

基于 GAGG 闪烁体探测器卫星小载荷的组装与测试

江汶阳^{1,2)} 赵益巍^{1,2)} 祁欣睿^{1,2)} 江建勇¹⁾ 张丰收¹⁾ 刘圆圆^{1)†}

(1)北京师范大学核科学与技术学院,射线束技术教育部重点实验室,100875,北京;

2)北京师范大学物理学系,100875,北京)

摘要 介绍北京师范大学天格计划团队研制的以 Cerium-doped Gadolinium Aluminum Gallium Garnet (GAGG)闪烁体探测器为核心的卫星小载荷(BNU-120)的组装与测试工作. 组装中,4个GAGG晶体(每个3.8 cm×3.8 cm×1.0 cm)通过硅胶与64个SiPM(Silicon Photomultiplier, Sensl MicroFJ-60035-TSV)耦合. 实验在15~1330 keV范围内标定和测试了温度和偏压对探测器信号幅度的影响、探测器的能量与道址关系、探测器的能量分辨率与能量的关系,以及探测器的探测效率与能量的关系. 标定测试结果与天格计划团队先期研发载荷标定数据一致,且探测器探测效率实验测量数据与基于Geant4的蒙特卡罗模拟数据相符. 标定数据将用于未来BNU-120发射后在轨探测数据的修正.

关键词 GAGG; γ 射线探测; 天格计划; 卫星载荷

中图分类号 TL812+.1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022131

0 引言

物质与能量引起的时空曲率的变化以波形式的传播被称为引力波^[1]. 在引力波被观测以前,人们获取遥远天体信息的方式都是对来自宇宙的电磁波进行观测. 2015年,美国LIGO团队首次观测到了引力波事件GW150914^[2]; 2017年,该团队与欧洲Virgo团队观测到来自2个中子星合并的引力波事件GW170817^[3-4]; 2019年,2个团队观测到引力波事件GW190521,并发现了第一颗中等质量黑洞^[5]. 引力波的成功探测为天文学的观测方式开启了一扇新的窗口^[6-8]. 不同于天文学传统观测方式观测到的电磁波信息,引力波信息能直接反映致密星体的质量、自旋和距离信息,而此前的电磁波观测方式对于此类信息的获取难度非常大.

在国内,也有针对引力波暴的观测项目. 引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)卫星工程是中国科学院高能物理研究所等单位研制的空间伽马暴探测卫星^[9],其科学目的是对引力波伽马暴等高能辐射现象进行观测. 该项目已于2020年12月发射了2颗GECAM卫星,每个卫星上搭载有25个伽马射线探测器和8个荷电粒子探测器^[10],这2种探测器均为闪烁体探测器,并且均使用Silicon Photomultiplier(SiPM)阵列作为光电器件,以期得到更高的探测效率.

引力波的成功观测吸引了世界各国科研工作者

的关注,也引发了世界各地学生的好奇与向往. 鉴于引力波探测具有一定的教育意义,2016年,清华大学发起了一个以培养本科生为目的的天文科学观测联盟项目——天格计划(Gamma Ray Integrated Detectors, GRID),联盟成员包括北京师范大学、南京大学、四川大学、中科院高能物理研究所等多所高校和研究院. 项目计划发射24颗立方星组成空间分布式伽马射线暴探测网,其科学目标是观测宇宙中由天体合并所产生的伽马暴,并实现对发生合并的天体的定位,在此基础上根据观测数据开展天体物理方面的科学研究. 目前,天格计划已有多颗卫星成功完成各项在轨调试,顺利开始空间科学观测,对伽马射线暴、太阳活动、脉冲星和空间辐射损伤等进行持续在轨观测与分析. 目前,天格计划团队已完成天格01载荷^[11]、天格02载荷^[12-15]、天格03载荷、天格03B载荷以及天格04载荷的研制与发射,并已成功观测到数次具有一定研究价值的伽马暴事件.

本文将详细介绍北京师范大学天格计划团队研制的第一颗卫星载荷(命名为“BNU-120”)的组装与标定工作. 该载荷的核心是一台基于Cerium-doped Gadolinium Aluminum Gallium Garnet(GAGG)闪烁体探测器^[16]和SiPM光电倍增器件^[17-18]的高灵敏度伽马射线探测设备.

† 通信作者:刘圆圆(1983—),女,教授,博士.研究方向:核科学与技术. E-mail: yyluo@bnu.edu.cn

收稿日期:2022-04-29

1 探测器的组装与标定

1.1 BNU-120 的结构 载荷的结构如图 1. BNU-120 载荷的核心是一台伽马射线探测器. 该探测器包含 2×2 个伽马射线探测单元, 每个单元包含 1 块 $3.8 \text{ cm} \times 3.8 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ 的 GAGG 闪烁晶体, 1 个 4×4 的 SiPM (SensL, MicroFJ-60035-TSV) 阵列与每块晶体耦合. 每个检测单元连接一个独立的信号读出. 整个载荷的有效探测面积约为 58 cm^2 .

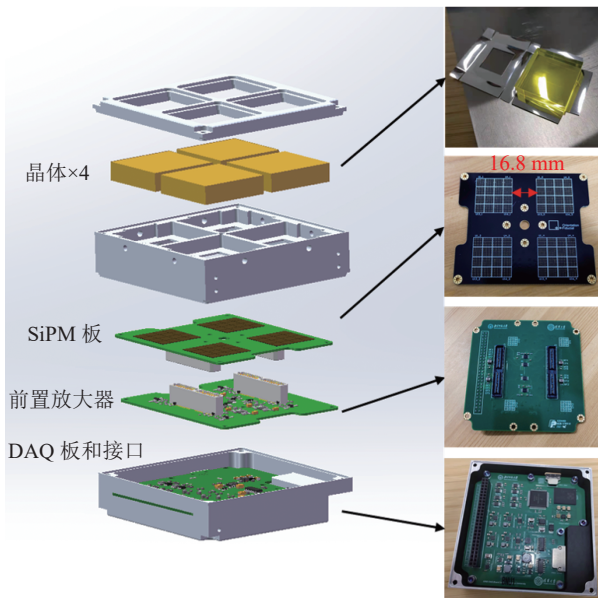


图 1 BNU-120 的载荷结构示意图

载荷整体分为 3 部分: 第 1 部分是顶盖, 外层星衣嵌在上面; 第 2 部分包含包裹了内层星衣与镜面反射膜 (enhanced specular reflector, ESR) 的 4 块晶体、SiPM、前置放大器; 第 3 部分是与 data acquisition (DAQ) board 相连的底盖. 整体组装探测器前, 先对晶体包裹 ESR 膜与内层星衣, 接着依次组装 3 个部分. 最后将这 3 个部分通过螺丝拧在一起. 其中晶体与 SiPM 之间有一层光耦合膜, 在整体组装时进行粘贴.

外层星衣的主要成分是铝箔和黄色有机物, 内层星衣是和晶体紧密接触的 6 层铝膜 (图 2-b). 外层星衣和内层星衣同时起到遮光作用. γ 射线射入时, 会依次通过外层星衣与内层星衣, 与晶体作用产生光子, 光子被 SiPM 收集, 产生的电信号通过前置放大器运算放大传输到 DAQ. 模拟信号通过 DAQ 上的 analog to digital converter (ADC) 转化为数字信号后被 micro-controller unit (MCU) 处理成为一个事件. 事件被发送回地面后, 就可探测到一个有效事件.

值得注意的是, 当 γ 射线与晶体发生相互作用时, 产生的光子会朝着四面八方射出, 为了让这些光

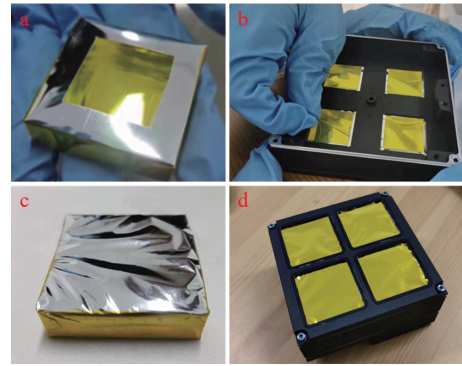


图 2 载荷组装过程实物
a. 包裹好 ESR 膜的晶体; b. 包裹好内层星衣的晶体; c. 组装过程中粘贴光耦合膜; d. 组装好的探测器.

图 2 载荷组装过程实物

子被晶体下方的 SiPM 尽可能多地接收, 需要在晶体表面贴上一层 ESR 膜, 只在面向 SiPM 的方向留出一个正方形窗口 (图 2-a). 这样, 无论 γ 射线最初产生的光子是什么方向, 都会被 ESR 膜不断反射, 直到被 SiPM 收集. 此外, 在窗口和 SiPM 之间利用光耦合膜 (图 2-c) 减少光子在 SiPM 和晶体交界面上的反射^[19].

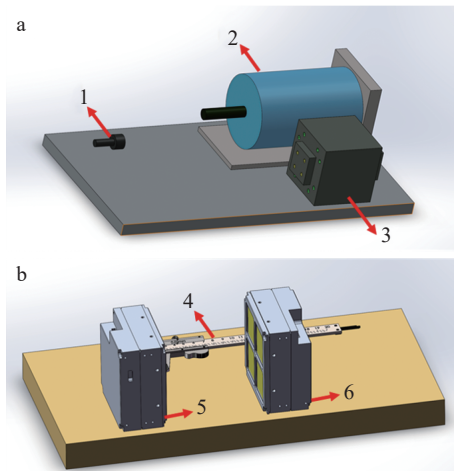
1.2 载荷的标定 完成载荷组装后, 需要对载荷的性能进行标定. 标定的主要内容包括温度和偏压对探测器信号幅度的影响、探测器的能量与道址关系、探测器的能量分辨率与能量的关系, 以及探测器的探测效率与能量的关系^[20].

1.2.1 温度偏压标定实验 探测器使用 SiPM 将闪烁体的闪烁光子转换成电路中的载流子并进行倍增, 使光信号转换成电信号. SiPM 的增益会受到温度和偏压的影响. 在探测器发射进入轨道的过程中, 温度会发生较大变化. 同时, 温度的变化对 GAGG 闪烁体光产额发生变化^[21]. 因此, 即便是相同的能量射线, 在不同温度和不同偏压下, 所得到的信号幅度并不一定相同, 需要借助温度偏压标定实验, 对探测器所测得的数据进行修正, 使数据在某一特定温度和偏压条件下进行讨论.

温度偏压响应标定实验时将探测器与放射源一起放入恒温箱中, 其中放射源放在一个备用探测器外壳中进行固定. 设置恒温箱不同的温度值, 以及 SiPM 的不同偏压值, 得到不同温度和偏压条件下的探测器测量放射源得到的信号幅度谱. 将获得的数据进行分析, 通过拟合得到探测器的温度偏压响应规律.

1.2.2 能量道址标定实验 载荷的能量道址标定实验分为放射源标定与 X 光机标定 2 个实验, 分别标定载荷的中高能区与低能区, 标定实验环境示意图如图 3.

1) 放射源标定实验. 在放射源标定实验中可以得到探测器的能量道址关系和相应能量下的能量分辨率. 标定实验中使用了 ^{241}Am 、 ^{22}Na 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 这 4 种



a. 能量标定时的实验环境示意; b. 豁免源标定实验环境示意。
1. 可移动的 X 射线源; 2. 高纯锗探测器; 3. 装有载荷的工件;
4. 游标卡尺; 5. 装有豁免源的载荷外壳; 6. 被标定载荷。
图中忽略了次要结构、电源线、计算机以及屏蔽用的铅块。该图基于天格计划联盟数据完成绘制。

图 3 能量道址标定实验环境示意

放射源。实验中, 放射源放置在一个备用探测器外壳中固定(图 3-b), 利用游标卡尺将 2 台探测器外壳以适当距离间隔, 同时在放有探测器的一侧围绕一圈铅块进行屏蔽。每种放射源的标定实验均先将探测器在不放置放射源的情况下开机数分钟, 时间与放置放射源标定时间等同, 记录下来的数据作为环境本底在最后的能量数据中扣除。

标定实验采用的各放射源产生的 γ 射线能量如表 1 所示。其中 ^{22}Na 采用了衰变产生的正电子湮没后产生的 γ 光子能量, 而非其衰变放出的 γ 射线能量。 ^{60}Co 衰变会得到能量为 1173.228 和 1332.492 keV 的 2 种 γ 射线, 由于康普顿效应, 后者会产生低于自身能量的射线, 在能谱上形成一个康普顿坪, 对 1173.228 keV 的峰形有一定影响, 遂在标定时选择能量为 1332.492 keV 的 γ 射线。

表 1 BNU-120 标定使用的放射源

| 放射源 | 标定采用的 γ 射线能量/keV |
|-------------------|-------------------------|
| ^{241}Am | 59.5409 |
| ^{22}Na | 511.004 |
| ^{137}Cs | 661.657 |
| ^{60}Co | 1332.492 |

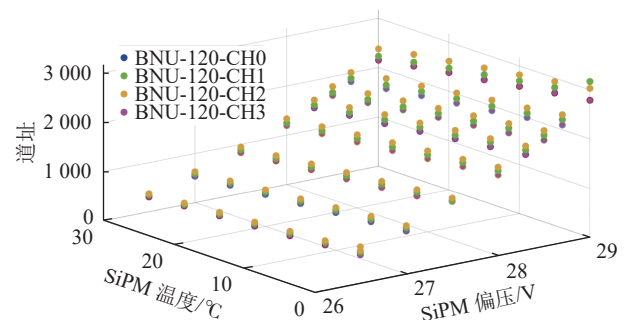
2) X 光机标定实验。为了覆盖更多的能量区间, X 光机标定实验对放射源标定实验进行了补充。考虑到使用的 GAGG 晶体存在能量为 50.2 keV 的特征吸收边, 在吸收边附近探测器的各性能会存在突变, 所以 BNU-120 探测器在 X 光机标定实验中选取的能量

点分别为 12.0、15.0、22.0、29.0、35.0、40.0、45.0、47.1、49.1、51.1、53.1、55.1、64.8、74.8、79.9、90.1、99.9 keV。

X 光机标定实验是在中国计量科学研究院实验室进行的。用到的设备包括探测器、探测器屏蔽工件、X 光机、已标定的高纯锗探测器、数控可移动机械平台、线性电源、电脑、连接线等。在实验过程中, 移动 X 射线源对准载荷 4 个晶体(对应图 3-a 中工件中心 4 个黄色圆孔), 分别进行能量标定。在后续的数据处理中, 其他没有被对准的单个晶体的对应通道探测到的能量均可以作为所标定通道的本底被扣除^[22]。

2 探测器标定结果

2.1 温度偏压标定结果 实验中, 选取不同的温度和偏压, 得到 4 个通道偏压(x)、温度(y)和增益(z)的三维空间散点图(图 4), 每个数据点代表某一偏压和温度对应的多道道址。从图 4 中可以看出数据成曲面分布, 在同一偏压下, 不同的温度与增益成线性变化, 可采用插值法得到响应函数, 并根据响应函数对能量道址的数据进行修正。



在不同偏压与不同温度下对载荷进行了标定。偏压范围是 26.5~29.0 V, 步长为 0.5 V, 温度范围是 0~30 °C, 步长为 5 °C。

图 4 探测器温度-偏压标定实验数据三维分布

2.2 能量道址标定结果 放射源标定实验和 X 光机标定实验可得到不同能量下的多道道址, 以及该道址对应的环境温度(放射源标定实验和 X 光机标定实验中 SiPM 偏压均保持在 28.5 V), 通过温度-偏压标定实验结果, 可对不同温度下的能量道址标定实验数据进行修正。从图 4 以及实验数据可知, 在同一偏压下, 道址与温度成线性关系。选择标准温度 29.5 °C, 根据道址与温度的线性关系将不同温度下的道址修正为 29.5 °C 下应测量到的道址。图 5 是 BNU-120 探测器经修正后, 在温度 29.5 °C、偏压 28.5 V 下的能量(E)与道址(C)关系。

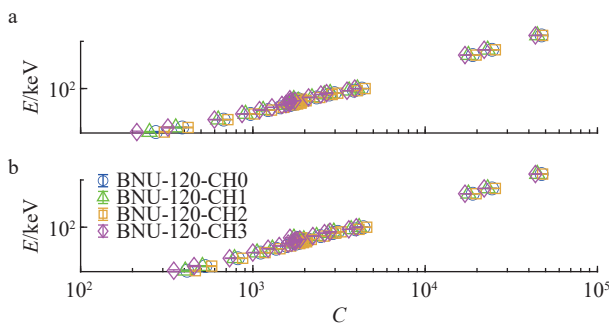
对探测器的各通道的能量道址关系进行二次拟合, 得到 4 个通道各自的拟合方程, 并给出各方程的决定系数 R^2 :

$$\begin{aligned} E_1 &= 4.63 \times 10^{-8} C^2 + 0.0259 C - 0.72, \\ R_1^2 &= 0.9999; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_2 &= 5.14 \times 10^{-8} C^2 + 0.0275 C - 0.93, \\ R_2^2 &= 0.9999; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E_3 &= 7.91 \times 10^{-8} C^2 + 0.0239 C + 0.73, \\ R_3^2 &= 0.9999; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_4 &= 2.82 \times 10^{-8} C^2 + 0.0294 C - 1.54, \\ R_4^2 &= 0.9999. \end{aligned} \quad (4)$$



a. 标定测得的原始数据; b. 经过温度偏压修正后的数据。

图 5 BNU-120 探测器的 $E-C$ 关系

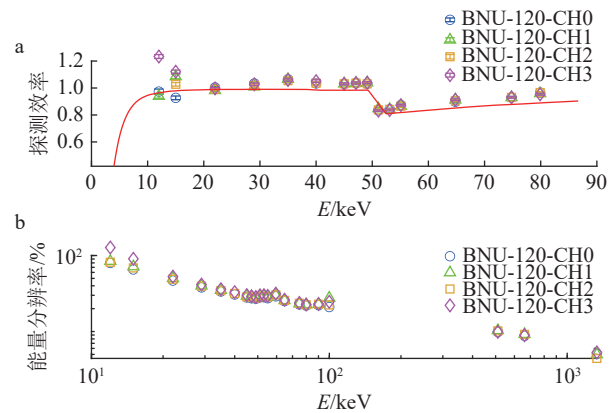
从图像以及拟合的结果可以看出,探测器的 $E-C$ 关系方程的二次项系数极小,可以认为 $E-C$ 成线性关系,得到的各拟合方程将作为后续数据处理的重要依据。

2.3 探测效率和能量分辨率测量结果 借助高纯锗探测器的测量结果,可以对探测器各能量点下射线正入射时的探测效率进行计算,并与蒙特卡罗模拟的探测效率进行比较,如图 6-a 所示,其中在 GAGG 闪烁体能量为 50.2 keV 的特征吸收边处探测效率有突变。由于载荷外的屏蔽件的屏蔽效果有限,探测器实际接收到的有效事件增多,导致图 6-a 中某些通道存在探测效率 >1 的点。计算结果表明,探测器正入射探测效率与模拟结果基本吻合。

在 X 光机标定实验中,根据每次测量的全能峰拟合结果得到半高宽,从而得到每个数据的能量分辨率,绘制出能量分辨率与能量的关系,如图 6-b 所示。

3 讨论

在本文所述组装的过程中,部分步骤是人工处理的,比如 ESR 膜和内层星衣的裁剪。在人工裁剪时,容易出现边缘不整齐的现象,给后续的粘贴部分带来挑战。在今后的实验中可以考虑更机械化的操作方法。现在所需的 ESR 膜的轮廓是打印机打印后使用刻刀裁取的,在后续的粘贴过程中,ESR 表面的保护



a. 探测器正入射探测效率测量值与蒙特卡罗模拟对比。实线表示蒙特卡罗模拟的探测效率与能量的关系;
b. 探测器能量分辨率随能量的变化关系(实验环境温度
为 29.5 °C, SiPM 偏压为 28.5 V)。

图 6 探测器的探测效率和能量分辨率与能量的关系

膜被撕下,会产生大量不易清理的打印机墨粉,残留的墨粉会影响探测器的探测效率,需要反复清理保证包装好的晶体表面不会有墨粉残留。未来可以尝试其他裁剪 ESR 膜的有效方法。

在标定过程中只进行了探测器角响应的模拟,未进行探测器角响应实验。角响应实验是研究射线从空间各个角度入射探测器时,探测器探测效率的变化情况。进行角响应实验能与模拟结果进行对比,确认模拟部分建模的合理性,并为模拟部分提供参考数据。未来角响应结果可以用于对在轨观测数据进行计数率修正,从而为衡量伽马暴的强度提供可用的数据。

温度偏压标定实验的温度可以选择更大范围,因为在探测器发射的过程中温度急剧上升,而在太空工作时环境温度低,标定中选择更大的温度范围更有利于对更大温度范围内的探测结果进行处理分析。

4 结论与展望

本文描述了北京师范大学天格计划团队研制的第一台伽马射线探测器 BNU-120 的组装与标定测试情况。实验得到了温度和偏压对探测器信号幅度的影响、探测器的能量与道址的关系、探测器的能量分辨率与能量的关系,以及探测器的探测效率与能量的关系。BNU-120 在制作工艺方面较天格计划团队已研制的载荷有所改进(如改进了 ESR 膜裁剪出的形状,降低了包裹过程的难度;将 ESR 膜的折叠过程细化为 2 步,在 2 步之间清理一次墨粉,有效减少了包裹过程中残留在 ESR 膜表面的墨粉,降低了后期清洁晶体的难度),标定测试结果与已发射的天格 04 载荷基本一致,这些标定结果对探测器发射前性能的确

定、后续观测数据的校正有重要作用。

在组装、标定以及数据处理的工作中, 仍存在一些可以改进之处, 在未来的研究中, 将对上述不足之处进行改善, 并对整个工作进一步完善和拓展。

致谢 天格联盟清华大学团队在本文研究全程中给予了宝贵建议, 北京师范大学天文系给予了部分硬件支持, 中国计量科学研究院在探测器标定工作中提供了重要实验场所, 特此一并致谢。

5 参考文献

- [1] EINSTEIN A. Approximative integration of the field equations of gravitation[C]// Berlin: Math Phys, 1916: 688
- [2] FAN X L. The detection of gravitational waves and the new era of multi-messenger astronomy[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, 59(4): 1
- [3] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Gravitational waves and Gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 848(2): L13
- [4] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(16): 161101
- [5] ABBOTT R, ABBOTT T D, ABRAHAM S, et al. GW190521: a binary black hole merger with a total mass of $150 m_{\odot}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(10): 101102
- [6] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 061102
- [7] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA[J]. *Living Reviews in Relativity*, 2018, 21(1): 1
- [8] 黄双林, 龚雪飞, 徐鹏, 等. 空间引力波探测: 天文学的一个新窗口[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(1): 38
- [9] 陈维, 宋黎明, 郑世界, 等. GECAM卫星科学应用系统简介[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(12): 129
- [10] 郭东亚, 彭文溪, 朱玥, 等. GECAM能量响应及在轨本底模拟[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(12): 101
- [11] WEN J X, LONG X Y, ZHENG X T, et al. GRID: a student project to monitor the transient gamma-ray sky in the multi-messenger astronomy era[J]. *Experimental Astronomy*, 2019, 48(1): 77
- [12] GAO H Z, YANG D X, WEN J X, et al. On-ground calibrations of the GRID-02 gamma-ray detector[J]. *Experimental Astronomy*, 2022, 53(1): 103
- [13] WANG X I, ZHENG X T, XIAO S, et al. GRB 210121A: a typical fireball burst detected by two small missions[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 922(2): 237
- [14] WEN J X, ZHENG X T, YU J D, et al. Compact CubeSat Gamma-ray detector for GRID mission[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, 32(9): 1
- [15] WEN J X, ZHENG X T, YU J D, et al. A compact gamma-ray detector on CubeSat for the GRID mission[EB/OL]. [2022-04-20]. <https://arxiv.org/abs/2104.14228>
- [16] IWANOWSKA J, SWIDERSKI L, SZCZESNIAK T, et al. Performance of cerium-doped $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ (GAGG: Ce) scintillator in gamma-ray spectrometry[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 712: 34
- [17] ACERBI F, GUNDAKER S. Understanding and simulating SiPMs[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 926: 16
- [18] PIEMONTE C, GOLLA A. Overview on the main parameters and technology of modern Silicon Photomultipliers[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 926: 2
- [19] 周栖敏. 天格计划卫星载荷的组装调试与在轨单粒子实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2021
- [20] 高怀众. GRID卫星探测器标定实验与性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2020
- [21] NAKAJIMA K, TAMAGAWA Y, OGAWA I, et al. Temperature dependence of scintillation properties and pulse shape discrimination between γ - and α -rays in $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$: Ce scintillator[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, 916: 51
- [22] 潘晓凡. 空间伽马暴探测立方星载荷的研制与实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2021

BNU-120 gamma-ray detector with GAGG scintillators

JIANG Wenyang^{1,2)} ZHAO Yiwei^{1,2)} QI Xinrui^{1,2)} JIANG Jianyong¹⁾
ZHANG Fengshou¹⁾ LIU Yuanyuan¹⁾

(1)Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2)Department of Physics, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract A gamma-ray detector was developed with Cerium-doped Gadolinium Aluminum Gallium Garnet (GAGG) scintillators at Beijing Normal University. Four GAGG crystals, each measuring 3.8 cm×3.8 cm×1.0 cm, were coupled to 64 Silicon Photomultipliers (SiPM, Sensl MicroFJ-60035-TSV). Signal dependence on temperature and bias, correlations between energy and energy resolution, between energy and detection efficiency, were all measured and calibrated in the range from 15-1 330 keV. Calibrations and measurements were found consistent with those done with detectors developed previously by our group. Detection efficiency was consistent with Monte Carlo simulations on Geant4. Calibrations will be critical for future in-orbit data correction.

Keywords GAGG; gamma-ray detection; GRID; satellite payloads

【责任编辑:武 佳】