et al. http://xxx.lanl.gov/PS_cache/arxiv/pdf/0704/0704.0128v2.pdf, astro-ph/0704.0128, 2007
- [121] Zhang B, Fan Y Z, Dyks J, et al. ApJ, 2006, 642: 354

- [122] Nousek J A, Kouveliotou C, Grupe D, et al. *ApJ*, 2006, 642: 389
- [123] Sari R, Piran T, Halpern J P. *ApJ*, 1999, 519: L17
- [124] Mészáros P. *AIPC*, 2006, 836: 234
- [125] Zhang B. *AIPC*, 2005, 801: 106
- [126] Kumar P, Panaitescu A. *ApJ*, 2000, 541: L51
- [127] Panaitescu A, Mészáros P, Gehrels N, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 1357
- [128] Dyks J, Zhang B, Fan Y Z. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0511/0511699v1.pdf, astro-ph/0511699, 2005
- [129] O'Brien P, Willingale R, Osborne J, et al. *ApJ*, 2006, 647: 1213
- [130] Liang E W, Zhang B, O'Brien P T, et al. *ApJ*, 2006, 646: 351
- [131] Zhang B B, Liang E W, Zhang B. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0612/0612246v3.pdf, 2006
- [132] Mészáros P, Rees M J. *MNRAS*, 1999, 306: L39
- [133] Pe'er A, Mészáros P, Rees M J. *ApJ*, 2006, 652: 482
- [134] Mészáros P, Rees M J. *ApJ*, 2001, 556: L37
- [135] Ramirez-Ruiz E, Celotti A, Rees M J. *MNRAS*, 2002, 337: 1349
- [136] Rees M J, Mészáros P. *ApJ*, 2005, 628: 847
- [137] Ramirez-Ruiz E. *MNRAS*, 2005, 363: L61
- [138] Kumar P, Piran T. *ApJ*, 2000, 535: 152
- [139] Tagliaferri G, Goad M, Chincarini G, et al. *Nature*, 2005, 436: 985
- [140] Kobayashi S, Zhang B, Mészáros P, et al. *ApJ*, 2007, 655: 391
- [141] Rees M J, Mészáros P. *ApJ*, 1998, 496: L1
- [142] Sari R, Mészáros P. *ApJ*, 2000, 535: L33
- [143] Rees M J, Mészáros P. *ApJ*, 2000, 545: L73
- [144] MacFadyen A I, Woosley S E, Heger A. *ApJ*, 2001, 550: 410
- [145] Ramirez-Ruiz E. *MNRAS*, 2004, 349: L38
- [146] Lee W H. *ApJ*, 2002, 577: L893
- [147] Zhang B, Mészáros P. *ApJ*, 2001, 552: L35
- [148] Fan Y Z, Piran T, Xu D. *JCAP*, 2006, 9: 13
- [149] MacFadyen A I, Woosley S E, Heger A. *ApJ*, 2001, 550: 410
- [150] De Pasquale M, Grupe D, Poole T S, et al. *MNRAS*, 2006, 370: 1859
- [151] Liang E W, Zhang B B, Zhang B. http://xxx.lanl.gov/PS_cache/arxiv/pdf/0705/0705.1373v1.pdf, astro-ph/0705.1373, 2007
- [152] Fan Y Z, Xu D. *MNRAS*, 2006, 372: 19
- [153] Yu Y W, Dai Z G. 2007, *MNRAS* submitted
- [154] Troja E, Gusumano G, O'Brien G, et al. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0702/0702220v2.pdf astro-ph/0702220, 2007
- [155] Zhang W Q, Woosley S E, Heger A. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0701/0701083v1.pdf astro-ph/0701083, 2007
- [156] Eichler D, Granot J. *ApJ*, 2006, 641: L5
- [157] Zou Y C, Dai Z G. *ChJAA*, 2006, 6: 551
- [158] Granot J, Kumar P. *MNRAS*, 2006, 366: L13
- [159] Jin Z P, Yan T, Fan Y Z, et al. *ApJ*, 2007, 656, L57
- [160] Ioka K, Toma K, Yamazaki R, et al. *A&A*, 2006, 458: 7
- [161] Fan Y Z, Piran T. *MNRAS*, 2006, 369: 197
- [162] Panaitescu A, Mészáros P, Burrows D, et al. *MNRAS*, 2006, 369: 2059
- [163] Romano P, Moretti A, Banat P L, et al. *A&A*, 2006, 450: 59
- [164] Burrows D N, Romano P, Falcone A, et al. *Science*, 2005, 309: 1833

- [165] Chincarini G, Moretti A, Romano P, et al. <http://lanl.arxiv.org/ftp/astro-ph/papers/0612/0612121.pdf>, astro-ph/0612121, 2006
- [166] Gehrels N, Chincarini G, Giommi P, et al. *ApJ*, 2005, 621: 558
- [167] Falcone A D, Burrows D N, Lazzati D, et al. *ApJ*, 2006, 641: 1010
- [168] Chincarini G, Moretti A, Romano P, et al, http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0702/0702371v1.pdf, astro-ph/0702371, 2007
- [169] Guetta D, D'Elia V, Fiore F, et al. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0610/0610512v1.pdf, astro-ph/0610512, 2006
- [170] Zou Y C, Dai Z G, Xu D. *ApJ*, 2006, 646: 1098
- [171] Staff J, Ouyed R, Bagchi M. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0608/0608470v2.pdf, astro-ph/0608470, 2006
- [172] Wu X F, Dai Z G, Wang X Y, et al. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0512/0512555v1.pdf astro-ph/0512555, 2005
- [173] Huang Y F, Cheng K S, Gao T T. *ApJ*, 2006, 637: 873
- [174] Fan Y Z, Wei D M. *MNRAS*, 2005, 364: 42
- [175] Perna R, Armitage P G, Zhang B. *ApJ*, 2006, 636: L29
- [176] King A, O'Brien P T, Goad M R, et al. *ApJ*, 2005, 630: L113
- [177] Proga D, Zhang B. *MNRAS*, 2006, 370: L61
- [178] Dai Z G, Wang X Y, Wu X F, et al. *Science*, 2006, 311: 1127
- [179] Gao W H, Fan Y Z. *ChJAA*, 2007, 6: 513
- [180] Kumar P, Piran T. *ApJ*, 2000, 532: 286
- [181] Akerlof C, Balsano R, Barthelmy S, et al. *nature*, 1999, 398: 400
- [182] Fox D W, Yost S, Kulkarni S R, et al. *nature*, 2003, 422: 284
- [183] Fox D W, Price P A, Soderberg A M, et al. *ApJ*, 2003, 586: 5
- [184] Wang X Y, Dai Z G, Lu T, *MNRAS*, 2000, 319: 1159
- [185] Zhang B, Kobayashi S, Mészáros P. *ApJ*, 2003, 595: 950
- [186] Wei D M, *A&A*, 2003, 402: 9
- [187] Jakobsson P, Hjorth J, Fynbo J P U, et al. *ApJ*, 2004, 617: 21
- [188] Roming P W, Schady P, Fox D B, et al. *ApJ*, 2006, 652: 1416
- [189] Zhang B, Kobayashi S. *ApJ*, 2005, 628: 315
- [190] Beloborodov A M. *ApJ*, 2005, 618: 13
- [191] Kobayashi S, Zhang B, Mészáros P, et al. *ApJ*, 2007, 655: 391
- [192] Li Z, Dai Z G, Lu T, et al. *ApJ*, 2003, 599: 380
- [193] McMahon E, Kumar P, Piran T. *MNRAS*, 2006, 366: 575
- [194] Wei D M, Yan T, Fan Y Z. *ApJ*, 2006, 636: 69
- [195] Wei D M. *MNRAS*, 2007, 374: 525
- [196] Band D L, Norris J P, Bonnell J T. *ApJ*, 2004, 613: 484
- [197] Bromm V, Coppi P S, Larson R B. *ApJ*, 1999, 527: 5
- [198] Abel T, Bryan G L, Norman M L, *Science*, 2002, 259: 93
- [199] Lamb D Q, Reichart D E. *ApJ*, 2000, 536: 1
- [200] Gou L J, Mészáros P, Abel T. *ApJ*, 2004, 604: 508
- [201] Waston N, Reeves J N, Hjorth J, et al. *ApJ*, 2006, 637: L69
- [202] Boër M, Atteia J L, Damerdjy Y, et al. *ApJ*, 2006, 638: L71
- [203] Cusumano G, Mangano V, Chincarini G, et al. *Nature*, 2006, 440: 164
- [204] Totani T, Kawai N, Kosugi G, et al. *PASJ*, 2006, 58: 485
- [205] Gou L J, Fox D B, Mészáros P. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0612/0612256v1.pdf, astro-ph/0612256, 2006
- [206] http://Swift.gsfc.nasa.gov/docs/Swift/archive/GRB_table/, 2007

- [207] Villasenor J S, Lamb D Q, Ricker G R, et al. *Nature*, 2005, 437: 855
- [208] Fox D B, Frail D A, Price P A, et al. *Nature*, 2005, 437: 845
- [209] Fenimore E E, Ricker G, Atteia J L, et al. *GCN*, 2004, 2735: 1
- [210] Soderberg A M, Kulkarni S R, Price P A, et al. *ApJ*, 2006, 636: 391
- [211] Soderberg A M, Berger E, Kasliwal M, et al. *ApJ*, 2006, 650: 261
- [212] Faber J A, Baumgarte T W, Shapiro S L, et al. *ApJ*, 2006, 241:L93
- [213] Norris J P, Bonnell J T. *ApJ*, 2006, 643: 266
- [214] Nakar E. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0701/0701748v1.pdf astro-ph/0701748, 2007
- [215] Burrows D N, Racusin J. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0702/0702633v1.pdf, astro-ph/0702633, 2007
- [216] Panaitescu A. http://xxx.lanl.gov/PS_cache/astro-ph/pdf/0705/0705.1015v1.pdf, astro-ph/0705.1015, 2007
- [217] Norris J, Marani G F, Bonnell J T. *ApJ*, 2000, 534: 248
- [218] Gehrels N, Norris J P, Barthelmy S D, et al. *Nature*, 2006, 444: 1044
- [219] Fenimore E E, Ramirez-Ruiz E. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0004/0004176v2.pdf, astro-ph/0004176, 2000
- [220] Guidorzi C, Frontera F, Montanari E, et al. *MNRAS*, 2006, 371: 843
- [221] Li L-X, Pacynski B. *MNRAS*, 2006, 366: 219
- [222] Amati L, Frontera F, Tavani M, et al. *A&A*, 2002, 390: 81
- [223] Yonetoku D, Murakami T, Nakamura T, et al. *ApJ*, 2004, 609: 935
- [224] Firmani C, Avila-Reese V, Ghisellini G, et al. *MNRAS*, 2006, 370: 185
- [225] Frail D, Kulkarni S R, Sari R, et al. *ApJ*, 2001, 562: 55
- [226] Ghirlanda G, Ghisellini G, Lazzati D. *ApJ*, 2004, 616: 331
- [227] Liang E W, Zhang B. *ApJ*, 2005, 633: 611
- [228] Willingale R, O'Brien, P T, Osborne J P, et al. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0612/0612031v1.pdf, astro-ph/0612031, 2006
- [229] Fynbo J P U, Watson D, Thone C C, et al. *Nature*, 2006, 444: 1047
- [230] Della V M, Chincarini G, Panagia N, et al. *Nature*, 2006, 444: 1050
- [231] Gal-Yam A, Fox D B, Price P A, et al. *Nature*, 2006, 444: 1053
- [232] King A, Olsson E, Davies M B. *MNRAS*, 2007, 374: L34
- [233] Cantiello M, Yoon S C, Langer N, et al. http://lanl.arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0702/0702540v1.pdf, astro-ph/0702540, 2007
- [234] Zhang B, Zhang B B, Liang E W, et al. *ApJ*, 2007, 655: 25
- [235] Soderberg A M, Kulkarni S R, Nakar E, et al. *Nature*, 2006, 442: 1014
- [236] Campana S, Mangano V, Blustin A J, et al. *Nature*, 2006, 442: 1008
- [237] Liang E W, Zhang B, Dai Z G, Virgili F. http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0605/0605200v3.pdf, astro-ph/0605200, 2006
- [238] Mazzali P A, Deng J, Nomoto K, et al. *Nature*, 2006, 442: 1018
- [239] Toma K, Ioka K, Sakamoto T, et al. *ApJ*, 2007, 659: 1420
- [240] Ovaldsen J E, Jaunsen A O, Fynbo J P U, et al. http://xxx.lanl.gov/PS_cache/astro-ph/pdf/0703/0703388v1.pdf, astro-ph/0703388, 2007
- [241] Prochaska J X, Chen H W, Dessauges-Zavadsky M, et al. http://xxx.lanl.gov/PS_cache/astro-ph/pdf/0703/0703665v1.pdf, astro-ph/0703665, 2007
- [242] Price P A, Songaila A, Cowie L L, et al. http://xxx.lanl.gov/PS_cache/astro-ph/pdf/0705/0705.4101v1.pdf, astro-ph/0705.4101, 2007
- [243] Ghirlanda G, Ghisellini G, Firmani C. *New J.Phys.* , 2006, 8: 123
- [244] Hurley K. *Nature*, 1994, 372: 652
- [245] <http://glast.gsfc.nasa.gov/science/433-SRD-0001-CH-03.pdf>, 2007

Observational Study of Gamma-ray Bursts in Swift era

DONG Yun-ming^{1,2}, LU Tan²

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China; 2. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Gamma-ray bursts (GRBs) are powerful explosions in soft gamma-ray bands in the Universe, with some distinct characters—short lasting times, high energies and powerful explosions. They remain mystery for long times since their detection in the late 1960's. The breakthroughs took place in 1991 with the launch of the Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) and in 1997 with the first X-ray afterglow detected by the Italian-Dutch satellite Beppo-SAX. A new era in GRB research on early afterglows began since the launch of the Swift satellite on November 20, 2004. Now, more than 200 GRBs and early afterglows are detected by the Swift satellite. The early afterglows, the afterglows of short GRBs and the high redshift GRBs are observed by Swift. These new phenomena of GRBs give us some new clues and methods to investigate the nature and origin of GRBs. In this paper, firstly, we briefly review the history of GRBs, and then introduce the physical picture of the GRB study. Secondly, the structures and the functions of Swift satellite are presented in § 3. Finally, we discuss the observational achievements of Swift and the theoretical challenge, including the early afterglows, the afterglows of short GRBs and high redshift GRBs.

Key words: astrophysics; gamma-ray bursts; Swift satellite; afterglow