特殊伽玛暴及伽玛暴的特殊辐射成分

李兵^{1,2}, 孙惠^{3,4}, 王灵俊^{2,4}, 魏俊杰^{5,6}, 黄永锋¹, 李立新^{3,7}, 黎卓^{3,7*}, 梁恩维⁸, 吴雪峰⁵

1. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023;
 2. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心, 北京 100049;
 3. 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871;
 4. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;
 5. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;
 6. 广西相对论天体物理重点实验室, 南宁 530004;
 7. 北京大学物理学院天文与天体物理研究所, 北京 100871;
 8. 广西大学物理科学与工程技术学院, 南宁 530004
- *联系人, E-mail: zhuo.li@pku.edu.cn

收稿日期: 2017-09-20; 接受日期: 2017-11-03; 网络发表日期: 2018-01-26

国家自然科学基金(编号: 11273005, 11373012, 11473012, 11533003, 11533033, 11603076, 11673068, U1331202)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845800)、中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDB23000000, XDB23040000, XDA15052100)、中国科学院青年创新促进会(编号: 2011231, 2017366)、中国科学院前沿科学重点研究项目(编号: QYZDB-SSW-SYS005)、江苏省自然科学基金(编号: BK20161096)和广西相对论天体物理重点实验室基金资助项目

摘要 伽玛射线暴(伽玛暴)的探测从其被发现以来, 已经获得了大量的伽玛射线观测结果以及多波段的余辉观测结果, 但是X射线能区的爆发阶段的瞬时辐射还比较缺乏观测数据. 爱因斯坦探针(EP)是软X射线能区(0.5–4 keV)的大视场(1.1 sr)望远镜, 为伽玛暴的X射线瞬时辐射的观测带来全新的时间窗口. 本文讨论了EP对富X射线辐射的特殊伽玛暴或伽玛暴的特殊辐射成分进行了预期研究, 特别是研究了X射线闪、低光度伽玛暴、超长伽玛暴和伽玛暴的先兆辐射. 我们发现, EP预期能每年探测到约810个伽玛暴类爆发事件, 其中95%为能谱较软的X射线闪, 将近1%为典型伽玛暴; EP预期能每年探测到0.2–8个低光度伽玛暴, 具体探测率依赖于低光度暴能谱硬度的分布; EP预期每年至少能探测到20–200个超长伽玛暴; EP有望探测到大量的、目前人们非常缺乏了解的伽玛暴先兆辐射, 至少每年80个事件. 综合这些情况, 预计EP将对伽玛暴的分类、前身星特性、爆发机制和喷流特性等方面的研究具有重要意义.

关键词 伽玛射线暴, X射线, 巡天

PACS: 97.60.-s, 95.85.Nv, 95.55.Ka

1 引言

伽玛射线暴(简称伽玛暴, Gamma-ray Burst, GRB)

是宇宙中的恒星量级剧烈爆发, 短时间内释放巨大的能量(近来的理论和观测综述参见文献[1,2]). 伽玛暴自从1960年发现以来, 观测已经积累了大量的伽玛能

引用格式: 李兵, 孙惠, 王灵俊, 等. 特殊伽玛暴及伽玛暴的特殊辐射成分. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039507

Li B, Sun H, Wang L J, et al. Special gamma-ray bursts and special radiation components from gamma-ray bursts (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039507, doi: [10.1360/SSPMA2017-00264](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00264)

段的数据; 而自1990年发现余辉以来, 也积累了大量的多波段的余辉数据, 从X射线、紫外、光学、红外到射电波段. 但是在X射线能段的瞬时辐射(即爆发阶段的辐射)还比较缺乏观测. 这是因为以往和现有卫星的X射线观测都是在伽玛射线探测器触发以后的后随观测, 而从触发到后随观测开始存在分钟量级的时间间隔. 爱因斯坦探针(EP)观测伽玛暴不需要触发, 有望对伽玛暴的瞬时X射线辐射带来新的时间窗口. 这对于观测X射线辐射较强的特殊伽玛暴, 或者富X射线的伽玛暴辐射成分将起到重要的作用. 以下针对EP可能带来重要伽玛暴研究突破的3个方面进行阐述, 分别是X射线闪、低光度伽玛暴、超长伽玛暴和伽玛暴先兆辐射.

2 X射线闪

2.1 X射线闪的概念及研究现状

通常伽玛暴的辐射能量中, X波段辐射只占百分之几, 但20世纪90年代日本的Ginga卫星发现部分伽玛暴有着很软的能谱, 有些暴的能谱中X射线辐射成分占优. 随后荷兰与意大利的BeppoSAX卫星观测确认了X射线闪的存在, 其主要辐射集中于X射线波段. 按照目前的认识, X射线闪(X-ray Flashes, XRF)是一类特殊的伽玛暴, 它们有着和普通伽玛暴相似的持续时间

和在天球上各向同性的分布, 其 T_{90} 主要介于10–200 s之间^[3–6], 能谱要比伽玛暴软得多, 通常特征光子能量甚至低于10 keV, 见图1. 表1总结了与XRF的观测研究相关的卫星项目情况.

1996–2001年BeppoSAX运行期间, 共观测到17个XRF事例, 约占其定位的伽玛暴总数的1/4. 在此基础上, 进一步把原来的伽玛暴区分为3大类: X射线闪、富X射线伽玛暴(X-ray Rich GRBs, XRR)、正常伽玛暴(Classical Gamma-Ray Bursts, C-GRB). 针对Swift样本, 人们采用硬度指数 H_{25} (定义为 $H_{25}=S(25–50\text{ keV})/S(50–100\text{ keV})$)来区分这3类暴, 具体标准为^[6] $S(25–50\text{ keV})/S(50–100\text{ keV}) > 1.32$, XRF, $0.72 < S(25–50\text{ keV})/S(50–100\text{ keV}) \leq 1.32$, XRR, $S(25–50\text{ keV})/S(50–100\text{ keV}) \leq 0.72$, C-GRB.

2000年发射的HETE-2卫星(共运行约6年)由于观测波段宽(FREGATE: 6–400 keV; WXM: 2–20 keV), 比较适合对X射线闪进行系统的观测研究. 根据2–30 keV波段和30–400 keV波段的能流比, HETE-2卫星小组对X射线闪给出了针对HETE-2样本的定量定义: $\log[S(2–30\text{ keV})/S(30–400\text{ keV})] > 0$, XRF, $-0.5 < \log[S(2–30\text{ keV})/S(30–400\text{ keV})] \leq 0$, XRR, $\log[S(2–30\text{ keV})/S(30–400\text{ keV})] \leq -0.5$, C-GRB.

在HETE-2卫星观测到的样本中, 这3种类型大致各占1/3, 表明X射线闪是一种比较常见的爆发现象^[7].

图1 (网络版彩图) (a) 伽玛暴GRB 980329与X射线闪XRF 971019硬X射线和伽玛射线光变曲线的对比. 可以看出, XRF在伽玛射线波段几乎没有辐射^[4]; (b) XRF 020903的峰值光子能量 E_{pk} 分布概率, 其最可能的值是3.7 keV^[5]

Figure 1 (Color online) (a) Comparison of the light curves of GRB 980329 and XRF 971019. It is seen that the XRF hardly shows emission in gamma-ray band [4]; (b) the probability density distribution of the spectral peak energy E_{pk} in XRF 020903, with the highest probability value being 3.7 keV [5].

表 1 与X射线闪观测相关的仪器概况

Table 1 Detectors that are related to the observations of XRFs

探测器/ 卫星名	工作时段	仪器类型	能段 (keV)	有效面积 (cm ²)	能量分辨率 (keV@keV)	流量灵敏度 (erg cm ⁻² s ⁻¹)	视场
WFC/Beppo- SAX	1996–2002	编码孔	2–28	138@10.5 keV	1.2@6	–	–
WXM/ HETE-2	2000–2006	编码孔	2–25	175×8	~1.76@8	~8×10 ⁻⁹	1.6 sr
SXC/HETE-2	2000–2006	电荷注入器件	0.500–14	6.3@5 keV×2	0.046@0.526	0.47 cts cm ⁻² s ⁻¹	0.91 sr
XRT/Swift	2005至今	电荷耦合器件	0.2–10	110@1.5 keV	~0.140@6	2×10 ⁻¹⁴ @10 ⁴ s	–
GBM/ Fermi	2008至今	碘化钠晶体 锗酸铋晶体	8–1000 ~200–40000	18@511 keV×12 121@511 keV×2	~55@511 ~82@511	0.74 ph cm ² s ⁻¹	8 sr~ 4π sr
LAD/LOFT	计划2020	准直型硅漂移 探测器	2–30~80	1×10 ⁶ @8 keV	~0.2–0.26@6	3×10 ⁻⁸ @1 s 1.5×10 ⁻¹⁰ @50 ks	π sr
WXT/EP	计划2020	龙虾眼镜头	0.5–4	3 @0.1 keV×8	0.4@1	~1×10 ⁻¹¹ @10 ³ s	1.1 sr
FXT/EP	计划2020	龙虾眼镜头	0.5–4	60@1 keV	0.1@1	~1×10 ⁻¹² @10 ³ s	1°×1°

在几个X射线闪的光学余辉中, 还发现了其与超新星成协的可能证据. 一些XRF的统计性质及能谱示意图见图2.

针对X射线闪, 主要提出了4种可能的解释. (1) 高红移伽玛暴. 它们的红移需要在6–8以上, 从而峰值光子能量被从通常的数百keV红移到几十keV. (2) 被偏轴观测的伽玛暴. 在此框架中伽玛暴是由均匀喷流产生的, 当在轴上观测时, 看到的是普通伽玛暴. 而当偏轴观测时, 看到的光子能量会降低, 能流也减少, 表现为XRR和XRF事件. (3) 高度重子污染的火球产生的伽玛暴, 即“脏火球”伽玛暴或“失败”的伽玛暴. (4) 结构化的喷流. 在这种喷流中, 核心部分能量密度较高, 速度也快. 从里向外, 能量密度逐渐降低, 速度逐渐减小. 这样, 当在核心方向观测时, 看到的是普通伽玛暴, 而随着视线方向外移, 看到的依次是XRR和XRF. 目前, 由于对大量X射线闪红移测量的结果表明, 它们的红移并不特别高, 所以现在(1)模型作为对X射线闪的基本模型已被排除. 至于(2)–(4)模型中哪些正确, 目前还存在激烈的争论. 基本上, 这3种机制都和伽玛暴的本质有着密切的联系. 对X射线闪开展研究, 有助于深入了解伽玛暴的爆发机制、前身星特征、宇宙恒星形成历史以及超新星爆发过程、伽玛暴宇宙学等.

2.2 EP对X射线闪探测前景及预期成果

EP工作波段为0.5–4 keV, EP/WXT的视场为60°×60°, 约等于1.1 sr, 其1000秒积分的观测灵敏度深达10⁻¹¹ erg s⁻¹ cm⁻², 将对X射线闪具有很高的敏感度. 因此, X射线闪是EP的极佳观测对象. 以Swift/BAT对伽玛暴的观测数据为基础, 对EP观测X射线闪的能力进行初步估计.

探测能段修正. EP/WXT的探测能段为0.5–4 keV, 而Swift/BAT的探测能段为15–150 keV, 将Swift观测的伽玛暴样本的能谱向低能段延伸, 计算出0.5–4 keV的流强. Sakamoto等人^[6,8]在Swift/BAT的伽玛暴数据表里给出了伽玛暴的时间平均能谱. 这些平均能谱可以用幂律或者截断的幂率函数来拟合:

$$f(E) = K_{50}^{\text{pl}} \cdot \left(\frac{E}{50 \text{ keV}} \right)^{\alpha_{\text{pl}}},$$

$$f(E) = K_{50}^{\text{cpl}} \cdot \left(\frac{E}{50 \text{ keV}} \right)^{\alpha_{\text{cpl}}} \cdot \exp \left(\frac{-E(2 + \alpha_{\text{cpl}})}{E_{\text{peak}}} \right),$$

其中 α_{pl} 和 α_{cpl} 是光子谱指数, E_{peak} 是 νF_{ν} 谱的峰值能量, 通常以keV为单位, K_{50}^{pl} 和 K_{50}^{cpl} 为归一化因子, 单位为cm⁻² s⁻¹ keV⁻¹, 可用如下公式计算:

图 2 (网络版彩图) (a) HETE-2 卫星观测到的伽玛暴的峰值流量密度与峰值光子能量的关系. 样本中普通伽玛暴、富 X 射线伽玛暴和 X 射线闪的数目大致相当. (b) 几个 XRF, XRR 及 C-GRB 的能谱示意图, 修改自文献 [7]

Figure 2 (Color online) (a) The peak flux density and the spectral peak energy relation for GRBs observed by HETE-2. The numbers of C-GRBs, XRRs and XRFs in the sample are comparable. (b) The spectra of several XRFs, XRRs and C-GRBs, adapted from ref. [7].

$$K_{50} = \frac{F|_{15}^{150}}{\int_{15}^{150} E \cdot f'(E) \cdot dE},$$

$$f'(E) = \left(\frac{E}{50 \text{ keV}} \right)^{\alpha_{\text{pl}}},$$

$$\text{或 } f'(E) = \left(\frac{E}{50 \text{ keV}} \right)^{\alpha_{\text{cpl}}} \cdot \exp \left(\frac{-E(2 + \alpha_{\text{cpl}})}{E_{\text{peak}}} \right).$$

据此, 可以计算出 Swift/BAT 的伽玛暴样本在不同能段的流强

$$F|_{E_1}^{E_2} = \int_{E_1}^{E_2} E \cdot f(E) \cdot dE.$$

视场和观测时间修正. Ghirlanda 等人 [9] 从现有的 Swift 样本中 (截至 2014 年 7 月共有 773 个长暴) 提取了 204 个 $P > 2.6 \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (15–150 keV) 的伽玛暴. 考虑 Swift 的典型视场是 1.4 sr 和观测时间约为 9.5 年, 可以估算 Swift 对 $P > 2.6 \text{ ph s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 的伽玛暴的探测率约为 $15 \text{ yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. 根据该探测率对 EP/WXT (视场约为 1.1 sr) 在某一观测时间段内的预期探测样本进行相应的归一化.

灵敏度的修正. EP/WXT 的流量灵敏度依赖于曝光时间. 对于曝光时间较短 ($< 1000 \text{ s}$) 的情形, 流量灵敏度和曝光时间近似为反相关线性关系; 对于曝光时间较长 ($> 1000 \text{ s}$) 的情形, 流量灵敏度则近似为正比于 $T^{-1/2}$, T 为曝光时间. 对于曝光时间 1000, 100 和 10 s 分别大致为 1×10^{-11} , 1×10^{-10} 和 $1 \times 10^{-9} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. 在估算 EP 卫星对 XRF 的探测率中, 是用 100 s 曝光时间的灵敏

度来计算的.

Salvaterra [10] 根据文献 [9] 的计算模型 (该模型是基于目前 Swift 的观测结果), 计算了拥有不同观测能段的仪器每年至少探测到 10 个 $z > 8$ 伽玛暴所应必备的最低灵敏度和视场. 本课题组也参考文献 [9] 的模型, 基本可以重复出 Salvaterra 的计算结果, 说明我们计算的正确性. 参考文献 [9] 的计算模型以及基于 EP 的观测模式 (观测能段 0.5–4 keV; 视场 $60^\circ \times 60^\circ$, 约为 1.1 sr; 灵敏度取为 $10^{-10} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$, 对于 100 s 积分时间; 平均总的有效观测时间为运行时间的 $\sim 70\%$), 预计未来 EP 每年可探测到约 810 多次各类伽玛暴事件. 为了具体估算各类伽玛暴事件分别占总伽玛暴事件的比例, 结合文献 [9] 的模型计算了 EP 对 X 射线闪 (XRF)、富 X 射线伽玛暴 (XRR)、普通伽玛暴 (C-GRB) 的探测数目. 具体做法为以下 4 个方面. (1) 假定能谱为 Band 函数, 且低、高能谱指数取定值为 -1.0 和 -2.3 . (2) 根据能谱硬度 H 的区分标准 (BeppoSAX 和 HETE-2 的区分标准), 计算 XRF, XRR, C-GRB 对应的谱峰值能量 E_p 的取值范围 (即用 E_p 来判断某一事件到底是 XRF 还是其他 2 类). (3) 结合 Yonetoku 关系, 由得到的 E_p 计算光度 L 的取值范围. (4) 基于 EP 的观测模式, 计算未来 EP 每年可探测到的 XRF, XRR, C-GRB 的数目.

乐观估计 EP 每年可探测到 810 多次各类伽玛暴事件, 其中 X 射线闪 (XRF) 的次数约 770 次 (占 94.8%), 富 X 射线伽玛暴 (XRR) 约为 36 次 (占 4.5%), 普通伽玛暴 (C-GRB) 约为 6 次 (占 0.7%). 从计算结果可以看出, EP 所探

测到的伽玛暴绝大多数属于XRF. 值得指出的是, 高红移伽玛暴由于红移效应, 它们的谱峰值能量EP观测值会被红移到软X射线波段, 因此会表现为XRF. 也就是说, 将来EP观测到的一小部分XRF很可能是普通的高红移伽玛暴经红移而得. 虽然这些高红移伽玛暴与其他XRF可能有本质(爆发机制)上的区别, 但是能谱硬度上它们表现一样, 需要红移测量来进一步区分.

运行3到5年后, EP将大幅增加各类事件样本的数目, 为探索伽玛暴的起源和物理本质及相关天体物理问题带来重大机遇.

3 低光度伽玛暴

3.1 背景简介

第一个被探测到的被称为低光度伽玛暴的是GRB 980425, 其各向同性伽玛射线光度只有 $10^{46} \text{ erg s}^{-1}$, 极低的红移($z=0.0085$)也导致对应的超新星SN98bw被观测到, 成为第一个被观测到的与长伽玛暴成协的超新星. 目前认为, 低光度暴(可能)是长伽玛暴的一个子类. 已有比较详细观测的低光度暴大概只有4个, 所以还比较缺乏观测性质的统计. 粗略地说, 它们的各向同性光度($10^{46}-10^{48} \text{ erg s}^{-1}$)要显著低于普通的典型的伽玛暴光度($10^{50}-10^{53} \text{ erg s}^{-1}$), 总体而言低了4-5个量级. 虽然估计上有不确定性, 但是目前观测估计的低光度暴单位体积爆发率比典型暴要高10-100倍. 观测到的低光度暴都是比较邻近的, 这使得它们对应的超新星能够很容易被仔细地进行观测, 给出超新星的能量和暴周环境的信息, 揭示伽玛暴和超新星的关系. 这对研究伽玛暴前身星和中心引擎, 大质量恒星晚期演化提供重要的手段. 由于低光度暴的发生更频繁, 它们有可能比典型暴是更重要的宇宙线、中微子以及引力波的辐射源. 所以, 研究低光度暴具有重要意义. 目前的低光度暴统计量很不够, 非常有必要探测到更多的这种暴, 进行多波段的联合观测, 获得它们的爆发和余辉等阶段以及后期的超新星的详细个体信息, 并进行统计分析.

3.2 观测和理论现状

目前观测比较详细, 特别是具有成协超新星观测的低光度伽玛暴具有4例, GRB 980425, 031203, 061218和100316D. 它们统一的特征是在伽玛射线或

硬X射线能区释放了 $10^{48}-10^{50} \text{ erg}$ 的能量; 光变曲线基本上是平滑的、单一脉冲的形状; 能谱都随着时间变软^[11]. 推算的喷发物张角比典型伽玛暴要大^[12]. 再细分又可以把这4个低光度暴分成两对: GRB 980425和031203持续时间约30 s, 能谱峰值能量 $>150 \text{ keV}$; 而GRB 060218和100316D则持续时间长得多, 约1500 s, 能谱也软, 峰值能量约5 keV, 辐射的能量大都是 $5 \times 10^{49} \text{ erg}$. 由于能谱较软, 有人也把后面这一对称为X射线闪.

与这4例低光度暴成协的超新星跟典型伽玛暴的成协超新星很相像, 都是较为少见的宽线Ic型超新星, 说明它们都具有类似的前身星. 超新星没有H和He线, 说明前身星包层已经被剥离. 其膨胀速度很快, 达到 $(1-3) \times 10^4 \text{ km s}^{-1}$, 并且比较亮的光度说明合成的 ^{56}Ni 含量相对较高, 携带的总动能也比普通超新星要高. 通常这些低光度暴也都伴随有较亮的射电余辉, 需要的喷发物具有中等相对论的速度(洛伦兹因子2)和 10^{49} erg 量级的动能. 这些迹象让人们认为低光度暴的驱动机制是中等相对论的激波从前身星表面或(光学厚的)星风冲出来导致的. 但是这个激波的起源还存在不同解释. 例如, 是传统上认识的导致超新星爆发的超新星激波^[13,14], 还是中心引擎产生的喷流驱动的激波^[15,16]?

无论是哪种激波驱动机制, 都意味着低光度暴对于典型伽玛暴是不同类型的暴——典型暴是相对论喷流冲出前身星包层以后仍保持极端相对论, 并在半径较大、光学薄的地方产生的辐射; 而低光度暴是中等相对论激波在小半径、光学厚的地方突围时产生. 这些猜想需要更多的观测来证实. 首先, 不同的物理机制产生的伽玛暴其各个观测量之间的相关性可能不同. 已有研究似乎表明, 低光度暴的光度(各向同性)、能谱峰值能量以及喷发物的初始洛伦兹因子满足不同于典型伽玛暴的经验关系. 另外, 在光度和峰值能量的关系中, 低光度暴GRB 060218在 3σ 的置信水平上偏离典型伽玛暴的统计分布. 这些都似乎表明低光度暴的特殊性^[13,15,17,18]. 其次, 如果低光度暴与典型暴机制不同, 我们期望低光度暴在光度函数上是一个不同的成分. 现有的研究结果似乎支持这个想法^[12], 但是由于统计样本不够大的原因, 仍然存在争论.

3.3 EP的预期贡献

以上分析表明, 低光度暴研究的一个关键是增加统计样本, 需要探测到更多的低光度暴. 虽然不确定

性较大, 但是现有结果表明低光度暴可能是高爆发率的. 最新的研究结果表明, 其本地爆发率为约 $200 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$, 远高于高光度暴的爆发率 $1 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (假设各向同性爆发^[19]). 尽管低光度伽玛暴的爆发率应比普通伽玛暴高2–3个量级, 目前只有6个这样的低光度暴被观测到(包括两个没有详细对应超新星观测的暴^[19]). 导致如此低的探测率的主要原因是这种暴的光度比较低, 现有伽玛探测器的灵敏度只能探测非常低红移的暴. 另外, 还有一个原因可能是目前的伽玛暴探测卫星一般工作在20–300 keV能段, 而低光度暴可能很大一部分能谱较软. EP的探测能段和较高的灵敏度将非常适合寻找低光度伽玛暴.

根据最新的低光度伽玛暴光度函数^[19], 假设低光度暴爆发率的红移演化跟随恒星形成率, 并假设低光度暴是在天空均匀分布的, 可以计算低光度暴的探测率随流量阈值的关系, 即 $\log N$ - $\log S$ 分布. 由于似乎存在能谱峰值能量很不同的两类暴, 即类GRB 980425的和类GRB 060218的, 我们进行了两个计算, 针对这两类暴分别假设峰值能量为122和4.7 keV, 结果见图3. 根据EP的灵敏度(按照100 s的积分时间算)和视场大小(1.1 sr), 以及平均总的有效观测时间为运行时间的~70%, 估计EP每年将能探测到光度为 10^{46} – $10^{49} \text{ erg s}^{-1}$ 的低光度暴约8或0.2个——这两个数字分别对应两个假设的峰值能量, 实际情况应该介于两者之间. 这样的探测效率比目前的伽玛暴卫星探测效率高几到几十

倍. EP有望在3年内探测到足够多的低光度暴, 对它们进行统计分析, 而且对特别明亮的暴进行仔细的特例分析.

4 超长伽玛暴

最近几年INTEGRAL, Swift, Fermi, Konus-Wind等探测器陆续发现了一些持续时间特别长的伽玛暴, 从伽玛暴持续时间与伽玛暴光度的关系图(图4)可以看到, 棕色的3个大圆点簇拥成团, 似乎构成一个新的子类, 这类伽玛暴被称为超长伽玛暴(Ultra Long GRBs).

超长暴的光度处在普通伽玛暴的低端, 其光度仅比低光度暴略大, 但超长暴的持续时间可达数千秒以上. 目前已经探测到的超长暴有GRBs 101225A, 111209A, 121027A, 130925等(不完全列表). 虽然目前已发现的超长暴数量较少, 但Levan等人^[20]估计超长暴的爆发率并不低, 其爆发率可能只比正常伽玛暴低几倍. 之所以大部分超长暴无法被观测到, 是因为目前伽玛暴的触发机制导致的. 超长暴的光度比较低, 通常很难触发Fermi等探测器.

超长暴的宿主星系通常都很暗, 其绝对星等为 $MB = -17$, 半径很小, 只有600 pc左右. 这样的星系比普通的伽玛暴的宿主星系小得多, 也暗得多. 已知超长暴的红移介于0.3–1.8. 超长暴的各向同性能量为 10^{52} erg , 位于普通长暴各向同性能量的低端. 目前大

图3 (网络版彩图)低光度暴在0.5–4 keV的探测率随探测器灵敏度的变化. (a) 取低光度暴的能谱峰值能量为与GRB 980425一样的122 keV, 而能谱指数在峰值以下和以上分别为–1和–2.3. 阴影区域考虑了低光度暴光度函数的不确定性. 红虚线为EP在100 s积分时间的灵敏度. (b) 取低光度暴的能谱峰值能量为与GRB 060218一样的4.7 keV

Figure 3 (Color online) The detection rate of low-luminosity GRBs as function of the detector sensitivity (in 0.5–4 keV range). (a) Assume the spectral peak energy follows that of GRB 980425, 122 keV, and the spectral indices below and above the spectral peak energy are –1 and –2.3, respectively. The shaded region accounts for the uncertainty in the luminosity function of low-luminosity GRBs. The red dashed line is the EP sensitivity for 100 s integration time. (b) Assume the spectral peak energy follows GRB 060218, 4.7 keV.

图 4 (网络版彩图) 不同种类伽玛暴^[20]

Figure 4 (Color online) Different classes of GRBs^[20].

多数超长暴没有在余辉中观测到明显的喷流拐折现象, 这意味着这类暴的喷流张角比较大. Levan 等人^[20]估计超长暴的喷流张角在 10° 以上.

关于超长暴的前身星及其产生机制, 目前的理论模型包括蓝超巨星作为前身星^[21]、或大质量黑洞的潮汐瓦解事件^[20]、或黑洞自转衰减提供能量^[22]等. Greiner 等人^[23]在分析了超长暴 GRB 111209A 的多波段数据之后发现, 该暴伴随有明亮超新星爆发, 命名为 SN 2011kl. SN 2011kl 的星等为 $M_{\text{bol}} = -20.0$, 介于普通超新星 ($M > -19.5$) 与超亮超新星 ($M < -21$) 之间, 是通常的与伽玛暴成协的超新星亮度的 3 倍以上. SN 2011kl 的光谱与正常伽玛暴的超新星有很大差异, 但与超亮超新星的光谱类似. 此外, 在 SN 2011kl 的光谱中未发现 ^{56}Ni 的存在, 这些都与正常伽玛暴的超新星不同. 基于这些原因, Greiner 等人^[23]认为, SN 2011kl 的能量来自磁星 (magnetar). SN 2011kl 的特性不支持超长暴 GRB 111209A 的前身星为蓝巨星起源, 其发现也不支持大质量黑洞潮汐瓦解起源.

观测发现, 超长暴瞬时辐射期间伽玛光子的流量与 X 射线辐射存在明显的相关性. 超长暴瞬时辐射期间的 X 射线辐射通常都有剧烈的耀发, 见图 5. 由图 5 可知, 超长暴瞬时辐射期间 X 射线波段的光度典型值为 $10^{49} \text{ erg s}^{-1}$. 如果假设超长暴的喷流张角典型值为 10° , 其发生率为正常长伽玛暴的 1/3, 因正常长伽玛暴在红移 $z=0$ 的爆发率密度为 $10^2\text{--}10^3 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (考虑喷流张角修正后), 以 EP 的探测灵敏度 $10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (曝光

图 5 (网络版彩图) 3 个超长暴 GRBs 101225A, 111209A 和 121027A 的 X 射线光变曲线. 天蓝色为潮汐瓦解事件, 橘色与黑色为两个低光度暴. 虚化的黑白背景为正常伽玛暴的 X 射线光变曲线^[20]

Figure 5 (Color online) The X-ray light curves of three ultra-long GRBs 101225A, 111209A, and 121027A. For comparison, a tidal disruption event (blue), two low-luminosity GRBs (orange and black), and normal GRBs (dark region) are also shown^[20].

100 s) 和视场范围 1.1 sr 来计算, 并考虑了平均总的有效观测时间为运行时间的 $\sim 70\%$, EP 每年可探测到 23–230 次超长暴.

这个估计可能过于保守, 有 3 个方面的修正. (1) 由于超长暴持续时间长, 可以增加曝光时间来搜寻, 提高流量灵敏度和超长暴探测率. 例如, 以 EP 1000 s 曝光时间的灵敏度来搜寻, 探测深度的增加会导致探测率增大 3 倍. (2) 以上假设了超长暴爆发率密度不随红移演化, 如果假设正比于恒星形成率的演化, 那么探测率会增大 3 倍. (3) 由于超长暴的长持续时间, 在短时标的曝光情况下, 探测率也依赖于巡天的策略. 例如, 如果在超长暴典型持续时间内 EP 能完成的巡天区立体角为 Ω ($> 1.1 \text{ sr}$), 那么相当于 EP 在该曝光时间内的“实际视场”增大为 Ω , 而探测率会增大 $\Omega/1.1 \text{ sr}$ 倍. 所以, 这些原因最后会导致超长暴的 EP 探测率可能比每年 20–200 次要大至少一个量级.

因为 EP 对超长暴的高探测率, 可迅速扩大超长暴样本规模, 为揭示超长暴的前身星和爆发机制等提供了可观的观测资料. Fermi-GBM 还探测到了 GRB

图 6 GRB 041219a 的先兆辐射^[24] (a) 光变曲线; (b)-(d) 能谱
Figure 6 The precursor in GRB 041219a [24] (a) Light curve; (b)-(d) spectrum.

130925 的先兆信号, 这种信号(见第 5 节)很可能在 X 射线上也有体现, 这为 EP 探测超长暴的先兆信号提供了机遇。

5 伽玛暴的先兆辐射

观测上发现一些伽玛暴具有先兆辐射(Precursor). GRB 030406, 一个发生在 INTEGRAL 视场之外的伽玛暴, 在主暴前 50 s 左右有一个先兆辐射. GRB 041219a, INTEGRAL 发现的一个伽玛暴, 主暴之前约 260 s 左右有一个先兆辐射(图 6). GRB 050820a 的主暴之前 200 s 左右有一个先兆辐射, 先兆辐射触发了 Swift, 主暴触发了 Konus/WIND. 主暴和先兆辐射总共持续了约 600 s 时长. Swift 和 Konus/WIND 发现的 GRB 060124 在主暴之前约 500 s 左右有一个先兆辐射. Swift, Konus/WIND 和 RHESSI 共同发现的 GRB 061121 在主暴之前 60 s 左右有一个先兆辐射. Koshut 等人^[25]发现, 约 3% 的由 BATSE 发现的伽玛暴具有先兆辐射. 后来的研究发现了更多先兆辐射^[26]. Swift 观测到的伽玛暴中 10% 左右有先兆辐射^[27].

伽玛暴的先兆辐射在 X 射线波段也曾被探测过, 如 Ginga 和 GRANAT 卫星就曾探测过^[28-30]. Ginga 探测

到的伽玛暴先兆辐射具有温度为 1–2 keV 的热谱。

伽玛暴先兆辐射具有如下 4 个特征: (1) 持续时间短于伽玛暴的主暴辐射, 并且比主暴要暗; (2) 和伽玛暴主暴辐射之间有一个安静的时间间隔, 间隔长短和先兆辐射的持续时间差不多; (3) 光谱明显比主暴要软, 有几个例子辐射以黑体谱为主; (4) 光变曲线具有快速上升和指数下降(Fast Rise and Exponential Decay, FRED)的形状。

目前伽玛暴先兆辐射在观测上还不完善, 理论上也还没有成功的模型, 但是其观测对理解伽玛暴的本质可能具有重要意义^[31]. 由于先兆辐射相比主暴辐射可能发生在离伽玛暴中心引擎更近的距离上, 其观测结果可以对伽玛暴的爆发机制和中心引擎给出更强的限制^[31]. 由于 EP 具有大视场监视功能, 这为发现伽玛暴的先兆辐射提供了便利. 当发现一个新的伽玛暴, 如果其位置恰好在 EP 的视场之内, 就可以在其巡天数据中寻找该暴的先兆辐射. 因此, 伽玛暴的先兆辐射可以作为 EP 的一个重要科学目标。

由于存在较大不确定性, 笼统估计 EP 的探测率如下. 假设每年 EP 探测到约 810 个伽玛暴, 并根据 Swift 结果保守假设 10% 的伽玛暴有先兆辐射, 那么落在 EP 视场内的先兆事例约为每年 81 个. 实际上, Swift 卫星探

测到先兆辐射的概率极有可能和EP不同, 因为两者的观测能段不同, 这里仅给出一个大致探测率的估算, 即每年80个左右的伽玛暴先兆辐射事例.

6 结论

伽玛暴这一类恒星量级的剧烈爆发现象在伽玛射线能段已经积累大量的数据, 随后的观测也在多波段上对余辉进行了深入的研究, 但是在瞬时X射线上还缺乏大量的研究, EP有望填补这一部分的缺口. 观测和理论上都预期在X射线能区可能存在伽玛暴的特殊子类或者存在伽玛暴的特殊辐射, 对于它们的大量、

仔细研究对伽玛暴这类天体的研究有重要意义. 本文讨论了EP可能在X射线闪、低光度伽玛暴和伽玛暴先兆辐射上的预期研究结果. (1) EP每年能探测到约810个伽玛暴类爆发事件, 其中95%为能谱较软的X射线闪, 仅约1%为典型伽玛暴; (2) EP每年能探测到0.2–8个低光度伽玛暴, 下限对应于假设低光度暴都像GRB 980425那么硬, 而上限对应于假设都像GRB/XRF 060218那么软; (3) EP每年至少能探测到20–200个超长暴, 依赖于曝光时间和巡天策略等因素, 实际的探测率可能增大至少一个量级; (4) EP的广角特性有望探测大量的、非常缺乏了解的伽玛暴先兆辐射, 每年探测率约为80个事件.

参考文献

- Kumar P, Zhang B. The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets. *Phys Rep*, 2015, 561: 1–109, arXiv: [1410.0679](#)
- Gehrels N, Ramirez-Ruiz E, Fox D B. Gamma-ray bursts in the *Swift* era. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2009, 47: 567–617, arXiv: [0909.1531](#)
- Heise J, Zand J I, Kippen R M, et al. X-ray flashes and X-ray rich gamma ray bursts. In: *Bursts in the Afterglow Era: Proceedings of the International Workshop Gamma-Ray*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. 16–21
- Heise J. X-ray flashes and X-ray counterparts of gamma-ray bursts. In: *The Proceedings of Gamma-Ray Burst and Afterglow Astronomy 2001: A Workshop Celebrating the First Year of the HETE Mission*. New York: American Institute of Physics, 2003. 229–236
- Sakamoto T, Lamb D Q, Graziani C, et al. *High Energy Transient Explorer 2* observations of the extremely soft X-ray flash XRF 020903. *Astrophys J*, 2009, 602: 875–885
- Sakamoto T, Hullinger D, Sato G, et al. Global properties of X-ray flashes and X-ray-rich gamma-ray bursts observed by *Swift*. *Astrophys J*, 2008, 679: 570–586, arXiv: [0801.4319](#)
- Sakamoto T, Lamb D Q, Kawai N, et al. Global characteristics of X-ray flashes and X-ray-rich gamma-ray bursts observed by *HETE-2*. *Astrophys J*, 2005, 629: 311–327
- Sakamoto T, Barthelmy S D, Baumgartner W H, et al. The second *Swift* burst alert telescope gamma-ray burst catalog. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 195: 2–891, arXiv: [1104.4689](#)
- Ghirlanda G, Salvaterra R, Ghisellini G, et al. Accessing the population of high-redshift gamma ray bursts. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 448: 2514–2524, arXiv: [1502.02676](#)
- Salvaterra R. High redshift gamma-ray bursts. *J High Energy Astrophys*, 2015, 7: 35–43, arXiv: [1503.03072](#)
- Kaneko Y, Ramirez-Ruiz E, Granot J, et al. Prompt and afterglow emission properties of gamma-ray bursts with spectroscopically identified supernovae. *Astrophys J*, 2007, 654: 385–402
- Liang E, Zhang B, Virgili F, et al. Low-luminosity gamma-ray bursts as a unique population: Luminosity function, local rate, and beaming factor. *Astrophys J*, 2007, 662: 1111–1118
- Wang X, Li Z, Waxman E, et al. Nonthermal gamma-ray/X-ray flashes from shock breakout in gamma-ray burst-associated supernovae. *Astrophys J*, 2007, 664: 1026–1032
- Nakar E, Sari R. Relativistic shock breakouts—a variety of gamma-ray flares: From low-luminosity gamma-ray bursts to type Ia supernovae. *Astrophys J*, 2012, 747: 88–102, arXiv: [1106.2556](#)
- Bromberg O, Nakar E, Piran T. Are low-luminosity gamma-ray bursts generated by relativistic jets? *Astrophys J*, 2011, 739: L55, arXiv: [1107.1346](#)
- Irwin C M, Chevalier R A. Jet or shock breakout? The low-luminosity GRB 060218. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 460: 1680–1704, arXiv: [1511.00336](#)

- 17 Campana S, Mangano V, Blustin A J, et al. The association of GRB 060218 with a supernova and the evolution of the shock wave. *Nature*, 2006, 442: 1008–1010
- 18 Liang E W, Lin T T, Lü J, et al. A tight $L_{\text{iso}}-E_{\text{p},z}-\Gamma_0$ correlation of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2015, 813: 116–124, arXiv: [1505.03660](#)
- 19 Sun H, Zhang B, Li Z. Extragalactic high-energy transients: Event rate densities and luminosity functions. *Astrophys J*, 2015, 812: 33–50, arXiv: [1509.01592](#)
- 20 Levan A J, Tanvir N R, Starling R L C, et al. A new population of ultra-long duration gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2014, 781: 13–34, arXiv: [1302.2352](#)
- 21 Gendre B, Stratta G, Atteia J L, et al. The ultra-long gamma-ray burst 111209a: The collapse of a blue supergiant? *Astrophys J*, 2013, 766: 30, arXiv: [1212.2392](#)
- 22 Nathanail A, Contopoulos I. Are ultralong gamma-ray bursts powered by black holes spinning down? *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2015, 453: L1–L5, arXiv: [1504.03906](#)
- 23 Greiner J, Mazzali P A, Kann D A, et al. A very luminous magnetar-powered supernova associated with an ultra-long γ -ray burst. *Nature*, 2015, 523: 189–192, arXiv: [1509.03279](#)
- 24 McBreen S, Hanlon L, McGlynn S, et al. Observations of the intense and ultra-long burst GRB 041219a with the Germanium spectrometer on INTEGRAL. *Astron Astrophys*, 2006, 455: 433–440
- 25 Koshut T M, Kouveliotou C, Paciesas W S, et al. Gamma-ray burst precursor activity as observed with BATSE. *Astrophys J*, 1995, 452: 145
- 26 Lazzati D. Precursor activity in bright, long BATSE gamma-ray bursts. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 357: 722–731
- 27 Hu Y D, Liang E W, Xi S Q, et al. Internal energy dissipation of gamma-ray bursts observed with *Swift*: Precursors, prompt gamma-rays, extended emission, and late X-ray flares. *Astrophys J*, 2014, 789: 145–157, arXiv: [1405.5949](#)
- 28 Murakami T, Inoue H, Nishimura J, et al. A γ -ray burst preceded by X-ray activity. *Nature*, 1991, 350: 592–594
- 29 Murakami T, Ogasaka Y, Yoshida A, et al. GINGA observations of gamma-ray bursts. In: The Proceedings of AIP Conference, Gamma-Ray Bursts, New York, 1991. 28–31
- 30 Sazonov S Y, Sunyaev R A, Terekhov O V, et al. GRANAT/WATCH catalogue of cosmic gamma-ray bursts: December 1989 to September 1994. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1998, 129: 1–8
- 31 Li L X. Gamma-ray burst precursors as the remnant of the thermal radiation initially trapped in the fireball. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 380: 621–636

Special gamma-ray bursts and special radiation components from gamma-ray bursts

LI Bing^{1,2}, SUN Hui^{3,4}, WANG LingJun^{2,4}, WEI JunJie^{5,6}, HUANG YongFeng¹, LI LiXin^{3,7},
LI Zhuo^{3,7*}, LIANG EnWei⁸ & WU XueFeng⁵

¹ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

² Particle Astrophysics Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

⁴ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁵ Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

⁶ Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, Nanning 530004, China;

⁷ Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China;

⁸ School of Physics and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

Gamma-ray bursts (GRBs) were first detected in 1960s. Since then, GRBs have been observed extensively in gamma-rays. The afterglows of several hundred GRBs were also detected, providing us with abundant clues for understanding the physics of GRBs. However, X-ray observations of GRBs at the prompt burst phase are still quite lacking. These very early X-ray observations should be very important for probing the activities of GRB central engines. The Einstein Probe, a unique satellite that works mainly in soft X-rays (0.5–4 keV) with a large field of view (1.1 sr), will open up a new window for us to observe the prompt X-ray emission of GRBs. In this article, we review the current status of the studies on some special kinds of GRBs such as those rich in X-rays and those baring special emission components. Especially, we investigate possible contributions of EP to the studies of X-ray flashes (XRFs), low-luminosity GRBs, ultra-long GRBs, and the precursors of GRBs. It is found that: (1) EP is expected to detect about 810 GRB-like events, among which 95% are soft XRFs and only 1% are typical GRBs; (2) EP could detect 0.2–8 low-luminosity GRBs each year (the exact detection rate is strongly dependent on the exact spectral distribution of low luminosity GRBs, which is still largely uncertain currently); (3) EP would detect at least 20–200 ultra-long GRBs each year; (4) EP may be able to detect a lot of GRB precursors (at least 80 events per year), which are still poorly understood. We believe that the EP satellite will lead to encouraging discovers and will deepen our understanding of GRBs in various aspects such as their classifications, their progenitors, the triggering mechanisms and the beaming features, etc. We also note that the EP satellite has great advantages on its wide field of view and good sensitivity, over other similar world-wide instruments. We suggested that the project should be carried out as soon as possible.

gamma-ray burst, X-ray, sky survey

PACS: 97.60.-s, 95.85.Nv, 95.55.Ka

doi: [10.1360/SSPMA2017-00264](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00264)