

文章编号: 1000-8349(2011)02-175-16



# Swift 时代伽马射线暴的观测和理论

林一清

(厦门理工学院 数理系, 厦门 361024)

**摘要:** 伽马射线暴是宇宙中最剧烈的爆发现象之一。Swift 卫星的快速定位和 Fermi 卫星的宽、高能段观测, 使得伽马暴的观测可以全波段进行。通过 Swift 的观测可以对伽马暴现象的本质有进一步的理解, 而 Fermi 卫星提供了一些暴高能光子的辐射数据, 为进一步研究暴的辐射机制和伽马暴以及它的余辉提供了有力的依据。介绍了 Swift 和 Fermi 卫星发射后一些伽马暴的观测和理论研究进展。

**关键词:** 伽马射线暴; 辐射机制; 伽马射线

**中图分类号:** P172.3      **文献标识码:** A

## 1 引 言

Swift, 一个多波段的伽马射线暴 (Gamma-ray burst, 简称 GRB) 观测卫星, 由于其快速定位, 使得我们对 GRB 现象的本质有了进一步的理解。Fermi 的地面 GRB 监测器 (Gamma-ray Bursts Monitor, 简称 GBM) 和大范围望远镜 (Large Area Telescope, 简称 LAT) 可以观测到很宽的能量波段的谱 (从 8 keV 到大于 300 GeV), 为我们研究暴的辐射机制和 GRB 及其余辉提供了有力的依据。本文将介绍 Swift 和 Fermi 卫星发射后一些 GRB 的观测和理论研究进展, 更详细的关于 Swift 暴的理论和观测总结见参考文献 [1-3]。

## 2 伽马暴 X 射线余辉辐射和光学辐射

### 2.1 X 射线余辉的光变曲线和 X 射线耀发

Swift 的快速反应能力和自带的 X 射线探测器 (XRT) 为探测 X 射线余辉辐射带来了极大

---

收稿日期: 2010-06-23; 修回日期: 2010-11-17

资助项目: 福建省青年人才创新项目 (2007F3105)

的方便。

X 射线余辉的一个特征是, 其光变曲线通常可以分为 4 个阶段<sup>[4]</sup>: (1) 早期紧随暴之后的快速下降阶段, 时间幂律指数可达  $-3$  以下; (2) 紧接着慢下降, 时间指数约为  $-0.5$ ; (3) 然后是时间指数为  $-1.2$  的衰减; (4) 再然后可能拐折到  $-2$  的下降, 具体见图 1<sup>[4-5]</sup>。(1)、(3) 和 (4) 阶段都有比较好的解释<sup>[4-6]</sup>。

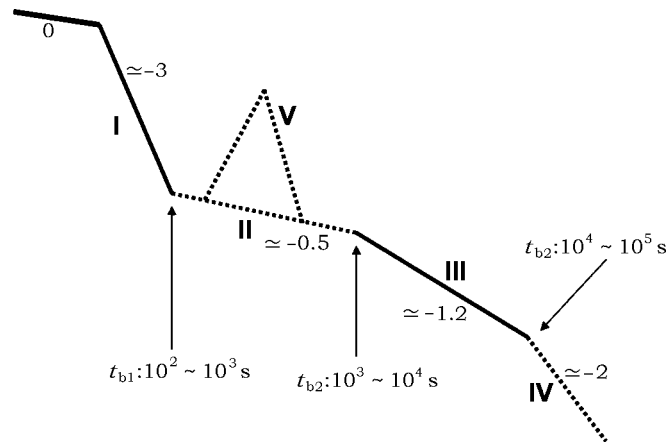


图 1 早期 X 射线余辉四阶段示意图

虚线处的峰是指可能出现的 X 射线耀发, 取自文献 [4]。

在第一阶段有两种可能的机制<sup>[3]</sup>: 首先认为是由于处于高纬度的锥状喷流辐射要晚于低纬度的, 所以观测到的是暴本身在高纬度的辐射 (由于多普勒变换使流量下降), 一般称为曲率效应 (curvature effect, 或称尾巴辐射, tail emission)<sup>[8-10]</sup>。下面是对这个效应的详细解释: 考虑一些环状的子喷流从中心引擎中喷射出来, 通过内激波碰撞合并成一个大的环状喷流。假定这个最终的喷流密度均匀, 边缘是间断的, 以洛伦兹因子为  $\gamma$  向外运动。假设环状喷流在某半径  $R_c$  处 (相应的观测时间为  $t_c$ ) 忽然放出辐射并马上停止, 然后计算在环的高纬度地方的辐射。则辐射来自的维度  $\theta$  与观测时间  $t$  的关系是:

$$t = (1+z) \left( \frac{R_c}{c} \right) \left( \frac{\theta^2}{2} \right) + t_c, \quad (1)$$

其中  $z$  是宇宙学红移。如果视线没有太靠近边缘, 尾巴辐射的持续时间为:

$$t_{\text{tail}} = (1+z) \left( \frac{R_c}{c} \right) \left( \frac{\theta^2}{2} \right) \cong (330\text{s}) \left( \frac{R_c \theta_j^2}{10^{13} \text{cm} \cdot \text{rad}^2} \right) \left( \frac{1+z}{2} \right), \quad (2)$$

$\theta_j$  为喷流的张角。忽略喷流的厚度和等时面效应, 并定义  $L'_{\nu}$  为共动系各向同性的辐射强度, 则观测者所观测到的辐射流强为:  $F_{\nu} \propto L'_{\nu} D^2$ , 其中  $D^2 = [\gamma(1 - \sqrt{1 - 1/\gamma} \cos\theta)]^{-1}$  为多普勒因子。在早期有两种极限情况:  $\theta \ll 1/\gamma$  时,  $D^2 \simeq 2\gamma$ ; 而  $\theta \gg 1/\gamma$  时,  $D^2 \simeq 2/(\gamma\theta^2)$ 。由于  $t \propto \theta^2$ , 因此我们得到  $\theta \gg 1/\gamma$  时,  $F_{\nu} \propto L'_{\nu} D^2 \propto (\nu')^{-\beta} D^2 \propto \nu^{-\beta} t^{-2-\beta}$ , 其中  $\beta$  是观测频率  $\nu$  上辐射的谱指数。这种近似对所有  $1/\gamma \ll \theta < \theta_j$  的情况总是成立的。如果第一阶段 (即陡降部分) 是不同壳层在不同半径处的高维辐射, 其洛伦兹因子极大, 满足  $\theta \gg 1/\gamma$ , 于

是时间指数为  $-(2 + \beta)$ 。如果还考虑时间零点效应, 这个下降会更陡<sup>[11]</sup>。第二种可能的机制是与喷流相联系的热等离子体茧的辐射产生。如果发射光深在  $100 \sim 1\,000$  时, 有相当一部分的茧动能被消耗, 那么这些在喷流之后以相对论膨胀的等离子体就会冲破恒星表层, 形成早期的快速衰减<sup>[11]</sup>。

阶段三是正常的晚期余辉辐射。阶段四是由于喷流效应导致的拐折。而阶段二是一个在观测之前未预测到的现象, 这个慢下降的阶段几乎是所有暴都具有的现象, 一般可以延续到  $10^3 \sim 10^4$  s, 并且从阶段二到阶段三的转变过程中, 谱指数并不改变<sup>[4]</sup>。这个变平现象可能为中心能量的持续注入<sup>[4,5,12,13]</sup>, 但是可能给伽马暴的辐射效率带来困难<sup>[14]</sup>。目前已出现很多针对变平的解释: 多个子喷流模型<sup>[15]</sup>、环状喷流的高纬辐射<sup>[16,17]</sup>、变化的微观参数<sup>[18]</sup>、偏小的电子能量、低密度介质等<sup>[19]</sup>。

X 射线余辉的另一个特征是: 在近一半的 Swift 暴 X 射线余辉中, 观测到一类流量快速上升随后快速衰减的耀发现象<sup>[20-22]</sup>, 在长暴<sup>[21]</sup>和短暴<sup>[22]</sup>余辉中均有发现。图 2 (a) 为长暴 GRB050502B 的 X 射线耀发现象, (b) 为短暴 GRB050724 的 X 射线耀发现象。有一些 X 射线耀发的暴, 由于峰值能量小于 15 keV, 被定名为 X 射线闪<sup>[23-25]</sup>。

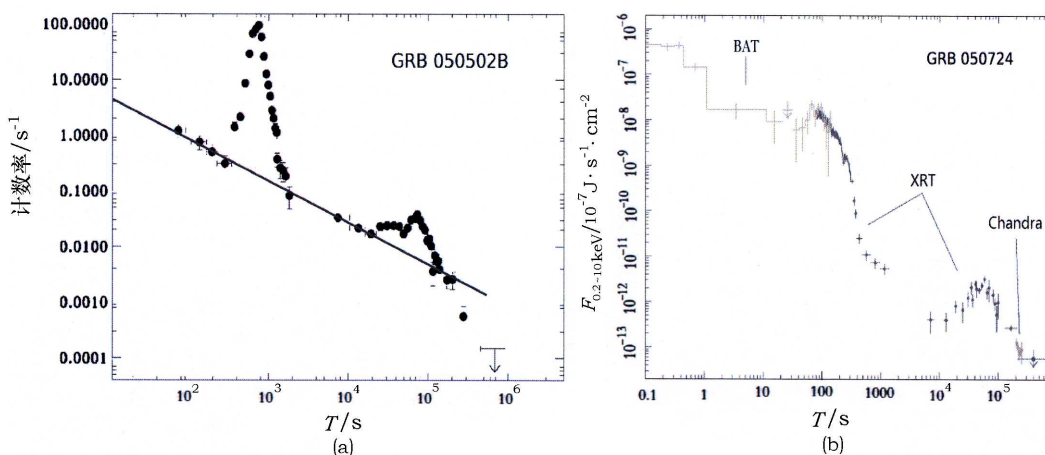


图 2 X 射线耀发现象<sup>[21,22]</sup>

(a) 为长暴 GRB050502B 的 X 射线耀发现象, (b) 为短暴 GRB050724 的 X 射线耀发现象。

X 射线耀发和鼓包的特点是: Swift 暴中, 50% 的 X 射线余辉具有 X 射线耀发; 对不同的暴, 出现的耀发次数不定; 耀发时标远小于余辉时标, 且每个脉冲的宽度随出现的时间变晚而变宽; 短暴中 X 射线耀发出现在约 100 s 后; 一次 X 射线耀发总能量与瞬时伽马暴辐射能的比值为  $0.1 \sim 1$ , 但是也有例外, 如 GRB050502B<sup>[24]</sup>; Swift 暴中 60% 的 X 射线余辉中观测到 X 射线鼓包, X 射线耀发和 X 射线鼓包是负相关的。

早期 X 射线耀发激起了人们对中心能源机制特别是针对短暴的浓厚兴趣, 一般认为是中心能源的持续活动所致<sup>[5,6,25,26]</sup>。戴等人<sup>[27]</sup>认为双中子星并合会先形成超大质量较差旋转的中子星, 由较差旋转驱动的磁重联过程产生短暴 X 射线耀发。也有人认为短暴是超大质量磁星起源, 它塌缩成黑洞之前可以有耀发, 用以解释 GRB050709 的一个 X 射线耀发<sup>[28]</sup>。也

有人给了一个短暴模型：中子星 + 白矮星系统，中子星由于吸积塌缩成黑洞，产生伽马暴，白矮星碎裂，被黑洞吸积，产生 X 射线耀发<sup>[29]</sup>。

## 2.2 光学辐射的探测

GRB041219A 是 Swift 观测到的第一个具有光学辐射的暴，它具有超长的持续时间和与暴同时的光学辐射，而且它也是很少几个观测到暴阶段的光学辐射的暴之一<sup>[30-32]</sup>。

大约 95% 的暴可以观测到 X 射线余辉，但是只有大约一半的 Swift 暴中观测到光学余辉。根据光变曲线的形状将光学余辉分为 4 种类型：快速上升的早峰，慢上升的晚峰，平高原和首次测量后的迅速衰减，图 3 列出 28 个已知红移的伽马暴的光学余辉光变曲线<sup>[33]</sup>。

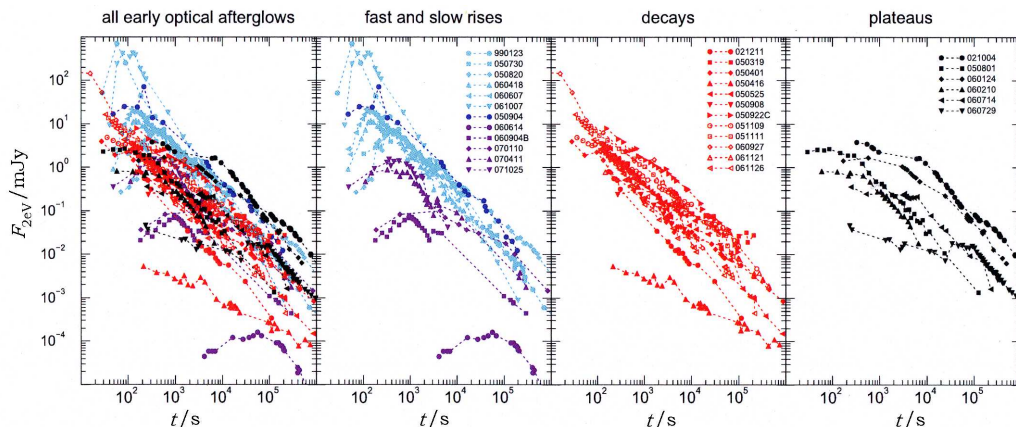


图 3 28 个已知红移的 GRB 光学余辉光变曲线及其形状分类，取自文献<sup>[33]</sup>

还有大约一半的暴没有观测到光学余辉，这些暴被称为暗暴。对于暗暴的成因目前有很

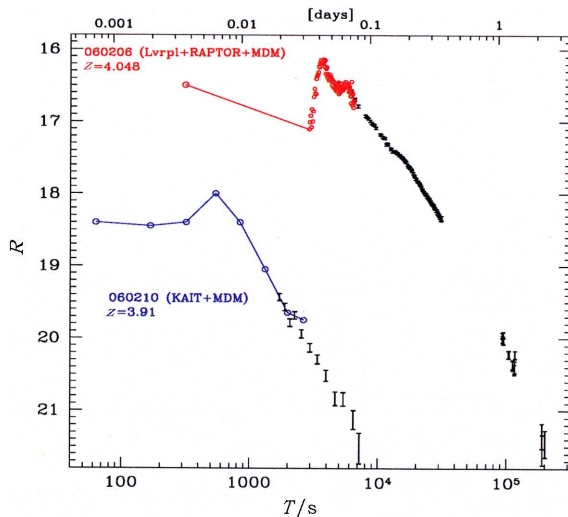


图 4 GRB060206 和 GRB060210 的早期反常光学辐射，取自文献<sup>[35]</sup>

多解释, 比如环境吸收、低密度环境、快速衰减、尘埃吸收、高红移引起的 Ly-alpha 覆盖和吸收, 以及本身弱源等, 但是到目前为止还没有定论 [34]。

尽管光学余辉的观测比较少, 但是观测到的光学辐射大多有一个反常的性质, 一个平坦下降接着一个快速上升, 然后下降, 图 4 是 GRB060206 和 GRB060210 早期的反常光学辐射 [35]。一般来说, 在一个大质量星的生命中, 会形成一个星风泡沫环境, 微观激波参数会随着火球的演化而改变, 那么在风泡沫环境的基础上, 改变微观激波参数可以解释这些反常的光学辐射 [18]。也有人认为这些反常的光学余辉来源于中心能源机制产生的一个大角度喷流状的喷射物 [36]。

个别暴的光学余辉很亮, 甚至可以用眼睛直接观测, 如 GRB080319B [37]。

### 3 短暴的余辉和宿主星系的观测

短暴由于发生时标短, 衰减很快, 必须观测仪器响应也快, 才有可能看到短暴的余辉, Swift 刚好具有这个能力。在 Swift 之前, 短暴的余辉还没有被肯定地观测到。有几个短暴被宣称探测到光学余辉, 例如 GRB000301C [38] 和 GRB040924 [39,40]。然而这几个暴的持续时标约为 1~2 s, 在较软的 X 射线波段甚至长于 2 s, 因此不能算完全意义上的短暴。严格说来, 只有探测到持续时标不超过 0.3 s 的短暴光学或射电余辉才能算是真正标志着短暴余辉研究时代的到来。GRB050509 是 Swift 卫星探测到的一个持续时标仅 30 ms 的短暴, 它的早期 (爆发后 62~262 ms) X 射线也被 Swift/BAT 探测到, 其流量比一般情形低 [41]。现在有 GRB050509B [42], GRB050709 [43], GRB050724 [44], GRB051210 [45], GRB051221A [46] 等观测到了余辉。图 5 给出短暴 GRB050709 的余辉 [43]。

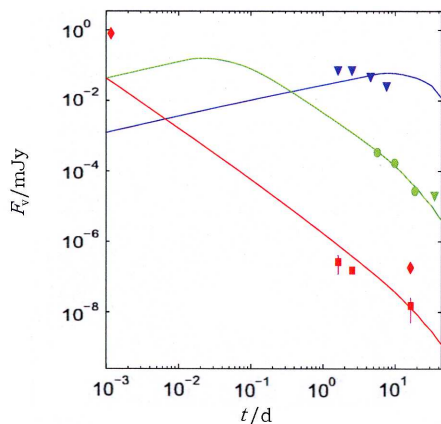


图 5 短暴 GRB050709 余辉的观测  
从下往上分别是 X 射线、光学和  
射电波段的观测, 取自文献 [43]。

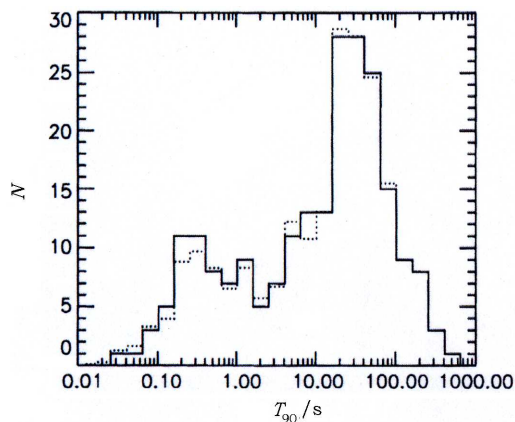


图 6 CGRO/BATSE 观测到的 222 个 GRB  
的持续时间  $T_{90}$  的分布, 取自文献 [50]

短暴的精确定位使得对短暴宿主星系的探测成为可能, 虽然目前对宿主星系的观测数目仍然比较少, 但是对余辉和宿主星系的观测比较确定地排除了短暴的塌缩星模型和磁星

模型等,短暴极有可能由双致密星的并合产生。在已有的样本中,既有恒星形成星系也有椭圆星系<sup>[43,44,47-49]</sup>,其中与椭圆星系成协这一点表明至少有一些短暴的前身星与老年星族有关,支持了短暴起源于双致密星并合的观点。更多数据的积累将有助于统计短暴的红移、宿主星系、短暴在宿主星系中的位置,从而更好地确定短暴的起源。

#### 4 一些 Swift 暴的观测对 GRB 分类问题提出疑问

经典 GRB 的分类是根据持续时间,一般用  $T_{90}$ (指光子数累积计数从 5% 到 95%) 或者  $T_{50}$ (指光子数累积计数从 25% 到 75%) 作为典型时标。目前公认的分类方法是由 Kouveliotou 等人<sup>[50]</sup>提出的,他们对 CGRO/BATSE 暴进行分析,发现瞬时辐射持续时间  $T_{90}$  呈双峰分布,平均值分别是 26.2 s 和 0.33 s,如图 6,由此将 GRB 分为长暴( $T_{90} > 2$  s)和短暴( $T_{90} < 2$  s)。然而,部分 Swift 暴的观测对这种分类法提出疑问。例如: GRB060614, GRB060505, GRB090426 等的观测使人们重新考虑 GRB 的分类。首先,没有证据表明长暴 GRB060614 ( $T_{90}=104$  s) 和 GRB060505 ( $T_{90}=4$  s) 与超新星成协<sup>[51-54]</sup>,不符合长暴的塌缩星模型<sup>[55]</sup>。陆等人<sup>[56]</sup>提出 GRB060614 是一个特殊的暴,可能是一个中等质量黑洞捕获一颗恒星导致的。长暴 GRB060614 的一些观测性质、特征都跟典型短暴相似<sup>[57]</sup>,使得它们更像一个短暴。其次, GRB090426 的持续时间  $T_{90}=1.2$  s<sup>[58]</sup>,无疑应该归为短暴,但是对宿主星系和早期余辉的性质分析表明它与大质量恒星的中心塌缩星模型相关<sup>[58,59]</sup>。最后, Swift/BAT 的光变曲线表明几乎一半短暴在一个 0.1 ~ 1 s 的硬辐射之后,还有一个较软的延展性伽马辐射和一个晚期的 X 射线耀发,大概持续 10 ~ 100 s,如图 7 所示,这个延展性辐射使短暴变成长暴<sup>[22,60]</sup>。

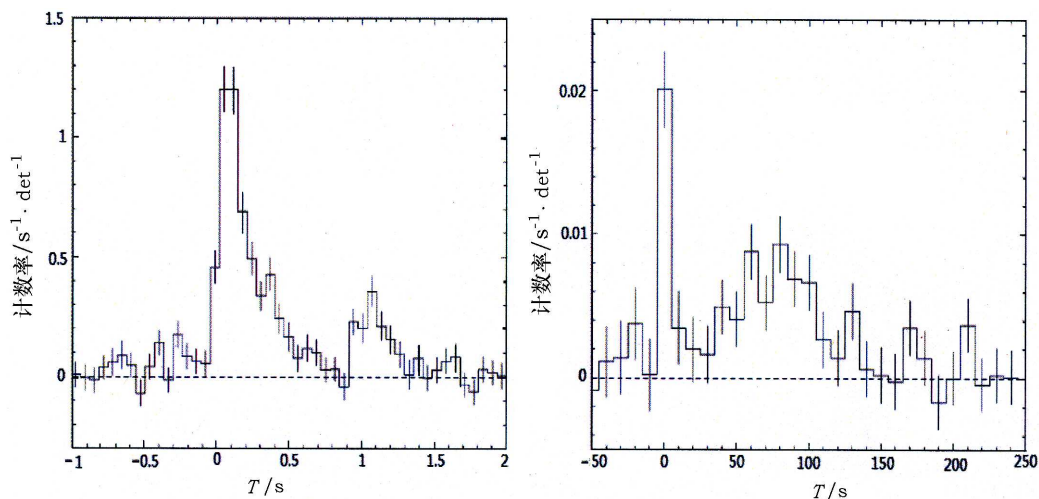


图 7 短暴 GRB050724 的 BAT 光变曲线以及延展性辐射,取自文献 [22]

从观测上,一般来说,瞬时 GRB 的谱都有从硬到软的变化,因此很难把延展性辐射从硬 spike 中分出来。对这些短暴延展性辐射的观测,使得人们很难把这些暴归到长暴或者短暴,对我们传统的分类方式提出新的挑战。因此认为对 GRB 的分类必须根据它们的余辉、宿主星系,而不仅仅是暴本身的持续时间<sup>[4]</sup>。

## 5 有红移暴的进展

BATSE 长期观测的结果表明, GRB 在角分布上具有高度各向同性, 在径向上呈现非均匀分布, 这意味着 GRB 很可能是宇宙学起源, 而非银河系内起源<sup>[61]</sup>。

自从 2004 年 Swift 卫星发射以来, 具有确定红移的暴的数量大大提高。图 8 列出从 Swift 发射到 2007 年 9 月共 109 个暴红移的分布<sup>[62]</sup>。Swift 暴的红移平均值在 1.95 左右, 而之前暴红移的平均值在 1 左右, Swift 暴的红移比以前的暴要高。这个区别可能是由于 Swift 观测卫星比以前的观测卫星 BeppoSAX 和 HETE-2 要灵敏。

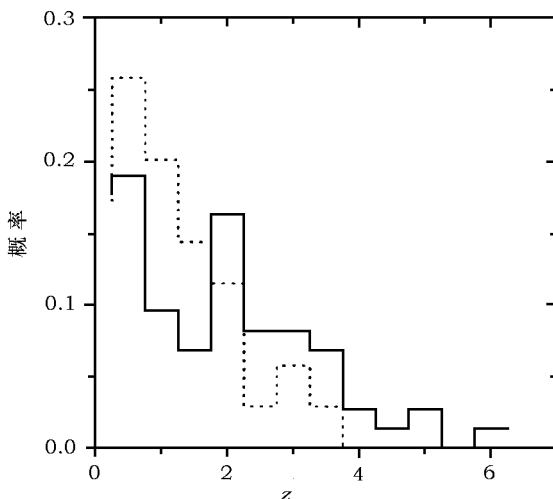


图 8 Swift 暴和 BATSE 暴红移的分布, 取自文献 [62]

### 5.1 高红移 GRB 和 GRB 宇宙学

伽马暴瞬时辐射和余辉是宇宙深处最亮的指路明灯, 它们可以在  $z > 10$  的地方用现在的观测仪器比如 Swift/BAT 和 Fermi/GBM 观测到<sup>[63-65]</sup>。更大量的可以探测到红移的暴的样本不仅可以用来决定瞬时辐射<sup>[66]</sup>和余辉辐射<sup>[67]</sup>的光度函数问题, 而且可以用来做宇宙学研究<sup>[68]</sup>。

GRB 目前在宇宙学上的应用主要是作为标准烛光测距离, 相对于超新星其主要优点是可以延伸到极远处。一般认为长暴可以作为宇宙中红移在 2~10 之间的标准烛光。很多研究群体根据 GRB 观测数据对宇宙学提出一些限制<sup>[69-72]</sup>, 尽管在这些分析中, 对 GRB 的光度引擎还不是特别清晰, 而且它们的校准也还是一个大问题<sup>[73-75]</sup>。

目前 GRB 的红移分布从 0.008 5 (GRB980425)<sup>[76]</sup> 到 8.2 (GRB 090423)<sup>[77]</sup>, 成为理想的探测高红移介质的探针。

GRB 也是探测高红移处恒星形成史、宇宙金属丰度演化史的理想工具<sup>[78-80]</sup>。由于长暴与大质量恒星的死亡相关, 因此可以用来探测恒星形成史。为了研究 GRB 和恒星形成之间的关系, 人们往往假定 GRB 的爆发率与恒星形成率 SFR(全称 star formation rate)成正比, 对预测的 GRB 红移分布与观测分布进行比较<sup>[81-83]</sup>。如果 GRB 与恒星形成率有关, 那么 GRB

的爆发率与恒星形成率的比值  $R_{\text{GRB/SFR}}$  应该不会随着红移的改变而改变。但是, 根据目前对恒星形成历史的理解和 Swift 暴的红移分布关系, 如图 9, 发现  $R_{\text{GRB/SFR}}$  随着红移的升高而升高, 这可能意味着 GRB 的爆发率既同恒星形成史有关, 也和金属演化史有关 [84]。

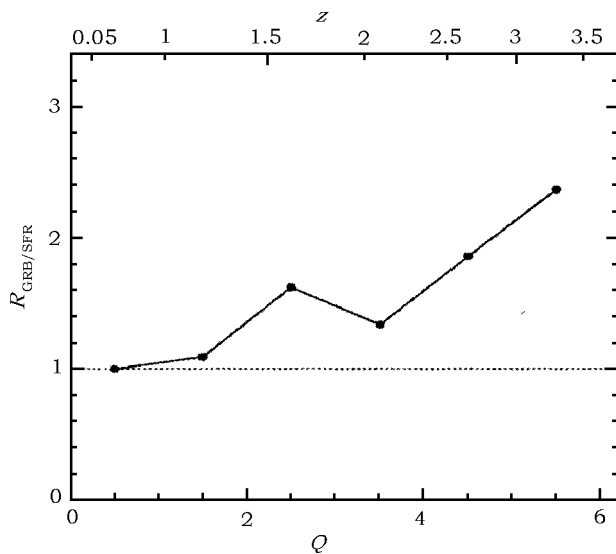


图 9 GRB 的爆发率与恒星形成率的比值与红移的关系, 取自文献 [84]

## 5.2 低红移 GRB 和 X 射线闪

X 射线闪 (X-Ray flash, 简称 XRF) 具有比典型 GRB 更软的谱和更低的各项同性能, 是 GRB 向更低更软谱的延伸, 是 GRB 的一个子类 [85–87]。早期推测 X 射线闪是发生在较远处的 GRB, 由于宇宙学效应使得它们更软、更弱。但是对一些 GRB 红移的测量发现, 有一些 X 射线闪是发生在附近的事件, 比如: XRF020903 的红移为 0.251 [88], XRF040701 的红移为 0.21 [89]。对红移系统性的研究也表明 X 射线闪并不是高红移处的 GRB [90]。

低红移、低光度的暴 GRB060218 (红移  $z = 0.033$  [91], 各项同性能  $E_{\text{iso}} = 1.9 \times 10^{42} \text{ J}$  [92]), 是 2006 年 GRB 观测上的重大发现之一, 是一个 GRB 与超新星成协的重要例子。GRB060218 是 Swift/BAT 触发具有超长持续时间 ( $T_{90} = 2100 \text{ s}$ ) 的暴 [93], XRT 仪器在 BAT 触发之后 153 s 开始观测, 并且持续了 12.3 d, X 射线光变曲线有一个长的慢上升和逐渐衰减的趋势 [94]。GRB060218 的谱从硬的 BAT 能段演化到软的 XRT 能段, 随着时间的演化有一个峰值能量发生在  $E_p = 4.9 \text{ keV}$  的软 X 射线波段, 因此被认为是 X 射线闪 [95]。根据 GRB060218 的非热光变曲线特征和能谱, 发现这个暴的辐射机制和过程跟典型暴没有很大的差异, 所以观测到的长时标、软谱可能是由于这个暴的整体洛伦兹因子较低所致 [96]。

GRB060218 独特在两个方面: 伴随着瞬时非热辐射有一个很强的 X 射线热辐射; 在早期, 大概  $t < 1 \text{ d}$  有一个很强的光学辐射。Campana 等人 [95] 发表在《Nature》上的文章也提出 GRB060218 早期辐射里有温度为 0.17 keV 左右的热成分, 这种热成分的起源有助于解释 GRB060218 观测现象。用传统的模型无法解释这个暴的热 X 射线辐射和光学余辉, 有人对大约 103 s 以后的晚期射电数据进行拟合, 认为 GRB 瞬时辐射可能来源于一种内部引擎, 如磁



星的作用<sup>[97,98]</sup>。但是这个模型仅仅解释射电余辉,而认为 X 射线余辉是一个中心引擎的持续活动,并且没有对瞬时 X 射线辐射和早期的光学辐射进行解释<sup>[97,98]</sup>。关于这个早期的光学余辉和瞬时辐射中的热 X 射线辐射,目前有多种可能的解释。首先, Campana 以及 Waxman 等人<sup>[95,99]</sup>提出用一个非球膨胀的超新星激波爆发模型来解释这个热辐射成分。热 X 射线辐射的高能和持续时间很长意味着激波辐射半径要比前身星的半径大很多,即有一个很大的质量损失率。在激波气体变成光薄之后,正在膨胀的超新星喷射物中就会发出热辐射。同时,用超新星抛射物在激波爆发时的整体康普顿辐射机制可以解释非热伽马辐射和 X 射线闪<sup>[100]</sup>。但是,这样的一种起源不大可能是早期发生的,并且光学辐射的这一部分其实是热 X 射线辐射成分向低能段的延伸<sup>[95]</sup>。Chisellini 等人<sup>[101]</sup>强调光学辐射要求的辐射面要比热 X 射线成分的延伸大得多,提出光学辐射来源于一个自吸收的同步辐射源。这种辐射机制要求的亮温度比较高,辐射面比较小。类比余辉的标准模型,他们提出用相对论喷流来解释。Bjornsson 等人<sup>[102]</sup>提出另外一种模型,认为光学辐射是由于光学厚的回旋加速辐射产生。这种模型的关键是吸收电子的高温,就像普通的伽马暴一样,从原子核出来的热量在半相对论内激波中被加速,库仑碰撞把部分的能量传给电子,而 X 射线光子的逆康普顿冷却使得电子温度约 100 keV。这样一个比较高的亮温度的光学辐射意味着一个与热 X 射线成分相似的辐射区域。这就可以用一个模型把射电、光学和热 X 射线辐射紧紧地联系在一起。光学和热 X 射线辐射是两个独立的谱成分,但是它们都来自于一个准球形、连续外流的光球,这个光球跟环境介质的作用产生射电辐射。

## 6 Fermi 的观测和相关理论

### 6.1 Fermi 的观测

Fermi 是 2008 年 6 月 11 日发射升空的高能望远镜,能段在 8 keV 到 300 GeV,其中包含两个仪器:地面 GRB 监测器(8 keV~40 MeV)<sup>[103]</sup>和大范围望远镜(20 MeV~300 GeV)<sup>[104]</sup>。从 Fermi 卫星发射到 2010 年 1 月 22 日,共观测到 375 个 GRB,图 10 给出 LAT 和 GBM 观

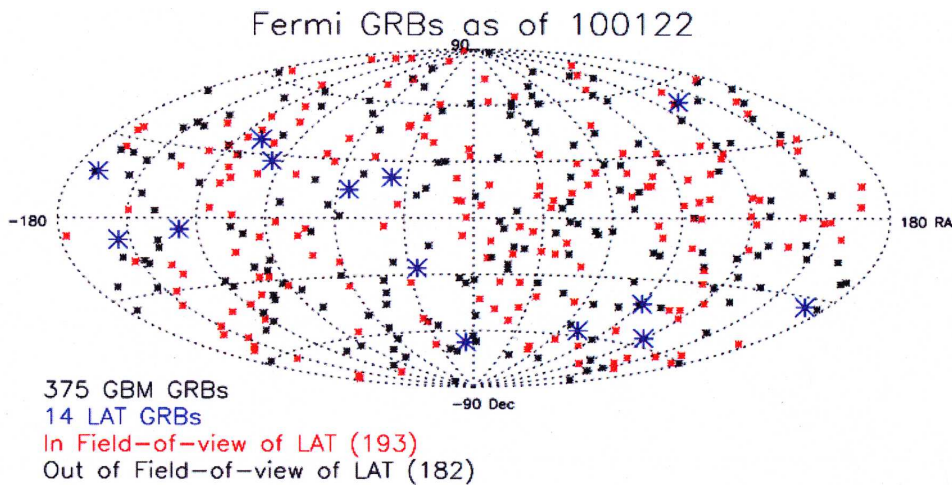


图 10 截至到 2010 年 1 月 22 日 Fermi 暴的空间分布,取自文献 [105]

测到的 GRB 的空间分布<sup>[105]</sup>。大于 100 MeV 暴的观测由于对源环境有一个限制, 并且可以帮助理解能源问题而受到特别的关注, 虽然 LAT 之前的高能观测仪器 (CGRO/EGERT, AGILE) 也曾经观测到几个大于 100 MeV 的光子<sup>[106-108]</sup>, 但不足以确定 GRB 的辐射机制<sup>[108-110]</sup>。现在的 LAT 与之前的高能探测仪器相比, 视场、角分辨率和有效观测区域都大大提高, 到 2010 年 4 月共探测到 16 个高能光子 ( $> 100$  MeV)。LAT 的探测率为每年 9.3 个, 这个探测率意味着 GRB 瞬时爆发阶段辐射出来的能量只有 10%~20% 被 LAT 探测到, 大部分 GRB 的高能辐射并不影响总能量<sup>[111]</sup>。Fermi 对伽马暴高能光子进行观测发现一些有趣的现象, 如 GeV 辐射的延迟到达和持续时间比瞬时软伽马辐射的持续时间长<sup>[112]</sup>。图 11 给出了 LAT 观测的 GRB080825C、GRB081024B 和 GRB090217 的瞬时辐射的光变曲线<sup>[105]</sup>。从曲线中我们可以看到 LAT 高能光子相对于 GBM 低能光子延迟到达。GRB080825C, 最高光子能量为 572 MeV, 延后时间大约是 35 s; GRB081024B, 最高光子能量 3.1 GeV, 延时大约是 3 s; 而 GRB090217 几乎没有延时和高能光子的辐射<sup>[105]</sup>。对于这个延时有多种不同的解释, 可能是由于 GeV 和 TeV 的光子具有不同的物理起源<sup>[110]</sup>, 也可能是早期外流有很强的重子污染, 洛仑兹因子太小导致辐射区域对 GeV 的光子是光学厚的<sup>[113]</sup>。

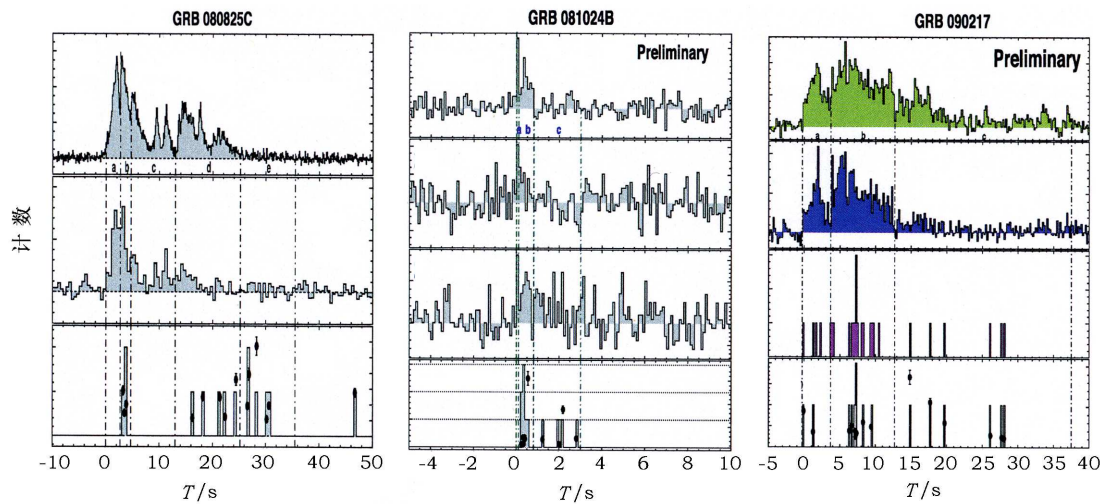


图 11 LAT 观测到 GRB080825C、GRB081024B 和 GRB090217 的瞬时光变曲线

竖直的虚线表示分析用的时间间隔, 取自文献 [105]。

其次, 人们对 GRB090510 和 GRB090902B 的研究发现, 延展高能辐射 ( $> 100$  MeV) 的持续时间比瞬时辐射的亚 MeV 辐射持续时间长<sup>[114,115]</sup>。Abdo 等人<sup>[114]</sup>提出强子喷流辐射模型来解释这个现象, 即高能光子不能逃逸出软光子的场, 引起喷流辐射。Kumar 等人<sup>[116]</sup>提出 GRB080916C 的高能延展辐射是由外激波的同步加速辐射产生的。这个模型被用来解释其他伽马暴的高能延展辐射, 例如 GRB090510<sup>[117-120]</sup>和 GRB 090902B<sup>[121]</sup>。王等人<sup>[122]</sup>利用 Klein-Nishina 效应来解释延展高能辐射, 发现可以很好地解释 GRB090510 和 GRB090902B 的延展高能辐射。最后, GRB080916C 的数据显示了 keV-MeV-GeV 谱的连接完全符合 Band

函数<sup>[123]</sup>, 而没有任何谱的截断, 或者在 MeV-GeV 之间有附加的鼓包, 如图 12(a) 所示<sup>[115]</sup>, 而短暴 GRB090510 的 GeV 波段的瞬时辐射谱除了 Band 谱外, 还有一个硬的幂律谱<sup>[114]</sup>, 如图 12(b) 所示。另外, 在长暴 GRB090902B 中, 也发现了一个硬的幂律谱<sup>[114]</sup>。

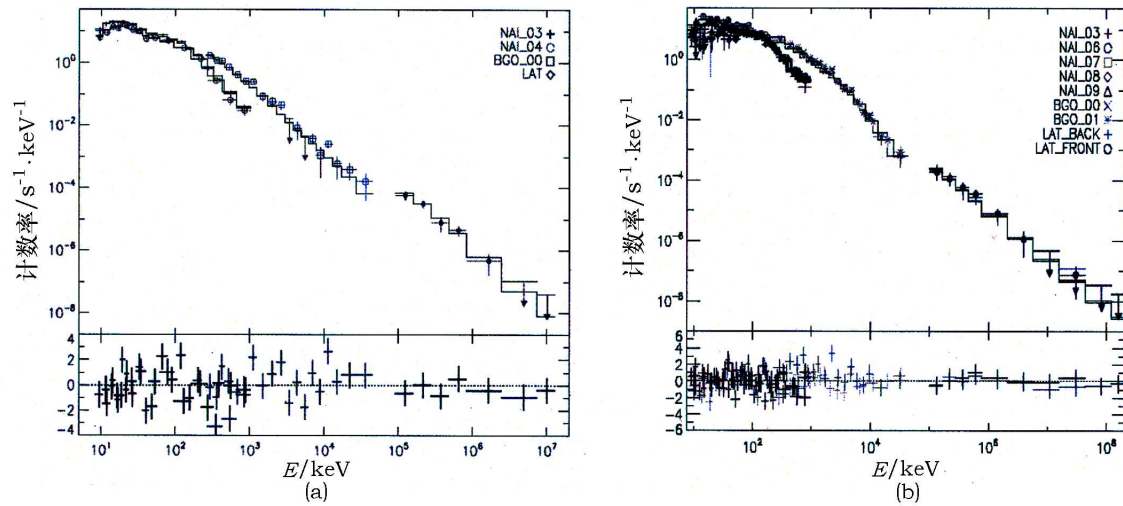


图 12 GRB080916C GBM 和 LAT 谱的连接, 分别取自文献 [114] 和文献 [115]

## 6.2 限制洛伦兹对称性破缺

洛伦兹不变性是爱因斯坦狭义相对论的一个假定, 根据暴 GRB080916C (具有最高的光子能量, 在暴后 16.54 s 达到 13.22 GeV) 的数据计算, 得到 LIV (Lorentz invariance violating) 的限制, 即对量子引力质量尺度的保守下限,  $M_{QG,1} > 0.1 M_{\text{Planck}}$ <sup>[111]</sup>, 比以前最好的估算高一个数量级。

LAT 探测到来自红移为 0.9 处的短时标 (持续时间小于 2 s) 非常亮的 LAT 暴 GRB090510, 在其光变曲线中可以看到非常窄而尖的 Spike, 参见文献 [115] 中的图 1。根据该暴中探测到一个能量为 31 GeV 的光子相对于其他低能伽马光子的到达时间滞后 (小于 0.86 s), 第一次得到线性洛伦兹破缺所对应的量子引力能比普朗克能量还大, 即  $M_{QG,1} > M_{\text{Planck}}$ <sup>[111]</sup>, 排除了洛伦兹对称性破缺的可能性, 证明了爱因斯坦在狭义相对论中提出的洛伦兹不变性假设是正确的。

## 6.3 对洛伦兹因子下限的限制

GRB 瞬时爆发具有非常大的各向同性, 很短的时间尺度, 及大量的光子能量  $\geq m_e c^2$ 。这样的高能光子应该具有很大的光深而无法被观测到, 这就是“Compactness problem”<sup>[124]</sup>。解决这个问题要求伽马暴物质运动一开始必须是相对论的, 即用辐射区域的相对论膨胀来解决这个问题。对于 EGRET 观测到的一些暴, 光子能量大约在 100 MeV, 为了从辐射区域逃离, 避免  $\gamma\gamma$  衰减, 辐射区域的洛伦兹因子要求很大,  $\Gamma \geq 10^2$ <sup>[125-129]</sup>。

Fermi/LAT 卫星观测更多更高能的伽马暴辐射, 有一些很亮的暴的谱延伸到 GeV, 甚至到十几个 GeV, 中间没有任何截断。假设这些高能光子的  $\gamma\gamma$  光深小于 1, 可以获得更高的洛伦兹因子,  $\Gamma \geq 10^3$ <sup>[110,114,130]</sup>。上面的计算一般都有两个假设。首先, 所有的光子, 高能

的和低能的都是在同一区域和同一时间产生, 但是 Fermi 观测表明相对 MeV 辐射, 高能辐射有所延迟, 而持续时间却较长<sup>[114,130,131]</sup>; 其次, 光子频谱被假定为延伸到无穷高频处, 但是 Li 等人<sup>[132]</sup>指出, 由于吸收, 高能谱的末端被截断, 用这样的光子计算  $\gamma\gamma$  光深显然不自洽。赵等人<sup>[133]</sup>根据 3 个 Fermi/LAT 亮暴 GRB080916C、GRB090510 和 GRB090902B 谱的研究, 修改上面两个假定, 得到这 3 个暴洛伦兹因子下限的限制, 如图 13 所示。

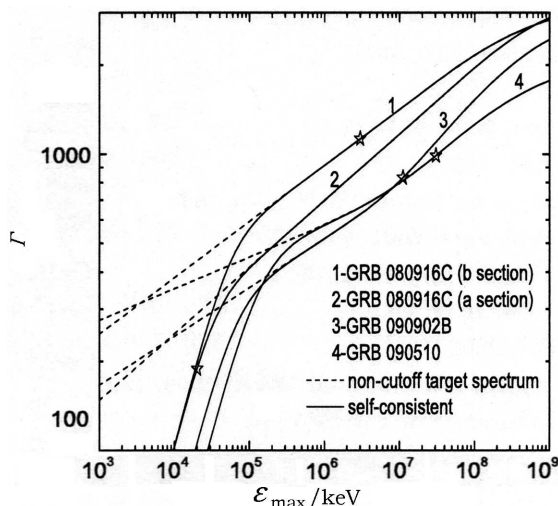


图 13 3 个亮暴的最大能量和洛伦兹因子的关系, 取自文献 [133]

目前 Fermi 正常运行, 它与 Swift 卫星以及其他地面的高能观测设备 (如 MILAGRO, VERITAS, HESS, MAGIC) 使得对 GRB 的观测和研究首次可以在全能段范围内进行。但是, Fermi 的观测数据很多都还没处理, 观测的时间也不是很长, 我们期待 Fermi 有更多新发现。

## 7 致 谢

感谢邹远川和王发印毕业论文中对 Swift 和 Fermi 暴的一些总结。

## 参考文献:

- [1] Gehrels N, Ramirez-Ruiz E, Fox D B. *A&A*, 2009, 47: 567
- [2] Zhang B. *ChJAA*, 2007, 7: 1
- [3] Meszaros P. *Reports on Progress in Physics*, 2006, 69: 2259
- [4] Zhang B, Fan Y Z, Dyks J, et al. *ApJ*, 2006, 642: 354
- [5] Nousek J A, Kouveliotou C, Grupe D, et al. *ApJ*, 2006, 642: 389
- [6] Zhang B. *International Journal of Modern Physics A*, 2005, 20: 3151
- [7] Meszaros P, Rees M J. *MNRAS*, 1999, 306: L29
- [8] Kumar P, Panaitescu A. *ApJ*, 2000, 541: L51

- [9] Zou Y C, Dai Z G. *ChJAA*, 2006, 6: 551
- [10] Zhang B, Fan Y Z, Dyks J, et al. *ApJ*, 2006, 642: 354
- [11] Wu X F, Dai Z G, Wang X Y, et al. *AdSpR*, 2007, 40: 1827
- [12] Dai Z D, Lu T. *Phys. Rev. Lett.* 1998, 81: 4301
- [13] Yu Y, Huang Y F. *ChJAA*, 2007, 7: 669
- [14] Ioka K, Toma K, Yamazaki R, et al. *A&A*, 2006, 458: 7
- [15] Toma K, Ioka K, Yamazaki R, et al. *ApJ*, 2006, 640: 137
- [16] Fan Y Z, Wei D M. *MNRAS*, 2005, 364: 42
- [17] Xu M, Huang Y F, Kong S W. *ChJAA*, 2008, 8: 411
- [18] Kong S W, Wong A Y, Hang Y F, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 409
- [19] Fan Y Z, Piran T. *MNRAS*, 2006, 369: 197
- [20] O'Brien P T, Willingale R, Osborne J, et al. *ApJ*, 2006, 647: 1213
- [21] Burrows D N, Romano P, Falcone P, et al. *Science*, 2005, 309: 1833
- [22] Barthelmy S D, Chincarini G, Burrows D N, et al. *Nature*, 2005, 438: 994
- [23] Schady P, Gronwall C, Mason K O, et al. *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, 2005, 207
- [24] Romano P, Moretti A, Banat P L, et al. *A&A*, 2006, 450: 59
- [25] Cusumano G, Mangano V, Chincarini G, et al. *Nature*, 2005, 440: 164
- [26] Wu X F, Dai Z G, Wang X Y, et al. *cosp*, 2005, 36: 1531
- [27] Dai Z G, Wang X Y, Wu X F, et al. *Science*, 2006, 311: 1127
- [28] Gao W H, Fan Y Z. *ChJAA*, 2006, 6: 513
- [29] Dermer C D, Atoyan A. *ApJ*, 2006, 643: 13
- [30] Vestrand W T, Wozniak P R, Wren J A, et al. *Nature*, 2005, 435: 178
- [31] Blake C H, Bloom J S, Starr D L, et al. *Nature*, 2005, 435: 181
- [32] McBreen S, Hanlon L, McGlynn S, et al. *A&A*, 2006, 455: 433
- [33] Panaitescu A, Vestrand W T. *MNRAS*, 2008, 387: 497
- [34] Lin Y Q. *ChJAA*, 2006, 6: 555
- [35] Stanek K Z, Dai X, Prieto J L, et al. *ApJ*, 2007, 654: 21
- [36] Liu X W, Wu X F, Lu T. *A&A*, 2008, 487: 503
- [37] Racusin J L, Karpov S V, Sokolowski M, et al. *Nature*, 2008, 455: 183R
- [38] Jaunsen A O, Hjorth J, Bjornsson G, et al. *ApJ*, 2001, 546: 127
- [39] Fenimore E E, Ricker G, Atteia J L, et al. *GCN*, 2004, 2375: 1
- [40] Fox D B, Caltech-NRAO GRB. *AAS*, 2004, 2051: 6008
- [41] Rol E, Page K, Burrows D N, et al. *GCN*, 2005, 3395: 1
- [42] Castro-Tirado A J, de Ugarte Postigo A, Gorosabel J, et al. *A&A*, 2005, 439: L15
- [43] Fox D B, Frail D A, Price P A, et al. *Nature*, 2005, 437: 845
- [44] Berger E, Price P A, Cenko S B, et al. *Nature*, 2005, 438: 988
- [45] La Parola V, Mangano V, Fox D, et al. *A&A*, 2006, 462: 73
- [46] Soderberg A M, Berger E, Kasliwal M, et al. *ApJ*, 2006, 650: 261
- [47] Gehrels N, Sarazin C L, O'Brien P T, et al. *Nature*, 2005, 437: 851
- [48] Bloom J S, Prochaska J X, Pooley D, et al. *ApJ*, 2006, 638: 354
- [49] Bloom J S, Perley D A, Chen H W, et al. *ApJ*, 2007, 654: 878
- [50] Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. *ApJ*, 1993, 413: L101
- [51] Gehrels N, Norris J, Barthelmy S D, et al. *Nature*, 2006, 444: 1044
- [52] Gal-Yam A, Fox D B, Price P A, et al. *Nature*, 2006, 444: 1053
- [53] Fynbo J P U, Watson D, Thone C C, et al. *Nature*, 2006, 444: 1047
- [54] Della Valle M, Chincarini G, Pamagosa N, et al. *Nature*, 2006, 444: 1050
- [55] Woosley S E, Bloom J S. *ARA&A*, 2006, 44: 507
- [56] Lu Y, Huang Y F, Zhang S N. *ApJ*, 2008, 684: 1330

- [57] Zhang B, Zhang B B, Liang E W, et al. *ApJ*, 2007, 655: L25
- [58] Levesque E M, Bloom J S, Butler N R, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 963
- [59] Antonelli L A, D'Avanzo P, Perna R, et al. *A&A*, 2009, 507: L45
- [60] Zhang B, Zhang B B, Virgili F J, et al. *ApJ*, 2009, 703: 1696
- [61] Paciesas W S, Meegan C A, Pendleton G N, et al. *ApJ*, 1999, 122: 465
- [62] Lin Y Q. *RAA*, 2009, 9: 613
- [63] Lamb D Q, Reichart D E. *ApJ*, 2000, 536: 1
- [64] Bromm V, Loeb A. *ApJ*, 2002, 575: 111
- [65] Gou L J, Fox D B, Meszaros P. *ApJ*, 2007, 668: 1083
- [66] Liang E W, Zhang B, Virgili F, et al. *ApJ*, 2007, 662: 1111
- [67] Akerlof C W, Swan H F. *ApJ*, 2007, 671: 1868
- [68] Chincarini G, Fiore F, DellaValle M, et al. *The Messenger*, 2006, 123: 54
- [69] Dai Z G, Liang E W, Xu D. *ApJ*, 2004, 612: 101
- [70] Ghirlanda G, Ghisellini G, Lazzati D. *ApJ*, 2004, 616: 331
- [71] Friedman A S, Bloom J S. *ApJ*, 2005, 627: 1
- [72] Liang E W, Zhang B. *ApJ*, 2005, 633: 611
- [73] Ghirlanda G, Ghisellini G, Firmani C, et al. *A&A*, 2006, 452: 839
- [74] Liang E W, Zhang B. *MNRAS*, 2006, 369: L37
- [75] Liang N, Xiao W K, Liu Y. *ApJ*, 2008, 685: 354
- [76] Galama T, Vreeswazj P M, van Paradijs J, et al. *Nature*, 1998, 395: 670
- [77] Salvaterra R, Della Valle M, Campapa S, et al. *Nature*, 2009, 461: 1258
- [78] Fynbo J P U, et al. *A&A*, 2006, 451: L47
- [79] Price P A, Cowie L L, Minezaki T, et al. *ApJ*, 2006, 645: 851
- [80] Prochaska J X, Chen H W, Dessauges-Zavadsky M, et al. *ApJ*, 2007, 666: 267
- [81] Totani T. *ApJ*, 1997, 486: L71
- [82] Le T, Dermer C D. *ApJ*, 2007, 661: 394
- [83] Coward D. *New Astron. Rev*, 2007, 51: 539
- [84] Li L X. *MNRAS*, 2008, 388: 1487
- [85] Liang E W, Dai Z G. *ApJ*, 2004, 608: L9
- [86] Lamb D Q, Donaghy T Q, Graziani C. *ApJ*, 2005, 620: 355
- [87] Lin Y Q. *ChJAA*, 2008, 8: 309
- [88] Soderberg A M, et al. *ApJ*, 2004, 606: 994
- [89] Soderberg A M, et al. *ApJ*, 2005, 627: 877
- [90] Gendre B, Galli A, Piro L. *A&A*, 2007, 465: 13
- [91] Mirabal N, Halpern J, Thorstensen J, et al. *ApJ*, 2006, 643: L99
- [92] Sakamoto T, Barbier L, Barthelmy S, et al. *GCN*, 2006, 4822: 1
- [93] Cumumano G, Barthelmy S, Blustin A J, et al. *GCN*, 2006, Circ.4775
- [94] Sakamoto T, Barbier L, Barhtelmy S, et al. *GCN*, 2006, Circ. 4822
- [95] Campana S, Mangano V, Blustin A J, et al. *Nature*, 2006, 442: 1008
- [96] Liang E W, Zhang B, Stamatikos M, et al. *ApJ*, 2006, 653: L81
- [97] Soderberg A M, Kulkarni S R, Nakar E, et al. *Nature*, 2006, 442: 1014
- [98] Fan Y, Piran T, Xu D. *JCAP*, 2006, 0609: 013
- [99] Waxman E, Mesaros P, Campana S. *ApJ*, 2007, 667: 351
- [100] Wang X Y, Li Z, Waxman E, et al. *ApJ*, 2007, 664: 1026
- [101] Chisellini C I. *ApJ*, 2008, 672: 443
- [102] Bjornsson C I. *ApJ*, 2008, 672: 443
- [103] Meegan C A, LichitiG, Bhat P N, et al. *ApJ*, 2009, 702: 791
- [104] Atwood W B, AdboA A, Ackermann M, et al. *ApJ*, 2009, 697: 1071

- [105] Ohno M. For the Fermi-LAT/GBM collaborations, 2010, arXiv:astro-ph/1002.0228
- [106] Hurley K, Dingus B L, Mukherjee R, et al. *Nature*, 1994, 372: 652
- [107] Wren D N, Bertsch D L, Ritz S. *ApJ*, 2002, 574: L47
- [108] Gonzalez M M, Dingus B L, Kaneko Y, et al. *Nature*, 2003, 424: 749
- [109] Granot J, Guetta D. *ApJ*, 2003, 598: L11
- [110] Katz J. *ApJ*, 1994, 432: L27
- [111] Granot J. for the Fermi LAT Collaboration, the GBM Collaboration 2010, arXiv: astro-ph/1003: 2452
- [112] Fan Y Z. 2009, arXiv: 0912: 1887
- [113] Zhang B, Kobayashi S, Meszaros P. *ApJ*, 2003, 595: 950
- [114] Abdo A A, Ackermann M, Arimoto M, et al. *Sci*, 2009, 323: 1688
- [115] Ackermann M, Asano K, Atwood W B, et al. *ApJ*, 2010, 716: 178
- [116] Kumar P, Barniol D R. *MRANS*, 2009, 400: 75
- [117] De Pasquale M, Schady P, Kuin N P M. *ApJ*, 2010, 709: 146
- [118] Gao W H, Mao J, Xu D, et al. *ApJ*, 2009, 706: L33
- [119] Ghirlanda G, Ghisellini G, Nava L. *A&A*, 2010, 510: 7
- [120] Ghisellini G, Ghirlanda G, Nava L. *MNRAS*, 2010, 403: 926
- [121] Piran T, Nakar E. *ApJ*, 2010, 718: 63
- [122] Wang X Y, He H N, Li Z, et al. *ApJ*, 2010, 712: 1232
- [123] Band D, Matteson J, Ford L, et al. *ApJ*, 1993, 413: 281
- [124] Piran T. *Phys. Rep.* 1999, 314: 575
- [125] Lithwick Y, Sari R. *ApJ*, 2001, 555: 540
- [126] Krolik H, Pier E A. *ApJ*, 1991, 373: 277
- [127] Fenimore E E, Epstein R I, Ho. *A&AS*, 1993, 97: 59
- [128] Woods E, Loeb A. *ApJ*, 1995, 453: 583
- [129] Baring M G, Harding A K. *ApJ*, 1997, 491: 663
- [130] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *Nature*, 2009, 462: 331
- [131] Abdo A A, Ackermann M, Asano K, et al. *ApJ*, 2009, 707: 580
- [132] Li Z. *ApJ*, 2010, 709: 525
- [133] Zhao X H, Li Z, Bai J M. 2010, arXiv:astro-ph/1005: 5229

## Observations and Theories of GRBs in the Swift Era

LIN Yi-qing

*(Physics and Mathematics department, Xiamen University of Technology, Xiamen, China , 361024)*

**Abstract:** Gamma-ray bursts (GRBs) are the most luminous phenomenon in the universe, and their origin and mechanism are very active areas of research and debate. Through nearly forty years development, today, gamma-ray bursts are accessible in full time window and in all electromagnetic wavelengths of the events, with the satellites Swift and Fermi. Swift, the NASA's dedicated GRB emission, was launched on 20th November 2004. With three instruments, Bursts

Alert Telescope (BAT), X-ray Telescope (XRT) and UV-Optical Telescope (UVOT), Swift can “swiftly” catch the unpredictable bursts of gamma-ray in random direction of the sky within less than 100 s. With its rapid-response capability and multi-wavelength observatory, the swift satellite has provided high-quality observations of hundreds of bursts, and facilitated a wide range of follow-up observations within seconds of each event. Swift has brought new surprises and challenges to our understanding of cosmological GRBs. The major discoveries of Swift can be concluded as following four points. First discovery is the identification of a canonical X-ray afterglow behavior. Besides the prompt emission phase, there are five components in the X-ray light curves, that are, the steep decay phase, the shallow decay phase, the normal decay phase and the post jet break phase. The other one is the discovery and the location of some short bursts, which enabled much more detailed studies of the bursts environment, the host galaxy, and the intergalactic, and favored the idea that short bursts are related to mergers of two compact stellar objects. Thirdly, Swift observations showed faint soft gamma-ray extensions or tails of some short GRBs, which means that they are not necessarily short. The traditional “short & long” classification regime breaks down, and another criteria is needed in order to define the two GRB categories. The fourth discovery of Swift is the detection of GRBs with redshift. GRB090423 has the unprecedented high redshift of  $z \simeq 8.2$ , and the mean redshift of the Swift bursts is  $> 2$ , which is a factor  $\simeq 2$  higher than the mean of the BeppoSAX and GETE-2 redshifts. The detection of a long burst, GRB060218, is also the exciting result from Swift for it is the first time that a GRB/SN has been observed minutes after the gamma-ray trigger at X-ray and UV/optical wavelengths. The Fermi gamma-ray space telescope, includes two instruments, Gamma-ray Bursts Monitor (GBM) and Large Area Telescope (LAT), launched on 11th June 2008. Fermi has opened a new high-energy window in the study of GRBs and provided a powerful tool for study of the radiation mechanisms and the physical conditions for GRBs and their afterglows.

**Key words:** gamma-ray bursts; radiation mechanism; gamma rays