



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



GECAM卫星有效载荷正样 研制情况介绍

李新乔 代表 GECAM卫星有效载荷项目组

2020年11月1日

概要

- 研制历程
- 正样研制基本情况
- 正样设计和投产情况
- GRD标定&CPD标定
- 试验及测试情况
- 总结

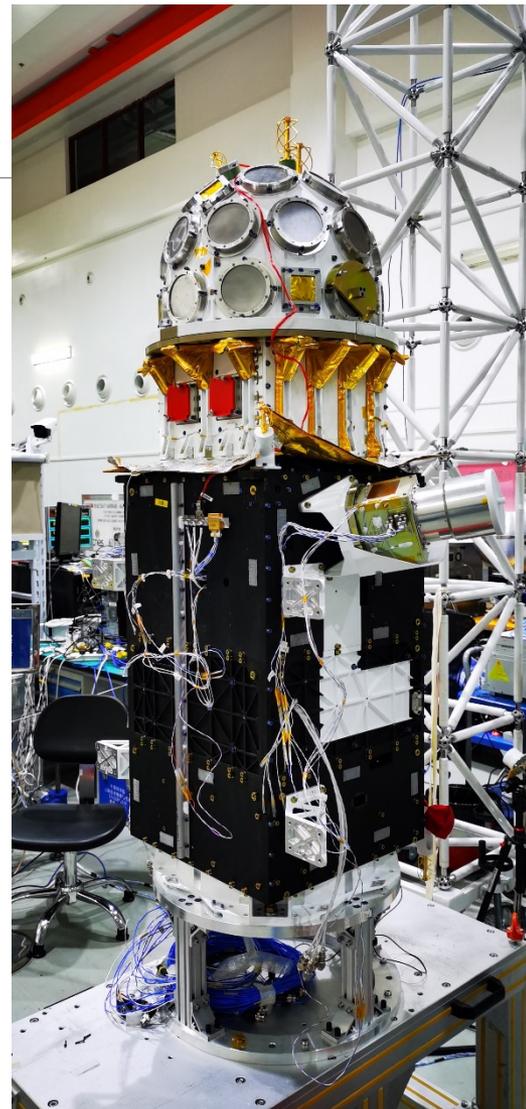




研制历程

GECAM卫星研制历程

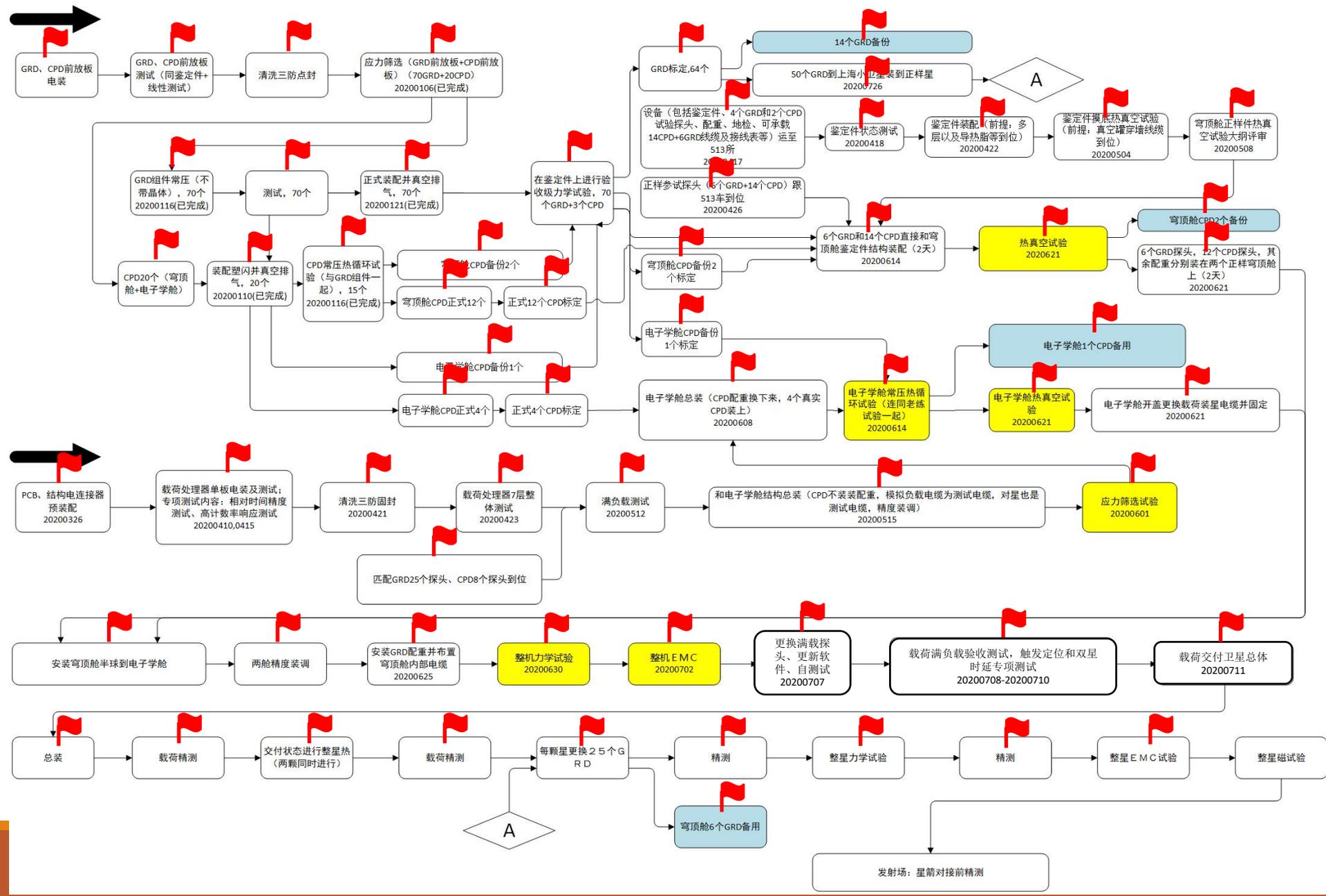
- ✓ 2017年4月和11月，国家空间科学中心分别组织召开了两次项目咨询评议会。
- ✓ **2017年12月，正式批复进入工程论证。**
- ✓ 2018年3月19日，通过科学目标与有效载荷配置方案评审。
- ✓ 2018年4月12日，通过工程项目初步技术指标与使用要求评审。
- ✓ 2018年6月8日，通过GECAM有效载荷分系统可行性论证报告评审。
- ✓ **2018年12月，GECAM卫星工程正式批复立项。**
- ✓ 2019年3月至2019年11月，GECAM整星初样研制。
- ✓ **2019年11月4日，完成GECAM卫星有效载荷初样研制总结暨转正样评审；**
- ✓ **2020年7月11日，完成GECAM卫星有效载荷验收测试；**
- ✓ 目前已完成两颗卫星的整星桌面联试、AIT和除磁试验之外的所有环境试验；
- ✓ **2020年10月28日，完成GECAM卫星有效载荷正样研制总结评审；**
- ✓ **将于2020年11月12日完成GECAM卫星出厂，12月10日在西昌卫星发射中心发射**





正样研制基本情况

正样研制技术流程

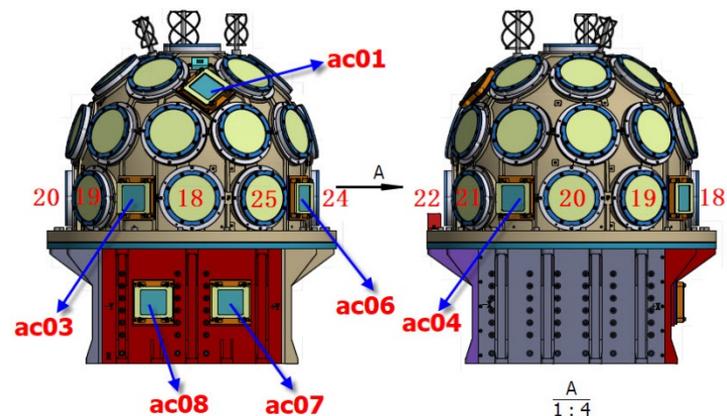


满负载验收测试载荷状态

——产品配套表

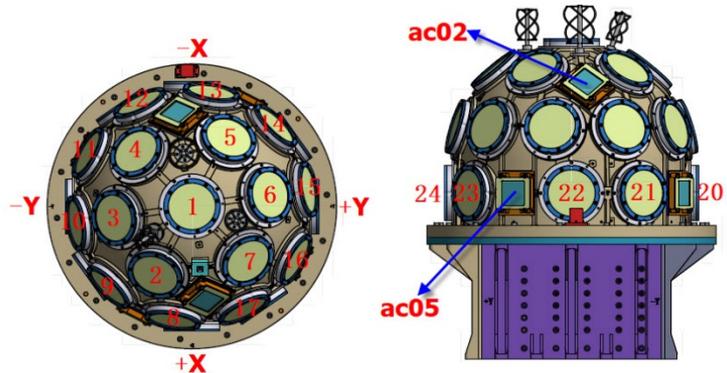
载荷硬件产品配套表

序号	名称	设备编号	批次号	产品分类	数量 (台/套)
1	GECAM望远镜1	KX-08-ZH00-1	Z01-1	C类	1
2	GECAM望远镜2	KX-08-ZH00-2	Z01-2	C类	1
3	电缆	KX-08-ZH00-W00-1	/	C类	2



载荷软件产品配套表

序号	产品名称	代号	关键等级	CPU/FPGA A	版本
1	载荷数据管理软件	R-KX-08-ZH02-01	B	CPU	V2.09
2	数据采集软件	F-KX-08-ZH02-01	B	FPGA	V2.32
3	载荷数据管理逻辑	F-KX-08-ZH02-02	B	FPGA	V2.07

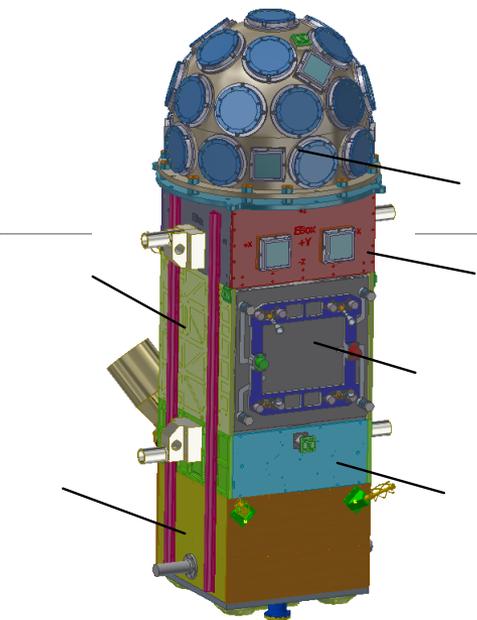
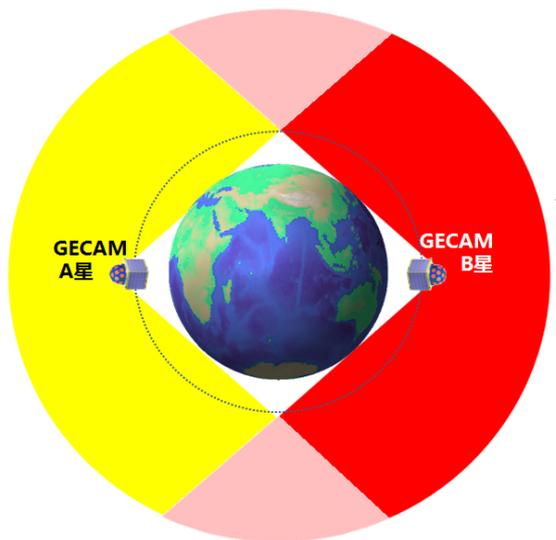


整体布局示意图



正样设计和投产情况

有效载荷载荷总体方案-1

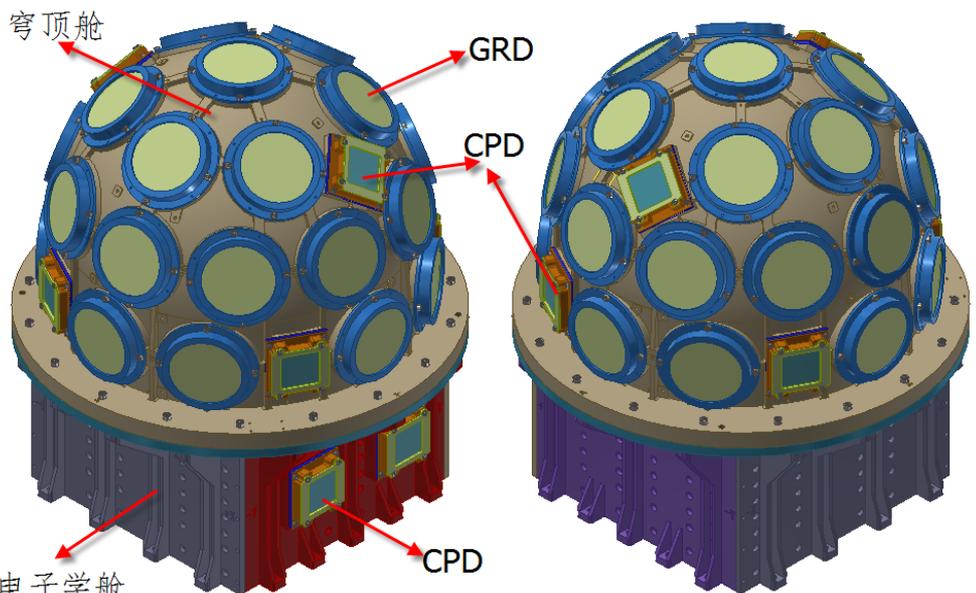


低轨道双星

- 成本、可行性
- 轨道相同，反相位，形成100%全天覆盖
- 600 km, 29度倾角，空间环境和SAA区满足要求

每颗星的探测器配置

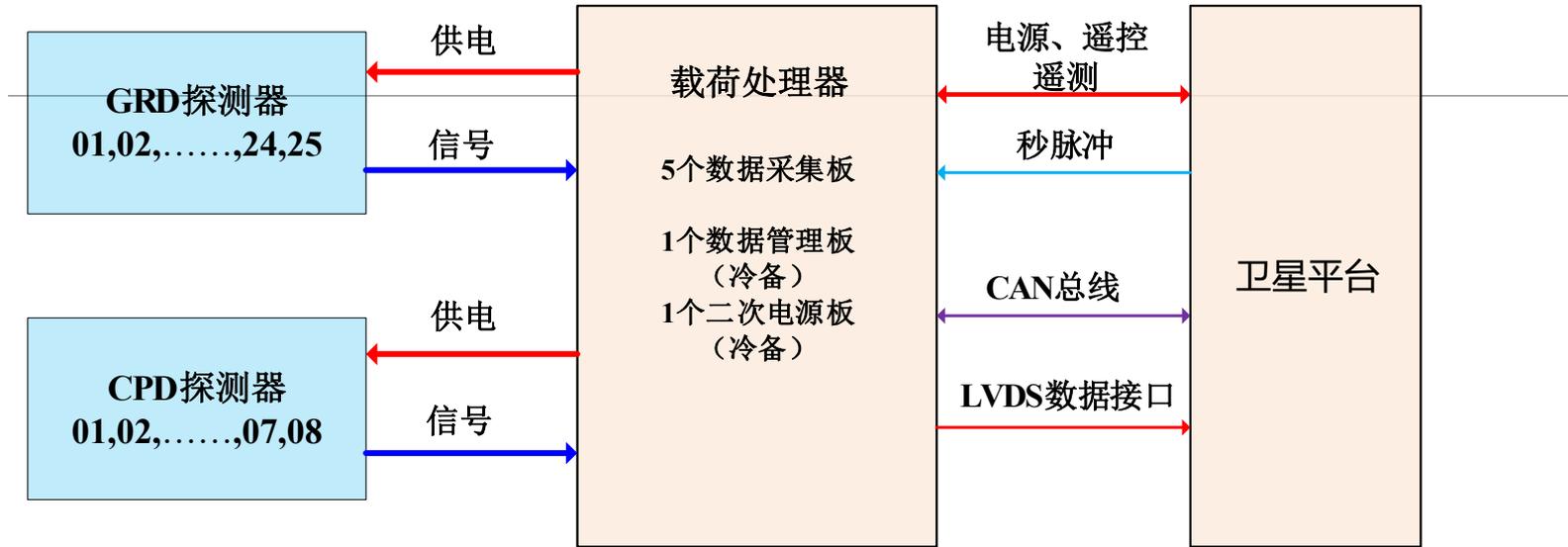
- 25个伽马暴射线探测器(GRD)，黄色圆形
- 8个荷电粒子探测器 (CPD)，蓝色方形
- 视场224度
- 均匀指向不同方向
- 定位、能谱、时变测量



电子学舱

2020/11/0

有效载荷载荷总体方案-2



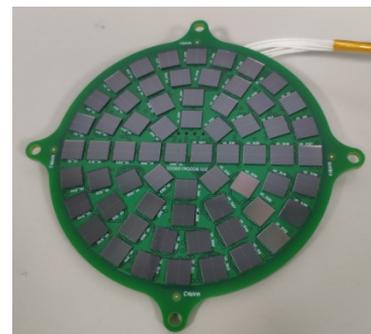
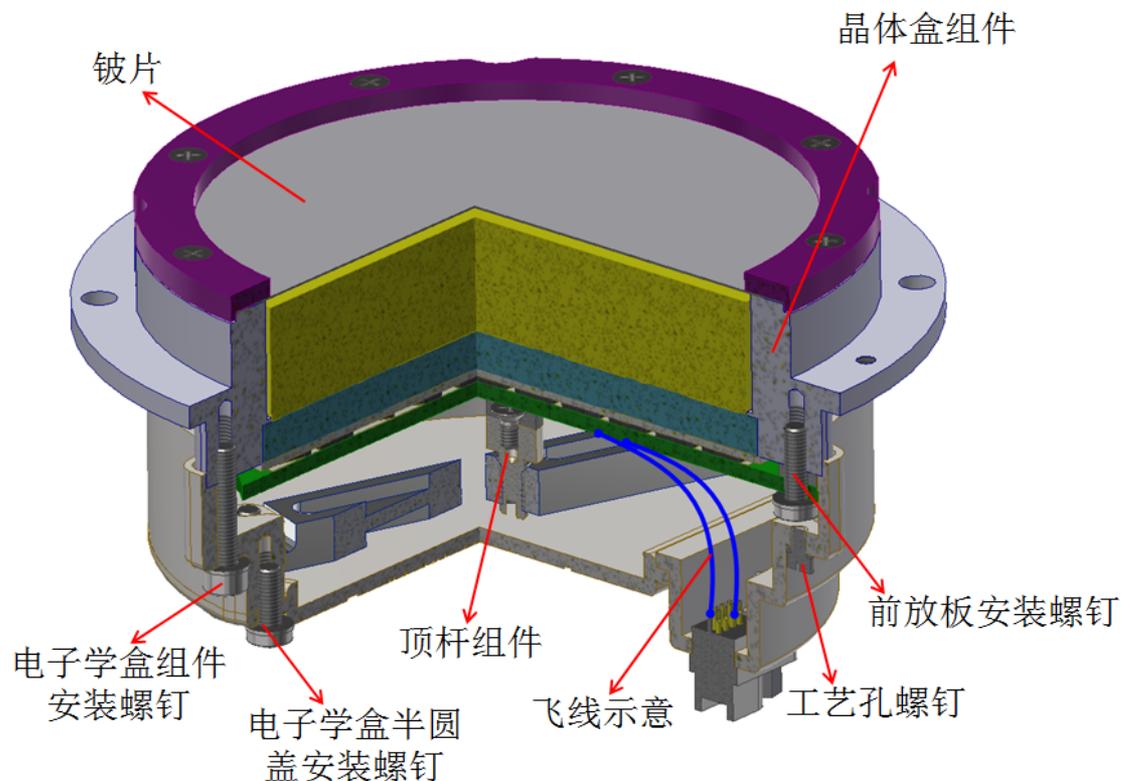
载荷系统框图

工作模式:

逐事例探测模式: 在南大西洋异常区之外的区域，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，同时记录GRD和CDP的时间并道和能谱并道数据；

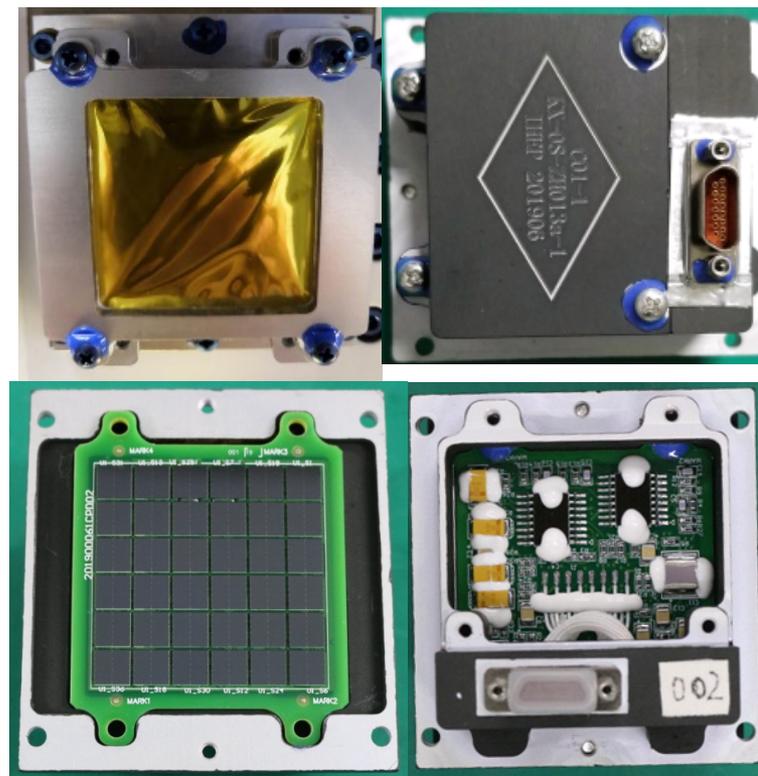
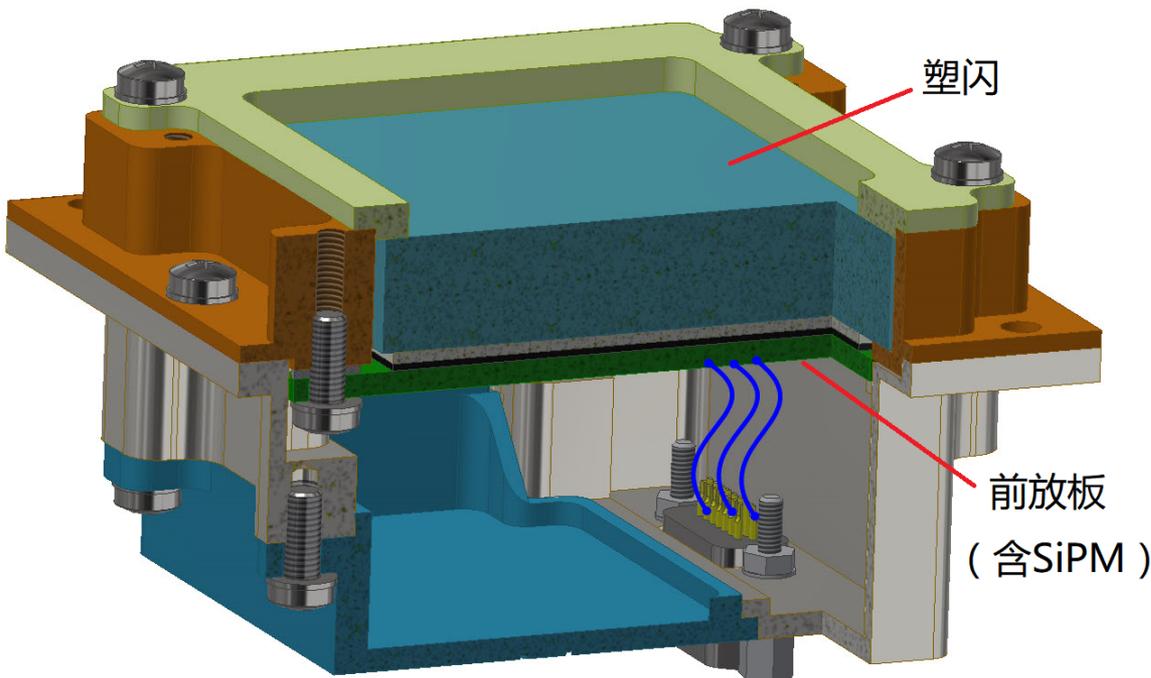
异常区探测模式: 在南大西洋异常区，有效载荷切换为异常区工作模式，仅记录GRD和CPD的时间并道和能谱并道数据。异常区范围具备注入功能

GRD设计方案



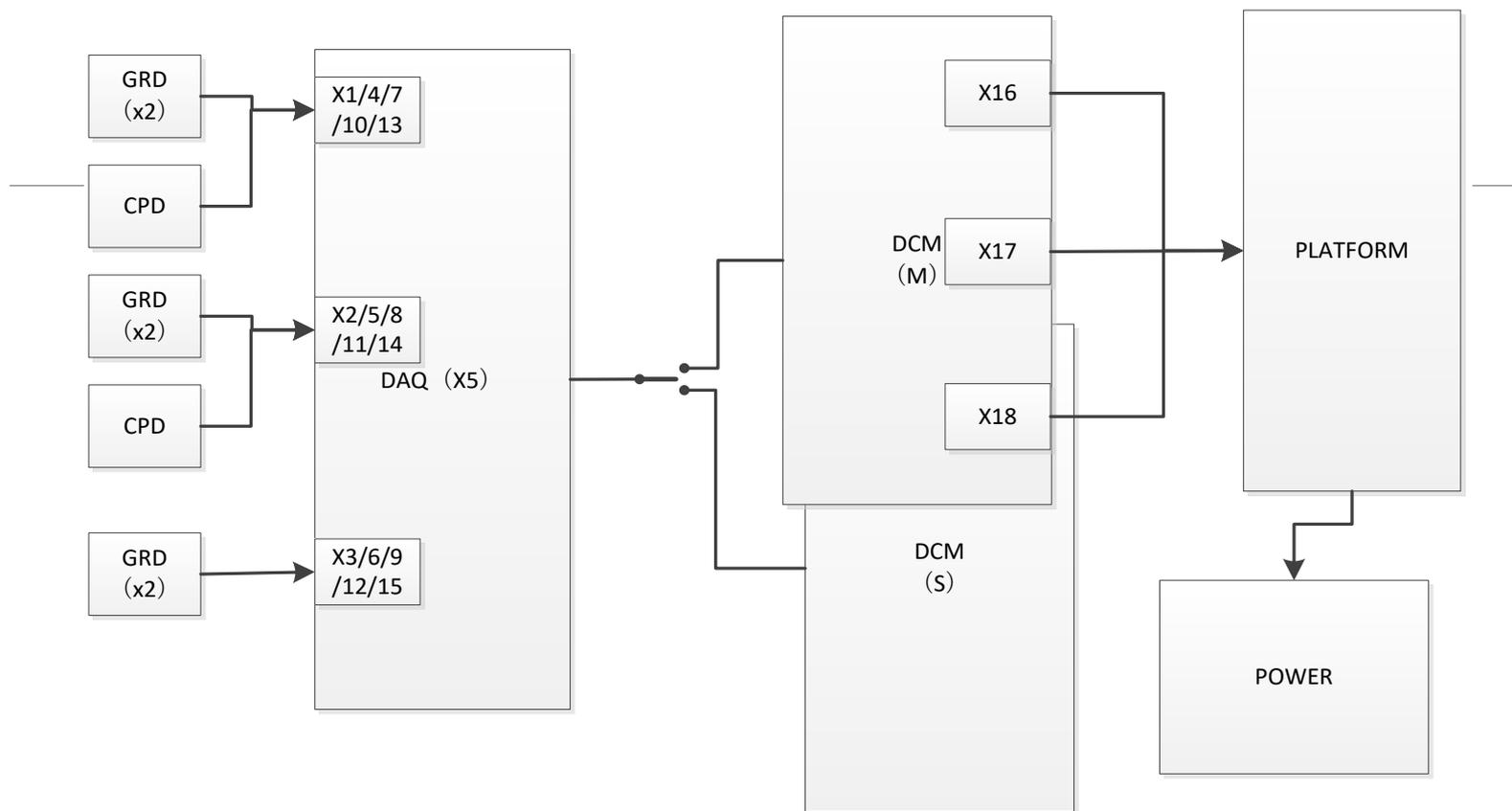
- GRD的溴化镧晶体尺寸为直径76 mm，厚15 mm，面积45.36 cm²，质量为0.346 kg
- TSV封装的SiPM阵列，小单元尺寸为6.07×6.07 mm，64个，间隔分为2组
- 根据温度调节SiPM偏压，实现SiPM增益温度修正，保持SiPM增益的稳定性

CPD设计方案



- CPD塑料闪烁体尺寸：40mm*40mm*10mm，面积16 cm²
- TSV封装的SiPM阵列，小单元尺寸为6.07×6.07 mm，36个，间隔分为2组
- 根据温度调节SiPM偏压，实现SiPM增益温度修正，保持SiPM增益的稳定性

EBOX设计方案



- 载荷处理器负责25路GRD和8路CPD探测器的信号采集、控制、在线处理，与卫星平台的通讯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



GRD标定

GRD标定——地面标定项目

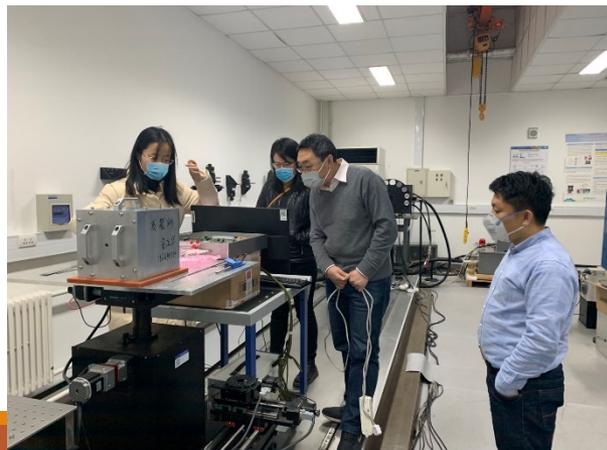
标定项目	标定子项	标定装置要求	标定装置实际情况	标定要求	级别要求	完成情况
能量响应	能量-能道关系	x光能量测量精度 $\leq 0.1\text{keV}$	$\leq 0.1\text{keV}$	测量点需尽量覆盖8 keV-2000keV, 总测量点不少于20个, 每个能点的统计量不少于100000个; 个别探头(按照晶体原材料批次, 3个批次)精测吸收边($\leq 0.1\text{keV}/\text{步长}$)	单体级别 正样件进行全部探头(63个)的标定)	1.完成所有探头(含备份件)标定; 2. 探头测试能点数量及各能点的统计量符合标定要求; 3.各探头的标定曲线符合统计规律; 4. 能量点在试验期间无显著晃动, 无未知来源的成份 5. 试验期间无明显电磁干扰;
	能量分辨率	X光单色度 $\leq 1.2\% @ 122\text{keV}$	$2.7\% @ 122\text{keV}$			
	能量响应矩阵	能谱测量数据统计量 $\geq 10\text{万}$	统计量 $\geq 10\text{万}$ (除个别最低能量能点和最高能量点)			
探测效率	探测效率	流强测量精度 $\leq 5\%$ 流强稳定度 $\leq 1\%/ \text{小时}$	流强测量精度 $\leq 5\%$ 流强稳定度 $\leq 1\%/ \text{小时}$			
空间响应	射线入射位置对能量和探测效率的影响	位置精度 $\leq 1\text{mm}$	位置精度 $\leq 0.1\text{mm}$	≥ 1 个探头, 总测量点不少于2个(15keV,60keV左右), 每个能点的统计量不少于100000个, 采用不同位置(25个点)的入射	单体级别 (抽样1-2只进行标定)	1.完成1个探头, 量点(15keV,39keV), 每个能点的统计量不少于100000个, 采用不同位置(25个点)的入射
	射线入射方向的影响	角度精度 $\leq 1^\circ$	角度精度 $\leq 0.1^\circ$	≥ 1 个探头, 总测量点不少于2个(放射源59.5keV, 122keV), 角度(范围 $0^\circ \sim 360^\circ$, 每 10° 为步长)		
温度与偏压响应	温度、偏压对能量响应的影响	温度测量精度 $\leq 0.1^\circ\text{C}$	温度测量精度 $\leq 0.1^\circ\text{C}$ 电压测量精度 $\leq 0.05\text{V}$	2个探头(一个有温度补偿, 一个没有), 温度测量范围 $-30 \sim 0^\circ\text{C}$, 每 2°C 一个点, 偏压:(27.5-29.5V, 每0.1V一个点, 4个放射源能点, 统计量 ≥ 40000)		2.探头的在不同标定项目下的性能变化规律符合理论预期;
		电压测量精度 $\leq 0.05\text{V}$				
时间特征	死时间	-	-	GRD探头高增益、低增益均需测试		3.标定装置满足要求(1个探头, 电子束线, 统计量 ≥ 100000 个)
空间环境响应	电子响应	束流能量测量精度 $\leq 1\%$; 束流通量不稳定性 $< 1\%/ \text{小时}$;	束流能量测量精度 $\leq 1\%$	≥ 1 个探头, 电子束线或 ^{207}Bi 放射源(统计量 ≥ 100000 个)		

标定工作的开展

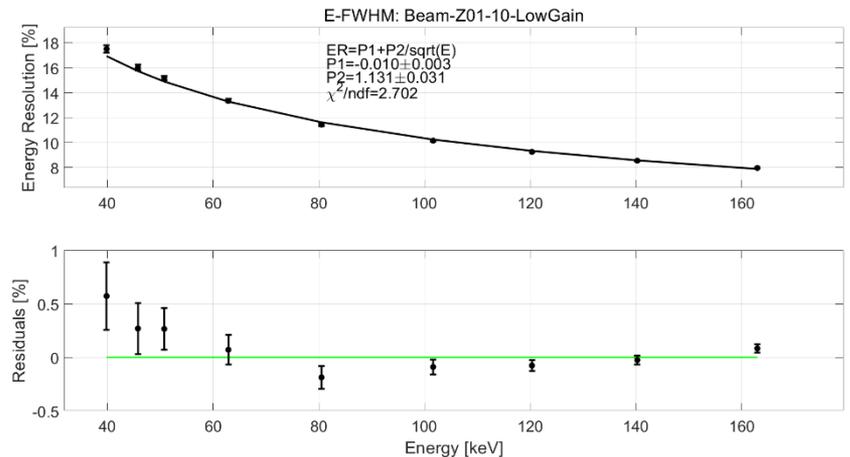
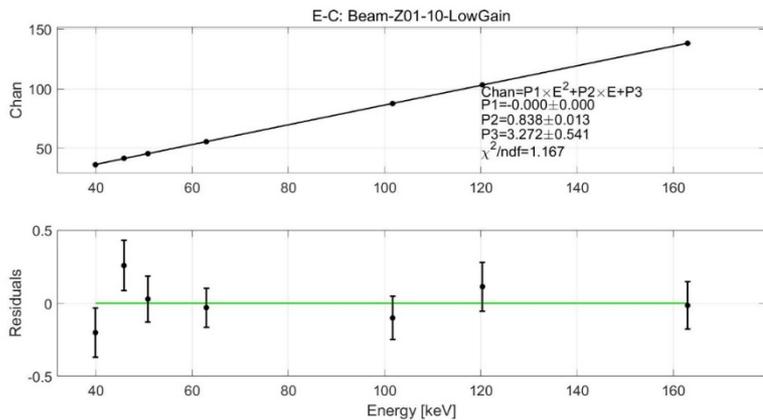
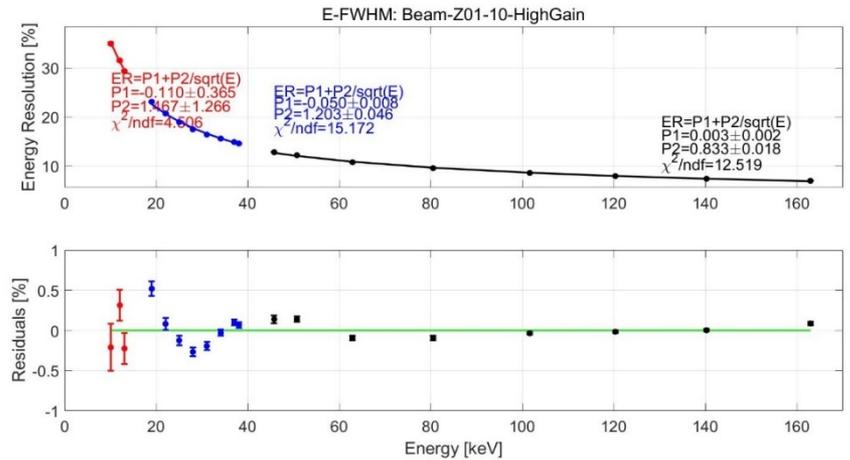
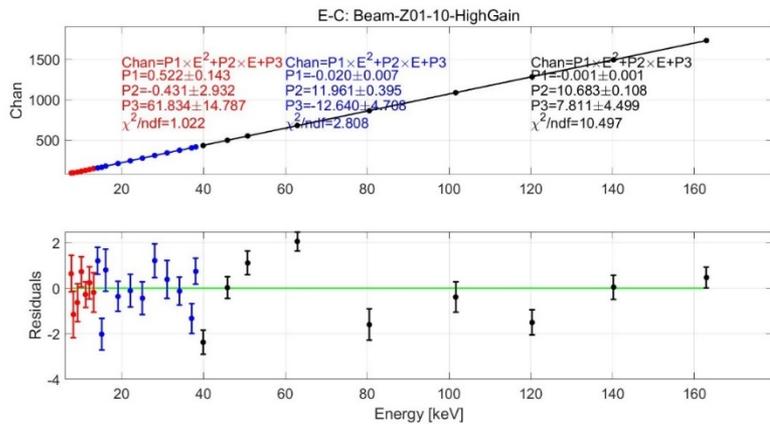
——HXCF标定GRD



技术指标项目	技术指标
能量范围	Si111: 8keV~43keV Si220: 30~160keV
单色光比例	>90%
单色光通量	>200cts/s
光斑大小	直径可调 (0.5mm~10mm), 可定制
能散度	1.2%@59.5keV
光束线位置	偏差 < 2.4mm@ ϕ 2mm
稳定性	单色光通量变化 < 1%@1h 单色光比例变化 < 1%@1h

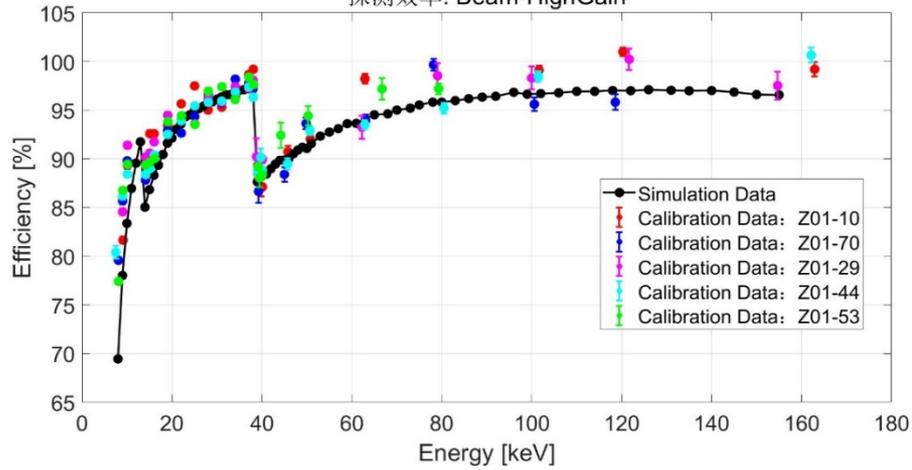


GRD标定——E-C关系&能量分辨率

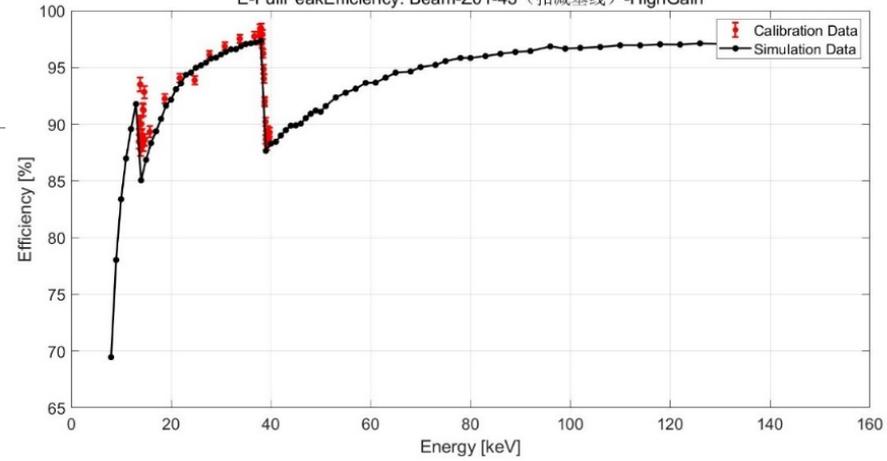


GRD标定——探测效率

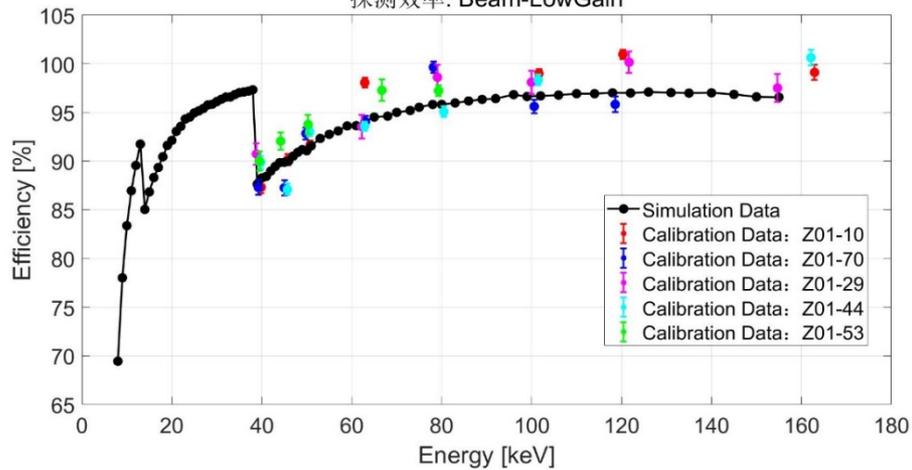
探测效率: Beam-HighGain



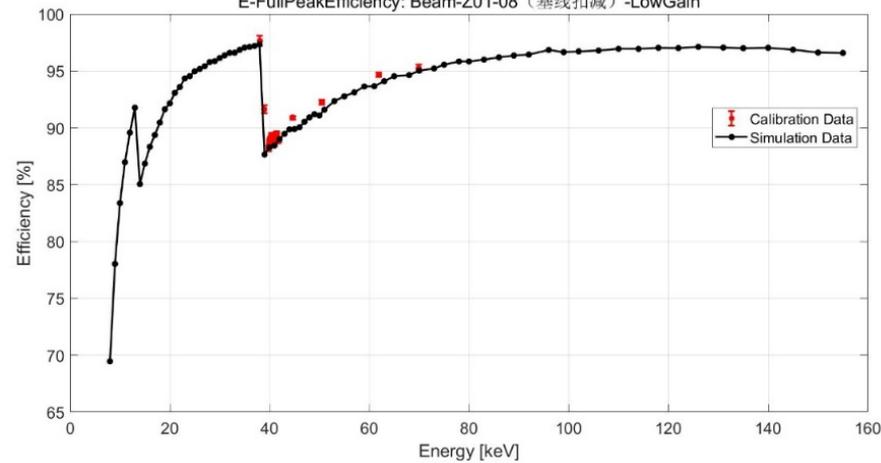
E-FullPeakEfficiency: Beam-Z01-43 (扣减基线) -HighGain



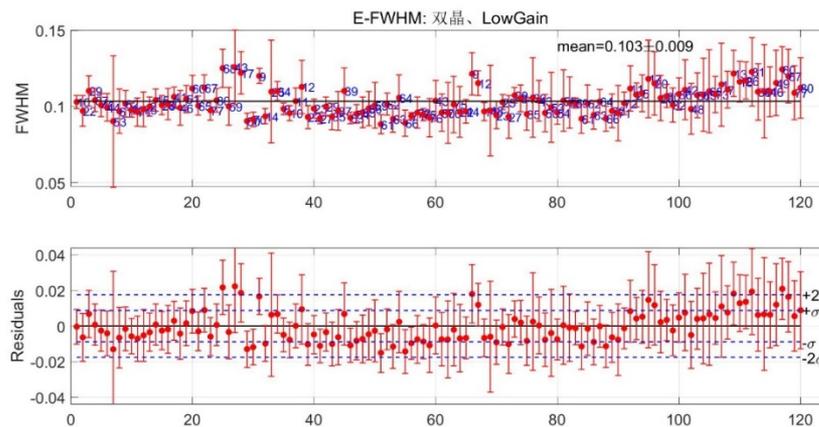
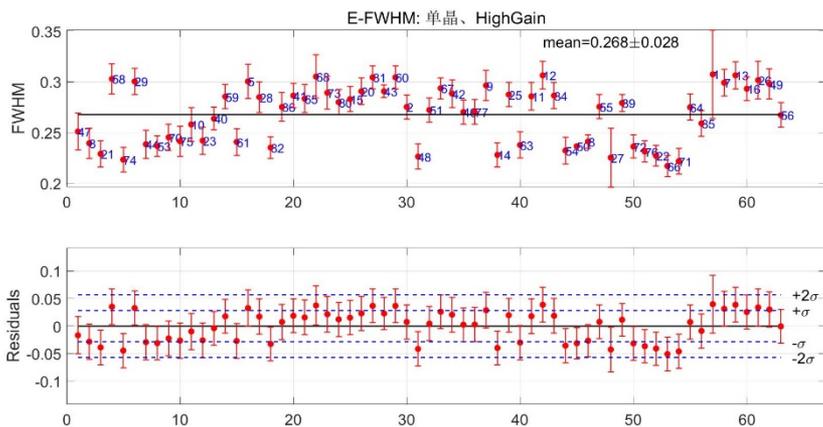
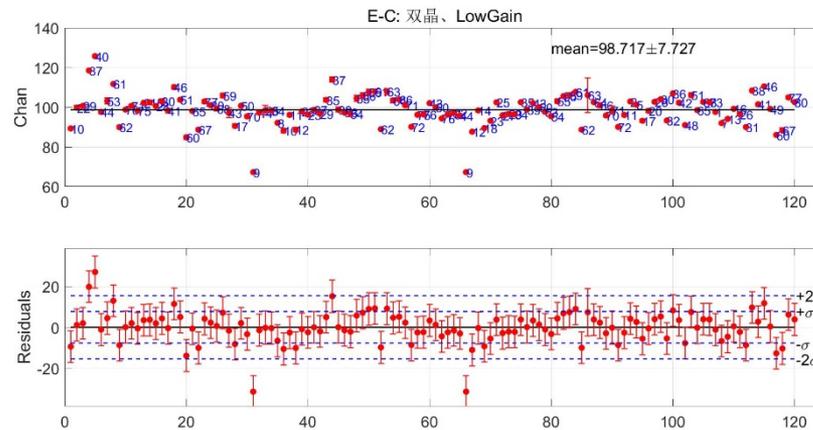
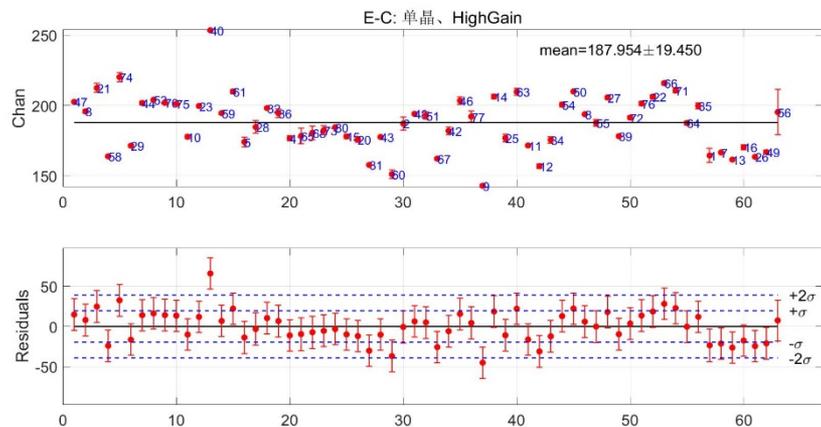
探测效率: Beam-LowGain



E-FullPeakEfficiency: Beam-Z01-08 (基线扣减) -LowGain



GRD标定——各探头一致性分析





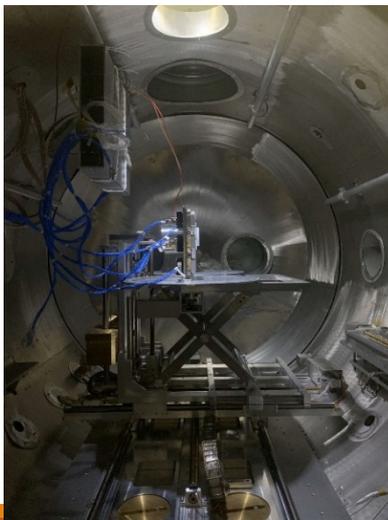
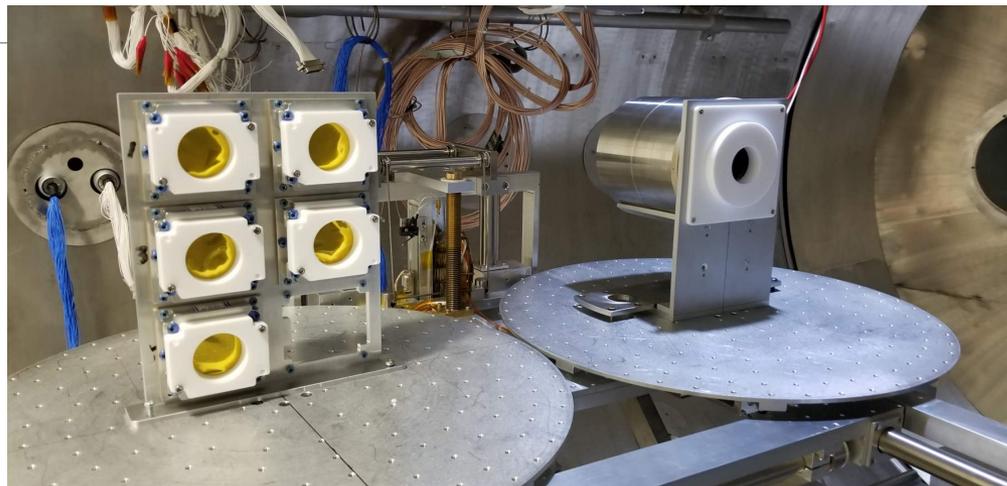
CPD标定

CPD标定——地面标定项目

标定项目	标定子项内容	标定手段	标定要求	测试范围	判据
能量响应	能量刻度（线性度） 能量分辨率	Bi-207电子放射源 /电子束线	1.电子能量范围：300keV-5MeV； 2. 能点 ≥ 10 个； 3.每个能点统计误差 $< 1\%$ ；	电子标定： 全部探头 （电子）	满足试验要求，能量探测范围满足300keV-5MeV
	能量响应矩阵			1个穹顶舱探头+1个电子学舱探头	
	包覆多层对能量响应的影响			全部探头	
	各探头一致性				
探测效率	伽马射线探测效率	放射源Cs-137， Go-57， Co-60， Ba-133	1.300keV~2MeV 3. 每个能点统计误差 $< 1\%$ ；	1个电子学舱探头	$< 20\%$ @8keV~2MeV（8keV~300keV在CPD的阈值以下，效率为0）
方向响应	方向响应	Bi-207电子放射源	1. 不同角度下，重复能量响应测试内容。与探测器表面法线方向夹角 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，每 15° 测量一次；2. 角度误差 $\pm 2^\circ$ ；3.每个能点统计误差 $< 1\%$ ；	1个穹顶舱探头+1个电子学舱探头	满足试验要求
时间响应	死时间	Bi-207电子放射源 /电子束线	最小时间间隔谱	1个穹顶舱探头+1个电子学舱探头	正常信号死时间 $< 5\mu s$
温度/偏压响应&工作模式验证	温度/偏压-输出幅度关系&工作模式验证	Bi-207电子放射源+高低温箱	不同温度不同偏压条件下，重复能量响应测试内容：1、 $-30^\circ C$ 至 $-10^\circ C$ ，2度一个测量点（穹顶舱）；2、 $-15^\circ C$ 至 $+20^\circ C$ ，2度一个测量点（电子学舱）；3、偏压范围27V~29.5V，电压调节步长为0.1V；4、半组份模式下，重复以上测试内容；5、每个能点统计误差 $< 1\%$ ；	1个穹顶舱探头+1个电子学舱探头	满足试验要求

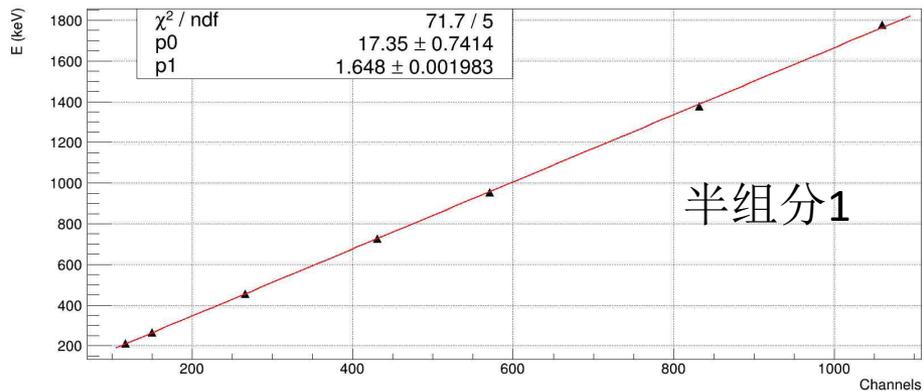
标定工作的开展

——电子束流标定CPD

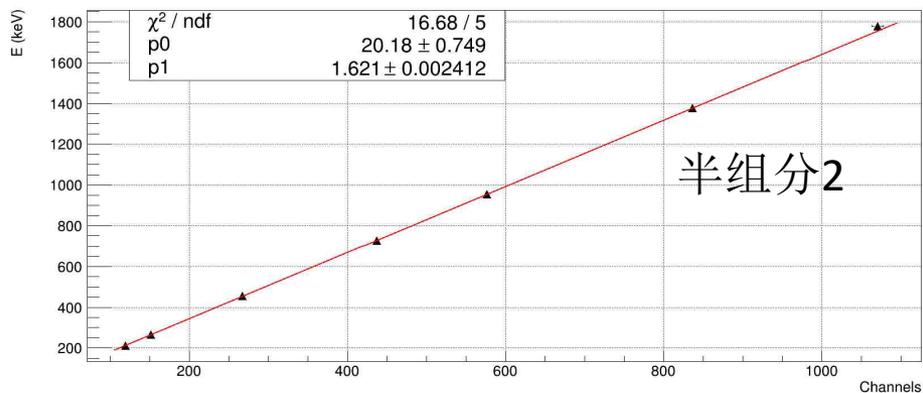


CPD标定——E-C关系

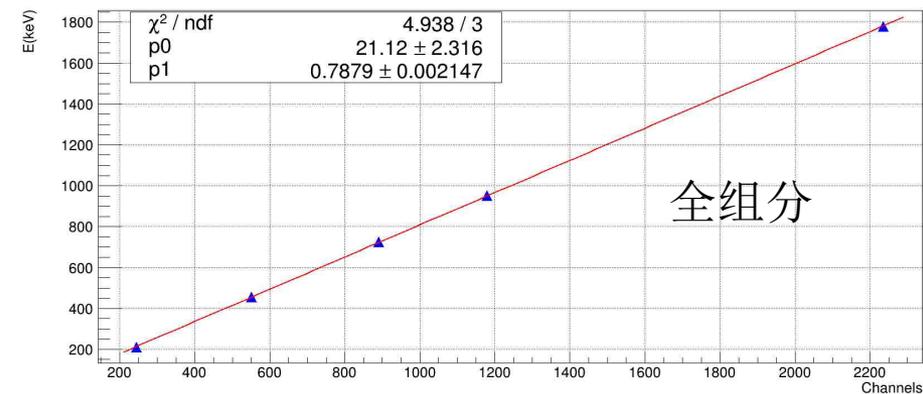
Q-Z01-07 E-C (Turn off B2)



Q-Z01-07 E-C (Turn off B1)

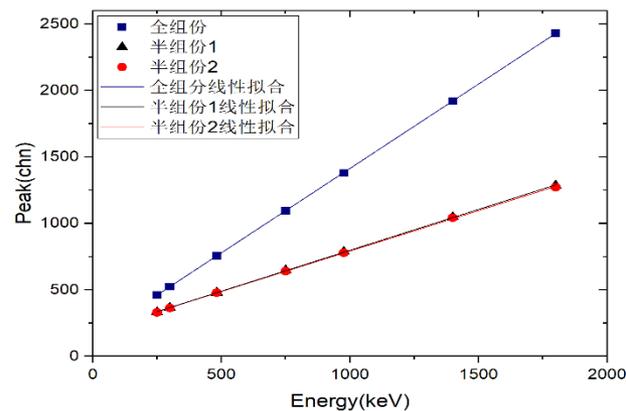


Q-Z01-07 E-C



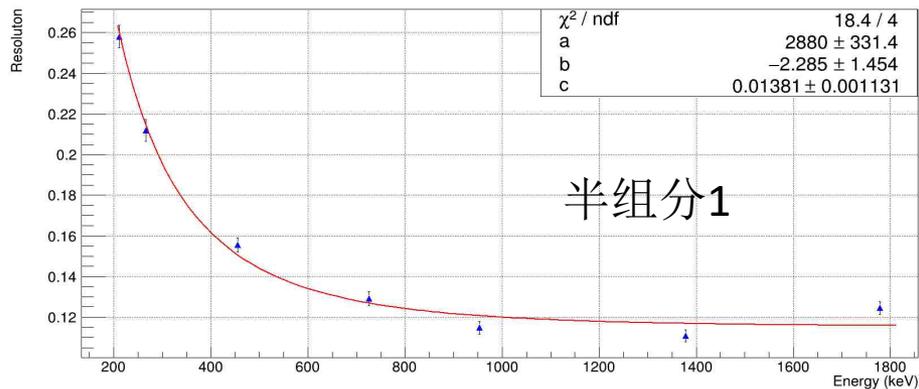
各探头E-C关系标定结果

CPD编号	P0	P1
Z01-1	49.78854	0.82146
Z01-2	49.73334	0.86103
Z01-3	52.69583	0.83129
Z01-4	52.45375	0.76686
Z01-5	52.42179	0.7968
Z01-7	55.42422	0.78042
Z01-8	53.12702	0.78404
Z01-9	55.05365	0.80911
Z01-10	53.45742	0.8211
Z01-11	56.06205	0.8411
Z01-12	57.09729	0.78715
Z01-13	53.93097	0.79049
Z01-14	55.86834	0.85916
Z01-15	62.13164	0.79957
D01-01	51.23035	0.87908
D01-02	56.43482	0.87949
D01-03	57.55607	0.85785
D01-04	57.67127	0.82501
D01-05	57.27439	0.84224

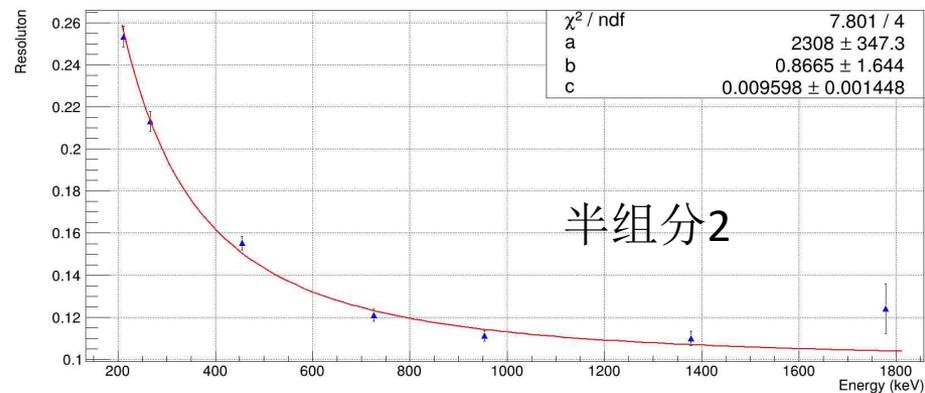


CPD标定——能量分辨率

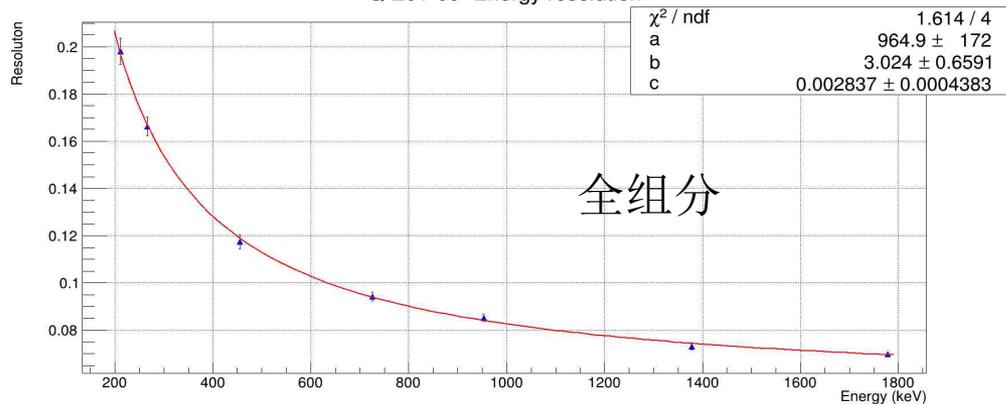
Q-Z01-07 Energy resolution (Turn off B2)



Q-Z01-07 Energy resolution (Turn off B1)



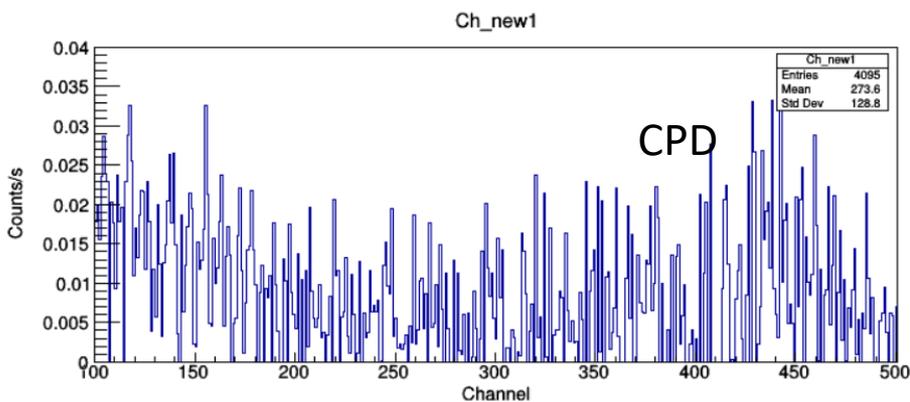
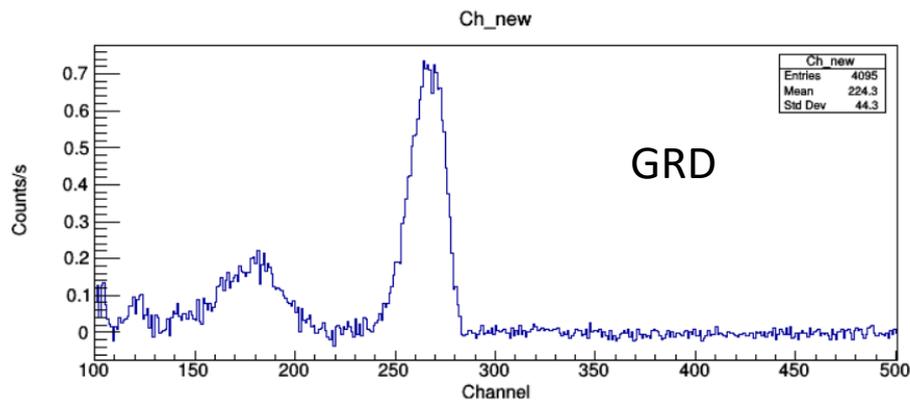
Q-Z01-09 Energy resolution



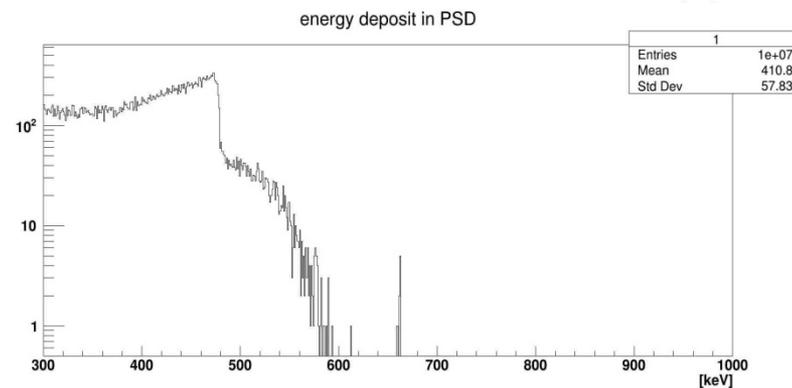
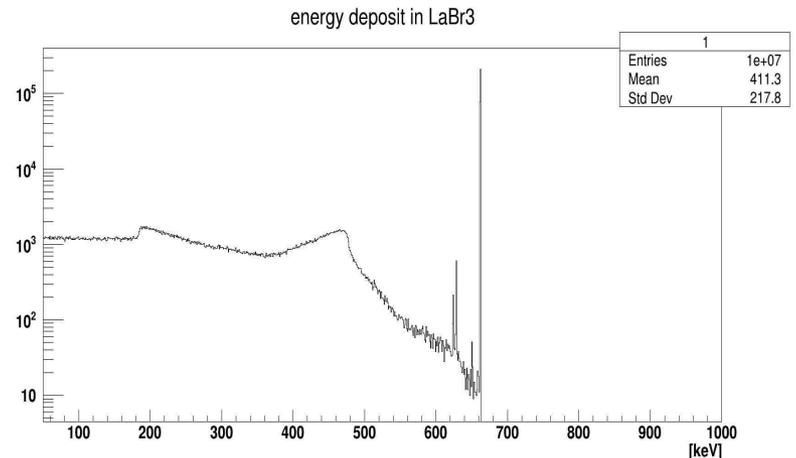
各探头能量分辨率随能量变化关系

CPD编号	a	b	c
Z01-1	1441.23	1.82796	0.00324
Z01-1	1441.23	1.82796	0.00324
Z01-2	1584.201	2.00721	0.00356
Z01-3	1465.093	2.13218	0.00299
Z01-4	1561.469	1.31261	0.00347
Z01-5	1625.036	1.55481	0.00358
Z01-7	1878.562	1.43516	0.00312
Z01-8	1473.293	2.27021	0.00293
Z01-9	1662.726	1.91368	0.0033
Z01-10	1595.902	1.99293	0.00317
Z01-11	1750.694	2.33807	0.00323
Z01-12	1875.557	1.46501	0.00374
Z01-13	1659.268	1.78803	0.00355
Z01-14	1630.388	2.71254	0.00312
Z01-15	1878.576	1.73258	0.00316
D01-01	1539.941	2.90571	0.00308
D01-02	1507.734	3.0113	0.00263
D01-03	1638.375	2.49971	0.00266
D01-04	1577.698	2.82532	0.00271
D01-05	1782.75	2.43252	0.00317

CPD标定——伽马探测效率



Cs-137 γ 能谱



模拟Cs-137 γ 能谱

- 从实验结果来看，CPD对于Cs-137（662keV） γ 探测效率是GRD对于 γ 探测效率的13.16%。由于GRD对于 γ 的绝对探测效率小于1，因此CPD对于 γ 的绝对探测效率小于13.16%，与模拟结果一致
- 满足指标中对 γ 探测效率（8keV~2MeV）小于20%的要求，可以实现对荷电粒子暴的有效甄别



试验及测试情况

正样阶段试验工作概况

验证类型	试验内容	验证对象	试验依据	试验评价	试验场所
力学试验	板级应力筛选	GRD前放（80）、CPD前放（20）、数采（10）、数管（2）、电源（2）	GECAM有效载荷正样件应力筛选试验大纲、细则	通过	513所
	验收级随机振动	载荷整机（2）	GECAM有效载荷正样件力学试验大纲、细则	通过	
	验收级正弦振动			通过	
	补充力学试验			通过	
热试验	板级应力筛选	GRD前放（80）、CPD前放（20）、数采（10）、数管（2）、电源（2）	GECAM有效载荷正样件应力筛选试验大纲、细则	通过	511所
	热循环试验、补充热循环试验	载荷电子学舱（2）	GECAM有效载荷正样件热试验大纲、细则	通过	
	热真空试验	穹顶舱（2）、载荷电子学舱（2）		通过	
EMC试验		载荷整机	GECAM有效载荷正样件EMC试验大纲、细则	通过	
组件质保试验		GRD探头组件、CPD探头组件	GECAM有效载荷GRD、CPD组件质保试验大纲、细则	通过	
标定试验	质子束流试验	GRD探头、CPD探头+正样标定系统	GECAM卫星GRD质子束流试验方案、GECAM卫星CPD质子束流试验方案	通过	兰州近物所
	系统级	GRD探头、CPD探头+正样标定系统	GECAM卫星GRD正样件标定试验方案、GECAM卫星CPD正样件标定试验方案	通过	高能所、计量院、空间中心

环境试验工作现场



穹顶舱热真空试验

电子学舱热真空试验



电子学舱热循环试验
2020/11/6

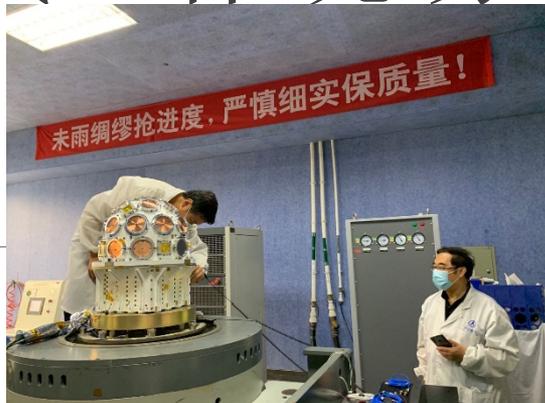
载荷力学试验

整星热试验

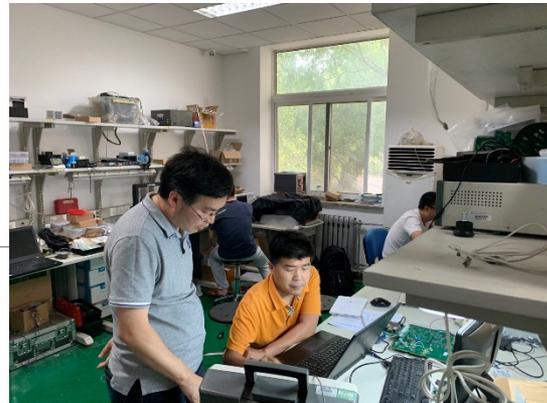
试验及测试工作现场



GRD晶体封装件入所验收



整机力学试验



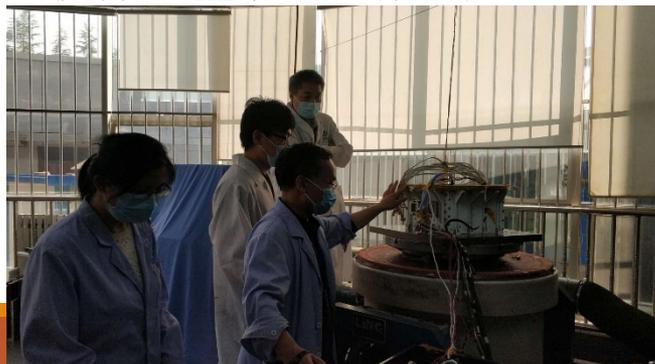
软件配置项测试现场



软件配置项测试现场



百米束线标定现场



应力筛选试验现场



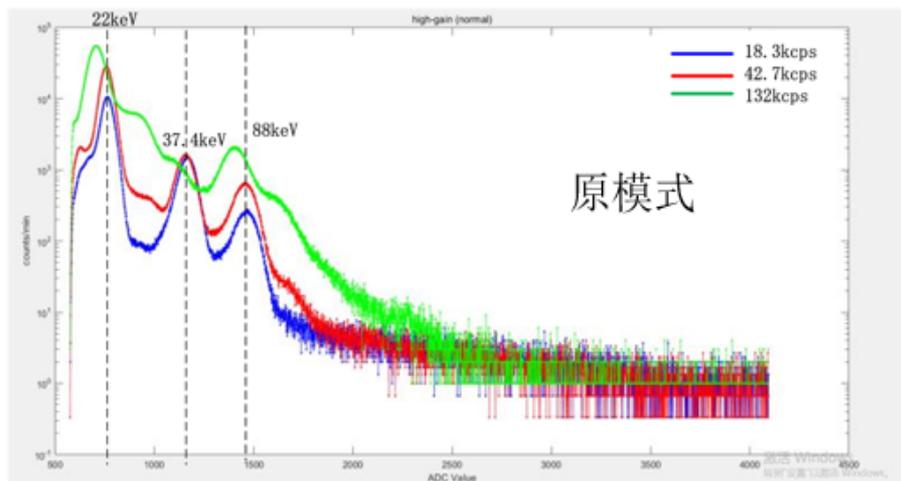
EMC试验现场



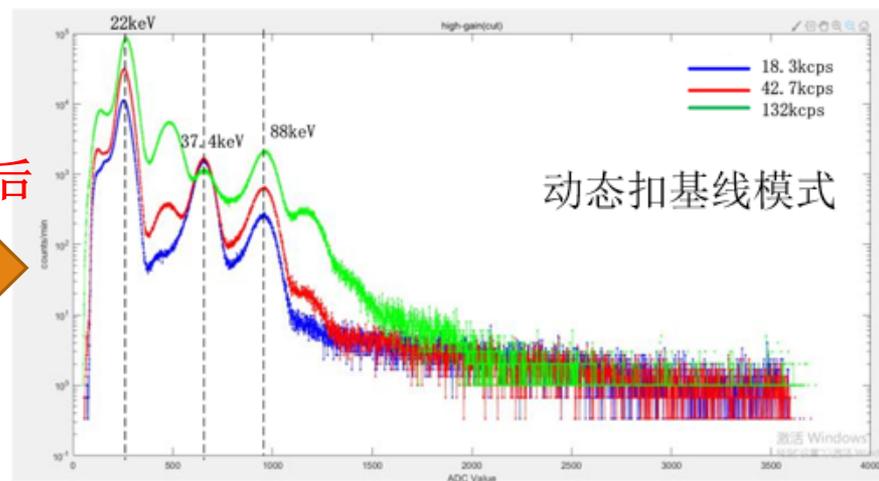
风雨无阻, 连夜转运设备

高计数率下的响应

使用Cd109的88keV峰对GRD探头在两种模式下的性能对比进行了测试



优化后



- 在非扣减基线模式下，高计数率下由于基线晃动会导致能谱出现一定程度的畸变，从而影响测量；
- 动态扣减模式下，即使放射源的计数达到132kcps也不会导致谱形畸变，**峰位变化小于2ADC道**

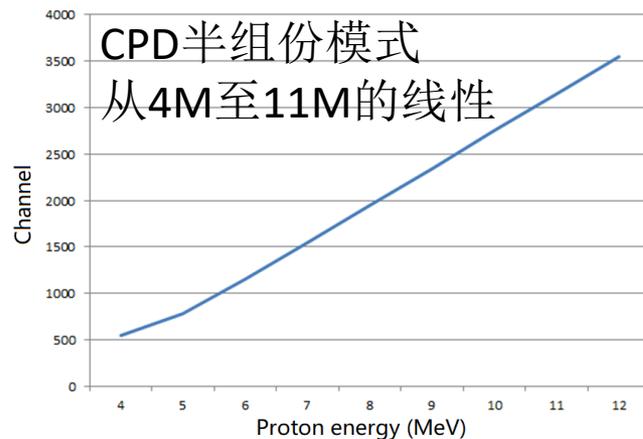
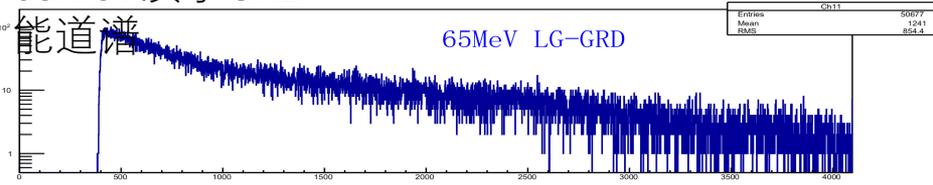
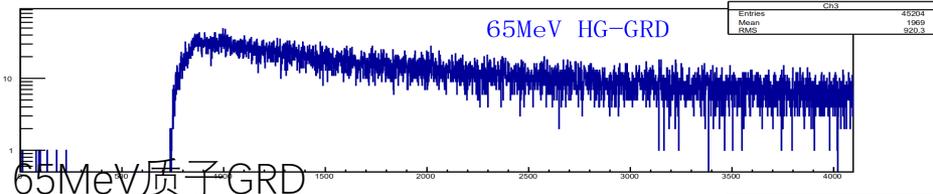
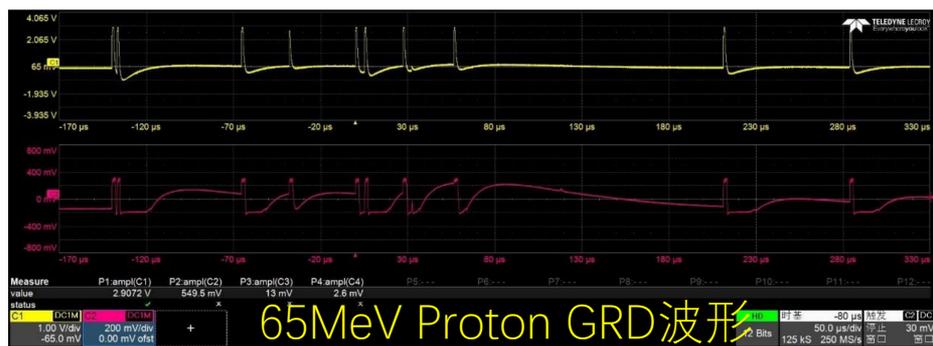
大信号响应测试

全组份在轨 29.5V-1.5V 波形信息统计 **—— 质子束流试验**

	HG 脉冲宽度	LG 脉冲宽度	电流
15MeV	20us	4us	1.23mA(7000 cnt cm ² /s)
35MeV	50us	4us	2.35mA(15000 cnt cm ² /s)
50MeV	70us	4us	2.44mA(11250 cnt cm ² /s)
65MeV	200us	10us	2.29mA(350 cnt cm ² /s)

结论:

1. 高能质子测试中信号的波形符合预期;
 2. 从 35MeV 到 65MeV 工作电流基本稳定在 2.3mA 左右;
 3. 能谱、超大信号的宽度谱与入射能量关系不明显;
- 探测器对大信号的响应能力符合设计要求**

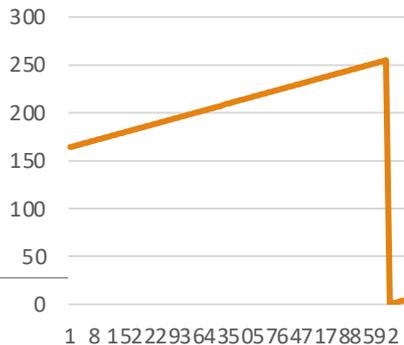


CPD对质子的响应符合设计预期, 达到最小电离之前, 有较好的线性

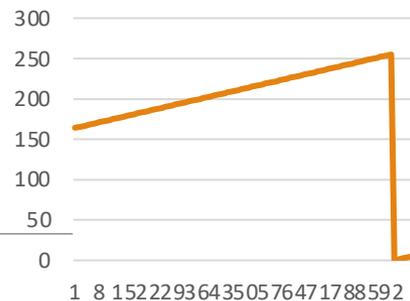
大数据量功能测试



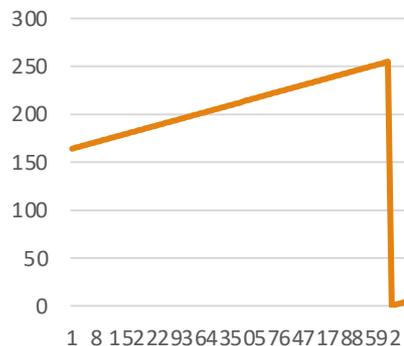
DAQ1遥测包计数



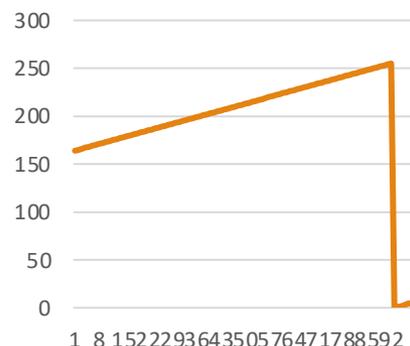
DAQ2遥测包计数



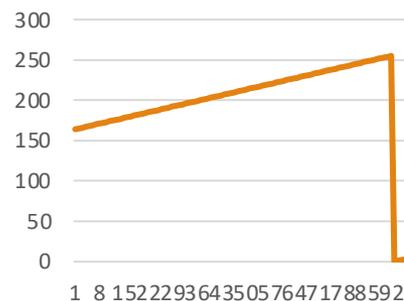
DAQ3遥测包计数



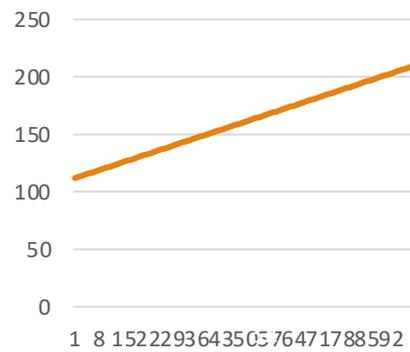
DAQ4遥测包计数



DAQ5遥测包计数



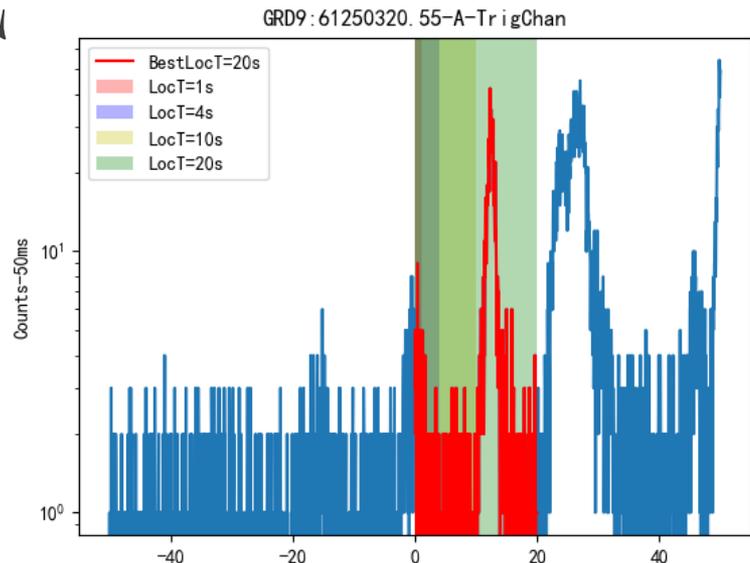
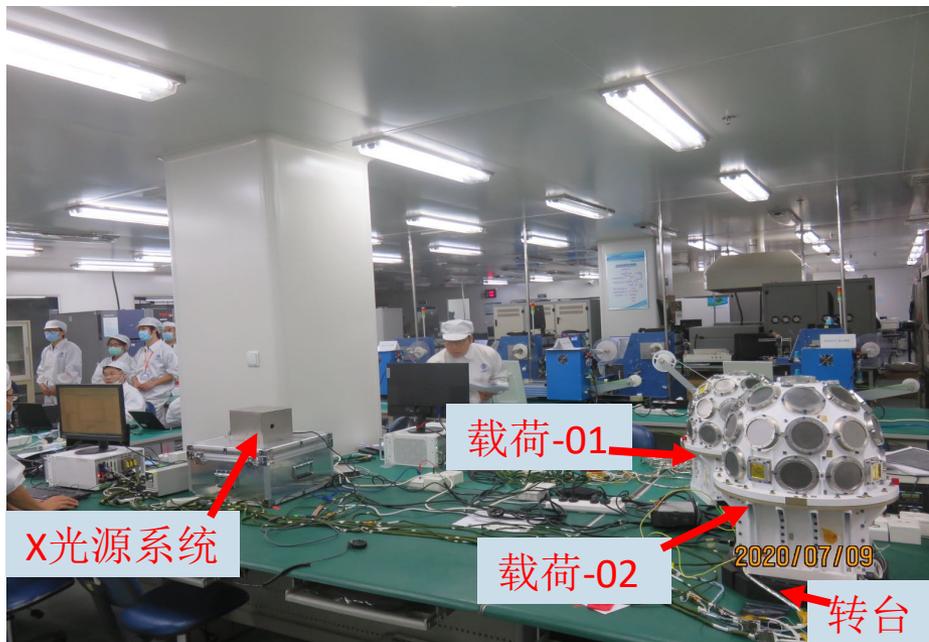
数管遥测包计数



结论:

1. 数采板的单板最大输出速率约为140kcnts/s
2. 数采板的单通道计数率达到最大计数率时, 不会对其他通道产生影响
3. 在高计数率情况下, 数管对各个数采板的数据的传输权重一致
4. 高计数率测试的结果符合设计预期

触发定位功能测试



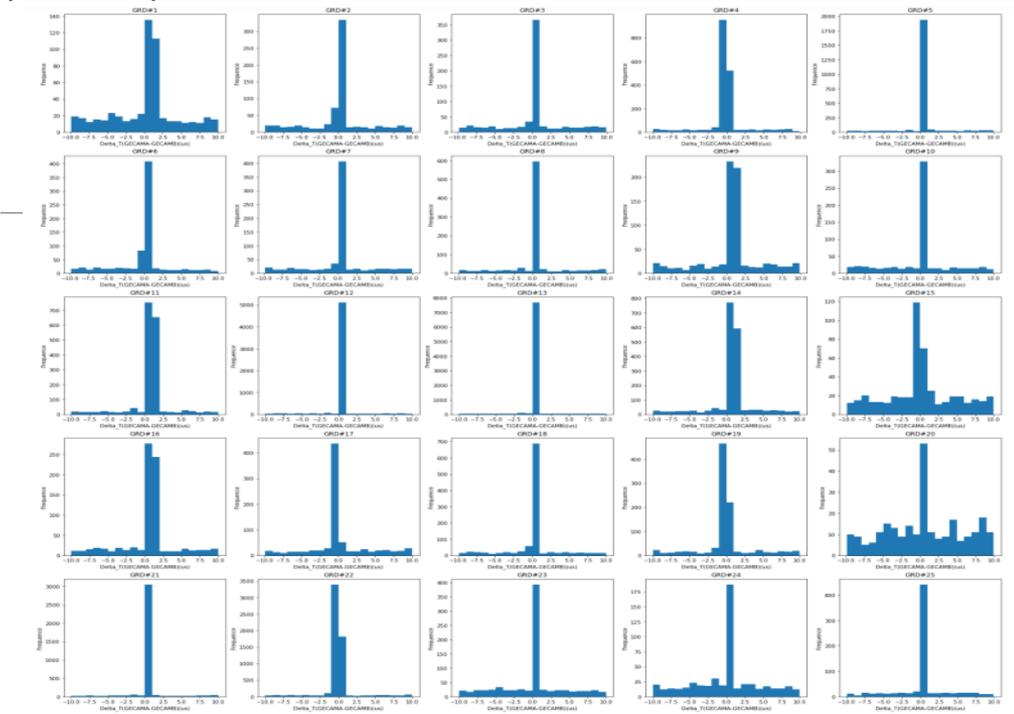
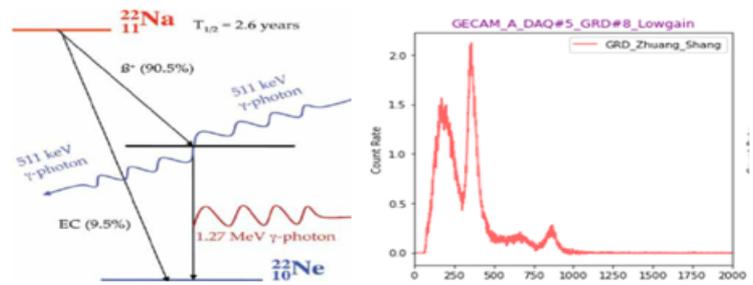
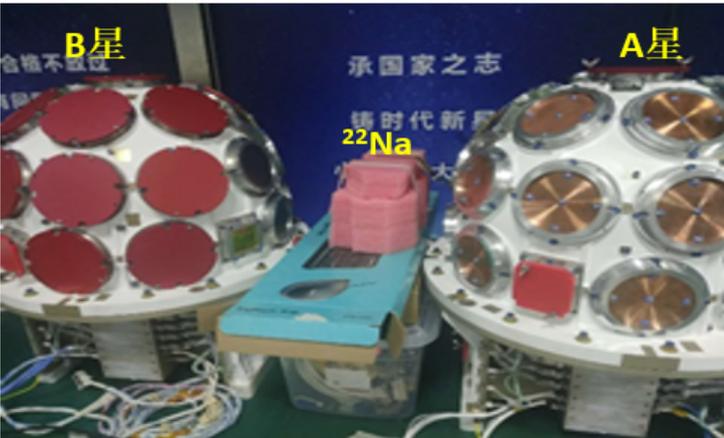
四种定位时标下的最佳定位时标计算

序号	测试种类/试验名称	时间	载荷和卫星状态	触发方式
1	验收触发定位专项测试	2020.07.09	载荷1/2+地检	X光管+转盘
2	触发&双星时延测试	2020.07.24-25	整星桌面联试	X光管+转盘
3	X光管触发定位测试	9月15日	整星桌面GRD 1-25 CPD 1-8	X光管模拟伽马暴
4	双星联合X光管触发定位测试	10月16日	整星测试	X光管模拟伽马暴

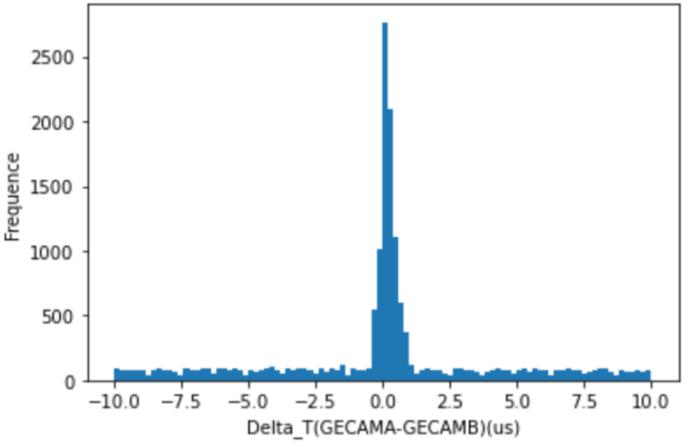
结论:

- 触发定位软件可实现对地面模拟伽马暴的有效触发和定位计算;
- 定位计算结果与X光源的入射方向的变化在趋势上相符

相对时间精度测试



A星GRD8探头与B星各个GRD探头之间时间差分布



双星GRD探头之间的时间差分布

结论:

- 3sigma误差范围内, **双星时间系统在约1us的范围内相符合**
- 满足设计指标的要求

指标符合性

项目	技术指标	指标要求	实际指标
整体指标	有效视场	$\geq 214^\circ$ (圆锥视场, 单星)	229° (载荷几何视场) 223.6° (地球遮挡后*)
	定位能力①	1° (规定的标称条件下)	0.4度
	功耗 (含热控)	$\leq 47.5\text{W}$ (平均); $\leq 52\text{W}$ (峰值);	主41.13W/备41.05W
	总质量 (含热控)	$46 \pm 0.5\text{kg}$	45.14kg (GRD含22个配重探头) /45.3kg (GRD全部真实探头)
	设计寿命	3年	3年
	可靠度	0.90 (EOL)	0.91 (EOL)
GRD探测器	数量*	≥ 20	25
	探测面积(单体)	$\geq 40\text{cm}^2$	45.36 cm^2
	探测能区	8keV~2MeV	5.9keV~4MeV
	能量分辨率FWHM	$< 18\% @ 59.5\text{keV}$	$12.1\% \sim 17.2\% @ 59.5\text{keV}$
	伽马射线探测效率	$> 50\% @ 8\text{keV}$	$78\% @ 8\text{keV}$
	死时间	$\leq 5\mu\text{s}$	$4\mu\text{s}$
CPD探测器	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	150 keV~7 MeV
	伽马射线探测效率	$< 20\% @ 8-2000\text{ keV}$	$< 7\% @ 8-2000\text{ keV}$
	死时间	$\leq 5\mu\text{s}$	$4.8\mu\text{s}$
载荷处理器	在轨触发、定位计算时间	$\leq 1\text{min}$	$< 1\text{s}$ (与长短触发有关)
	探测器相对时间精度	$< 0.5\mu\text{s}$	$< 0.12\mu\text{s}$
	双星定位时延	$\leq 10\mu\text{s}$ (参考)	$< 1\mu\text{s}$

总结&讨论

- GECAM卫星是空间科学先导二期首颗科学星，也是2020年发射的唯一一颗。受疫情影响，有效载荷的研制工作受到了极大挑战！
- 载荷团队团结一心，克服了疫情带来的巨大困难，不辱使命，完成了正样研制的所有工作，可靠性得到了全面验证，功能和性能指标全面满足科学需求。
- 卫星即将迎来出厂的重要节点，后续我们将继续以严谨细实的精神做好每件事，确保卫星发射入轨后以良好的状态工作，持续产出高质量科学数据。

会当振鼓击天浪
高挂长帆越星海

谢谢！