

GRID天格计划与二号星进展

天格计划学生团队

清华大学导师团：曾鸣、冯骅、曾志、田阳、仓基荣

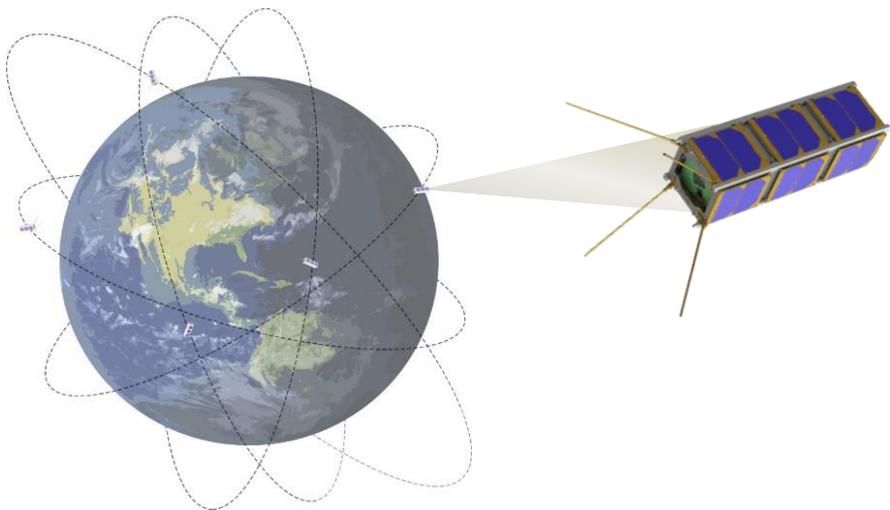
清华大学工程物理系、天文系



2020/11/01

M. ZENG, Tsinghua University, 第二届GECAM研讨会·北京

“天格计划”



Gamma Ray Integrated Detectors (GRID)

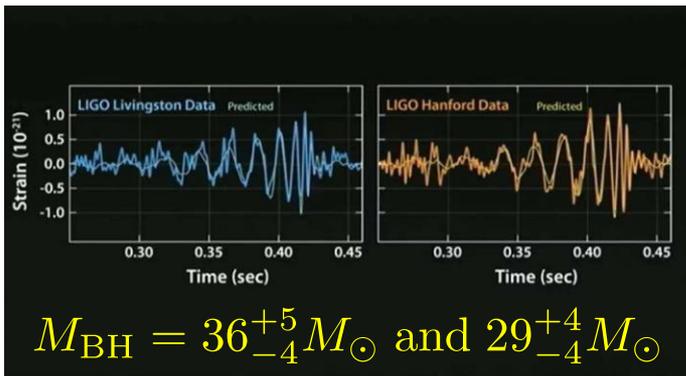
基于立方星的伽马射线空间探测网络

“天格计划”是一个以学生为主体的、面向基础科学前沿的科研实践项目，也是一个理工学科交叉的基础科学人才培养项目。

PART ONE

学生选题：“前沿驱动、学科交叉”

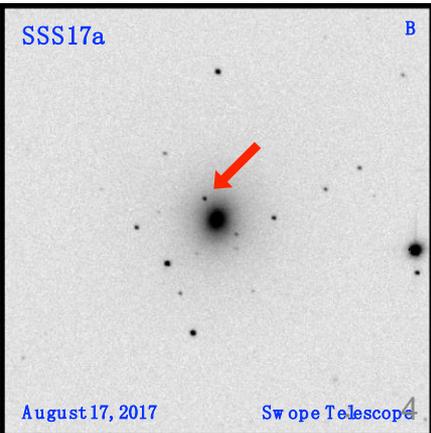
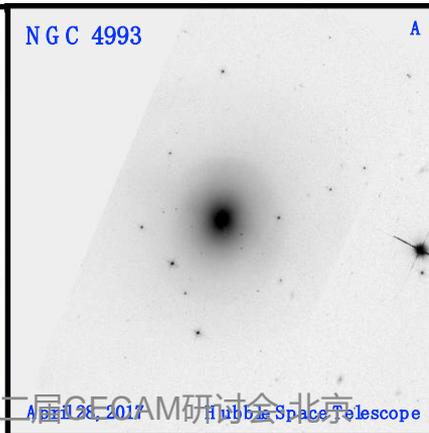
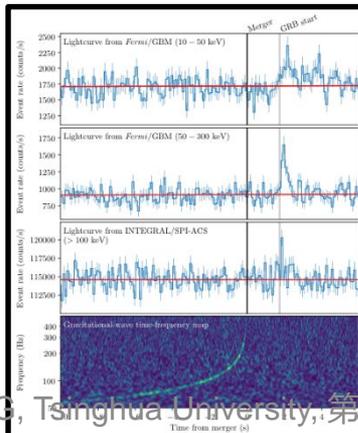
天文学迎来新时代——多信使天文学



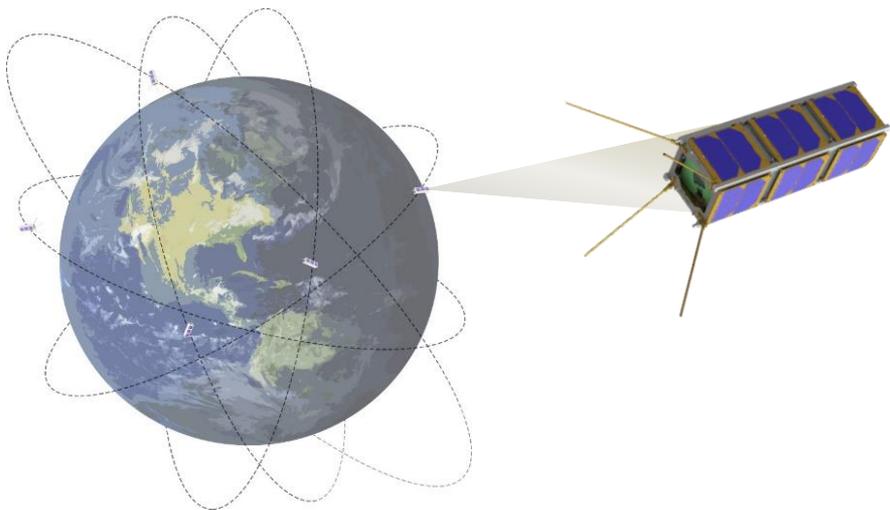
- 2015年9月14日
- 第一次飞跃
- 人类首次探测到引力波GW150914
- 双黑洞并和

- 2017年8月17日
- 第二次飞跃 (意义更大的一步)
- 人类首次探测到引力波电磁对应体GW170817
- 双中子星并和

- 验证引力波速度
- 验证了中子星并和可以产生伽马暴
- 解决了重元素的合成渠道的问题
- 提供了测量哈勃常数的新渠道
-
- 开启了“多信使天文学”
 - 天体物理研究迎来新契机



天格计划 - 本科生自主提出, 力所能及



Gamma Ray Integrated Detectors (GRID)
基于立方星的伽马射线空间探测网络

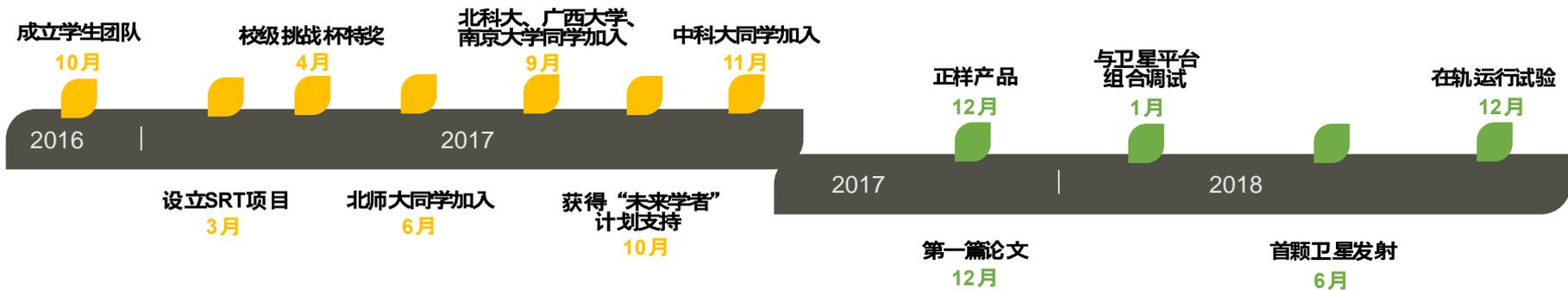
- 2016年10月 本科生自主提出
(早于GW170817一年)
- 闪烁晶体+SiPM探测器
(核辐射探测专业知识)
- 立方星载荷电子学
(核电子学与单片机专业知识)
- 10-24颗立方星组网
(标准化平台、成本低、可行性好)
- 全天全时覆盖、有定位能力

PART TWO

自主实施：“学生主体、立足培养”



天格计划 - 发展历程



学生团队（50余名本科生）：

- ✓ 工程物理系
- ✓ 物理系
- ✓ 航空航天学院
- ✓ 精密仪器系
- ✓ 电子系
- ✓ 机械系
- ✓

专家讲座交流



与陈雁北教授交流

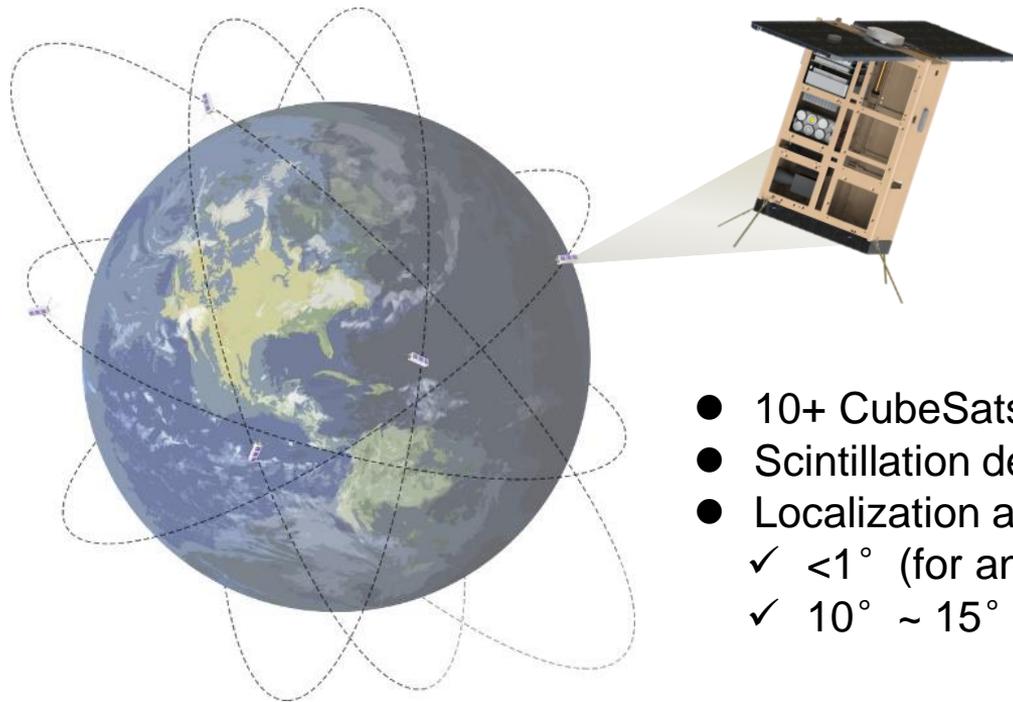


2016年~2017年的四个晚上
四次专家讲座



与梁恩维教授交流

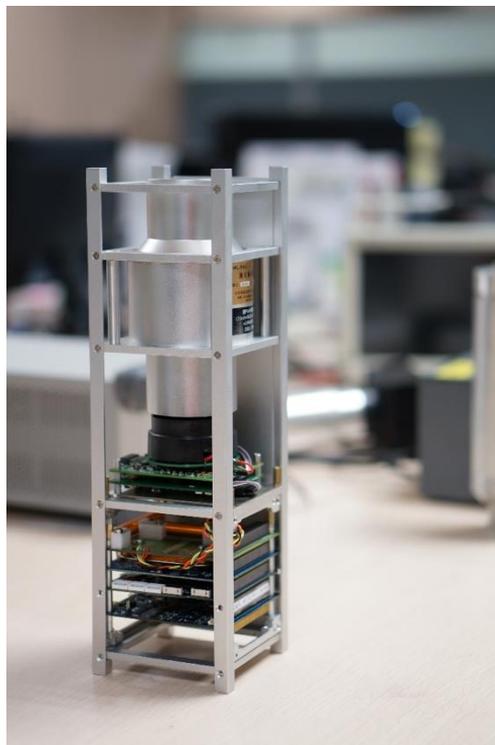
The GRID Concept



- 10+ CubeSats in LEO
- Scintillation detector, $\sim 60 \text{ cm}^2$ each
- Localization accuracy for GRBs within 200 Mpc
 - ✓ $< 1^\circ$ (for an on-axis event, $\sim 0.14 \text{ yr}^{-1}$)
 - ✓ $10^\circ \sim 15^\circ$ (for a GRB 170817A like event, $\sim 5 \text{ yr}^{-1}$)

GRID (Gamma-Ray Integrated Detectors)

第一代 (原型) – 2017年清华挑战杯特奖



学生团队:

- 近百次学术讨论;
- 两万字科学建议书
- 物理模拟与误差分析



溴化镧探测器

- 伽马射线探测
- 前放、高压及分压等

读出电子学

- 模数转换
- 波形甄别

OBC

- 星上数据处理
- 中央控制

GPS

- 获取位置信息
- 时间同步

电池组及电源管理模块

磁力矩器

- 姿态测控

UHF/VHF收发器

如何发一颗卫星？



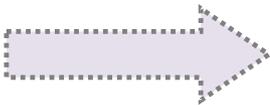
科学性？ 可靠性？ 成本？



探测器：10 keV~1 MeV
(专门优化探测器结构)



电子学：可靠、集成度高
(大哥大变手机)

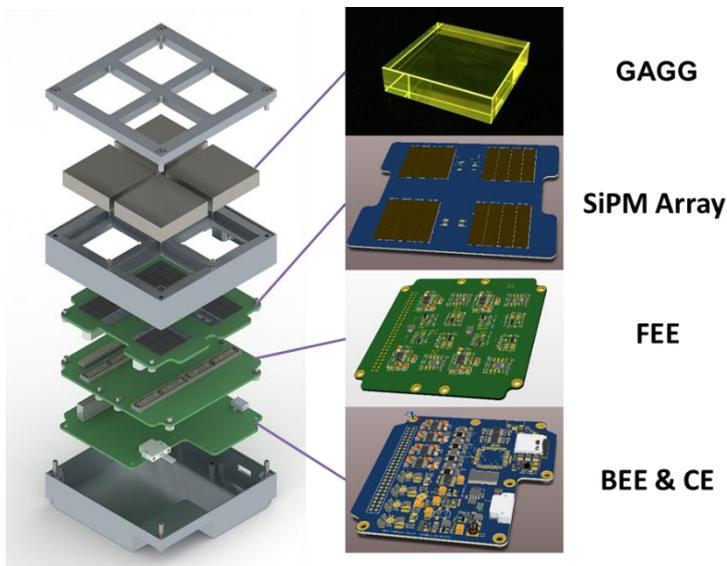


体积：0.5 U (10 cm×10 cm×5 cm)
(月饼盒大小)

第二代天格载荷



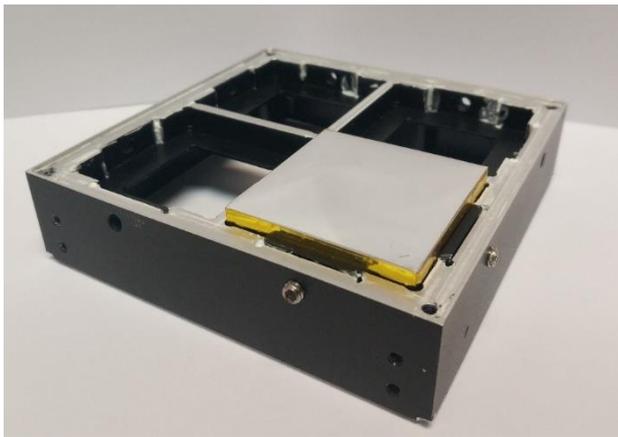
| Specifications | |
|-----------------------|------------------------------------|
| Size | 0.5U (10×10×5 cm ³) |
| Weight | 780 g |
| Power | 3 W |
| Detection area | ~ 58 cm ² |
| FOV | 2π |
| Energy range | 10 keV ~ 2 MeV |
| Dead time | ~ 10 us |
| Background count rate | ~ 500 Counts/s |
| Telemetry | ~ 1 GB/day |



6U 立方星 (CubeSat)

学生自主完成设计与调试

Scintillator & Package

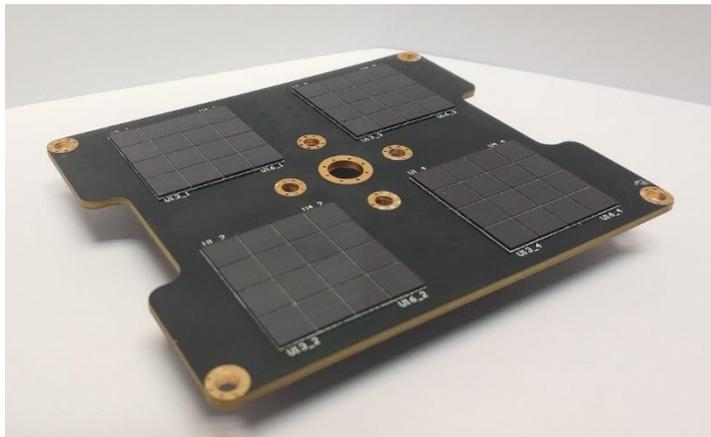


Every single scintillator is fixed by two pieces of slider propelled by a screw, to ensure its reliability and integrity during launch.



The Coupling Surface

SiPM & Coupling

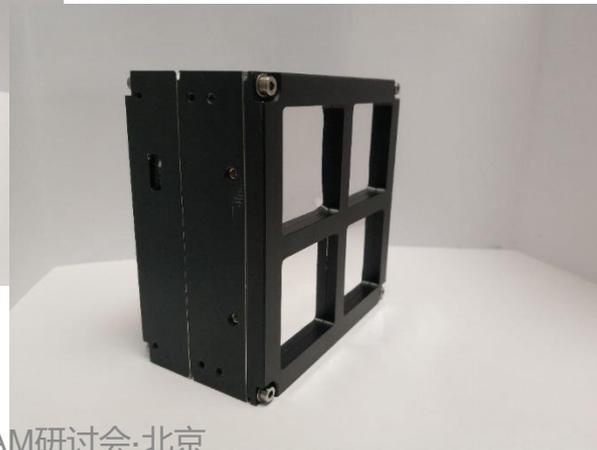
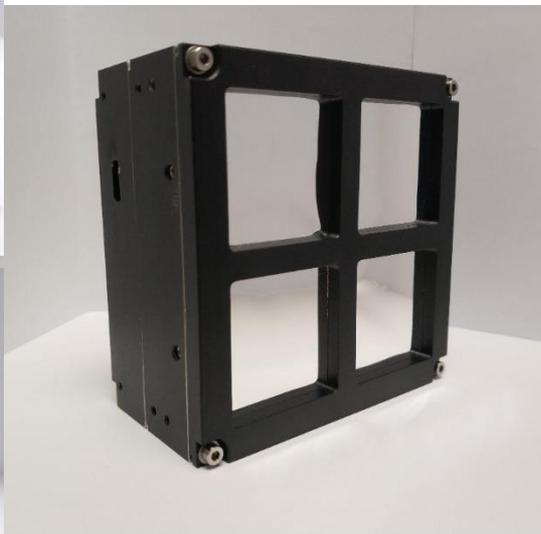


Four SiPM Array at the top.
Each array is composed by 4×4
SenSL J-60035 SiPM.
Four temperature detection chips at
the bottom.



Coupling scintillator and SiPM with
optical cement
SiPM signal output through two
high density connector

第二代天格载荷



第二代天格载荷



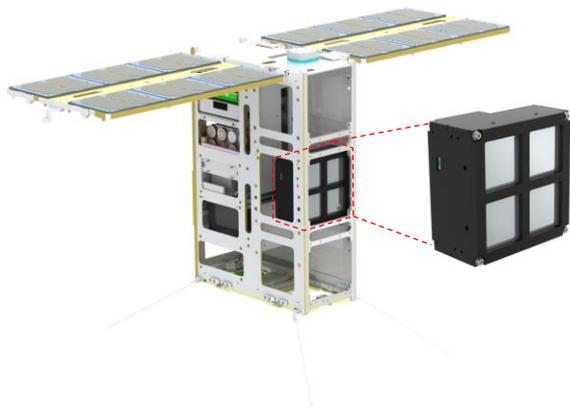
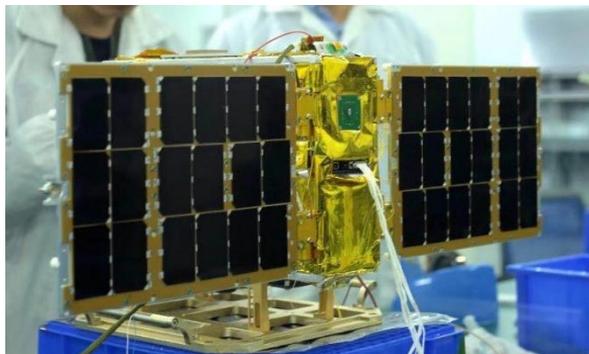
Designation

Spacetrack catalog number **43663**
COSPAR ID 2018-083-B

Orbit 509×524 km, 97.5°
Country/organization of origin China

Date (UTC) 29 October 2018 00:43
Launch site Jiuquan Satellite Launch Center, China
Launch vehicle Chang Zheng 2C

第二代天格载荷



审定名

空间飞行器目录编号 43663
国际卫星标识符 2018-083-B
空间飞行器目录名称 OBJECT B

卫星详情

轨道 510 x 523 km, 97.5°
类别 不详
来自国家/组织 中国
固有亮度 (食分) ?

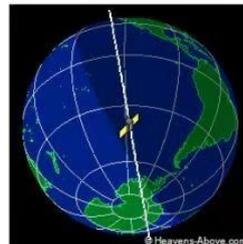
发射升空

日期 (协调世界时 UTC) 2018年10月29日 0:43
发射场 酒泉卫星发射中心, 中国
发射用火箭 长征二号丙

OBJECT B - 轨道



从轨道平面上方俯视



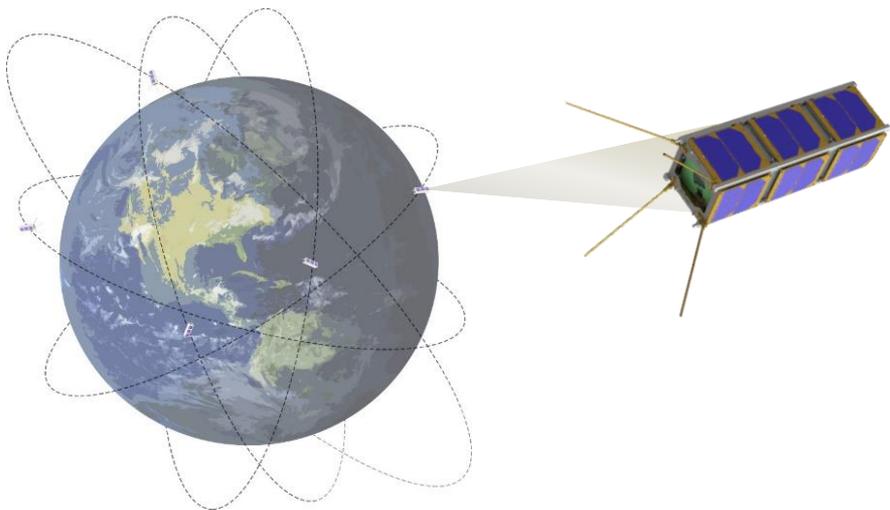
从卫星上方俯视



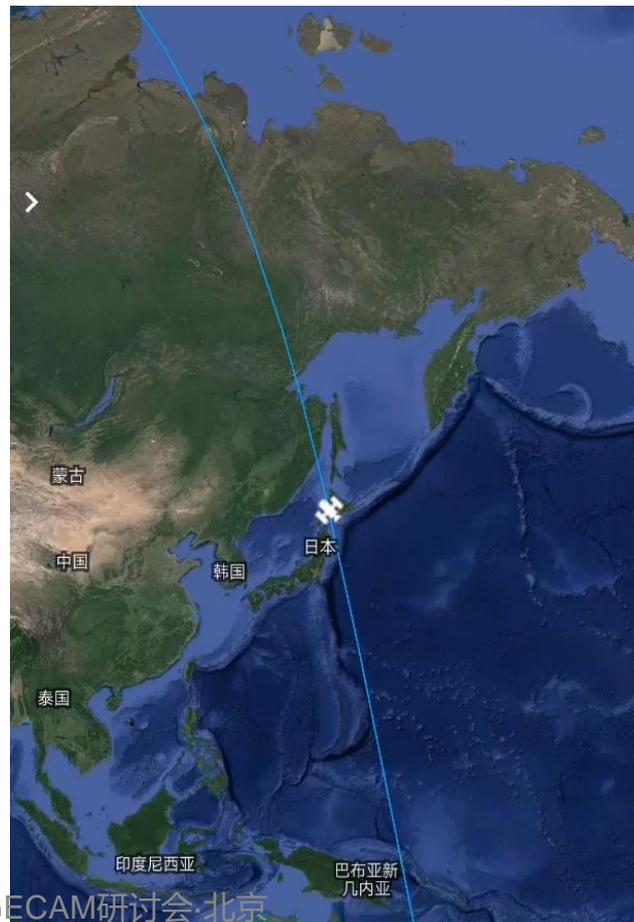
星下点轨迹

2018年10月29日 上午8:43 成功发射升空!

First CubeSat of GRID



Gamma Ray Integrated Detectors (GRID)
基于立方星的伽马射线空间探测网络



天格计划探测器研发



- GRID_DAQBoard
- GRID_DAQBoard_20180225
- GRID_DAQBoard_20180324
- GRID_DAQBoard_20180524
- GRID_DAQBoard_20180717
- 多道
- 立方星2号电路板
- 立方星2号电路板-5四通道-ADC、PD
- 立方星2号电路板-20170826
- 立方星2号电路板-20170830
- 立方星2号电路板-20170831
- 立方星2号电路板-20170903
- 立方星2号电路板-20170908
- 立方星MCA板 (地面调试版) - 副本
- 立方星MCA板 (地面调试版) 无盲孔

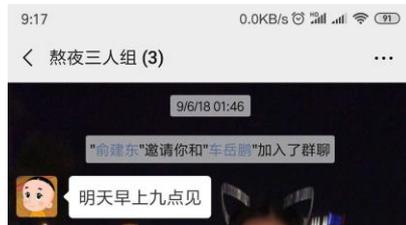
大版本迭代三次,
小版本数十次



2018.9.13 凌晨 1:05 工物馆门口

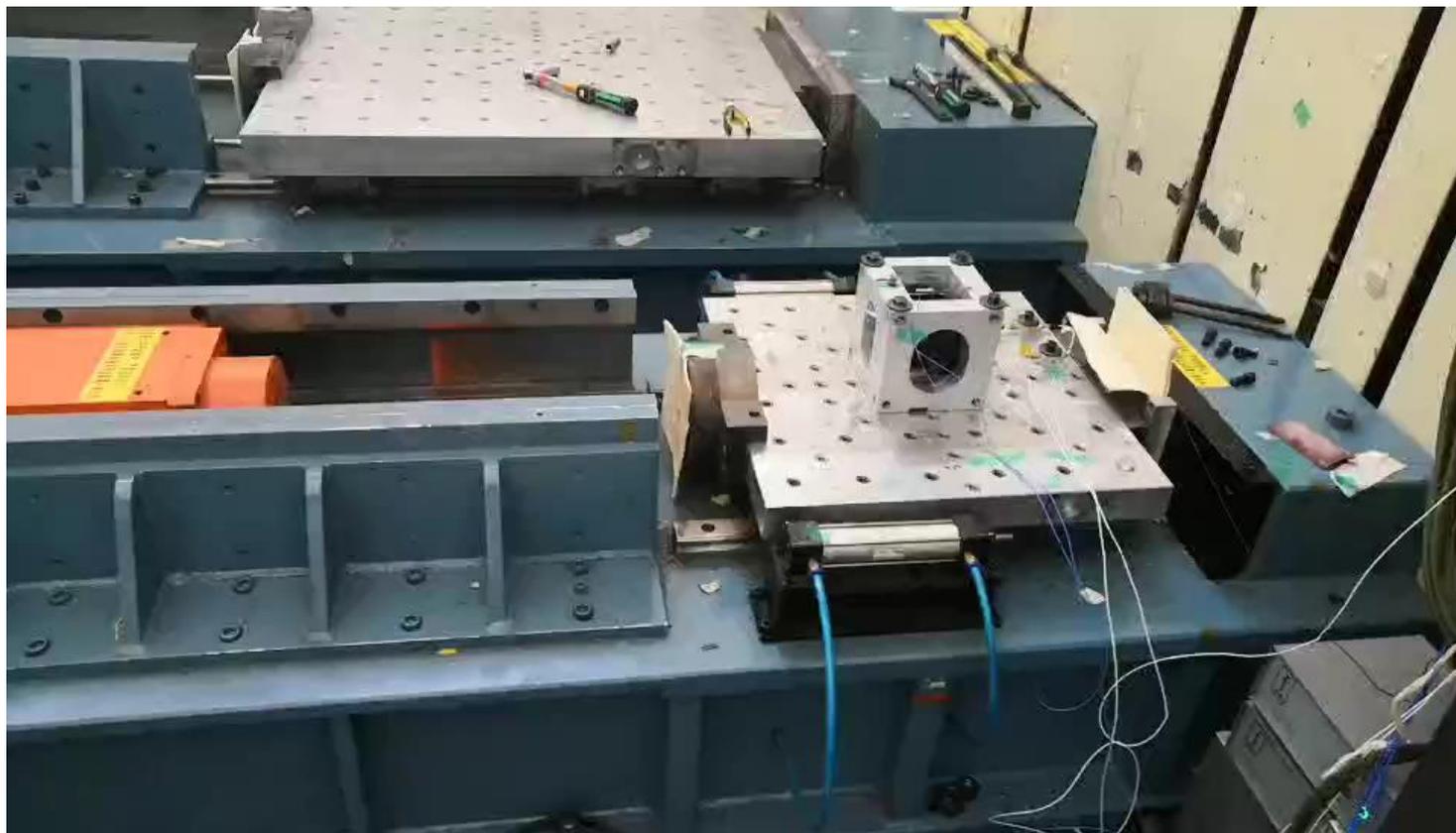


2017年某个周末的上午
在走廊中举行的会议

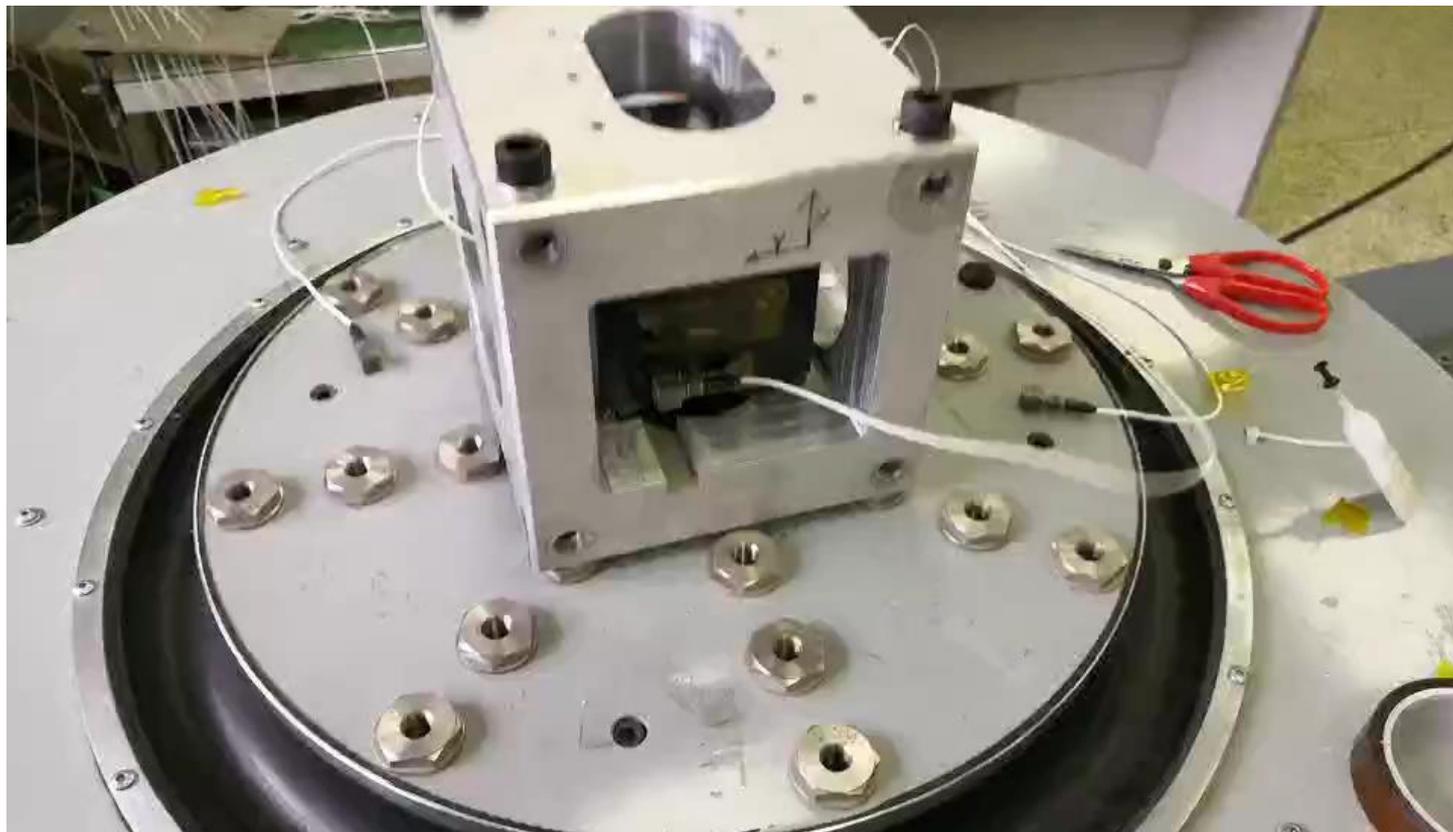


2018.9.6 凌晨 1:46

Space qualification tests

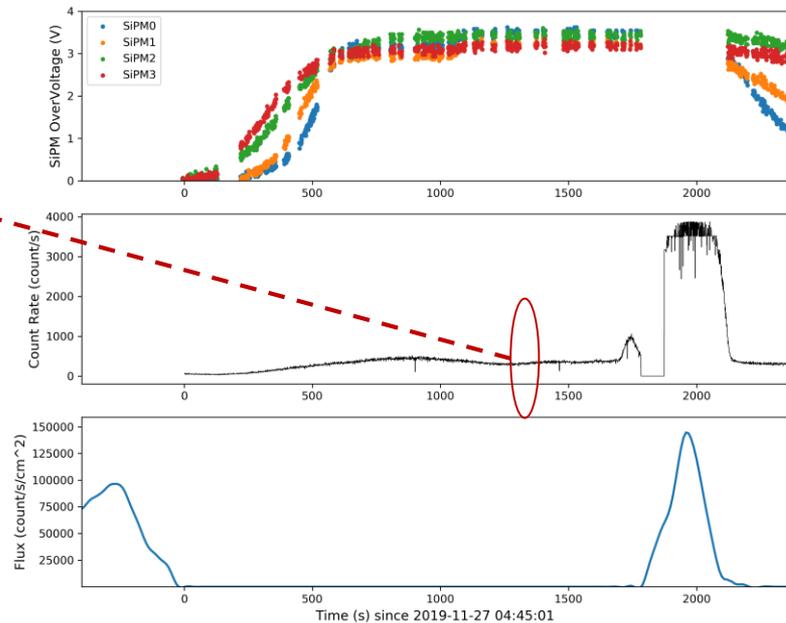
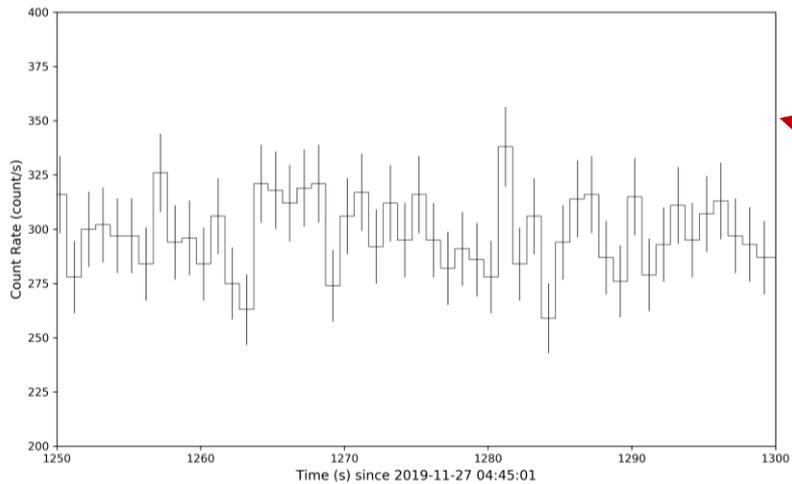


Space qualification tests





出现问题、解决问题……正常工作





真正的学生项目

- 每年面向本科生招新，学生成员滚动成长（5个年级、7个院系、60余人）
- 平均每周4-5次交流讨论（完全自组织、热情高涨）
- 学生在国内外学术会议的口头报告
 - 2017.06.21, 北京, 香山会议-引力波天体物理与引力波电磁对应体
 - 2017.08.05, 乌鲁木齐, 中国天文学年会
 - 2017.10.19, 北大, Transients from compact objects
 - 2017.11.05, 武汉, 暂现源相关天文现象的观测与研究
 - 2018.07.18, 美国洛杉矶, 国际空间科学大会 (COSPAR)
 - 2019.09.08, 青海, 中国天文学年会



学生发表的第一篇论文



arXiv.org > astro-ph > arXiv:1907.06842

Search...

Help | Advance

Astrophysics > Instrumentation and Methods for Astrophysics

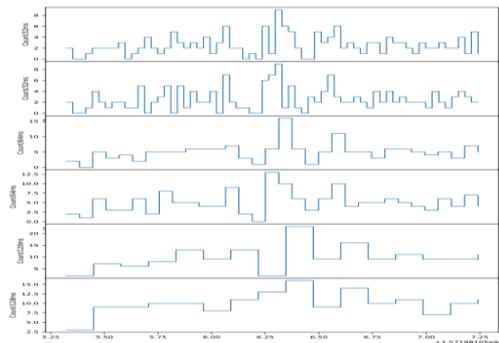
GRID: a Student Project to Monitor the Transient Gamma-Ray Sky in the Multi-Messenger Astronomy Era

Jiaying Wen, Xiangyun Long, Xutao Zheng, Yu An, Zhengyang Cai, Jirong Cang, Yuepeng Che, Changyu Chen, Liangjun Chen, Qianjun Chen, Ziyun Chen, Yingjie Cheng, Litao Deng, Wei Deng, Wenqing Ding, Hangci Du, Lian Duan, Quan Gan, Tai Gao, Zhiying Gao, Wenbin Han, Yiyang Han, Xinbo He, Xinhao He, Long Hou, Fan Hu, Junling Hu, Bo Huang, Dongyang Huang, Xuefeng Huang, Shihai Jia, Yuchen Jiang, Yifei Jin, Ke Li, Siyao Li, Yurong Li, Jianwei Liang, Yuanyuan Liang, Wei Lin, Chang Liu, Gang Liu, Mengyuan Liu, Rui Liu, Tianyu Liu, Wanqiang Liu, Di'an Lu, Peiyibin Lu, Zhiyong Lu, Xiyu Luo, Sizheng Ma, Yuanhang Ma, Xiaoqing Mao, Yanshan Mo, Qiyuan Nie, Shuiyin Qu, Xiaolong Shan, Gengyuan Shi, Weiming Song, Zhigang Sun, Xuelin Tan, Songsong Tang, Mingrui Tao, Boqin Wang, Yue Wang, Zhiang Wang, Qiaoya Wu, Xuanyi Wu, Yuehan Xia, Hengyuan Xiao, Wenjin Xie, Dacheng Xu, Rui Xu, Weili Xu, Longbiao Yan, Shengyu Yan, Dongxin Yang, Hang Yang, Haoguang Yang, Yi-Si Yang, Yifan Yang, Lei Yao, Huan Yu, Yangyi Yu, Aiqiang Zhang, Bingtao Zhang, Lixuan Zhang, Maoxing Zhang, Shen Zhang, Tianliang Zhang, Yuchong Zhang, Qianru Zhao, Ruining Zhao, Shiyu Zheng, Xiaolong Zhou, Runyu Zhu, Yu Zou, Peng An, Yifu Cai, Hongbing Chen, Zigao Dai, Yizhong Fan, Changqing Feng, Hua Feng, He Gao, Liang Huang, Mingming Kang, Lixin Li, Zhuo Li, Enwei Liang, Lin Lin, Qianqian Lin, Congzhan Liu, Hongbang Liu, Xuewen Liu, Yinong Liu, Xiang Lu, Shude Mao, Rongfeng Shen, Jing Shu, Meng Su, Hui Sun, Pak-Hin Tam, Chi-Pui Tang, Yang Tian, Fayin Wang, Jianjun Wang, Wei Wang, Zhonghai Wang, Jianfeng Wu, Xuefeng Wu, Shaolin Xiong, Can Xu, Jiandong Yu, Wenfei Yu, Yunwei Yu, Ming Zeng, Zhi Zeng, Bin-Bin Zhang, Bing Zhang, Zongqing Zhao, Rong Zhou, Zonghong Zhu (collapse list)

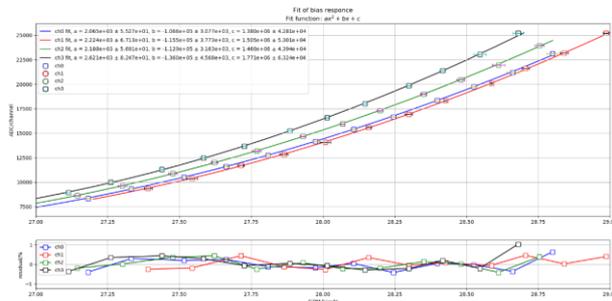
(Submitted on 16 Jul 2019)

包括来自12所高校的96名学生，有大量本科生的贡献

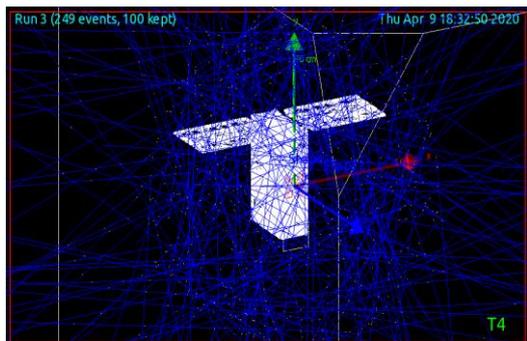
2020 疫情期间



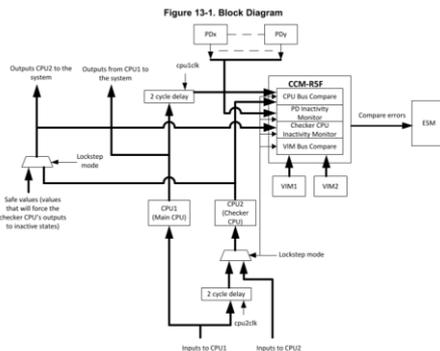
“天格计划” 一号星的在轨数据处理Pipeline
徐大成 (大二) 等4名本科生



“天格计划” 二号星的测试与定标
高怀众 (大四) 等2名本科生



“天格计划” 空间环境的物理模拟 (大创)
卢迪安 (大四) 等2名本科生



“天格计划” ARM双核CPU的抗辐照研究 (大创)
张斌斌 (大四)

天格计划 – 特色与理念



- 学科交叉：工程 & 科学
- 团队协作：“真刀真枪”做科学工程
- 从课程到真的会做，本科生能力可及
- 鼓励挑战前沿、培育国际视野：兴趣 & 勇气

PART THREE

现状与未来：
学生团队、多校多星、天格联盟

天格联盟 – 核科学&天文学 合作育人



澳门科技大学



北京大学



北京科技大学



北京师范大学



广西大学



兰州大学



南京大学



武汉大学



厦门大学



中国科技大学



中山大学



清华大学

多学科交叉的指导教师团队 (20+人)

- ✓ 引力波: 朱宗宏 (北师大)、蔡一夫 (中科大) 等
- ✓ 伽马暴: 戴子高、张彬彬 (南大)、张冰 (北大)、熊少林 (高能所) 等
- ✓ 探测器电子学: 封常青 (中科大)、刘聪展 (高能所)、周荣&王忠海 (川大) 等

天格联盟 – 核科学&天文学 合作育人



2018年3月28日，天格计划第一次导师讨论会，20所兄弟院校和科研单
位的30余名专家、教授参加和交流讨论

天格联盟 – 核科学&天文学 合作育人

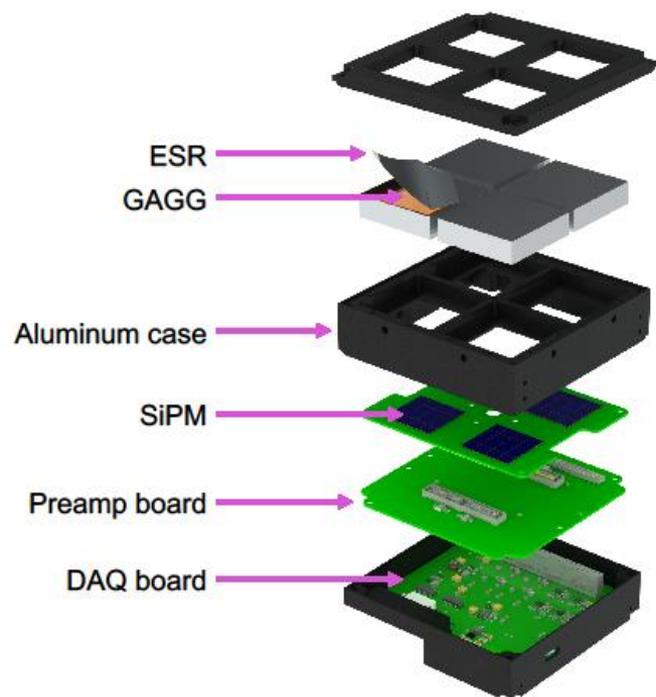


2019年12月8日，“天格计划” 2019年年会暨天格联盟成立会议

PART FOUR

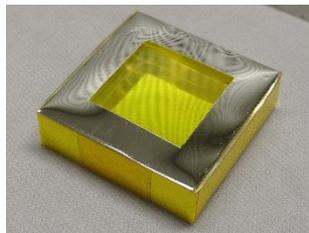
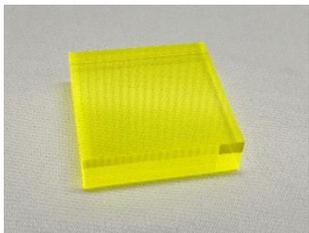
“天格计划” 二号星进展

探测器结构及主要性能参数



| | 天格01设计值 | 天格01实际值(在轨) | 天格02实际值(地面) |
|-----------|----------------------|--|--|
| 体积 | 0.5U | < 0.5U ($9.4 \times 9.4 \times 5 \text{ cm}^3$) | < 0.5U ($9.4 \times 9.4 \times 5 \text{ cm}^3$) |
| 质量 | / | ~ 780 g | ~ 780 g |
| 功耗 | 3 W | Typ. 2.4 W Max. 3 W | Typ. 2 W Max. 2.8 W |
| 探测面积 | ~ 58 cm ² | / | / |
| 视场 | 2 π | Depend on attitude | / |
| 能量范围 | 10 keV ~ 2 MeV | 40 keV ~ 2 MeV | Lower threshold < 15 keV Upper threshold ~ 2 MeV |
| 死时间 | 10 μ s | ~ 50 μ s | ~ 20 μ s |
| 本底 计数率 | ~ 500 cps | Norm. ~ 200 cps SAA > 3000 cps | / |
| 数据量 | ~ 1 GB/day | ~ 64 MB/day | / |

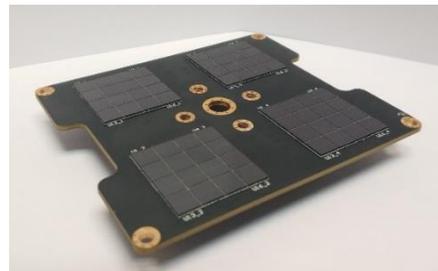
GAGG闪烁体 + SiPM光电转换



包裹ESR反射膜（厚度约 65 μm ）

| | |
|--------|---------------------------------------|
| 体积 | $38 \times 38 \times 10 \text{ mm}^3$ |
| 光产额 | 46000 ph/MeV |
| 密度 | 6.63 g/cm^3 |
| 等效原子序数 | 54 |
| 能量分辨率 | 6% @662 keV |
| 潮解 | 否 |

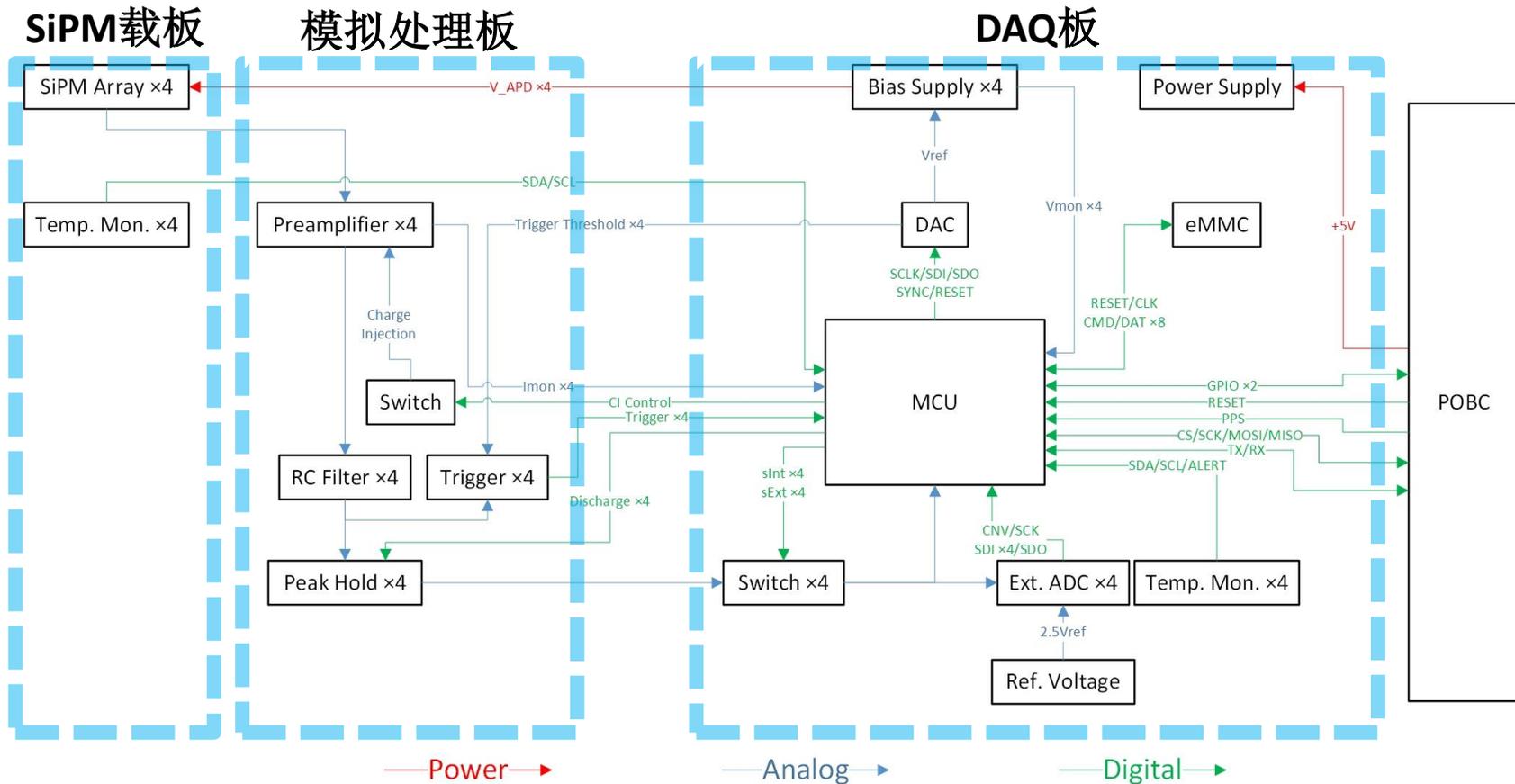
Values from C&A Corporation



SensL Micro-J 60035 SiPM芯片
与天格SiPM载板

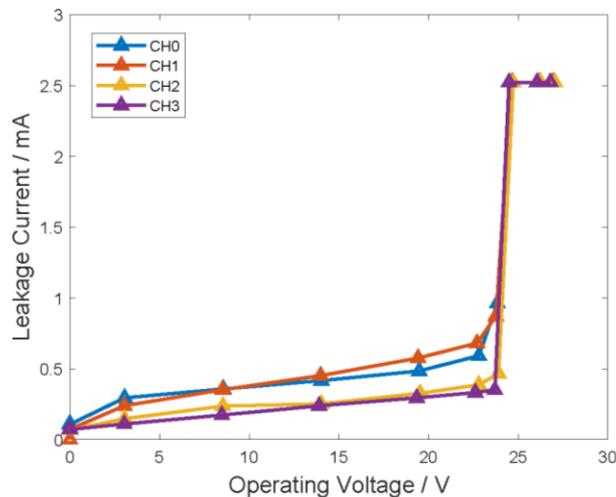
| | |
|--------------------------|----------------------------------|
| 工作电压 | $\sim 30 \text{ V}$ |
| 光子探测效率PDE GAGG发射光谱内平均 | $> 25\%$ |
| 暗计数率 | $\sim 150 \text{ kHz/mm}^2$ |
| 雪崩电压随温度变化率 | $21.5 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ |

电子学系统框图





优化SiPM漏电流监测电路



2019.04 IV曲线扫描结果

天格01在轨近两年，SiPM受辐照损伤影响，漏电流增大了两个量级以上，达到mA量级，超出原有监测范围。

为了实现全寿命周期下的漏电流监测，修改监测电路，损失一部分测量精度，增大监测上限至3.3mA。

同时，在SiPM两端设电压监测点，可以精确监测SiPM的实际反偏电压。

遗留问题：电流测量精度可能不足以通过IV曲线扫描测量SiPM工作点。后续可能通过提高精度或设计双增益来提高动态范围。

基于RTOS实时操作系统重制MCU固件



- μ C/OS-III特点:

- 可剥夺型实时内核
- 完全开源, 适合教学和科研
- 丰富而可裁剪的扩展功能模块
- 顶层与底层真正分离, 便于移植
- 源码通过多个行业的安全性认证



Real-Time Kernels: μ C/OS-II and μ C/OS-III

μ C/OS-II and μ C/OS-III are preemptive, highly portable, and scalable real-time kernels. Designed for ease of use on a huge number of CPU architectures, these kernels are a key component of the μ C/OS real-time operating system.

- 由清华大学工物系邵贝贝教授最早引入中国, 是目前国内嵌入式领域使用最广泛的实时内核

- 《嵌入式实时操作系统 μ C/OS-II》邵贝贝 译, 2003, 累计发行5万多册
- 《嵌入式实时操作系统 μ C/OS-III》宫辉、曾鸣等 译, 2012, 累计发行近2万册

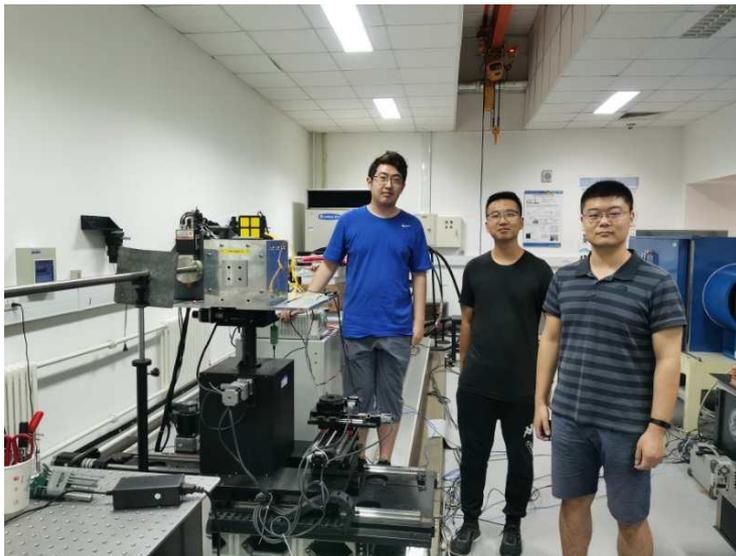
- 使用 μ C/OS的益处:

- 提升代码的规范性和可维护性 (以任务分离)
- 提升了代码的可移植性, 有利于未来硬件平台的升级 (软硬件代码分层)
- “开源” 契合天格计划属性, 同时有利于团队协作开发

- 其它要点:

- 保留原有对外接口及指令, 兼容天格01
- 保留Bootloader + APP的架构, 以备固件升级

天格计划 – 载荷定标实验

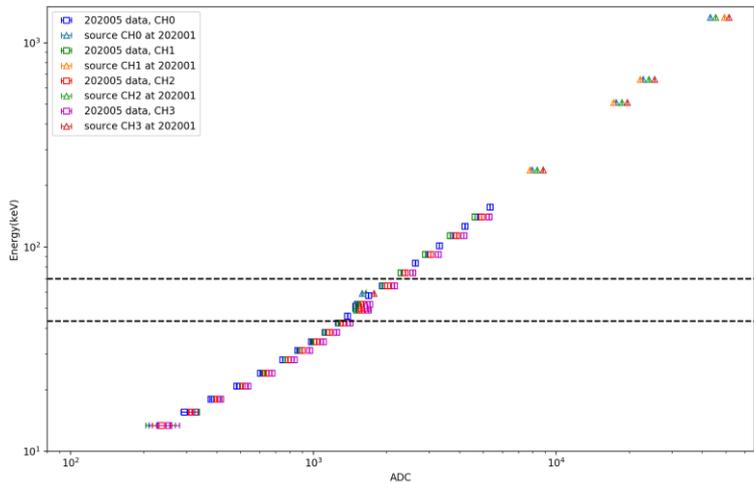


X光机实验

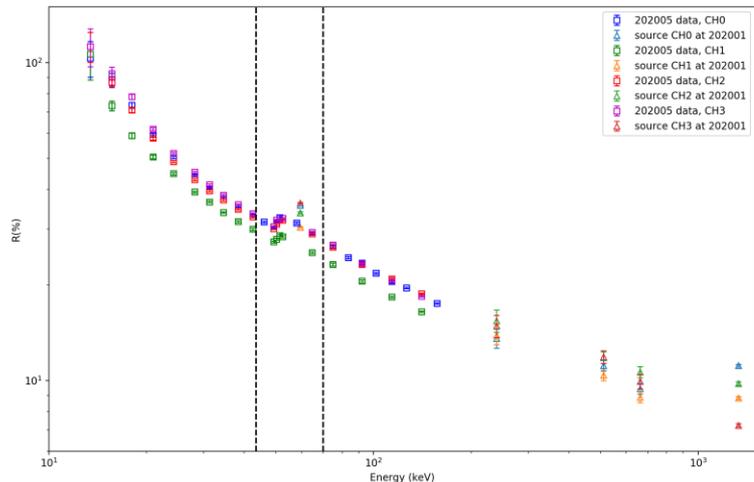


角响应实验

天格计划 – 载荷定标实验

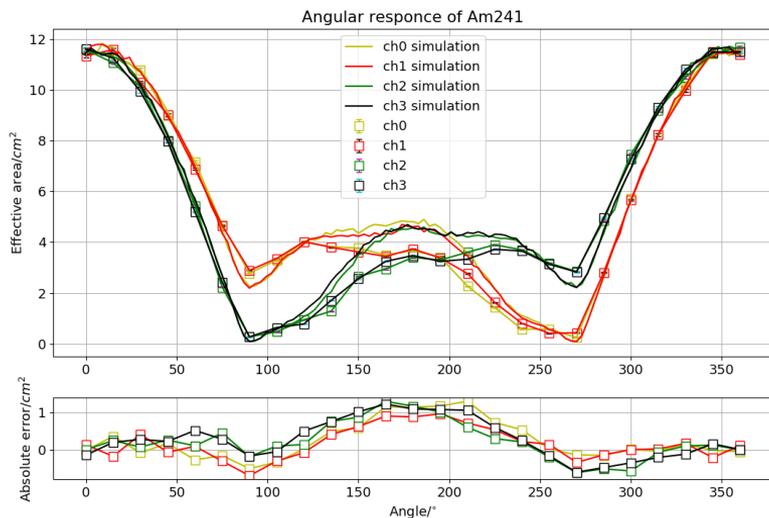


能量-道址关系

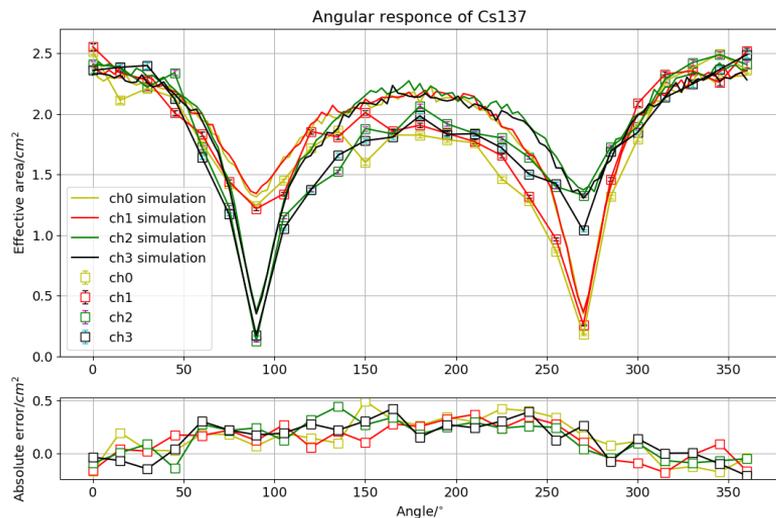


能量分辨率

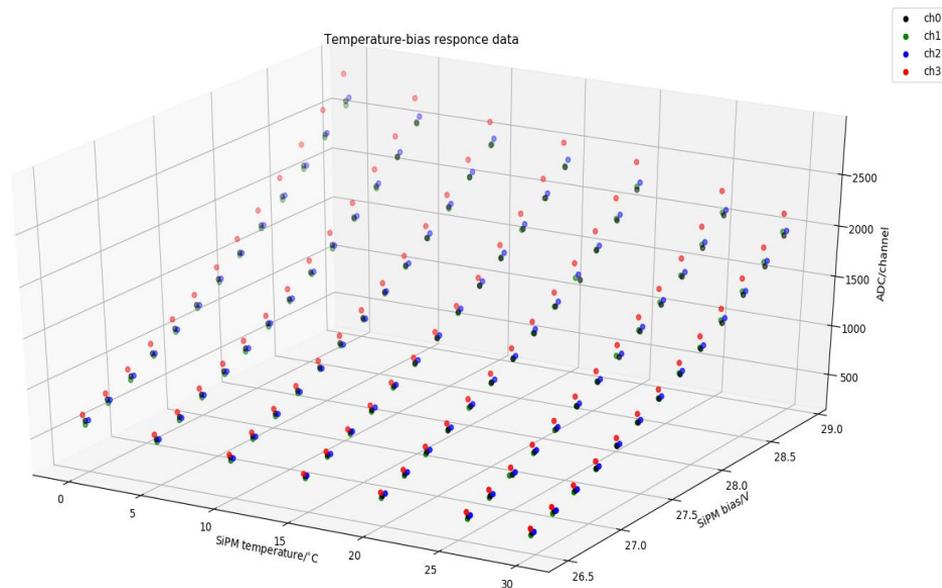
天格计划 - 载荷定标实验



角响应-²⁴¹Am

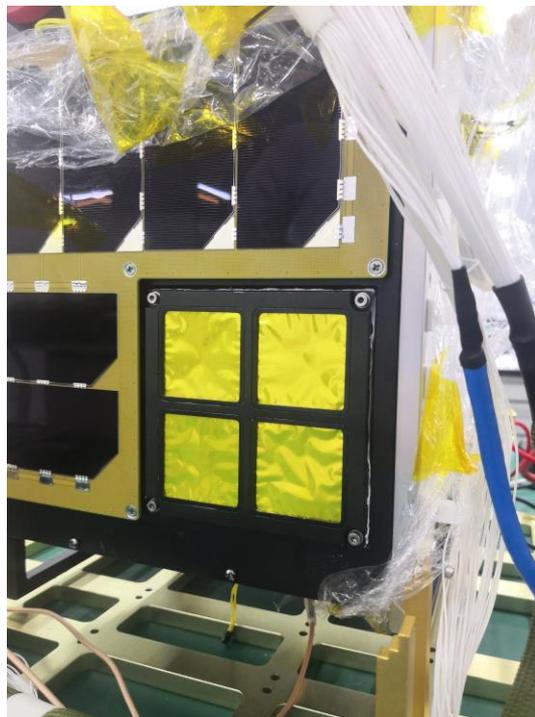
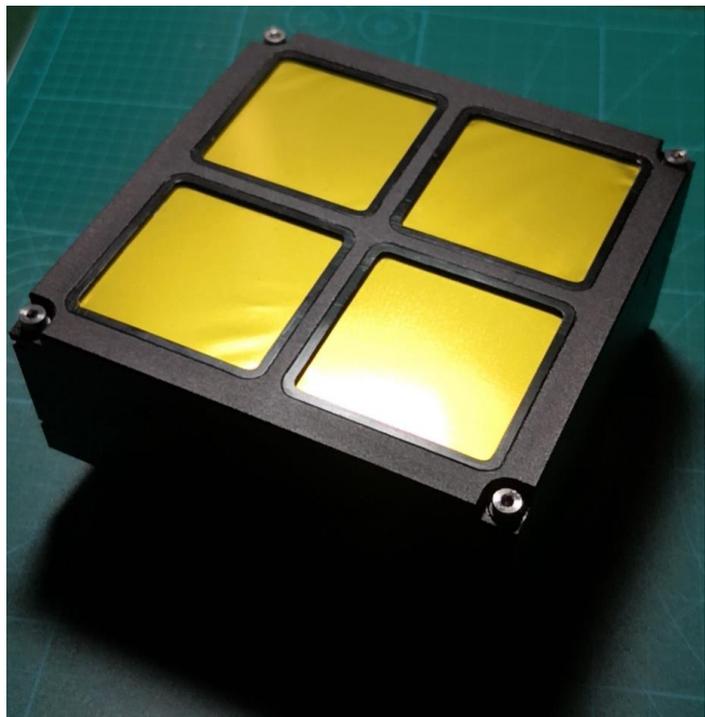


角响应-¹³⁷Cs



温度偏压响应-202005

天格02 Flight Model



PART FIVE

展望：基础科学拔尖人才的培养



- “天格计划”是一个以学生为主体的、面向基础科学前沿的科研实践项目，也是一个理工学科交叉的基础科学拔尖人才培养项目。
- “天格计划”强调理工结合、学科交叉的人才培养理念、知识技能的综合运用能力、学生自我科研管理的领导力和团队能力，力争培养未来大科学工程的领军人才。
- “学生主体、立足培养、学科交叉、探索前沿”为指导方针

天格计划 – 实施模式与目标



- **三个阶段目标**

2018: 1颗星, 1个月运行或探测10个伽玛暴事例, 开源软硬件 (清华), 着手组建天格联盟

2019-2020: 3颗星 (各校总计), 100个伽玛暴事例, 与LIGO引力波协同探测, 10-20个高校加入联盟

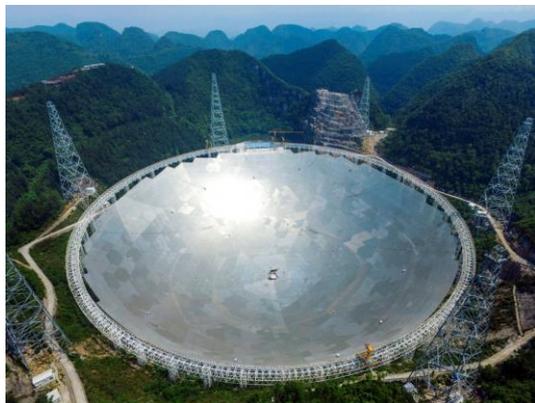
2021-2025: 10颗星 (各校总计), 稳定组网, 探测与引力波成协的伽玛暴事例, 吸引国际高校参与

- **国际影响力**

瑞士EPFL洛桑高工、匈牙利科学院、德国海德堡大学、日本东京大学.....

欧洲Hermes、美国NASA BurstCube

Leaders in future large science projects



FAST



Insight-HXMT



eXTP

谢谢！