超长暴和超软暴

黄艳^{1,2}, 罗琦^{3,4}, 张彬彬^{5,6*}, 熊少林³

1. 北京大学物理学院天文学系, 北京 100871;
2. 北京大学数理天文与天体物理研究所, 北京 100871;
3. 中国科学院高能物理研究所粒子天体物理中心, 北京 100049;
4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 南京大学天文与空间科学学院, 南京 210023;
6. 教育部现代天文与天体物理重点实验室(南京大学), 南京 210023

*联系人, E-mail: bbzhang@nju.edu.cn

收稿日期: 2019-12-24; 接受日期: 2020-03-26; 网络出版日期: 2020-09-18

国家重点基础研究发展计划(编号: 2018YFA0404204)和国家自然科学基金(编号: 11833003)资助项目

摘要 超长暴是一种特殊的伽马射线暴(伽马暴)类型, 其释放的总能量与普通伽马暴相当, 但持续时间可高达小时量级. 由于超长暴辐射流量偏低, 目前所观测的超长暴样本数量较少. 超长暴到底是普通长暴的延伸, 抑或是一种新类型的伽马暴, 目前的观测还未能给出一个确定的答案. 超软暴在本文定义为能谱偏软的伽马暴, 主要包括X射线闪和富X射线伽马暴等类型. 本文回顾了超长暴和超软暴的观测特征和理论研究, 讨论其可能的爆发机制和前身星模型. 引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)具有全天视场、高灵敏度、良好的定位精度和宽能段覆盖(6 keV–5 MeV)的综合优势, 且低能区探测能力比现有探测设备明显占优, 有利于超长暴和超软暴的观测. 我们根据GECAM的响应矩阵和本底模拟数据, 对典型的超长暴(GRB 130925A)和超软暴(XRR 050525A)进行能谱模拟, 并与Fermi/GBM和Swift/BAT的能谱观测进行比较, 发现GECAM对于低能段能谱的测量能力要优于Fermi/GBM和Swift/BAT. 另外, 我们还计算了GECAM对超长暴和超软暴的探测率, 发现GECAM预期每年可以探测到~20个超长暴, ~50个X射线闪以及~300个富X射线伽马暴.

关键词 伽马射线暴, 伽马射线, 巡天, GECAM

PACS: 97.60.-s, 95.85.Pw, 95.80.+p, 95.55.Ka

1 引言

伽马射线暴(简称伽马暴, GRB)是宇宙中十分剧烈的恒星级爆发现象. 伽马暴在短时间(~ms–100 s)

内释放出巨大的能量($E_{\text{iso}}=10^{53}$ erg), 与太阳的静能相当^[1,2]. 伽马暴自20世纪60年代发现以来, 已经积累了大量的观测数据. 在伽马暴研究早期, 其理论模型多达百个^[1], 由于当时对伽马暴的距离未知, 所以很难对这

引用格式: 黄艳, 罗琦, 张彬彬, 等. 超长暴和超软暴. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129504

Huang Y, Luo Q, Zhang B B, et al. Ultra-long gamma-ray bursts and ultra-soft gamma-ray bursts (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 129504, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0415](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0415)

些模型进行一一验证. 伽马暴的火球模型则是上述众多模型中最著名的一个^[3]. 伽马暴研究的突破是1997年余辉的发现, 并由此奠定了其在宇宙学尺度发生的本质. 伽马暴余辉的标准模型认为, 余辉阶段的辐射源于外激波扫过星周介质而产生的非热辐射^[4]. 但是对于瞬时辐射, 尽管传统上的主流模型认为其是内激波过程产生的^[5,6], 但近年来越来越多的观测证据支持其来自磁能耗散过程^[7], 两种模型之争目前仍难分伯仲.

引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)具有全天视场、高灵敏度、良好的定位精度和宽能段覆盖等显著优势, 同时具备在轨触发、在轨定位、准实时下传触发定位信息等功能, 从而快速引导空间和地面望远镜进行后随观测. GECAM预期将发现各种双致密星(包括中子星-中子星、中子星-黑洞和黑洞-黑洞)并合起源的引力波伽马暴以及新型的引力波高能辐射现象. GECAM也将揭示快速射电暴的高能辐射的本质、发现更多超长和超软的伽马暴、监测新的磁星爆发以及探测地球伽马闪等.

超长暴(Ultra-Long Gamma-Ray Bursts, ULGRBs)和超软暴(Ultra-Soft Gamma-Ray Bursts, USGRBs)是两类特殊的伽马暴. 超长暴的持续时间很长(~ 1000 – 10000 s), 且流量较低^[8], 现有的伽马射线卫星较难被超长暴触发, 即使被触发, 也存在时间分辨率不够以及光变记录不完整等问题. 超软暴的能谱偏软(低能光子流量与高能光子流量之比偏高), 现有的大多数伽马射线卫星的探测能段在几十keV以上, 探测超软暴的效率不高. 并且以往和现有的X射线(<10 keV)卫星是在伽马射线探测器被触发之后数分钟才开始对该暴进行后续观测, 因此, 超软暴的瞬时辐射在X射线能段(<10 keV)普遍缺乏观测数据. GECAM的灵敏度高, 可以被流量较低的超长暴触发, 进而扩充现有的超长暴样本. 另外, GECAM可以全天视场对伽马暴进行监测, 不受地球遮挡的影响, 且时间分辨率高, 方便我们获得质量较高的完整的超长暴光变和能谱信息^[9]. GECAM的另外一个优势是其对低能段(6–100 keV)的覆盖, 有利于我们对软伽马射线辐射较强的超软暴开展详尽的观测和研究. 在下文中, 我们将回顾超长暴和超软暴在观测和理论等方面的研究, 并结合GECAM的观测优势, 阐述GECAM可能对未来超长暴和超软暴的研究会有哪些优势.

2 超长暴

2.1 超长暴的观测特征

传统的理论认为GRB可以分为两类: 短暴, 持续时间小于2 s, 能谱偏硬, 一般认为是双致密星的合并^[10–12]; 长暴, 持续时间大于2 s, 能谱偏软, 一般认为是大质量恒星的坍缩^[10,13–16]. 近年来通过对数据进一步的发掘, 人们意识到该2 s的界限会受到仪器效应的影响^[17], 人们对伽马暴“长”、“短”的定义实际上更多暗含其物理起源的信息(坍缩星起源—Type II—长暴, 致密星合并起源—Type I—短暴)^[18]. 长暴的典型时标为几十秒, 但是近年来INTEGRAL, Swift, Fermi, Konus-WIND (KW)等伽马射线探测器陆续发现一些爆发时间特别长的伽马暴, 持续时间可达 10^4 s, 甚至大于 10^4 s, 这类伽马暴被称为超长暴^[8]. 目前已经确认的超长暴包括GRB 101225A^[19], GRB 111209A^[20–22], GRB 121027A^[8], 以及GRB 130925A^[23]等. 不同伽马射线探测器的探测能区和观测能力不尽相同, 其给出的超长暴样本列表也会有所差别: Swift/BAT给出的超长暴样本可参考https://swift.gsfc.nasa.gov/results/batgrbcat/summary_cflux/summary_GRBlist/list_ultra-long_GRB_comment.txt, Konus-WIND给出的超长暴样本可参考<http://www.ioffe.ru/LEA/kw/wm/ulong/index.html>. 本文中, 我们根据以往已经发表的文章^[8,24–26], 整理了如表1中所示的超长暴样本(表1中超长暴的划分是根据 $T_{90} > 1000$ s, 但个别伽马暴的 $T_{90} < 1000$ s, 如GRB 110709B, GRB 111215A和GRB 170714A, 仍被认为是超长暴, 这是因为GRB 110709B和GRB 111215A的 T_{90} 接近1000 s, 考虑到 T_{90} 的误差, 仍可认为是超长暴^[24,27]. 而GRB 170714A被认为是超长暴, 主要是因为这个暴的X射线活跃时间很长, 部分文献支持其为超长暴^[26]). 从表1的结果我们可以发现, 超长暴的红移偏低, 介于0.3–2.1, 各向同性能量的典型值约为 10^{52} erg, 比普通长暴略微偏低, 持续时间达1000 s以上. 另外, 图1表示的是不同类型伽马暴的各项同性光度和持续时间的关系图, 从图1我们可以看出, 几个代表超长暴的红棕色数据点簇拥成一团, 不同于其他类型的伽马暴.

2.1.1 超长暴的伽马射线辐射

超长暴的流量偏低, 一般情况下较难被伽马射线探测器触发. 以GRB 101225A为例, 只有Swift/BAT

表1 超长暴样本

Table 1 The sample of ULGRBs

GRB名称	T_{90} (s)	红移	能流 (Fluence) (erg cm^{-2})	能段 (keV)	各向同性能量 (erg)	探测器	参考文献
GRB 840304A	1200	N/A	2.8×10^{-3}	5–3000	N/A	Pioneer Venus Orbiter/ International Cometary Explorer/Vela 5B	[28]
GRB 971208A	2500	N/A	2.6×10^{-4}	15–1000	N/A	CGRO/BATSE/KW/ BeppoSAX	[29]
GRB 020410A	1550	0.5	2.8×10^{-5}	15–1000	1.8×10^{52}	BeppoSAX/KW	[30]
GRB 060218A	2100	0.0331	1.7×10^{-5}	15–150	6.2×10^{49}	Swift	[31]
GRB 060814B	2700	N/A	2.4×10^{-4}	18–1170	N/A	KW/Suzaku-WAM/ INTEGRAL	[29]
GRB 080407A	2100	N/A	4.4×10^{-4}	20–1000	N/A	KW	[32]
GRB 090417B	>2130	0.345	8.2×10^{-6}	15–150	$>6.3 \times 10^{51}$	Swift	[33]
GRB 091024A	1300	1.09	1.5×10^{-4}	1–10000	4.5×10^{53}	Swift/KW/Fermi	[24]
GRB 100316D	1300	0.0591	5.1×10^{-6}	15–150	3.9×10^{49}	Swift	[34]
GRB 101225A	7000	0.847	2.6×10^{-6}	15–150	5.2×10^{52}	Swift	[19]
GRB 110709B	900	N/A	2.24×10^{-5}	15–150	N/A	Swift	[35]
GRB 111209A	13000	0.677	4.9×10^{-4}	15–150	7.0×10^{52}	Swift/KW	[21]
GRB 111215A	796	2.06	4.5×10^{-6}	15–150	3.9×10^{51}	Swift	[36]
GRB 121027A	6000	1.77	2.0×10^{-6}	15–150	8.8×10^{52}	Swift/KW	[8]
GRB 130925A	5000	0.35	3.8×10^{-4}	15–150	7.0×10^{51}	Swift/KW/Fermi/ INTEGRAL/MAXI	[23]
GRB 141121A	1410	1.469	4.3×10^{-6}	15–150	8.0×10^{52}	Swift/MAXI/KW	[37]
GRB 161103A	4700	N/A	3.0×10^{-4}	20–1500	N/A	KW	[38]
GRB 170714A	420	0.793	2.8×10^{-6}	15–150	1.58×10^{52}	Swift	[26]

图1 不同类型伽马暴的各向同性光度和持续时间, 取自文献[8]

Figure 1 The isotropic luminosity vs. the duration time of different classes of GRBs, from refs. [8].

(15–150 keV)探测到该暴, 并且Swift对其触发主要通过成像触发(Image Trigger), 而不是计数率触发(Rate

Trigger). 由于部分超长暴的持续时间特别长(>5000 s), 而Swift的轨道周期只有90 min, 考虑地球遮挡的影响, 我们无法观测到超长暴完整的光变, 这也使得持续时间 T_{90} 的测量存在偏差. 因为部分辐射阶段的观测数据欠缺, 甚至无法测量 T_{90} 和流量, 而对于流量较强的超长暴, Konus-WIND和INTEGRAL会被触发, 并记录下比较完整的光变信息, 如GRB 111209A, GRB 121027A, 以及GRB 130925A. 从超长暴伽马射线辐射的光变特征, 我们可以将其光变分成连续性辐射(如GRB 101225A和GRB 111209A)和间歇性辐射(如GRB 121027A和GRB 130925A).

2.1.2 超长暴的X射线辐射

图2为部分超长暴(GRB 101225A, GRB 111209A和GRB 121027A等)的X射线光变图. 从图2我们可以看出, 超长暴的X射线光变具有以下特点.

(1) 高光度($\sim 10^{49} \text{ erg s}^{-1}$), 长时间($\sim 10^4 \text{ s}$)活跃, X射

图 2 超长暴的X射线光变曲线, 取自文献[8]

Figure 2 The X-ray light curves of ULGRBs, from ref. [8].

线光变上不时会出现一些跳变和闪烁, 随后快速下降.

(2) 瞬时辐射阶段的伽马射线(10 keV–1 MeV)光变上也存在跳变和闪烁的信号, 并且这些跳变和闪烁信号发生的时刻与X射线(<10 keV)光变是一致的, 说明瞬时辐射阶段的伽马射线光变在一定程度上和X射线光变具有相关性, 都源于中心引擎的活动.

(3) X射线光变上的跳变和闪烁等特征信号存在时间较长, 大约为 10^3 – 10^4 s, 说明中心天体活动的时间很长.

(4) X射线光变后期流量随时间呈幂率快速衰减, 衰减幂率指数约为-3(甚至更陡), 快速衰减阶段持续时间约为 10^2 – 10^3 s, 理论上认为该阶段源于瞬时辐射阶段的高纬度辐射延迟到达(曲率效应), 示踪着伽马暴从瞬时辐射阶段向余辉阶段的过渡[39].

(5) 超长暴的X射线余辉观测没有看到明显的转折现象($\sim 10^5$ s), 所以这类伽马暴的喷流张角比较大. Levan等人[8]估计超长暴的喷流张角在 10° 以上.

2.1.3 超长暴其他波段的观测

图3为超长暴GRB 101225A和GRB 111209A在UV和光学波段的光变曲线. 对于GRB 111209A, 从光变上很容易看出, 当 $t \gtrsim 1$ d, u波段的光变可以用一个单一

图 3 超长暴GRB 101225A (a)和GRB 111209A(b)的UV和光学光变曲线, 取自文献[8]

Figure 3 The UV and optical light curves of ULGRBs GRB 101225A (a) and GRB 111209A (b), from ref. [8].

的幂率谱去拟合, 且 $\propto t^{-1.38}$, 与X射线光变衰减的斜率一致. 然而J波段的光变衰减得更慢一些, 可以表示为 $\propto t^{-0.5}$. u波段与J波段光变斜率之差为 ~ 0.9 , 和经典的外激波模型(~ 0.25)不符. Levan等人[8,20,40]认为该光学辐射起源于超新星辐射在30 d左右产生的鼓包, 并且该超新星的光度要比普通超新星的大100倍左右, 被称为超亮超新星. 另外, 超长暴GRB 101225A的光学光变在晚期也衰减得很缓慢(r波段 $\propto t^{-0.59}$, i波段 $\propto t^{-0.34}$), 同样暗示在30 d左右会出现一个超新星的辐射成分[20].

2.2 超长暴的理论研究

2.2.1 超长暴持续时间的定义

伽马暴研究早期, 超长暴指的是瞬时辐射时间很长的伽马暴. 而 T_{90} 在伽马暴研究早期是作为伽马暴分类的一个重要判据, 所谓 T_{90} 是指光子的时间累计流量占总流量5%–95%的时间. 但是 T_{90} 的测量与监测卫星的能量范围和探测能力都有关系, 不同卫星对于同一爆发的 T_{90} 存在较大差异. Lü等人[41]提出, 如果伽马暴的辐射太微弱以致于部分辐射被埋没于背景之下, 从而也会导致 T_{90} 的测量存在偏差, 这就是所谓的冰山效应. 另外, 对于目前发现的超长暴候选样本, 通过对 T_{90} 的似然分析和累计分布分析表明, 超长暴作为单独一

个种类存在的显著性不强, 可能只是长暴分布的尾巴^[42]. 因此, T_{90} 是否能够作为对超长暴分类的重要判据仍待商榷. 这里也涉及伽马暴的持续时标如何定义等问题, 特别是如何保证伽马暴光变时标直接反映中心能源的活动. 随着超长暴样本的增多, 人们开始研究其中心引擎机制是否有所不同, 而超长暴由开始定义的“瞬时辐射时间超长”转变成“中心引擎活动超长”. 在多波段观测上, 余辉阶段存在的X射线耀发以及早期平台期, 使得越来越多的人意识到, 在瞬时辐射过后, 中心引擎并没有完全停歇下来, 只是强度和能量变弱了, 使得其辐射无法在高能波段被探测到. 综上, 单纯凭借瞬时辐射的 T_{90} 来定义中心引擎的活动期显然是不合适的.

因此, Zhang等人^[43]和Gao等人^[44]分别试图定义一个新的时标来描述伽马暴的中心活动. 该时标的定义是基于对Swift卫星观测到的大样本伽马暴进行多波段(尤其是X射线)分析, 而不仅仅局限于伽马射线能段. 这个时标被称作 t_{burst} , 也是一个可观测量, 它被认为是中心能源真正的活跃时标. 对 t_{burst} 的定义如下: 在 t_{burst} 时间内, 观测到的信号主要源于中心能源的相对论性喷流经内部耗散过程发出的辐射, 而非外激波过程主导的余辉辐射. 这个时标与传统的 T_{90} 最大的区别在于, 它并不局限于伽马射线能段的观测, X射线耀发等明显由中心能源引发的余辉阶段成分也是必须要加以考虑的. 为了保险起见, 称 t_{burst} 为中心能源活跃时标的下限更合适一些, 因为不排除此后中心能源再度活跃的可能性. 在观测上, t_{burst} 的终点是用X射线余辉光变曲线上外激波辐射最终占据主导的时刻来判断, 对应陡降阶段的结束期. 由于大多数伽马暴的X射线余辉都存在陡降, 因此通常 t_{burst} 要比 T_{90} 长很多. 对于那些没有陡降的伽马暴而言, 认为 t_{burst} 与 T_{90} 等同. Gendre等人^[25]利用以上定义的 t_{burst} , 根据 $t_{\text{burst}} > 5 \times 10^3 \text{ s}$, $5 \times 10^3 \text{ s} > t_{\text{burst}} > 10^3 \text{ s}$, 以及 $10^3 \text{ s} > t_{\text{burst}} > 500 \text{ s}$ 三个判据, 给出了三个不同质量的超长暴样本列表.

超长暴只是普通长暴分布延展的尾巴, 还是新的伽马暴分类, 目前的观测数据还未能给出一个确定的答案. 与普通长暴 T_{90} 约为几十秒的量级相比, 超长暴的瞬时辐射持续时标要长得多, 可以用小时计数. 有人认为这类伽马暴很反常, 它们的前身星或许与普通长暴不尽相同, 更可能起源于半径更大的蓝超巨星. 当然, 为了证实这样的观点, 进一步的详尽观测是必需的.

2.2.2 超长暴的宿主星系

宿主星系的证认可以更好地帮助我们了解超长暴可能的前身星模型. 超长暴(GRB 101225A, GRB 111209A和GRB 130925A)的宿主星系普遍较暗, 偏蓝, 绝对光度为 $M_B = -16 - -18$, 星系尺度较小($< 700 \text{ pc}$), 可以看到较强的OII和OIII的窄发射线, 具有较高的恒星形成率, 且金属性较低^[8]. 这种类型的星系在光度、尺度、金属性等性质上与邻近宇宙中的蓝致密矮星系很类似.

2.2.3 超长暴与超新星成协

超长暴的红移偏低, 距离我们较近. 如果超长暴和普通长暴一样, 起源于大质量恒星坍缩, 那么对于这些距离较近的超长暴, 我们应该可以观测到超新星与之成协的现象. 确实, 对于超长暴GRB 101225A和GRB 111209A, 观测发现其光变曲线在晚期呈现偏平或者再增亮的信号, 并且其能谱演化呈现由蓝变红的趋势, 暗示着超新星与之成协^[8]. 证实超长暴与超新星成协的理论模型有: 贫金属型蓝超巨星的cocoon辐射会产生超亮超新星, 当其相对论性喷流正轴时我们就可以观测到与之对应的超长暴, 如GRB 111209A与成协的超亮超新星SN 2011kl^[20,45]; 但是, 由于SN 2011kl的能谱中缺乏 56Ni 谱线, Gendre等人^[21]和Metzger等人^[46]认为磁星星风模型更适合解释GRB 111209A和SN 2011kl; 而Gao等人^[47]认为黑洞吸积模型可以同时解释GRB 111209A的X射线辐射以及SN 2011kl的光变曲线, 且模型参数认为其前身星更像是沃尔夫-拉叶星(Wolf-Rayet Star), 而不是蓝超巨星. 更加详尽的观测有助于我们去区分这些模型. 目前已经认证的与超新星成协的超长暴有GRB 111209A^[20], GRB 060218^[31]和GRB 100316D^[34]等.

2.2.4 超长暴的前身星模型

超长暴的前身星模型主要分为以下三种类型: 超大质量恒星, 类似于Pop III Stars(蓝超巨星)^[20,45,48,49], 白矮星的潮汐瓦解^[50,51], 特殊的中心引擎, 如新生成的磁星^[40]、夸克星^[26], 黑洞的超吸积^[52]以及黑洞自旋衰减提供能量^[53]等. 我们将在下面的叙述中举例说明.

一般认为普通长暴起源于大质量恒星的坍缩, 且前身星为沃尔夫-拉叶星^[14-16]. 对于坍缩星模型, 伽马暴的持续时间由抛射物回落吸积到中心的时标决定,

对于普通的沃尔夫-拉叶星, 其物质的回落吸积时标为^[20]

$$\delta t_{\gamma} \sim 77 \left(\frac{R_*}{2 \times 10^{10} \text{ cm}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{M_*}{10 M_{\odot}} \right)^{-\frac{1}{2}} (1+z) \text{ s.} \quad (1)$$

但是对于蓝超巨星, 其物质的回落吸积时标为^[20]

$$\delta t_{\gamma} \sim 1.2 \times 10^4 \left(\frac{R_*}{10^{12} \text{ cm}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{M_*}{50 M_{\odot}} \right)^{-\frac{1}{2}} (1+z) \text{ s.} \quad (2)$$

蓝超巨星的回落吸积时标与超长暴的持续爆发时标一致, 说明蓝超巨星是产生超长暴的一种可能的前身星模型^[20,45]. Wu等人^[54]提出了回落吸积(大质量恒星死亡时物质抛射然后回落到中心黑洞)和黑洞-吸积盘磁过程(Blandford-Znajek机制), 成功解释了超长暴GRB 121027A的长时间X射线明亮辐射.

Greiner等人^[40]通过对超长暴GRB 111209A的多波段数据进行分析, 发现该暴伴随着明亮的超新星爆发, 命名为SN 2011kl. 该超新星的星等为-20.0, 介于普通超新星和超亮超新星之间, 是与普通伽马暴成协超新星亮度的3倍以上, 光谱与正常伽马暴超新星有很大的差异, 但是与超亮超新星类似. 有趣的是, 该光谱中未发现 ^{56}Ni 的存在, 这一发现支持其起源于磁星, 而不支持蓝巨星和大质量黑洞潮汐瓦解的起源.

2.3 GECAM对于超长暴的观测预期

我们以超长暴GRB 130925A为例, 讨论GECAM相

对于其他望远镜(INTEGRAL, Konus-WIND, Swift/BAT, 以及Fermi/GBM)对超长暴的观测优势. GECAM包括两颗微小卫星(A星和B星), 利用全天视场对伽马暴进行监测, 在SAA区也可能开机观测, 年平均视场覆盖率大于90%全天. 另外, GECAM有较宽的能量覆盖范围(6 keV–5 MeV), 灵敏度高($\sim 2 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 在低能区(<100 keV)的探测面积比同类设备大, GECAM在低能区探测能力具有一定优势. 对伽马暴的定位能力也更强, 能够鉴别伽马暴与空间荷电粒子事件.

图4为目前运行的几个伽马射线探测器以及GECAM对GRB 130925A光变的观测. 从图4(a)可以看出, INTEGRAL和Konus-WIND的优势在于其观测不受地球遮挡的影响, 可以记录下超长暴完整的光变曲线, 然而我们可以看出其时间分辨率和灵敏度有所不足, 对于较弱的超长暴, 无法获取其光变的细节信息, 甚至无法触发该暴(如GRB 101225A). 并且INTEGRAL的观测能区都比较高(>70 keV), 可能会丢失超长暴在低能区的信息, 此外, INTEGRAL和Konus-WIND都没有定位能力. Swift/BAT和Fermi/GBM位于低地球轨道, 受地球遮挡的影响, 难以监测超长暴的完整辐射. 而GECAM结合了INTEGRAL, Konus-WIND, Swift/BAT和Fermi/GBM的观测优势, 弥补它们在超长暴观测上的不足, 拥有大视场、高灵敏度和良好定位能力等综合优势, 将使我们记录下更多暗弱超长暴完整的光变信息, 且具有较高的时间分辨率, 为后续的超长暴研究提供支持.

图 4 (a) 不同的伽马射线探测器对超长暴GRB 130925A光变曲线的观测, 取自文献[23]; (b) GECAM对超长暴GRB 130925A光变曲线的预期观测

Figure 4 (a) The light curves observation of ULGRB GRB 130925A which were detected by different gamma-ray detectors, from ref. [23]; (b) GECAM's expected light curve observation of ULGRB GRB 130925A.

图4(b)为GECAM对GRB 130925A预期观测的光变曲线, 红色的数据点为A星的观测, 蓝色的数据点为B星的观测, 重合部分为A星和B星的共同观测, A星与B星的交替观测, 使得GECAM对于伽马暴的监测可以不受地球遮挡的影响. 另外GECAM还将可能在SAA区仍然开机(在SAA区本底增强, 探测灵敏度有所下降), 以便我们获得最全的伽马暴样本.

接下来, 我们根据GECAM仪器响应矩阵模拟器和模拟的在轨本底数据, 利用Xspec去模拟超长暴GRB 130925A的能谱, 并与Fermi/GBM的观测结果进行比较. 首先我们假设超长暴GRB130925A相对于GECAM卫星的入射角度为 $\theta=30^\circ$, $\varphi=60^\circ$, 利用GECAM响应矩阵模拟器产生该入射方向的响应矩阵. 单颗GECAM卫星配置有25个GRD探头, 在上述入射角度下, 探头编号为05, 06, 01, 04, 13, 14的响应最佳, 我们模拟这6个探头产生的信号. 图5为GRB 130925A在第一个观测时期内($T_0-2\text{ s}-T_0+270\text{ s}$, T_0 为触发的时间)时间平均谱的模拟结果, 不同的颜色表示不同的探头信号. 我们假设能谱的形式为截断的幂律谱 $\propto(E/100\text{ keV})^\alpha \times \exp(-E(2+\alpha)/E_p)$, 并且这段时间内的总流量为 $8.48 \times 10^{-5}\text{ erg cm}^{-2}$. GECAM对该暴的能谱测量结果与Fermi/GBM的对比如表2所示, 对比这两个探测器对于该暴的能谱测量结果发现, GECAM对于能谱的测量误差要小于Fermi/GBM, 一定程度上说明GECAM在 $<100\text{ keV}$ 能区的观测将优于Fermi/GBM. 利用GECAM在能谱观测上的优势, 我们可以对超长暴的能谱进行细致的分析, 从而确定超长暴和普通长暴是否无差异.

2.4 GECAM对于超长暴的探测率

我们可以根据现有的Konus-WIND观测到的超长暴样本数量粗略估计GECAM对于超长暴的探测率. Konus-WIND的观测能段为 $20\text{ keV}-15\text{ MeV}$. 在过去25年的时间内, Konus-WIND给出了 ~ 120 个超长暴的候

图 5 GECAM对超长暴GRB 130925A的能谱模拟

Figure 5 The energy spectrum simulation of ULGRB GRB 130925A from GECAM.

选体, 但持续时间大于 1000 s 的爆发只有 ~ 17 个. 我们定义超长暴为持续时间大于 1000 s 的爆发, 那么对于Konus-WIND来说, 其对超长暴的探测率为每年 0.7 个. Konus-WIND的灵敏度为 $\sim 10^{-7}\text{ erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$. GECAM的观测能段为 $6\text{ keV}-5\text{ MeV}$, 与Konus-WIND的观测能段十分接近, 但是GECAM的灵敏度比Konus-WIND高约 10 倍. 这两个探测器都是全天视场进行监测, 故GECAM对于超长暴的探测率约为Konus-WIND的 30 倍, 即GECAM每年可探测到 ~ 20 个超长暴.

3 超软暴

3.1 超软暴的定义和研究现状

超软暴在本文定义为能谱偏软的伽马暴, 我们主要讨论以下两种: X射线闪(X-ray Flashes, XRFs)和富X射线伽马暴(X-ray Rich GRBs, XRRs). 20世纪90年代, 日本Ginga卫星发现部分伽马暴的能谱很软^[55]. 荷兰-意大利的BeppoSAX卫星确认了X射线闪的存

表2 超长暴GRB 130925A的测量结果

Table 2 The measurement results of ULGRB GRB 130925A

望远镜	能谱测量			能谱测量误差		
	Normalization ($\text{photon cm}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ keV}^{-1}$)	α	E_p (keV)	Normalization ($\text{photon cm}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{ keV}^{-1}$)	α	E_p (keV)
GECAM	9.37×10^{-3}	-1.65	79.63	7.54×10^{-5}	3.59×10^{-3}	0.73
Fermi/GBM	9.15×10^{-3}	-1.66	84.55	1.80×10^{-4}	1.08×10^{-2}	1.61

在^[56,57]. HETE-2本身对X射线比较灵敏, 在HETE-2卫星观测到的GRB样本中, Hard GRBs, XRRs, XRFs各占约1/3^[58]. 将GRB 980329与XRF 971019的光变进行对比, 发现XRF在伽马波段几乎没有辐射^[57], 特征光子能量等于或者小于10 keV^[59]. 针对Swift样本, 采用硬度指数 H_{25} 去区分XRF, XRR和普通伽马暴C-GRB, 具体标准为^[60]

$S(25-50 \text{ keV})/S(50-100 \text{ keV}) > 1.32$, 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.

一些研究^[60,61]通过对Swift/BAT上的伽马暴样本进行统计分析发现, XRFs/XRRs和普通的长暴没有本质差别, 只不过其表现为更小的峰值能量和更低的光度. XRFs/XRRs同样满足经典长暴的经验关系式, 并且在红移分布和宿主星系等性质上, XRFs/XRRs和普通长暴有很大的相似性, 因此, XRFs/XRRs和普通长暴很可能是同一起源. 不同的是相对于普通长暴, XRFs/XRRs更偏向于与超新星成协. 另外, XRF和XRR在标准烛光关系研究中有重要的地位^[62]. 对于XRFs和XRRs的理论解释, 可能的模型有^[61,63]:

(1) 高红移($z \sim 6-8$)的伽马暴, 峰值能量观测值会被红移到软X射线波段, 表现为XRFs或者是XRRs;

(2) 被偏轴观测的伽马暴, 看到的光子能量降低, 流量减少;

(3) “脏”(重子物质偏多)火球的伽马暴或者是“失败”的伽马暴;

(4) 结构化的喷流模型, 在核心方向观测是普通的伽马暴, 而远离核心方向表现为XRFs或者XRRs.

然而目前的观测发现XRFs和XRRs的红移普遍不高, 基本上可以排除第一种模型, 其他模型还有待讨论, 并且其他的几种模型和伽马暴的本质有着密切的联系. 对XRFs和XRRs的观测, 有助于我们去了解伽马暴的爆发机制、辐射机制、前身星模型、超新星爆发过程、宇宙恒星形成历史和伽马暴宇宙学等. 目前现有的伽马射线探测器的观测能段都比较高, Swift/BAT的观测能段为15–150 keV, 灵敏度高, 但是视场小, 其视场仅为GECAM的 $\sim 1/7$; Fermi/GBM的观测能段为8 keV–40 MeV, 但15 keV以下的探测能力不足; 而GECAM的观测能段为6 keV–5 MeV, 并且在低能区

(<100 keV)的探测能力比现有设备明显占优, 很适合探测能谱偏软的伽马暴.

3.2 GECAM对于超软暴的能谱观测

由于XRR的流量大于XRF的流量, 为了更好地讨论, 我们选择对XRR 050525A的能谱进行模拟. 与超长暴能谱模拟的方法一样, 首先假设XRR 050525A相对于GECAM的入射方向为 $\theta=30^\circ$, $\varphi=60^\circ$, 选取探头编号为05, 06, 01, 04, 13, 14的探测器进行模拟. 图6(a)¹⁾为Swift/BAT在 $T_0-0.12 \text{ s}-T_0+12.68 \text{ s}$ 的时间平均谱, 图6(b)为GECAM能谱模拟的结果, 不同的颜色表示的是不同的探头信号. 我们假设能谱的形式为截断的幂律谱 $\propto (E/50 \text{ keV})^\alpha \exp(-E(2+\alpha)/E_p)$. GECAM对于XRR 050525A的测量结果与Swift/BAT的对比如表3所示. 对比图6(a)和(b), 我们发现GECAM对于XRR 050525A能谱参数的限制比Swift/BAT更好.

3.3 GECAM对于超软暴的探测率

GECAM的探测能段为6 keV–5 MeV, 全天视场进行观测, 灵敏度为 $\sim 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 而Swift/BAT的探测能段为15–150 keV, 灵敏度为 $\sim 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 下面, 我们以Swift/BAT对伽马暴的观测数据作为基础, 对GECAM观测XRFs和XRRs的能力进行初步的估计. Bi等人^[61]基于Swift/BAT3上的大样本伽马暴数据, 对2004–2016年这12年间的1104个GRB数据进行分析, 发现其中包含81个XRFs, 540个XRRs和394个C-GRBs, 并且发现XRFs的峰值能量约为5–40 keV, XRRs的峰值能量为10–200 keV, 均在GECAM和Swift/BAT的能段观测范围附近. 所以Swift/BAT对于XRFs和XRRs的探测率分别为 ~ 7 和 ~ 45 个/年. 但Swift/BAT的视场为 $\sim 1/7$ 全天, 假设GECAM的灵敏度与Swift/BAT相当, 那么GECAM每年可以探测到 ~ 50 个XRFs和 ~ 300 个XRRs.

4 结论

超长暴和超软暴是两类特殊的伽马暴类型, 超长暴持续时间很长, 流量偏低, 超软暴能谱偏软, 流量也偏低, 受当前伽马射线探测器探测能力的限制, 我们目前所获得的超长暴和超软暴样本数量较少, 使得我们

1) <https://swift.gsfc.nasa.gov/results/batgrbcats/GRB050525A/web/GRB050525A.html>

图 6 (a) Swift/BAT对XRR 050525A的能谱观测^[1]; (b) GECAM对XRR 050525A的能谱模拟

Figure 6 (a) The energy spectrum observation of XRR 050525A from Swift/BAT^[1]; (b) the energy spectrum simulation of XRR 050525A from GECAM.

表3 超软暴XRR 050525A的测量结果

Table 3 The measurement results of USGRB XRR 050525A

望远镜	能谱测量			能谱测量误差		
	Normalization (photon cm ⁻² s ⁻¹ keV ⁻¹)	α	E_p (keV)	Normalization (photon cm ⁻² s ⁻¹ keV ⁻¹)	α	E_p (keV)
GECAM	0.27	-1.01	78.25	4.61×10^{-3}	1.08×10^{-2}	0.88
Swift/BAT	0.27	-1.02	80.40	(-0.02, +0.03)	(-0.1, +0.1)	(-2.92, +3.48)

对其研究十分受限, 其前身星起源、辐射机制等基本问题尚未有一个很明确的答案. GECAM具有全天视场、高灵敏度、良好的定位精度和宽能段覆盖的综合优势, 有利于超长暴和超软暴的观测. 对于超长暴, GECAM可以不受地球的影响, 全天检测超长暴的完整暴发, 我们期待GECAM可以记录更多和更全的伽马暴数据. 另外, 由于GECAM有更高的灵敏度, 我们期待GECAM可以获得更多更暗的超长暴数据, 从而扩大现有的超长暴样本. GECAM在低能区(<100 keV)

的灵敏度优于Fermi/GBM, 将有利于超软暴的观测. 我们利用GECAM的响应矩阵和本底数据, 使用软件Xspec对超长暴GRB 130925A和超软暴XRR 050525A进行能谱模拟, 发现GECAM可以更好地限制能谱参数. 另外我们还估计了GECAM超长暴和超软暴的探测率, 预计GECAM每年可以探测到~20个超长暴, ~50个XRFs和~300个XRRs. 我们相信和期待GECAM运行之后, 可以显著增加各类伽马暴的样本数量和质量, 促进我们进一步探索伽马暴的起源和物理本质.

参考文献

- Kumar P, Zhang B. The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets. *Phys Rep*, 2015, 561: 1–109
- Gehrels N, Ramirez-Ruiz E, Fox D B. Gamma-ray bursts in the Swift era. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2009, 47: 567–617
- Piran T. Gamma-ray bursts and the fireball model. *Phys Rep*, 1999, 314: 575–667
- Wijers R A M J, Galama T J. Physical parameters of GRB 970508 and GRB 971214 from their afterglow synchrotron emission. *Astrophys J*, 1999, 523: 177–186
- Rees M J, Mészáros P. Unsteady outflow models for cosmological gamma-ray bursts. arXiv: astro-ph/9404038
- Paczynski B, Xu G. Neutrino bursts from gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1994, 427: 708–713
- Zhang B, Zhang B. Gamma-ray burst prompt emission light curves and power density spectra in the ICMART model. *Astrophys J*, 2014, 782: 92
- 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; Levan A

- J. Swift discoveries of new populations of extremely long duration high energy transient. *J High Energy Astrophys*, 2015, 7: 44–55
- 9 Han X B, Zhang K K, Huang J, et al. GECAM satellite system design and technological characteristic (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 60: 129511 [韩兴博, 张科科, 黄佳, 等. GECAM双星总体方案及关键技术概述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 60: 129511]
- 10 Kouveliotou C, Meegan C A, Fishman G J, et al. Identification of two classes of gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1993, 413: L101
- 11 Nakar E. Short-hard gamma-ray bursts. *Phys Rep*, 2007, 442: 166–236
- 12 Berger E. Short-duration gamma-ray bursts. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2014, 52: 43–105
- 13 Maeder A, Meynet G. Rotating massive stars: From first stars to gamma ray bursts. *Rev Mod Phys*, 2012, 84: 25–63
- 14 Woosley S E. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes. *Astrophys J*, 1993, 405: 273
- 15 Woosley S E, Bloom J S. The supernova-gamma-ray burst connection. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 507–556
- 16 MacFadyen A I, Woosley S E. Collapsars: Gamma-ray bursts and explosions in “failed supernovae”. *Astrophys J*, 1999, 524: 262–289
- 17 Qin Y, Liang E W, Liang Y F, et al. A comprehensive analysis of Fermi gamma-ray burst data. III. Energy-dependent T_{90} distributions of GBM GRBs and instrumental selection effect on duration classification. *Astrophys J*, 2012, 763: 15
- 18 Zhang B, Zhang B B, Virgili F J, et al. Discerning the physical origins of cosmological gamma-ray bursts based on multiple observational criteria: The cases of $z=6.7$ GRB 080913, $z=8.2$ GRB 090423, and some short/hard GRBs. *Astrophys J*, 2009, 703: 1696–1724
- 19 Thöne C C, de Ugarte Postigo A, Fryer C L, et al. The unusual γ -ray burst GRB 101225A from a helium star/neutron star merger at redshift 0.33. *Nature*, 2011, 480: 72–74
- 20 Nakauchi D, Kashiyama K, Suwa Y, et al. Blue supergiant model for ultra-long gamma-ray burst with superluminous-supernova-like bump. *Astrophys J*, 2013, 778: 67
- 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
- 22 Stratta G, Gendre B, Atteia J L, et al. The ultra-long GRB 111209A. II. Prompt to afterglow and afterglow properties. *Astrophys J*, 2013, 779: 66
- 23 Evans P A, Willingale R, Osborne J P, et al. GRB 130925A: An ultralong gamma ray burst with a dust-echo afterglow, and implications for the origin of the ultralong GRBs. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 444: 250–267
- 24 Virgili F J, Mundell C G, Pal’shin V, et al. GRB 091024A and the nature of ultra-long gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2013, 778: 54
- 25 Gendre B, Joyce Q T, Orange N B, et al. Can we quickly flag ultra-long gamma-ray bursts? *Mon Not R Astron Soc*, 2019, 486: 2471–2476
- 26 Hou S J, Liu T, Xu R X, et al. The X-ray light curve in GRB 170714A: Evidence for a quark star? *Astrophys J*, 2018, 854: 104
- 27 van der Horst A J, Levan A J, Pooley G G, et al. Detailed afterglow modelling and host galaxy properties of the dark GRB 111215A. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 446: 4116–4125
- 28 Klebesadel R W, Laros J G, Fenimore E E. The unusual gamma-ray burst of March 4, 1984. *Bull Amer Astronom Soc*, 1984, 16: 1016
- 29 Pal’shin V, Aptekar R, Frederiks D, et al. Extremely long hard bursts observed by Konus-Wind. *AIP Conf Proc*, 2008, 1000: 117–120
- 30 Nicastro L, in ’t Zand J J M, Amati L, et al. Multiwavelength study of the very long GRB 020410. *Astron Astrophys*, 2004, 427: 445–452
- 31 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
- 32 Pal’shin V, Hurley K, Goldsten J, et al. GRB 080407: An ultra-long burst discovered by the IPN. arXiv: 1301.5203
- 33 Holland S T, Sbarufatti B, Shen R, et al. GRB 090417B and its host galaxy: A step toward an understanding of optically dark gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2010, 717: 223–234
- 34 Starling R L C, Wiersema K, Levan A J, et al. Discovery of the nearby long, soft GRB 100316D with an associated supernova. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 411: 2792–2803
- 35 Zhang B B, Burrows D N, Zhang B, et al. Unusual central engine activity in the double burst GRB 110709B. *Astrophys J*, 2012, 748: 132
- 36 Zauderer B A, Berger E, Margutti R, et al. Illuminating the darkest gamma-ray bursts with radio observations. *Astrophys J*, 2013, 767: 161
- 37 Cucchiara A, Veres P, Corsi A, et al. Happy birthday Swift: Ultra-long GRB 141121A and its broadband afterglow. *Astrophys J*, 2015, 812: 122
- 38 Frederiks D, Golenetskii S, Aptekar R, et al. GRB 161103A: An Ultra-long GRB Detected by Konus-Wind. Technical Report, GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 20141, #1. 2016, 20141
- 39 Xu M, Huang Y F. Progresses in the researches of gamma-ray bursts and their afterglows (in Chinese). *Prog Astron*, 2012, 30: 17–34 [徐明, 黄永锋. 伽马射线暴及其余辉研究进展. 天文学进展, 2012, 30: 17–34]
- 40 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

- 41 Lü H J, Zhang B, Liang E W, et al. The “amplitude” parameter of gamma-ray bursts and its implications for GRB classification. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 442: 1922–1929
- 42 Boër M, Gendre B, Stratta G. Are ultra-long gamma-ray bursts different? *Astrophys J*, 2015, 800: 16
- 43 Zhang B B, Zhang B, Murase K, et al. How long does a burst burst? *Astrophys J*, 2014, 787: 66
- 44 Gao H, Ren A B, Lei W H, et al. A further study of the t_{Burst} of GRBs: Rest-frame properties, external plateau contributions, and multiple parameter analysis. *Astrophys J*, 2017, 845: 51
- 45 Kashiyama K, Nakauchi D, Suwa Y, et al. Luminous supernova-like UV/optical/infrared transients associated with ultra-long gamma-ray bursts from metal-poor blue supergiants. *Astrophys J*, 2013, 770: 8
- 46 Metzger B D, Margalit B, Kasen D, et al. The diversity of transients from magnetar birth in core collapse supernovae. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 454: 3311–3316
- 47 Gao H, Lei W H, You Z Q, et al. The black hole central engine for ultra-long gamma-ray burst 111209A and its associated supernova 2011kl. *Astrophys J*, 2016, 826: 141
- 48 Suwa Y, Ioka K. Can gamma-ray burst jets break out the first stars? *Astrophys J*, 2011, 726: 107
- 49 Nagakura H, Suwa Y, Ioka K. Population III gamma-ray bursts and breakout criteria for accretion-powered jets. *Astrophys J*, 2012, 754: 85
- 50 MacLeod M, Goldstein J, Ramirez-Ruiz E, et al. Illuminating massive black holes with white dwarfs: Orbital dynamics and high-energy transients from tidal interactions. *Astrophys J*, 2014, 794: 9
- 51 Ioka K, Hotokezaka K, Piran T. Are ultra-long gamma-ray bursts caused by blue supergiant collapsars, newborn magnetars, or white dwarf tidal disruption events? *Astrophys J*, 2016, 833: 110
- 52 Liu T, Song C Y, Zhang B, et al. Black hole hyperaccretion inflow-outflow model. I. Long and ultra-long gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2018, 852: 20
- 53 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
- 54 Wu X F, Hou S J, Lei W H. Giant X-ray bump in GRB 121027A: Evidence for fall-back disk accretion. *Astrophys J*, 2013, 767: L36
- 55 Strohmayer T E, Fenimore E E, Murakami T, et al. X-ray spectral characteristics of *Ginga* gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1998, 500: 873–887
- 56 Heise J, in 't. Zand J, Kippen R M, et al. X-ray flashes and X-ray rich gamma ray bursts. In: Costa E, Frontera F, Hjorth J, eds. *Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era*. ESO Astrophysics Symposia (European Southern Observatory). Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. 16
- 57 Heise J. X-ray flashes and X-ray counterparts of gamma-ray bursts. In: *Gamma-Ray Burst and Afterglow Astronomy 2001: A Workshop Celebrating the First Year of the HETE Mission*. New York: American Institute of Physics, AIP Conference Proceedings, 2003. 229–236
- 58 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
- 59 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*, 2004, 602: 875–885
- 60 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
- 61 Bi X, Mao J, Liu C, et al. Statistical study of the Swift X-ray flash and X-ray rich gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 2018, 866: 97
- 62 Lamb D Q, Donaghy T Q, Graziani C. A unified jet model of X-ray flashes, X-ray-rich gamma-ray bursts, and gamma-ray bursts. I. Power-law-shaped universal and top-hat-shaped variable opening angle jet models. *Astrophys J*, 2005, 620: 355–378
- 63 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 [李兵, 孙惠, 王灵俊, 等. 特殊伽马暴及伽马暴的特殊辐射成分. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039507]

Ultra-long gamma-ray bursts and ultra-soft gamma-ray bursts

HUANG Yan^{1,2}, LUO Qi^{3,4}, ZHANG BinBin^{5,6*} & XIONG ShaoLin³

¹ Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

² Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China;

³ Particle Astrophysics Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵ School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

⁶ Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics (Nanjing University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China

Ultra-long gamma-ray bursts (ULGRBs) are special gamma-ray bursts (GRBs) lasting for several hours. However, their released energy is comparable with that of typical long GRBs. The observed flux of ULGRBs is typically low, making them hard to detect, and therefore, only a small sample of ULGRBs have been collected. Observationally, it remains a question of whether ULGRBs are a new population or just a tail distribution of long GRBs. Ultra-soft gamma-ray bursts (USGRBs) refer to another type of special GRBs with soft energy spectra. USGRBs include X-ray flashes (XRFs) and X-ray rich GRBs (XRRs). In this paper, we first review the observations and theoretical studies of ULGRBs and USGRBs and discuss their possible explosion mechanisms and progenitor models. We then consider the Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor (GECAM), which has some advantages in observing ULGRBs and USGRBs. The GECAM has a full-sky FOV, high sensitivity, good positioning accuracy, extensive energy range coverage (6 keV–5 MeV), and lower energy threshold, making it ideal to observe ULGRBs and USGRBs. Based on the provided GECAM response matrix and background simulation data, we simulate the energy spectrum of typical ULGRB (GRB 130925A) and USGRB (XRR 050525A). We then compare those spectra with those observed by Fermi/GBM and Swift/BAT. We found that the GECAM can provide a more accurate energy spectrum. Furthermore, we also discuss the detection rate of ULGRBs and USGRBs observed by GECAM. We found that GECAM should detect ~20 ULGRBs, ~50 XRFs, and ~300 XRRs per year.

gamma-ray burst, gamma-ray, sky survey, GECAM

PACS: 97.60.-s, 95.85.Pw, 95.80.+p, 95.55.Ka

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0415](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0415)