

# 单峰伽玛射线暴光变曲线的 FWHM 与 持续时间之间的关系<sup>\*</sup>

邓家干<sup>1)†</sup> 黄仁堂<sup>2)</sup>

1) 广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004)

2) 广西民族大学物理与工程学院, 南宁 530012)

(2007 年 2 月 2 日收到, 2007 年 3 月 19 日收到修改稿)

探讨了具有单峰结构的伽玛射线暴( GRB )光变曲线的半峰全宽( FWHM )与伽玛暴持续时标  $T$  之间的关系. 用目前公认的半经验公式——Kocevski, Ryde & Liang (2003) 模型对 108 个单峰光变曲线数据样本进行拟合, 选取 59 个  $\chi^2 < 2$  的有效拟合样本计算 FWHM, 然后对 FWHM 与  $T$  进行相关分析. 两者能较好地用幂率关系进行拟合为  $T \approx BW^a$ , 其中  $W$  为光变曲线的 FWHM,  $a$  与  $B$  为常数. 结果表明, 单峰 GRB 光变曲线的 FWHM 与  $T_{90}$  (伽玛暴光子计数在 5%—95% 之间的持续时标) 对数值之间有很好的线性相关性, 相关系数  $R = 0.72$ , 而 FWHM 与  $T_{50}$  (伽玛暴光子计数在 25%—75% 之间的持续时标) 的相关更紧密, 相关系数  $R = 0.93$ . 这表明 GRB 的光变曲线结构与其持续时间有密切的关系, 光变曲线的 FWHM 越宽, 则持续时标越长.

关键词: 伽玛射线暴( GRB ), 光变曲线, 相关分析

PACC: 9870R

## 1. 引言

自从伽玛射线暴( GRB )在 20 世纪 70 年代被美国的 Vela 卫星发现以来, 在世界范围内掀起了研究来自天外的 GRB 的热潮. 目前, 人们普遍认为 GRB 是在宇宙距离上由一种标准能源产生的相对论喷流的辐射<sup>[1-6]</sup>. 在宇宙学距离上的起源中心, 由于两颗致密星(如中子星-中子星、中子星-黑洞等)的合并, 或大质量恒星的引力塌缩, 或由中子星到奇异星的相变而喷射出大量高速的、具有相对论特性的喷流. 这些喷流在起源中心以很强的磁场或重子形式存在, 并形成以极端相对论速度膨胀的火球. 火球形成之后, 起初为光学厚, 并进行热辐射. 随着火球的膨胀, 典型的粒子能量与密度数将减少. 当到达与源中心一定距离时, 火球变为光学薄. 由于火球壳层膨胀快慢不一, 壳层之间发生相互碰撞, 产生内激波, 这时同步辐射与逆康普顿辐射等非热过程将出现, 将内能转换为辐射从而导致 GRB 产生<sup>[7]</sup>. 这些壳层辐射损失一部分动能后, 还有能量剩余, 于是火球继续膨胀, 当扫过星际介质时, 会与星际介质相碰撞, 产

生外激波, 从而产生 X 射线、光学、红外线和射电余辉. 在 GRB 发射过程中, 每一个发射的细节就是一个单一的脉冲, 这些单个脉冲是 GRB 的组成基础. 复杂的光变曲线则由多个的单脉冲组合构成<sup>[8,9]</sup>. 由于几何结构是描述和了解天文现象的基本因素<sup>[10]</sup>, 因此, 光变曲线的轮廓直接反映了 GRB 的某些特性.

在 GRB 的研究中, 对光变曲线的研究非常重要. 因为人们对 GRB 的研究都是从 GRB 的光变曲线与能谱开始的. Fishman 等人<sup>[11]</sup>首先发现了 GRB 的光变曲线中的一些脉冲显快速上升指数下降( FRED )型结构. 后来, 有很多人对这种脉冲的伽玛射线暴的光变曲线进行了研究<sup>[11-22]</sup>. 其中, Kocevski 等<sup>[17]</sup>建立了一个光变曲线脉冲的半经验函数模型(称为 KRL 模型), 并以此模型对 77 个光变曲线脉冲能进行了很好的拟合.

本文用 KRL 模型对 108 个单峰脉冲的光变曲线样本的 4 个能道(即能量  $E = 20-50$  keV,  $50-100$  keV,  $100-300$  keV 和  $E > 300$  keV 的 4 能道<sup>[9]</sup>)数据总和的光变曲线进行拟合, 按  $\chi^2 < 2$  的要

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10662002)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jgden@126.com

求得出 59 个有效拟合样本,计算其半峰全宽(FWHM).最后对 FWHM 与  $T_{90}$ (GRB 持续时间内的光子计数从 5% 增加到 90%,即占光子计数的 90% 的时间间隔)、 $T_{50}$ (GRB 持续时间内的光子计数从 25% 增加到 75%,即占光子计数的 50% 的时间间隔)进行相关分析.从而研究 FWHM 与  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  的关系.

## 2. 数据处理方法

本文使用的数据来自美国宇航局(NASA)的康普顿 GRB 观测卫星 CGRO(Compton gamma-ray observatory)的科学服务中心的 BATSE(burst and transient experiment)的 64 ms GRB 数据(<http://coss.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/>).CGRO 自从 1991 年发射上天至 2000 年完成使命,安装在此卫星上的 BATSE 探测器总共接收到了 2704 个 GRB 数据,我们选取了其中的 108 个单峰的光变曲线样本数据,所选取的样本主要为 Kocevski 等人<sup>[17]</sup>和 Norris 等人<sup>[11]</sup>文章中所列出的样本,同时也用手工方法选取了部分其他样本.

数据处理的第一步是去除背景.我们利用 CGRO 科学服务中心所提供的去背景参数数据与方法去除了各个样本暴的背景.

数据处理的第二步是光变曲线拟合处理.我们将数据样本的所有 4 个能道的数据进行相加,对此总和光变曲线用 KRL 模型进行拟合.KRL 模型可表示为<sup>[17]</sup>

$$F(t) = F_m \left( \frac{t}{t_m} \right)^r \left[ \frac{d}{d+r} + \frac{r}{d+r} \left( \frac{t}{t_m} \right)^{r+1} \right]^{-\frac{r+d}{r+1}}, \quad (1)$$

式中,  $F_m$  为光变曲线的脉冲最大值(峰值);  $r$ ,  $d$  分别为脉冲的上升指数与下降指数;  $t_m$  为脉冲最大值(峰值)所对应的时间.

拟合后的样本还要满足以下两个条件才能作为有效样本: 1) 所拟合的去背景后的光变曲线脉冲须满足  $\chi^2 < 2$ .  $\chi^2$  按  $\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{F(t_i) - y(t_i)}{y(t_i)} \right\}^2 / (n - m)$  计算(其中  $F(t_i)$  为 KRL 拟合曲线的计算值;  $y(t_i)$  为样本数据值;  $n$  为数据点数;  $m$  为 KRL 函数的参数个数;  $n - m$  为自由度); 2) 脉冲的峰应该明显突起,以便能算出有效的 FWHM 来进行数据处理.我们开始选取了 108 个单峰脉冲样本进行拟合

处理,只有 59 个样本符合以上条件,因此以下的数据处理只有 59 个样本.

数据处理的第三步是求出有效样本的 FWHM.通过峰值求出半峰值  $F_m/2$ ,然后求出两个半峰值对应的时间差即为 FWHM;

最后,将所求出的 FWHM 与  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  进行相关分析.所采用的  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  数据也是来源于 CGRO 科学服务中心的 BATSE 的 64 ms GRB 数据表中所提供的数据.

## 3. 结果及分析

图 1 为 5 个有效样本 GRB911022(914), GRB920925(1956), GRB930326(2268), GRB990316(7475), GRB990424(7529)的 KRL 拟合曲线图.图 1 中,  $c$  为光子数.实心点为去背景后的光变曲线数据点,实线为 KRL 模型的拟合线,空心点为脉冲半峰值所对应的位置.从图 1 可以看出, KRL 函数拟合线与数据点吻合得很好.

图 2 为 59 个有效样本的 FWHM 及其误差  $\sigma$  分布图.  $N$  表示伽玛射线暴的统计数.其 FWHM 分布为:从  $(0.58 \pm 0.03)$  s 至  $(31.49 \pm 0.91)$  s;平均值为:  $(5.85 \pm 0.26)$  s.  $\sigma$  分布为:从 0.02 至 1.25 s;平均值为 0.26 s.

图 3 为 FWHM 与  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  的关系图.图中,横坐标为 FWHM 的对数值,纵坐标为  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  的对数值.从图 3 可以看出, FWHM 与  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  显示很好的相关性.两者的相关系数为:FWHM 与  $T_{90}$ ,  $r = 0.72$ ; FWHM 与  $T_{50}$ ,  $r = 0.93$ .可见 FWHM 与  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  之间相关系数值都很高.

图 3 中的斜实线为线性拟合直线.可以建立两者之间的关系为

$$\log T = a \log W + b, \quad (2)$$

或

$$T = BW^a, \quad (3)$$

其中,  $T$  为  $T_{90}$  或  $T_{50}$ ;  $W$  为脉冲的 FWHM;  $a$ ,  $b$  分别为拟合直线的斜率与斜截常数,  $B = 10^b$  为常数.对于 FWHM 与  $T_{90}$ (图 3(a)),  $a = 0.71$ ,  $b = 0.89$ ,  $B = 7.76$ ;对于 FWHM 与  $T_{50}$ (图 3(b)),  $a = 0.93$ ,  $b = 0.12$ ,  $B = 1.32$ .将各数据代入(3)式,得 FWHM 与  $T_{90}$  的幂率关系为

$$T_{90} = 7.76 W^{0.71}, \quad (4)$$

FWHM 与  $T_{50}$  的幂率关系为

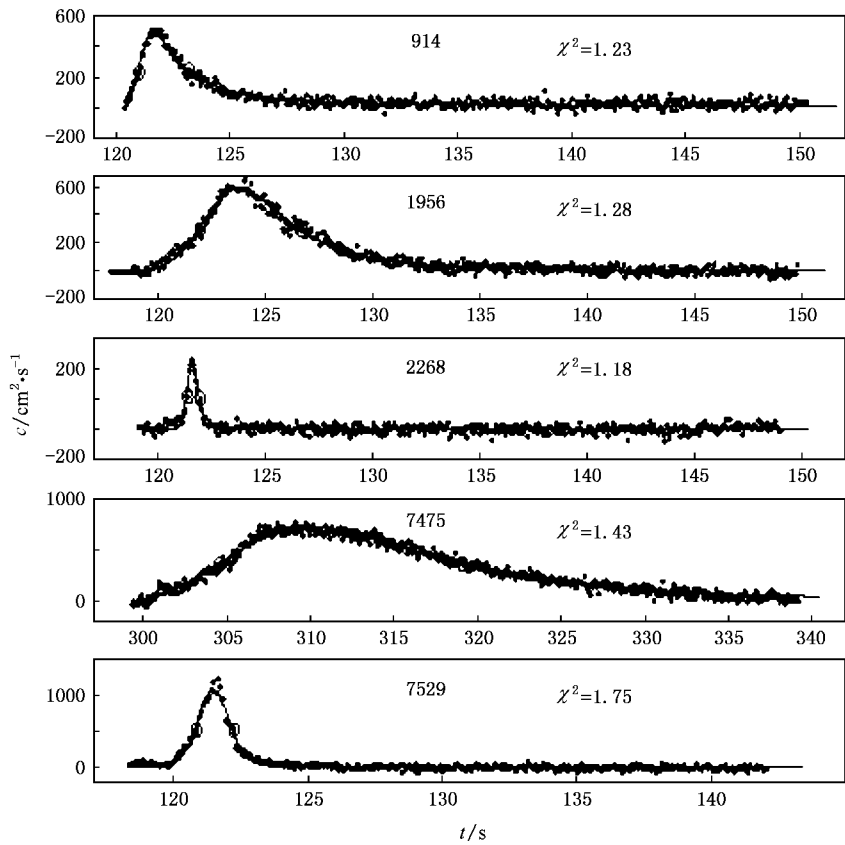


图1 5 个 GRB 暴的光变曲线的 KRL 拟合曲线图

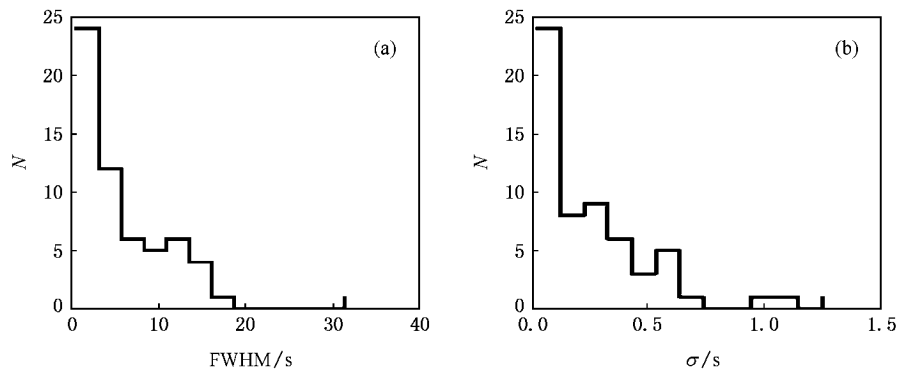


图2 (a) 69 个有效样本的 FWHM 的分布图 (b) FWHM 的误差  $\sigma$  的分布图

$$T_{50} = 1.32 W^{0.93} \tag{5}$$

归纳以上,FWHM 与  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  之间有很高的相关性,两者间能较好地拟合为幂率关系.特别是 FWHM 与  $T_{50}$  之间相关系数达到 0.93.

FWHM 与  $T_{90}$ 、 $T_{50}$  之间的关系可解释如下:在标准的火球模型框架下,GRB 是内激波过程产生的,GRB 的峰值能量  $E_p$  有关系<sup>[23]</sup>: $E_p \propto L^{1/2} \Gamma^{-2} t_v^{-1} (1+z)^{-1}$  ( $L$  为 GRB 的各向同性光度, $\Gamma$  为火球洛

伦兹因子, $t_v$  为 GRB 的光变时标).由于 GRB 的持续时间  $T$  与洛伦兹因子  $\Gamma$  之间也存在如下关系: $T \propto \Gamma^{-1}$ <sup>[16,24]</sup>,因而有  $E_p \propto T$ .另外,Qin 等人<sup>[19]</sup>与邓家干等人<sup>[22]</sup>又在统计上证明了 FWHM 与  $E_p$  之间存在相关性.因此,FWHM 与  $T$  相关.本文利用 CGRO 卫星的观测数据,从数值上量化了 FWHM 与 GRB 光子计数从 5% 增加到 90% 的持续时间  $T_{90}$  以及光子计数从 25% 增加到 75% 的持续时间  $T_{50}$  之间的相关性.

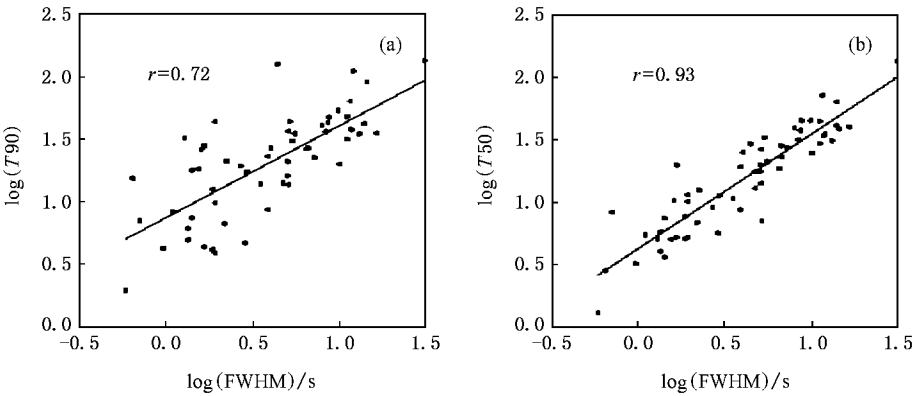


图 3 (a)FWHM 与  $T_{90}$  的关系图 ;(b)FWHM 与  $T_{50}$  的关系图

4. 结 论

近年来 ,人们对 GRB 光变曲线进行了大量的研究 ,并试图解释这些 GRB 光变曲线形状的形成以及 GRB 的发射机理.FWHM 是描述 GRB 光变曲线的脉冲结构特征的一个重要的物理量<sup>[19]</sup> ,其大小与脉冲的不对称度保持着一定的关系<sup>[12]</sup> .研究 FWHM ,这我们对了解 GRB 光变曲线结构特性以及 GRB 发射机理具有重要的意义 .最近 ,Qin 等人<sup>[19]</sup>发现 FRDE 型脉冲的 FWHM 与  $E_p$ (峰值能量)之间存在相关性 ,而且此相关性是由于火球模型的多普勒效应导致的 .我们证实了这一结论的正确<sup>[22]</sup> .Qin 等人沿着

Fenimore 等人<sup>[13]</sup>与 Ryde 等人<sup>[7]</sup>的  $\delta$  函数脉冲源概念 ,从理论上导出了在火球表面上由  $\delta$  函数脉冲 (local- $\delta$  function pulse)发射的 GRB 光变曲线的 FWHM 与光子峰值流量之间存在有相关性<sup>[18]</sup> .我们发现 86 个 FWHM 范围为 0.38—48.58 s 的 FRED 型脉冲数据样本不属于  $\delta$  函数脉冲发射的 GRB 光变曲线<sup>[26]</sup> .本文结果的意义在于 :揭示了光变曲线结构与 GRB 持续时间的密切关系 ,即 GRB 的光变曲线的 FWHM 越宽 ,则持续时间  $T_{90}$  , $T_{50}$  越长 .

在今后的工作中 ,我们将进一步研究 FWHM 与光度等物理量之间的关系 ,从而深入揭示 GRB 光变曲线的结构特性以及 GRB 的发射机理 .

[ 1 ] Fishman G J , Meegan C A 1995 *ARA&A* **33** 415

[ 2 ] Piran T 1999 *Phys. Rep* **314** 575

[ 3 ] van Paradijs J , Kouveliotou C , Wijers R A M J 2000 *ARA&A* **38** 379

[ 4 ] Cheng K S , Lu T 2001 *ChJAA* **1** 1

[ 5 ] Mészáros P 2002 *ARA&A* **40** 137

[ 6 ] Liang E W , Dai Z G , Wu X F 2004 *ApJ* **606** L29

[ 7 ] Ryde F 2004 *ApJ* **614** 827

[ 8 ] Fishman G J , Meegan C A , Wilson R B , Brock M N , Horack J M , Kouveliotou C , Howard S , Paciesas W S , Briggs M S , Pendleton G N 1994 *ApJS* **92** 229

[ 9 ] Ryde F , Borgonovo L , Larsson S , Lund N , von Kienlin A , Lichti G 2003 *A&A* **411** L331

[ 10 ] Dai X Y , Zhang B 2005 *ApJ* **621** 875

[ 11 ] Norris J P , Nemiro R J , Bonnell J T , Scargle J D , Kouveliotou C , Paciesas W S , Meegan C A , Fishman G J 1996 *ApJ* **459** 393

[ 12 ] Norris J P , Marani G F , Bonnell J T 2000 *ApJ* **534** 248

[ 13 ] Fenimore E E , Madras C D , Nayakshin S 1996 *ApJ* **473** 998

[ 14 ] Lee A , Bloom E D , Petrosian V 2000 *ApJS* **131** 1

[ 15 ] Ryde F , Svensson R 2000 *ApJ* **529** L13

[ 16 ] Ryde F , Petrosian V 2002 *ApJ* **578** 290

[ 17 ] Kocevski D , Ryde F , Liang E 2003 *ApJ* **596** 389

[ 18 ] Qin Y P , Zhang Z B , Zhang F W , Cui X H 2004 *ApJ* **617** 439

[ 19 ] Qin Y P , Dong Y M , Lu R J , Zhang B B , Jia L W 2005 *ApJ* **632** 1008

[ 20 ] Zhang Z B , Deng J G , Lu R J , Gao H F 2006 *CJAA* **6** 312

[ 21 ] Zhang F W , Qin Y P 2005 *Chin. Phys.* **14** 2276

[ 22 ] Deng J G , Huang R T 2007 *Astronomical Research & Technology* **1** 1 ( in Chinese ) 邓家干、黄仁堂 2007 天文研究与技术 **1** 1 ]

[ 23 ] Zhang B , Mészáros P 2002 *ApJ* **581** 1236

[ 24 ] Daigne F , Mochkovitch R 1998 *MNRAS* **296** 275

[ 25 ] Deng J G , Huang R T 2006 *J. Guangxi University*( Natural Science Edition )( in Chinese ) **31** 275 ( in Chinese ) 邓家干、黄仁堂 2006 广西大学学报 ( 自然科学版 ) **31** 275 ]

# The relationship between FWHM and duration of single peaked GRB light curves<sup>\*</sup>

Deng Jia-Gan<sup>1)†</sup> Huang Ren-Tang<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Physics Science and Technology Institute, Guangxi University, Nanning 530004, China*

<sup>2)</sup> *Physics Department, Guangxi National Institute, Nanning 530012, China*

(Received 2 February 2007; revised manuscript received 19 March 2007)

## Abstract

We explored the relation between FWHMs of single pulses in a sample of GRB (Gamma-Ray Burst) light curves and durations of the GRBs. Based on a sample of 108 single-peaked GRB light curves, we fitted these sample data with Kocevski, Ryde & Liang (2003) model. A sub-sample containing 59 pulses with  $\chi^2 < 2$  is selected to test whether there is a relation between FWHM of the pulses and the duration of GRBs or not. The relation between these two quantities is well fitted with  $T \approx BW^a$ , where  $T$  is the duration,  $W$  is the FWHM,  $a$  and  $B$  are constants. Our result shows that there does exist a proportional correlation between the logarithm of FWHMs and the logarithm of  $T_{90}$  (duration containing from 5% to 95% of the total fluence of a GRB) of GRB light curves with a correlation coefficient  $R = 0.72$ . The proportional correlation between the logarithm of FWHMs and the logarithm of  $T_{50}$  (duration containing from 25% to 75% of the total fluence of a GRB) is more tight with a larger correlation coefficient  $R = 0.93$ . Our finding shows that the light curve structure is correlated to the GRB duration. A larger FWHM corresponds to a longer GRB.

**Keywords:** gamma-ray bursts, light curve, correlation investigation

**PACC:** 9870R

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10662002).

<sup>†</sup> E-mail: jgden@126.com