GECAM卫星有效载荷介绍

李新乔^{*}, 文向阳, 安正华, 徐岩冰, 梁晓华, 杨生, 孙希磊, 刘晓静, 高旻, 汪锦州, 张大力, 龚轲, 刘雅清, 赵小芸, 彭文溪, 朱玥, 李刚, 乔锐, 郭东亚, 廖进元, 卢红, 王辉, 李延国, 陈刚, 张帆, 熊少林

中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

^{*}联系人, E-mail: lixq@ihep.ac.cn

收稿日期: 2019-12-25; 接受日期: 2020-04-21; 网络出版日期: 2020-11-11

中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15360100, XDA15360102)资助项目

摘要 引力波暴高能电磁对应体全天监测器(Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor, GECAM)卫星旨在实现对引力波事件的高能电磁对应体的全天监测, 并监测全天的快速射电暴的高能辐射、特殊伽马暴以及磁星爆发等高能天体爆发事件, 为相关的物理研究提供能谱、光变及定位等观测数据. GECAM由两颗共轨共轭运行的卫星组成, 卫星均采用反地心指向, 实现视场的全天覆盖. 卫星有效载荷包括两种探测器: 伽马射线探测器(Gamma Ray Detector, GRD)和荷电粒子探测器(Charged Particle Detector, CPD). GRD采用溴化镧晶体匹配SiPM (Silicon PhotoMultiplier)技术探测8 keV–2 MeV的X/γ射线, 通过两颗星多探头联合探测实现对伽马暴等爆发事件的定位; CPD利用塑料闪烁体匹配SiPM技术探测300 keV–5 MeV的荷电粒子, 同GRD联合可鉴别和排除空间粒子事件. 有效载荷的载荷处理器(Electronics Box, EBOX)具有在轨触发定位能力, 将通过北斗短报文准实时下传触发时间和定位等信息, 从而引导其他望远镜进行后随观测.

关键词 引力波事件, 伽马暴, 溴化镧, SiPM, 在轨触发定位

PACS: 07.87.+v, 29.40.Gx, 07.05.Hd

1 引言

在1916年, 爱因斯坦基于广义相对论预言了引力波的存在^[1]. 引力波通过波的形式从辐射源向外传播并传输能量. 可能测到的引力波源主要来自双致密星系统(如中子星、黑洞等)的旋进或者并合、快速旋转的致密天体、超新星爆发、超大质量黑洞绕转并合以及随机的引力波背景等^[2].

2016年2月, 美国科学基金会宣布激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO)于2015年9月14日首次发现两颗黑洞并合产生的引力波信号^[3], 开启了引力波天文学时代. 目前, 引力波信号的定位依赖于其到达地面探测器网络中不同探测器的时间差, 地球尺度的限制使地面探测器网络的空间定位能力极限为~10平方度. 地面引力波探测器所能提供的典型定位误差有几百平方度^[4,5].

引用格式: 李新乔, 文向阳, 安正华, 等. GECAM卫星有效载荷介绍. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129508

Li X Q, Wen X Y, An Z H, et al. The GECAM and its payload (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 129508, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0417](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0417)

此量级的定位误差使其他波段望远镜的后随观测面临巨大困难, 而利用多个波段的望远镜对引力波事件的综合研究却是十分必要的. 根据已有研究, 双致密星并合过程不仅产生引力波, 往往还伴随着X/γ射线、软X射线、光学、射电等波段的辐射, 其中X/γ射线通常以伽马射线暴的形式出现. 对引力波的多波段联合观测当中, 除了对引力波本身的观测之外, 对伽马射线暴的观测排在了时间序列的最前端, 因此, 它可为其他波段的观测提供触发^[6]. 伽马射线暴的定位精度可达度甚至角分的量级, 这远好于地面引力波探测器网络的空间定位能力, 可以为后随观测提供更为精确的位置信息. 因此, 引力波电磁对应体的伽马射线暴探测变得非常关键.

2017年8月17日, LIGO和Virgo以及全球70多个望远镜合作组首次联合发现双中子星并合引力波(编号GW 170817)及引力波伽马暴(编号GRB 170817A), 随后又发现光学、软X射线以及射电波段的电磁对应体^[5-12]. GW 170817的观测是人类首次同时利用引力波和电磁波观测同一个天体物理过程, 这标志着多信使引力波天文学时代的到来.

各种正在运行或在研的望远镜纷纷将引力波电磁对应体的探测提升为重点科学目标. 在高能电磁对应体的探测方面, 国际上几乎所有正在运行的高能探测设备都投入了大量观测资源进行搜索研究, 包括Fermi/GBM, Swift/BAT, INTEGRAL/SPI-ACS, Konus-Wind, CALET/CGBM, AstroSAT等. 2017年我国发射的慧眼-硬X射线调制望远镜(*Insight-HXMT*)在一定程度上也具备探测搜索200 keV以上伽马能区高能电磁对应体的能力^[13]. 我国的下一代天文望远镜增强型X射线时变与偏振空间天文台(eXTP), 配置了多种探测器, 除了基于高精度测量天体的X射线能谱、时变和偏振研究极端条件下的物理过程, 也将伽马暴和引力波暴在内的各种瞬变天体活动纳入重要科学观测对象^[14-18]. 目前, Fermi空间伽马射望远镜GBM是在轨运行的空间天文卫星当中对伽马暴监测能力最强的探测器^[19], 但受地球遮挡、南大西洋异常区等影响, 其全天覆盖度较为有限.

GECAM卫星工程于2018年12月正式立项, 计划在2020年底前发射. 卫星有效载荷包含两种探测器: 伽马射线探测器(Gamma Ray Detector, GRD)和荷电粒子探测器(Charged Particle Detector, CPD). 两种探测

器的多个探头近似均匀排布于半球体表面: GRD用于探测来自不同方向的伽马射线, 探测伽马暴的能谱和通量, 并结合不同安装方向的探头对伽马暴接收度的差异实现伽马暴的定位; CPD对伽马射线不敏感, 但对空间高能带电粒子敏感, 可用于排除空间荷电粒子暴^[20]的干扰. 本文将对GECAM卫星有效载荷的探测原理和基本设计进行介绍.

2 卫星简介及载荷组成

为了保证GECAM卫星的观测时间及提高载荷的灵敏度, GECAM卫星采用高度600 km倾角29°的圆轨道. 为了消除卫星平台对视场遮挡的影响, 有效载荷位于卫星顶部. 同时由于低轨卫星的地球遮挡问题, 采用2颗相同的小卫星运行于同一轨道面内, 轨道相位相反, 同时两颗卫星均保持载荷的反地心指向, 如图1. 除了地球遮挡天区, 单星视场角约224°, 双星视场交叉覆盖区域张角约44°, 双星视场形成对全天的完整覆盖. 卫星具有在轨触发和定位以及准实时下传发布探测结果的能力, 对于全天随机发生的暂现源(如引力波高能电磁对应体、伽马暴、快速射电暴高能对应体等)具有优异的综合探测能力.

如图2和3所示, 每颗GECAM卫星的有效载荷由GRD, CPD和载荷处理器(Electronics Box, EBOX)组成. 探测器均采用模块化设计.

每颗卫星总共25个GRD模块, 均安装在卫星的穹顶舱, 每个模块均能探测从前部入射的伽马射线光子, 视场 $\sim 2\pi$ ^[21]. 25个GRD分别指向不同方向, 在立体角上基本均匀分布(面向地球的方向除外). 这样的配置不仅使每颗星能监测除地球遮挡外的所有天区, 而且对各入射方向的接收面积相当, 因此对各天区位置的灵敏度较为均匀. 最后, 利用指向不同方向的GRD通过探测器计数分布定位, 或者两颗星的时间延迟法可计算源的入射方位^[22].

每颗卫星共有8个CPD模块, 分别置于卫星表面的不同方向(朝向地球的方向除外), 其中, 6个安装于卫星的穹顶舱, 2个安装于载荷电子学舱的侧面. 它需要测量空间环境中荷电粒子的流强变化, 鉴别伽马暴与空间荷电粒子事件, 避免后者对伽马暴的混淆.

EBOX位于载荷电子学舱内, 用于采集和处理GRD和CPD数据, 实现对伽马暴的在轨触发和定位;

图 1 (a) GECAM双星在轨运行视场示意图; (b) 整星布局图

Figure 1 (a) Schematic diagram of the field of view of two satellites in orbit; (b) layout of the whole satellite.

图 2 GECAM有效载荷结构设计(a)和初样鉴定件实物照片(b)

Figure 2 GECAM payload structure design (a) and physical photos of initial sample identification parts (b).

实现数据存储、打包和传输以及跟卫星平台的交互; 提供电源等. 主结构用于安装和布置GRD和CPD探头, 并与卫星平台对接.

为满足GECAM的科学需求, 以及小卫星平台小型化设计的要求, GRD选择溴化镧(LaBr_3)^[23]匹配SiPM的方案. 而CPD则采用的是塑料闪烁体匹配SiPM的方案. 由于溴化镧晶体容易潮解, 对封装工艺

有极高要求, 在本项目之前国际上很少大规模使用.

3 伽马射线探测器

3.1 探测原理和物理设计

GRD主要功能是实现8 keV–2 MeV伽马射线探测, 测量伽马暴的光变和能谱, 对伽马暴进行定位^[21].

图 3 GECAM载荷系统框图

Figure 3 GECAM payload system block diagram.

GRD探测器设计采用溴化镧晶体耦合SiPM的方式对伽马射线进行探测, GRD的设计如图4所示, 从上到下依次为铍窗、铝晶体盒、溴化镧晶体、石英窗、SiPM和前放电路板、转接板以及电连接器. 伽马射线从铍窗入射, 作用于溴化镧晶体, 激发闪烁光透过石英窗被SiPM接收, SiPM将光信号转变为电信号后, 经前置放大器放大信号, 放大后的信号最后经过电连接器通过电缆与数据采集电路板连接, 将信号数字化后由数据获取电子学系统记录下来. GRD同时给出伽马射线的能量和时间信息, 用于物理分析.

溴化镧晶体容易潮解, 需要封装^[23]. 同时保持对低能X射线的透射率, 铍(Be)是窗材料的最佳选择. 在兼顾密闭性和机械强度的前提下, 根据铍窗厚度尽量薄的原则, 选择铍窗厚度为200 μm , 对5 keV X射线透过率>65%, 满足低能X射线探测要求.

基于国内外溴化镧具备较为成熟封装工艺的量产晶体的情况, 我们对晶体的尺寸进行了优化设计. 主要从面积和厚度两方面考虑.

在同等空间背景环境条件下, 对于同等亮度的伽马暴而言, 探头的接收总面积直接决定了灵敏度的大小. 因此, 在总的探头数量受到重量、功耗、电子学复杂度等因素制约的客观情况下, 单个探头的面积需足够大, 以确保探测器对伽马暴有足够的灵敏度. GRD最终选定的晶体直径为76 mm, 面积4536 mm^2 . 单颗卫星的GRD探头数量为25个, 较为均匀地分布于穹顶舱半球体表面, 来自任何一个方向的伽马暴, 都有10个以上探头参与定位, 以便有足够高的定位精度.

晶体的厚度设计主要从探测效率、重量、定位精

图 4 GRD单体结构设计方案示意图

Figure 4 Schematic diagram of GRD single structure design scheme.

度等方面考虑. 基于GEANT4模拟软件(<http://geant4.web.cern.ch>), 图5和6分别对比了对应单个GRD探头在典型量产溴化镧晶体厚度15和25 mm时的全能峰有效面积和典型入射角度30°情况下10 keV–3 MeV不同入射能量对应的能量响应分布. 从图中可知: (1) 两种厚度的晶体有效面积和能量响应差别不大, 尤其在科学目标最为关注的低能区. 25 mm厚的晶体相对15 mm厚的晶体能量响应探测优势不显著. (2) 对伽马暴的定位是基于不同指向探头对伽马暴光子的接收通量的差异, 通过探测器计数分布的方式得到的^[24]. 定位精度受晶体厚度影响, 尤其是对于高能伽马能区, 晶体厚度越厚, 则不同指向的探头对伽马射线的接收面积差异越小, 越不利于伽马暴的定位. 因此, 从定位能力来看, 15 mm厚的晶体更优, 且定位精度可以满足科学

图 5 单个GRD探头选择两种厚度的晶体, 不同角度入射时全能峰的Ancillary Response File (ARF). 每种颜色的ARF自上而下分别对应的入射角度从0°(垂直入射)到80°, 按5°间隔递增

Figure 5 Ancillary Response File (ARF) of all-around peak in two kinds of crystal of one GRD with different thicknesses and incident angles. The incident angle of ARF of each color is from 0° (vertical incidence) to 80° respectively from top to bottom, and increases at 5° intervals.

图 6 单个探头30°入射时的Redistribution Matrix File (RMF)

Figure 6 Redistribution Matrix File (RMF) at 30° incident for a single probe.

目标要求(见图7). (3) 对于25个GRD探头, 25 mm厚的晶体比15 mm厚的晶体重6.38 kg, 考虑到整星重量的

约束, 15 mm厚的晶体占用重量资源更少. 综上所述, GRD探头的厚度选定为15 mm.

图 7 采用软中硬三种GRB典型能谱作为输入得到的定位精度分布, 能谱定义见式(1)和表1. (a)–(c)分别对应表1中的软、中、硬三组谱指数. 每组图中, 上下图分别对应两个半天区

Figure 7 The positioning accuracy distribution obtained by using three typical energy spectra of soft, medium and hard GRB as input is shown in eq. (1) and Table 1. (a)–(c) respectively correspond to the soft, medium and hard spectral indexes in Table 1. In each group of figures, the upper and lower figures correspond to two half day areas, respectively.

$$f_{\text{Band}}(E) = A \begin{cases} \left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^{\alpha} \exp\left[-\frac{(\alpha+2)E}{E_{\text{peak}}}\right], & E < \frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{\alpha+2}, \\ \left(\frac{E}{100 \text{ keV}}\right)^{\beta} \exp(\beta-\alpha) \left[\frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{100 \text{ keV}(\alpha+2)}\right]^{\alpha-\beta}, & E \geq \frac{(\alpha-\beta)E_{\text{peak}}}{\alpha+2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, A (单位 $\text{photon cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{keV}^{-1}$)是代表幅度的参数, α 是低能段谱指数, β 是高能段谱指数, E_{peak} (单位 keV)是 νFv 峰值能量.

准直器可以排除外围弥散本底, 在特定情况下, 可以在一定程度上提高信噪比. 为此, 我们对不同张角的准直器方案进行了对比. 不同准直器视场半张角对应的本底谱如图8所示, 本底成分以弥散 X/γ 射线为主, 此外还包括大气反照 X/γ 射线、空间天体源、次级粒子、空间荷电粒子等. 从图中可以看出, 准直器张角越小本底水平越低. 但信噪比不完全取决于本底水平, 因为准直器在降低了本底水平之外, 同时使得探头对伽马暴的接收面积也减小. 我们模拟了一个典型的伽马暴来考察不同准直器视场对信噪比的影响, 其结果如表2所示. 从表2可知, 无准直器方案的信噪比是最佳的.

基于上述设计, 我们通过模拟研究了几种典型伽马暴能谱情况下的GECAM的定位能力, 结果如图7所示, 图中分别给出了三组谱指数情况下, 在载荷坐标系 $\theta \sim 45^\circ$ 和 $\theta \sim 135^\circ$, 仅有一颗星可以看到暴的情况. 相对来说这种情况比两颗星同时看到暴的定位精度差, 属保守估计. 从图7可知, GECAM对中等典型亮度伽马暴($1 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, 10 s, Band软谱)的定位精度优于 1° (1σ 统计误差, 按照单个GRD本底700 cps计算, 各入射方向取平均值). 特别地, 我们模拟了GECAM对GRB 160724444(流强 $1 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, 持续10 s)的定位情况. 该暴的基本参数由Fermi/GBM观测获得,

包括流强、爆发时间、能谱形状. 定位的 1σ 统计误差为 0.6° . 此外, 对于GRB 170817A, 我们之前对GECAM定位能力的模拟如图9所示, 从中可知, GECAM

表 1 Band软、中、硬谱的定义

Table 1 Definition of soft, medium and hard Band spectrum

Band谱	低能谱指数	高能谱指数	峰值能量 (keV)
软	-1.9	-3.7	70
中	-1.0	-2.3	230
硬	0.0	-1.5	1000

图 8 不同视场大小的准直器方案下的本底能谱, 图中不同曲线对应视场半张角(单位: 度), N对应 90° , 即无准直器

Figure 8 The background energy spectrum of collimator schemes with different field sizes, in which different curves correspond to the half opening angles of the field of view (unit: degree), N corresponds to 90° , i.e. no collimator.

表 2 典型GRB对应不同准直器视场的信噪比($\theta=30^\circ$, $\varphi=100^\circ$; $\text{nor}=0.004841$, $\text{index}=-1.454$; $\text{exp_t}=2 \text{ s}$)

Table 2 signal to noise ratio of different collimator fields of view corresponding to typical GRB ($\theta=30^\circ$, $\varphi=100^\circ$; $\text{nor}=0.004841$, $\text{index}=-1.454$; $\text{exp_t}=2 \text{ s}$)

准直器半张角 ($^\circ$)	弥散X射线本底	总本底	ARF	信噪比	备注
50	0.28	0.3137	0.3981	15.18	—
60	0.38	0.4116	0.5159	16.03	—
70	0.51	0.5327	0.6450	16.64	—
80	0.68	0.6963	0.7782	17.17	—
90	1.00	1.0000	1.0000	17.23	无准直器

图 9 GECAM(蓝色)与GBM(黑色)的定位对比, 圆点为各自的定位位置, 从内到外三个圈分别为 1σ , 2σ , 3σ 置信区间; 红五角星是GW 170817的光学对应体坐标^[24]

Figure 9 Comparison between the location capabilities of GECAM (blue) and GBM (black). For both instruments, the dots are the locations, and the three circles from inside to outside are the 1σ , 2σ , 3σ confidence intervals, respectively. The red pentagram is the optical counterpart location of GW 170817 [24].

对于此暴的能谱参数统计误差普遍好于Fermi/GBM所给出的结果^[24].

3.2 探头电子学设计

GRD探头采用的SiPM阵列通过光学胶垫与溴化镧晶体封装件的光导玻璃耦合. SiPM阵列采用TSV封装结构, 总尺寸为 $\phi 8.12$ cm, 每个小单元尺寸为 6.07 mm $\times$ 6.07 mm, 像素尺寸为 35 μ m, 填充因子为76%, 每个小单元包含22292个像素. 单位面积上的像素数为 605 个/ mm^2 , 比 2 MeV激发的100%收集的单位面积上的光子数 27 photon mm^{-2} 高一个量级, 因此不会饱和, 单一器件可实现300倍的动态范围. 其量子效率对于 380 nm波长为30%–40%, 高于传统PMT的20%–30%.

SiPM热噪声以单光子为主, 计数率在最大偏压下为 70 kHz mm^{-2} , 两英寸阵列热噪声计数率为 161 MHz, 即平均每 10 ns有 1.6 个热电子噪声. 溴化镧的衰减时间为 16 ns, 取数时间取 100 ns, 则热噪声为 16 个热电子, 远小于 5 keV所激发的 37 光电子. 因此采用并联读出方式, 将SiPM阵列合为一读出, 通过触发阈值压低热噪声, 同时, 通过温控使SiPM保持在低温(-20 ± 3)°C范围内工作, 实现对低能X射线的探测.

每个探头有64片SiPM, 为了提高探测器可靠性, SiPM分为两组独立供电. 正常情况下两组均加电工

作, 称之为全组分工作模式. 若其中半组SiPM出现故障, 将该半组SiPM供电关闭, 用另外半组进行信号收集和放大, 称之为半组分工作模式.

探测器位于卫星的表面, 温控设计只能将SiPM的温度控制在 -17°C – -23°C 范围内. SiPM的温度系数为 21.5 mV $^\circ\text{C}^{-1}$, 设计进行在轨温度修正. 通过温度传感器采集SiPM温度, 转换为数字信号反馈给供电电路调节SiPM偏压, 实现实时增益温度修正, 保持SiPM增益的稳定性. 在轨可以通过本底谱线进行增益标定.

GRD的能量测量范围的指标需求为 8 keV– 2 MeV, 电子学读出的设计目标为 5 keV– 5 MeV, 为了实现较大的动态范围, GRD前放电子学采用高低增益的读出方式对SiPM信号进行处理, 实现全能段的正常电信号读出. 高增益下读出覆盖的能量范围为 5 keV– 200 keV, 低增益下覆盖的能量范围为 50 keV– 5 MeV.

GRD的SiPM的增益约为 10^6 , 光电信号需要先经过隔直电容, 然后经过两级运放放大, 并在第二级运放分为高低增益, 信号放大后由数据获取电路对峰值信号进行ADC转换. 每级运放原理图相同, 只有反馈电阻的区别, 功耗约为 100 mW, 供电为 ± 5 V. 高低增益放大器第一级放大倍数均为1. 高增益第二级放大倍数为10, 低增益第二级放大倍数为1.

3.3 性能指标及测试情况

GRD的性能指标如表3所示. 从中可知, GRD各项指标均优于设计指标要求.

我们使用 ^{55}Fe 放射源在不同温度条件下对GRD进行了测试. 其中, 25°C 和 -25°C 温度下测试得到的 5.9 keV脉冲幅度分布如图10所示. 根据我们的实测结果, -25°C 工况下, GRD阈值设为 4.3 keV时, 噪声贡献

表 3 GRD性能参数

Table 3 GRD performance parameters

内容	指标要求	设计/实测指标
探测器	LaBr ₃ 晶体+SiPM	LaBr ₃ 晶体+SiPM
数量	≥ 20	25
探测面积(单体)	≥ 40 cm ²	45.36 cm ²
探测能区	8 keV–2 MeV	5 keV–5 MeV
能量分辨率FWHM	$<18\%$ @59.5 keV	$\leq 13\%$ @59.5 keV
伽马射线探测效率	$>50\%$ @8 keV	$\geq 70\%$ @8 keV
死时间(正常事例)	≤ 5 μ s	4 μ s

的计数率 <50 Hz, 该阈值对应 ^{55}Fe 峰位左侧 2σ 处, 对于 ^{55}Fe 净峰面积, 因阈值而损失的部分占比约2.3%.

图11给出不同温度固定偏压下SiPM输出脉冲幅度随温度的变化. 从结果看, SiPM各参数随温度变化趋势与理论预期一致, 偏压固定条件下, SiPM脉冲幅度随温度的变化具有良好的线性.

在中国计量科学研究院, 我们利用HXCF标定装置^[25]对GRD在最为关注的低能区内的能量响应进行刻度, 结果如图12所示. 可以看出, GRD的能量线性在8–160 keV范围内除吸收边处存在拐折外, 其余能区线性良好.

图13为利用HXCF和放射源对GRD能量分辨率的

实测结果. 利用能量分辨率公式 $\text{FWHM} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b$ 进行拟合, 所得参数为 $a=86.6$, $b=0.91$.

4 荷电粒子探测器

4.1 探测原理和结构组成

CPD主要功能是探测300 keV–5 MeV的空间电子, 实现空间粒子暴^[13]的鉴别. 为了满足CPD的功能需求, 采用塑料闪烁体作为探测灵敏材料、硅光电倍增管(SiPM)作为光读出器件的设计方案. CPD探测器结构示意图如图14所示, 由塑料闪烁体、包覆材料、SiPM

图10 GRD在25°C(a)和-25°C(b)温度下测试得到的5.9 keV脉冲幅度分布

Figure 10 The 5.9 keV pulse height histogram distribution of GRD measured at 25°C (a) and -25°C (b).

图11 (a) 偏压固定条件下, GRD从-40°C–30°C温度下脉冲幅度随温度的变化曲线; (b) 常温20°C下, 不同偏压条件下测得的 ^{241}Am 峰值变化. 平滑线为多项式拟合结果

Figure 11 (a) Curve of GRD pulse amplitude with temperature from -40°C to 30°C under the condition of fixed bias; (b) the change of ^{241}Am peak value measured under different bias at 20°C under normal temperature. Smooth lines are polynomial fitting results.

图 12 GRD探测器能量与能道关系, (b)和(c)为对吸收边处的精细测量结果. 红线为线性拟合结果. (a) 8–160 keV; (b) 8.3–24 keV; (c) 33.8–51.4 keV

Figure 12 The relationship between energy and energy channel of GRD detector, (b) and (c) are the fine measurement results at the absorption edge. The red lines are the results of linear fitting. (a) 8–160 keV; (b) 8.3–24 keV; (c) 33.8–51.4 keV.

阵列、前端电子学、外壳结构等组成. 根据CPD功能要求, 选用对伽马射线响应较差, 但对带电粒子的光响应较好的BC-408塑料闪烁体, 其波长特性与SiPM匹配性较好, 且对于电子有较好的光产额能量线性. 塑料

图 13 GRD在8.1 keV–1.33 MeV的能量分辨. 红线为拟合结果

Figure 13 Energy resolution of GRD at 8.1 keV–1.33 MeV. The red line is the fitting result.

图 14 CPD单体结构设计方案示意图

Figure 14 Schematic diagram of CPD single structure design scheme.

闪烁体各端面均进行抛光处理, 并包裹了Tevek反射膜以增加光收集. 塑料闪烁体的外层再包裹多层的Te-flon作为缓冲材料. 粒子入射到塑料闪烁体后产生的闪烁光被SiPM接收, SiPM将光信号转变为电信号后, 经前置放大器放大信号, 最后经过电连接器通过电缆与数据采集电路板连接, 将信号数字化后由数据获取电子学系统记录下来. CPD同时给出粒子的能量和时间信息.

参考传统的利用镶嵌放射源对探测器进行在轨标定的方法^[26,27], 为了在轨标定增益, 每个CPD探头塑料闪烁体内镶嵌²⁴¹Am源. 利用²⁴¹Am释放的 α 粒子对CPD进行在轨标定. 在塑料闪烁体中心打孔, 将镶嵌源封装

于其中. 每枚镶嵌源的尺寸为 $\phi 1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$, 活度为20–30 Bq. 镶嵌源的本底谱如图15所示. 由于GRD和CPD各探测器的相对时间精度可达 $<0.3\text{ }\mu\text{s}$, 因此, 该镶嵌源除了提供CPD标定的 α 粒子, 还可以通过时间符合的方式挑选出打在临近GRD上的59.5 keV的X射线, 结合GRD溴化铟晶体内生谱线一起, 用于GRD的在轨标定.

CPD探测器帮助区分GRD探测伽马暴和空间荷电粒子事件. 伽马射线和荷电粒子在GRD和CPD上探测效率差异很大, 因此通过GRD和CPD计数率比值, 可推断暴是由伽马射线还是荷电粒子(以电子为主)组成的. 此外CPD可监测空间环境荷电粒子流强变化, 研究GRD在轨本底.

利用GEANT4模拟软件(<http://geant4.web.cern.ch>), 我们通过模拟对CPD厚度进行优化, 分别对于三种不同厚度的塑料闪烁体对入射电子的响应进行了模拟. 能量范围200–5000 keV, 单能入射. 其能量响应结果如图16所示. 空间轨道电子符合幂指数分布, 主要成分为低能段电子, CPD的主要探测目标集中于1 MeV以下的低能段. 高能段电子在6 mm塑料闪烁体中的能量沉积大部分在1 MeV以下, 不利于1 MeV以下核心电子能区的能谱探测, 因此首先排除该方案. 相对地, 20 mm厚的塑料闪烁体对电子的探测虽然比10 mm方案更优, 但其厚度过厚, 结构上不利于装配, 并且其重量更重, 对于微小卫星来说也属不利因素. 对于10 mm

图15 CPD探头镶嵌了标定源状态下的本底谱. 高斯峰来自 ^{241}Am 源 α 粒子贡献

Figure 15 Background spectrum of CPD embedded with calibration source. The Gaussian peak comes from the contribution of α particle of ^{241}Am source.

图16 不同厚度的塑料闪烁体的电子沉积能谱, 不同颜色的曲线对应不同的电子入射能量. (a) 6 mm; (b) 10 mm; (c) 20 mm

Figure 16 Electron deposition energy spectra of plastic scintillators with different thicknesses. Different color curves correspond to different electron incident energies. (a) 6 mm; (b) 10 mm; (c) 20 mm.

厚的塑料闪烁体, 2 MeV以上高能段电子虽然多数为穿透事例, 但其能量沉积的最可几值在1.5 MeV以上, 对1 MeV以下电子核心探测能区的能谱测量影响可以忽略, 且不影响探测器对高能电子暴的鉴别能力.

综上, 10 mm厚的塑料闪烁体可以满足本项目要求. 因此, 选取10 mm作为CPD塑料闪烁体的材料厚度.

基于CPD的设计, 我们模拟了它对X/γ射线和高能电子、质子的探测效率. 如图17所示, CPD只对200 keV以上的伽马射线有较低的探测效率, 对200 keV以下的伽马射线没有响应, 而对200 keV以上的电子有较高的探测效率. 根据GRD和CPD对伽马射线和电子的探测效率的差异, 我们模拟了伽马暴和电子暴在GRD和CPD探测器上的响应, 如表4所示, 可以通过GRD和CPD的计数之比来鉴别伽马暴和电子暴. 同样的方法也可以鉴别伽马射线爆发和质子爆发, 因此, GRD和CPD目前的设计满足科学需求.

根据GRD和CPD对伽马射线和电子的响应, 我们模拟了典型持续时间(2 s和20 s)的伽马暴和电子暴. 只有当GRD探测到爆发才有必要进行鉴别, 因此我们计算了流强较弱的暴(显著性为 3σ)的情况下, GRD和CPD对伽马暴和电子暴的鉴别能力下限.

伽马暴和电子暴的能谱都使用了三种Band谱, 其由两段幂律谱光滑连接而成, 参数包括低能谱指数、高能谱指数以及峰值能量, 能谱公式如式(1), 谱指数和峰值能量见表2.

电子暴还使用了两种幂律谱, $f_{\text{PL}}(E)=AE^{\text{index}}$, 其中 A 为幅度, index为谱指数. 模拟采用了两种典型的谱指数-2和-1.

我们统计了这些爆发平均在单个GRD和单个CPD上的计数(即总计数扣除本底计数), 计算CPD/GRD计数之比及其误差, 同时计算出伽马暴在GRD上的显著性达到 3σ .

图 17 CPD对伽马射线和带电粒子的探测效率

Figure 17 Detection efficiency of CPD for gamma rays and charged particles.

表4给出了2 s暴时标下的计算结果(20 s时标下CPD/GRD计数之比与2 s时标基本相同). 表中, 由于要求GRD上的显著性都是 3σ , 本底水平固定, 故而GRD的计数对不同的入射谱均为相同值120. 从表4可知, 对于不同的能谱模型和典型的爆发持续时标, 伽马暴和电子暴产生的CPD/GRD计数比(即甄别因子)分别处于 <0.01 和 >0.2 的范围. 对于最弱的暴(3σ), 电子暴对应的CPD/GRD计数比的测量误差较大(中心值 ~ 0.3 , 误差 ~ 0.1), 但在误差涨落范围内也能甄别这两类爆发. 因此, 上述仿真结果验证了GRD和CPD联合鉴别伽马暴和荷电粒子暴的能力.

4.2 探头电子学设计

CPD所选用的SiPM型号与GRD相同. 与塑料闪烁

表 4 鉴别伽马暴和空间荷电粒子暴的方式(单个GRD: 3σ), 暴持续时间2 s

Table 4 Identify the burst mode of gamma ray bursts and space charged particles (GRD: 3σ), and the duration of the bursts is 2 s

事件	能谱	GRD计数及误差 (8–5000 keV)	CPD计数及误差 (0.3–5 MeV)	CPD/GRD计数之比 及其误差
伽马暴	Band软谱	120.0 $\pm$ 41.5	0.008 $\pm$ 5.7	0.0001 $\pm$ 0.05
	Band中谱	120.0 $\pm$ 41.5	0.06 $\pm$ 5.7	0.0005 $\pm$ 0.05
	Band硬谱	120.0 $\pm$ 41.5	1.1 $\pm$ 5.8	0.0090 $\pm$ 0.05
空间荷电粒子事件 (电子)	Band软谱	120.0 $\pm$ 41.5	32.5 $\pm$ 8.0	0.27 $\pm$ 0.12
	Band中谱	120.0 $\pm$ 41.5	35.5 $\pm$ 8.2	0.30 $\pm$ 0.12
	Band硬谱	120.0 $\pm$ 41.5	43.3 $\pm$ 8.7	0.36 $\pm$ 0.14
	幂率谱指数-1	120.0 $\pm$ 41.5	48.6 $\pm$ 9.0	0.40 $\pm$ 0.16
	幂率谱指数-2	120.0 $\pm$ 41.5	37.5 $\pm$ 8.3	0.31 $\pm$ 0.13

体匹配的SiPM阵列呈正方形,由6×6的SiPM单元组成,总尺寸为40 mm×40 mm. 每个SiPM单元尺寸为6.07 mm×6.07 mm,像素尺寸为35 μm . 36路SiPM单元采用并联方式合为一路线读出,通过触发阈值压低热噪声,实现对带电粒子的探测. SiPM与塑料闪烁体通过光学耦合胶/硅胶垫耦合在一起,光学耦合胶除了增加光收集效率以外,也可以起减震的作用.

CPD每个探头有36路SiPM,为了提高探测器的可靠性,和GRD类似,CPD的SiPM也进行了分组设计,正常情况下以全组分模式工作,其中半组分故障时,用另外的半组分工作.

CPD的前端电子学与GRD类似,包括了温度传感器、前端放大电路. 由于CPD动态范围较小,只用了一级运放进行信号放大. 探测器位于卫星的表面,外边只有星衣及温控,使得SiPM在 $(-20\pm3)^{\circ}\text{C}$ 范围内工作. SiPM的温漂系数在3%/ $^{\circ}\text{C}$ 左右,温度变化达到30 $^{\circ}\text{C}$ 时将导致增益增大1倍,因此需要做温度修正. CPD温度修正的方式与GRD相同:通过温度传感器采集SiPM温度,转换为数字信号反馈给供电电路调节SiPM偏压,实现实时增益温度修正,从而在环境温度变化时对增益进行补偿,降低由于SiPM温度导致的增益变化. 前置放大器用于将SiPM的信号放大成形. CPD探头通过一个电连接器与后端电子学相连. 塑料闪烁体、SiPM以及前端电路部分密封在铝制外壳中,以便与载荷主体结构进行连接固定,同时屏蔽弥散本底.

4.3 性能指标及测试情况

CPD的性能指标如表5所示. 从中可知, CPD各指

表 5 CPD性能指标

Table 5 Performance indexes of CPD

内容	指标要求	设计/实测指标
探测器	塑料闪烁体+SiPM	塑料闪烁体+SiPM
数量	≥ 5	8
塑闪单体尺寸	$\geq 15 \text{ cm}^2$	16 cm^2
探测能区	300 keV–5 MeV	270 keV–5 MeV
伽马射线探测效率	$<20\% @ 8\text{--}2000 \text{ keV}$	$<7\% @ \text{全能区}$
死时间	$\leq 5 \mu\text{s}$	3 μs

标均优于设计指标要求.

我们分别利用 ^{207}Bi 电子源和 ^{137}Cs 伽马源对CPD在 -20°C 正常工作温度下的性能进行了测试,其测试能谱如图18所示. 从图中可以看出, -20°C 的低温使得CPD的热噪声得到较好抑制,其可以探测电子的能量下限在约220 keV,满足300 keV的能区下限需求. 另外,CPD对伽马射线不敏感,所以 ^{137}Cs 测试能谱中662 keV处无全能峰. 测试结果符合设计预期,性能指标满足设计指标要求.

5 总体电子学设计

探头的信号处理与卫星通信等功能由载荷电子学舱内的EBOX实现,框图连接如图19所示. EBOX负责25路GRD和8路CPD探测器的信号采集、控制、在线处理,与卫星平台的通信以及二次电源的供配电等功能. EBOX由5块相同的数据采集电路板、数据管理电路板和二次电源板构成.

图 18 CPD测试 ^{207}Bi 电子源和 ^{137}Cs 伽马源的能谱. (a) ^{207}Bi ; (b) ^{137}Cs

Figure 18 Energy spectrum of ^{207}Bi electron source and ^{137}Cs gamma source measured by CPD. (a) ^{207}Bi ; (b) ^{137}Cs .

图 19 GECAM 载荷电连接框图

Figure 19 GECAM payload electrical connection diagram.

二次电源电路把卫星平台提供的一次电源通过 DC-DC (Direct Current) 转换成多种电源. 数据管理电路采用冷备份设计, 通过内部的数据接口和控制接口与采集板采集通信. 每一块数据采集板(数采板)采集 5 个 GRD 探测器和 2 个 CPD 探测器的信号(有的数采板只有 1 个 CPD).

每一路探测器 SiPM 的输出信号时间特性是 $t_r=200\text{ ns}$, $t_f=2.2\text{ }\mu\text{s}$ 的正极性信号, 都通过 40 MHz 高速 ADC 进行脉冲幅度提取, 脉冲幅度和时间信息逐事例保存. GRD 的设计能段为 5 keV–5 MeV, 覆盖 3 个数量级. 为了获得足够的信噪比同时兼顾大动态范围要求, 设计分割为两个量程分别进行采集, 高增益能区范围为 5–200 keV, 低增益能区范围为 50 keV–5 MeV. CPD 的设计能段为 300 keV–5 MeV, 只覆盖 1 个数量级, 因此只设计了一路信号通道, 覆盖全能区. 保存的物理事例打包发送到后端的数据管理板. GRD 探测器和 CPD 探测器内部的温度探头由 FPGA 采集, 发送到数据管理板, 数据管理板根据温度参数发送指令, 控制数据采集电路板上的 DAC 调节 SiPM 的偏压, 实现 SiPM 增益的温度补偿.

一颗星的探测器使用 5 块数采板采集数据, 1 块数采板接 5 个 GRD 和 1–2 个 CPD. 由于数采板的数据传输能力有限, 当遇到强伽马暴时, 若某一个数采板连接的探头总计数率超过数采板的数据传输能力, 就会导致数据丢弃. 为了充分利用 5 块数采板的数据传输能力, 希望每块数采板的 5 个 GRD 在天图的指向位置尽量分散. 当天图上某个位置发生强伽马暴时, 计数率较高的几个 GRD 探头会分散在不同的数采板上, 使得各数采板的计数率差距不大, 数据传输能力得到充分的利用. CPD 探头主要测量带电粒子, 对伽马暴不敏感, 但也尽量避免同一方向的 CPD 位于同一块数采板. 数采板与探头的对应关系如表 6. 不同数采板对应的各个 GRD 和 CPD 探头的天图朝向如图 20. 基于该设计, 我们对数采板的传输能力进行了估计, 可以满足目前最高亮度的伽马暴对应的数据传输.

数据管理电路通过 RS422 电平, 波特率 57600 bps, 给数据采集电路发送参数调整、指令等信息, 5 个采集板共用; 内部 LVDS 数据接口 1–5 为串行接口, 每路由 CLK, DATA 2 个信号组成, 用于数据采集电路向数据管理电路发送科学数据和工程数据; PPS 秒脉冲为

表 6 各数采板对应的GRD探头和CPD探头分组情况

Table 6 Grouping of GRD and CPD corresponding to each data acquisition board

数采板编号	GRD分组					CPD分组	
1	1	9	11	14	16	AC03	AC05
2	2	6	13	20	25	AC01	AC04
3	3	7	12	18	23	AC02	AC06
4	4	15	17	19	22	AC07	—
5	5	8	10	21	24	AC08	—

图 20 各个GRD和CPD探头的天图朝向, 不同颜色对应不同数采板

Figure 20 The sky map orientation of each GRD and CPD, different colors correspond to different data acquisition boards.

RS422电平.

数据管理电路除了负责数据采集电路和卫星平台之间的通信, 指令和数据的接收、处理和发送等常规功能之外, 还通过单片机实现在轨触发和定位的功能: 统计各探测器在不同时标和能量范围的计数率, 判断是否大于触发阈值, 若触发则进行在轨定位计算, 生成触发定位数据, 通过CAN总线发送到卫星平台. CAN总线为双路, 波特率500 kbps. 通过内部LVDS数据接口获得数据采集电路的物理事例数据, 进行打包处理, 通过卫星平台LVDS数据接口按照约定的数据帧格式发送给卫星平台. 卫星平台LVDS为双路、串行接口, 每路由CLK, DATA, GATE 3个信号组成. PPS秒脉冲为RS422电平. 每次触发最长在~200 s之内完成星上处理, 触发时间、定位和能谱等触发定位数据通过~31条北斗短报文准实时下传到地面. 大约50%的触发定位数据可以在5 min以内下传, 其他触发数据能够在20–60 min以内下传, 用于及时发布并引导后随观测.

GECAM有效载荷入轨后, 在正常工作状态下, 持

续加电工作, 分为两种工作模式: 逐事例探测模式和异常区探测模式.

逐事例探测模式: 在南大西洋异常区之外区域, GRD和CPD以逐事例模式工作, 记录每个入射事例的能量和时间信息(即事例数据)、时间并道和能谱并道数据, 进行在轨触发.

异常区探测模式: 在南大西洋异常区, 有效载荷切换为异常区工作模式, 仅记录GRD和CPD的时间并道和能谱并道数据, 不进行在轨触发. 进出异常区的信息由卫星平台传给载荷数管, 并且异常区范围可通过上注更新.

6 讨论和总结

GECAM卫星有效载荷首次大规模采用了溴化镧晶体匹配SiPM技术用于空间天文卫星的主探测器, 以实现伽马暴的高性能探测. 针对溴化镧晶体易潮解的特点, 我们对其封装工艺进行了关键技术攻关, 已

通过了力、热、噪声、辐照、湿度等环境试验的验证, 并经过了初样鉴定件组件级和系统级试验考核。

对于SiPM温度敏感问题, 我们采用了温控结合温度增益补偿双重措施来解决, 温控可使探测器工作在 $(-20\pm 3)^{\circ}\text{C}$, 其热噪声保持在较低水平, GRD能量下阈可达4.3 keV, 自动增益补偿可以使得探测器的增益保持稳定。

在初样阶段, 我们对GRD和CPD的性能进行了详细测试, 测试结果表明, GRD能量范围可覆盖5 keV–5 MeV, CPD能量范围可覆盖270 keV–5 MeV, GRD能量分辨率优于13%@59.5 keV, GRD探测效率 $\geq 70\%$ @8 keV, CPD对伽马射线的探测效率 $< 7\%$ @全能区, 两种探测器死时间皆为3 μs , 各项指标均优于设计指标要求。

此外, 基于可靠性考虑, 对探测器的SiPM进行了分组设计, 每个探头的SiPM均分为可独立加电的两

组; 并且探头数量做了冗余设计, 每颗卫星上GRD和CPD的冗余数量分别为5个和3个。

探测器在轨标定基于溴化镧晶体内生谱线、塑料闪烁体镶嵌源、正负电子湮灭线以及已知天体源的特征线等来实现。

GECAM卫星有效载荷针对高能暂现源的特点进行了专门设计, 具有能区范围宽、灵敏度高、全时全天覆盖、能够鉴别和排除空间粒子暴等特点。通过北斗短报文, 有超过50%的伽马暴都可以在5 min以内下传触发时间、定位和能谱等信息, 其他触发能够在60 min以内下传。接收到短报文信息后对外发布时间小于10 min。典型定位精度为 1° , 可以很好地引导后随观测。

GECAM卫星通过与LIGO (Advanced LIGO)、Virgo和KAGRA等引力波探测相结合, 有望发现更大样本与双致密天体并合所产生的引力波成协的高能电磁对应体, 探索和研究致密天体并合过程中的物理问题。

致谢 感谢张双南、卢方军、徐玉朋、王焕玉、刘聪展、何会林、董永伟、刘志东、田宗军、吴金杰、陈晓敏、朱光武、沈理达、邱明波、张飞、孟斌、文星、李陆、王于仁、侯懂杰、张承模、杨家卫、张爱梅、李正伟、张翼飞, 及GECAM卫星工程两总和各级领导: 王赤、吴季、孟新、荆涛、耿浩、林柯妍、余金培、张科科、黄佳、陈友梅、韩兴博、杨勇、王建平等同志在本项目立项和研制过程中给予的支持和帮助。感谢北京玻璃研究院在GRD探测器溴化镧晶体封装件生产和供货方面给予的支持。感谢西北稀有金属材料研究院在铍片供应方面给予的支持。感谢山东航天电子技术研究所在探测器工程化、集成测试、试验等方面给予的支持。

参考文献

- 1 Abramovici A, Althouse W E, Drever R W P, et al. LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory. *Science*, 1992, 256: 325–333
- 2 Shapiro S L, Teukolsky S A, Lightman A P. Black holes, white dwarfs, and neutron stars: The physics of compact objects. *Phys Today*, 1983, 36: 89–90
- 3 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102, arXiv: [1602.03837](#)
- 4 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170814: A three-detector observation of gravitational waves from a binary black hole coalescence. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 141101, arXiv: [1709.09660](#)
- 5 Abbott B P, et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW 170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys Rev Lett*, 2017, 119: 161101, arXiv: [1710.05832](#)
- 6 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW 170817 and GRB 170817A. *Astrophys J*, 2017, 848: L13, arXiv: [1710.05834](#)
- 7 Kochanek C S, Piran T. Gravitational waves and gamma-ray bursts. *Astrophys J*, 1993, 417: L17, arXiv: [astro-ph/9305015](#)
- 8 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger. *Astrophys J*, 2017, 848: L12, arXiv: [1710.05833](#)
- 9 D’Avanzol P, Campana S, Salafia O S, et al. The evolution of the X-ray afterglow emission of GW 170817/GRB 170817A in XMM-Newton observations. arXiv: [1801.06164v2](#)

- 10 Murguia-Berthier A, Ramirez-Ruiz E, Kilpatrick C D, et al. A neutron star binary merger model for GW170817/GRB 170817A/SSS17a. *Astrophys J*, 2017, 848: L34, arXiv: [1710.05453](#)
- 11 Ruan J J, Nynka M, Haggard D, et al. Brightening X-ray emission from GW170817/GRB 170817A: Further evidence for an outflow. *Astrophys J*, 2018, 853: L4, arXiv: [1712.02809](#)
- 12 Li T P, et al. (The *Insight*-HXMT team). *Insight*-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW 170817. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 031011, arXiv: [1710.06065](#)
- 13 Li T P. HXMT: A Chinese high-energy astrophysics mission. *Nucl Phys B-Proc Suppl*, 2007, 166: 131–139
- 14 Zhang S N, Santangelo A, Feroci M, et al. The enhanced X-ray timing and polarimetry mission—eXTP. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 029502, arXiv: [1812.04020](#)
- 15 Watts A L, Yu W F, Poutanen J, et al. Dense matter with eXTP. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 029503, arXiv: [1812.04021](#)
- 16 Rosa A D, Uttley P, Gou L J, et al. Accretion in strong field gravity with eXTP. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 029504, arXiv: [1812.04022](#)
- 17 Santangelo A, Zane S, Feng H, et al. Physics and astrophysics of strong magnetic field systems with eXTP. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 029505, arXiv: [1812.04460](#)
- 18 in 't Zand J J M, Bozzo E, Qu J L, et al. Observatory science with eXTP. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 029506, arXiv: [1812.04023](#)
- 19 Meegan C, Lichti G, Bhat P N, et al. The Fermi gamma-ray burst monitor. *Astrophys J*, 2009, 702: 791–804, arXiv: [0908.0450](#)
- 20 Tsurutani B T, Lakhina G S, Verkhoglyadova O P. Energetic electron (>10 keV) microburst precipitation, ~ 5 – 15 s X-ray pulsations, chorus, and wave-particle interactions: A review. *J Geophys Res Space Phys*, 2013, 118: 2296–2312
- 21 Zhang D, Li X, Xiong S, et al. Energy response of GECAM gamma-ray detector based on $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ and SiPM array. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2019, 921: 8–13
- 22 Simo A-L. Hybrid positioning algorithms. In: Proceedings of the Digest of TISE Seminar. Institute of Mathematics, Tampere University of Technology, 2006. 43–46
- 23 Milbrath B D, Choate B J, Fast J E, et al. Comparison of $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ and NaI(Tl) scintillators for radio-isotope identification devices. In: Proceedings of the IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Fajardo, 2005. 283–287
- 24 Liao J-Y, Luo Q, Zhu Y, et al. The localization method of GECAM and simulation analysis (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 129510 [廖进元, 罗琦, 朱玥, 等. GECAM定位方法及模拟分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 129510]
- 25 Zhou X, Li X Q, Xie Y N, et al. Introduction to a calibration facility for hard X-ray detectors. *Exp Astron*, 2014, 38: 433–441
- 26 Manzo G, Giarrusso S, Santangelo A, et al. The high pressure gas scintillation proportional counter on-board the BeppoSAX X-ray astronomy satellite. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1997, 122: 341–356
- 27 Liu C Z, Zhang Y F, Li X, et al. Instrumentation and methods for astrophysics. arXiv: [1910.04955](#)

The GECAM and its payload

LI XinQiao^{*}, WEN XiangYang, AN ZhengHua, XU YanBing, LIANG XiaoHua, YANG Sheng, SUN XiLei, LIU XiaoJing, GAO Min, WANG JinZhou, ZHANG DaLi, GONG Ke, LIU YaQing, ZHAO XiaoYun, PENG WenXi, ZHU Yue, LI Gang, QIAO Rui, GUO DongYa, LIAO JinYuan, LU Hong, WANG Hui, LI YanGuo, CHEN Gang, ZHANG Fan & XIONG ShaoLin

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The Gravitational wave high-energy Electromagnetic Counterpart All-sky Monitor (GECAM) monitors gamma-ray bursts (GRBs) coincident with gravitational wave events over the whole sky. It also monitors other burst events, such as the high-energy radiation of fast radio bursts, various GRBs, and magnetar bursts. GECAM can measure the energy spectra, light curves, and location of all kinds of bursts. GECAM consists of two small satellites which operate in the same low earth orbit but in opposite geocentric directions. To obtain an all-sky field of view, the two satellites operate in opposite orbital phases. The GECAM payload includes two kinds of detectors: charged particle detector (CPD) and gamma-ray detector (GRD). Each GRD module consists of a $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ scintillator and a SiPM array, and its gamma-ray detection range is 5 keV–5 MeV. GECAM retrieves the locations of events such as GRBs through analyzing the data of the multiple GRDs on both satellites. Meanwhile, the CPD consists of a plastic scintillator and a SiPM array that detects charged particles of energies from 300 keV to 5 MeV. The GECAM distinguishes the charged particle burst events in space by jointly analyzing the GRD and CPD data. The payload electronic box (EBOX) provides in-flight trigger and burst localization. The trigger and burst location data are transmitted by a BeiDou Short Message system, which allows GECAM to guide other telescopes to do follow-up observations.

gravitational wave events, gamma ray burst, $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$, SiPM, in-flight trigger

PACS: 07.87.+v, 29.40.Gx, 07.05.Hd

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0417](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0417)