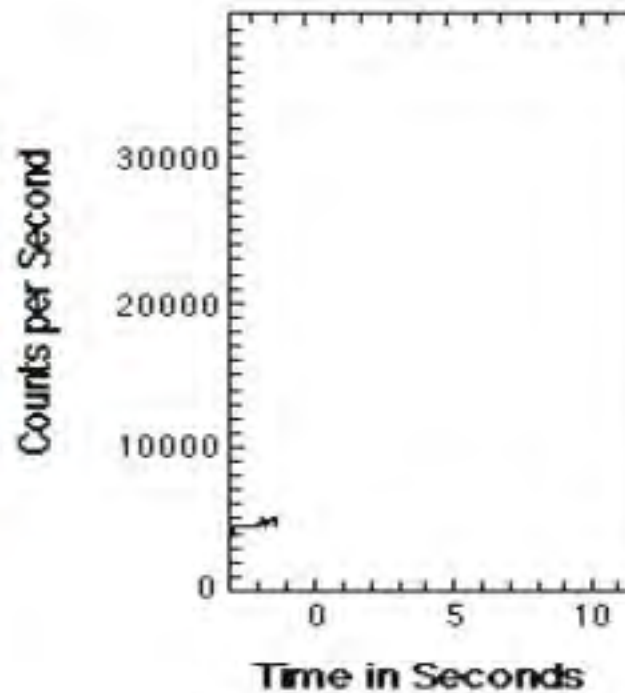
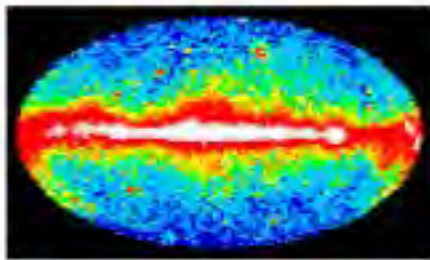


中国空间站 伽马暴偏振探测仪POLAR-2介绍

代表POLAR-2项目团队
中国科学院高能物理研究所

伽马射线暴——恒星爆炸或致密天体并合

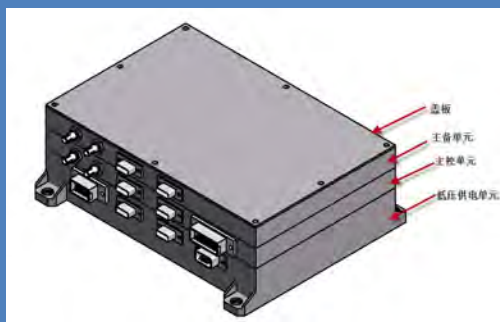
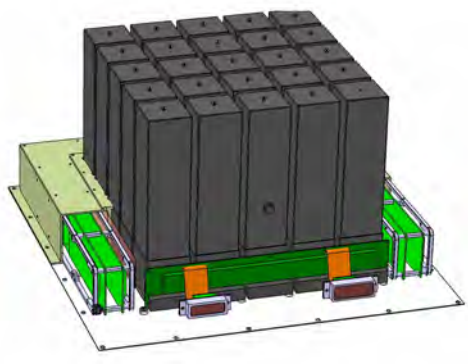
- 20世纪60年代首先由美国的Vela卫星（用于监视其他国家进行核试验时产生的伽马射线）偶然发现
- 特点：空间分布各向同性，持续时间从几毫秒至上千秒不等，爆发时释放能量极高(1个常规伽马暴在1秒中释放的能量相当于太阳一生释放的能量总和)



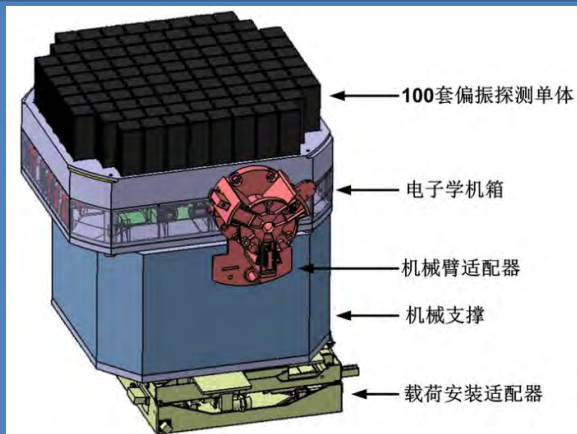
为什么 侧重于伽马暴的偏振探测？

- 偏振探测 原理上并不复杂，但要提高探测效率和探测灵敏度却不容易。
- 即便是伽马暴这么强的爆发，信噪比好，探测也不容易
- 伽玛暴的发现已经过去四十多年，但它仍是一个未解之谜，它的研究目前仍是天体物理研究的前沿。
- 目前对伽玛暴的测量主要集中在对天体辐射的能量、强度和方向（位置）的方面，对偏振的测量还远远不够。
- 伽玛暴偏振的测量对伽玛暴辐射机制的研究十分重要。

POLAR2 是POLAR的升级换代版

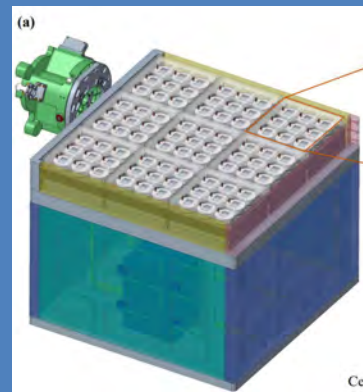


POLAR: 5*5模块,
探测面积约430cm²,
总质量约35kg

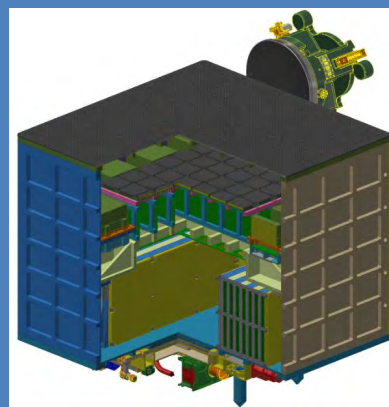


欧方载荷HPD

HPD: 探测面积大于
2000cm²; 150kg
LPD: 探测面积大于
300cm²; 160kg
BSD: 探测面积大于
400cm²; 140kg



中方载荷LPD



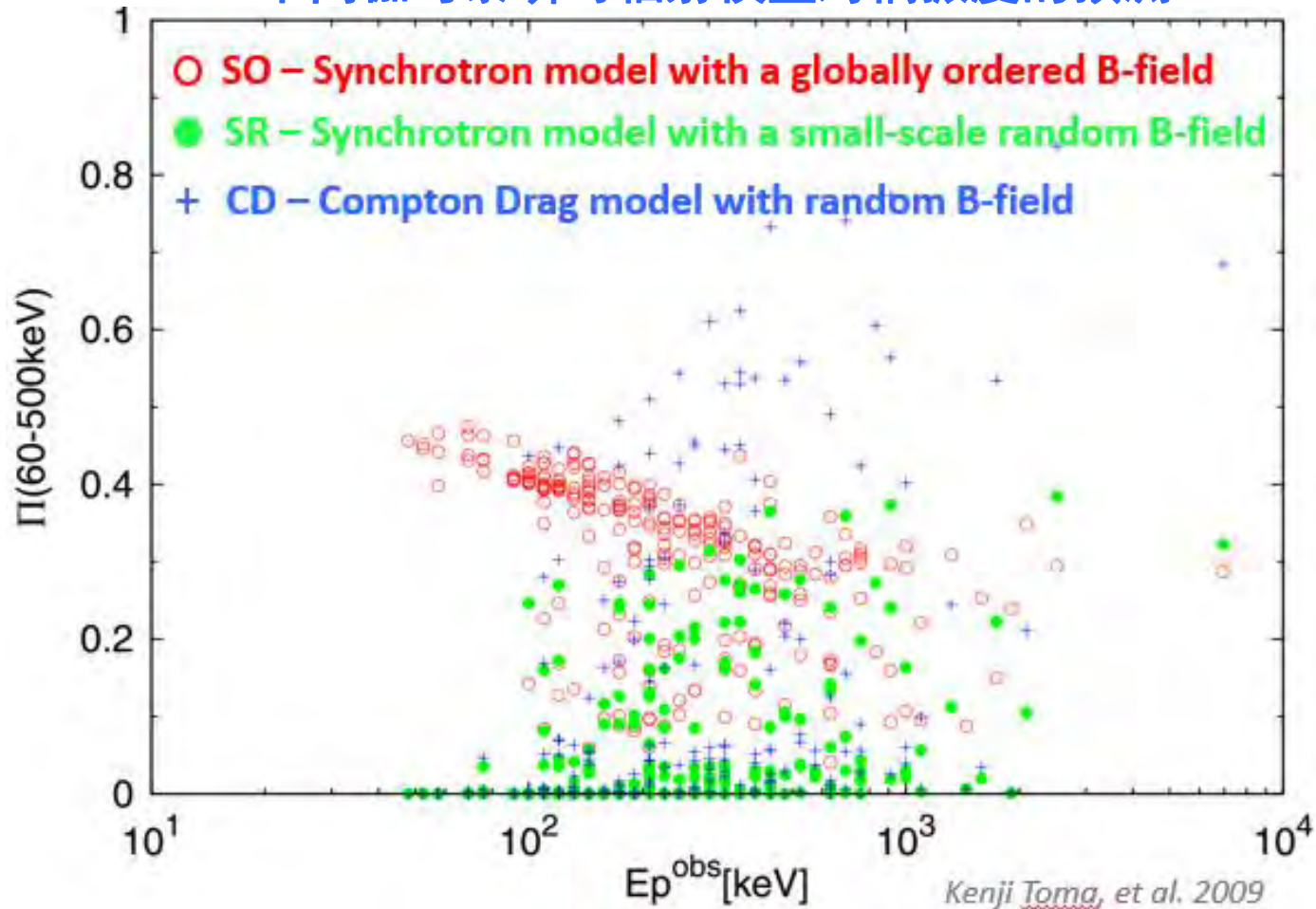
中方载荷BSD

POLAR2

伽马暴瞬时辐射机制研究

➤ 偏振作为伽马暴瞬时辐射机制研究的重要探针

不同伽马暴瞬时辐射模型对偏振度的预测



科学背景

- 开辟软X射线偏振巡天观测领域，实现对高能暂现源宽能区 (2–800keV) 偏振、能谱、光变观测：
 - ✓ 测量典型伽马暴 (GRB) 及其晚期X射线耀发的偏振，解决伽马暴能源机制和辐射物理等基本科学问题，保持我国在伽马暴偏振测量领域的国际领先地位。
 - ✓ 测量与中子星并合引力波暴关联伽马暴的偏振，解决类似GW170817/GRB170817A爆发的新生天体是黑洞还是中子星、两种爆发时延等基本问题。
 - ✓ 测量软伽马重复暴 (SGR) 的偏振，为探究SGR产生快速射电暴物理机制做出关键贡献。

2012年《Science》
八大天文学之谜之一

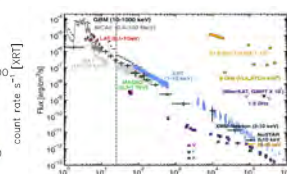
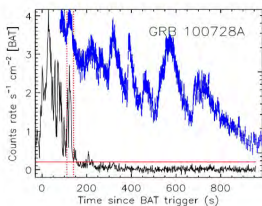
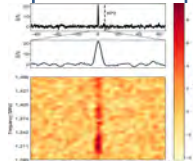
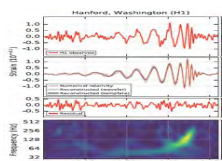
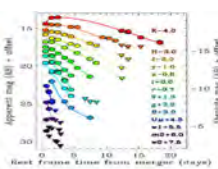
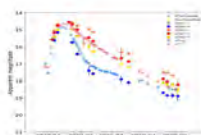
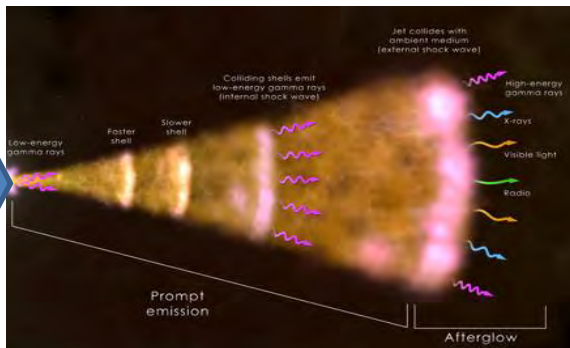
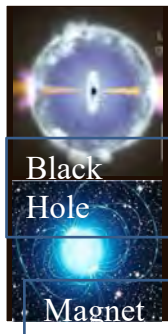
爆炸恒星

Science News Reports on the Top Mysteries



伽马射线暴——恒星爆炸或致密天体并合

当今多信使天文、极端条件天体物理研究的最佳对象！



引力波

快速射电暴？

伽马暴和晚期耀发

多波段余辉

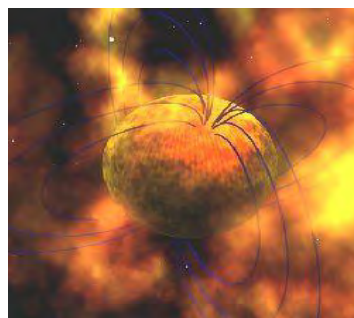
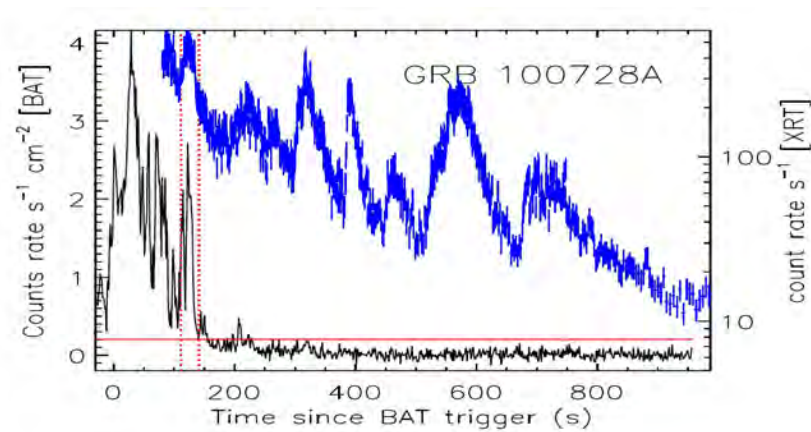
超新星和千新星

- 核心科学问题：**
- ✓ 爆发的引力波辐射
 - ✓ 新生致密天体及剧烈爆发活动
 - ✓ 中心引擎及喷流形成
 - ✓ 喷流结构和磁场特性
 - ✓ 粒子加速和辐射机制

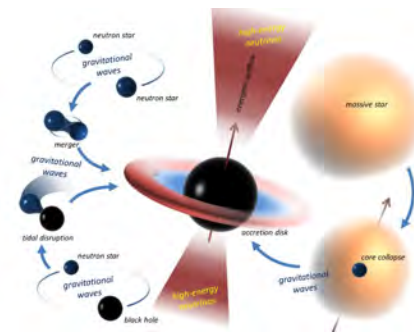
伽马暴及X射线耀发偏振同时测量的意义

有望解决的问题:

- 偏振的时变是否具有普遍性?
→ 中心引擎和喷流磁场位型的演化
- 伽马暴和晚期X射线耀发偏振是否有差异?
→ 两者的能源机制、磁场位型、辐射机制是否一样?



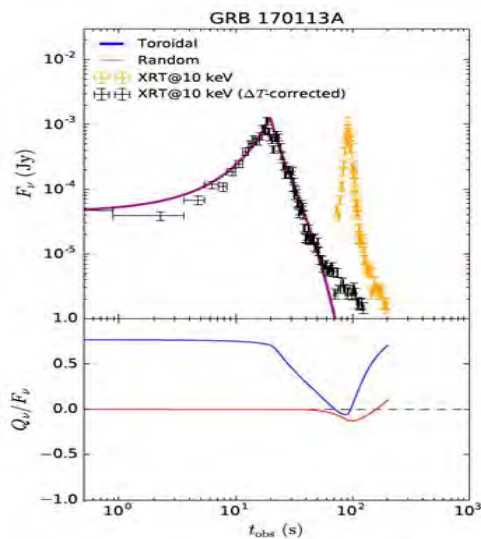
磁星



超吸积黑洞/中子星

X射线耀发偏振观测——未开垦的领域

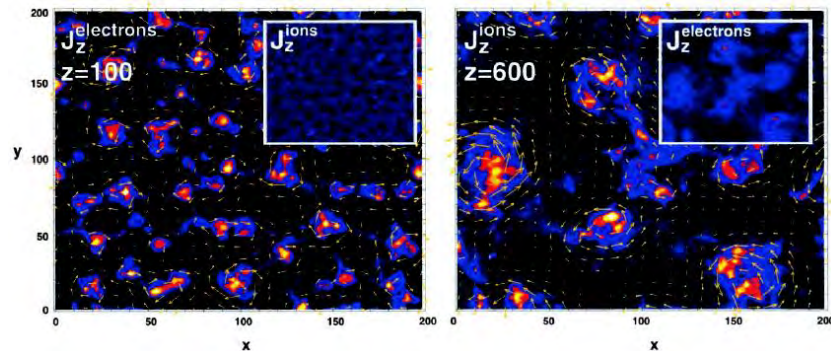
伽马暴X射线耀发偏振度演化理论预言：
 严重依赖于磁场位型；偏振测量是认识
 辐射区磁场位型的重要探针，进而了解
 中心天体信息



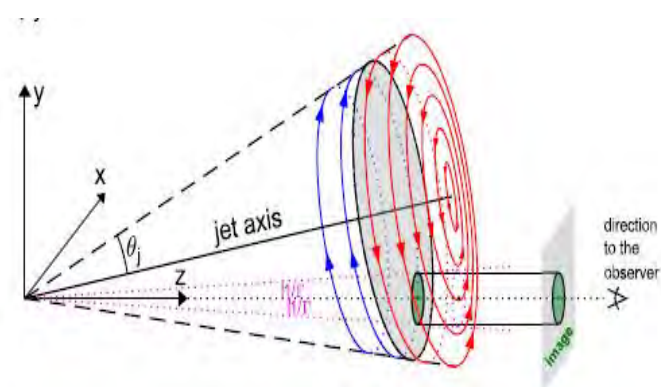
Geng et al. 2018

大尺度无序磁场：
 线偏振度低

环形磁场：
 线偏振度高



Frederiksen et al. 2004

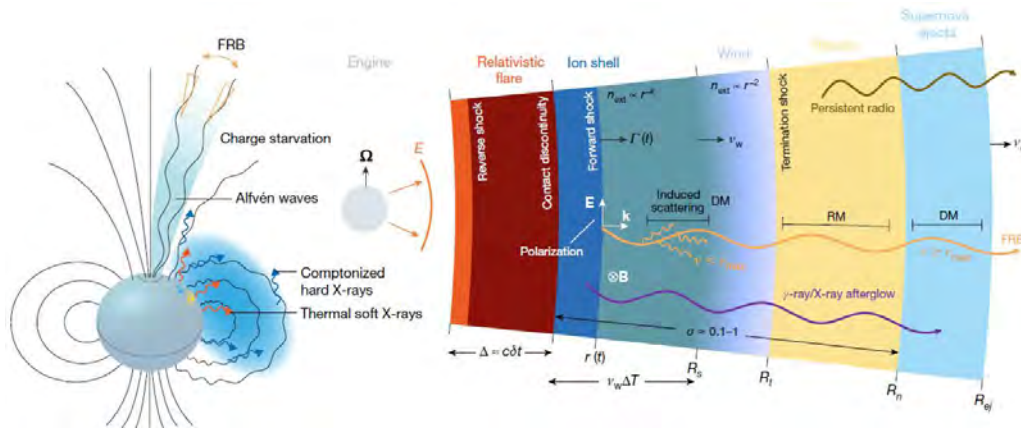


Granot 2016

快速射电暴——起源未知的极短射电爆发

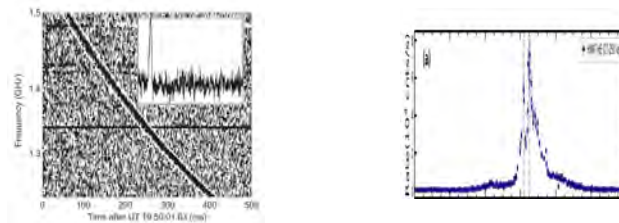
快速射电暴是一种极端短时标的射电爆发现象，部分快速射电暴具有重复性爆发。目前快速射电暴的起源天体还没有得到观测证认，一般认为与年轻的磁星活动有关。提出了模型非常多，主流的两种归纳为磁星模型和喷流激波模型。

极端条件天体物理研究的最佳对象之一！



源于年轻、高度磁化、孤立中子星（磁星）？

Zhang Bing 2020, Nature



快速射电暴 伽马和X射线余辉？

核心科学问题：

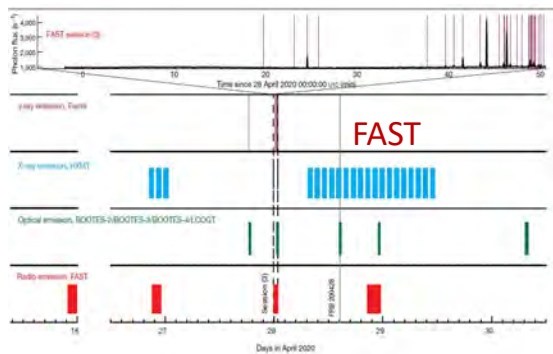
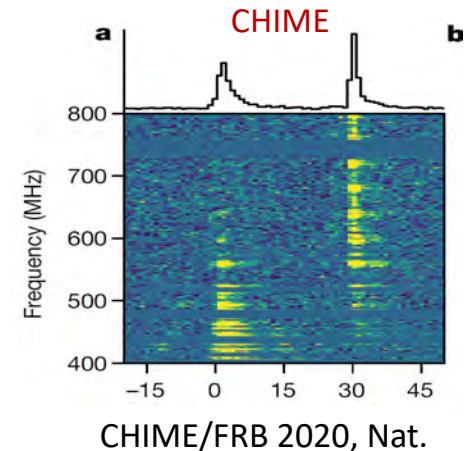
- ✓ 起源天体和爆发机制
- ✓ 重复和非重复爆发问题
- ✓ 辐射区与起源天体距离
- ✓ 抛射物结构和磁场特性
- ✓ 粒子加速和辐射机制

FRB200428起源于SGR1935?

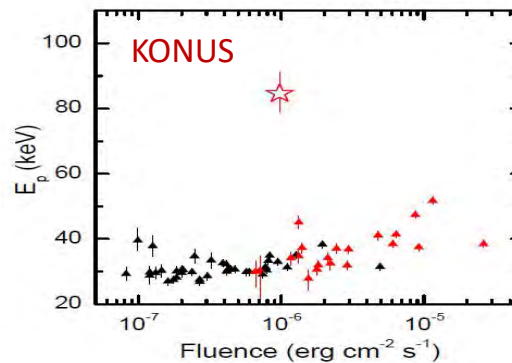
SGR 1935在2020年处于活跃的高能爆发期

- CHIME探测到FRB 200428可能与其成协
- HXMT探测到延迟8.3秒的成协硬X射线爆发
- Konus探测到SGR1935能谱很硬的奇特爆发
- FAST射电望远镜没有监测到其它高能爆发的FRB

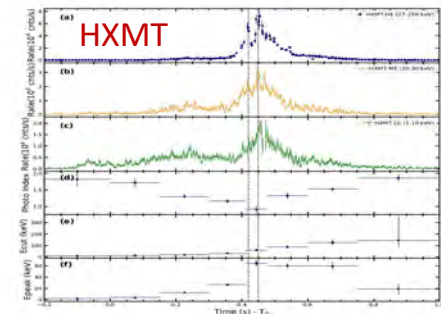
FRB仅仅伴随很少见的、谱很硬的X射线爆发?



Lin et al. 2020, Nat.



Ridnaia et al. 2021, Nat Astro



Li et al. 2021, Nat. Astro.

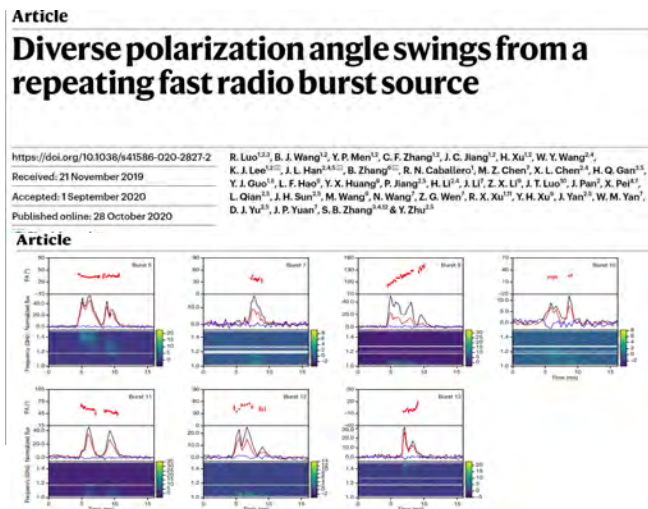
2020年Nature和Science杂志遴选为十大科技突破!

FRB偏振观测的意义

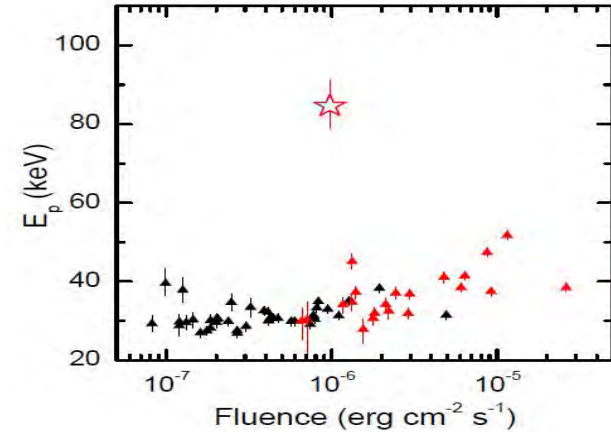
偏振信息对解决FRB起源有重要意义

- 不同FRB射电偏振呈多样性
- FAST发现重复FRB180301有丰富的射电偏振特征，与磁星磁层有关

- 与FRB成协、不成协的高能爆发偏振差异如何？
- 起源天体和爆发机制？
- 辐射区位置和磁场特性？
- 粒子加速和辐射机制？



Luo et al. 2020, Nature



Ridnaia et al. 2021, Nat Astro

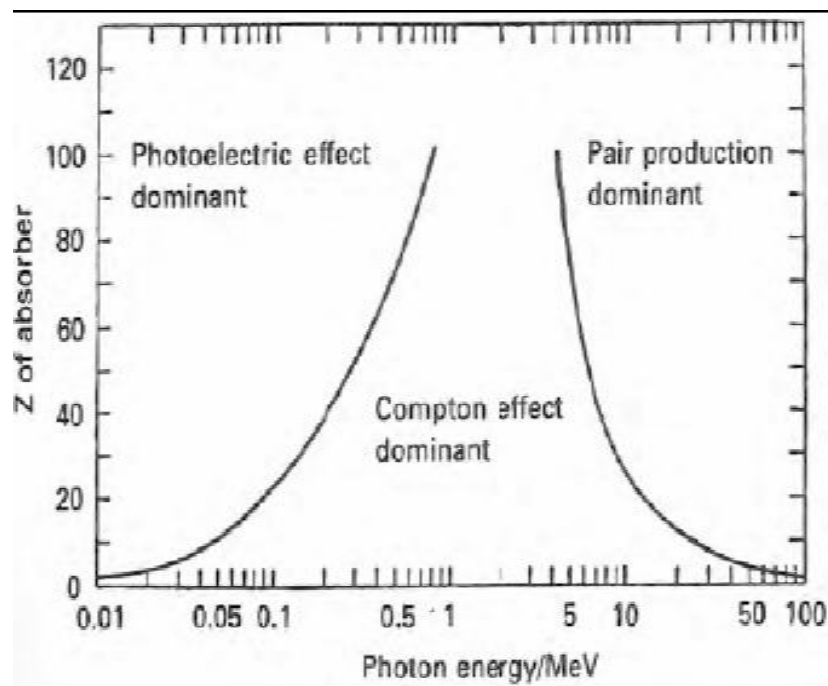
偏振测量简介

■ 偏振是电磁辐射的基本信息之一

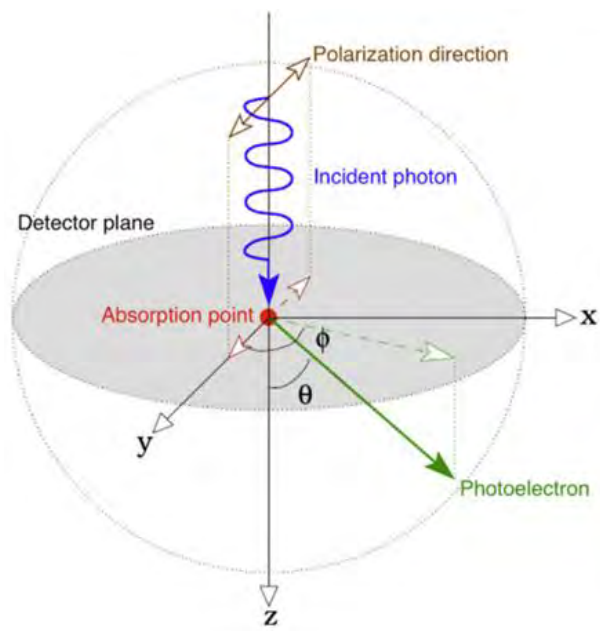
- 电磁辐射基本信息：强度，能谱，方向，**偏振**
- 从偏振信息可得到辐射机制和传播中经历的物理过程的信息

■ 偏振测量的方法

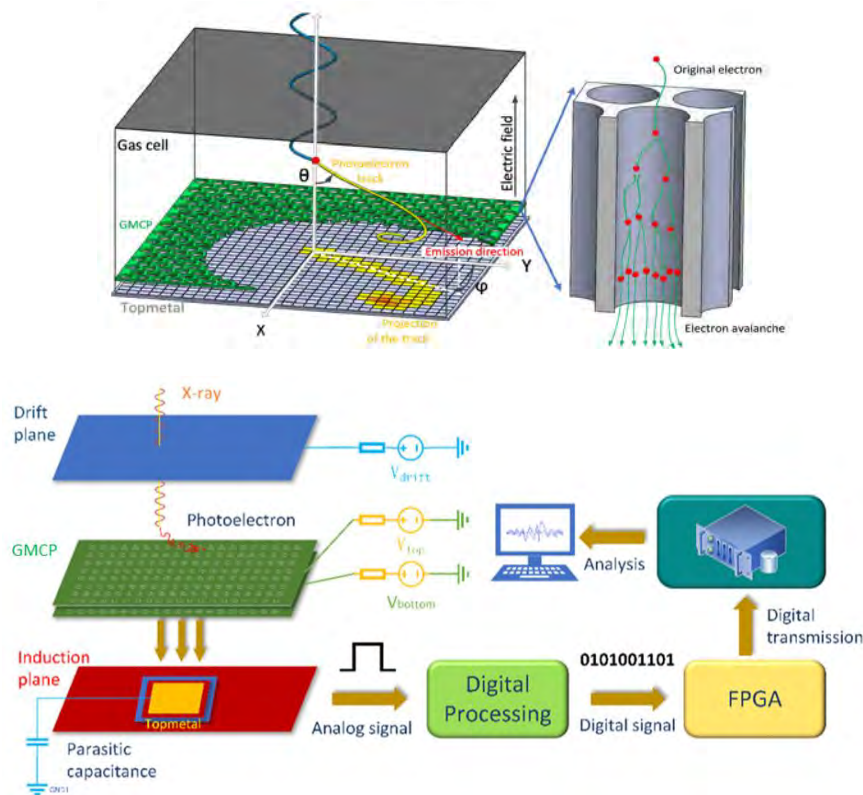
- Bragg衍射
- 光电效应
- **康普顿散射**
- 电子对产生



X射线偏振探测原理



- ▲ 光电效应占主导作用
- ▲ 在X-Y平面上投影为 $\cos^2\phi$
- ▲ 像素读出，二维成像
- ▲ 精确重建光电子出射方向

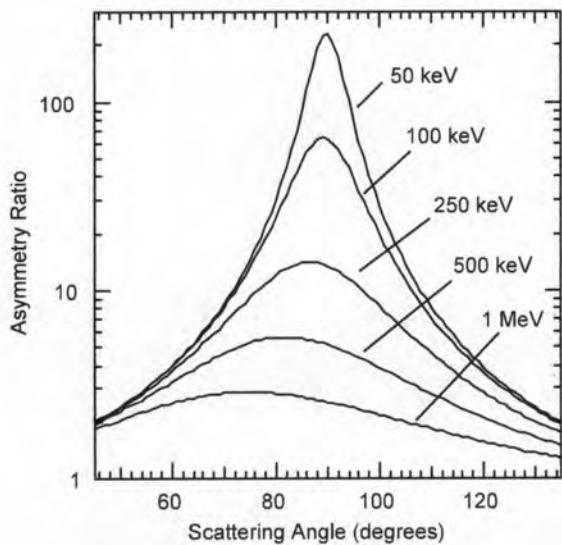


伽玛暴偏振测量原理：康普顿散射

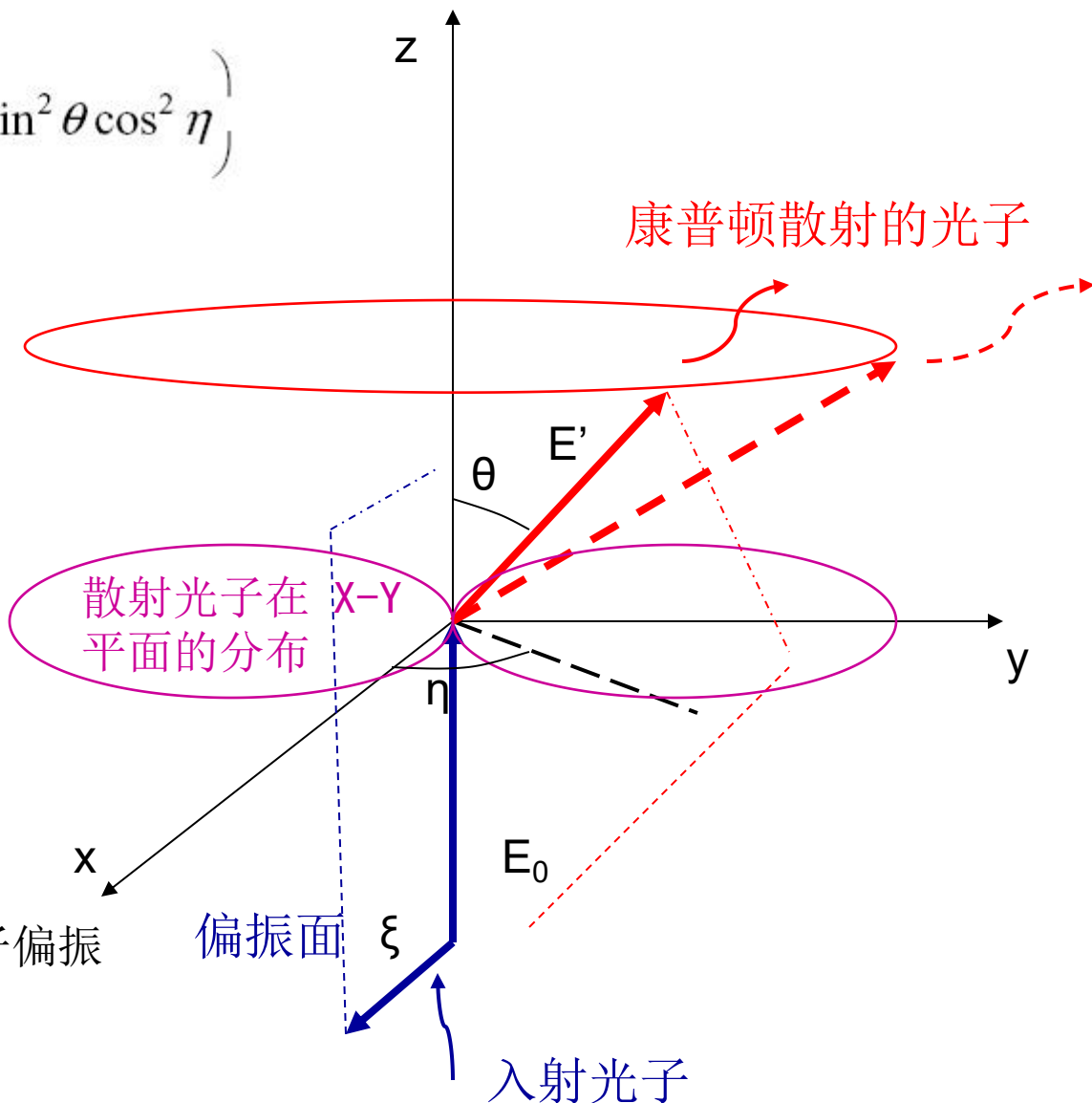
$$d\sigma = \frac{r_o^2}{2} d\Omega \left(\frac{E'}{E_o}\right)^2 \left(\frac{E_o}{E'} + \frac{E'}{E_o} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \eta\right)$$

θ is the Compton Scatter Angle

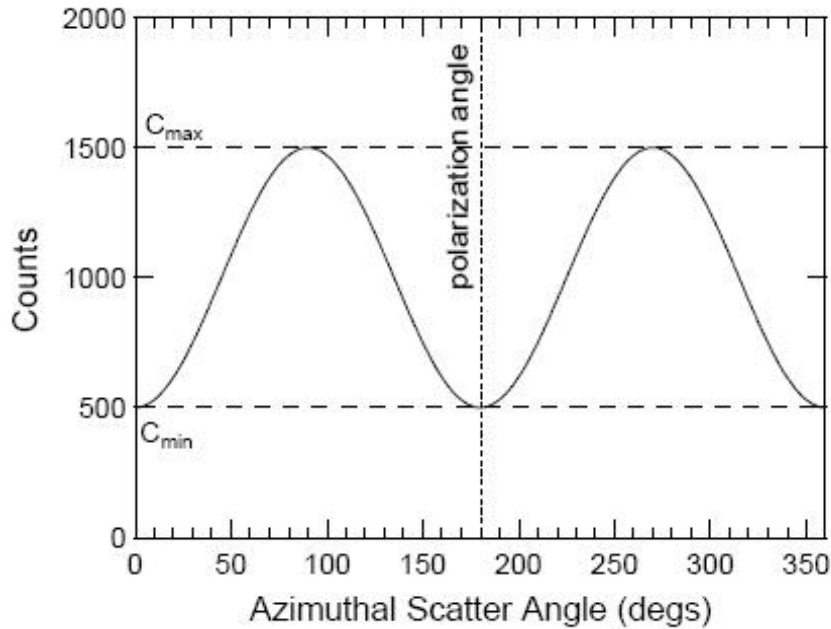
η is the Azimuthal Scatter Angle



散射光子倾向分布在和入射光子偏振面垂直的平面上



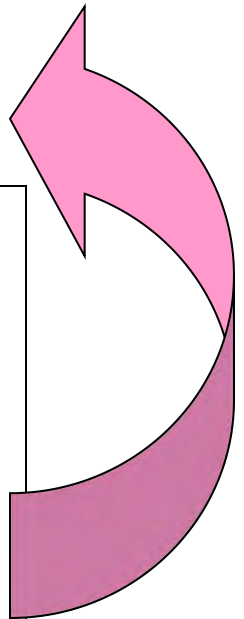
方位角分布



$$C(\eta) = A \cos\left(2\left(\eta - \varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right) + B$$

调制因子 $M = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max} + C_{\min}} = \frac{A}{B}$

极化度 $p = \frac{M}{M_{100}}$



测量原理

- 1、对于实测方位角分布，用如上函数拟合
- 2、根据拟合结果计算调制因子M
- 3、模拟100%极化的光子入射产生的调制因子 M_{100}
- 4、计算极化度p，极化方向通过 C_{\max} 所在方位角求得



POLAR简介

伽马暴偏振探测仪(POLAR、“天极”望远镜)

背景：TG-2中欧国际合作项目

科学目标：伽马暴偏振探测、
脉冲星、引力波、太阳暴

探测能区：50 ~ 500 keV

2006年确定方案

2012年6月正式立项

2016年9月15日发射

承研单位：

1、IHEP (China)



2、Univ. de Genève
(Switzerland)



3、PSI (Switzerland)



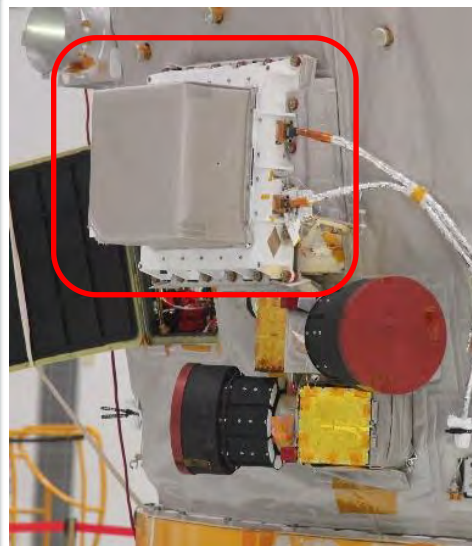
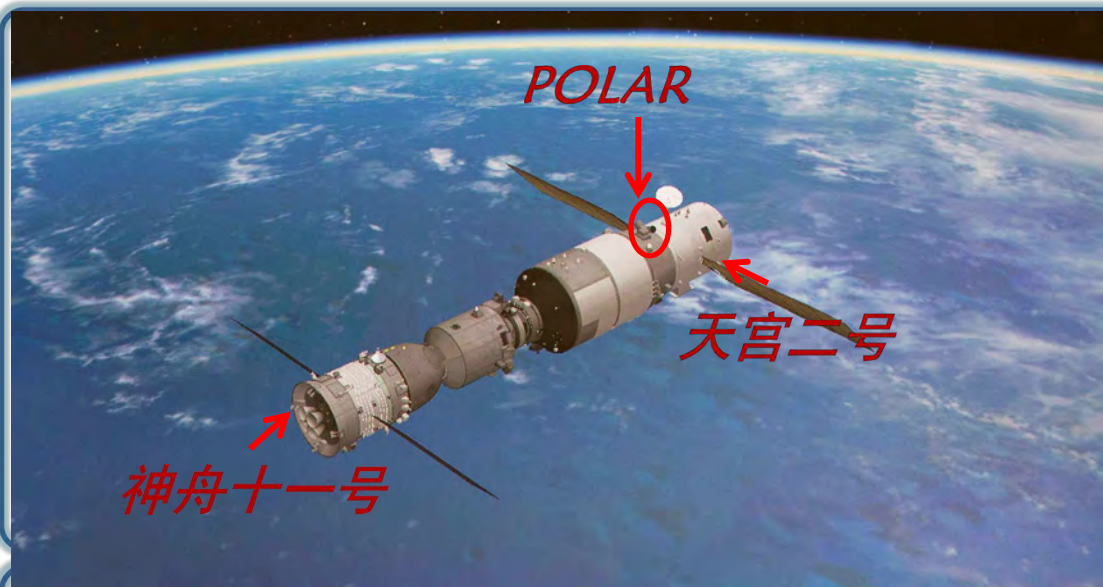
4、NCBJ(Poland)



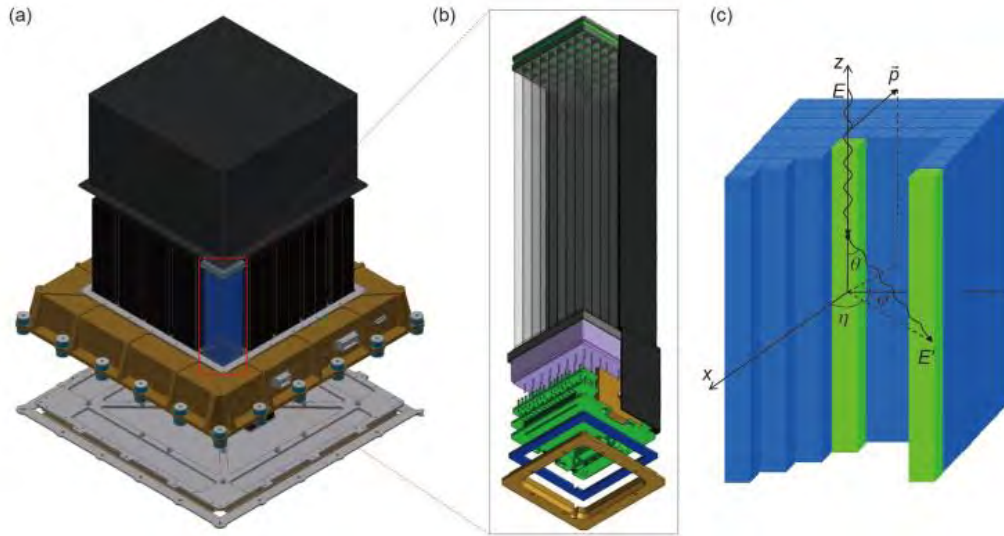
偏振探测器OBOX



电控箱IBOX

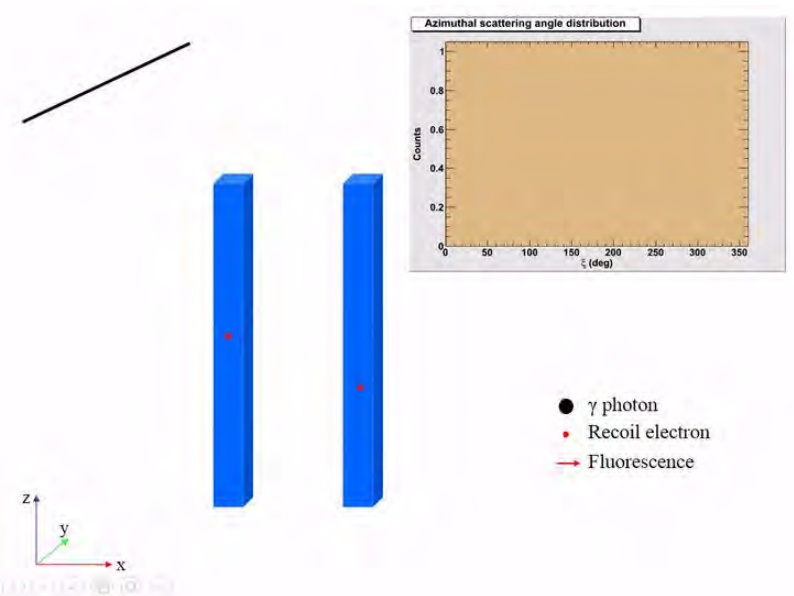
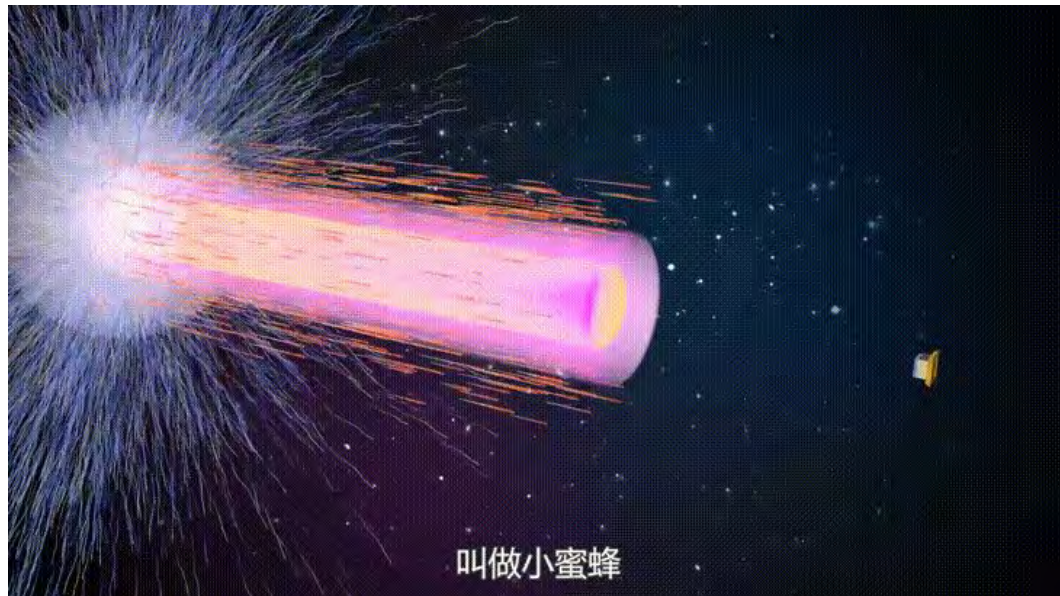


POLAR探测器组成与探测原理



Klein-Nishina equation:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} \frac{E'^2}{E^2} \left(\frac{E'}{E} + \frac{E}{E'} - 2\sin^2\theta \cos^2\varphi \right)$$



POLAR 主要技术指标

序号	参数	技术指标
1	探测材料	塑料闪烁体EJ-248M
2	伽玛暴探测数	~100个
3	伽玛暴定位误差	$\leq 5^\circ$ (能量通量 $\geq 10^{-5}$ erg cm ⁻²)
4	探测能区	~50 – 500 keV
5	视场	$\pm 70^\circ \times \pm 70^\circ$ (~1/3天空)
6	调制因子	40%@200 keV
8	最小可测偏振度MDP	~10% (Flux _{total} $\geq 3 \times 10^{-5}$ erg cm ⁻²)
9	探测器几何面积	~430 cm ² (垂直入射)
10	质量	舱外27.6 kg, 舱内3.52 kg, 合计~32 kg
11	外形尺寸	舱外: 462 × 462 × 268.5 mm ³ 舱内: 247 × 160 × 85 mm ³
12	最大功耗	≤ 80 W
13	时间精度(相对UTC)	± 1 ms
14	可靠性	0.90 (2年寿命末期)

POLAR发射



- 2016 0915晚， TG-2 发射成功



伽马暴观测

- POLAR入轨后从开机正常观测（2016年9月22日OBOX加高压）到2017年3月底，共计观测到经其它卫星或探测仪器确认的各类伽玛暴共计55个，其中49个GRB已经发布了GCN circular。
- POLAR实际在轨测试期间的正常观测时间约为5个月。因此POLAR在轨伽玛暴探测率约为11个/月，或132个/年，。

POLAR观测到的经其它卫星确认的伽玛暴统计列表

Number	GRB Name	Trigger time (UTC)	Joint observation
1	GRB 160924A	2016-09-24T06:04:09.040	Fermi/GBM, SPI-ACS
2	GRB 160928A	2016-09-28T19:48:05.000	Fermi/GBM, SPI-ACS, KW
3	GRB 161009651	2016-10-09T15:38:07.190	Fermi/GBM
4	GRB 161011217	2016-10-11T05:13:44.420	KW
5	GRB 161012989	2016-10-12T23:45:11.380	KW
6	GRB 161013948	2016-10-13T22:44:40.100	Fermi/GBM
7	GRB 161120401	2016-11-20T09:38:33.520	SPI-ACS
8	GRB 161129A	2016-11-29T07:11:40.000	Swift/BAT, Fermi/GBM, AstroSAT
9	GRB 161203A	2016-12-03T18:41:07.750	KW,SPI-ACS, CALET/CGBM, AstroSAT
10	GRB 161205A	2016-12-05T13:27:18.000	Fermi/GBM
11	GRB 161207A	2016-12-07T20:42:55.000	Fermi/GBM, CALET/CGBM
12	GRB 161207B	2016-12-07T05:22:44.000	Fermi/GBM
13	GRB 161210A	2016-12-10T12:33:54.000	Fermi/GBM
14	GRB 161212A	2016-12-12T15:38:59.000	Fermi/GBM
15	GRB 161213A	2016-12-13T07:05:02.000	Fermi/GBM, SPI-ACS
16	GRB 161217B	2016-12-17T03:03:44.000	Fermi/GBM
17	GRB 161217C	2016-12-17T03:53:15.000	KW
18	GRB 161218A	2016-12-18T03:47:34.634	Swift/BAT
19	GRB 161218B	2016-12-18T08:32:41.341	Fermi/GBM
20	GRB 161219B	2016-12-19T18:48:39.000	Swift/BAT
21	GRB 161228A	2016-12-28T09:43:24.000	Fermi/GBM
22	GRB 161228B	2016-12-28T13:15:40.000	Fermi/GBM, SPI-ACS
23	GRB 161228C	2016-12-28T00:46:20.000	Fermi/GBM
24	GRB 161229A	2016-12-29T21:03:49.000	Fermi/GBM
25	GRB 161230A	2016-12-30T12:16:07.000	Fermi/GBM
26	GRB 170101A	2017-01-01T02:26:00.660	Swift/BAT
27	GRB 170101B	2017-01-01T02:47:18.270	Fermi/GBM

25	GRB 170100A	2017-01-01T02:26:00.660	Fermi/GBM
26	GRB 170101A	2017-01-01T02:26:00.660	Swift/BAT
27	GRB 170101B	2017-01-01T02:47:18.270	Fermi/GBM
28	GRB 170102A	2017-01-02T02:51:18.000	KW
29	GRB 170105A	2017-01-05T06:14:07.000	SPI-ACS, KW
30	GRB 170109A	2017-01-09T03:17:35.000	Fermi/GBM
31	GRB 170112B	2017-01-12T23:16:09.000	Fermi/GBM
32	GRB 170114A	2017-01-14T22:01:10.000	Fermi/GBM
33	GRB 170114B	2017-01-14T19:59:12.000	Fermi/GBM, KW
34	GRB 170120A	2017-01-20T11:18:30.000	Fermi/GBM
35	GRB 170121A	2017-01-21T01:36:55.200	Fermi/GBM
36	GRB 170124A	2017-01-24T20:58:06.000	Fermi/GBM, KW, CALET/CGBM
37	GRB 170127C	2017-01-27T01:35:49.000	Fermi/GBM, Fermi/LAT, AGILE, AstroSAT
38	GRB 170130A	2017-01-30T07:14:45.000	Fermi/GBM
39	GRB 170131A	2017-01-31T23:14:59.000	Fermi/GBM, Swift, KW
40	GRB 170202B	2017-02-02T07:19:54.000	KW
41	GRB 170206A	2017-02-06T10:51:57.700	Fermi/GBM, Fermi/LAT, SPI-ACS
42	GRB 170206C	2017-02-06T11:40:10.000	SPI-ACS
43	GRB 170207A	2017-02-07T21:45:04.000	Fermi/GBM, IPN, KW
44	GRB 170208C	2017-02-08T13:16:33.000	Fermi/GBM, SPI-ACS
45	GRB 170210A	2017-02-10T02:47:37.000	Fermi/GBM, IPN, KW
46	GRB 170219A	2017-02-19T00:03:07.000	Fermi/GBM, CALET/CGBM, SPI-ACS, KW, IPN
47	GRB 170220A	2017-02-20T18:48:01.000	KW
48	GRB 170228B	2017-02-28T18:32:56.000	Fermi/GBM
49	GRB 170305A	2017-03-05T06:09:06.800	Fermi/GBM, KW, SPI-ACS, Swift/BAT
50	GRB 170306B	2017-03-06T14:07:20.000	Fermi/GBM, Fermi/LAT, SPI-ACS
51	GRB 170309A	2017-03-09T12:26:42.000	CALET/CGBM
52	GRB 170315A	2017-03-15T13:57:53.000	Fermi/GBM
53	GRB 170317A	2017-03-17T09:45:56.000	Swift/BAT
54	GRB 170320A	2017-03-20T03:42:39.000	SPI-ACS, KW
55	GRB 170325B	2017-03-25T21:50:01.000	KW

5个伽马暴偏振分析结果

Table 1: Summary of the five GRBs selected (*in units of erg/cm^2 in 10-1000 keV)

GRB	T90 (s)	Fluence*	PD	Prob(PD<2%)	PD _{up} (99%)	PA(deg.)	PA Change
161218A	6.76	1.25×10^{-5}	9%	9%	45%	40	No
170101A	2.82	1.27×10^{-5}	8%	13%	31%	164	No
170127C	0.21	7.4×10^{-6}	11%	5.8%	67%	38	Unknown
170206A	1.2	1.34×10^{-5}	10%	12%	31%	106	No
170114A	8.0	1.93×10^{-5}	4%	14%	28%	164	Yes
170114Ap1	N/A	N/A	15%	8%	43%	122	N/A
170114Ap2	N/A	N/A	41%	0.49%	74%	17	N/A

- ✓ 我们首次高精度偏振分析结果表明：**GRBs的偏振度较低（4%~11%）**。前四个GRBs的偏振约为10%。这对GRB模型给出了较严格的约束。
- ✓ 把**GRBs分成前后段进行PA演化分析**，结果表明：其中三个GRBs的PA无显著演化，**GRB170127C**因统计量较低没有有效结果，而**GRB170114A**偏振角发生显著变化（**122度，17度**）

LETTERS

<https://doi.org/10.1038/s41550-018-0664-0>

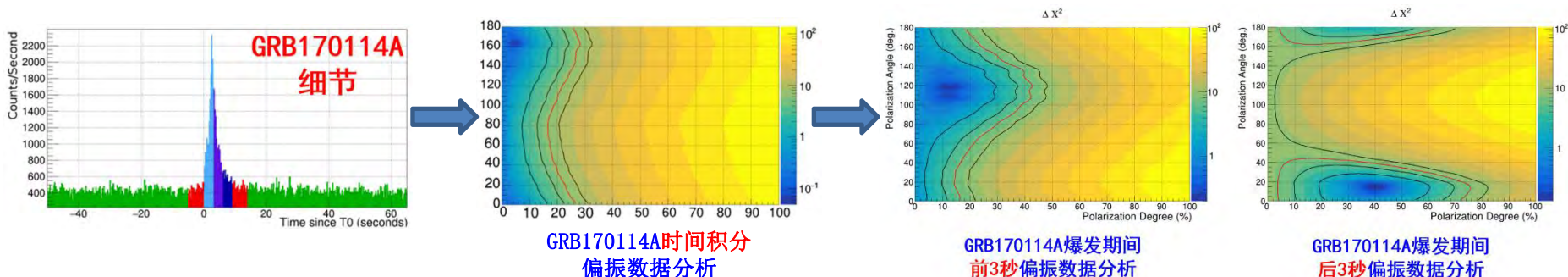
nature
astronomy

Detailed polarization measurements of the prompt emission of five gamma-ray bursts

Shuang-Nan Zhang^{1,2,10*}, Merlin Kole^{3,10*}, Tian-Wei Bao¹, Tadeusz Batsch⁴, Tancredi Bernasconi⁵, Franck Cadoux³, Jun-Ying Chai^{1,2}, Zi-Gao Dai^{6,7}, Yong-Wei Dong¹, Neal Gauvin⁵, Wojtek Hajdas⁸, Mi-Xiang Lan^{6,9}, Han-Cheng Li^{1,2}, Lu Li¹, Zheng-Heng Li^{1,2}, Jiang-Tao Liu¹, Xin Liu^{1,2}, Radoslaw Marcinkowski⁸, Nicolas Produit⁵, Silvio Orsi³, Martin Pohl³, Dominik Rybka⁴, Hao-Li Shi¹, Li-Ming Song^{1,2}, Jian-Chao Sun¹, Jacek Szabelski⁴, Teresa Tymieniecka⁴, Rui-Jie Wang¹, Yuan-Hao Wang^{1,2}, Xing Wen^{1,2}, Bo-Bing Wu¹, Xin Wu³, Xue-Feng Wu⁹, Hua-Lin Xiao^{1,8}, Shao-Lin Xiong¹, Lai-Yu Zhang¹, Li Zhang¹, Xiao-Feng Zhang¹, Yong-Jie Zhang¹ and Anna Zwołinska⁴

POLAR结果提出的新的科学问题需要POLAR-2回答

- 偏振演化是否普遍存在于伽马暴当中？
- 探测到的偏振度普遍不高，是否是由于伽马暴爆发期间偏振角的快速变化所导致的？这种变化占主导的机制是什么？



- 为了回答这些问题，中欧科学家联合提出在中国空间站上开展POLAR-2实验，具有重要意义
 - POLAR-2设计上具有大视场、大面积、宽能段、多任务协同观测能力， $90^\circ \times 90^\circ$ 视场内伽马暴探测率最高，伽马射线偏振探测灵敏度最高。软X射线偏振大视场巡天为国际首创
 - POLAR-2是目前国际上唯一具有从软X射线到伽马射线能段偏振、定位、能谱探测能力的天文观测仪器，最有希望回答上述重要科学问题，并且开辟新的研究方向。（POLAR 偏振分析定位和能谱主要依靠其他实验的观测）

中国空间站POLAR-2项目

- 天宫二号POLAR后续项目，增强型伽马暴偏振探测器，科学能力大幅提升
- 19年正式入选CSS国际合作项目，计划2025~2026前后发射，在轨寿命>2年

2019年6月 POLAR-2入选首批国际合作项目



United Nations/China Cooperation on the Utilization of the China Space Station (CSS)

联合国/中国围绕中国空间站应用开展合作

Selected Experiment Projects to be executed on board the CSS for the 1st Cycle

Announced on the occasion of the 62nd Session of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space

12 June 2019 Vienna, Austria

第一轮合作入选项目

2019年6月12日在奥地利维也纳举行的第62届和平利用外空委员会大会期间发布

I. Fully accepted experiment projects:

完全入选项目

No.1: POLAR-2: Gamma-Ray Burst Polarimetry on the China Space Station

Building on the previous investigation on China's TG-2 space lab, this project aims to answer the most important open questions in astrophysics regarding the nature of Gamma-Ray Bursts (GRBs) by using the most promising investigation approach of polarization measurements allowing to observe even the weakest gamma-ray transients, such as those connected to gravitational waves.

It is an experiment project in astronomy in space. It was applied and will be implemented by four institutions from four countries, which are: The University of Geneva from Switzerland, the National Center for Nuclear Research of Poland, the Max Planck Institute for Extra-terrestrial Physics of Germany, and the Institute of High Energy Physics of Chinese Academy of Sciences.

第1个项目: POLAR-2: 中国空间站上的伽马暴偏振探测器

nature

Nature报道

Explore content Journal information Publish with us Subscribe

nature > news > article

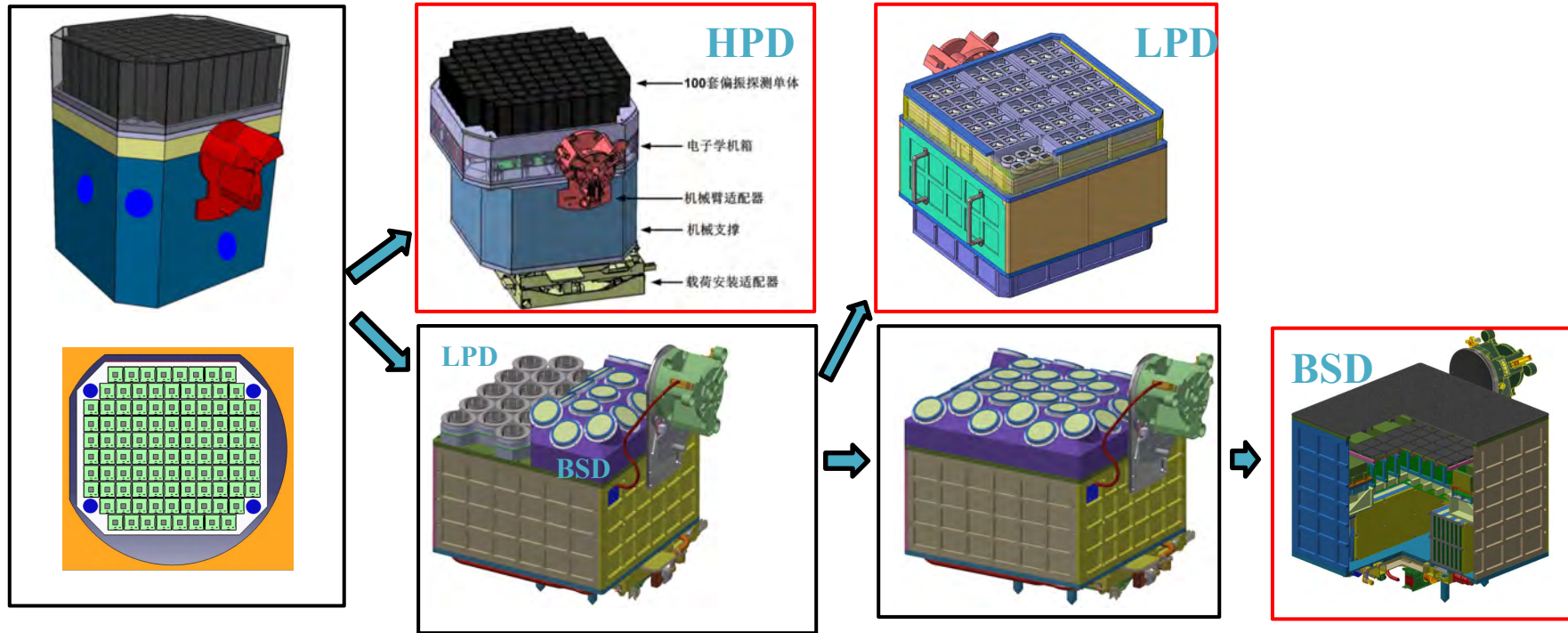
NEWS · 17 JUNE 2019

China reveals scientific experiments for its next space station

Other winners include a detector called POLAR-2, a more powerful follow-up to a sensor launched on Tiangong-2 to study the polarization of energetic γ -ray bursts from distant cosmic phenomena. POLAR-2, which will be built by an international collaboration, could even allow astronomers to observe the weak radiation associated with sources of gravitational waves.



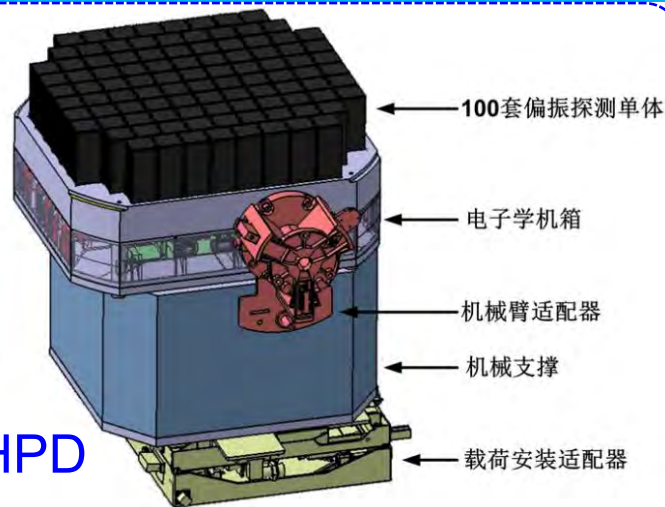
POLAR-2整体方案演化



POLAR-2载荷组成

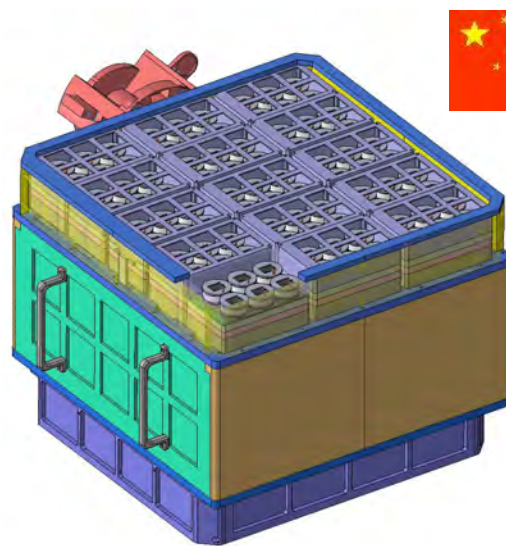


- 高能偏振探测器 (HPD, 30-800 keV) :
- 伽马射线偏振测量
- Compton偏振探测仪, 塑闪+SiPM+ASIC
- 100个偏振探测单体, 6400根塑料闪烁体棒
- 总有效面积: $>2000 \text{ cm}^2$
- 偏振有效面积: $>1000 \text{ cm}^2$

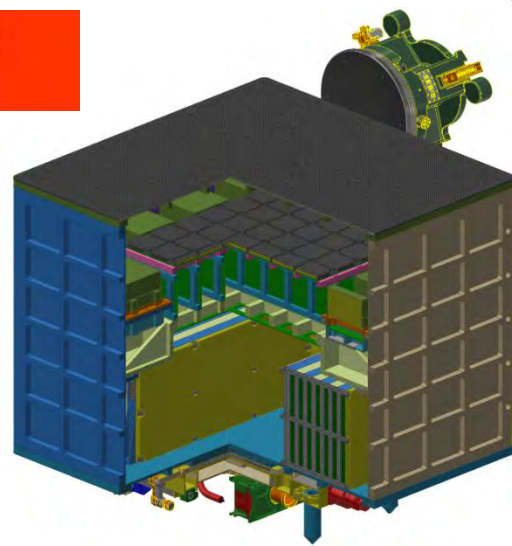


欧方载荷HPD

- 低能偏振探测器 (LPD, 2-10 keV) :
- X射线偏振测量, 光电效应
- 气体探测器+GMCP+Topmetal
- 宽能段能谱探测器 (BSD, 10-2000 keV) :
- 伽马暴定位和宽能段能谱测量, 为HPD和LPD的偏振测量提供必要的输入, 提高伽马暴偏振测量的样本
- 编码板成像, GAGG晶体+SiPM+ASIC



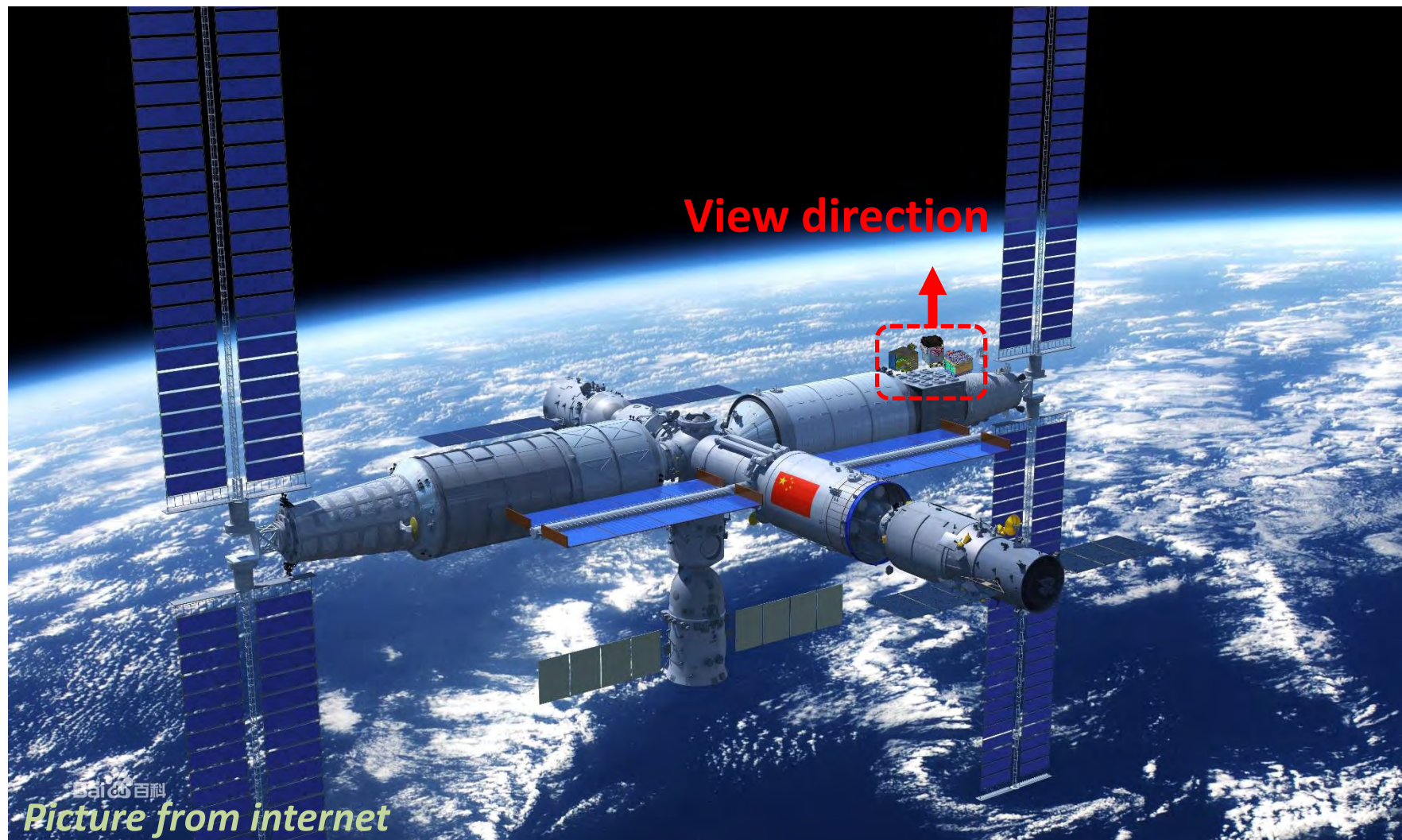
中方载荷LPD



中方载荷BSD

POLAR-2 三个载荷安装位置及视场

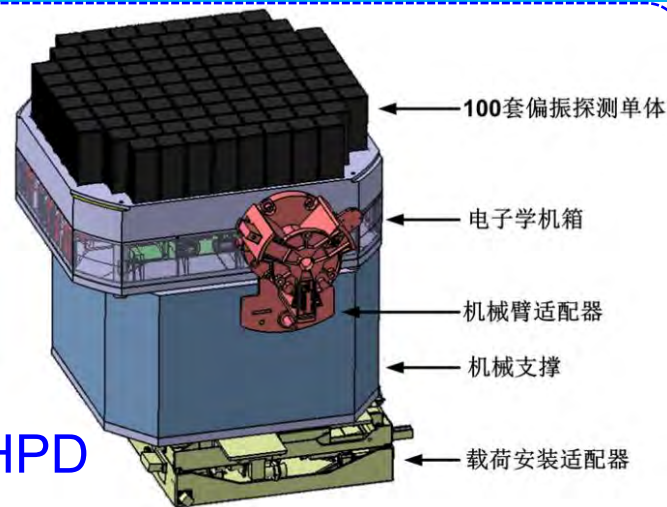
- FOV: HPD ($\sim 180^\circ \times 180^\circ$), LPD ($\sim 90^\circ \times 90^\circ$), BSD ($\sim 120^\circ \times 120^\circ$)



高能偏振探测器 HPD



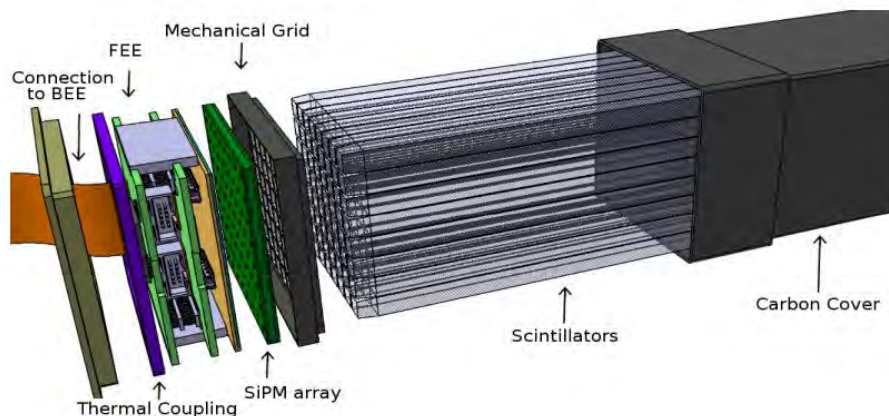
- 高能偏振探测器 (HPD, 30–800 keV) :
- 伽马射线偏振测量
- Compton偏振探测仪, 塑闪+SiPM+ASIC
- 100个偏振探测单体, 6400根塑料闪烁体棒
- 总有效面积: $>2000 \text{ cm}^2$
- 偏振有效面积: $>1000 \text{ cm}^2$



欧方载荷HPD

承研单位:

- 1、Univ. de Genève, Switzerland
- 2、NCBJ(Poland)
- 3、MPE (Germany)
- 4、IHEP (China)



偏振探测单体

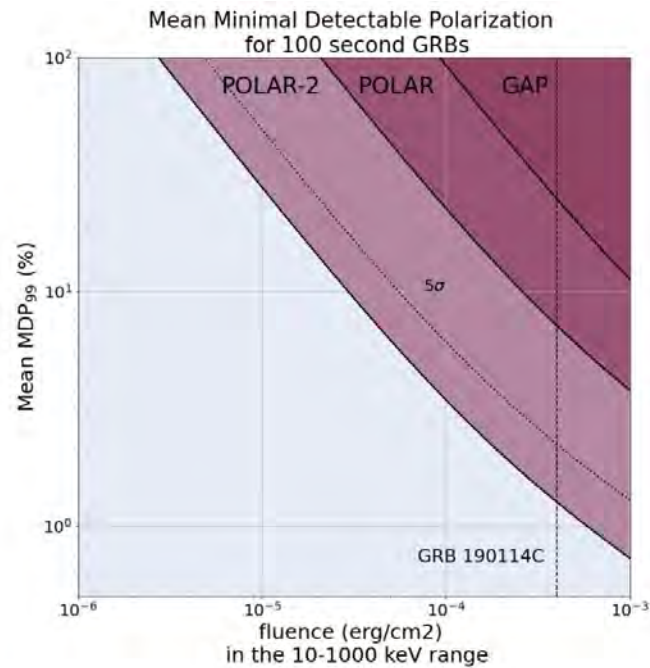
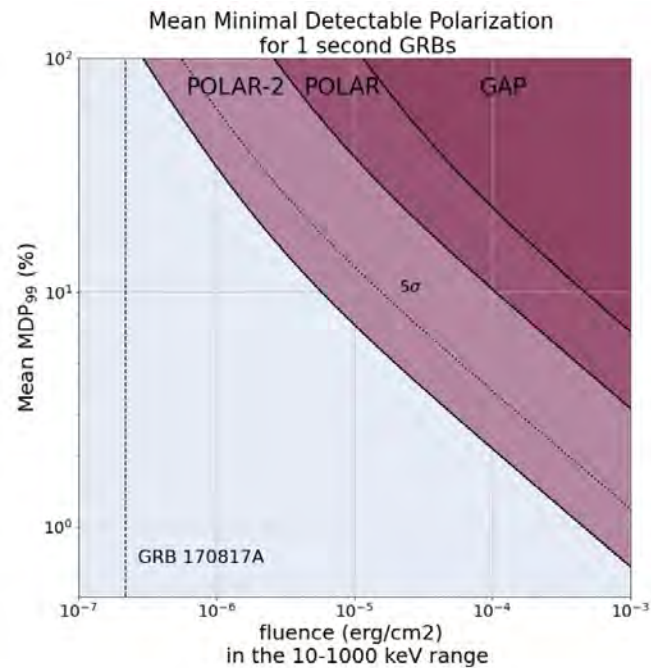
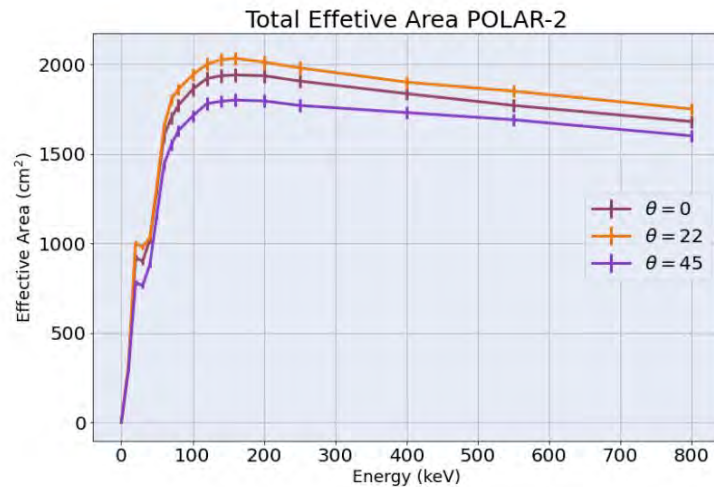
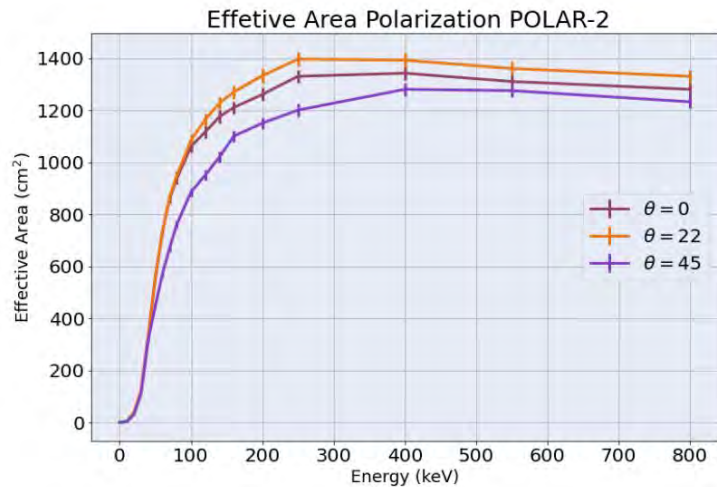
HPD/POLAR2 探测器的优化 (与POLAR相比)

性能	POLAR	POLAR-2
偏振探测器路数	1600路塑闪	6400路塑闪
信号读出方式	PS+MAPMT+ASIC	PS+SiPM+ASIC
探测能区	50-500 keV	偏振探测器: ~30-800 keV
偏振探测面积	557 cm ²	>2000 cm ²
每年可测伽马暴个数	55个/6个月	~250个/年
偏振探测能力	14个GRB的偏振	每年可对~30个亮暴进行高精度偏振测量, 同时给出与引力波暴相关的伽马暴的偏振限制
平台	中国天宫二号实验室	中国空间站

HPD/POLAR2 主要技术指标

序号	参数	技术指标
1	探测材料	塑料闪烁体EJ-248M
2	伽玛暴探测数	~250个 (~30个偏振探测好于10%)
3	伽玛暴定位误差	$\leq 5^\circ$ (能量通量 $\geq 10^{-5}$ erg cm ⁻²)
4	探测能区	~30 – 800 keV
5	视场	~1/2天空
8	最小可测偏振度MDP	~10% ($\text{Flux}_{\text{total}} \geq 3 \times 10^{-5}$ erg cm ⁻²)
9	探测器几何面积	~2200 cm ² (垂直入射)
10	质量	合计~130 kg
11	外形尺寸	650x650x830 mm ³
12	最大功耗	≤ 300 W
14	可靠性	0.90 (2年寿命末期)

HPD主要性能



Merlin Kole, et al.
ICRC2021

LPD/POLAR2

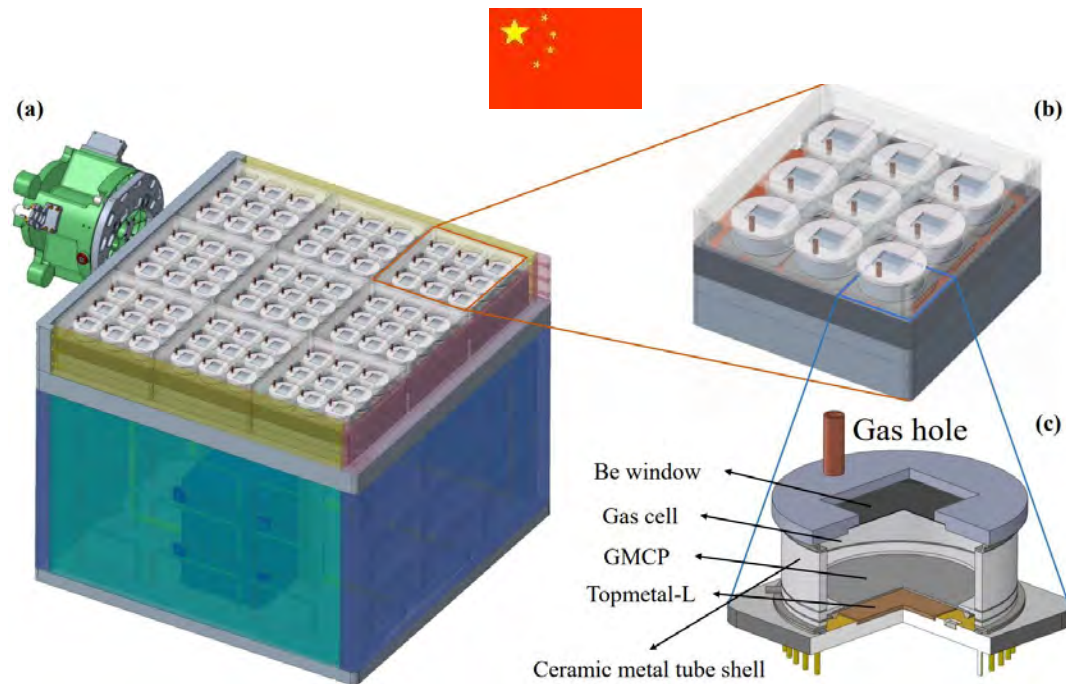
- LPD 载荷包含 81 个探测单元，分为 9 组，其设计方案如下图所示。
- LPD测量 X射线偏振的原理是 X射线光子和气体发生光电效应，产生的光电子的出射方向携带入射 X 射线光子的偏振信息。
- 采用气体+GMCP+Topmetal ASIC 读出芯片的方式测量光电子径迹，根据径迹推断出射电子的运动方向。
- 能量范围： 2-10 keV
- 探测面积： ~ 298 cm²
- 视场： ~ 90 ° × 90 °
- 能量分辨率： ≤ 20 % @ 5.9 keV
- 最小可测偏振度： ~ 10.6%

@GRB210619B

600 × 600 × 500 mm³

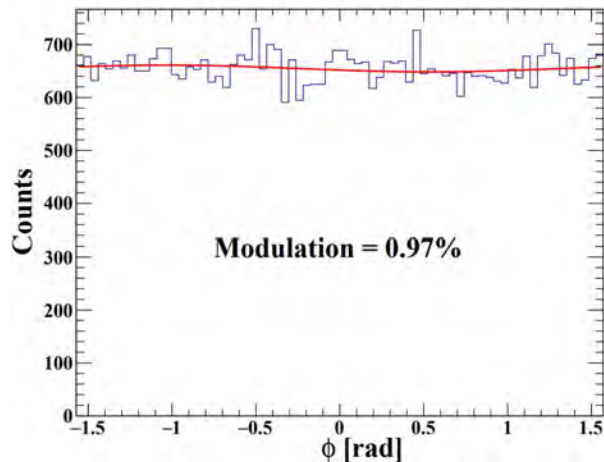
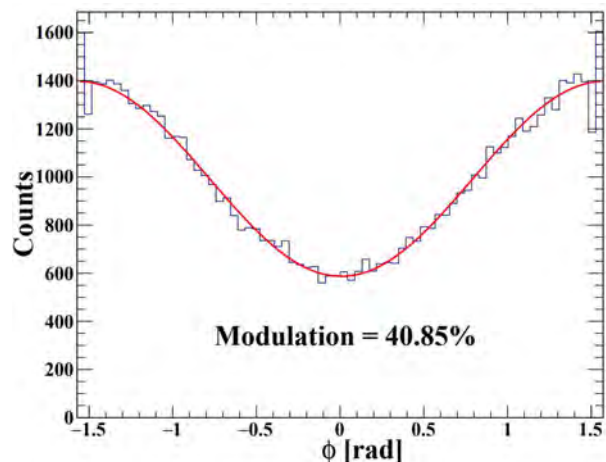
质量： <160kg

功耗： <300w

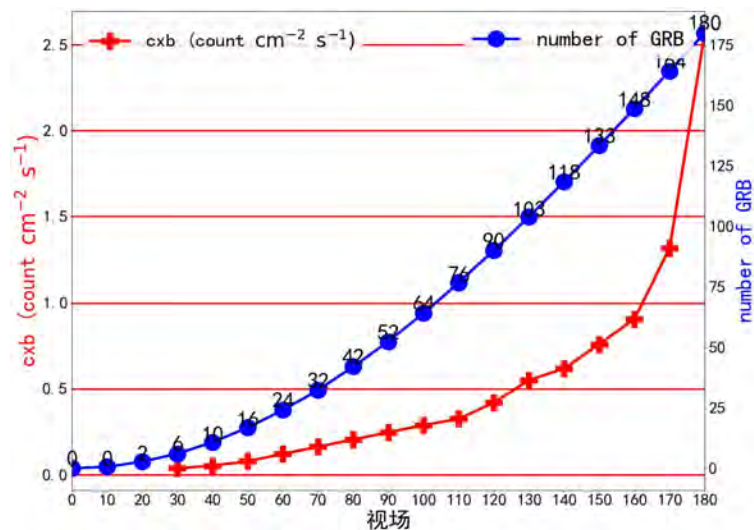
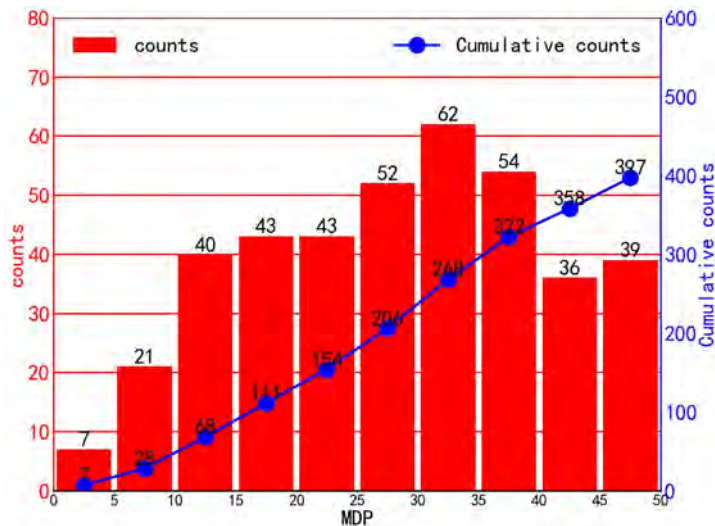


广西大学梁恩维教授牵头，联合华中师范大学，中国科学院高能物理研究所，中国科学院大学，中国电子科技集团公司第十三研究所，北京卫星环境工程研究所等单位组成CXPDP合作组

LPD主要性能



在80 kPa压强30%Ne+70%DME混合气体中调制曲线。左边是8.047 keV线偏振光的结果，右边是5.9 keV无偏振光的结果

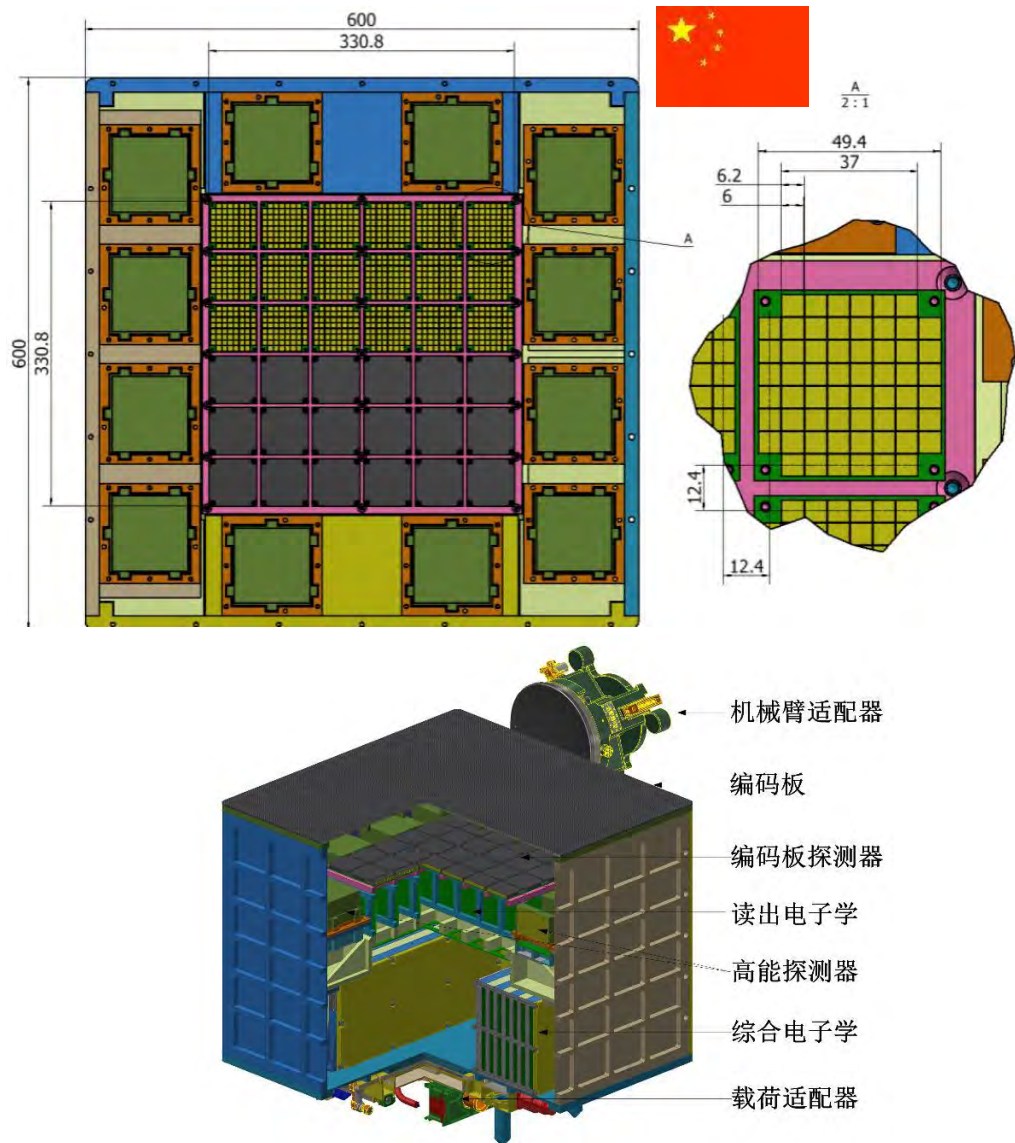


LPD十年伽马暴探测灵敏度的模拟分布

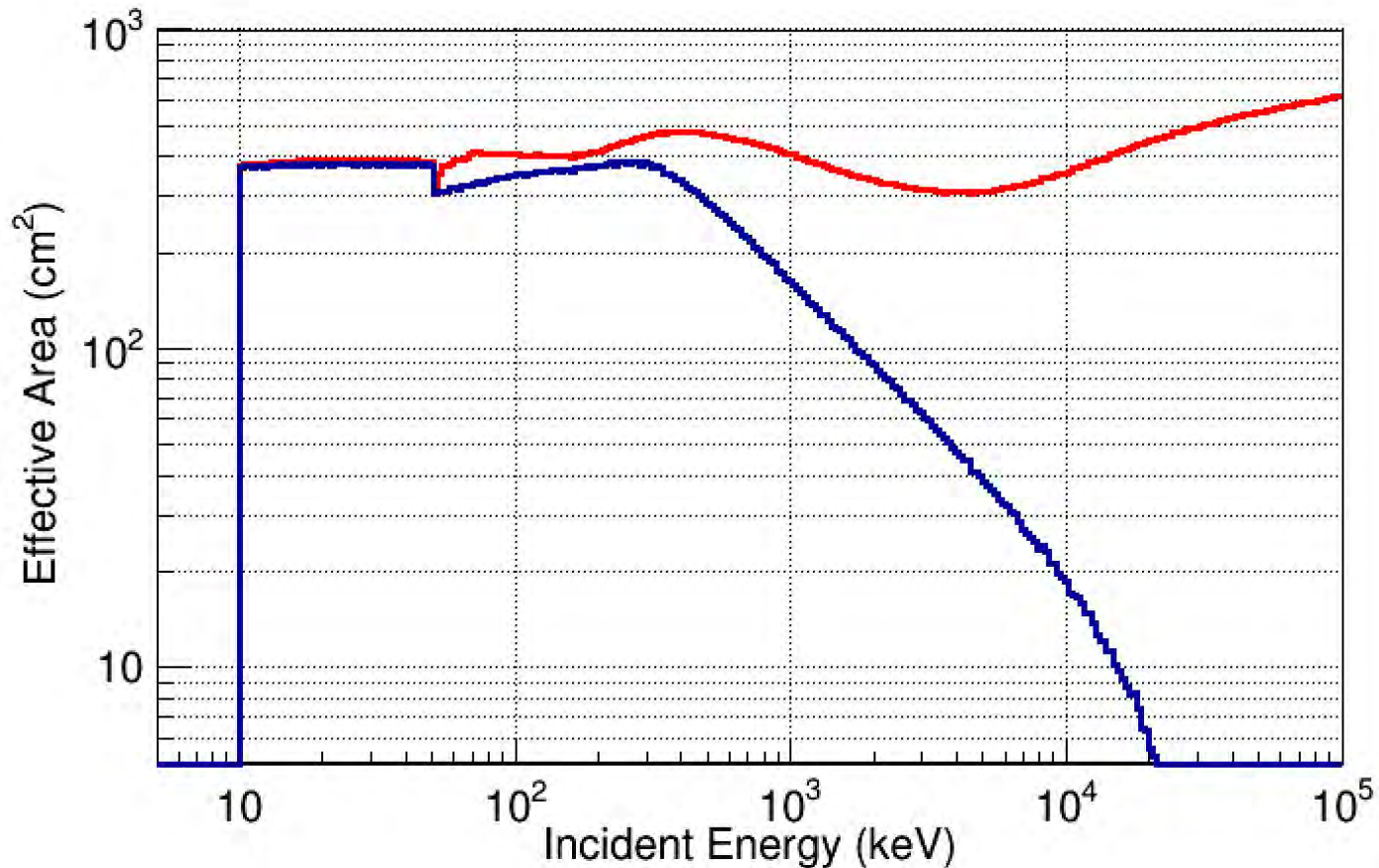
CXB本底水平、GRB观测数量随视场变化情况

BSD/POLAR2

- BSD 载荷包含两种探测器。
 - CAMI (Code Aperture Mask Imager) 编码板探测器阵列, 共 6×6 个探测单元, 每个探测单元含 60 个 GAGG 晶体像素, 采用 ASIC 芯片读出, 共 2160 个编码板探测器像素, 用于伽马暴高精度 ($\sim 0.2^\circ$) 定位和低能区 (10-300keV) 能谱测量。
 - HES (High Energy Spectrometer): 12 个探头 (单个探头由 4 个 GAGG 拼接 + SiPM, 单个 GAGG 大小 $35 \times 35 \times 50 \text{ mm}^3$), 能谱测量 ($\sim 200 \sim 5000 \text{ keV}$)。主要用于伽马暴的高能区能谱测量。
 - 电控箱: 数据处理打包, 电源控制等
- 主要承担单位:
 - 高能所
 - 空间应用中心
 - 清华大学



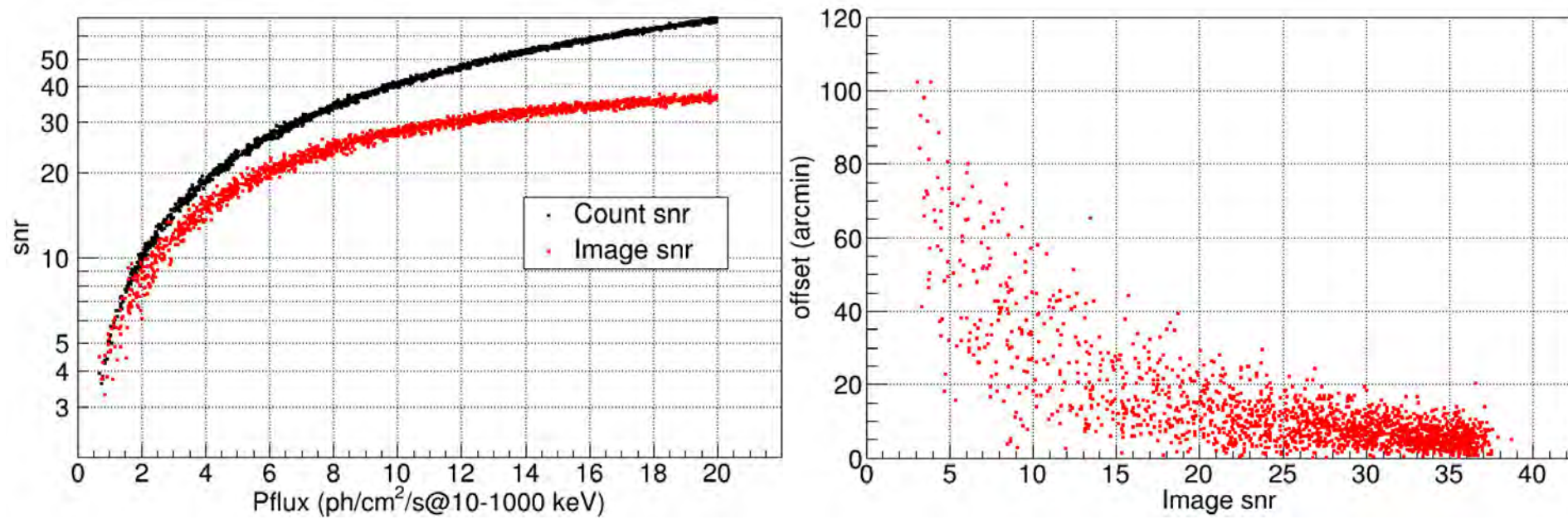
BSD主要性能——有效面积



Effective area of BSD for on-axis case.

Red: for any energy deposition; Blue: for photopeak case

BSD主要性能——定位能力研究

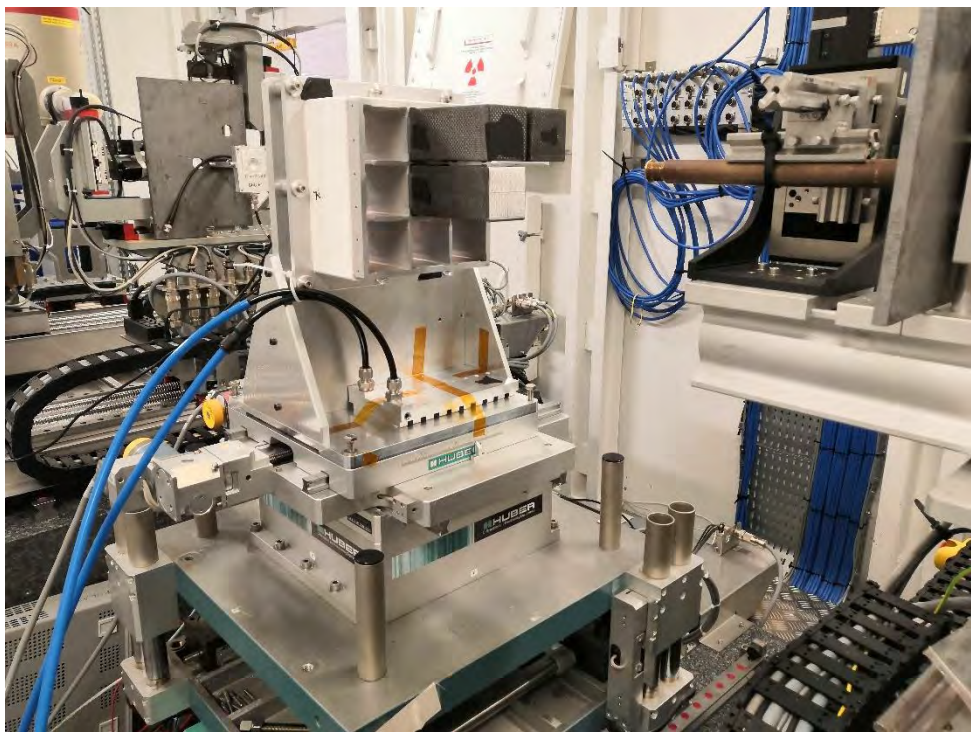


On-axis case. Left: imaging SNR vs Pflux; Right: localization error vs Imaging SNR. For GRB170817A like GRBs, the localization error is within 1 degree

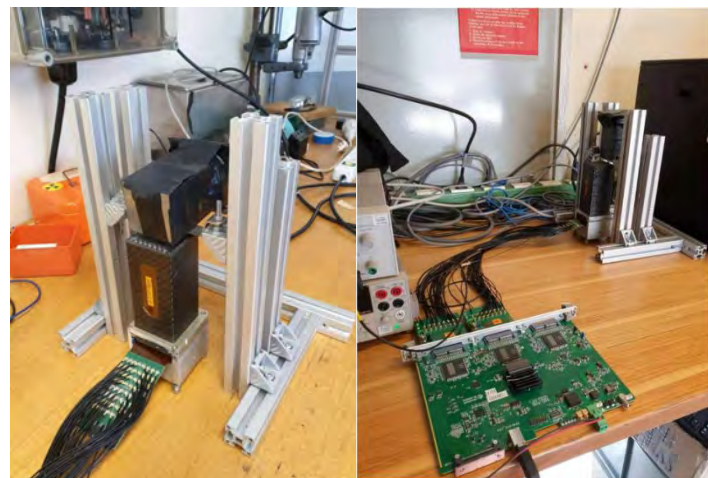
POLAR-2 目前状态

➤ HPD研制

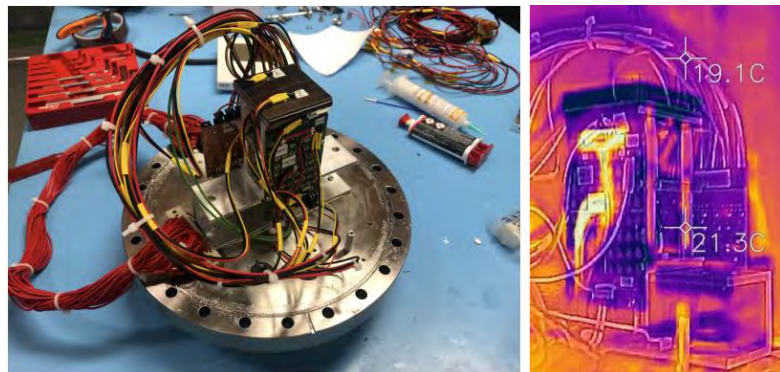
- 已开展多套偏振探测器单体的研制与测试：塑闪棒+SiPM+FEE
- BEE已研制出样机，目前正在进行软件测试
- 各类验证试验：ESRF束流试验、力学、热设计及测试，电子学辐照测试等



2023年4月ESRF束流试验



HPD探测器样机测试

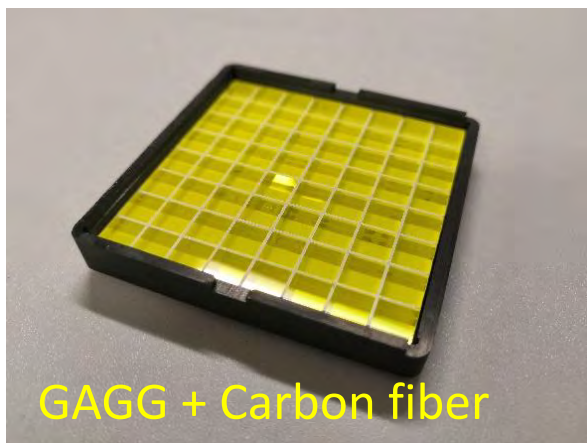


HPD探测器样机热设计测试

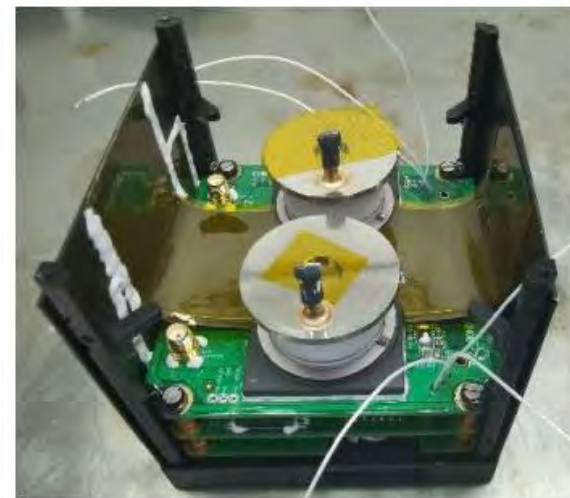
POLAR-2 目前状态

➤ LPD及BSD

- LPD原型机CXPB立方星项目已于2023年6月7日搭载“力箭一号”发射
- BSD成像探测器原理样机参加了4月份ESRF束流实验



中科院高能所BSD成像探测器原理样机2023年4月参加ESRF束流试验



广西大学CXPB载荷

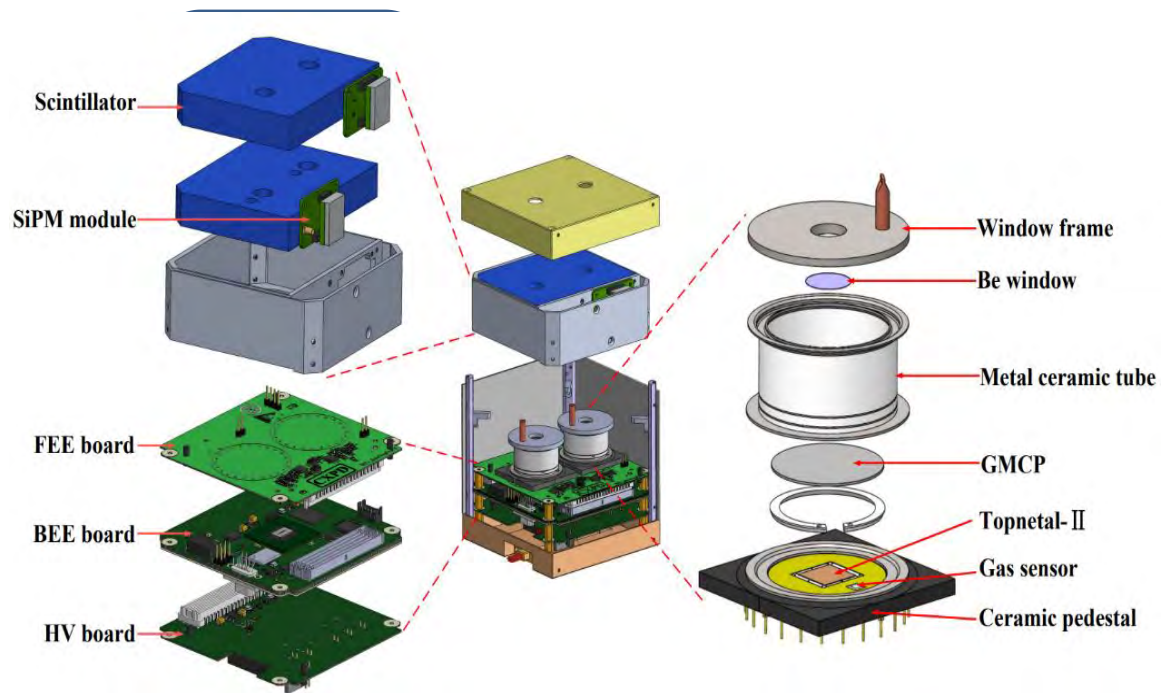
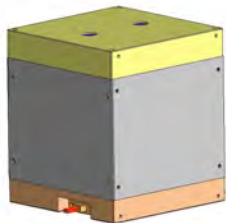
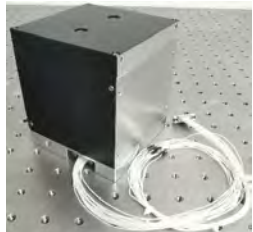
Cosmic X-ray Polarimeter Detection (CXPd) CubeSat

- * Validation of soft X-ray polarization detection technology
- * Spatial background measurement
- * Standard X-ray source polarization measurement

Size : $96 * 96 * 108 \text{ mm}^3$

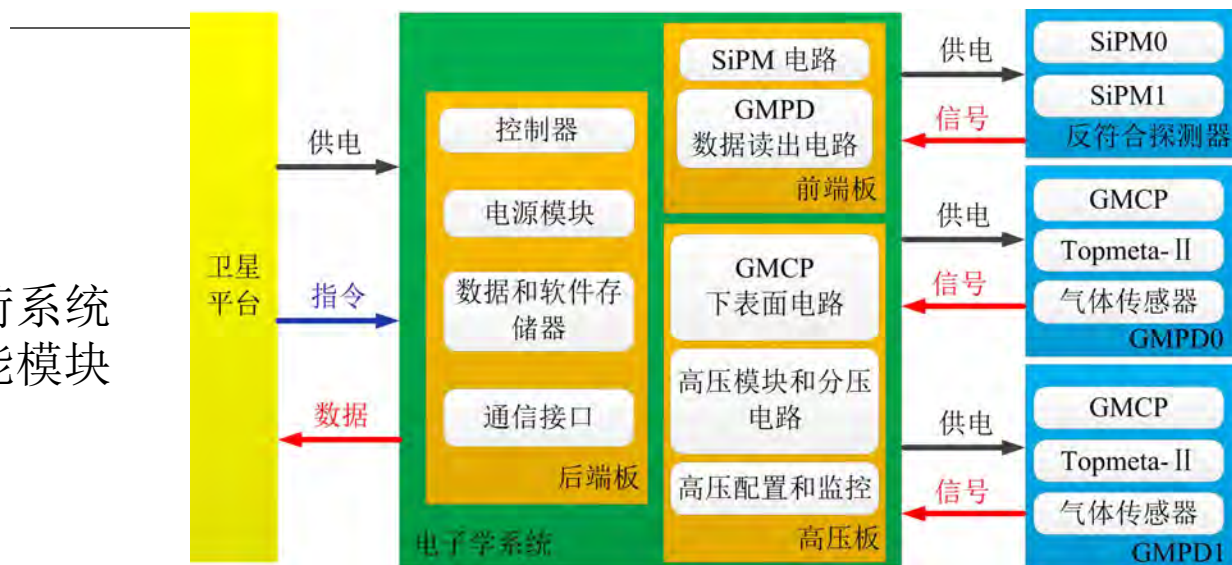
Mass: $\sim 900 \text{ g}$

Power consumption : $< 5 \text{ W}$



CXPD立方星结构

CXPD有效载荷系统组成和各功能模块划分

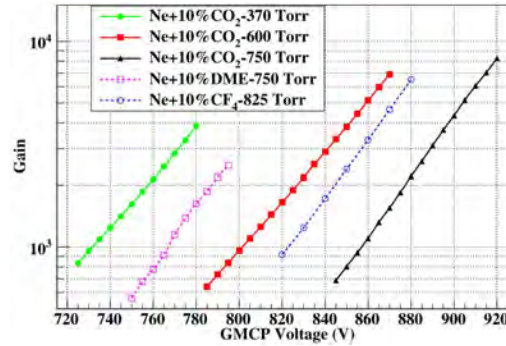
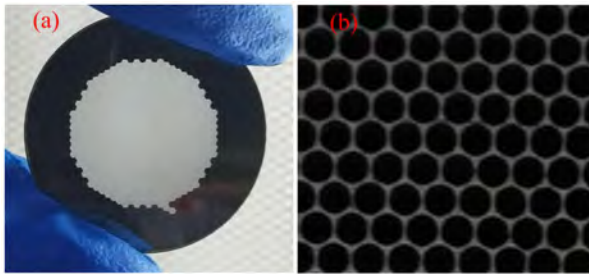


CXPD 记录的数据

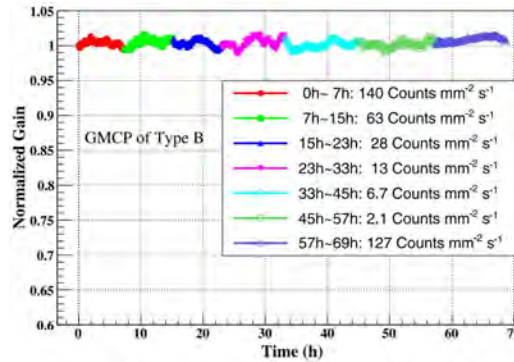
Component	Data types			
	SiPM data	SiPM trigger time		
GMCP data	GMCP time	GMCP ADC value		
Topmetal data	Topmetal time	Pixel address value	Pixel ADC value	
Monitoring data	HV voltage value	HV current value	GMPD temperature value	GMPD pressure value

Hui Wang et al., Nucl. Sci. Tech, 2023 Zongwang Fan et al., IEEE Trans, 2023

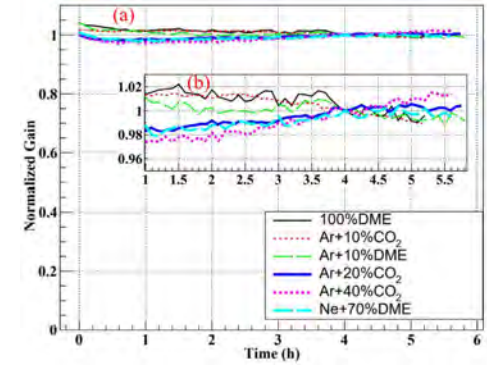
Gas Microchannel Plate (GMCP)



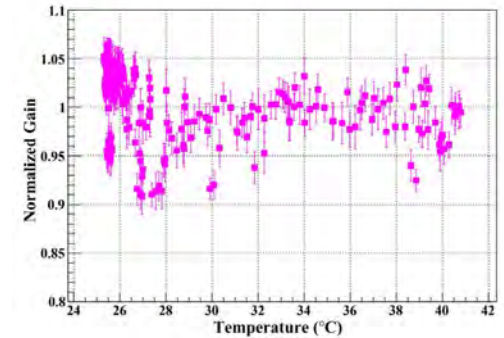
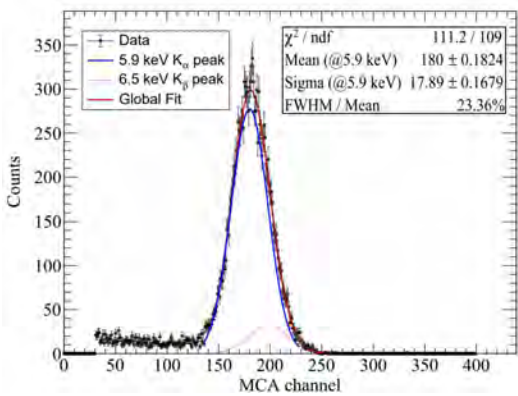
增益与GMCP电极间施加电压的关系



计数率对GMCP增益的影响

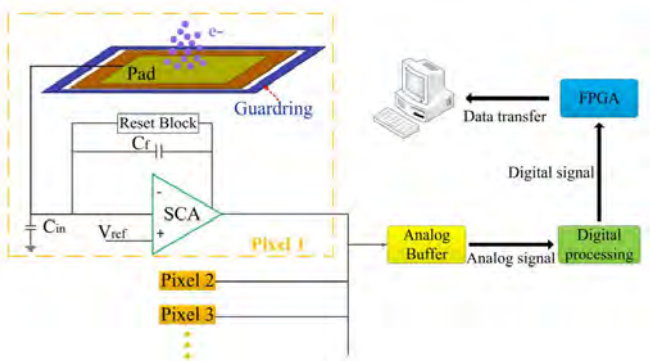
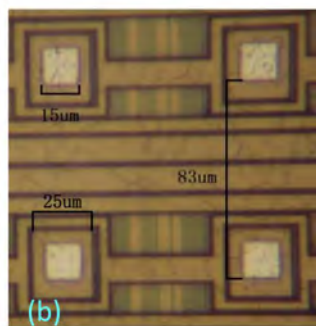
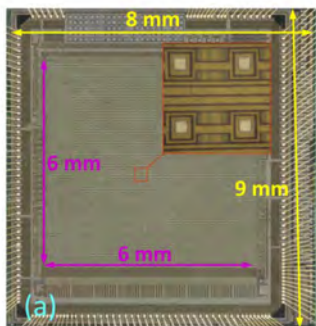


GMCP相对增益随着工作时间的变化

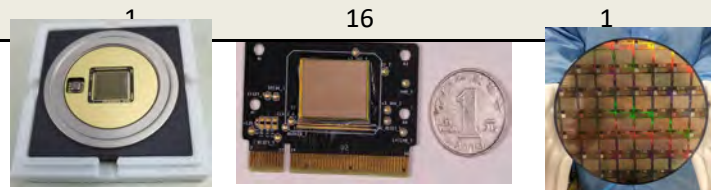


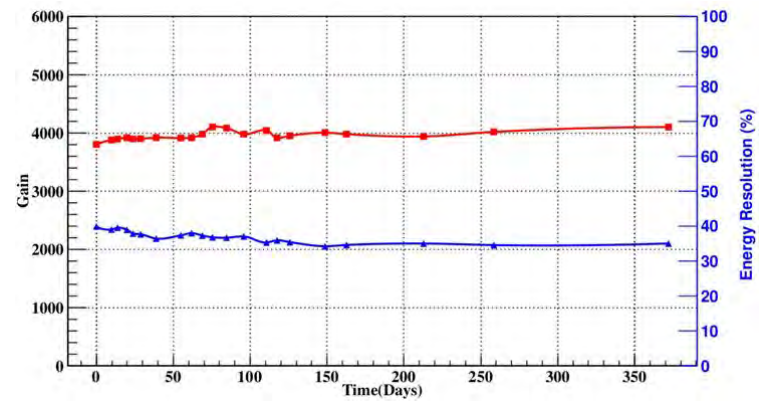
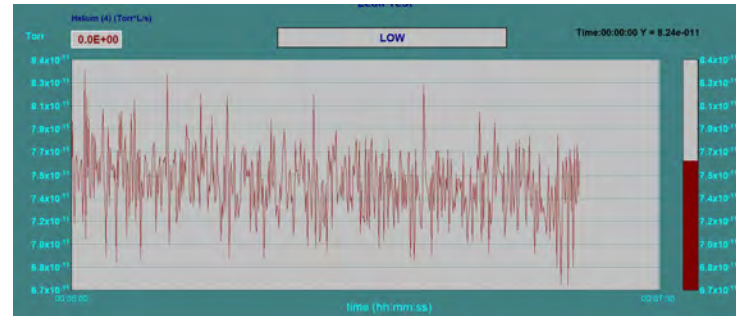
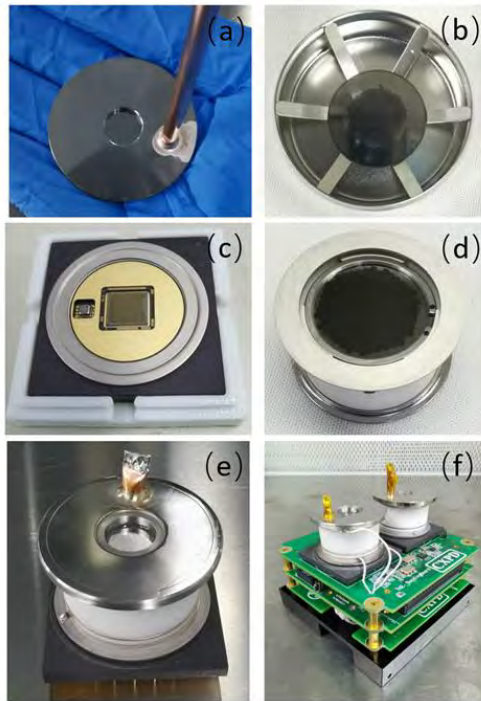
温度的对GMCP增益的影响

Topmetal 芯片

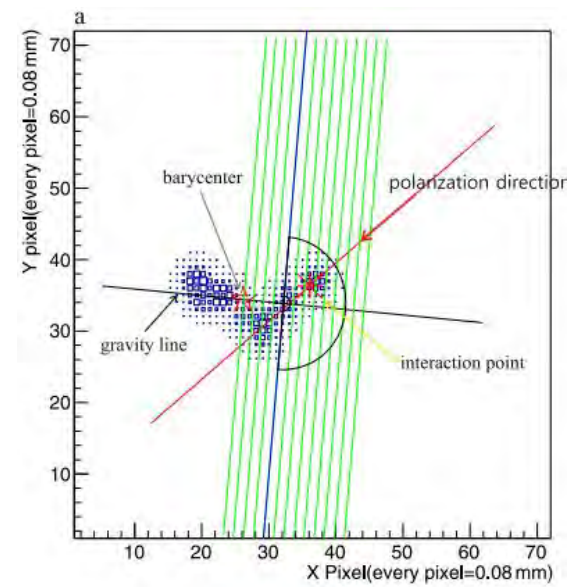
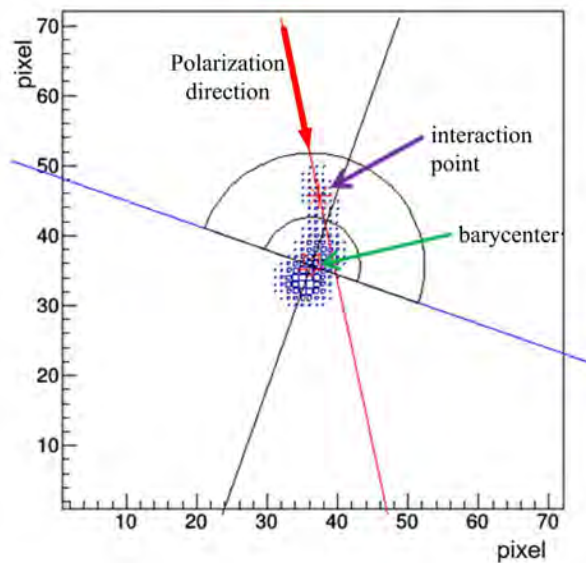
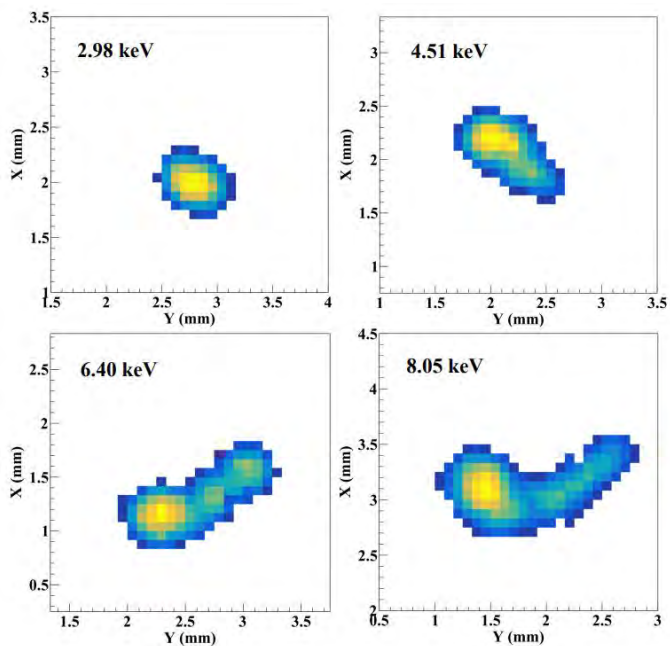


	Topmetal-II	Topmetal-M1/M2	Topmetal-L
Chip Size /mm ²	6 × 6	18 × 23	17 × 24
Pixel Array	72 × 72	400 × 512	356 × 512
Pixel Size /μm ²	83 × 83	45 × 45	45 × 45
Pixel Electrode / μm ²	15 × 15	10 × 20	26 × 26
ENC	~ 13.4e-	~ 15.4e-	~ 20.0e-
Power Consumption	~ 1W @3.3V	~ 4.3W @3.3V	~ 0.8W @3.3V
Clock	40MHz	5MHz	20MHz
Frame Rate	2.5ms	2.4ms	0.37ms @Sentinel Readout
Readout Mode	Rolling Shutter	Rolling Shutter	Rolling Shutter /Sentinel Readout
Readout Channel	1	16	1

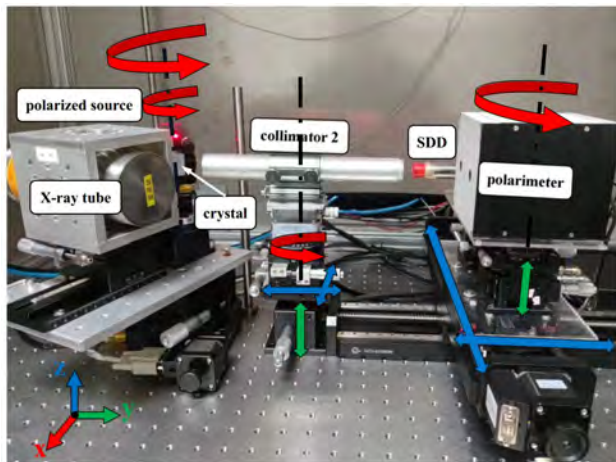
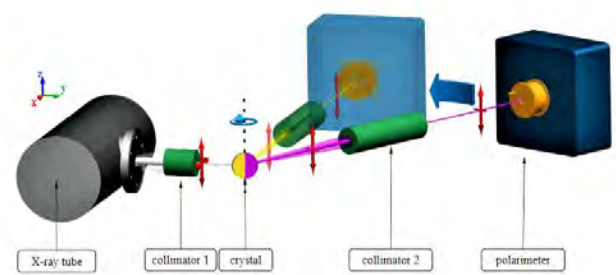
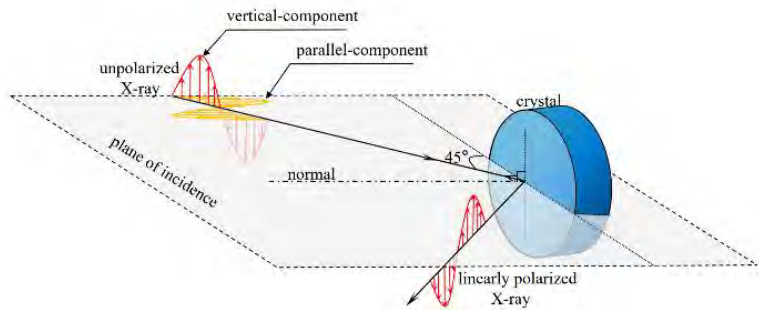




X-ray 光电子径迹



X-ray 标定平台



X-ray polarized calibration platform

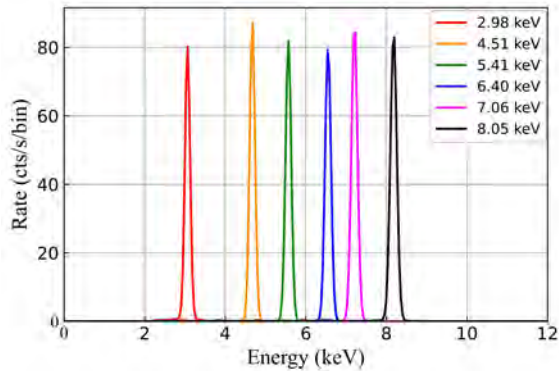
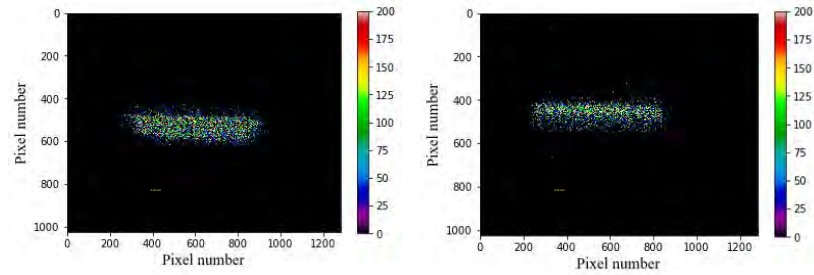
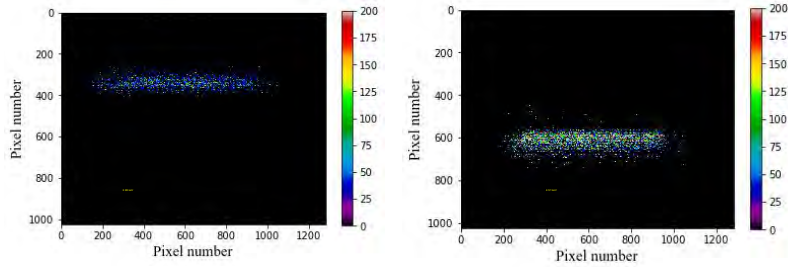


TABLE II. Configurations and performance list of 8.05 keV linear polarized sources. The polarization degree is calculated using Eq. (3).

Energy(keV)	2.98	4.51	5.40	6.40	7.06	8.05
Crystal	Si(111)	Si(220)	Si(311)	Si(400)	Si(331)	Si(224)
Incident radiation	Ag L_{α}	Ti K_{α}	Cr K_{α}	Fe K_{α}	Fe K_{β}	Cu K_{α}
Diffraction angle(deg)	41.6	45.8	44.5	45.5	44.9	44.1
Rate(cts/s)	207.52	375.49	370.49	375.8	426.77	439.25
Proportion of monochromatic light ^a (%)	93.04	97.91	98.31	98.64	97.40	97.32
FWHM(eV)	139.38	146.69	149.39	142.42	158.62	159.73
X-ray tube settings	8.0 kV, 0.49 mA	6.5 kV, 0.19 mA	7.0 kV, 0.19 mA	8.0 kV, 0.31 mA	9.8 kV, 0.44 mA	9.5 kV, 0.58 mA
Polarization(%)	97.4	99.8	99.9	99.8	99.9	99.8

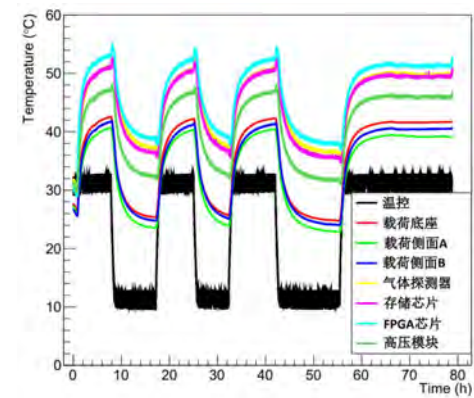
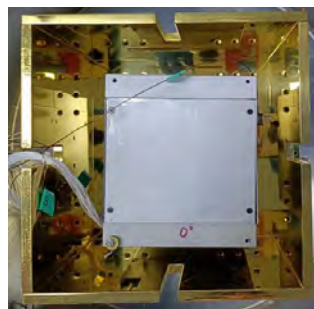
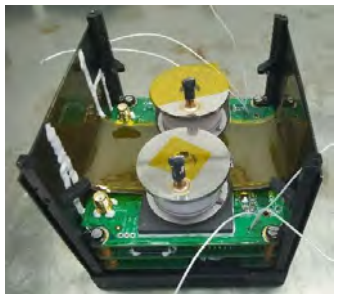
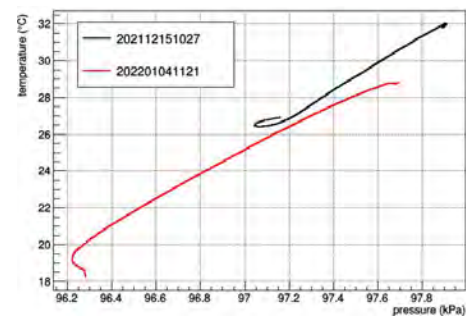
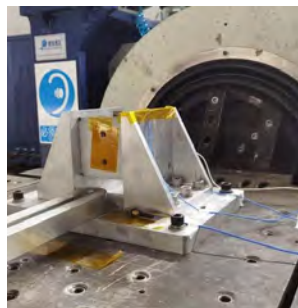
^a The proportion of monochromatic light is defined as the ratio of the number of photons falling within three times the sigma of the target peak centre value to the total photons.

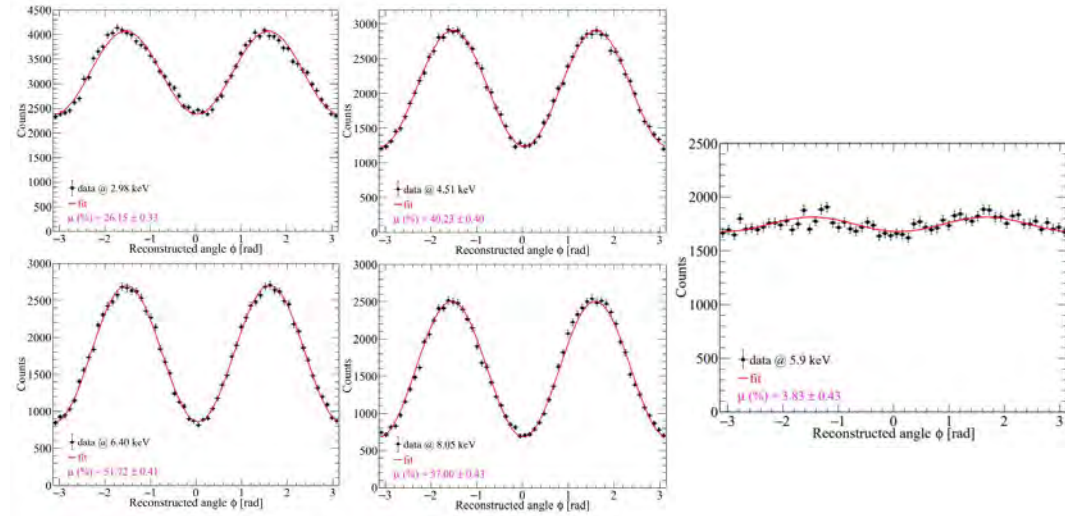
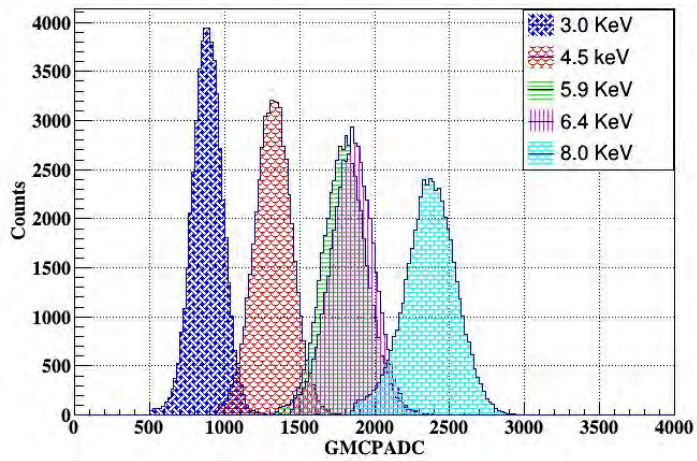
TABLE III. Configurations and performance list of 8.05 keV partially polarized sources. The copper K_{α} characteristic line diffracted by silicon crystal to generate beams with different degrees of polarization. The polarization degree is calculated using Eq. (3).

Energy(keV)	8.05	8.05	8.05	8.05	8.05	8.05
Crystal	Si(111)	Si(220)	Si(311)	Si(400)	Si(331)	Si(224)
Incident radiation	Cu K_{α}	Cu K_{α}	Cu K_{α}	Cu K_{α}	Cu K_{α}	Cu K_{α}
Diffraction angle(deg)	14.2	23.7	28.1	34.6	38.2	44.1
Rate(cts/s)	277.75	166.66	224.14	657.92	146.97	555.92
Proportion of monochromatic light ^a (%)	92.82	96.84	98.32	98.40	98.36	98.37
FWHM(eV)	193.05	162.63	159.61	159.24	159.11	159.73
X-ray tube settings	9.3 kV, 0.19 mA	9.4 kV, 0.39 mA	10.3 kV, 0.19 mA	11.5 kV, 0.29 mA	10.0 kV, 0.19 mA	10.5 kV, 0.29 mA
Polarization(%)	12.8	37.0	52.6	77.5	89.5	99.8

^a The proportion of monochromatic light is defined as the ratio of the number of photons falling within three times the sigma of the target peak centre value to the total photons.

CXPD 组装





Energy (keV)	E_{peak} (ADC)	FWHM (ADC)	FWHM/ E_{peak}
2.98	885.5 ± 0.5	230.3 ± 0.9	0.260 ± 0.002
4.51	1323.1 ± 0.6	285.0 ± 1.1	0.215 ± 0.001
6.40	1880.1 ± 0.7	338.9 ± 1.4	0.180 ± 0.001
8.05	2369.6 ± 0.9	190.1 ± 1.7	0.165 ± 0.001

GMPD, 40%He+60%DME, 0.8 atm		
Energy (keV)	μ	$\mu\sqrt{\epsilon}$
2.98	0.2615 ± 0.0033	0.0753
4.51	0.4023 ± 0.0040	0.0749
6.40	0.5172 ± 0.0041	0.0608
8.05	0.5700 ± 0.0043	0.0486

立方星状态



2023.2 立方星载荷交付

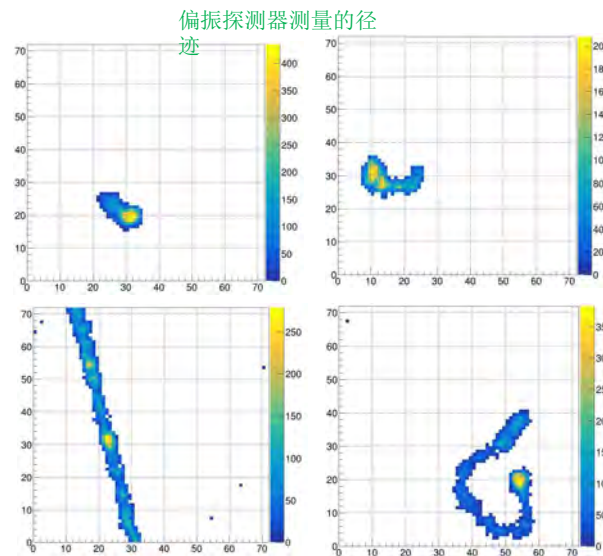
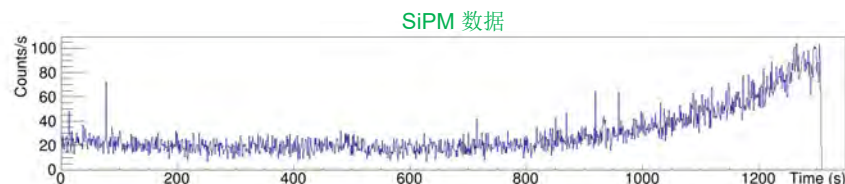
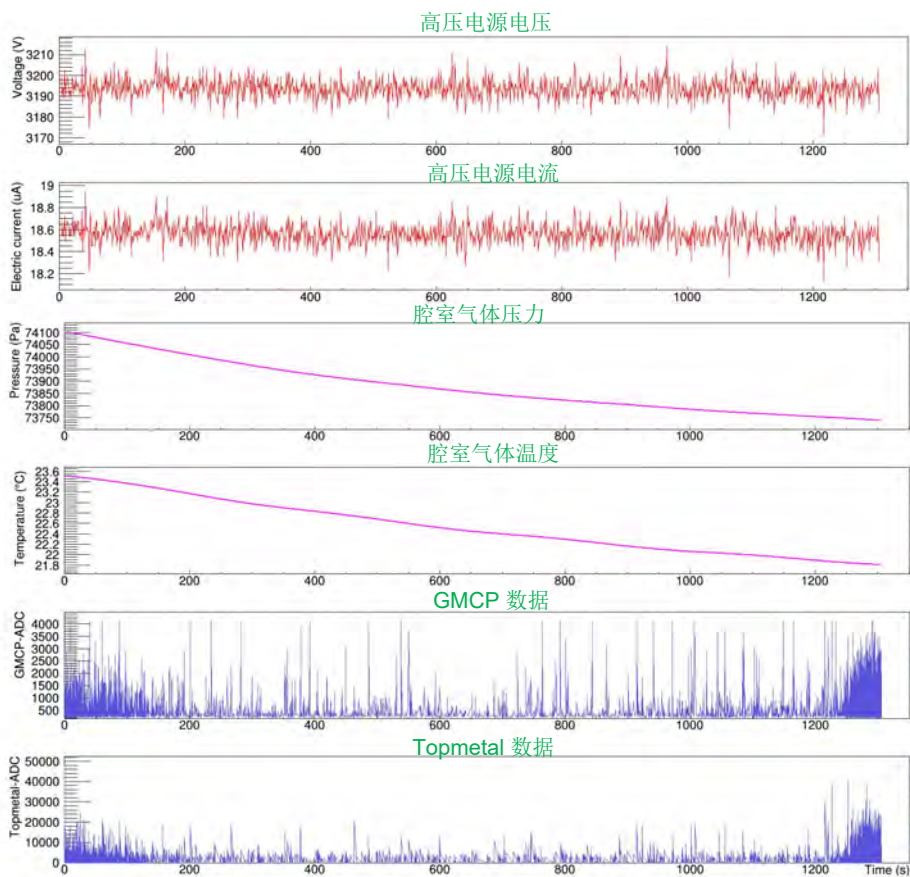


5.10 CXPД 载
荷与卫星平台完
成联调



6.7 CXPД立方星在
酒泉卫星发射中心
成功发射

立方星状态--工作正常



CXPD载荷的所有数据正常，工作良好，完成了空间X射线偏振测量的技术验证。

总结与展望

- POLAR项目整个研制周期约10年，中欧开展了深度融合的国际合作
- POLAR完成了科学目标: 55个伽马暴、14个偏振测量结果、国际上最大的高精度伽马暴偏振测量样本。探测到~10个太阳耀斑事件；对在轨期间发生的引力波暴事件开展高能成协爆发搜索和电磁流量上限分析
- POLAR观测结果提出了新的科学问题，挑战现有理论模型
- POLAR-2项目的提出具有重要意义，将包括HPD（中欧合作）、LPD（中方）以及BSD（中方）三个载荷。目前，HPD已在欧洲立项并获得经费，中方载荷正在开展立项申请等工作。POLAR-2将实现更宽能区、更大样本的高精度伽马暴偏振测量，从而回答POLAR所提出的科学问题，并开辟新的研究方向
- POLAR-2 目前计划2026~2028年发射，安装于中国空间站开展实验