

γ 暴研究的重大突破： 余辉的发现与观测研究

黄永锋 陆 焱

(南京大学天文系 南京 210093)

摘 要

由于 BeppoSAX 卫星的独特贡献,最近观测到了若干 γ 暴在 X 射线、光学甚至射电波段上的对应体,一度陷入困境的 γ 暴研究再次取得了突破性的进展。目前已经观测到了 γ 暴 GRB 970228 持续六个月以上的光学余辉,发现它可能位于一个暗弱的宿主星系中; GRB 970508 的光学余辉有较为复杂的表现,并测出其红移范围 $0.85 < z < 2.1$ 。在该暴发生约五、六天之后,还观测到了射电耀发现象。观测上的重大突破比较有力地支持了 γ 暴的宇宙学起源及火球模型。

关键词 γ 射线: 暴 — γ 射线: 观测 — 中子星 — γ 射线天文学

分类号: P172.3

1 引 言

γ 暴是一种来自宇宙空间的短时标的 γ 射线爆发现象,从发现至今已近 30 年^[1]。1991 年美国发射了一颗康普顿 γ 射线天文台卫星 (CGRO), 上面的 BATSE 仪器一年中能观测到大约 300 个 γ 暴事件, 由此估计一年中约发生 800 个 γ 暴。

γ 暴明显地分为两类。一类称为软重复暴^[2-6], 其特点是 γ 光子能量较低, 集中在几十 keV 附近, 且同一源会无规律地重复爆发。长期来软重复暴源只发现了 3 个, 它们均与超新星遗迹成协^[7]。3 个源中重复爆发次数最多的已达 100 多次, 最少的是 6 次。虽然软重复暴的机制目前仍不清楚, 但基本上能确认它同中子星这样的致密天体有关, 涉及到的能量约 10^{44} — 10^{45} erg。最近似乎又发现了第 4 个软重复暴源^[76], 但尚需进一步的观测确认。另一类 γ 暴称为经典 γ 暴, 在空间分布上是高度各向同性的。如果经典 γ 暴也象 X 射线暴一样同宇宙中的亮物质相关^[8], 那么它们可能会发生在 3 种距离尺度上: 离太阳 1 kpc 以内的银盘中、或离银心 100—300 kpc 的银晕中、或是发生在约 1 Gpc 的宇宙学距离上。这 3 种距离要求的 γ 暴能量分别约为 10^{39} 、 10^{44} 、 10^{51} erg。长期以来, 由于 γ 暴探测器在定位上都存

在着较大误差, 在 γ 暴的位置范围内天体太多, 难以证认出 γ 暴在其它波段上的对应体, 使 γ 暴的距离问题悬而未决, γ 暴也因此成为天体物理领域的一大谜。关于 CGRO 开始工作以来 γ 暴的研究情况, 可参考文献 [9,10]。

进入 1997 年, γ 暴的观测取得了新的重大突破。由意大利和荷兰合作研制的 BeppoSAX 卫星 [11,12], 由于其独具匠心的设计, 能够用 X 射线仪器迅速地定出某些 γ 暴的精确位置, 从而使人们观测到了一些 γ 暴在低能波段上的余辉。余辉的发现对 γ 暴的研究在两个方面实现了突破: 一是观测时间从秒量级拓宽到了月量级; 二是能量上从 γ 射线拓宽到包括光学甚至射电在内的全波段。不仅 γ 暴的距离问题有望因此而得以解决, 而且也为我们检验 γ 暴的理论模型提供了更为丰富的资料。

2 BeppoSAX 卫星

在近二十多年中, 人们一直都在努力寻找 γ 暴的光学对应体 [13-17]。但以前的观测一般都是在 γ 暴发生一周甚至更长以后才得以进行, 或者观测的极限星等不够 ($V = 20^m$), 都没有得到肯定的观测结果。最快速最灵敏的两次观测所达到的水平是: 时间延迟 1.85 d, 极限星等 $m = 23^m$ [17]; 时间延迟 4.0 d, 极限星等 $m_B = 22^m$ [13]。1996 年 4 月 30 日, 意大利和荷兰合作研制的 BeppoSAX 卫星发射升空, 才使得这种现状大为改观。

BeppoSAX 用于观测 γ 暴的仪器主要有: 一个 γ 暴监测器 GRBM (Gamma Ray Burst Monitor, 40—600 keV)、两个宽视场 X 射线照相机 WFC (Wide Field Camera, 2—30 keV) 及两个窄视场 X 射线仪器 NFI (Narrow Field Instruments)。WFC 视场约 $40^\circ \times 40^\circ$, 分辨率可达 $3'$ 左右。NFI 包括两个仪器 LECS 和 MECS, 其中 LECS 工作于 0.1—10 keV 能段, 定位精度可达 $50''$ 左右, 而 MECS 工作于 2—10 keV 能段。

GRBM 可以接收到来自整个 4π 立体角范围内的 γ 暴, 但是它的定位能力很差。不过如前所述, 由于 2 个 WFC 具有很大的视场, 它们随时都监视着约占 5% 的天区面积。每当 GRBM 探测到一次 γ 暴, BeppoSAX 就检测 WFC, 看看是否有相关的 X 射线爆发事件, 一旦有, 就能够迅速定出位置来, 误差将只有几个角分。接下来, 在仅仅 8 h 之内, 地面工作人员便可以调整卫星姿态将 NFI 指到 γ 暴源, 进一步给出误差不到 $1'$ 的更精确位置。从而地面上的光学望远镜在 γ 暴后几 h 之内就能够迅速作出反应, 为观测 γ 暴的光学对应体赢得了宝贵的时间。从理论上讲, BeppoSAX 定位出 γ 暴的机会是平均每月一个。

当然 BeppoSAX 的这种设计思想包含了一个假设, 即 γ 暴发生时会同时伴随着强烈的 X 射线活动。这样由 GRBM 的 γ 光变曲线和 WFC 的 X 光变曲线的相关性便可以确认 WFC 视场中的 X 变源就是 γ 暴的对应体。幸运的是, 事实证明 BeppoSAX 的这种设计思想是成功的, 到 1997 年 8 月底, BeppoSAX 已成功地定出了至少 4 个 γ 暴的位置, 它们是 GRB 970111、970228、970402、970508。

受到 BeppoSAX 卫星观测成功的启示和鼓舞, CGRO 卫星小组和 Rossi 卫星小组 RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) 进行了密切的合作, 也成功地定出了 3 个 γ 暴源的位置, 即 GRB 970616、970815、970828。

3 γ 暴的余辉

从1997年1月11日到8月底,已经有7个 γ 暴的位置得到了迅速的测定。后续的观测发现它们在X、光学、红外和射电各个波段都存在着余辉辐射。光学波段的余辉甚至在6个月之后还能被观测到。观测显示GRB 970228发生在一个暗弱的宿主星系中,另外还测出了GRB 970508光学对应体的红移,这样一些事实有力地支持了 γ 暴的宇宙学起源。火球模型^[18-26]因此成为当前最流行最成功的 γ 暴模型。

表1和表2概述了对7个 γ 暴源及其余辉的观测情况。下面我们分别详细地介绍对这7个 γ 暴的观测结果。

表1 7个 γ 暴的认证情况

GRB Name	定位仪器	爆发时间 (UT)	α	δ	光学观测时延
970111	BeppoSAX	11.405556	15 ^h 28 ^m 48 ^s	+19°34'	67 h
970228	BeppoSAX	28.123620	05 ^h 01 ^m 44 ^s	+11°47'	15.3 h
970402	BeppoSAX	2.930	14 ^h 50 ^m 06 ^s	-69°20'	19.2 h
970508	BeppoSAX	8.904	06 ^h 53 ^m 47 ^s	+79°16'	5.4 h
970616	CGRO/RXTE	16.757	01 ^h 19 ^m	-5°30'	17.8 h
970815	CGRO/RXTE	15.50491	16 ^h 08 ^m	+81°30'	15.5 h
970828	CGRO/RXTE	28.73931	18 ^h 08 ^m 29 ^s	+59°18'	7.0 h

表2 7个 γ 暴的余辉概况

GRB Name	GRB			余辉波段			
	强度	光变曲线	持续时间	X射线	光学	红外	射电
970111	强	3峰	50 s	无	无	无	无
970228	中等	4峰	80 s	有	有	有	无
970402	弱	多峰	>100 s	有	无	无	无
970508	弱	单峰	35 s	有	有	有	有
970616	强	多峰	200 s	有	无	无	无
970815	?	双峰	130 s	无	无	无	无
970828	?	?	>160 s	有	无	无	无

3.1 GRB 970111

BeppoSAX记录到GRB 970111爆发时间是1月11.405556日(UT)^[27]。这是具有三峰结构的强 γ 暴,持续约50 s。两主峰强度相当,相隔9 s,第三峰出现于第二峰之后17 s。该暴正好处于BeppoSAX第二个WFC的视场中,由此初步定出其位置是 $\alpha = 15^{\text{h}}28^{\text{m}}24^{\text{s}}$, $\delta = +19^{\circ}40'.0$ (本文位置坐标均以2000.0年为历元),误差半径为 $10'$ 。在WFC中,该源的X峰值流量约相当于蟹状星云(Crab)的4倍,或简写成4 Crab。进一步结合Ulysses卫星和CGRO上BATSE的观测结果,利用长基线方法, Hurley等人^[28]给出了更小的误差范围。

BeppoSAX的NFI在1月12.09—13.38日(UT)即 γ 暴后约16.8 h再次在该方向观测^[29]。虽然发现了两个X源,但均在上述误差范围之外,不大可能是 γ 暴的对应体。1月16日(UT)ROSAT卫星也没有在误差盒(Error box)内发现X射线对应体^[30]。从1月14到31日乃至2月28日,多次的光学、射电观测均未能误差范围内发现任何变源。因此对于GRB 970111,除了BeppoSAX的WFC记录到了与 γ 暴同步的X射线爆发活动外,实际上

并未观测到它在 X 和光学波段的余辉 [31,32]。

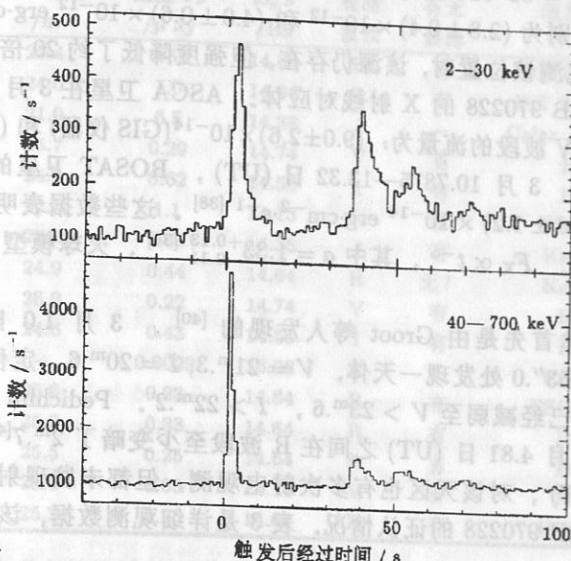


图 1 BeppoSAX 的 GRBM 和 WFC 记录到的 GRB 970228 的 γ 和 X 光变曲线 [34]

3.2 GRB 970228

γ 和 X 光变曲线有很好的相关性, 表明该 γ 暴位于 WFC 的视场内

GRB 970228 发生于 2 月 28 日 2:58:01 (UT), 即 2 月 28.123620 日 (UT) [33,34]。这是一个中等强度的 γ 暴, 具有多峰结构, 由一个主峰和 3 个强度依次递减的次峰构成, 持续时间为 80 s。在 40—600 keV、40—1000 keV 和 1.5—7.8 keV 波段, 峰值流量分别约达到 4×10^{-6} 、 6×10^{-6} 和 $10^{-7} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该暴在包含峰值时刻的 3.6 s 里能流约为 $2 \times 10^{-6} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}$ [35]。BeppoSAX 的 WFC 记录到与 γ 暴高度相关的 X 爆发事件 (如图 1 所示), 表明 GRB 970228 正好处于 BeppoSAX WFC 的视场内。BeppoSAX 由此可比较精确地定出其位置为 $\alpha = 05^{\text{h}}01^{\text{m}}57^{\text{s}}$, $\delta = +11^{\circ}46'.4$, 误差半径为 $3'$ 。

在 2 月 28.458 日 (UT), 即在 γ 暴发生 8 h 之后, BeppoSAX NFI 指向了上述位置 [36], 观测到一个新的 X 射线源, 命名为 SAX J0501.7+1146,

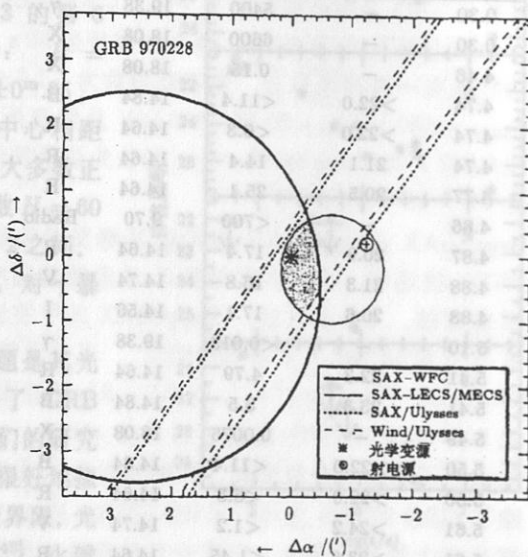


图 2 GRB 970228 的认证情况 [44]

坐标以光学变源 ($\alpha = 05^{\text{h}}01^{\text{m}}46^{\text{s}}.665$, $\delta = +11^{\circ}46'53''.9$) 为零点。两个圆圈分别是 BeppoSAX WFC 和 NFIs 的 $3'$ 和 $50''$ 误差范围。图中同时给出了 Wind/Ulysses 和 SAX/Ulysses 定出的误差带。VLA 观测到的射电源与 GRB 970228 无关

其定位精度也进一步提高 ($\alpha = 05^{\text{h}}01^{\text{m}}44^{\text{s}}$, $\delta = +11^{\circ}46'7''$, 误差半径 $50''$)。在 2—10 keV 和 0.5—10 keV 波段, 其流量分别为 $(2.8 \pm 0.4) \times 10^{-12}$ 和 $(4.0 \pm 0.6) \times 10^{-12} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。3 月 3.734 日, BeppoSAX 再次观测该位置时, 该源仍存在, 但强度降低了约 20 倍。观测结果表明 SAX J0501.7+1146 就是 GRB 970228 的 X 射线对应体。ASCA 卫星在 3 月 7.028—7.486 日 (UT) 测得该对应体 2—10 keV 波段的流量为: $(9.0 \pm 2.6) \times 10^{-14}$ (GIS 仪器) 和 $(7.2 \pm 2.1) \times 10^{-14} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (SIS 仪器)^[37]。3 月 10.7875—13.32 日 (UT), ROSAT 卫星的 HRI 仪器测得 0.1—2.4 keV 波段流量为 $(3.8 \pm 1.2) \times 10^{-14} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[38]。这些数据表明 GRB 970228 X 波段余辉随时间呈幂律衰减, $F_X \propto t^{-a}$, 其中 $a = 1.33_{-0.11}^{+0.13}$ ^[34], 火球模型对这一现象能给出很好的解释^[39]。

令人振奋的光学对应体首先是由 Groot 等人发现的^[40]。3 月 1.0 日 (UT), 他们在 $\alpha = 5^{\text{h}}01^{\text{m}}46^{\text{s}}.70$, $\delta = 11^{\circ}46'53''.0$ 处发现一天体, $V = 21^{\text{m}}.3$, $I = 20^{\text{m}}.6$, 定位精度达到 $1''$ 。到 3 月 8.9 日 (UT), 该源已经减弱至 $V > 23^{\text{m}}.6$, $I > 22^{\text{m}}.2$ 。Pedichini 等人也证实该源在 2 月 28.81 日 (UT) 到 3 月 4.81 日 (UT) 之间在 R 波段至少变暗了 $2^{\text{m}}.7$ ^[41]。从 γ 暴发生 19.9h 之后到 3 月 7 日 (UT), 对该天区也有多次射电观测, 但都未发现射电对应体^[42]。在图 2 中我们给出了对 GRB 970228 的证认情况。表 3 是详细观测数据, 该表部分地参考了 Wijers 等人的工作^[43]。

表 3 GRB 970228 在不同时刻和不同波段的流量

log t /s	光学星等 /m	流量 F_ν / μ Jy	log ν /Hz	观测 波段	有无 展源	观测仪器	参考文献号
0.30	—	5400	19.38	γ	—	SAX, TGRS	33,35
0.30	—	6600	18.08	X	—	SAX	33,44
4.46	—	0.15	18.08	X	—	SAX	36
4.74	>22.0	<11.4	14.84	B	—	Bologna 1.5m	6582
4.74	>22.0	<6.3	14.64	R	—	Bologna 1.5m	6582
4.74	21.1	14.4	14.64	R	有	Bologna	45
4.77	20.5	25.1	14.64	R	有	Rome	45
4.86	—	<700	9.70	Radio	—	Westerbork	6574
4.87	20.9	17.4	14.64	R	有	WHT La Palma	45
4.88	21.3	16.8	14.74	V	<1".5	WHT La Palma	40
4.88	20.6	17.1	14.56	I	<1".5	WHT La Palma	40
5.10	—	<0.013	19.38	γ	—	OSSE CGRO	6578
5.41	22.3	4.79	14.64	R	有	Apache Point	45
5.41	23.3	3.5	14.84	B	有	ARC 3.5m	6618
5.49	—	0.0075	18.08	X	—	SAX	36
5.50	>22.0	<11.4	14.84	B	—	Bologna 1.5m	6582
5.50	>22.0	<6.3	14.64	R	—	Bologna 1.5m	6582
5.61	>24.2	<1.2	14.74	V	—	NOT	44
5.61	>23.6	<1.45	14.64	R	有	Nordic(NOT)	45
5.70	>22.0	<11.4	14.84	B	—	Bologna 1.5m	6582
5.72	>21.5	<7.5	14.56	I	—	Palomar 1.5m	6588
5.73	24.0	1.0	14.64	R	有	Keck II	6588
5.79	—	0.0043	18.08	X	—	ASCA GIS/SIS	37
5.88	>22.2	<3.9	14.56	I	—	WHT La Palma	40
5.88	>23.7	<1.3	14.64	R	—	INT La Palma	43
5.88	>24.5	<0.9	14.74	V	—	INT La Palma	43

续表 3

log t /s	光学星等 /m	流量 F_ν / μ Jy	log ν /Hz	观测 波段	有无 展源	观测仪器	参考文献号
5.93	25.4	0.50	14.84	B	有	INT La Palma	6588
5.93	24.0	1.0	14.64	R	有	INT La Palma	6588
6.18	21.0	6.5	14.38	J	—	Calar Alto 3.5m	6611
6.35	25.7	0.29	14.74	V	有	HST	6606
6.35	24.2	0.62	14.56	I	有	HST	6606
6.41	22.0	1.1	14.13	K	有	Keck I	6619
6.42	23.5	0.65	14.38	J	有	Keck I	6619
6.50	24.9	0.44	14.64	R	无?	Keck II	6631
6.52	26.0	0.22	14.74	V	有	HST	6619
6.52	24.6	0.43	14.56	I	有	HST	6619
6.01	—	0.0029	18.08	X	—	ROSAT	6637
6.05	25.6	0.23	14.64	R	有	ESO NTT	45
6.35	25.2	0.33	14.64	R	有	HST	45
6.52	25.5	0.25	14.64	R	有	HST	45
7.21	28.0	0.03	14.74	V	有	HST	48
7.21	25.2	0.25	14.64	R	有	Hale 5m	6732

注 参考文献号栏中的四位数字指“IAU Circular”编号

GRB 970228 是第一个观测到光学对应体的 γ 暴。一个十分令人感兴趣且十分重要的问题是这个光学对应体似乎位于一个宿主星系中^[44-46]，很多光学观测都得到了这一结论(参看表 3 的第 6 列)。该宿主星系角直径约 $1''$ ，星等为： $R = 24^m.7 \pm 0^m.3$ ， $B = 25^m.4 \pm 0^m.4$ ， $V = 25^m.2 \pm 0^m.35$ ， $I = 24^m.5 \pm 0^m.3$ 。光学对应体和星系中心相距 $0''.22 \pm 0''.12$ 。如果假设该星系绝对星等像大多数正常星系那样为 -21^m — -16^m ，并取哈勃常数 $H = 60 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ ，则对应的红移 z 介于 0.2 和 2 之间。如果 GRB 970228 的宿主星系能得到确证，对 γ 暴的宇宙学起源将是一个有力的支持。

GRB 970228 的另一个引人注目的问题是其光学余辉的衰减方式。Galama 等人给出了 GRB 970228 余辉在 R 波段的光变曲线^[45]，他们的研究表明，以单一的幂律衰减 $F_R(t) \propto t^{-\alpha}$ 不能很好地拟合 R 波段的光变曲线。以 3 月 6 日 (UT) 为界限，光学余辉在前期的衰减速度远远快于后期^[45,49]。火球模型预言 γ 暴光学余辉以幂律方式衰减^[47]，但要解释 GRB 970228 的这种衰减行为，仍不是很容易的事^[45]。哈勃望远镜在 9 月 4 日对光学对应体进行了第三次观测，测得光学变源为 $V = 28^m.0 \pm 0^m.25$ ，

这一数据强烈地暗示 GRB 970228 的光学余辉一直在按 t^{-1} 方式衰减^[48]。图 3 中，我们给出

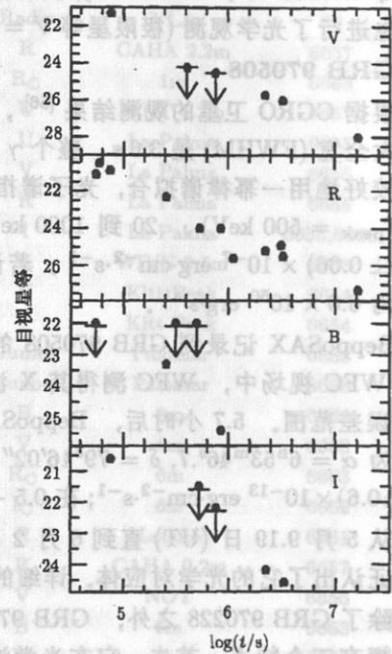


图 3 GRB 970228 在 V、R、B、I 波段随时间的衰减情况

时间以 γ 暴发生时刻为起点，纵坐标是视星等。

图中的数据均取自表 3

了 GRB 970228 在光学波段的衰减情况。

对于 GRB 970228, Caraveo 等人报道说发现它有 $0.55''/\text{yr}$ 的自行^[50,51], 由此得到的切向速度是 v (km/s) = $2.7 \times d$ (pc), 其中 d 为以 pc 为单位的距离。由于 v 必定小于光速 c , 因此 d 最大也将只有 100 kpc。但 HST 在九月份对 GRB 970228 的观测基本上否定了它存在自行的可能性^[48]。

3.3 GRB 970402

BeppoSAX 记录到 GRB 970402 的发生时间是 4 月 2.930 日 (UT)^[52]。这是一个很弱的, 具有复杂光变曲线的 γ 暴, 持续时间大于 100 s。当时该暴也正好处于 WFC 视场中, WFC 测得其峰值约相当于 Crab 的 0.46 倍, 并定出了误差半径为 $3'$ 的位置。

8 h 之后, 即 4 月 3.280 日 (UT), BeppoSAX 的 NFI 在该方向观测到一个新的 X 射线源^[53], 位置为: $\alpha = 14^{\text{h}}50^{\text{m}}06^{\text{s}}$, $\delta = -69^{\circ}20'0''$, 误差半径为 $50''$, 其流量在 2—10 keV 波段 (MECS 结果) 为 $(1.5 \pm 0.5) \times 10^{-13} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 0.5—5 keV 波段 (LECS 结果) 为 $(2.0 \pm 0.6) \times 10^{-13} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。研究者注意到观测中强度似乎在随时间衰减。到 4 月 4.634 日 (UT), NFI 再次观测了 50000 s, 但没有探测到任何 X 射线源, 表明该源的强度较 4 月 3.280 日 (UT) 已经减弱到了 1/3 以下。

Pedersen 等人在 4 月 4—11 日 (UT) 利用欧洲南方天文台的 NTT 望远镜进行了观测 (极限星等 $V = 22^{\text{m}}.5$, $I = 21^{\text{m}}.7$), 没有发现光学对应体^[54]。在 4 月 3.73 日 (UT), Harrison 等人也进行了光学观测 (极限星等 $V = 22^{\text{m}}.5$, $I = 21^{\text{m}}.7$), 同样未能发现光学对应体^[55]。

3.4 GRB 970508

根据 CGRO 卫星的观测结果^[56], GRB 970508 是一个弱的经典 γ 暴, 只有一个脉冲, 半极大全宽 (FWHM) 是 3.6 s, 整个 γ 暴持续 35 s。在 20 到 1000 keV 波段, GRB 970508 的谱可较好地用一幂律谱拟合, 光子谱指数为 -1.5 ± 0.05 。该暴的大部分能量集中在 500 keV 处 ($E_{\text{peak}} = 500 \text{ keV}$)。20 到 1000 keV 总能流是 $(3.1 \pm 0.2) \times 10^{-6} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}$, 峰值光度为 $(1.66 \pm 0.06) \times 10^{-7} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。若认为该暴发生于红移 $z \approx 0.835$ 处, 则对应的各向同性光度为 $6.0 \times 10^{50} \text{ erg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

BeppoSAX 记录到 GRB 970508 的爆发时间是 5 月 8.904 日 (UT)^[57]。该暴同样正好位于 WFC 视场中, WFC 测得其 X 波段峰值强度约相当于 1 Crab, 并给出了一个半径为 $3'$ 的误差范围。5.7 小时后, BeppoSAX NFI 在该方向上观测到一个新的 X 射线源^[58], 其位置为 $\alpha = 6^{\text{h}}53^{\text{m}}46^{\text{s}}.7$, $\delta = 79^{\circ}16'02''$, 误差半径约 $50''$ 。在 2—10 keV 波段, X 流量为 $(6.3 \pm 0.6) \times 10^{-13} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; 在 0.5—5 keV 波段, 流量为 $(7.0 \pm 0.8) \times 10^{-13} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

从 5 月 9.19 日 (UT) 直到 6 月 2 日 (UT), 对 GRB 970508 进行了大量的光学观测, 成功地证认出了它的光学对应体。详细的观测结果我们总结于表 4 中。

除了 GRB 970228 之外, GRB 970508 是第二个观测到光学余辉的 γ 暴, 并且后者的光学余辉有三个特点。首先, 它在光学波段是先增亮, 到 5 月 10 日 (UT) 前后达到亮度极大值: $R_{\text{min}} = 19^{\text{m}}.6-20^{\text{m}}.0$, 此后才一直衰减下去^[59], 衰减方式可用 $F \propto t^{-a}$ 拟合, 其中 a 介于 0.9 和 1.1 之间^[59-61]。图 4 给出了 GRB 970508 光学波段的光变曲线。第二, Metzger 等人发现其光谱中有 Fe II、Mg II 的吸收线^[62], 如图 5 所示。这些谱线波长在 430—514 nm 间, 红移分别是 0.835 或 0.767。又由于谱线中没有发现 Lyman- α 森林, 因此 $z < 2.3$ 。 $0.835 \leq z \leq 2.3$, 这是一个令人振奋的结论, 困惑了高能天体物理学家近三十年的距离问

题, 似乎就要有明确的结论了。此外, 在光谱中还证认出了 $z \approx 0.835$ 的发射线 [63]。第三, GRB 970228 的光学对应体明显不是一个点源, 而是一个延展源, 这很可能是它的宿主星系。与此不同的是, GRB 970508 一直表现为光学点源, 哈勃望远镜的观测表明它不可能以亮于 $R = 24^m.3$ 的致密星系或亮于 $R = 25^m.0$ 的 $1''$ 尺寸的星系作为宿主星系 [61]。另外在 GRB 970508 光学点源附近观测到了两个暗弱星系, R 约为 25^m , 距离 GRB 970508 均约 $4''$, 若取 z 为 0.8, 则对应的空间距离约为 30 kpc。光学吸收线看来也不大可能是由这两个星系引起的。

表 4 GRB 970508 在不同时刻的光学、红外和射电余辉

$\log(t/s)$	光学星等 /mag	流量 $F_\nu/\mu\text{Jy}$	$\log(\nu/\text{Hz})$	观测波段	观测仪器	参考文献号
4.13	—	<140	9.16	Radio	VLA	64
4.29	20.8	19.05	14.64	R	CAHA 2.2m	6657
4.33	20.4	20.58	14.56	I	Kitt Peak 4.0m	6666
4.39	21.5	13.88	14.74	V	Kitt Peak	6654
4.39	21.33	11.69	14.65	Gunn-r	Palomar	6655
4.4	21.2	13.18	14.65	Gunn-r	Palomar	6658
4.41	21.2	13.18	14.64	R	Kitt Peak	6655
4.41	21.40	10.96	14.64	R	WIYN 3.5m	6658
4.89	21.0	—	14.92	U	WHT 4.2m	6657
4.90	>20.5	<25.12	14.64	R	Loiano	6661
4.91	—	<270	9.16	Radio	VLA	64
4.93	20.8	19.05	14.64	R	CAHA 2.2m	6657
4.93	21.1	14.45	≈ 14.64	R _C	1m	6663
5.00	20.5	—	14.92	U	WHT 4.2m	6657
5.00	21.5	—	14.92	U	La Palma	6655
5.00	21.0	22.0	14.74	V	La Palma	6655
5.00	20.35	28.84	14.64	R	La Palma	6655
5.00	20.2	24.74	14.56	I	La Palma	6655,6660
5.03	20.30	30.20	14.64	R	WIYN 3.5m	6658
5.04	20.5	34.87	14.74	V	Kitt Peak	6654
5.04	19.6	43.00	14.56	I	Kitt Peak	6654
5.04	20.18	33.73	14.65	Gunn-r	Palomar	6658
5.06	20.17	34.04	14.65	Gunn-r	Palomar	6655
5.21	20.90	31.55	14.84	B	6m	6663
5.21	20.34	40.40	14.74	V	6m	6663
5.21	19.87	44.87	≈ 14.64	R _C	6m	6663
5.21	19.43	50.29	≈ 14.56	I _C	6m	6663
5.22	19.8	47.86	14.64	R	Loiano	6661
5.23	19.6	57.54	14.64	R	CAHA 2.2m	6657
5.24	19.65	76.28	14.74	V	NOT	6656
5.24	20.79	34.91	14.84	B	6m	6663
5.24	20.33	40.78	14.74	V	6m	6663
5.24	19.92	42.85	≈ 14.64	R _C	6m	6663
5.24	19.30	56.69	≈ 14.56	I _C	6m	6663
5.26	20.5	—	14.92	U	La Palma	6655
5.26	20.3	54.82	14.84	B	La Palma	6655,6660
5.26	20.2	45.96	14.74	V	La Palma	6655
5.26	20.1	36.31	14.64	R	La Palma	6655

续表 4

$\log(t/s)$	光学星等 /mag	流量 $F_\nu/\mu\text{Jy}$	$\log(\nu/\text{Hz})$	观测波段	观测仪器	参考文献号
5.26	19.1	68.15	14.56	I	La Palma	6655,6660
5.28	20.3	—	14.92	U	WHT 4.2m	6657
5.29	—	<10800	10.94	Radio	OVROI	6664
5.30	20.15	34.67	14.65	Gunn-r	Palomar	6655
5.30	20.16	34.36	14.65	Gunn-r	Palomar	6658
5.39	21.42	19.54	14.84	B	6m	6663
5.39	20.77	27.19	14.74	V	6m	6663
5.39	20.18	33.73	≈ 14.64	R _C	6m	6663
5.39	19.48	48.03	≈ 14.56	I _C	6m	6663
5.41	20.4	27.54	14.64	R	CAHA 2.2m	6657
5.43	20.9	—	14.92	U	La Palma	6660
5.43	19.7	39.22	14.56	I	La Palma	6660
5.43	20.9	31.55	14.84	B	La Palma	6660
5.43	20.6	31.80	14.74	V	La Palma	6660
5.43	20.2	33.11	14.64	R	La Palma	6660
5.45	20.47	25.82	14.64	R	WIYN 3.5m	6658
5.45	20.53	24.00	14.65	Gunn-r	Palomar	6658
5.45	—	<7800	10.94	Radio	OVROI	6664
5.46	20.47	25.82	14.64	R	M. Hopkins	6661
5.53	21.70	15.10	14.84	B	6m	6663
5.53	21.19	18.47	14.74	V	6m	6663
5.53	20.77	19.59	≈ 14.64	R _C	6m	6663
5.53	20.25	23.63	≈ 14.56	I _C	6m	6663
5.57	20.76	19.77	14.65	Gunn-r	Palomar	6660
5.57	18.43	28.3	—	K _S	Keck I	6666
5.59	—	<3900	10.94	Radio	OVROI	6664
5.63	21.93	12.22	14.84	B	6m	6663
5.63	21.33	16.23	14.74	V	6m	6663
5.63	21.01	15.70	≈ 14.64	R _C	6m	6663
5.63	21.01	11.73	≈ 14.56	I _C	6m	6663
5.64	—	430	9.93	Radio	VLA	64
5.68	21.1	14.45	14.64	R	Haute 1.2m	6663
5.73	—	610	9.93	Radio	VLA	64
5.73	—	100	9.16	Radio	VLA	64
5.73	—	330	9.69	Radio	VLA	64
5.76	—	<6800	10.94	Radio	OVROI	6664
5.80	19.21	13.8	—	K _S	Keck I	6666
5.82	—	1570	10.18	Radio	Ryle	6670
5.86	—	480	9.92	Radio	VLBA	65
5.96	—	660	10.18	Radio	Ryle	6670
6.05	>22.3	<8.69	14.84	B	6m	60
6.05	22.9	3.82	14.74	V	6m	60
6.05	22.2	5.25	≈ 14.64	R _C	6m	60
6.05	21.7	6.22	≈ 14.56	I _C	6m	60
6.33	23.10	2.29	14.64	R	HST	61
6.33	20.3	6.5	14.26	H	HST	61

注 参考文献号栏中的四位数系指“IAU Circular”编号

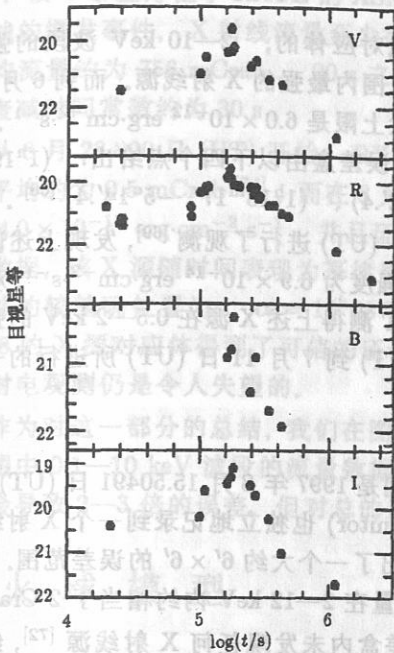


图 4 GRB 970508 在 V、R、B、I 波段

随时间的衰减情况

时间以 γ 暴发生时刻为起点, 纵坐标是视星等。

图中的数据均取自表 4

美国的甚大天线阵 (VLA) 对 GRB 970508 的位置进行观测时, 发现了一个突然出现的射电源^[64]。在 5 月 9.06 日 (UT) 和 9.84 日 (UT), VLA 在 1.43 GHz 波段没有探测到任何射电源, 3σ 上限分别是 0.14 mJy 和 0.27 mJy。但在 5 月 13.96 日 (UT) 发现了一个致密源, 与该 γ 暴的光学对应体的位置一致, 8.46 GHz 的峰值流量为 (0.43 ± 0.03)

mJy, 而在 5 月 15.08 日 (UT), 8.46 GHz 的流量增强到 (0.61 ± 0.04) mJy, 1.43 GHz 和 4.86 GHz 的流量则分别为 (0.10 ± 0.05) 和 (0.33 ± 0.03) mJy。美国的甚长基线阵 (VLBA) 在 5 月 17.17—17.40 日 (UT) 的观测证实了该射电源的存在^[65], 并精确确定出其位置为: $\alpha = 6^{\text{h}}53^{\text{m}}49^{\text{s}}.4513$, $\delta = 79^{\circ}16'19''.513$, 误差半径只有 $0''.001$ 。该源的视直径小于 $0''.0003$, 在 8.4 GHz 处的流量为 (0.48 ± 0.06) mJy。在 1997 年 8 月底之前 GRB 970508 是唯一发现了射电对应体的 γ 暴, 也是唯一在 X 射线、光学、红外和射电等各个波段都观测到余辉的 γ 暴。

3.5 GRB 970616

同前述几次 γ 暴不同, GRB 970616 的精确定位是由 CGRO 和 RXTE 共同完成的。CGRO 观测到该 γ 暴, 很快给出了误差约 2° 的位置^[66]。RXTE 在此误差范围内进行搜索观测, 发现了对应的 X 射线源^[67]。该暴发生于 1997 年 6 月 16.757 日 (UT), 在 BATSE 观

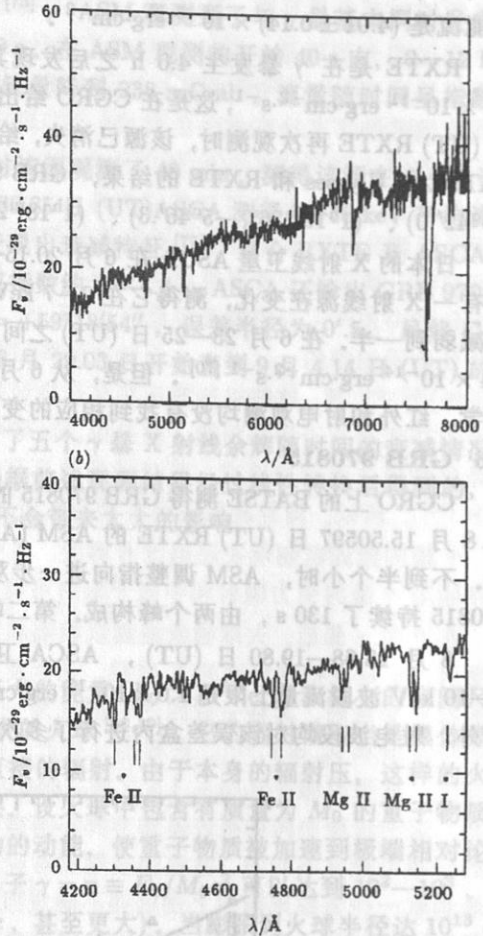


图 5 GRB 970508 的光学光谱^[62]

图 b 是图 a 中一段的放大, 其中标出了证认出来的十条谱线。这些谱线的红移分别是 $z = 0.835$ (带星号) 和 $z = 0.767$ (不带星号)

测到的 γ 暴中, 属于 2% 的强 γ 暴之一, 具有多峰结构, 持续约 200 s。大于 20 keV 的光子总能流是 $(4.01 \pm 0.14) \times 10^{-5} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

RXTE 是在 γ 暴发生 4.0 h 之后发现其 X 射线对应体的, 2—10 keV 波段的强度是 $1.1 \times 10^{-11} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 这是在 CGRO 给出的误差范围内最强的 X 射线源。而到 6 月 18.08 日 (UT) RXTE 再次观测时, 该源已消失, 给出的流量上限是 $6.0 \times 10^{-12} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。综合 BATSE、Ulysses 和 RXTE 的结果, GRB 970616 的误差盒由以下四个点给出: $(1^{\text{h}}19^{\text{m}}36^{\text{s}}, -5^{\circ}42'.0)$ 、 $(1^{\text{h}}19^{\text{m}}36^{\text{s}}, -5^{\circ}46'.3)$ 、 $(1^{\text{h}}18^{\text{m}}23^{\text{s}}, -5^{\circ}12'.4)$ 、 $(1^{\text{h}}18^{\text{m}}17^{\text{s}}, -5^{\circ}14'.4)$ [68]。

日本的 X 射线卫星 ASCA 在 6 月 20.15—21.44 日 (UT) 进行了观测 [69], 发现上述误差盒内有一 X 射线源在变化, 测得它在 2—7 keV 波段的强度为 $6.9 \times 10^{-14} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 观测中又减弱到一半。在 6 月 23—25 日 (UT) 之间, ROSAT 测得上述 X 源在 0.5—2 keV 的强度为 $1.4 \times 10^{-14} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ [70]。但是, 从 6 月 17 日 (UT) 到 7 月 11 日 (UT) 所进行的一系列光学、红外和射电观测均没有找到相应的变源。

3.6 GRB 970815

CGRO 上的 BATSE 测得 GRB 970815 的发生时间是 1997 年 8 月 15.50491 日 (UT) [71]。在 8 月 15.50597 日 (UT) RXTE 的 ASM (All Sky Monitor) 也独立地记录到一个 X 射线暴事件。不到半个小时, ASM 调整指向进一步观测, 定出了一个大约 $6' \times 6'$ 的误差范围。GRB 970815 持续了 130 s, 由两个峰构成。第二峰峰值流量在 2—12 keV 内约相当于 2 Crab。

8 月 18.68—19.80 日 (UT), ASCA 卫星在误差盒内未发现任何 X 射线源 [72], 给出的 2—10 keV 波段流量上限是 $1.0 \times 10^{-13} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从 8 月 16 日直到 8 月 27 日, 在光学、红外、射电波段均对该误差盒内进行了多次观测, 但未能证认出 GRB 970815 的对应体。

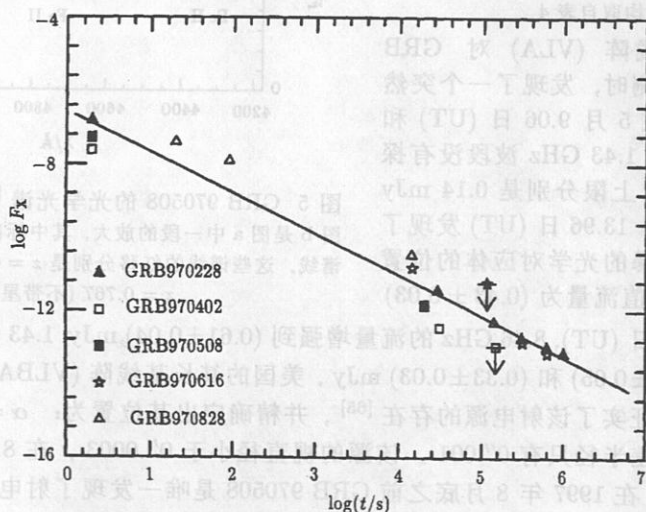


图 6 5 个 γ 暴 X 射线余辉随时间的衰减情况

时间以各次 γ 暴发生时刻为起点, 纵坐标是 0.1—10 keV 的 X 射线流量 (以 $\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 为单位) 的对数。

图中直线是用最小二乘法拟合的结果, 斜率为 -1.12

3.7 GRB 970828

根据 CGRO 上 BATSE 的记录, GRB 970828 的发生时间是 1997 年 8 月 28.73931 日 (UT)。该 γ 暴正好位于 RXTE 的 ASM 视场内^[73], ASM 观测到了与 γ 暴基本同时发生的 X 射线的爆发事件, X 射线流量至少持续了 160 s。在 ASM 观测的开始 40 s 内, 2—12 keV 的平均流量约为 756 mCrab, 90 s 之后, 平均流量降到 238 mCrab。流量随时间呈指数衰减, 衰减时间常数约为 30 s。

从 8 月 28.890 日 (UT) 开始, RXTE 再次对该源观测了 40 min, 测得该源在 2—10 keV 流量平均约为 0.5 mCrab^[74]。而在 8 月 29.91—30.85 日 (UT) ASCA 测得 2—10 keV 平均流量约为 $4.0 \times 10^{-13} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且证实该源表现出衰减特征^[75]。结合 RXTE 及 ASCA 的流量数据, 该 X 源随时间表现为幂律衰减, 衰减指数约为 -1.4。ASCA 还给出 GRB 970828 对应体的较精确位置为: $\alpha = 18^{\text{h}}08^{\text{m}}32^{\text{s}}.2, \delta = +59^{\circ}18'54''$, 误差半径为 0'.5。虽然 GRB 970828 的 X 源对应体得到了可信的认证, 但从 8 月 29.03 日开始直到 9 月 4.14 日 (UT) 的光学和射电观测仍是令人失望的。

作为对这一部分的总结, 我们在图 6 中点出了五个 γ 暴 X 射线余辉随时间的衰减情况。注意图中 0.1—10 keV 波段的流量数据是我们根据前述观测结果经过线性转换后得到的, 这可能会导致 2—3 倍的误差, 但对总的衰减图象不会带来太大的影响。

4 火球模型

发生于宇宙学距离上的 γ 暴, 由于涉及到巨大的能量 ($E_0 > 10^{51} \text{ erg}$) 和极小的空间尺度 ($< 30 \text{ km}$), 不可避免地要形成一个光学深度很大的火球^[18,19]。它的辐射谱应当是黑体谱, 与观测到的 γ 射线谱不符。实际上, 后者不是直接的辐射。由于本身的辐射压, 这样的火球必然要快速膨胀, 形成一个高速膨胀的火球壳层。设火球中包含有质量为 M_0 的重子物质, 则在膨胀过程中, 热能转化为重子物质定向运动的动能, 使重子物质被加速到极端相对论的速度。取 M_0 为 $(10^{-6}—10^{-5}) M_{\odot}$, 其洛伦兹因子 $\gamma = \eta \equiv E_0/M_0 c^2$ 可以达到 $10^2—10^3$, 此时重子物质的膨胀速度十分接近光速 (约 $0.9999c$, 甚至更大)。当膨胀到火球半径达 10^{13} cm 时, 其光学深度大大减小而变成光学薄, 这时才可能发射出非热辐射, 观测到 γ 暴。

火球物质可通过两种方式产生激波: (1) 火球壳层与外部星际介质作用形成的激波^[76], 称为外激波; (2) 火球壳层内部各层的速度不均匀, 后面快壳层追赶前面慢壳层的碰撞产生的激波^[20,77], 称为内激波。内激波加速电子, 产生非热辐射, 形成 γ 暴。在 $\gamma \gg 1$ 的情况下, 观测到的若干 MeV 的 γ 光子能量, 在火球共动坐标系中实际只有几十 keV, 这样低的光子能量不会碰撞转化为正负电子对, 这是与观测事实相符的。注意, 观测者所看到时标 δt 约为 1ms 的快速变化, 在静止坐标系中对应的空间尺度不再是通常情况下的 $c\delta t$, 而是 $\gamma^2 c\delta t$ 。所以发生 γ 暴时, 火球半径可大于 10^{13} cm , 而能同时保证 γ 暴的毫秒级快变时标和非热辐射所要求的光学薄条件。火球进一步膨胀, 与星际介质作用形成外激波, 其半径约为 10^{16} cm 。外激波难以产生 γ 暴光变曲线上复杂快变的多峰结构^[78,79], 所以现在人们一般倾向于用内激波来解释 γ 暴本身。 γ 暴的这种快变多峰结构被认为是暴源在放出能量时就固有的。然而, 外激波却可以自然地用来解释 γ 暴的余辉。

在火球模型中, γ 暴的非热辐射谱一般认为是激波加速的电子经同步加速辐射而形成, 但这其中有许多细节尚不清楚, 如激波如何加速电子、磁场如何由激波产生、热能如何在质

子和电子间分配、激波是绝热还是辐射的、有无束流效应等等。这些问题在天体物理的其它许多领域如活动星系核、脉冲星、超新星遗迹中同样存在着。

上述的火球模型,只说明了在火球形成之后,如何由火球产生宇宙学距离上的 γ 暴。一个无法回避的问题自然是:火球是如何产生的,即 γ 暴的能源机制是什么? γ 暴的能源必须能满足如下几个观测上的要求:(1) $E_0 \geq 10^{51}$ erg;(2)火球中包含的重子必须很少,即 $M_0 \leq (10^{-6} - 10^{-5}) M_\odot$;(3)能产生毫秒时标的快速变化;(4)一般地,每星系大约每 10^6 yr才发生一次 γ 暴。目前可以肯定的是,中子星的一些局部过程,如吸积不稳定性、表面热核反应、星震、彗星或小行星撞击中子星等等,都无法提供足够的能量。另外一些可能的能源机制包括:中子星/中子星或中子星/黑洞合并、失败的Ib型超新星爆发^[80]、刚诞生的超强磁场脉冲星^[81]、非常大质量恒星($\approx 10^6 M_\odot$)的坍缩、中子星向奇异星的相变(奇异星是由数目几乎相等的u、d、s三种夸克构成的夸克星,理论预测奇异星的能量可能比中子星的还低)^[82-84]等。这些机制都还存在这样或那样的问题。特别是在大多数(涉及中子星的)机制中均存在着重子污染问题,就是说,火球中的重子质量远远超过所要求的。注意到奇异星由壳层和星体两部分组成,其壳层质量只有约 $(10^{-6} - 10^{-5}) M_\odot$,而重子物质完全集中在壳层中^[83]。所以,奇异星机制有可能解释重子污染问题。

γ 暴的能源机制现在还远没有解决,其中很可能会包含着一种全新的天体过程。通过探测伴随着 γ 暴的引力辐射和中微子辐射可能会得到关于 γ 暴起源的重要信息。

在产生 γ 暴后,火球物质继续以极端相对论的速度向外膨胀,它与星际介质作用产生的外激波,正是我们观测到的X射线、光学及射电波段的余辉辐射^[39,43,47,85-91]。研究表明,外激波在膨胀时,其洛仑兹因子的演化为 $\gamma(t) \propto t^{-3/8}$,半径为 $r(t) \propto t^{1/4}$,从而同步加速辐射的特征频率 $\nu_m \propto t^{-3/2}$,在频率 ν 处产生的流量密度则为 $F_\nu \propto t^{-a}$,其中 a 同各 γ 暴的能谱有关,典型范围在0.75 - 1.5之间。因此火球模型可以很好地给出 γ 暴余辉的衰减方式。但是,这一过程中同样有许多细节并不清楚,除了前面已提到的一些问题外,还包括星际介质的分布可能并不均匀、激波由极端相对论逐渐过渡到非相对论的情形等。目前理论工作者都是选取一些参数来描述上述这些不确定因素,因此所作的理论解释仍显得很粗糙,只能作一些定性的解释。迄今为止观测到余辉的样本也太少,火球模型的认真检验尚需更多的观测数据。

5 讨 论

γ 暴研究进展极为迅速。本文初稿是1997年10月撰写的,其后已有很多新的发现。现只简略介绍一下这些新发现,并对它们的重要意义作一简单讨论。到1998年7月中旬,又定出了好几个 γ 暴的准确位置,它们是:GRB 971214、971227、980326、980329、980425、980515、980519、980613、980703。其中,GRB 971214、980326、980329、980519、980613均有光学对应体,GRB 980329和980519还有射电对应体。GRB 971214光学对应体的红移为 $z = 3.42$,因此 γ 暴本身放出的能量就高达 3×10^{53} erg^[92-94],这几乎已相当于 $1 M_\odot$ 中子星的全部能量。在1—2s的时间内,该暴的光度与整个宇宙中其它所有天体的光度相当; γ 暴瞬间产生的极端物理条件,与宇宙在大爆炸发生后1 ms时的条件相似。另外在GRB 980425发生后不到一天的时间内,人们在其误差盒内观测到一颗Ic型超新星,由它定

出的红移只有 $z = 0.0085 \pm 0.0002$ [95,96], 对应距离约 10 Mpc。这颗超新星是否就是 GRB 980425 的对应体, 是尤其让人们感兴趣的问题。

总的来说, 目前的观测结果仍显得有些零乱: 已定位的十几个 γ 暴约一半有光学对应体, 约四分之一有射电对应体, 但最强的 γ 暴 GRB 970111 反而没有观测到余辉; 有红移高达 3.42 的, 但似乎也有小到 0.0085 的; 有的观测到宿主星系, 也有的一直没有观测到; 余辉有随时间幂律衰减的, 也有在两三天后才出现极大值; γ 暴似乎还和超新星爆发有关系等。因此 γ 暴的本质仍显得扑朔迷离。

当然, 目前已定位的 γ 暴还是太少。我们迫切需要观测到更多的 γ 暴对应体, 以验证 γ 暴是否与星系成协、是否有宇宙学红移、是否产生于恒星形成区、是否能分成好几种。未来的几年中, HETE 和 BASIS 卫星将相继升空, 人们观测 γ 暴对应体的能力将大大增强, 距离问题有望较快得到解决, γ 暴能源之谜也终将被解开。

参 考 文 献

- 1 Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A. *Ap. J.*, 1973, 182: L85
- 2 Golenetskii S, Ilyinskii V, Mazets E P. *Nature*, 1984, 307: 41
- 3 Atteia J L et al. *Ap. J.*, 1987, 320: L105
- 4 Laros J G et al. *Ap. J.*, 1987, 320: L111
- 5 Horvath J E, Vucetich H, Benvenuto O G. *M.N.R.A.S.*, 1993, 262: 506
- 6 Kouveliotou C et al. *Nature*, 1994, 368: 125
- 7 Usov V V. *Astron. Astrophys.*, 1997, in the press
- 8 Walter H G L, Paradijs J V, Ronalde E T. *Space Sci. Rev.*, 1993, 62: 223
- 9 韦大明, 陆 垓. *天文学进展*, 1995, 13: 206, 220, 234
- 10 Fishman G J, Meegan C A. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1995, 33: 415
- 11 Piro L, Scarsi L, Butler R, et al. *Proc. SPIE*, 1995, 2517: 169
- 12 Parmar A N et al. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1997, 122: 309
- 13 McNamara B et al. *Ap. J. Suppl. Ser.*, 1996, 103: 173
- 14 Vrba F, Hartmann D, Jennings M. *Ap. J.*, 1995, 446: 115
- 15 Vrba F. *AIP Proc.*, 1996, 384: 565
- 16 Klose S. *Ap. J.*, 1995, 446: 357
- 17 Schaefer B et al. *Ap. J.*, 1994, 422: L71
- 18 Goodman J. *Ap. J.*, 1986, 308: L47
- 19 Paczyński B. *Ap. J.*, 1986, 308: L43
- 20 Rees M J, Mészáros P. *Ap. J.*, 1994, 430: L93
- 21 Rees M J, Mészáros P. *M.N.R.A.S.*, 1992, 258: 41P
- 22 Mészáros P, Rees M J. *M.N.R.A.S.*, 1992, 257: 29P
- 23 Mészáros P, Laguna P, Rees M J. *Ap. J.*, 1993, 415: 181
- 24 Mészáros P, Rees M J, Pathanassiou H. *Ap. J.*, 1994, 432: 181
- 25 Katz J. *Ap. J.*, 1994, 422: 248
- 26 Sari R, Narayan R, Piran T. *Ap. J.*, 1996, 473: 204
- 27 Costa E et al. *IAU Circ.*, 1997, No. 6533
- 28 Hurley K et al. *IAU Circ.*, 1997, No. 6545; 6571
- 29 Butler R C. *IAU Circ.*, 1997, No. 6539
- 30 Frontera F et al. *IAU Circ.*, 1997, No. 6567
- 31 Frail D A et al. *Ap. J.*, 1997, 483: L91
- 32 Castro-Tirado A J et al. *IAU Circ.*, 1997, No. 6598

- 33 Costa E *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6572
- 34 Costa E *et al.* Nature, 1997, 387: 783
- 35 Palmer D *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6577
- 36 Costa E *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6576
- 37 Yoshida A *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6593
- 38 Frontera F *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6637
- 39 Waxman E. *Ap. J.*, 1997, 485: L5
- 40 Groot P J *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6584
- 41 Pedichini F *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6635
- 42 Galama R *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6574; 6576; 6577
- 43 Wijers R A M J, Rees M J, Mészáros P. M.N.R.A.S., 1997, 288: L51
- 44 van Paradijs J *et al.* Nature, 1997, 386: 686
- 45 Galama T *et al.* Nature, 1997, 387: 479
- 46 Sahu K C *et al.* Nature, 1997, 387: 476
- 47 Mészáros P, Rees M J. *Ap. J.*, 1997, 476: 232
- 48 Fruchter A *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6747
- 49 Fox D W *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6643
- 50 Caraveo P A, Mignani R P, Tavani M *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6629
- 51 Caraveo P A, Mignani R P, Tavani M *et al.* Astron. Astrophys., 1997, 326: L13
- 52 Feroci M *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6610
- 53 Piro L *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6617
- 54 Pedersen H *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6628
- 55 Harrison T E *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6632
- 56 Kouveliotou C *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6660
- 57 Costa E *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6649
- 58 Piro L *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6656
- 59 Djorgovski S G *et al.* Nature, 1997, 387: 876
- 60 Kopylov A I *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6671
- 61 Fruchter A *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6674
- 62 Metzger M R *et al.* Nature, 1997, 387: 878
- 63 Kouveliotou C, Science, 1997, 277: 1257
- 64 Frail D A *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6662
- 65 Taylor G B *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6670
- 66 Connaughton V *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6683
- 67 Marshall F E *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6683
- 68 Hurley K *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6687
- 69 Murakami T *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6687
- 70 Greiner J *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6721
- 71 Smith D A *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6718
- 72 Murakami T *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6722
- 73 Remillard R *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6726
- 74 Marshall F E *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6727
- 75 Murakami T *et al.* IAU Circ., 1997, No. 6729
- 76 Mészáros P, Rees M J. *Ap. J.*, 1993, 405: 278
- 77 Paczyński B, Xu G. *Ap. J.*, 1994, 427: 708
- 78 Fenimore E E, Madras C, Nayakshin S. *Ap. J.*, 1996, 473: 998
- 79 Sari R, Piran T. *Ap. J.*, 1997, 485: 270
- 80 Woosley S. *Ap. J.*, 1992, 405: 273
- 81 Usov V V. Nature, 1992, 375: 472
- 82 Cheng K S, Dai Z G. Phys. Rev. Lett., 1996, 77: 1210

83 Huang Y F, Lu T. *Astron. Astrophys.*, 1997, 325: 189
 84 Cheng K S, Dai Z G, Lu T. *Int. J. Mod. Phys. D*, 1998, 7: 139
 85 Sari R. *Ap. J.*, 1997, 489: L37
 86 Vietri M. *Ap. J.*, 1997, 478: L9
 87 Waxman E. *Ap. J.*, 1997, 491: L19
 88 Huang Y F, Dai Z G, Wei D M et al. *M.N.R.A.S.*, 1998, 298: 459
 89 Dai Z G, Huang Y F, Lu T. *Ap. J.*, 1998, submitted
 90 Dai Z G, Lu T. *M.N.R.A.S.*, 1998, 298: 87
 91 Wijers R A M J, Galama T J. *Ap. J.*, 1998, submitted
 92 Kulkarni S R et al. *Nature*, 1998, 393: 35
 93 Halpern J P et al. *Nature*, 1998, 393: 41
 94 Ramaprakosh A N et al. *Nature*, 1998, 393: 43
 95 Galama T J et al. *IAU Circ.*, 1998, No. 6895
 96 Tinney C, Stathakis R, Cannon R et al. *IAU Circ.*, 1998, No. 6896

New Breakthrough in γ -ray Burst Research: Afterglows Being Observed

Huang Yongfeng Lu Tan

(Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract

Thanks to the prominent operations of BeppoSAX satellite, X-ray, optical and even radio afterglows from several γ -ray bursts were observed recently, leading to a great breakthrough in the field. GRB 970228 seems to be associated with a faint host galaxy, and its optical afterglow kept detectable for more than six months; GRB 970508 shows complex behaviour in optical bands, its red shift has been determined to be $0.835 \leq z \leq 2.1$, and a radio flare was observed about five days after the burst. These observations strongly suggest a cosmological origin for γ -ray bursts and the so called fireball model is favored currently.

Key words gamma rays: bursts—gamma rays: observations—neutron stars— γ -ray astronomy

《中国科学院南京天文观测站》项目工程大量项目。项目经费由南京天文观测站提供。项目组成员：黄永锋、翟宗新等。
 1 朱文耀、翟宗新等。《中国科学》D 辑(0120010)第 1 期(1997 年 1 月)。
 2 朱文耀、翟宗新等。《天文学进展》, 1997, 15(4): 373