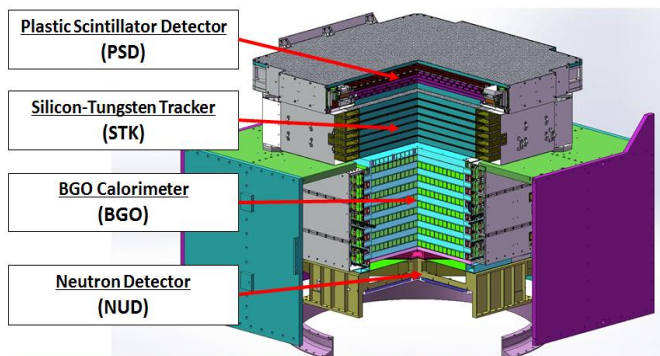


深度探索极端宇宙 空间新项目和新探测技术

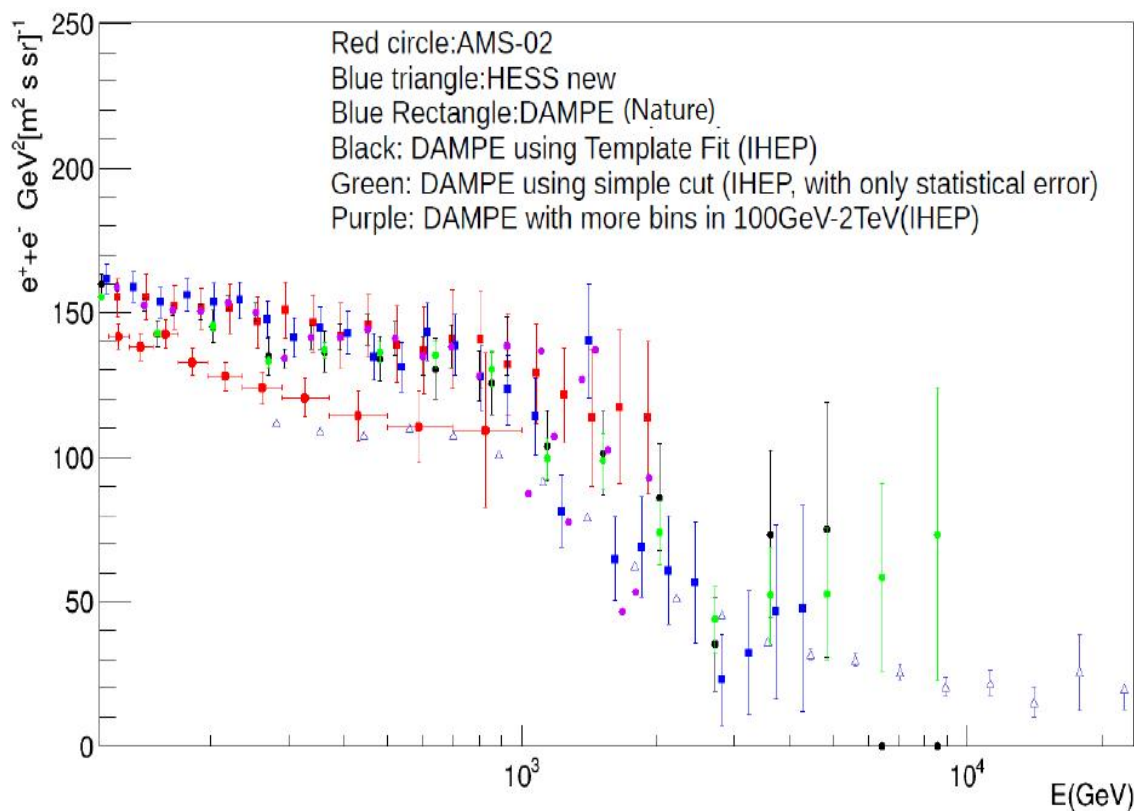
中科院高能物理研究所
粒子天体物理中心/重点实验室
张双南

中国开始了探索极端宇宙：悟空



- Charge measurement (dE/dx in PSD, STK and BGO)
- Pair production and precise tracking (STK and BGO)
- Precise energy measurement (BGO bars)
- Hadron rejection (BGO and neutron detector)

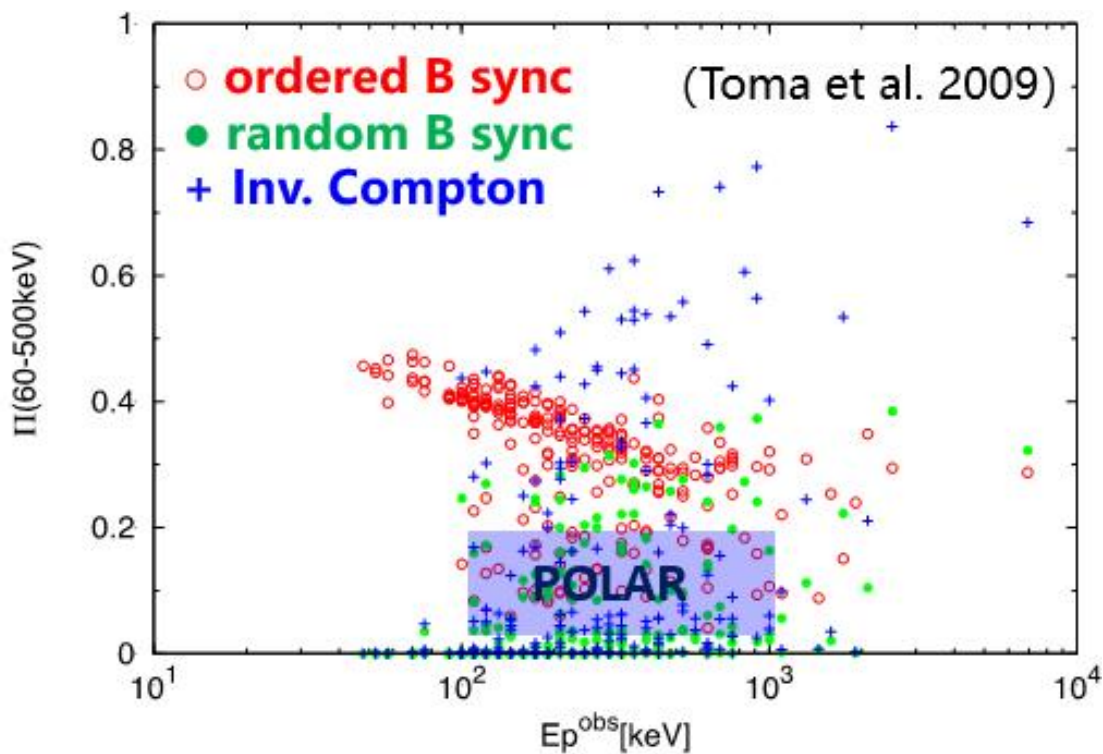
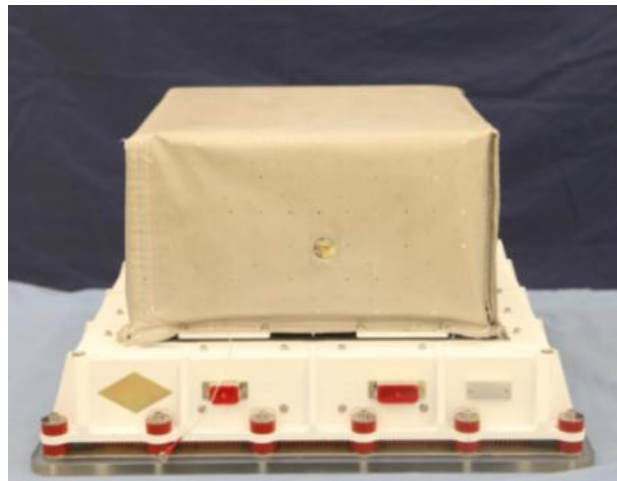
J. Chang et al. DAMPE Collaboration, Astroparticle Physics 95 (2017) 6–24



DAMPE 100 GeV-10 TeV 电子正电子能谱结果

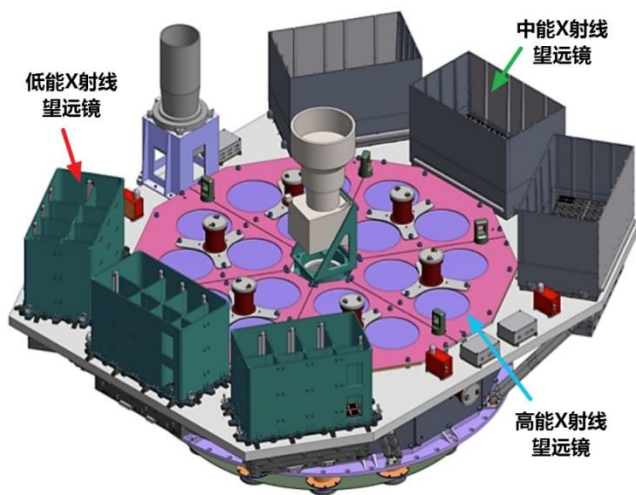
暗物质粒子卫星**2015年12月17日**发射，得到了**最精确宇宙高能电子谱**，发现了可能是暗物质湮灭的信号！

中国开始了探索极端宇宙：POLAR



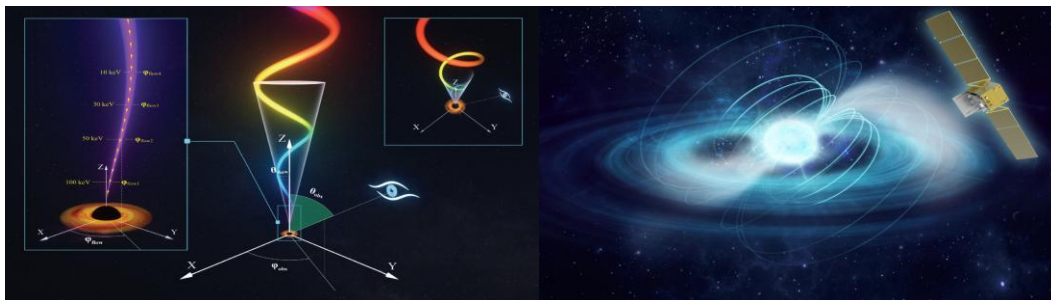
伽马射线暴偏振仪POLAR随天宫二号于2016年9月15日发射，得到了最精确和最大样本的伽马射线暴偏振测量结果，挑战了主流伽马暴相对论喷流模型。

中国开始了探索极端宇宙：慧眼HXMT



发现黑洞双星系统最高能量的准周期振荡现象，来自于距离黑洞最近的相对论喷流；

在中子星双星系统发现最高能量回旋吸收线，直接测量到迄今为止宇宙中最强磁场约为16亿特斯拉



[sciencemag.org](https://www.sciencemag.org)

China successfully launches x-ray satellite | Science

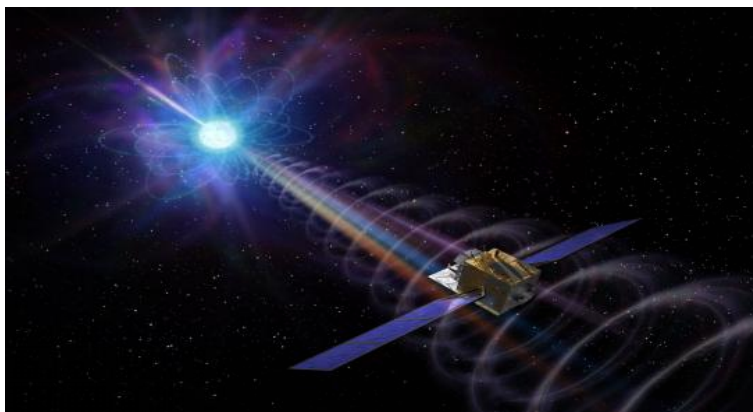
By Dennis Normile Jun. 15, 2017, 11:00 AM

4-5 分钟



A rocket carrying China's new x-ray telescope blasts off.

发现并证认快速射电暴的X射线对应体，证明快速射电暴可以起源于磁星暴发，帮助破解了快速射电暴的起源之谜



GECAM: 为多信使天文学服务的项目



- **Sciences (科学)**

- GW GRB (GW EM from keV to MeV)
- Fast Radio Bursts (FRB), High Energy Neutrinos (HEN), GRB, Magnetar

- **Performance (性能)**

- 100% all-sky FOV, high sensitivity, wide energy band, good localization (~ 1 deg)

- **Innovations (创新)**

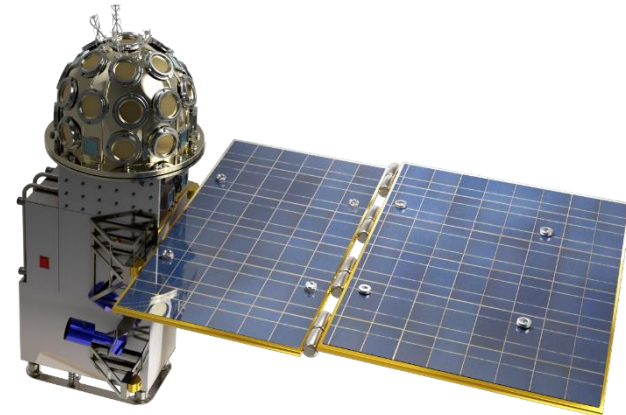
- Two small satellites, **ALL-TIME ALL-SKY**
- BeiDou navigation system, **real-time data**

- **Mission of Opportunity (机遇项目)**

- Proposed in 2016, approved in 2018
- **2020.12.10发射, 已经取得了很多成果**

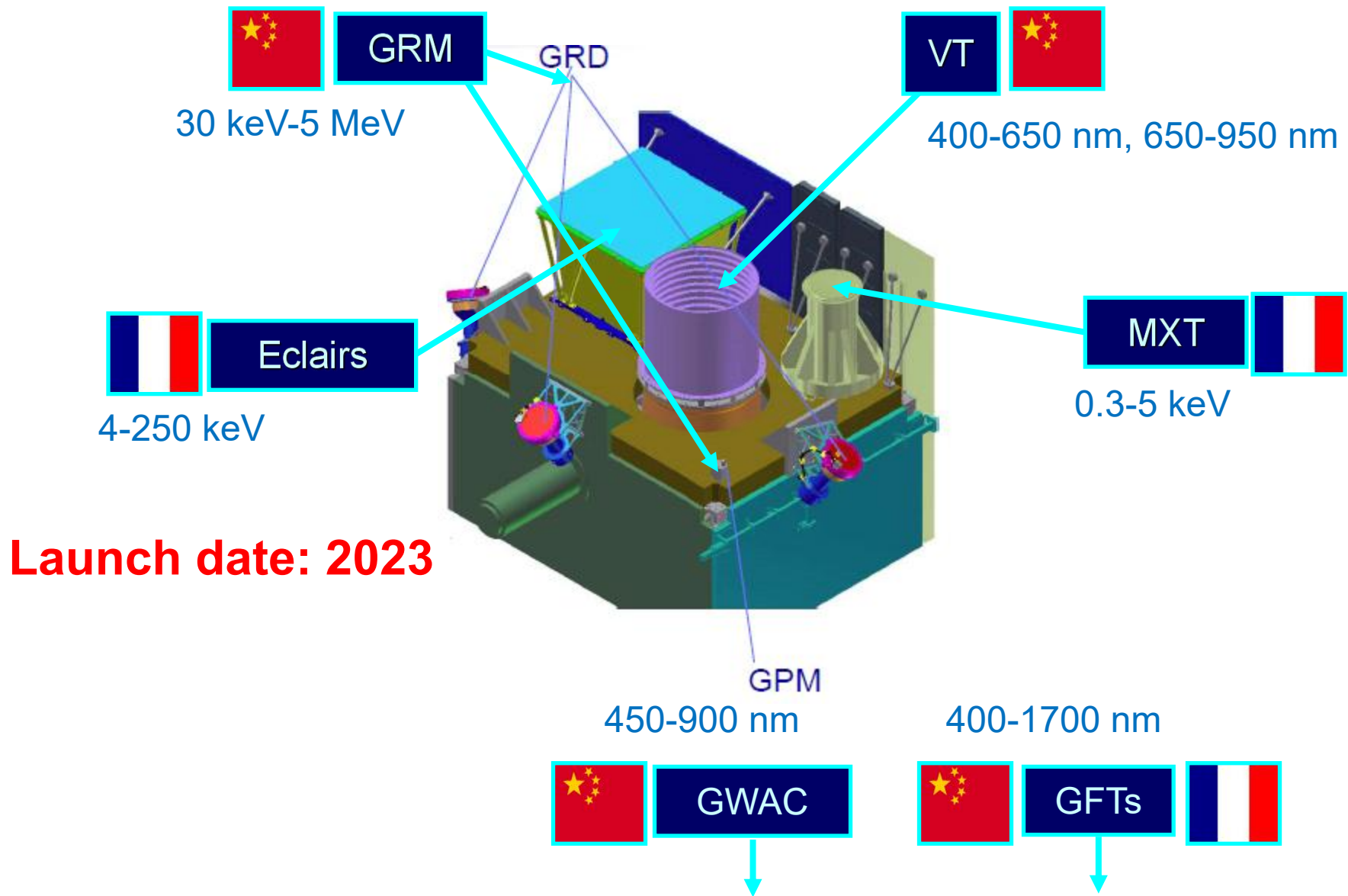


GECAM星座



GECAM卫星

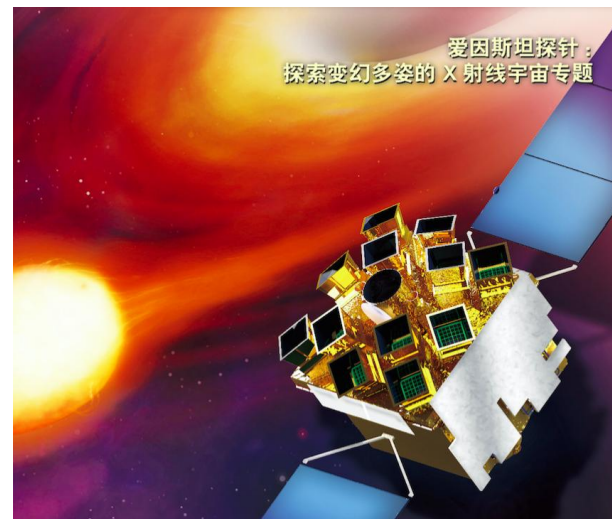
SVOM (中法合作多波段空间变源监视器)



Launch date: 2023

爱因斯坦探针 (EP)

- 主要科学目标：各种变源，包括黑洞瓦解恒星、活动星系核、伽马暴、引力波暴等极端天体物理现象
- 采用新型龙虾眼X射线聚焦技术
- **Launch date: 2023**



Mission Features

- Very wide FoV 1.1 sr (3600 sq. deg.) grasp: $\sim 10,000 \text{ deg}^2.\text{cm}^2$
- Good angular resolution ($\sim 5'$) and positioning accuracy ($< 1'$)
- Soft X-ray band: $0.5\text{-}5 \text{ keV}$
- Sensitivity: **> 1 order of magnitude higher** than current telescopes
- **Autonomous X-ray follow-up ($< 10 \text{ arcsec}$ localisation)**
- Fast alert data downlink and fast uplink for ToO

然而还有多个“极端宇宙”科学问题



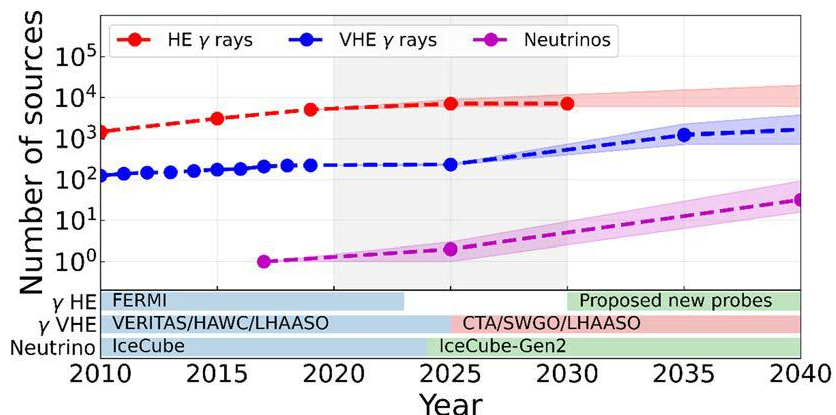
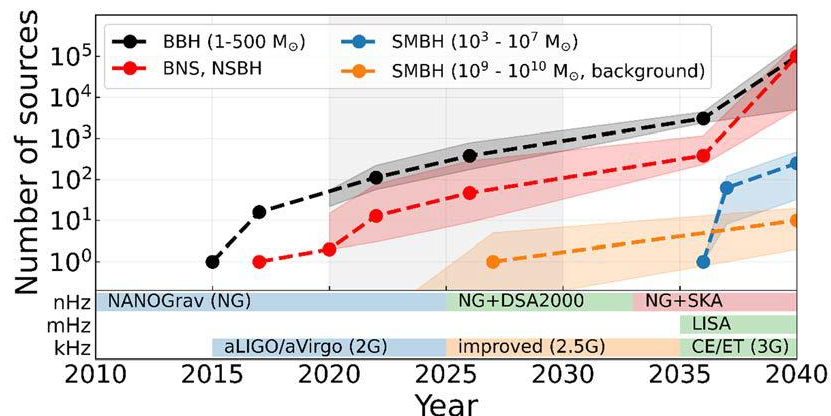
1. **极端起源**：宇宙大爆炸的极端过程产生的暗物质和普通物质的比例是大约6:1，但是目前还没有发现暗物质粒子
2. **极端能量**：高能宇宙线的能量比人造加速器的能量高至少一亿倍，但是其极端粒子加速过程还不清楚
3. **极端天体**：宇宙中的高能伽马射线源很可能是宇宙极端高能粒子加速器，但是目前的巡天研究还没有完全证认
4. **极端爆发**：伽马射线暴是宇宙大爆炸之后最剧烈的爆发现象，然而发出伽马射线的极端相对论喷流的性质还不清楚
5. **极端引力**：黑洞提供了宇宙中最强的引力场，但是在这种极端引力条件会发生什么现象还没有精确的观测结果
6. **极端磁场**：中子星提供了宇宙中最强的磁场，但是在这种情况下真空涨落会产生什么还没有直接的观测结果
7. **极端密度**：中子星内部的物质密度在宇宙中最高，但是其内部是由中子还是夸克物质组成的仍然是未解之谜

国际天文学发展新方向：新信使天文学



- 2021年11月，美国天文和天体物理十年规划（**Astro2020**）报告发布
- “自从上一次十年规划以来，四种探测手段（引力波、中微子、伽马射线和宇宙线）的巨大进步构成了新信使天文学。”，“观测极端加速器具有高优先级”，建议“**第一步就是建设功能强大的新信使天文台。**”
- 然而，目前的相关空间项目“正在达到寿命的末期，（美国）并没有部署继任者”，“美国将失去领导地位。”
- 报告把HERD列为GeV-PeV能量范围唯一已经批准的未来空间实验
- 2021年国际宇宙线大会总结报告把HERD排为**未来空间宇宙线实验第一名**

目前和未来引力波信使



目前和未来伽马射线和中微子信使

极端宇宙1：极端起源的暗物质之谜

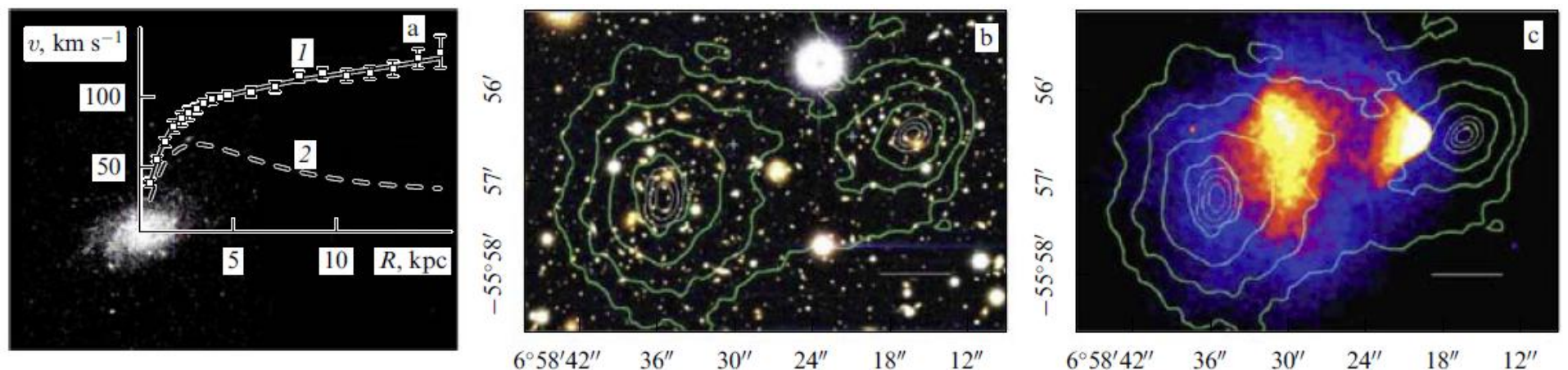


Figure 2. (a) Rotation curves for the M33 galaxy [4]: 1, the observed curve, 2, theoretical curve of the glowing galactic disk. (b) Optical and (c) X-ray images of cluster 1E0657-558 obtained with the Hubble and Chandra telescopes, respectively. The curves show mass density contours reconstructed by gravitational lensing [5]. Horizontal axes are the inclination angles, vertical axes are the ascension angles.

- 暗物质确实存在
- “**极端起源**”：宇宙大爆炸的极端过程产生的暗物质和普通物质的比例是大约6:1，但是还没有发现暗物质粒子。

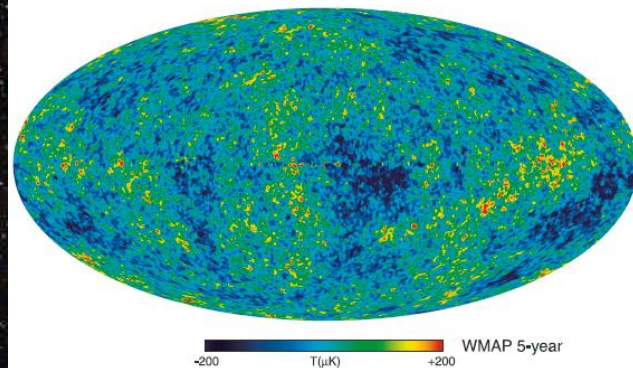
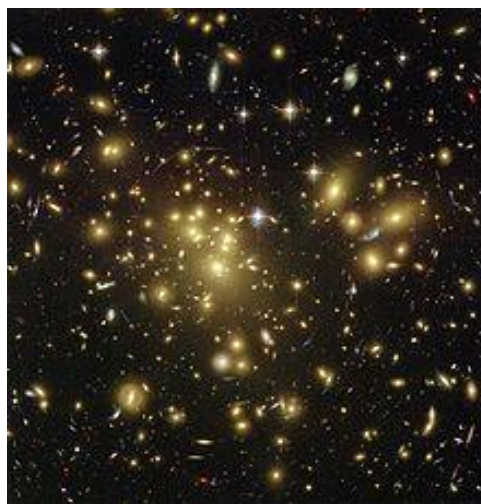
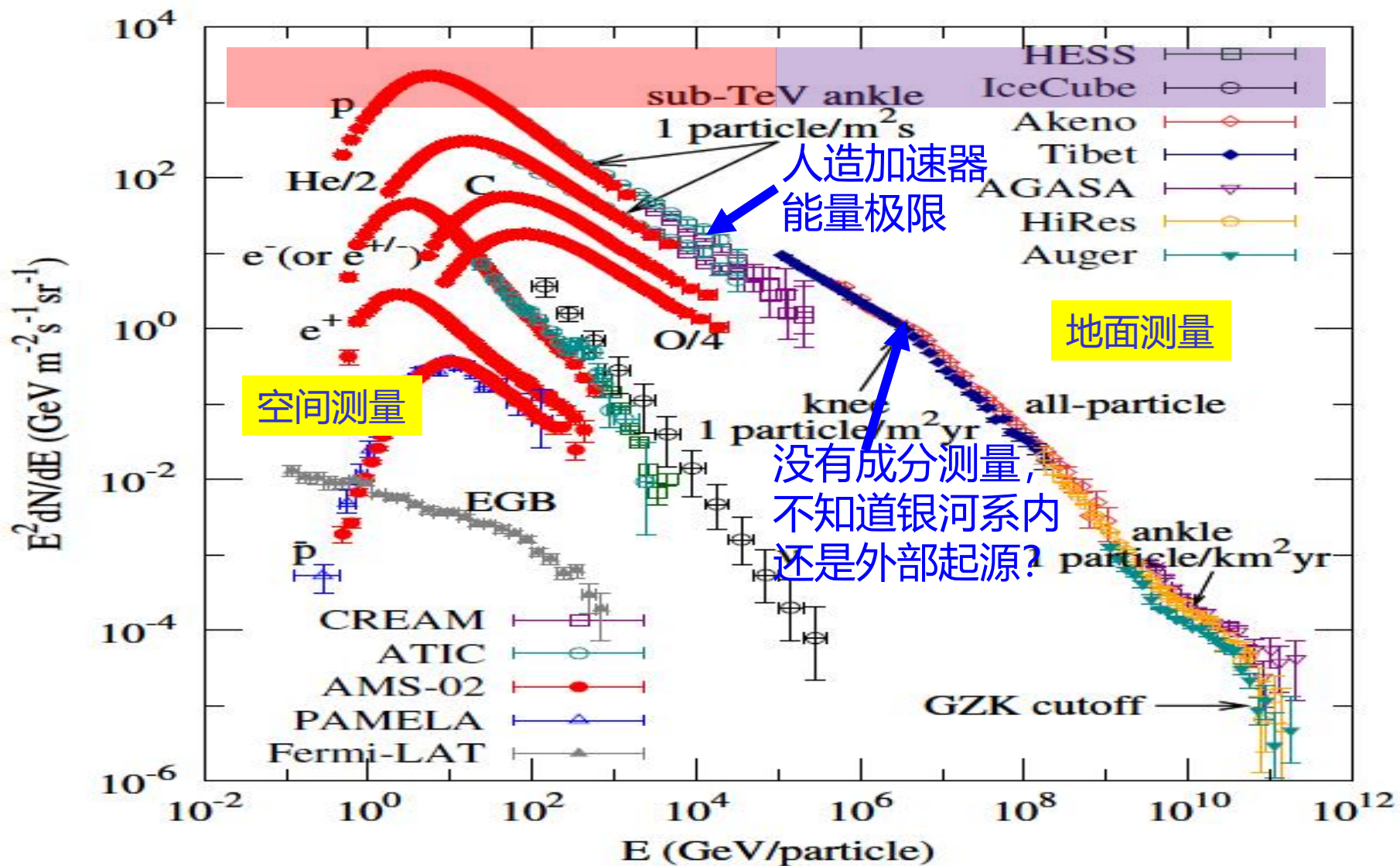


Figure 12. The foreground-reduced Internal Linear Combination (ILC) map based on the five year WMAP data.

极端宇宙2：极端能量的宇宙线世纪之谜！

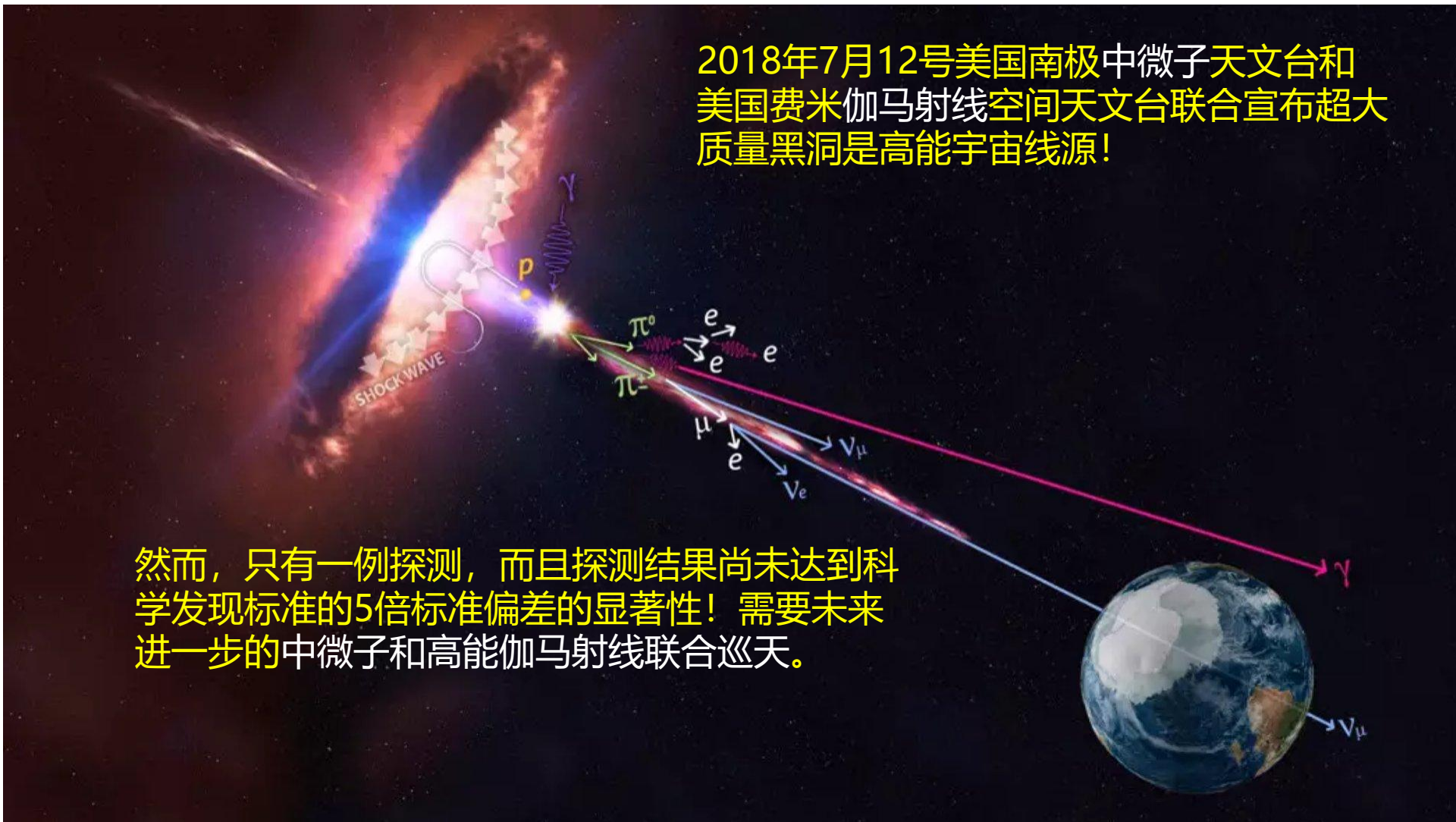


极端宇宙3：极端天体产生高能宇宙线？



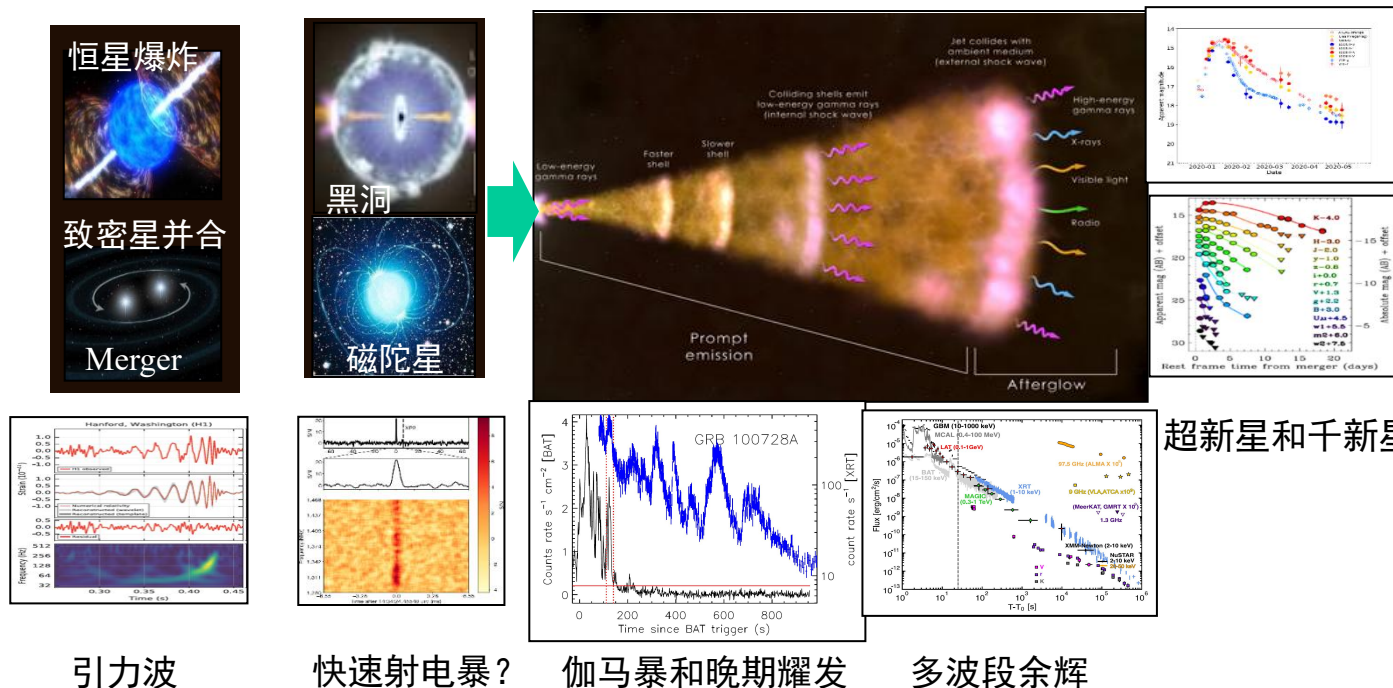
2018年7月12号美国南极中微子天文台和美国费米伽马射线空间天文台联合宣布超大质量黑洞是高能宇宙线源！

然而，只有一例探测，而且探测结果尚未达到科学发现标准的5倍标准偏差的显著性！需要未来进一步的中微子和高能伽马射线联合巡天。



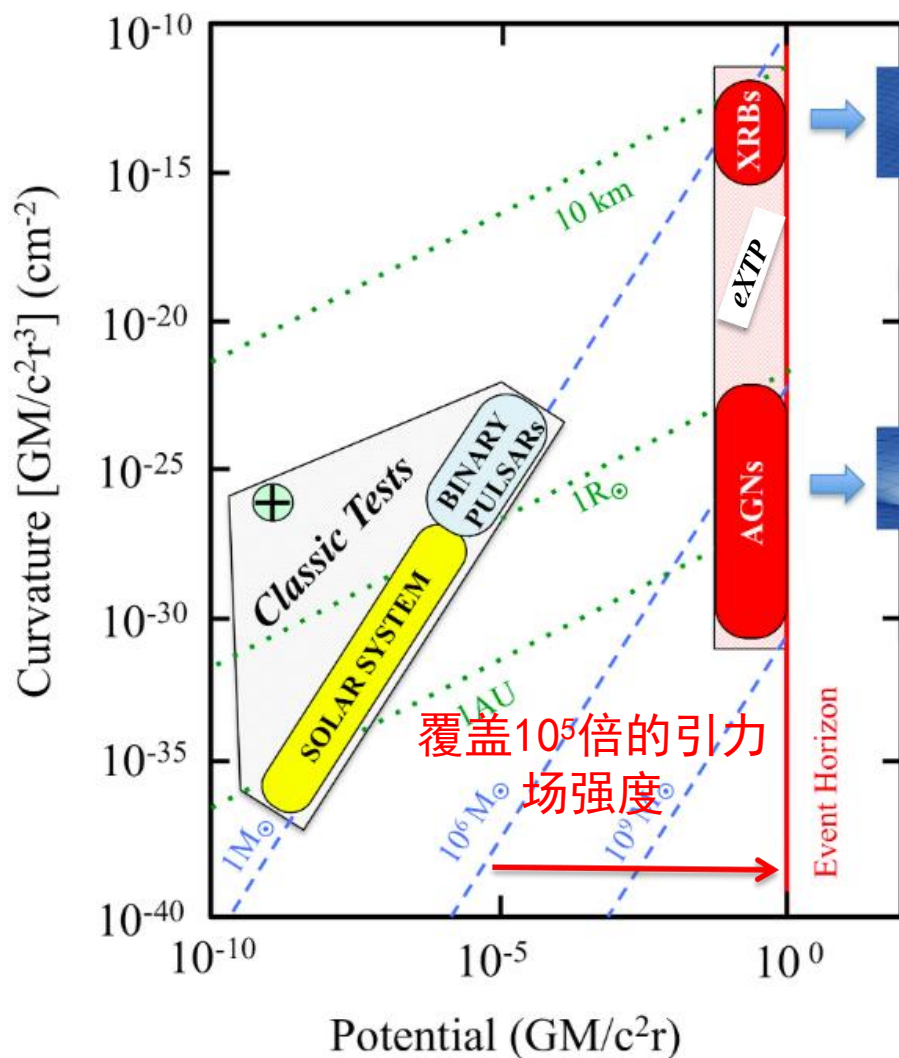
极端宇宙4： 极端爆发

伽马射线暴是宇宙大爆炸以来最剧烈的爆发现象， 恒星爆炸或致密天体并合的产物， 当今多信使天文、 极端条件天体物理研究的最佳对象！



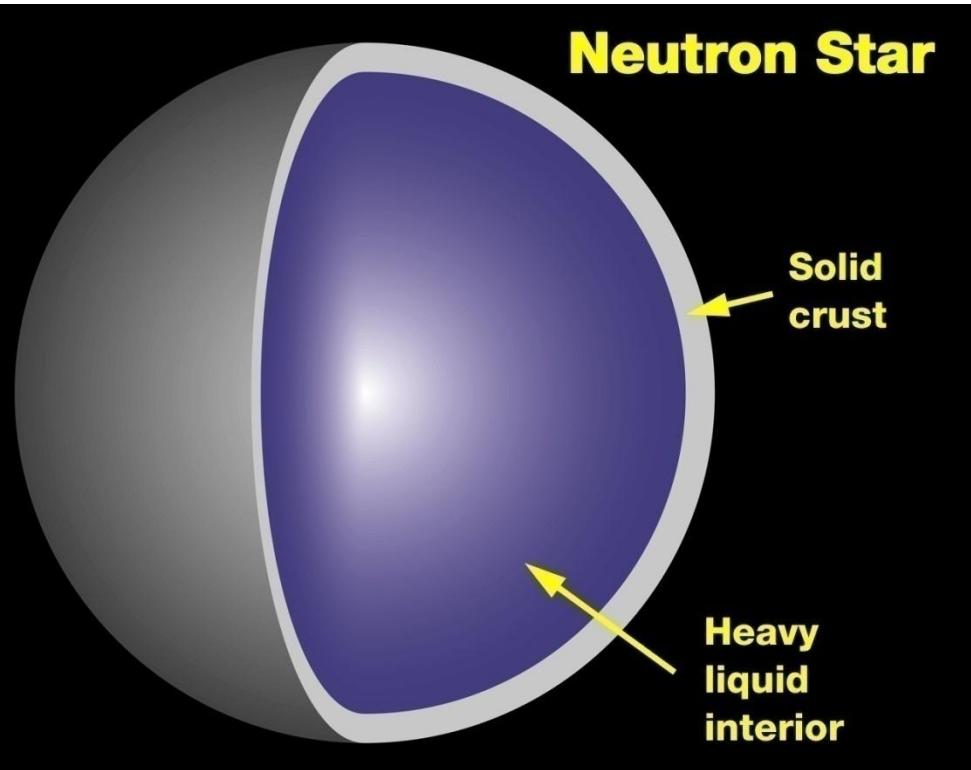
核心科学问题：爆发的引力波辐射，新生致密天体及剧烈爆发活动，中心引擎及喷流形成，极端相对论喷流结构和磁场特性，粒子加速和辐射机制，高能宇宙线，超新星爆炸机制，宇宙重核元素合成

极端宇宙5：黑洞附近的极端引力！

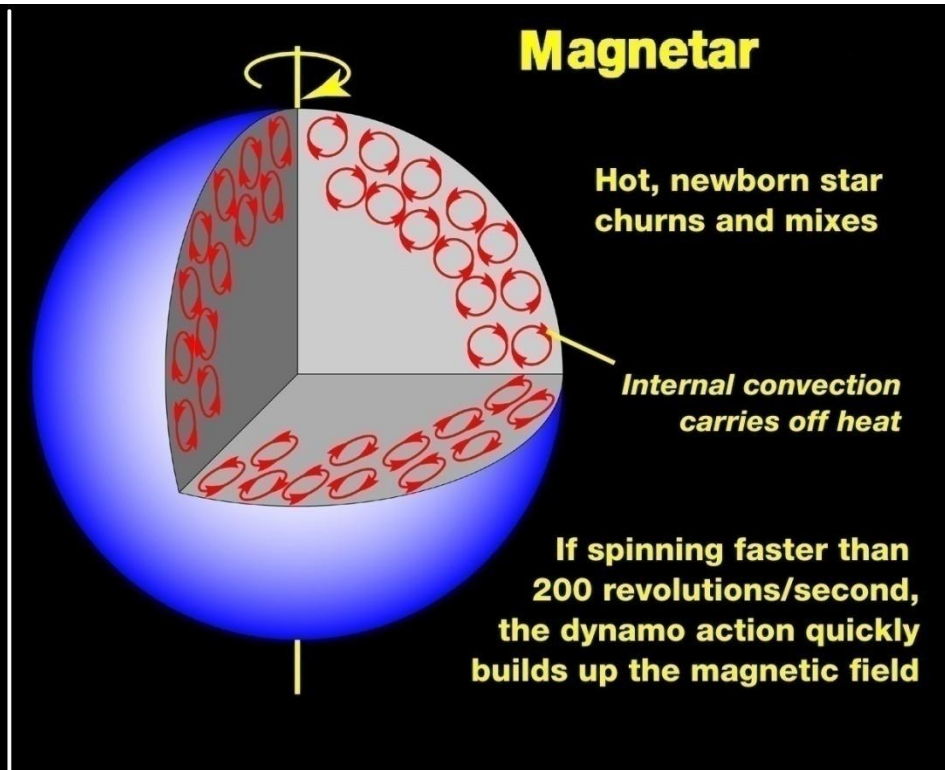


黑洞附近的极端引力
比地球的引力强10
亿倍，比地球的空间
曲率高百万亿倍

检验极端磁场条件下的量子电动力学的预言



普通中子星
表面稳定磁场 $\sim 10^{4-9}$ T



磁中子星
表面稳定磁场 $\sim 10^{10}$ T

地球表面稳定磁场 $\sim 10^{-4}$ T，实验室最强稳定磁场 ~ 10 T

极端宇宙7：极端密度的物理规律

量子色动力学的核心科学问题

温度

早期宇宙

EARLY UNIVERSE

LHC

Critical Point

高能质子对撞机

重离子对撞机

Heavy Ion Collision Experiments

Temperature (MeV)

100

10

1

0.1

0.01

0.001

Hadronic matter

1st order phase transition

Quarkyonic Matter

Quark gluon plasma

Color Superconducting Phases

Neutron stars

Nuclear Superfluid

中子星

Gas-liquid transition

NUCLEAR MATTER

Baryon Chemical Potential

2000 (MeV)

increasing density

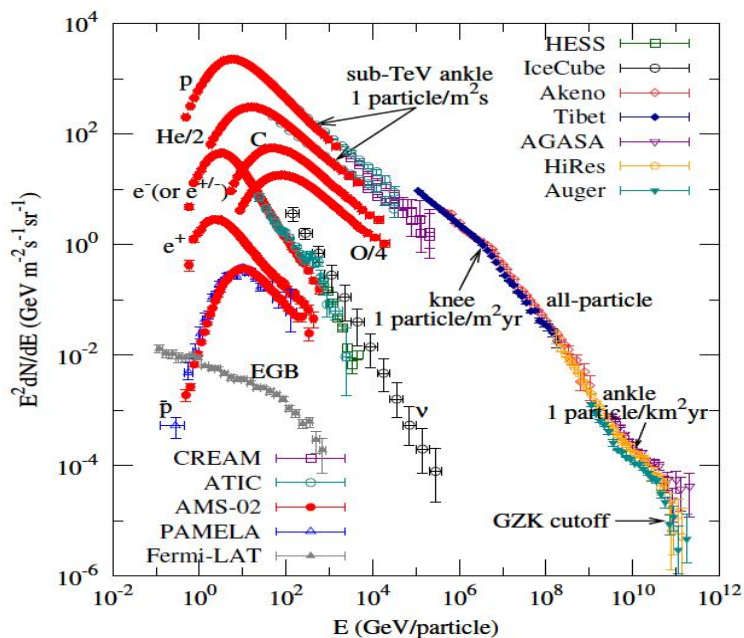
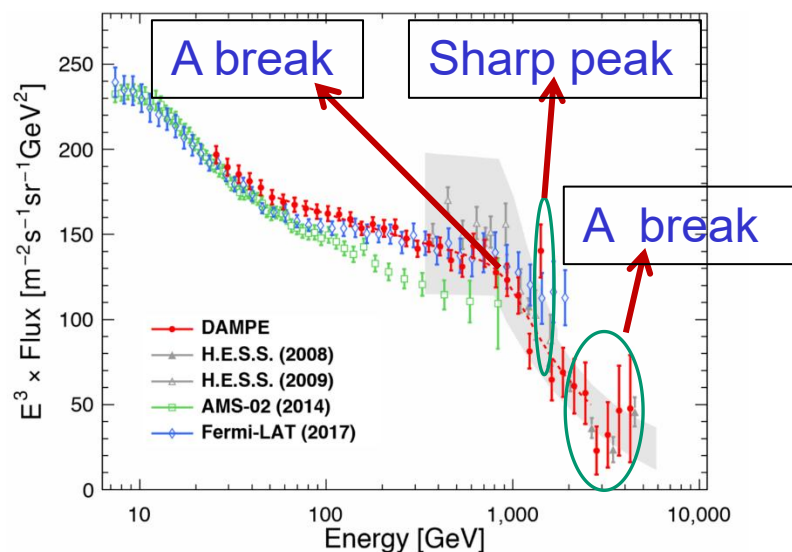
密度

- 空间高能宇宙辐射探测设施（HERD）项目是计划于2027年安装在中国空间站上的空间天文和粒子天体物理实验，预计在轨运行10年以上。
- HERD采用三维位置分辨五面灵敏的创新设计，其核心科学能力将长时间保持大幅度国际领先，将成为中国空间站标志性的旗舰级重大科学实验和具有国际影响的大型国际合作项目。



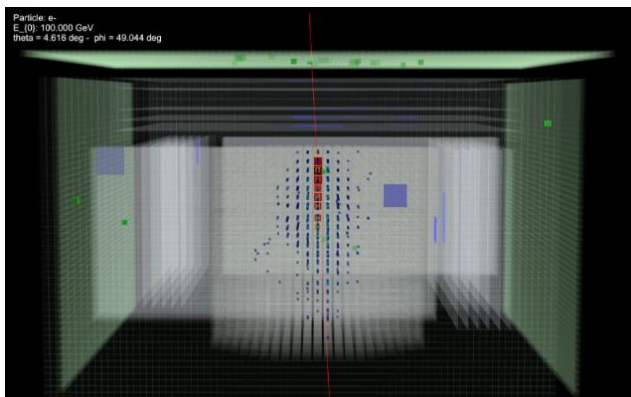
HERD的“前三极端”科学目标

- **极端起源：以最高灵敏度搜寻暗物质**
 - 利用更宽能区和最高灵敏度的各向异性测量能力对高能电子谱异常的各种非暗物质起源假说做出判决性检验。
 - 运行1年的暗物质湮灭线探测灵敏度远超同类实验运行5年以上的灵敏度
- **极端能量：探究宇宙线起源的世纪之谜**
 - 首次直接精确测量“膝”区宇宙线能谱和成分。
- **极端天体：开展高灵敏度的高能伽马射线巡天和监视，并探索脉冲星导航的新体制**
 - 牵引国际高能天体物理界的重要科学发现，发现极端天体
 - 首次实现同时对全天大部分脉冲星的几乎无间断高信噪比监测

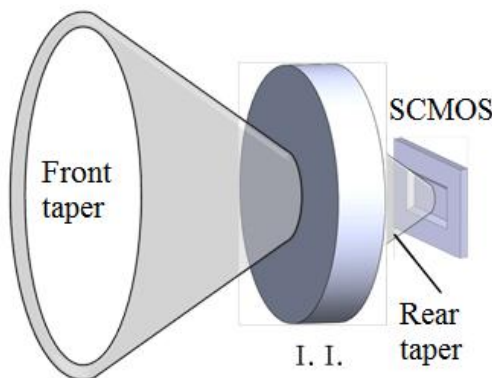


中国提出的创新方案

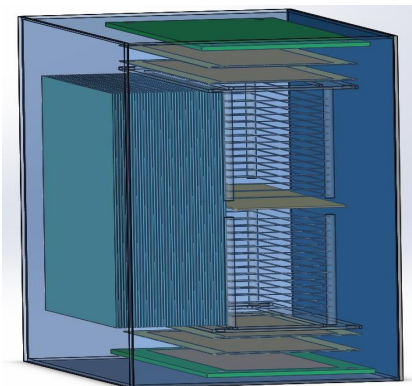
- 中国提出、得到验证并且被国际同行接受的创新方案
 - 三维成像、五面灵敏量能器概念
 - 以较少的资源实现世界领先的接收度；显著提升几何因子，改善粒子鉴别能力，系统误差更小，实测结果更可靠
 - 光纤+增强相机读出：系统简单，便于晶体热控
 - 穿越辐射探测器：TeV以上粒子在轨标定，保证数据可靠



高能粒子簇射

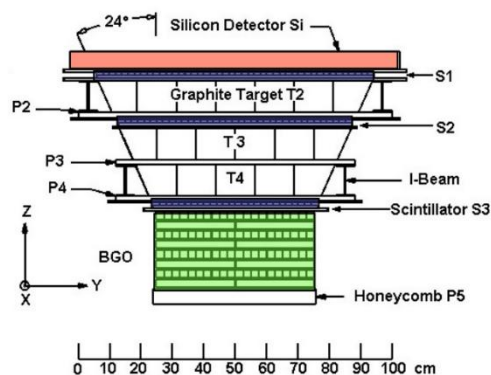


增强相机

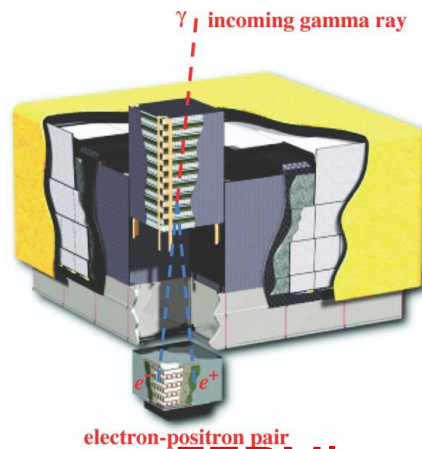


共腔穿越辐射探测器

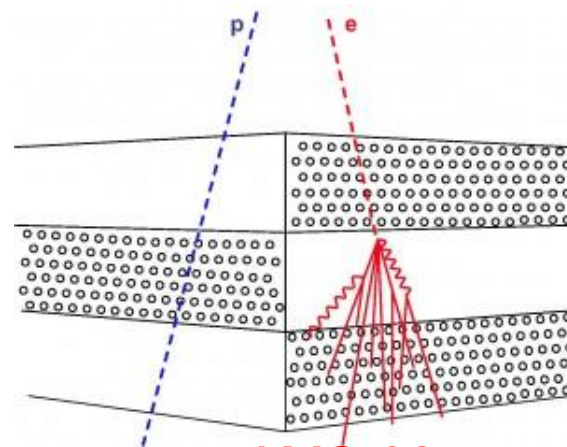
HERD是唯一的三维成像量能器



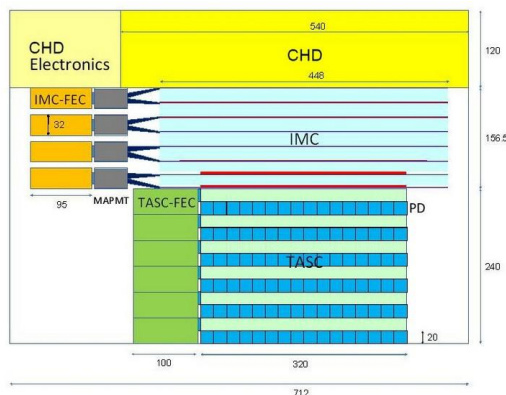
ATIC



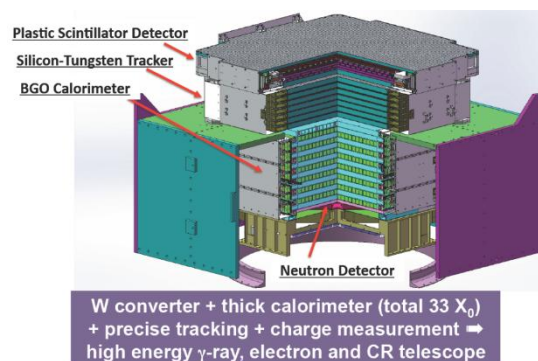
FERMI



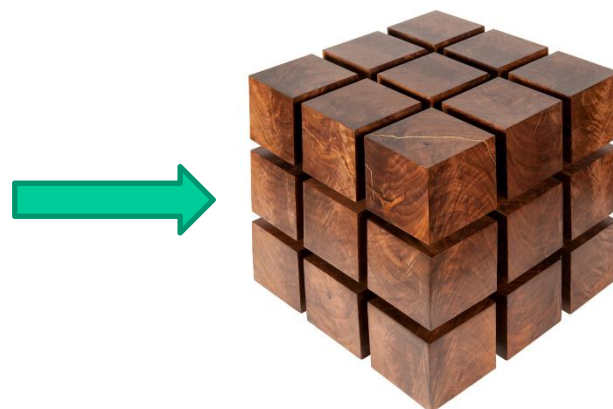
AMS-02



CALET



DAMPE



HERD

三维量能器可显著提升几何因子，“高颗粒度”成像显著改善
粒子鉴别能力，系统误差更小，测量结果更可靠

极端爆发：伽马暴偏振探测仪POLAR-2

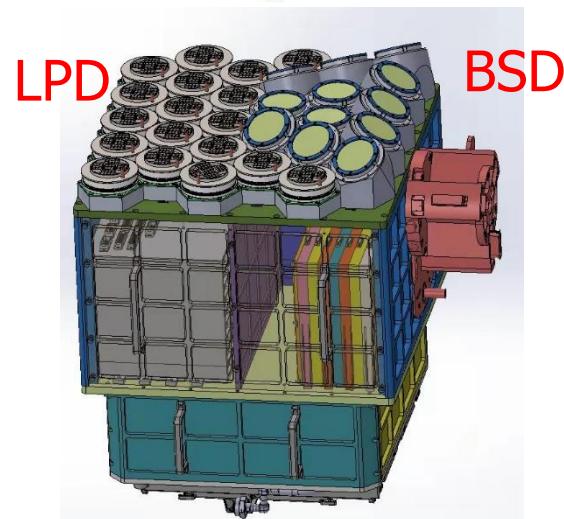
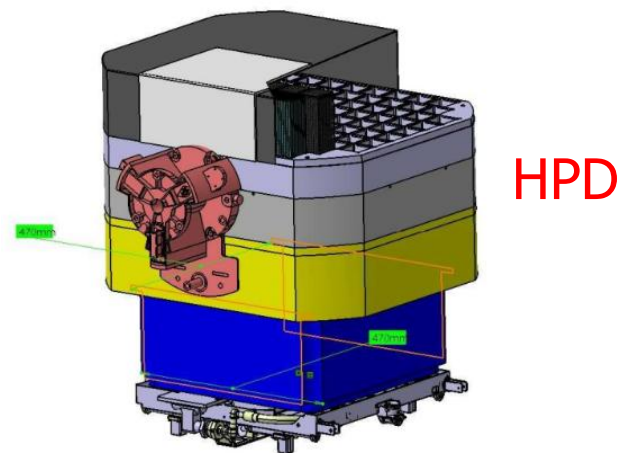


高能偏振探测器 (HPD, 30–800 keV) :
伽马射线偏振测量, 也是最灵敏的伽
马射线暴加速器, 欧洲瑞士等国。

低能偏振探测器 (LPD, 2–30 keV) :
X射线偏振测量, 中方广西大学。

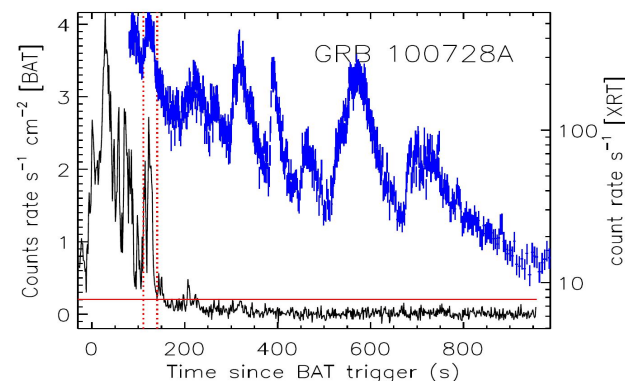
宽波段能谱探测器 (BSD, 8–2000 keV) :
快速定位伽马暴, 宽波段能谱测量,
提高偏振测量灵敏度, 中方高能所。

计划大约2025年发射。



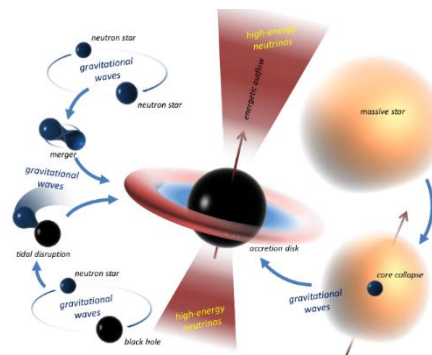
伽马暴“悬而未决”的基本问题：

- 中心引擎及其演化？
- 喷流几何结构和磁场位型？
- 喷流粒子加速和辐射机制？

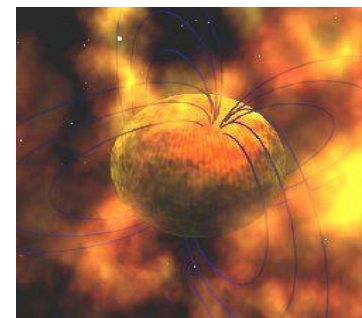


伽马暴及其晚期X射线耀发偏振同时测量有望解决的问题：

- 伽马暴和晚期X射线耀发能源机制、磁场位型、辐射机制是否一样？
- 偏振的时变是否具有普遍性？



超吸积黑洞/中子星

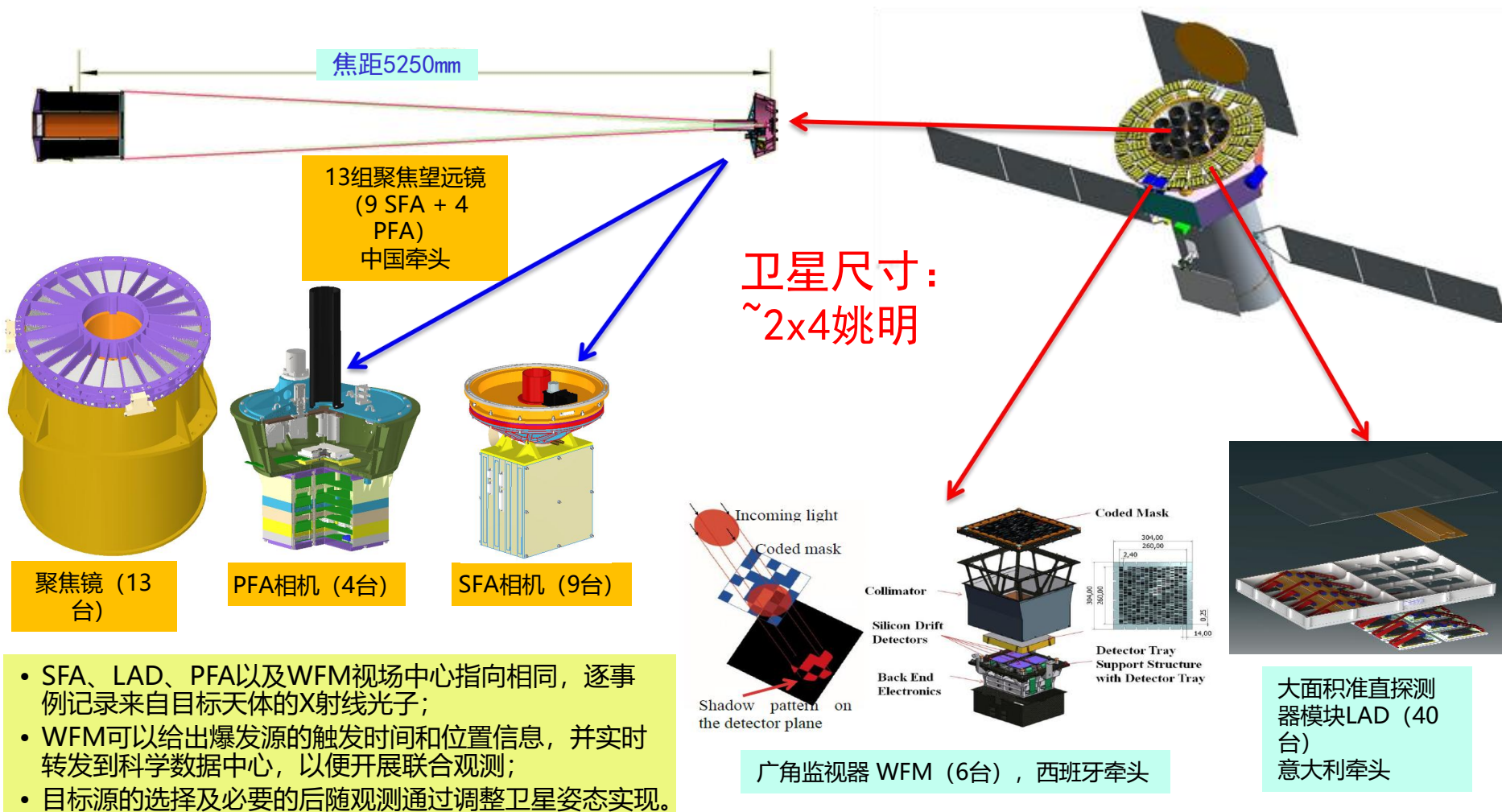


磁星

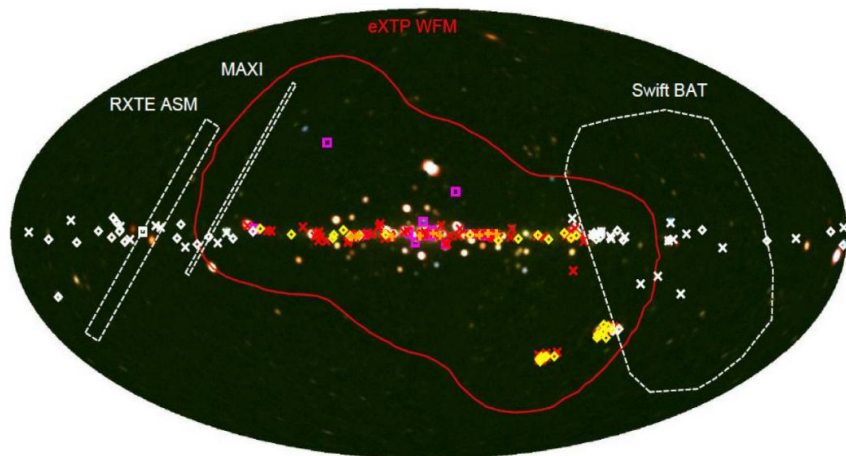
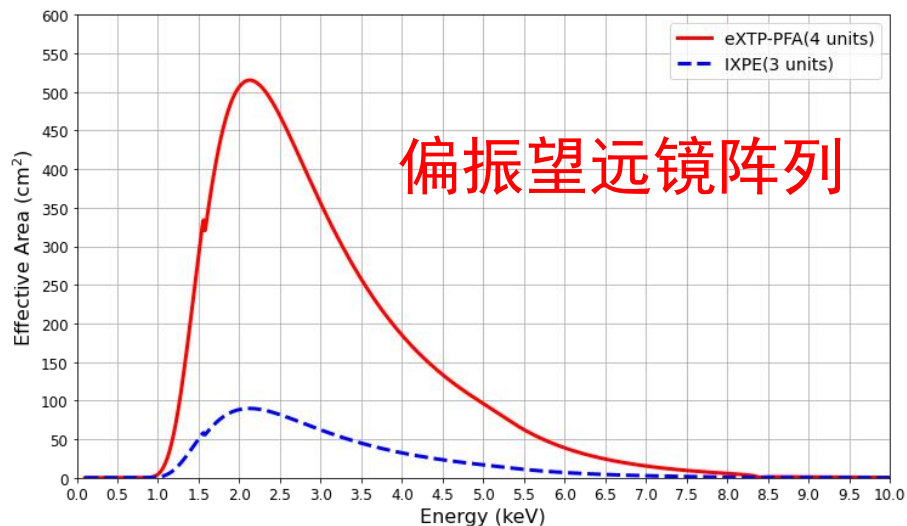
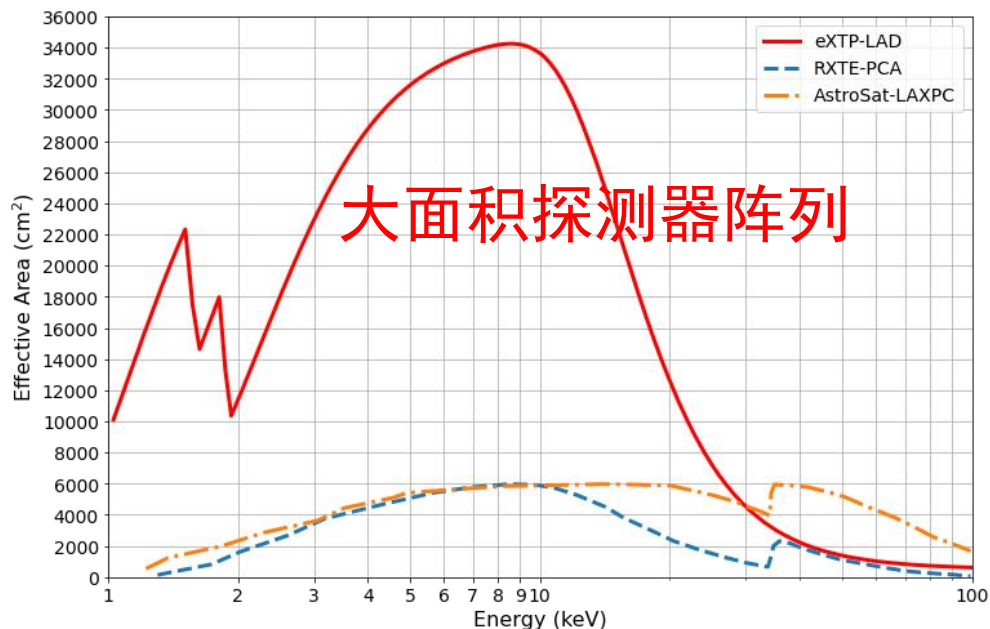
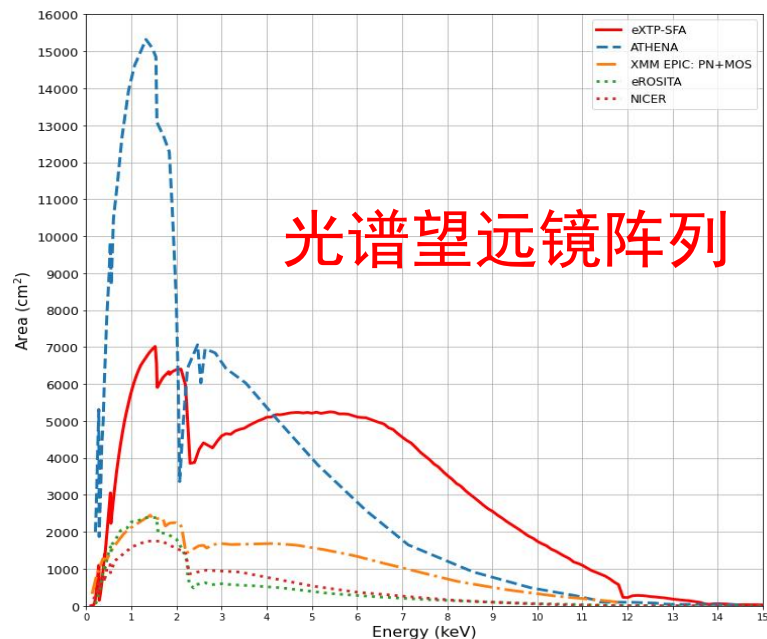
- 科学目标：“一奇二星三极端”：通过观测**黑洞**、**中子星或夸克星**理解**极端引力**、**极端磁场**和**极端密度**条件下的物理规律
- 探测能力：1-30 keV, $\sim 3.5 \text{ m}^2 @ 6 \text{ keV}$; 高时间分辨、高能量分辨、高精度偏振探测, 综合能力比以往的X射线天文卫星有一个数量级的提升
- 卫星方案:
 - 高度550km, 倾角 $\sim 0^\circ$, 圆轨道
 - 高精度、高稳定度定点观测
 - 总重量约6吨, 设计寿命5(8)年
- 目前状态:
 - 2022年完成方案阶段工作 (中科院先导二期重大背景型号), 具备进入初样的条件
 - 大型国际合作: 中国领导, 欧洲多国1/2载荷
 - 计划2027年发射



eXTP有效载荷及卫星构型



eXTP有效面积和视场：全部国际领先



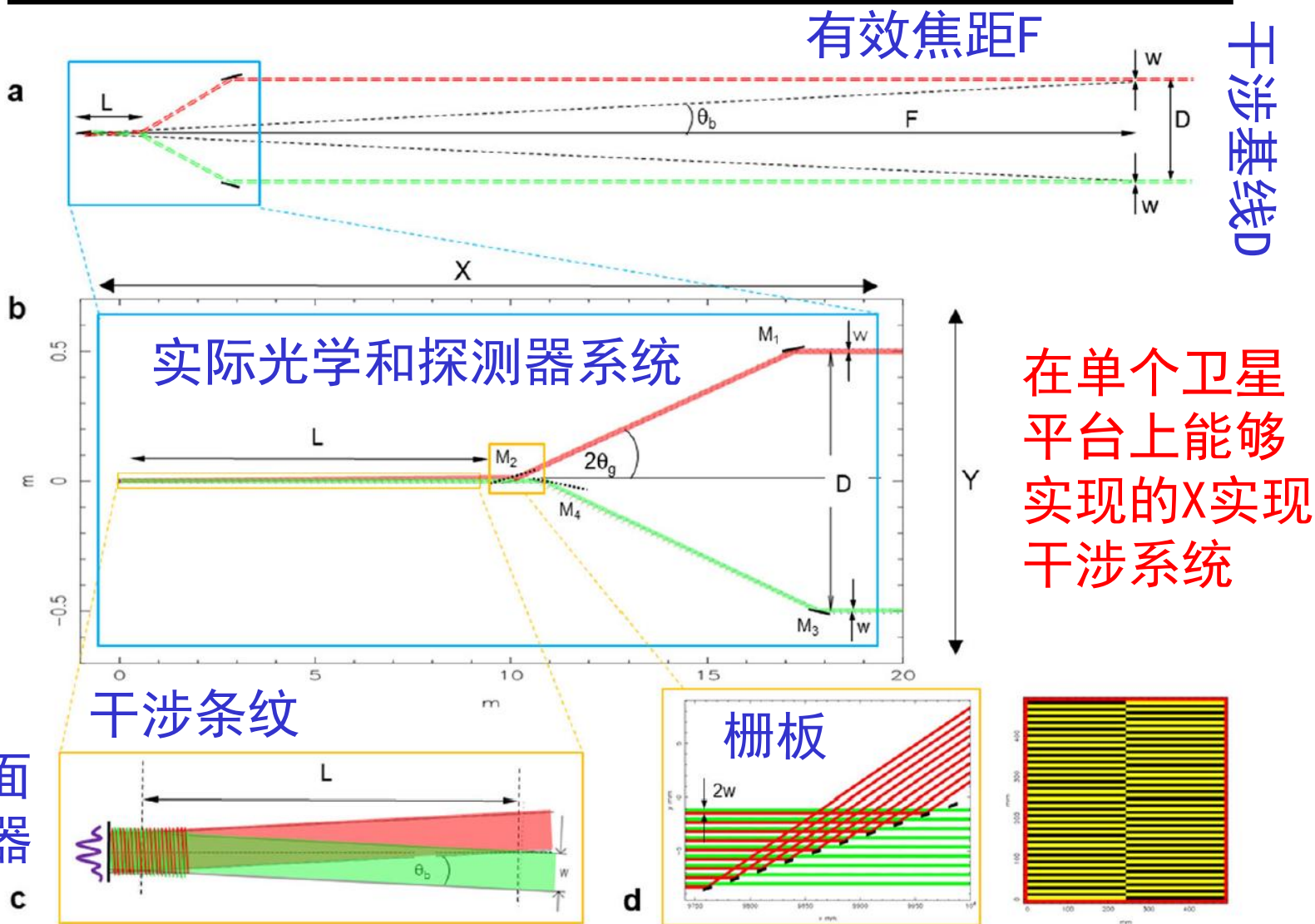
广角监视器阵列

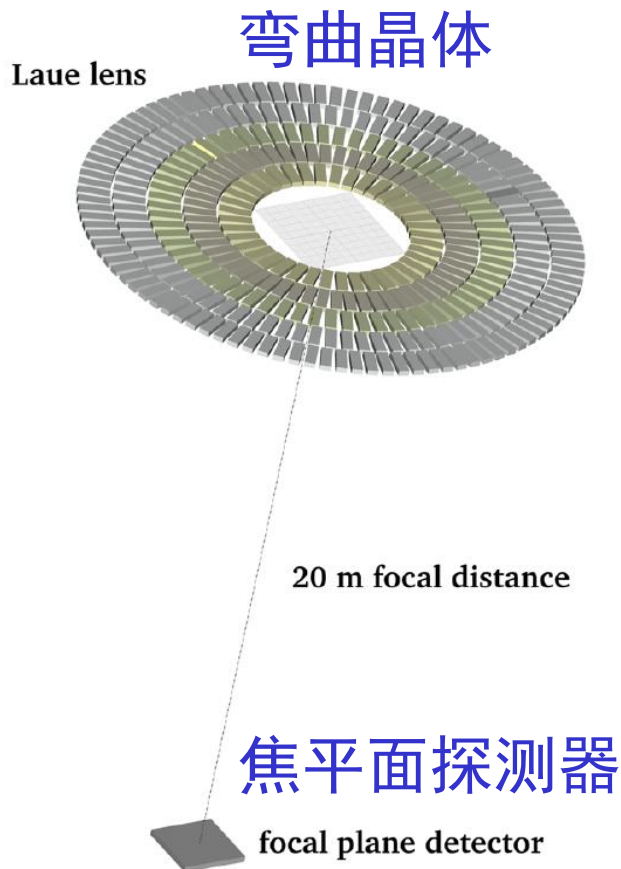
- 直接看到物质掉入黑洞的过程：需要微角秒分辨率X射线干涉技术和达到eV能量分辨率的X射线量能器
 - 欧空局启动了“远航2050”计划的关键技术攻关
- 直接测量到强度超过量子临界磁场 ($3 \times 10^9 \text{T}$) 的电子回旋吸收线 (10^9T 对应 80 keV)：能量高达600 keV的聚焦X射线光学和相应的高能量分辨探测器
 - 意大利空间局拟启动相关的空间项目
- 高统计性探测到宇宙反物质：比AMS02有效接收度大1-2个量级（与HERD相当）的空间磁谱仪
 - 国际上多个团队提出了项目概念，包括中国

X射线干涉技术：黑洞视界成像

Experimental Astronomy (2021) 51:1081–1107

1097





1190

Experimental Astronomy (2021) 51:1175–1202

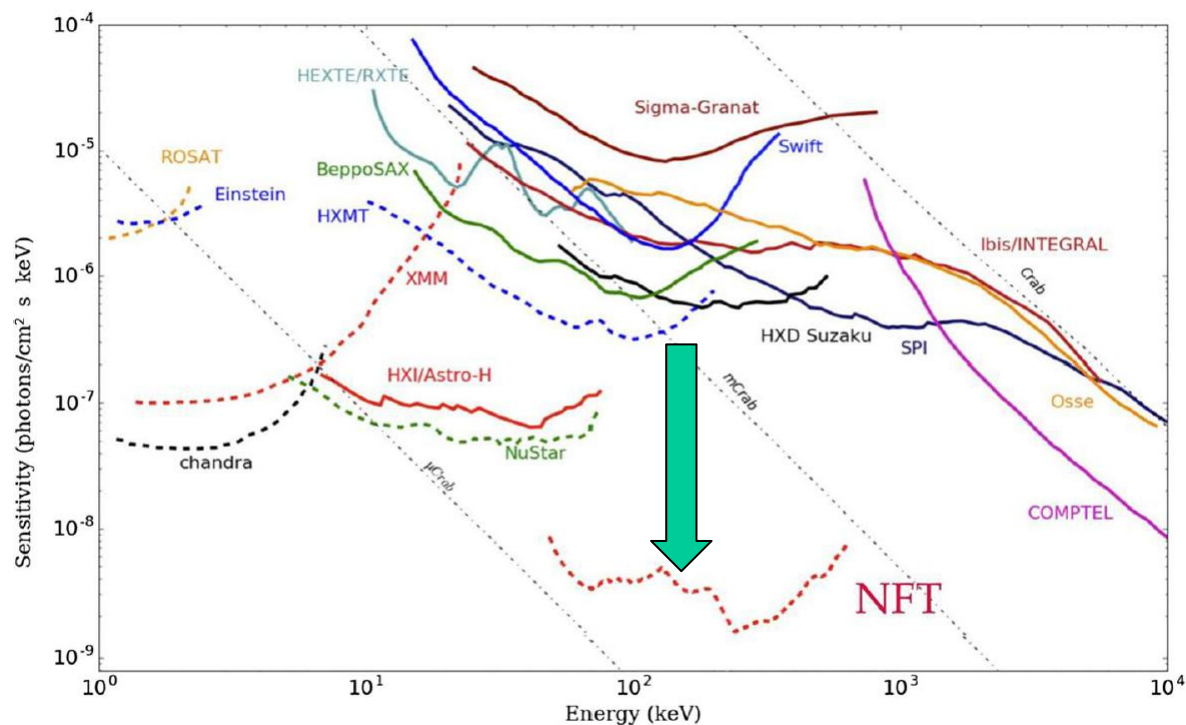
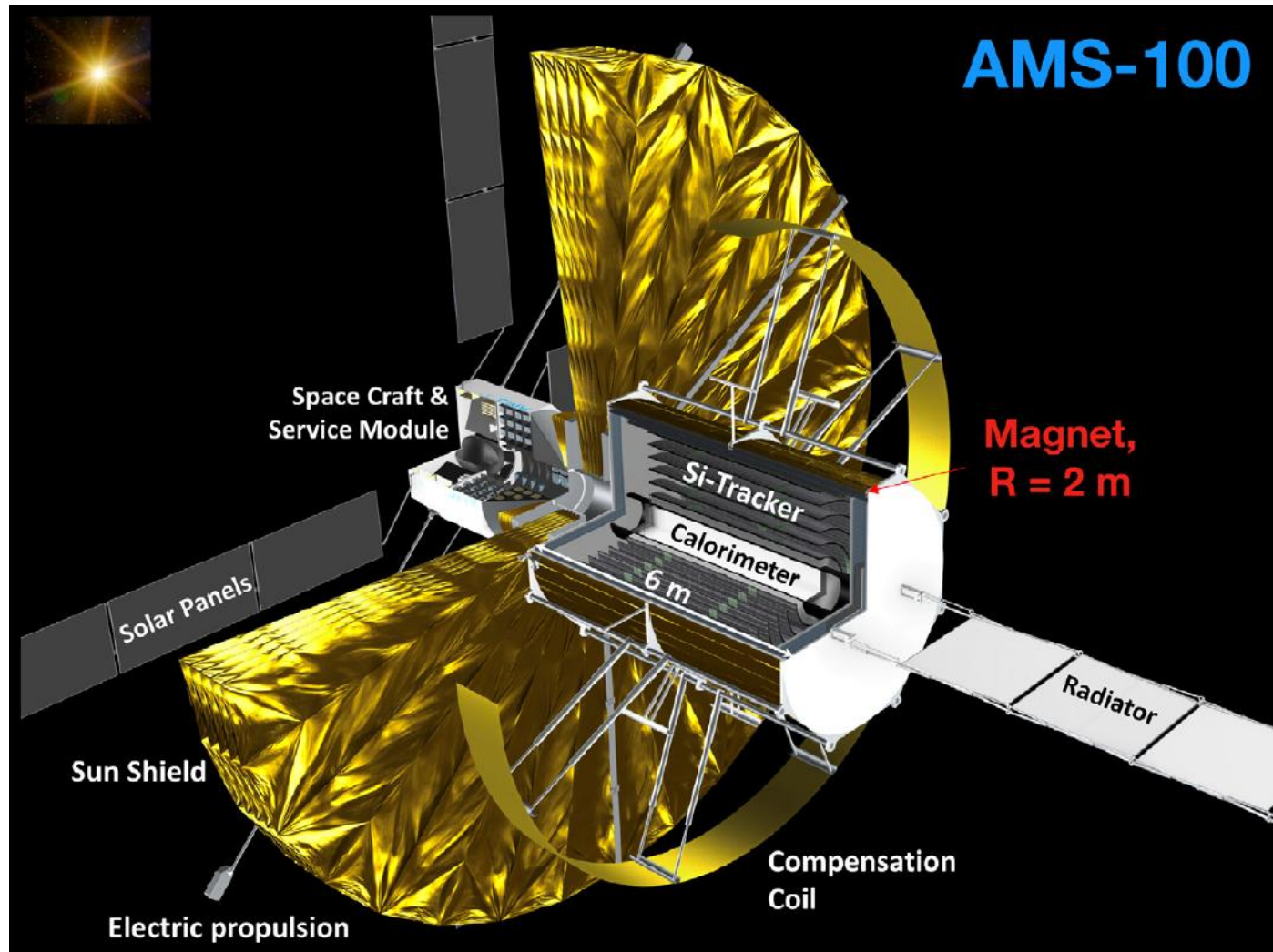


Fig. 15 NFT continuum sensitivity at 3σ , with $\Delta E = E/2$ and $\Delta T = 10^5$ s

Fig. 12 *Left*: Sketch of the Laue lens adopted for the Narrow Field Telescope (NFT) which will be made of bent crystals. The detector and the Laue lens dimensions are not to scale. *Right*: Simulated two-dimensional PSF image achieved with the NFT, as obtained with our Laue lens physical model with diffractive bent crystals, in the case of an on-axis source

下一代空间磁谱仪：宇宙反物质



S. Schael, A. Atanasyan, J. Berdugo et al.

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 944 (2019) 162561

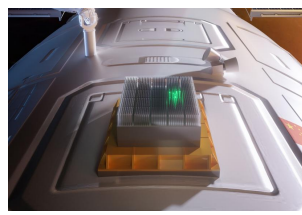
深度空间探索极端宇宙的现状和未来



- 悟空DAMPE (2015)
- POLAR (2016)
- 慧眼-HXMT (2017)
- GECAM (2020)
- SVOM (2023)
- EP (2023)
- POLAR-2 (2025)
- eXTP (2027?)
- HERD (2027?)



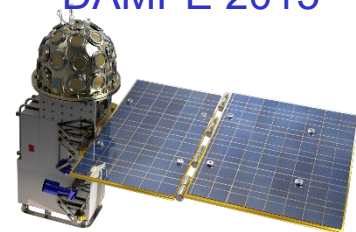
DAMPE 2015



POLAR 2016



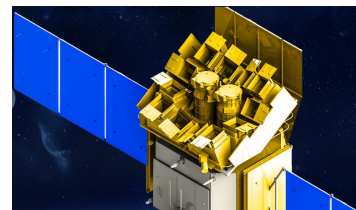
HXMT 2017



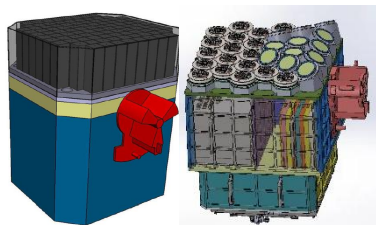
GECAM 2020



SVOM 2023



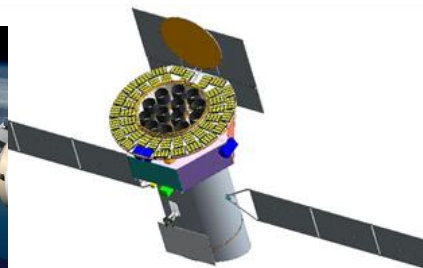
EP 2023



POLAR-2 2025



HERD 2027?



eXTP 2027?

探索极端宇宙未来还需要发展多个新的关键技术
非常感谢大家的长期关心和支持！