

# 宇宙 $\gamma$ 射线爆发的统计特征

徐永焯

(中国科学院紫金山天文台)

## 提 要

宇宙 $\gamma$ 射线爆发是一种极高能量的天体物理现象。现已探测到100多个爆发事件,得到了它们的时间结构、能谱、强度和部分辐射源的位置。本文将逐个介绍宇宙 $\gamma$ 射线爆发的统计结果。

## 一、前 言

宇宙 $\gamma$ 射线爆发是一种奇特的高能天体物理现象,它释放的能量之大,持续时间之短,能量释放速率之快,都是令人惊异的。1973年克里毕塞德等人<sup>[1]</sup>在Vela卫星资料中发现这一天体物理现象之后,引起实验工作者和理论家的极大重视,先后有20多颗卫星和宇宙飞行器从事过这一课题的探测<sup>[2]</sup>。现已探测到100多起爆发事件。平均每月爆发一次。爆发出现的时间很不均匀,有时很长时间没有爆发出现,有时一天内可以出现几次爆发。

出没无常、位置不定的宇宙 $\gamma$ 射线爆发在许多方面都和普通 $\gamma$ 射线源不同,同硬X射线爆发之间也没多大相关性<sup>[3]</sup>。这是一种特殊的瞬变现象。它们的特征时间比普通 $\gamma$ 射线源的变化时间短得多。

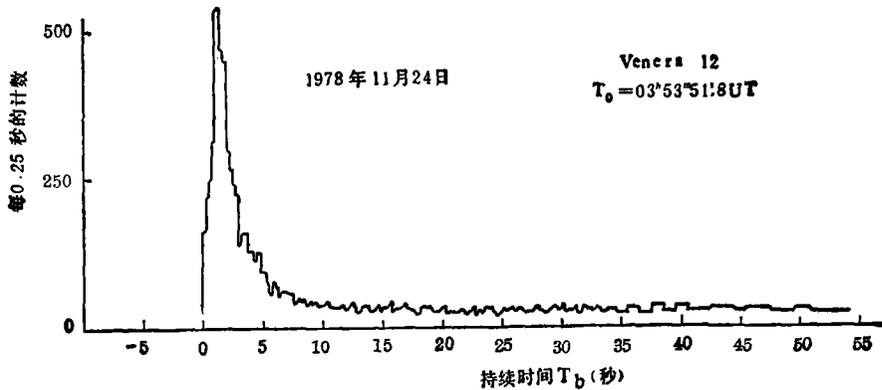
人们第一次发现的宇宙 $\gamma$ 射线爆发是1970年8月20日爆发事件,目前所知道的最早的宇宙 $\gamma$ 射线爆发发生在1967年7月1日 $14^{\text{h}}19^{\text{m}}28^{\text{s}}$ (UT)。自从1973年第一次发现宇宙 $\gamma$ 射线爆发之后,天文学家们对它进行了系统的观测。探测宇宙 $\gamma$ 射线爆发的工作大致分为两个阶段,第一阶段由单个卫星或分布较近的几颗卫星从事爆发事件的发现和考察,第二阶段由分布较远的几颗卫星进行三角测量以确定爆发源的位置和特征。两个阶段的分界线是1976年1月15日Helios-2卫星的发射。在第二阶段,测量方法有较大的改进,测量仪器的灵敏度和分辨率均有提高,因此这一时期内取得了许多很有价值的观测资料。这些资料为我们研究这一奇特的极高能过程提供了重要信息。

总的来说,人们对宇宙 $\gamma$ 射线爆发的了解还很肤浅,它的许多性质还没有弄清。八十年代 $\gamma$ 射线天文学将有较大的发展,许多卫星将携带 $\gamma$ 射线探测器上天,还要发射一批专门观测 $\gamma$ 射线的天文卫星。人们期待着这些卫星在对 $\gamma$ 射线天文学作出贡献的同时,也能在宇宙 $\gamma$ 射线爆发方面作出贡献。为了探明宇宙 $\gamma$ 射线爆发的物理性质,应当探明它的能谱和辐射源的位置。为了这个目的,今后的观测应提高仪器的能量分辨率和空间分辨率。

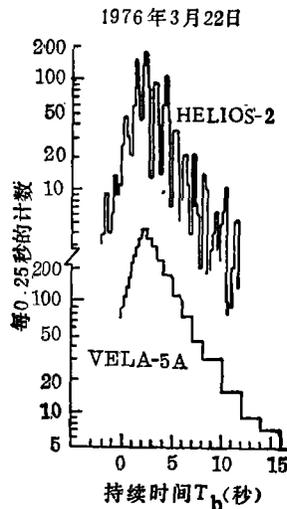
## 二、爆发事件的时间结构

经过许多卫星的观测, 现在已得到111个爆发事件<sup>[4]</sup>。在所有的事件中, 时间结构是宇宙  $\gamma$  射线爆发的最明显的特征。宇宙  $\gamma$  射线爆发就是从它的时间结构图上看出来的<sup>[1]</sup>。对一个爆发事件而言, 首先表现出来的特征是它的脉冲个数。在一次爆发过程中, 可以出现一个脉冲、两个脉冲和多个脉冲。它们分别称为单脉冲事件、双脉冲事件和多脉冲事件(图 1、2、3)。

单脉冲事件(图 1)的特征是, 一次爆发过程只出现一个脉冲, 脉冲过去爆发就停止。这类事件的持续时间一般较短。图 1(a)和 1(b)是其中的两个例子。图 1(a)事件的上升时间为 2—3 秒, 衰减时间 5—10 秒<sup>[5]</sup>。图 1(b)事件的 FWHM 等于 10 秒<sup>[6]</sup>。

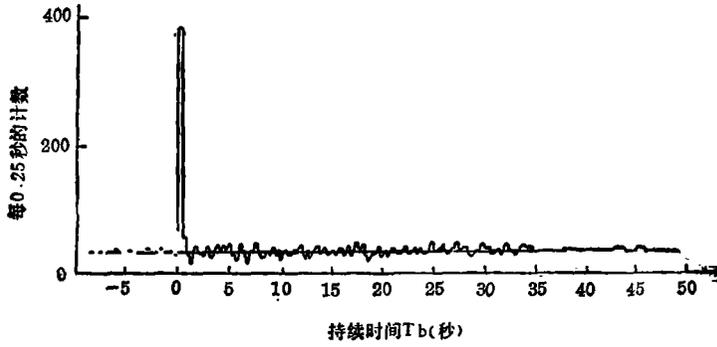


(a) 1978年11月24日单脉冲事件[5]

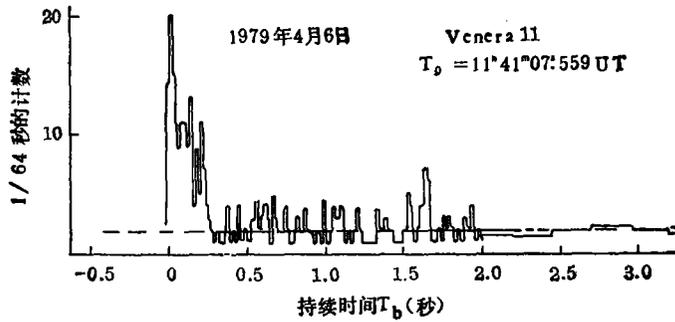


(b) 1976年3月22日单脉冲事件[6]

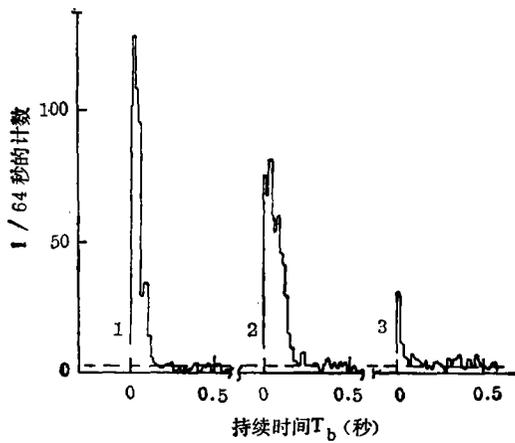
图1 单脉冲事件



(c) 短时间爆发 [7]



(d) 1979年4月6日短时间爆发 [8]



(e) 三个尖脉冲爆发时间结构 [8]

图1(c—e) 短时间爆发。在图1e中,三个短时间爆发时间结构图非常相似。其中(1)表示1979年3月24日事件,(2)表示1979年3月25日事件,(3)表示1979年3月27日事件

在单脉冲事件中,有一种持续时间很短的爆发事件,称为短时间爆发。这是一种特别的单脉冲事件。这种爆发持续时间  $T_b$  一般在 0.3 秒以下,有的竟短到 2 毫秒。爆发的时间结构

呈尖脉冲形式(图 1(c), 1(d), 1(e))。表 1 列出 Venera-11 上 Konus 实验探测到的尖脉冲爆发。由表可见, 七个爆发可能来自五个辐射源。

表 1 Konus 实验得到的短时间  $\gamma$  射线爆发

源数	爆发时间			持续时间 (秒)	能谱	强度 $S(E_0 > 30\text{keV})$ (尔格/厘米 <sup>2</sup> ·秒)	坐 标	
	年 月 日	时 分 秒					$\alpha$	$\delta$
1	78 11 02	12 33 30.196		0.01	硬	$2.6 \times 10^{-6}$		
2	78 11 9	15 12 49.956		0.15	硬	$2.0 \times 10^{-6}$		
3	79 1 7	5 31 42.015		0.25	软	$1.4 \times 10^{-6}$	$205.3 \pm 8.0$	$-18.3 \pm 10.0$
4	79 3 24	16 6 49.826		0.12	软	$1.0 \times 10^{-6}$	$285.2 \pm 0.3$	$14.2 \pm 1.7$
4	79 3 25	1 58 19.017		0.19	软	$1.5 \times 10^{-6}$	$285.2 \pm 0.3$	$14.2 \pm 1.7$
4	79 3 27	10 30 34.886		0.05	软	$3.8 \times 10^{-7}$	$285.2 \pm 0.3$	$14.2 \pm 1.7$
5	79 4 6	11 41 7.559		0.25	硬	$1.0 \times 10^{-6}$	$343.8 \pm 5.0$	$-45.0 \pm 6.0$

一次爆发出现两个脉冲的叫双脉冲事件。双脉冲事件中两个脉冲可以分开数十秒, 如 1978 年 10 月 25 日事件(图 2(a)), 也可以相隔很近, 如 1979 年 1 月 16 日事件(图 2(b))。前一个事件的两个脉冲的强度大致相等, 后一个事件的第二个脉冲强度却比第一个脉冲弱得多, 而且位于第一个脉冲的尾巴上。

在一次爆发过程中出现两个以上脉冲的事件称为多脉冲事件。这种事件所占的比例最大。在多脉冲事件中, 一次爆发出现的脉冲个数各不相同, 多的可达数十个, 少的只有几个。多脉冲事件的典型图形如图 3 所示。由图可见, 同是多脉冲事件, 脉冲的形状是各不相同的, 有的事件脉冲宽窄不等(图 3(a)), 有的事件呈几个尖脉冲(图 3(b)), 有的表现出周期图样(图 3(c)), 有的则出现重复性(图 3(d))。

不管单脉冲事件, 双脉冲事件还是多脉冲事件, 时间结构图上都有许多精细结构。1972 年 12 月 18 日事件显示出 60 毫秒宽的微型爆发<sup>[12]</sup>, 1976 年 1 月 28 日事件<sup>[13]</sup>有 10 毫秒的结构, 气球还观测到一个具有 5 毫秒结构的事件<sup>[14]</sup>(很可惜这个观测没有得到证实)。最突出的例子是 1978 年 11 月 4 日事件<sup>[6]</sup>。它的时间结构图上除有 8 个独立的脉冲外, 还有低到 30 毫秒的精细结构和一系列分开 4 秒的尖脉冲。但是, 对于精细结构也有不同的意见, 放在 Prognoz-6, Prognoz-7, Venera-11 和 Venera-12 飞船上的法国试验则没有显示出低于 16 毫秒的精细结构。除峰值精细结构外, 还观测到谷值的精细结构。正如窄峰既可叠加在比较高的爆发计数率上又可独立发生一样, 谷结构既可存在于计数率部分减小的地方, 又可以发生在辐射为零的时候。

麦采兹和高列尼斯基统计了 Venera-11 和 Venera-12 上的 Konus 仪器在 1978 年 9 月—1979 年 5 月期间的观测结果<sup>[5]</sup>, 他们指出, 宇宙  $\gamma$  射线爆发的脉冲个数同爆发的持续时间  $T_b$  有松散的联系, 其关系是: (1)  $T_b \approx 10$  秒的主要是单脉冲事件和中等持续时间的双脉冲; (2)  $10 \text{ 秒} < T_b < 30-40$  秒的主要是复杂的多脉冲事件; (3)  $T_b > 40$  秒的多半是双脉冲事件。我们

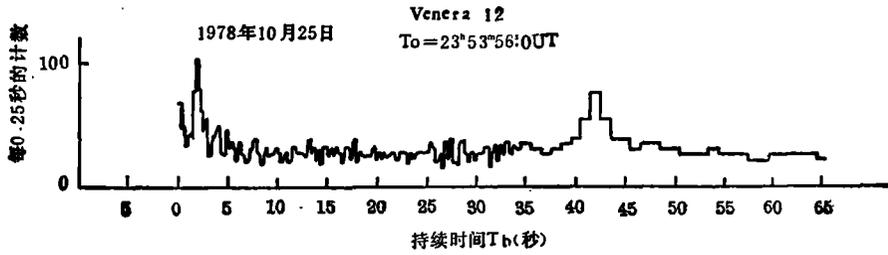


图2(a) 1978年10月25日事件[5]

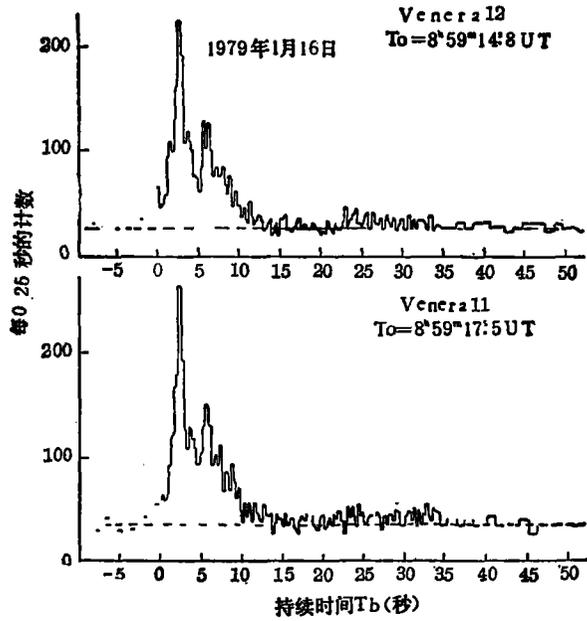


图2(b) 1979年1月16日双脉冲事件[5]

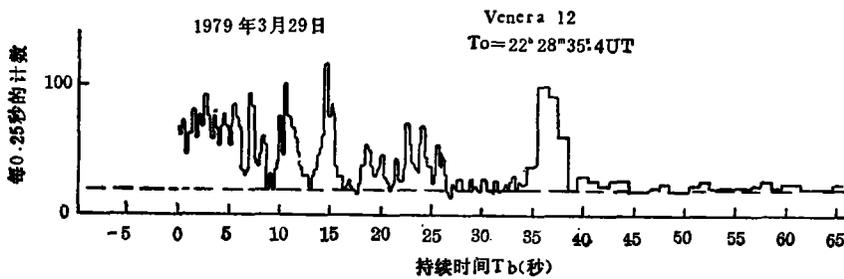


图3(a) 1979年3月29日多脉冲事件[5]

统计了表2中所列的资料, 结果与麦采兹和高列尼斯基的结果有所不同, 我们得到的结果是:

单脉冲事件, 平均持续时间  $\bar{T}_b = 4.64$  秒,

双脉冲事件, 平均持续时间  $\bar{T}_b = 11.26$  秒,

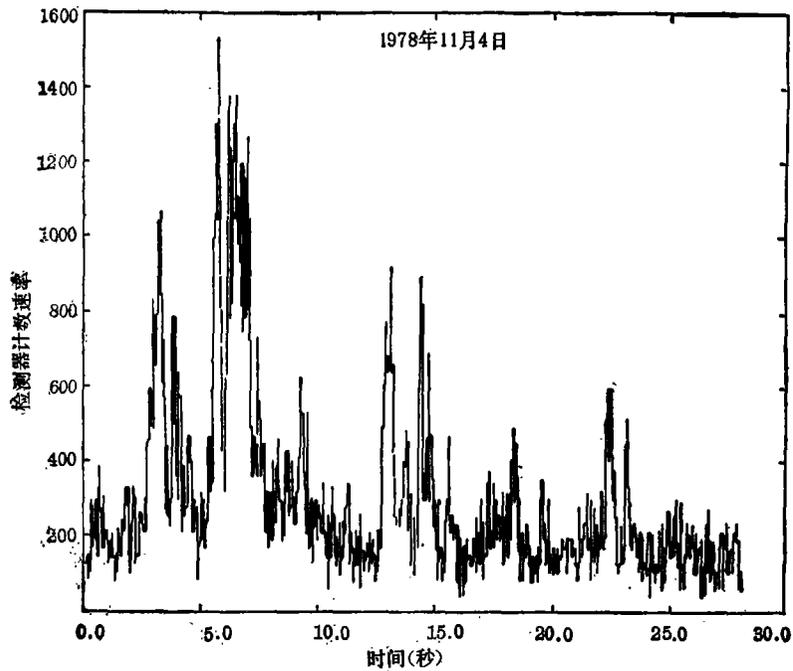


图 3(b) 1978年11月4日多脉冲事件[10]

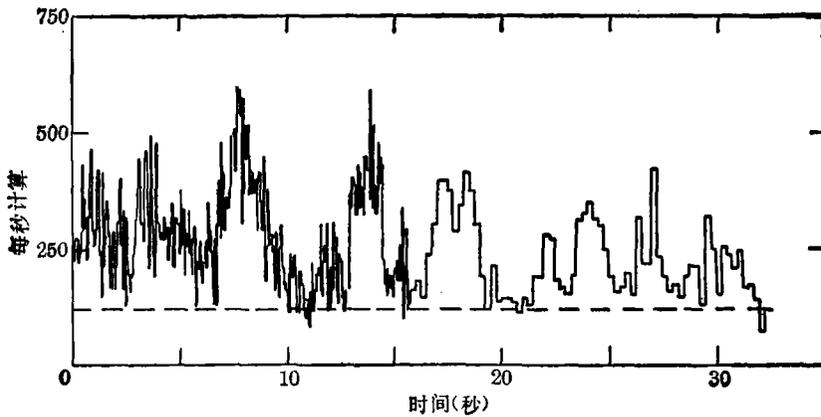


图 3(c) 1979年7月31日复杂结构事件[11]

多脉冲事件, 平均持续时间  $\bar{T}_b = 27.9$  秒。

产生差别的原因在选择样品不同, 我们选择的样品分布的时间较宽, 但因为有些观测资料中没有给出持续时间, 或者没有给出是什么样的脉冲事件, 因此只选取一部分观测作统计资料。而麦采兹和高列尼斯基的统计资料分布时间则较短(只有9个月)。

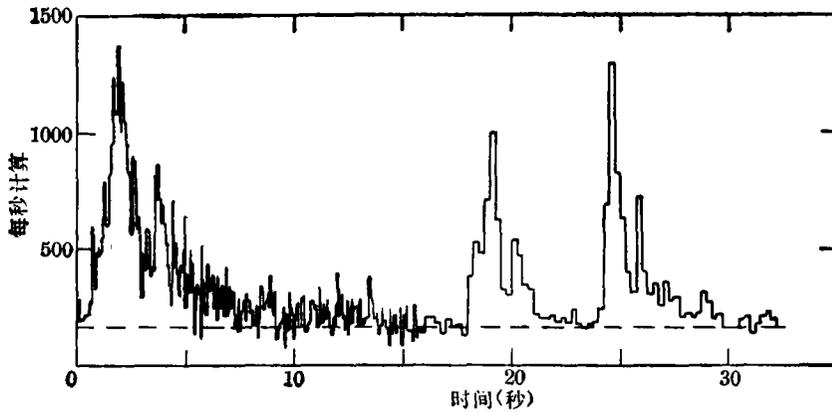


图 3(d) 1979年 1 月 13 日的重复事件[11]

根据我们的统计,单脉冲事件持续时间较短,双脉冲事件持续时间居中,多脉冲事件持续时间最长,或者说,宇宙 $\gamma$ 射线爆发的持续时间越长,出现的脉冲数就越多。

这里所述的宇宙 $\gamma$ 射线爆发的持续时间与其脉冲个数的关系是指一般情况而言的。在一次爆发过程中探测到脉冲数目多少还与探测器的灵敏度有关。同是 1978 年 11 月 24 日事件, Venera-12 观测资料呈单脉冲结构,而 Pioneer Venus orbiter 结果中则呈双脉冲结构<sup>[2]</sup>。

宇宙 $\gamma$ 射线爆发的脉冲个数还与它的能谱有联系。一般说来,对数型能谱有许多单脉冲特征,而复杂的多脉冲爆发则主要由幂律谱事件所组成。

相似结构是宇宙 $\gamma$ 射线爆发时间结构的又一特征。所谓相似结构是几个爆发事件之间的形态很相似(图 4)。相似结构的存在说明它们之间可能存在某种联系。典型的相似结构如图 4 所示。图 4(a)上表明了三个相似结构事件发生的时间。这三个事件虽然发生在不同的时间,但都显示出间隔 4 秒的脉冲。脉冲形状也相似。所不同的是前两个事件峰值强度几乎相等。而后一个事件,第一个峰值则几乎是其他两个事件的 2 倍。

图 4(b)给出四个单脉冲事件的相似结构。它们的脉冲形状几乎完全相同,上升时间也差不多(均在 0.25 秒左右),衰减时间也非常相近(约等于 1 秒)。不过, 1979 年 3 月 5 日事件高时间分辨率时间结构图上,除和其他三个事件一样有一个强脉冲外,强脉冲后面还跟着一系列微弱的小脉冲(图 5)。这一特征在其他三个事件中所未见过的。

关于相似结构的宇宙 $\gamma$ 射线爆发是否起源于同一个源的问题,现在还不能作出肯定或否定的回答。但是,戈达德小组和罗斯·阿拉莫斯小组联合观测表明,1978 年 11 月 15 日事件和 1978 年 11 月 24 日事件不是同一源起源的。

表 2. 宇宙 $\gamma$ 射线爆发的脉冲个数与持续时间(秒)的关系

序号	爆发时间	脉冲个数	持续时间(秒)	序号	爆发时间	脉冲个数	持续时间(秒)
1	72年 4月27日	多	13	18	78年11月19日	双	5
2	75 9 23	单	29	19	78 11 24	单	3
3	76 3 22	单	10	20	79 1 13	多	30
4	76 4 7	双	7	21	79 1 16	双	15
5	76 4 19	单	5	22	79 3 5	一大许多小	<2
6	76 12 9	多	8	23	79 3 6	单	1.5
7	76 12 20	多	21	24	79 3 19	多	35
8	77 3 10	双	5	25	79 3 24	单	尖脉冲 <0.25
9	77 7 8	多	60	26	79 3 25	单	同上
10	77 10 1	单	1	27	79 3 27	单	同上
11	77 10 20	多	39	28	79 3 29	多	40
12	77 11 10	双	28	29	79 4 4	单	<1
13	78 9 18	单	5	30	79 4 6	单	<2
14	78 9 21	多	14	31	79 4 24	单	<1
15	78 10 25	双	43	32	79 5 20	双	1
16	78 11 4	多	28	33	79 6 13	多	16
17	78 11 15	单	5	34	79 7 31	多	31

### 三、宇宙 $\gamma$ 射线爆发出现的频率

每年或每月出现多少个宇宙 $\gamma$ 射线爆发在了解它的爆发特性中具有重要意义。根据 Vela 卫星观测和 Konus 实验结果, 我们分析了 1969—1979 年宇宙 $\gamma$ 射线爆发出现的频率。结果如下。

(1) 每月出现的频率。图 6(a) 是 1969—1979 年宇宙 $\gamma$ 射线爆发逐月分布图, 它表明, 宇宙 $\gamma$ 射线爆发是成群出现的。各群的爆发数目不尽相同, I 群 16 次, II 群 24 次, III 群 22 次, IV 群 18 次。各群的持续时间大体相似, 平均为 25 个月。群与群之间间隔如下: 若将 1978 年 5 月发生的事件略去, 则 I—II 群之间 5 个月, II—III 群之间 10 个月, III—IV 群之间 9 个月。

(2) 每年出现的频率。图 6(b) 是 1969—1979 年宇宙 $\gamma$ 射线爆发逐年分布图。它表明, 在 1969—1979 年期间, 每年出现的宇宙 $\gamma$ 射线爆发数不相同。存在四个峰年: 1969 年, 1973 年, 1976 年和 1979 年, 平均周期为 3 年。出现三个谷年: 1970 年, 1975 年和 1978 年。没有确定的周期。在 1970~1973 年期间, 爆发数逐年增多, 在 1976—1978 年期间, 爆发数逐

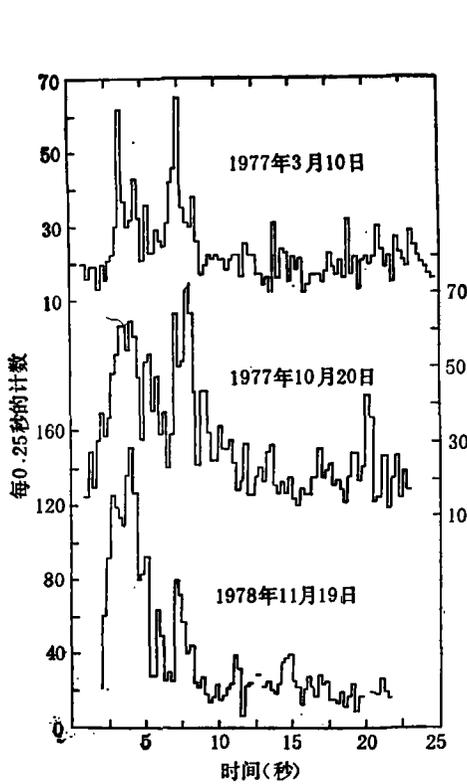


图 4(a)

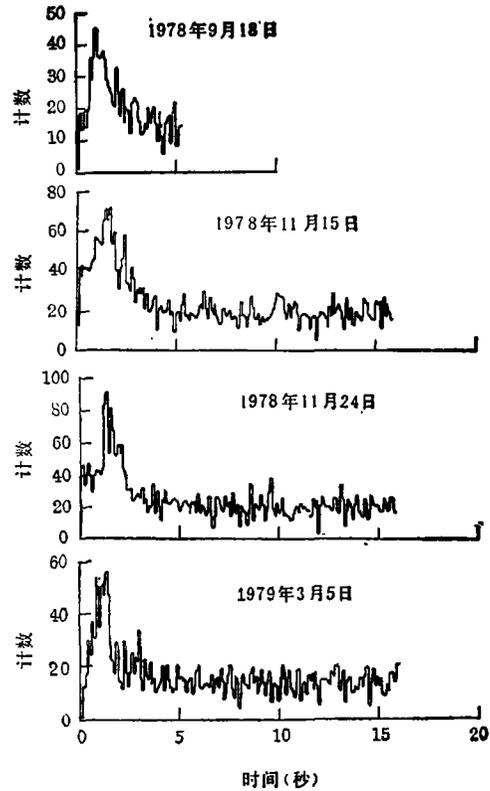


图 4(b)

图 4 相似结构[14][15]

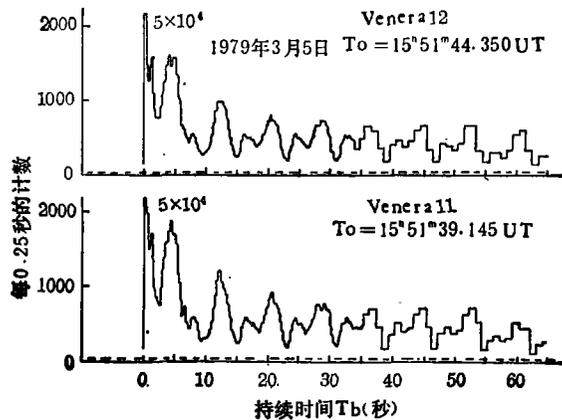


图 5 1979年3月5日事件时间结构图

年减少。在 1974—1975 年期间，很少出现宇宙  $\gamma$  射线爆发。

应当指出，探测到的宇宙  $\gamma$  射线爆发多少并不一定代表宇宙  $\gamma$  射线爆发出现的频率。探测到的爆发数还受天空是否有探测卫星、探测仪器的灵敏度和阈值等因素影响。对于前一个



因素,我们参看了[2]124页中图1。根据卫星发射时间和工作时间,这个影响是不大的。第二个因素的影响,我们采用将仪器归一化的方法已予以消除。因此图6给出的结果纯粹反映了宇宙 $\gamma$ 射线爆发出现的频率。

#### 四、宇宙 $\gamma$ 射线爆发的能谱

由于观测水平的关系,目前对宇宙 $\gamma$ 射线爆发的能谱还了解得不多。我们只收集到20来个爆发的能谱资料。这些资料告诉我们,不同的爆发事件能谱相差很大,有的呈指数谱,例如1978年11月15日事件,它可用下式表示:

$$\frac{dN}{dE} \propto \exp(-E/E_0)$$

其中 $E_0=100\sim 200\text{keV}$ ,表3所列事件均呈指数谱,由公式

$$\frac{dN}{dE} = I_0 \exp(-E/E_0) (\text{光子/厘米}^2 \cdot \text{秒} \cdot \text{keV})$$

表示。其中 $E_0$ 和 $I_0$ 值均在表3中。

表3. 宇宙 $\gamma$ 射线爆发的能谱特征

爆发日期	爆发相	$I_0$	$E_0$	爆发日期	爆发相	$I_0$	$E_0$
1971年 3月15日	第二极大	1.9	156	1972年 1月17日	第二极大	0.35	184
1971 3 18	第一衰减	1.8	174	1972 1 17	衰 减	0.11	170
1971 6 30	第一极大	0.7	276	1972 3 28	第一极大	0.50	238
1971 6 30	第二极大	1.5	142	1972 3 28	第二极大	0.55	176
1971 6 30	第二衰减	0.7	110	1972 5 14	第一极大	0.80	166
1972 1 17	第一衰减	0.1	138	1972 5 14	第二极大	0.80	152

另一些事件则呈幂律谱,由公式

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}$$

表示,其中 $\alpha$ 一般在1.3—2.5之间。但多数在1.5—1.7之间。

宇宙 $\gamma$ 射线爆发的能谱是很复杂的,其复杂性不仅表现在爆发事件之间能谱互有不同,即使同一个爆发事件,不同的相位,其能谱也是不同的,1977年10月20日事件就是一个例子<sup>[17]</sup>。这是一个多脉冲事件。在它的时间结构图上,从爆发开始到爆发结束可分为五个区域。区域1对应于双指数幂律谱, $\alpha_1=1.0\pm 0.5$ , $\alpha_2=2.9\pm 0.4$ ;区域3为单指数幂律谱, $\alpha=2.1\pm 0.5$ ;区域4则不能用任何合适的公式来拟合(图7)。

宇宙 $\gamma$ 射线爆发的能谱不是一成不变的。其演化的规律是:(1)随着持续时间 $T_0$ 增长,能谱越来越软(图8(a),(b))。曲线上数字分别表示持续时间为1秒,2秒……的能谱。(2)图9给出宇宙 $\gamma$ 射线爆发能谱演化的另一种特征:四个爆发事件初相能谱相差较大,而末相

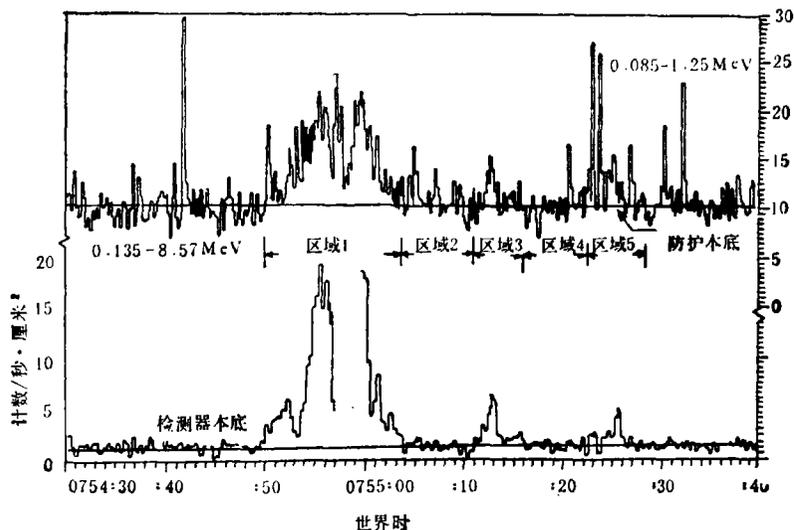


图 7(a) 1977年10月20日事件时间结构

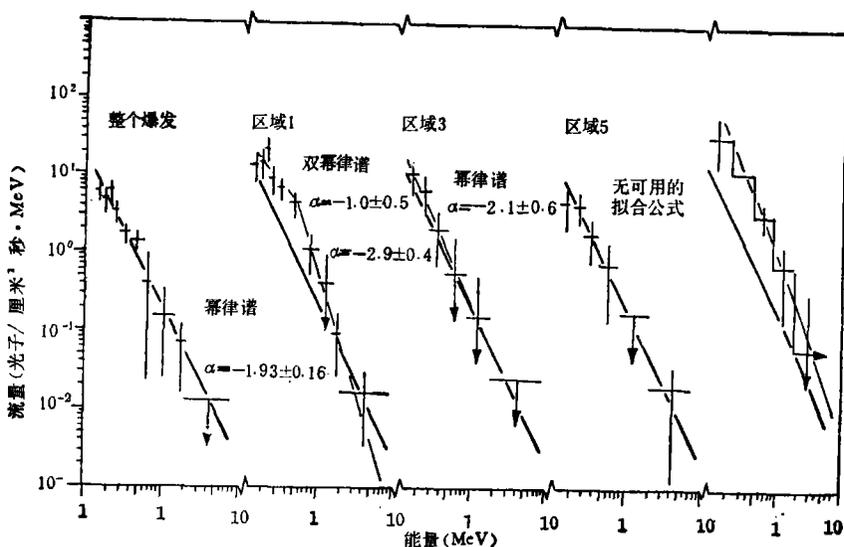


图 7(b) 1977年10月20日事件的能谱

却几乎相同。(3)有些事件的能谱始终保持不变<sup>[18]</sup>。(4)有些事件,如1978年11月19日事件,1979年1月13日、3月5日和4月6日事件在某些能量上强度增加许多<sup>[7]</sup>,这表明在这些宇宙 $\gamma$ 射线爆发中存在发射线。麦采兹<sup>[19]</sup>和高列尼斯基报告,在400~460keV能量上许多爆发事件都有特征谱线<sup>[19]</sup>。第加登和克林<sup>[20], [21]</sup>报告1979年11月19日事件在420keV和740keV有两条谱线,如果假设它们的原始谱线是正电子湮没线(511keV)和铁的一次激发态线(847keV),那这两条谱有相同的红移。麦采兹等人<sup>[22]</sup>还报告,在 $\gamma$ 射线爆发中有回旋加速

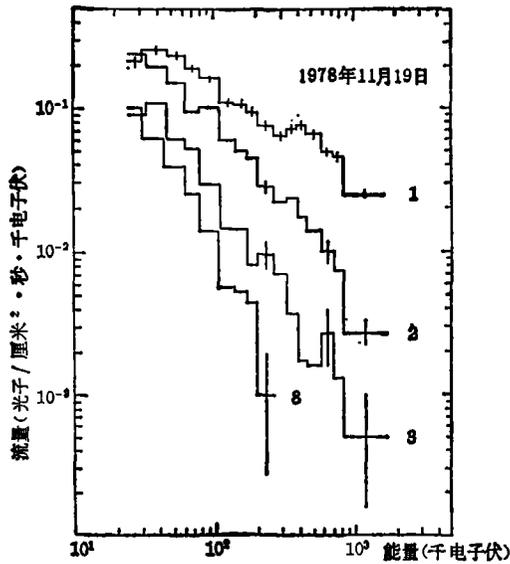


图 8(a) 1978年11月19日事件。曲线上数字1、2、3、8代表持续时间

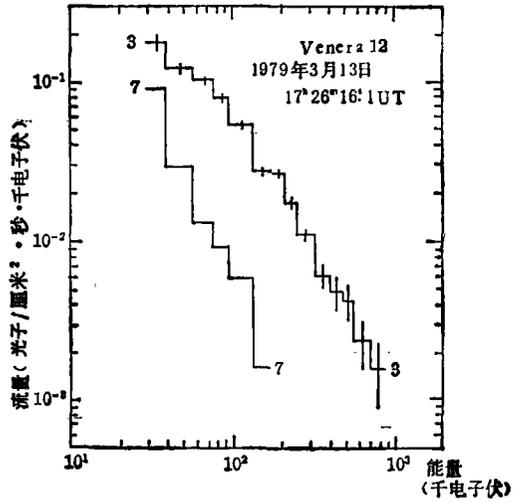
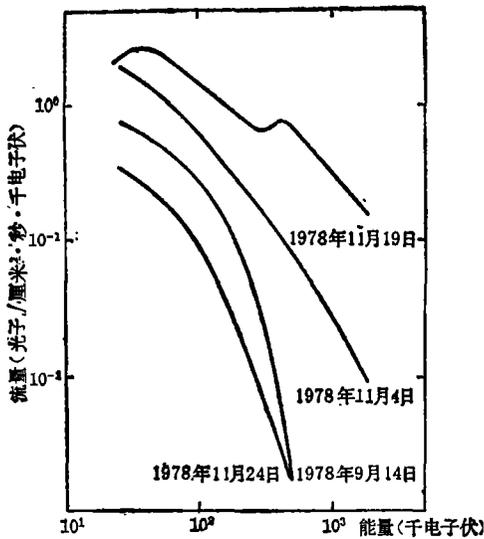
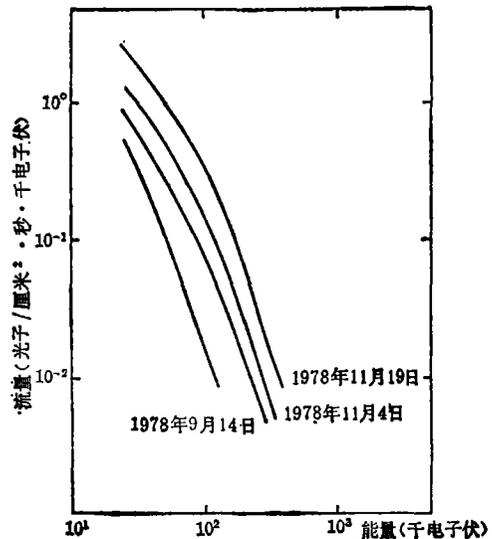


图 8(b) 1979年3月13日事件的能谱演化曲线上数字3、7代表持续时间



(a) 爆发初期测量谱



(b) 爆发末期测量谱

图 9 宇宙γ射线能谱演化

吸收线。这表明爆发源有强磁场。

宇宙γ射线爆发是天体物理和高能物理中最活跃的领域之一。除了观测到许多事件的时间结构、能谱之外，还得到一些事件的强度和辐射源的位置，由于篇幅所限，不一一介绍了。

在宇宙 $\gamma$ 射线爆发研究中, 不仅积累了大量的观测资料。在它的产能机制、贮能过程和辐射过程等方面都有许多研究。1979年3月5日事件引起理论家的极大兴趣, 1978年11月19日事件的爆发源位置已有广泛的讨论(见*Nature*, Vol.301, No.5900, p.491及其参考文献)。有兴趣的同志可参阅今年出版的*Nature*上的有关文章。

### 参 考 文 献

- [1] Klebesadel, R. W., Strong, I. B. & Olson, R. A.: *Ap. J.*, 182 (1973), L85.
- [2] Hurley, K., *Non-solar Gamma-rays*, Published by the committee on space research, p123.
- [3] Cline, T. L., Desai, U. D., Pizzichini, G., Spizzichina, A. J., Klebesadel, R. W., Ricketts, M. & Helmken, H., *Ap. J.*, 229 (1979), L47.
- [4] Klebesadel, R. W., Evans, W. D., Laros, L. G. & Strong, I. B., *Ap. J.*, 259 (1982), L51.
- [5] Mazets, E. P. & Golenetskii, S. V., *Astrophys. and space Sci.*, 75 (1981), 59.
- [6] Desai, U. D., *Astrophys. and space Sci.*, 75 (1981), 15.
- [7] Mazets, E. P. & Golenetskii, S. V., *Astrophys. and space Sci.*, 75 (1981), 61.
- [8] 同 [6], 75 (1981), 76.
- [9] 同 [6], 75 (1981), 77.
- [10] Evans, W. D., Fenimore, E. E., Klebesadel, R. W. Laros, J. G. and Terrell, N. J. *Astrophys. and space Sci.*, 75 (1981), 35.
- [11] Vedrenne, G.: *Gamma-Ray Astronomy*, The Royal Society of London, (1981), 648.
- [12] Nakano, G. H., Imhof, W. L., & Reagan, J. B. in RSRO, sp-106, The Context and Status of Gamma-Ray Astronomy, 9th ESLAB symp. Frascati, Italy, (1974).
- [13] Laros, J. G., Evans, W. D., Klebesadel, R. W., Olson, R. A., & Spalding, R. E., *Nature*, 267 (1977), 131.
- [14] 同 [6]
- [15] Barat, C., Chambon, G., Hurley, K., Neil, M. & Vedrenne, G, *Astrophys. and Space Sci.*, 75 (1981), 83.
- [16] 同 [5]
- [17] Knight, F. K., Matteson, J. L. & Feterson, L. E., *Astrophys. and space Sci.* 75 (1981), 21.
- [18] Gilman, D., Metzzer, A. E., Parker, R. H., Evans, L. G. & Trombka, J. I., *Ap. J.*, 236 (1980), 951.
- [19] Mazets, E. P., & Golenetskii, S. V., Toulouse Symposium on Cosmic Gamma-ray Bursts (1979).
- [20] Teegarden, B. J. & Cline, T. L., 同 [19].
- [21] Teegarden, b. j. & Cline, T. L., *Ap. J.*, 236 (1980), L67.
- [22] Mazets, E. P., et al., Preprint 662, Ioffe Institute Leningrad, USSR.

## Statistical Characteristics of Cosmic Gamma-ray Bursts

Xu Yong-xuan

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

Cosmic Gamma-ray Bursts are a sort of astrophysical phenomena which can release extremely high energy. Recently, more than hundred bursts have been detected since it was discovered in 1973. Time structure, spectrum and intensity of many bursts have been published and position of a few burst sources have also been reported. This paper describes some statistical characteristics of Cosmic Gamma-ray Burst.