

用ARGO-YBJ 实验的SPT 寻找 $\sim$ GeV的伽玛暴

YONG ARGO-YBJ SHIYAN DE
SPT XUNZHAO $\sim$ GeV DE GAMABAO

冯凤荣 ● 著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

用ARGO-YBJ

实验的SPT 寻找 $\sim$ GeV的伽玛暴

YONG ARG0-YBJ SHIYAN DE
SPT XUNZHAO $\sim$ GeV DE GAMABAO

祝凤荣 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

用 ARGO-YBJ 实验的 SPT 寻找 $\sim$ GeV 的伽玛暴 / 祝凤荣
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.7
ISBN 978-7-5643-2365-3

I. ①用… II. ①祝… III. ①宇宙 γ 射线暴—探测
IV. ①O572.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 119985 号

用 ARGO-YBJ 实验的 SPT 寻找 $\sim$ GeV 的伽玛暴

祝凤荣 著

责任编辑	张宝华
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川川印印刷有限公司
成品尺寸	148 mm $\times$ 210 mm
印 张	5.125
字 数	143 千字
版 次	2013 年 7 月第 1 版
印 次	2013 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-2365-3
定 价	21.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

γ 暴是来自宇宙空间的 γ 射线，在短时间内突然增强的现象。现已发现的光子能量主要集中在 $10\text{ KeV} \sim 10\text{ GeV}$ 能区，能谱是非热的幂率谱，在高端并未见截断；在已发现的几千个 γ 暴中，仅有 3 个暴的光子能量超过 1 GeV ，且光子的最高能量是 18 GeV ，理论预期甚至存在 TeV 能区的 γ 暴。 γ 暴中的高能光子存在问题是揭开 γ 暴之谜的关键，因此进一步寻找 $\sim\text{GeV}$ γ 暴，收集更多的样本，是当今 γ 暴科学研究的重大问题之一。ARGO-YBJ 实验位于海拔 4300 m 的西藏羊八井镇，由单层的气体探测器 Resistant Plate Chamber (RPC) 全覆盖构成，中心区探测面积达到 5600 m^2 。运行在计数模式下的 Single Particle Technique (SPT)，对光子的探测阈能达到 $\sim 1\text{ GeV}$ 。为了论述上的方便，对运行在计数模式下的 SPT 沿用习惯上的称谓：单粒子。与传统的 EAS 阵列相比，用单粒子寻找 $\sim\text{GeV}$ 的 γ 暴具有十分明显的优势。

为了保持本书的完整性，对于用羊八井中子监测器和太阳中子望远镜数据进行的太阳宇宙线研究的重要内容没有搜集在内，同时，没有包括在内的还有对 ARGO-YBJ 实验的事例率的研究。本书共分 7 章，具体内容如下：

第 1 章讨论了 GeV γ 暴的高能辐射观测的重要性和目前的观测现状以及用 ARGO-YBJ 的单粒子数据寻找 GeV γ 暴的优势。

第 2 章是相关 γ 暴背景知识的简单介绍，主要从现有的观测结果和理论模型两方面来介绍，同时介绍了 γ 暴高能部分的观测和辐射机制。

第 3 章是有关 ARGO-YBJ 实验的知识。首先简单介绍了广延大气簇射的基本知识，然后对 ARGO-YBJ 实验的各个部分做了简单论述，其中有 RPC 的静态测试、动态测试等研究。

第4章主要介绍了单粒子数据监测的方法、监测过程中发现的问题和已经解决的问题。

第5章是对单粒子的模拟研究。利用 CORSIKA 和 ARGO-G 程序包,结合原初宇宙线能谱,考虑了足够大的投点面积及足够大的统计量,依据实验数据对所做的结果作出修正,得出了与单粒子的4个道的实验数据相一致的宇宙线本底的计数率和对应探测器的有效面积,以及不同能量的 γ 光子对应探测器的有效面积和单粒子的4个道的典型流强上限。

第6章是利用单粒子的数据寻找与卫星相符合的 $\sim\text{GeV}$ γ 暴。首先依据卫星数据,寻找羊八井视场内的 γ 暴。由于 γ 暴分为长暴和短暴,由此给我们的数据带来不同的处理办法:对于短暴,根据 T90 算出信号的统计显著性超出 σ 与否做出判断,如果 σ 大于5,再进一步判断该信号是否由暴引起,否则求出其流强上限。对于长暴,在算出信号的统计显著性之前,要对数据进行气象效应的修正。用两种方法研究了单粒子数据的气象效应,对于 ≥ 2 、 ≥ 3 、 ≥ 4 道,求出了相应的修正系数,通过比较得出了其数据与 AS γ 实验的单粒子、羊八井太阳中子望远镜相一致的行为;对于 ≥ 1 道,由于其复杂性,在目前的实验条件下仍无法利用全部数据进行宇宙线方面的研究。根据暴的 T90 对应的数据,从2004年12月份到2007年3月份,单粒子没有探测到 γ 暴。

第7章是总结和展望。

本书在撰写过程中受到中央高校基金(SWJTU12ZT11)的大力资助和 ARGO-YBJ 实验合作组的老师、同学的帮助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,本书不妥之处敬请指出。

作 者

2013年2月

目 录

1 引 言	1
2 γ 射线暴	4
2.1 γ 射线暴的观测	4
2.2 γ 射线暴的理论	19
2.3 γ 射线暴的探测	26
3 羊八井 ARGO-YBJ 实验及其单粒子	30
3.1 广延大气簇射及其探测	30
3.2 ARGO-YBJ 实验	32
3.3 ARGO-YBJ 实验的单粒子	57
4 数据监测	60
4.1 数据监测的方法	60
4.2 发现的问题	63
4.3 解决问题——割断相连的 strip 对的信号线	72
5 ARGO-YBJ 实验单粒子系统的 MC 模拟	81
5.1 CORSIKA 和 ARGO-G 程序包	81
5.2 γ 射线的模拟	101
6 寻找 GeV 的 γ 暴	106
6.1 ARGO-YBJ 实验 SPT 的气象效应	106
6.2 ARGO-YBJ 实验的 SPT 可寻找 GeV γ 暴的类型	131

6.3 寻找 GeV 暴的方法 133

7 总结和展望 148

附录 A 模拟程序输入卡 150

参考文献 153

攻读博士学位期间发表的文章 157

引 言

1912 年,奥地利物理学家赫斯(Hess)乘气球载电离室上升至 5 000 多 m 的高空,发现电离越来越强,且白天和晚上的强度并没有差别,由此断定此电离辐射来自宇宙空间,故命名为宇宙射线。此后不久,德国物理学家科尔霍斯特(Kohlorster)于 1914 年证实了该辐射在 9 000 多米的高空仍然存在的事实。1968 年,美国物理学家克劳夏(Kraushaar)等用卫星上的探测器发现了宇宙中的 γ 射线^[1]。

γ 射线暴(简称 γ 暴, GRB)是来自宇宙空间的高能光子在短时间内爆发的现象。这一现象由美国军事卫星维拉(Vela)于 1967 年在监测核爆炸时发现,1973 年公开发表^[2]。随即人们认识到这是来自地球外的又一新的重大科学之谜,之后,许多卫星实验和地面实验都投入了对 γ 暴的研究工作。在 1991 年 4 月份至 2000 年 6 月份期间,康普顿伽玛射线观测站(Compton Gamma Ray Observatory, CGRO)上的 BATSE(Burst And Transit Source Experiment)探测器进行了全天区扫描以寻找 γ 暴。其结果表明, γ 射线暴在到达方向上是各向同性分布^[3]。但由于不能确定暴的红移,所以暴是起源于宇宙学距离上(即银河系外)还是银河系内一直没有定论。问题的突破是在 1997 年,意大利/荷兰卫星 Beppo-SAX 探测到来自于 γ 暴的第一个 X 射线余辉的发现^[4, 5], 此暴在几个小时的延迟之后被地面的天文望远镜精确定位到几个角分。余辉一般持续几个星期的时间,能够在光学和射电波段进行长时间的观测,从而能够更精确的定位,进而

测量到红移和寄主星系。余辉的测量最终证明了伽玛暴与最遥远的星系和类星体一样，也是起源于宇宙学距离上的。由于是宇宙学距离， γ 暴必须在瞬间爆发中消耗掉相当于一个极度光学厚的 $e^+ - \gamma$ 光子火球，这与观测上的 γ 暴的非热谱不相符。为此，Rees 等提出了火球-激波模型^[6]，它很好地解释了一些暴的性质，并成功地预言了余辉的性质。现在，火球-激波模型被普遍接受。

2002 年 10 月份发射的高能暂现源探索卫星（High-Energy Transient Explorer-2, HETE-2）不仅可探测到 γ 暴爆发后几小时的余辉，还可以捕捉到爆发后更早期的类似于软 γ 暴的 X 射线闪（X-ray flash, XRF），其辐射能量主要集中在 $2 \sim 25 \text{ KeV}$ 。这首次确定了 γ 暴与超新星成协^[7]。2004 年 11 月份发射的雨燕号卫星 Swift 的两年来的观测结果对我们理解 γ 暴具有划时代的革命。它能够在暴触发后的 1 min 左右精确定出 γ 射线、X 射线和光学波段的余辉的位置，实现了盼望已久的“短暴”余辉的测量，突破了天体物理学家认为的红移 $z \sim 6$ 的界限^[8-10]。

总之，自从 γ 射线暴发现以来， γ 暴的时间结构、空间分布、能谱特征、余辉等取得了丰富的观测资料，这对 γ 暴的物理过程有了一定程度的理解，但仍然有许多问题没有解决，而随着观测的进展，新的问题又不断出现。 GeV 的高能光子辐射，虽然在火球模型中可以实现，但这 10 多个模型中的过程究竟哪个是发生在 γ 暴的爆发过程中呢？这仍然是一个亟待解决的问题。另外，虽然 γ 暴的火球模型和观测数据在许多地方相符合，但是 γ 暴的火球模型中的洛伦兹因子目前仍是一个不知道的重要参数。由于内激波中光子的产生，且期望在 GRB 的能谱中有一个截断，对这一现象目前仍没有清楚地观测到。

在寻找 GeV γ 暴方面，CGRO 上的高能 γ 射线实验望远镜（Energetic Gamma Ray Experiment Telescope, EGRET）的探测器推进了地面 EAS 阵列实验和大气契伦科夫望远镜对高能 γ 暴的研究工作。由于 γ 射线的流强随着能量的升高而快速降低，这就要求有更大的有效探测面积，而地面阵列可以以较少的花费来实现阵列的运行，并达到较大的有效探测面积。即使在 γ 射线太空大面积望远镜（The

Gamma Ray Large Area Space Telescope, GLAST) 运行之后^[11], 地面阵列由于其大的有效探测面积使得在找寻 GeV γ 暴方面仍然具有优势。GLAST 的探测能量上限高到 300 GeV, 可以实现和地面阵列的交叉观测。

大气 γ 射线成像契伦科夫望远镜 (The Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope, MAGIC), 探测阈能是 ~ 100 GeV, 有效面积大约是 $10^4 \sim 10^5 \text{ m}^2$, 视场是 $\sim 0.01 \text{ sr}$ ^[12]。自 2004 年试运行以来, 虽历经升级, 但仍没有探测到高能 GRB。对于 GRB050713, MAGIC 收到 Swift 预警 12 s 后, 开始长达 37 min 的跟随观测。由于其较高的阈能, 仍没有探测到, 但它给出了能段 175 GeV $\sim$ 225 GeV、225 GeV $\sim$ 300 GeV、300 GeV $\sim$ 400 GeV、400 GeV $\sim$ 1 000 GeV 的流强上限 $\sim 10^{-9} \text{ ergs/cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[13]。不过到目前, High Energy Stereoscopic System (HESS) 实验还没有探测到 γ 暴, 但探测到了 γ 暴遗迹^[14]。另外, 几个契伦科夫望远镜 VERITS^[15]、HAGAR^[16]、MACE^[17]或在筹建中, 或在开发中。契伦科夫望远镜在 γ 暴观测上的不足之处, 在于它不能实现全天区、全天候的观测, 从而会与许多 γ 暴失之交臂。

与契伦科夫望远镜相比较, 地面广延大气簇射阵列 (Extensive Air Array, EAS) 可以实现宽视场、全天候的观测。但传统的广延大气簇射阵列, 如 GRAND 实验、Andyrchy 实验、Milagro 实验和西藏的 AS γ 阵列, 由于其较高的探测阈能, 目前仍没有探测到高能 γ 暴。利用 EAS 阵列的单粒子计数, 可以有效地降低地面 γ 暴的探测阈能^[18]。在南半球墨西哥的 Auger 实验的水箱 (watertank) 将被用于对高能 γ 暴的探测^[19, 20], 而位于北半球的我们的 ARGO-YBJ 实验的单粒子计数技术^[21-23] (或参考第 3 章), 对 γ 光子的探测阈能可低到 $\sim 1 \text{ GeV}$ (全阵列), 这是目前探测阈能最低的地面运行阵列。本书将利用 ARGO 实验的单粒子寻找 GeV γ 暴。

2

γ 射线暴

1973 年, γ 射线暴的观测结果在美国天体物理杂志 (ApJL) 上的发表标志着 γ 射线暴研究领域的诞生^[24]。经历了 1973—1991 年 γ 射线暴研究的“黑暗时期”和 1991—1997 年的“黎明时期”, 伴随着 1997 年 Beppo-SAX 卫星和 2004 年 Swift 卫星的发射成功, 迎来了 γ 射线暴研究的“黄金时期”, γ 射线暴是当今天体物理领域最热门的研究之一。

2.1 γ 射线暴的观测

目前, 人类对 γ 射线暴的研究已经积累了丰富的观测资料, 近几年的研究主要是关于 γ 射线暴的余辉的研究。这部分的观测包括两部分: 快速辐射和余辉的观测。

2.1.1 快速辐射

快速辐射是指 γ 暴自身的辐射, 其主要的观测特征如下:

(1) 空间分布。

图 2.1 显示出 BATSE 探测到的 2 704 个 γ 射线暴在天球上的位置。可以看出, 它们的空间角分布是非常好的各向同性分布, 但却不

是均匀分布的，弱的源（距离地球远的源）偏少。这两个空间分布特性确定了 γ 射线暴起源于宇宙学的距离上^[25]。不过，真正从实验上确定是在 1997 年通过 Beppo-SAX 卫星对 GRB 的 X 射线余辉的测量^[26]。

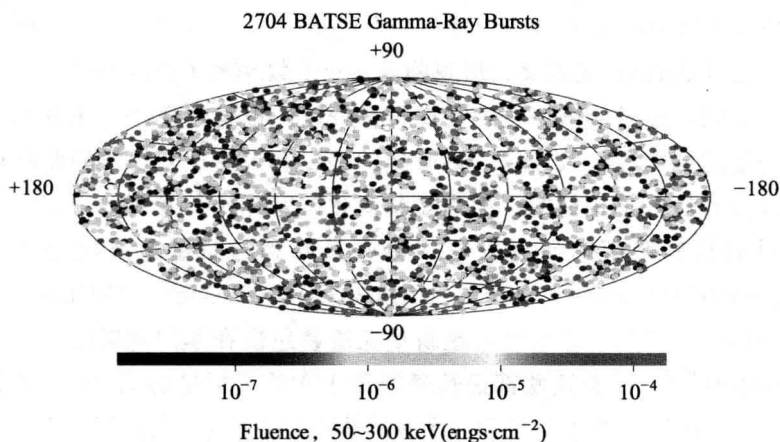


图 2.1 BATSE 所记录到的 2 704 个 γ 射线暴在天球上的分布

(2) 持续时间。

“典型” γ 射线暴的持续时间是 10 s。如图 2.2 所示，暴的持续时

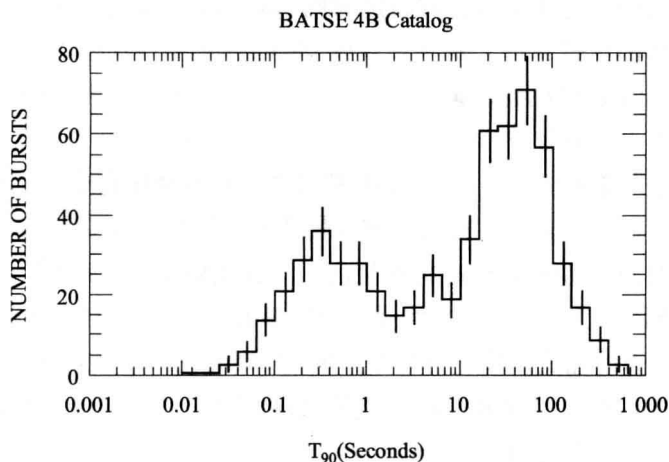
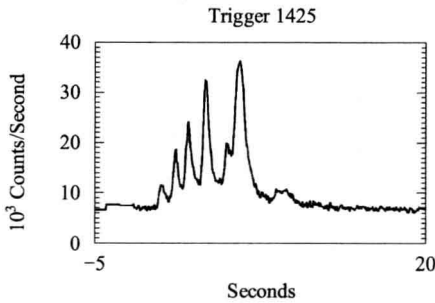
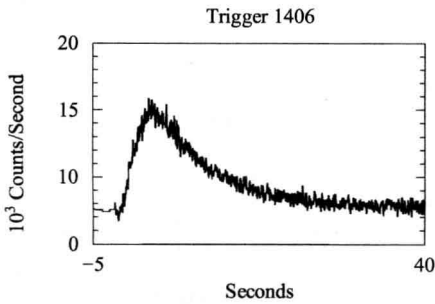
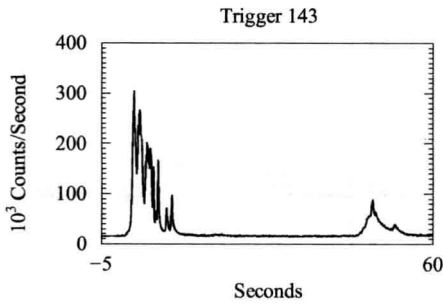
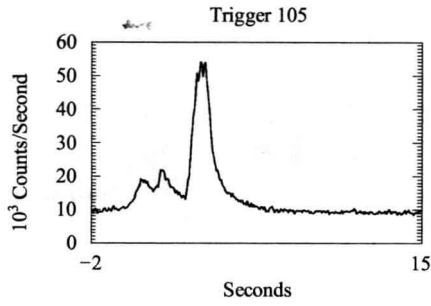


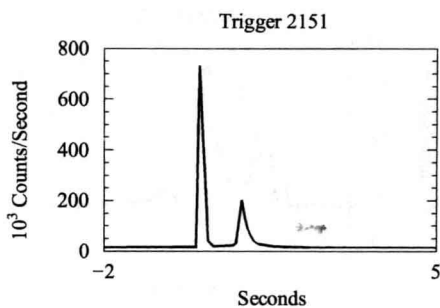
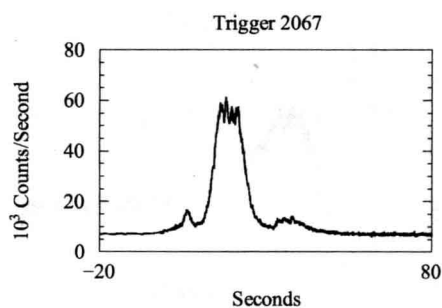
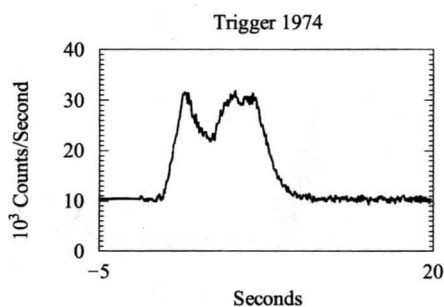
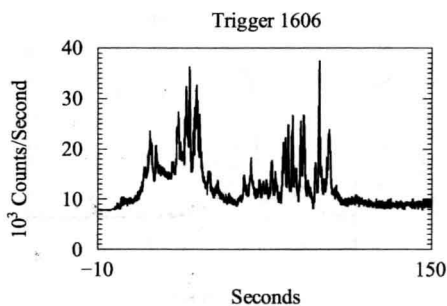
图 2.2 BATSE 所记录到的 2 704 个 γ 射线暴的持续时间分布

间分布跨了 6 个量级, 从 10^{-3} 到 10^3 s, 呈典型的双峰结构。BATSE 探测到的最短的暴是 5 ms, 其中还有 0.2 ms 的光变结构^[27]。目前, 持续时间最长的暴是 GRB940217, 其 GeV 能端的辐射持续了 1.5 h^[28]。以持续时间 T₉₀ 的 2 s 为界, 暴可分为长暴 (≥ 2 s) 和短暴 (≤ 2 s)^[29]。T₉₀ 是由 BATSE 组定义, 指观测到 γ 光子数 90% (5% ~ 95%) 所需要的时间。经过能谱分析, 发现长暴较软, 短暴较硬^[30], 主要是因为短暴的低能谱指数较硬。更有趣的是, 有人发现, 长暴的前两秒的时变和短暴是相似的, 但是短暴变化的时标比长暴要短得多^[31]。通过对长暴余辉的研究发现, 有些长暴和超新星遗迹成协 (比如, GRB980425/SN1998bw^[32]、GRB030329/SN2003dh^[33]、GRB060218/SN2006aj^[35-37])。有些红的超新星遗迹鼓包也在暴的晚期的光学余辉中发现^[34], 所有这些都是长暴起源于大质量恒星的塌缩的有力证据。对于短暴, 通过其 X 射线余辉的精确定位发现, 它们处于寄主星系的外围, 而且该寄主星系属于无恒星形成的、年老的椭圆星系^[38-41]。通过分析短暴 GRB050509b 和 GRB050709, 基本上确认短暴来源于双中子星的并合。但是 GRB060614 的发现对这一分类提出了挑战。从辐射的持续时间来看, 其持续时间为 ~ 100 s, 属于长暴, 但是, 其暴的谱的延迟特征和寄主星系以及余辉的特征又和短暴类似。因此, 文献[8]建议根据其起源把暴的分类改称为 I 型暴和 II 型暴。

(3) 光变曲线。

γ 的光变曲线 (见图 2.3) 非常多变, 有多峰也有单峰, 有复杂的也有平滑的, 其中往往有很短的快速光变结构 ($\delta t \approx 10$ ms)^[42], GRB990123 的快速光变时标在暴的早期和晚期没有变化^[43], 这支持内激波模型。为了检验 γ 射线暴的宇宙学效应, 人们用各种处理方法对 γ 射线暴的光变曲线进行时变分析, 发现无论长暴还是短暴, 弱暴的时间结构相对于强暴都存在时间拉伸效应^[44-46], 这也支持 γ 射线暴的宇宙学起源的观点。





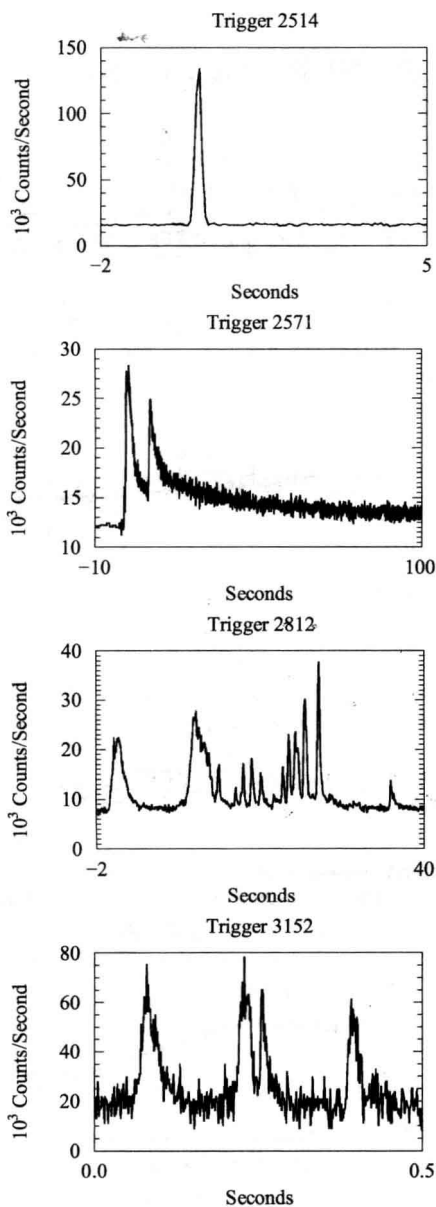


图 2.3 BATSE 所记录到 γ 射线暴的典型光变曲线

(4) 能谱特征。

γ 射线暴的能谱是非热谱 (见图 2.4), 辐射主要集中在几百 KeV 的能段, 各个暴的能谱各异。

