第 48 卷 第 4 期 天 文 学 报 Vol.48 No.4
2007 年 10 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Oct., 2007

伽玛暴及其早期 X 射线余辉的观测特征*

林一清 †

(厦门理工学院数理系 厦门 361005)

摘要 Swift 卫星的 X 射线望远镜观测揭示部分伽玛暴的早期余辉光变曲线有一个缓慢衰减的成分，而相当一部分却没有这样的成分. 研究比较这两种暴的观测性质发现两类暴的持续时间、伽玛辐射总流量、谱指数、谱硬度比峰值能量等物理量均没有显著差异. 然而有该成分的那些伽玛暴谱比较软、早期 X 射线余辉比较弱、伽玛射线辐射效率显著高于没有这个成分的那些暴. 结果表明两类暴的前身星和中心机制一致，是否呈现这个缓慢衰减成分可能取决于外部介质.

关键词 γ 射线：暴， X- 射线：星系，星际介质：余辉
中图分类号： P 172; **文献标识码**： A

1 引言

伽玛暴是至今人类所观测到的最强烈的爆发现象 [1]. 自发现以来， CGRO/ BATSE (Compton Gamma-Ray Observatory/Burst And Transient Source Experiment) 、 BeppoSAX (Satellite per Astronomia X, 其中 Beppo 是为了纪念天文学家 Giuseppe Occhialini 而后来加上的) 等空间卫星的观测和地面望远镜的余辉跟踪观测使我们对这个爆发之谜有了本质的认识 [2]. 2004 年 11 月发射的 Swift 卫星以其快速 [3] 、多波段同时观测取得了一定的重要发现 [4], 其中就有完整的 X 射线余辉辐射. Swift 的 X 射线望远镜 (XRT) 给出了暴后几十秒到天甚至到 100 天 (比如 GRB 060729[5]) 的 X 射线辐射光变曲线. 这些光变曲线一般包括早期快速衰减成分 (幂率函数下降 $F \propto t^{-\alpha}$, α 大于 3 甚至更高 [6]) 、α 在 0.6 附近的缓慢下降成分和 α 在 1 附近的成分 [7,8]. 长时间对 X 射线观测发现一些暴具有类似于喷流所造成的快速下降 (下降指数 2 左右) 成分，而大部分的暴没有预期的多波段的喷流拐折，挑战了传统的喷流模型 [9,10]. 在余辉辐射过程中一些暴还伴随有不规则的 X 射线耀发 [11]. 早期的快速下降、缓慢衰减和不规则的 X 射线耀发是以前所未知的. 目前一般认为早期的快速下降部分是由于伽玛暴结束后的高纬度光子到达的时滞效应所致 [6,12,13], 也可能是晚期外激波或者是环形喷流辐射 [13,14]. Zhang[15] 最近发现这个成分有很强的由硬到软的谱演化，他们认为在这个过程中观测到的光子除曲率效应带来的时滞光子外，还有另外来自中心机制的余辉辐射或者内激波的余辉辐射. 那些无

2006-12-26 收到原稿， 2007-01-24 收到修改稿
* 厦门理工学院校内科研启动经费资助
† yqlin@xmut.edu.cn

规则的 X 射线耀发可能是由于中心机制的后期活动所致 [11,16−18], 其对应于新的辐射单元, 具有新的时间零点 [19], 跟内激波模型的预期是吻合的 [12]. 文 [20] 提出这些后期耀发是来自于爆发后形成的脉冲星 (而非黑洞) 校差自转能释放引起 [20], 因此, 有强后期耀发的暴持续时间可能很长 (比如 GRB 050904[21]). 缓慢下降成分的物理起源一直在争论中. 这个成分成因可能是由于中心机制晚期的能量注入 [6,7,22] 、偏轴效应 [23] 、双成分喷流效应或者是外部原因比如尘埃的散射 [24,25]. 我们注意到在 XRT (X-Ray Telescope) 的光变曲线中, 约 1/3 的暴并没有这个缓慢的下降成分 [26]. 本文通过比较有无缓慢下降成分暴的观测特征, 提供关于这个缓慢下降成分物理起源的线索.

2　数据

文 [16] 详细分析了 32 个暴的 Swift 伽玛暴警报望远镜 (BAT) 和 XRT 的观测数据, 并且利用这些早期 X 射线余辉数据研究了这些伽玛暴的效率. 我们直接利用这个样本, 而不考虑短暴. 这样, 得到有缓慢下降成分的暴 17 个 (样本 A) 和无下降成分的暴 12 个 (样本 B) 的观测数据, 包括持续时间 (T_{90}) 、 BAT 谱指数 (β_γ) 、谱硬度比 (HR) 、伽玛流量 (S_γ) 、 X 射线谱指数 (β_X) 以及在火球减速半径处的流量跟减速时标乘积 (S_X). 对于伽玛暴效率 (η), 我们使用当 $\epsilon_e = 0.1$, $\epsilon_B = 0.01$ 情形下在火球减速半径处所计算的结果. 所有的样本见表 1 和表 2.

表 1　有缓慢下降成分的暴的伽玛辐射和 X 射线余辉辐射的观测数据 (样本 A)

Table 1　The observational data of the prompt Gamma-rays and X-ray afterglows for the GRB with a shallow decay component(sample A)

GRB	T_{90} (s)	β_γ	HR	$\lg S_\gamma$ ($\mathrm{erg\,cm^{-2}}$)	E_p (keV)	β_X	$\lg S_X$ ($\mathrm{erg\,cm^{-2}}$)	$\eta(/100)$
GRB050126	30	1.36	1.6	-6.07	157	1.59	-8.23	56
GRB050219A	23	0.32	1.73	-5.38	102	1.02	-8.4	57
GRB050315	96	2.1	0.93	-5.49	37	1.5	-9.11	94
GRB050319	15	2.15	0.99	-5.91	28	2.02	-8.14	70
GRB050406	5	2.59	0.74	-7.09	24	1.37	-10.11	80
GRB050416A	5	3.09	0.44	-6.37	15	0.8	-8.51	5
GRB050422	60	1.38	1.54	-6.21	123	2.23	-8.2	69
GRB050712	48	1.48	1.42	-5.96	126	0.9	-7.86	2
GRB050713A	70	1.12	1.39	-5.28	312	1.3	-7.55	68
GRB050713B	75	1.53	1.4	-5.34	109	0.7	-8.23	91
GRB050714B	87	2.59	0.68	-6.24	20	4.5	-8.17	96
GRB050726	30	0.99	2.14	-5.70	984	0.94	-7.3	48
GRB050802	20	1.54	1.37	-5.66	118	0.91	-7.46	40
GRB050803	150	1.43	1.51	-5.65	150	0.71	-7.58	29
GRB050814	65	1.85	1.1	-5.74	58	1.08	-8.63	68
GRB050819	40	2.64	0.61	-6.45	15	1.18	-10.85	99
GRB050822	102	2.48	0.73	-5.58	36	1.6	-8.2	69

表 2 无缓慢下降成分的暴的伽玛辐射和 X 射线余辉辐射的观测数据 (样本 B)

Table 2 The observational data of the prompt Gamma-rays and X-ray afterglows for the GRB without a shallow decay component(sample B)

GRB	T_{90} (s)	β_γ	HR	$\lg S_\gamma$ ($\mathrm{erg\,cm^{-2}}$)	E_p (keV)	β_X	$\lg S_X$ ($\mathrm{erg\,cm^{-2}}$)	η (/100)
GRB050128	13.8	0.71	1.66	-5.29	118	0.85	-7.3	4
GRB050215B	10.4	2.45	0.84	-6.63	18	0.51	-8.31	1
GRB050401	38	1.15	1.5	-5.07	132	0.98	-6.42	3
GRB050502B	17.5	1.65	1.31	-6.33	102	0.81	-8.38	4
GRB050525	11.5	1.1	1.3	-4.81	80	1.07	-6.29	8
GRB050607	26.5	1.2	1.75	-6.22	393	0.77	-7.97	4
GRB050716	69	0.87	0.69	-6.24	20	0.33	-7.41	0.2
GRB050717	70	1.12	1.63	-5.84	1890	1.15	-6.63	14
GRB050721	39	1.87	1.06	-5.51	45	0.74	-6.78	2
GRB050801	20	1.95	1.03	-6.51	33	0.72	-7.7	11
GRB050820A	270	1.24	1.73	-5.08	284	0.87	-6.07	0.1
GRB050826	45	1.12	1.76	-6.35	240	1.27	-7.41	12

3 分析方法和结果

我们对两个样本的观测结果运用 t- 检验法来检验各个观测量的平均值是否有统计性差异. 该方法首先计算两个样本 A 和 B 的均值差异的标准差,

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{x_i\in A}(x_i-\overline{x}_A)^2+\sum_{x_i\in B}(x_i-\overline{x}_B)^2}{N_A+N_B-2}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_B}\,,\right)} \tag{1}$$

其中 x_i 为样本中某个观测量, $\overline{x}_A$ (或者 $\overline{x}_B$) 为该观测量在样本 A (或者 B) 中的均值, N_A (或者 N_B) 为样本的大小. 然后计算 t- 检验统计量,

$$t_D = \frac{\overline{x}_A-\overline{x}_B}{S_D}\,. \tag{2}$$

最后计算 t 检验统计量在某置信水平的统计概率 p, 并给出是否具有显著统计性差异判断 [27]. 我们选择统计置信水平为 0.05, 对两个样本的各个观测量进行 t- 检验, 得到的结果见表 3.

从表 3 可见, 在 0.05 的置信水平上, 两个样本的伽玛辐射观测量的平均值不具有统计意义上的差异, 而其 X 射线余辉就有显著的差异. 有缓慢下降成分的暴 (样本 A) 的 X 射线余辉谱, 较软、暗, 其谱指数平均值为 1.43 ± 0.90, 而辐射 X 射线流量的对数为 $\lg(S_x)=-8.38\pm0.92$. 无缓慢下降成分的 X 射线余辉却比较硬、亮, 其谱指数平均值为 0.84 ± 0.26, 辐射 X 射线流量比前者高约一个量级, 即 $\lg(S_x)=-7.22\pm0.78$.

4 结论和讨论

伽玛射线辐射效率是表征伽玛暴性质的一个重要物理量. 我们用 t- 检验法比较研究

X 射线余辉光变曲线中有无缓慢下降成分的伽玛暴的伽玛辐射和早期 X 射线余辉观测量，发现与有缓慢下降的暴的 X 射线余辉谱相比，无缓慢下降成分的 X 射线余辉比较硬、亮．两种暴的辐射效率具有极其显著的差异，有缓慢下降成分的暴一般效率高，而无缓慢下降成分的效率远远低于前者．这些结果表明两类暴的伽玛暴本身并没有显著差异, 而其 X 射线余辉却具有显著差异. 伽玛暴本身一般为内激波产生, 余辉是伽玛暴后火球与外部介质作用而产生的．我们认为两种暴的前身星和中心机制没有差异，而外部环境可能有差异．人们对缓慢下降成分的物理起源还在讨论中．从我们的统计结果可见，在 X 射线余辉光变曲线中是否有缓慢下降成分，不是取决于暴本身，而是取决于外部介质环境．如果外部介质很致密，暴后火球可能快速扫过介质形成很强的外激波，因此有大量的电子被加速而辐射形成比较亮、硬的 X 射线辐射．这样就没有缓慢下降的区域出现, 而是出现与暴本身辐射紧密相连的快速下降．暴后火球的动能很大, 暴的整体辐射效率不是很高．如果暴周的介质密度很低，那么火球可能减速很慢，火球慢慢冷却辐射，形成一个缓慢的下降区域．在这个阶段火球的冷却辐射也许占主导．这样，暴后火球的剩余动能也许消耗在冷却辐射过程中，外激波就相对消弱， X 射线余辉比较暗和软，暴的辐射效率将提高．我们注意到，有缓慢衰减成分的暴的伽玛暴辐射谱一般比没有这个成分的暴要软 (见表 3), 这可能是由于内激波缓慢衰减辐射的软光子所致．因此本文的结果表明有无缓慢下降的辐射成分主要是由于暴周环境所致.

表 3　t- 检验结果

Table 3　The results of t-test

	the mean of sample A	the mean of sample B	t	p	significance
$T90$(s)	52.6 ± 71.5	54.2 ± 39.5	-0.08	0.94	no
β_γ	1.80 ± 0.72	1.37 ± 0.51	1.79	0.09	no
HR	1.20 ± 0.46	1.36 ± 0.38	-0.98	0.33	no
$\lg S_\gamma$	-5.89 ± 0.47	-5.82 ± 0.64	-0.32	0.75	no
E_p (keV)	142 ± 230	280 ± 520	-0.97	0.34	no
β_X	1.43 ± 0.90	0.84 ± 0.26	2.20	0.04	yes
$\lg S_X$	-8.38 ± 0.92	-7.22 ± 0.78	-3.55	0.001	yes
$\eta(/100)$	61 ± 29	5.3 ± 4.8	6.56	4.88E-7	yes

参 考 文 献

1 Cheng K S, Lu T. ChJAA, 2001, 1: 1
2 Zhang B. Mészáros P. IJMPA, 2004, 19: 2385
3 Gehrels N, Chincarini G, Giommi P, et al. ApJ, 2004, 611: 1005
4 Mészáros P. Rep Phys, 2006, 69: 2259
5 Grupe D, et al. ApJ, 2006, 662: 443
6 Zhang B, Fan Y Z, Dyks J, et al. ApJ, 2006, 642: 354
7 Nousek J A, Kouveliotou C, Grupe D, et al. ApJ, 2006, 642: 389
8 Tagliaferri G, Goad M, Chincarini G, et al. Nature, 2005, 436: 985
9 Rhoads J E. ApJ, 1999, 525: 737
10 Sari Re'em, Piran Tsvi, Halpern J P. ApJ, 1999, 519, L17

11 Burrows D N, Romano P, Falcone A, et al. Sci, 2005, 309: 1833
12 Liang E W, Zhang B, O'Brien P, et al. ApJ, 2006, 646: 351
13 Wu X F, Dai Z G, Wang X Y, et al. cosp, 2006, 36: 731
14 Zou Y C, Dai Z G, ChJAA, 2006, 6: 551
15 Zhang B B, Liang E W, Zhang B. ApJ in press, 2007, (astro-ph/0612246)
16 Zhang B, Liang E W, Page K L. ApJ, 2007, 989
17 King A, O'Brien P T, Goad M R, et al. ApJ, 2005, 630: L113
18 Fan Y Z, Wei D M. MNRAS, 2005, 364: L42
19 Huang Y F, Dai Z G, Lu T. MNRAS, 2002, 332, 735
20 Dai Z G, Wang X Y, Wu X F, et al. Sci, 2006, 311: 1127
21 Zou Y C, Dai Z G, Xu D. ApJ, 2006, 646: 1098
22 Panaitescu A, Mészáros P, Gehrels N, et al. MNRAS, 2006, 366: 1357
23 Eichler D, Granot J. ApJ, 2006, 641: L5
24 Granot J, Konigl A, Piran T. MNRAS, 2006, 370, 1946
25 Shao L, Dai Z G. ApJ, 2007, 660, 1319
26 O'Brien P T, Willingale R, Osborne J, et al. ApJ, 2006, 647: 1213
27 Press W H, et al. Numerical Recipes in Fortran, Cambridge University Press, 1999

The Characteristics of the Prompt Gamma-rays and Early X-ray Afterglows of Gamma-ray Bursts

LIN Yi-qing
(*Mathematics and Physics Department of Xiamen University of Technology, Xiamen* 361005)

Abstract After the successful launch of NASA's dedicated gamma-ray burst (GRB) mission, Swift, very early X-ray afterglow data for a large sample of GRBs have been recorded by the on board X-ray Telescope (XRT). The data show that the early X-ray afterglow light curves of some GRBs have a shallow decay component, but some have not. The physics mechanisms of this component are debated. We compare the characteristics of the prompt gamma-rays and the early X-ray afterglows for the two kinds of GRBs with a sample of 29 GRBs. Our results show that the properties of the prompt gamma-rays, including burst duration, gamma-ray flux, gamma-ray spectral index, hardness ratio, and peak energy of the νf_ν spectrum, have no significant difference for the two kinds of bursts. The early X-ray afterglows, however, show significant difference. Those bursts that have shallow decay components tend to have soft and dark X-ray afterglows, while the X-ray afterglows of those bursts that without shallow decay components tend to be hard and bright, and the GRB efficiency of the two kinds of bursts have also significant difference. The efficiency of those bursts with a shallow decay component is significantly higher that that of the bursts without this component. These results might suggest that the two kinds of GRBs have the same progenitor, and their central engines are similar. The early shallow decay component is possibly due the surrounding medium.

Key words Gamma-Ray: Bursts, X-Ray: Galaxies, ISM: Afterglow