

# 中国空间站 高能宇宙辐射探测设施HERD

高能物理研究所

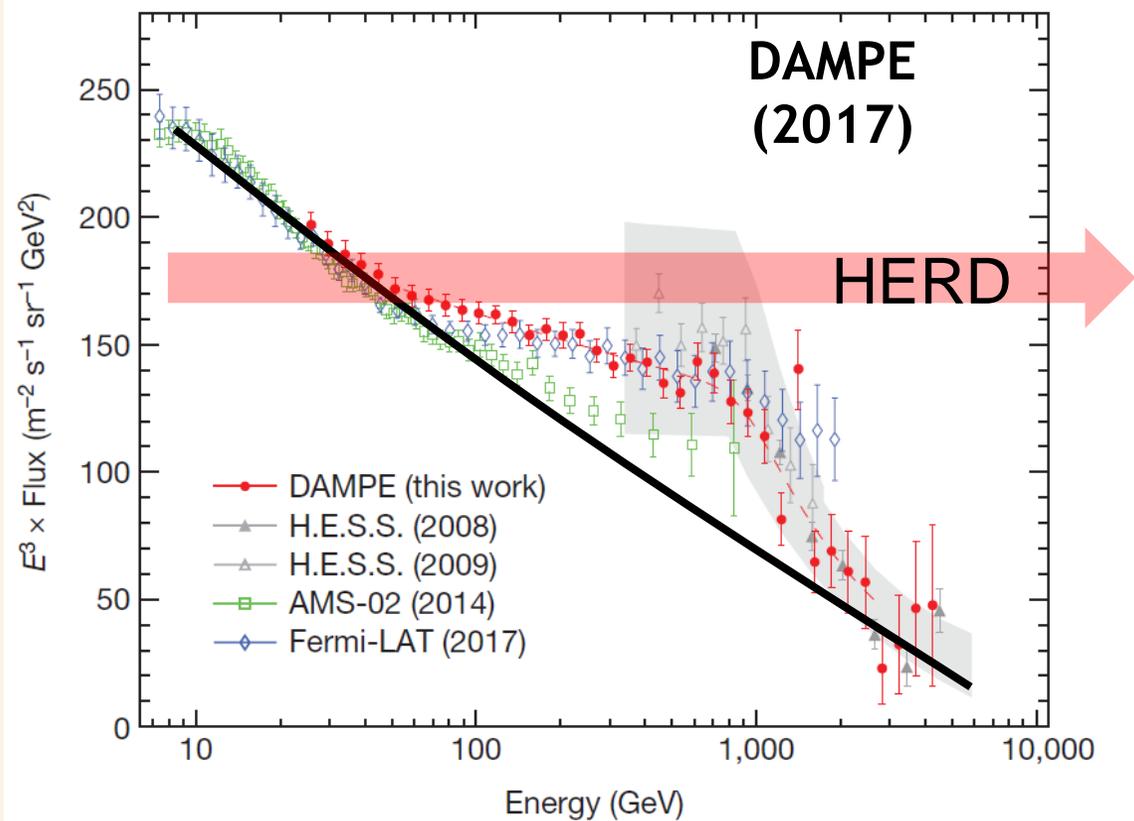
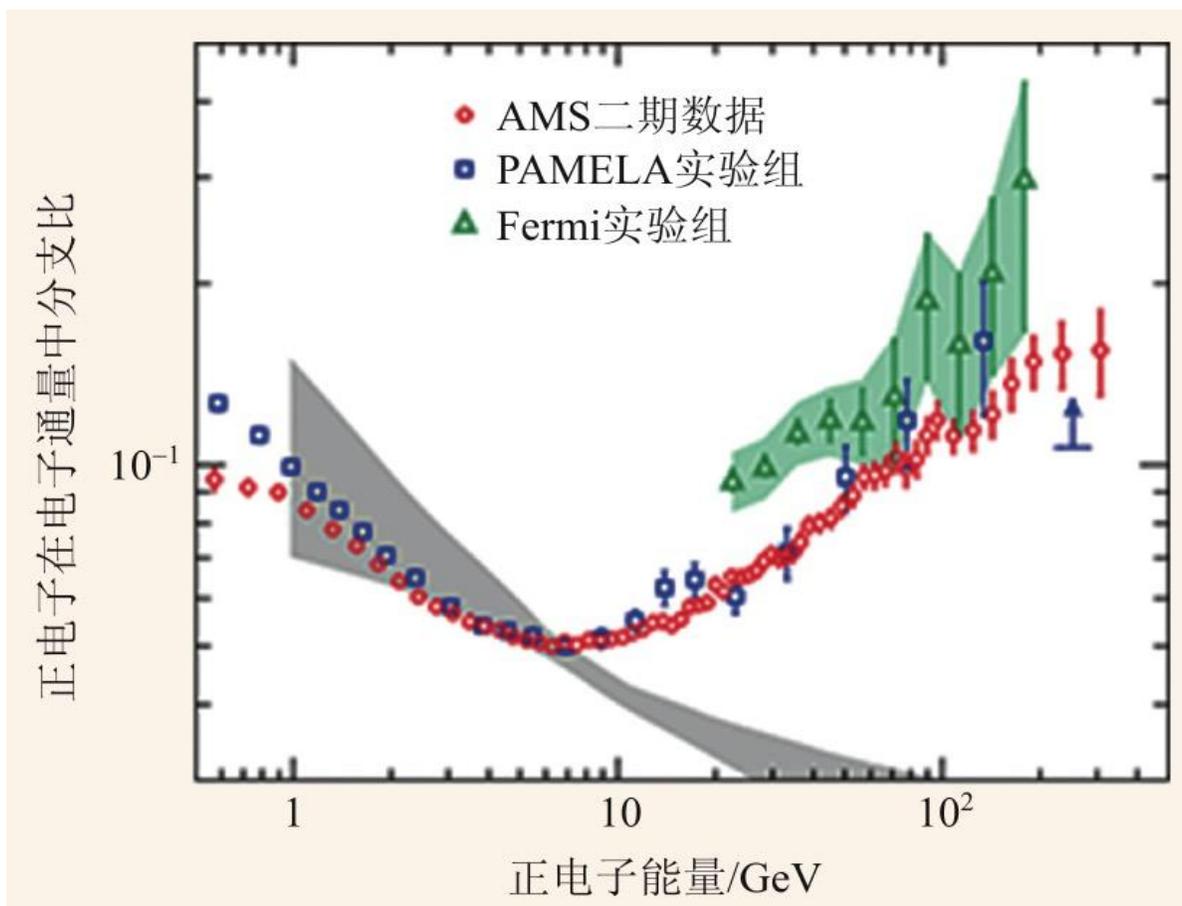
粒子天体物理全国重点实验室

张双南（毕效军代讲）

2025年8月1日于乌鲁木齐宇宙线会议



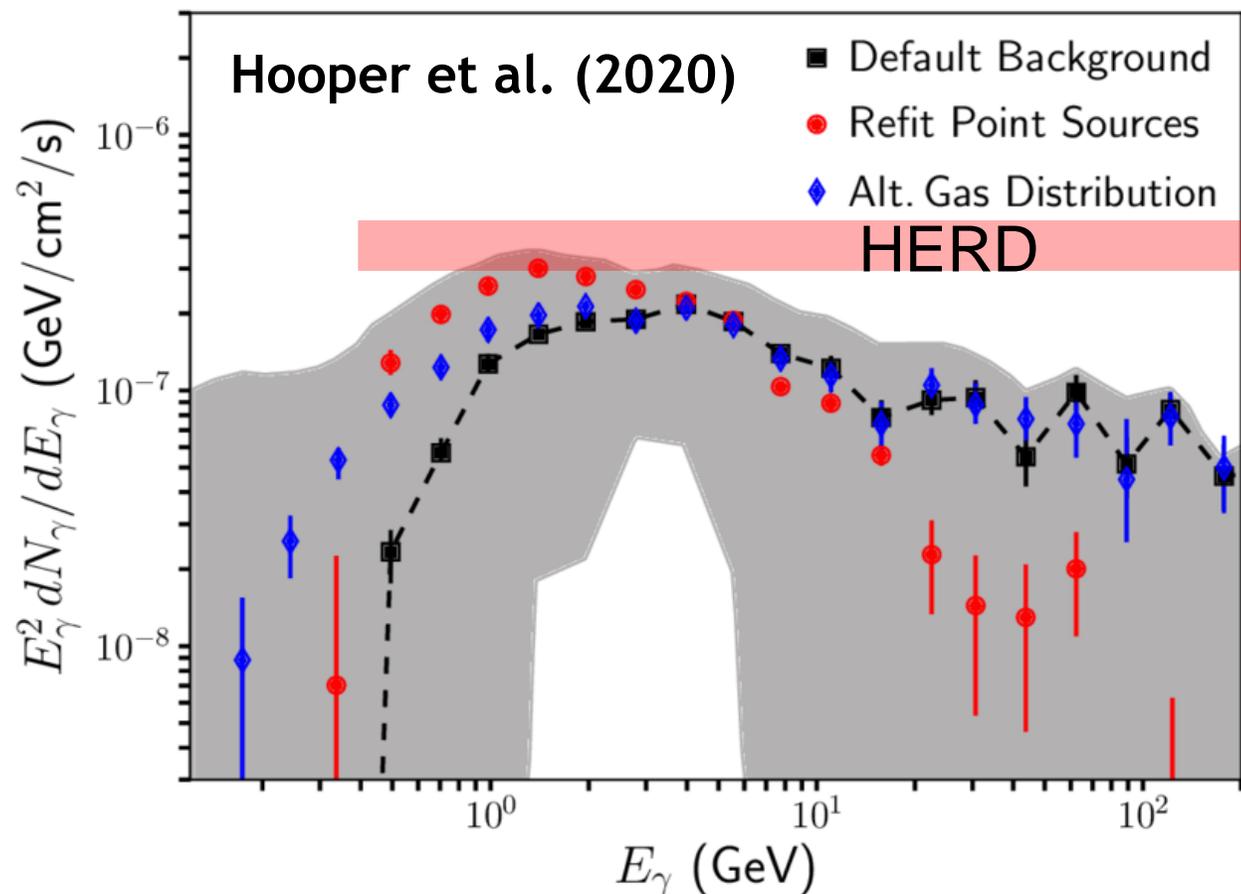
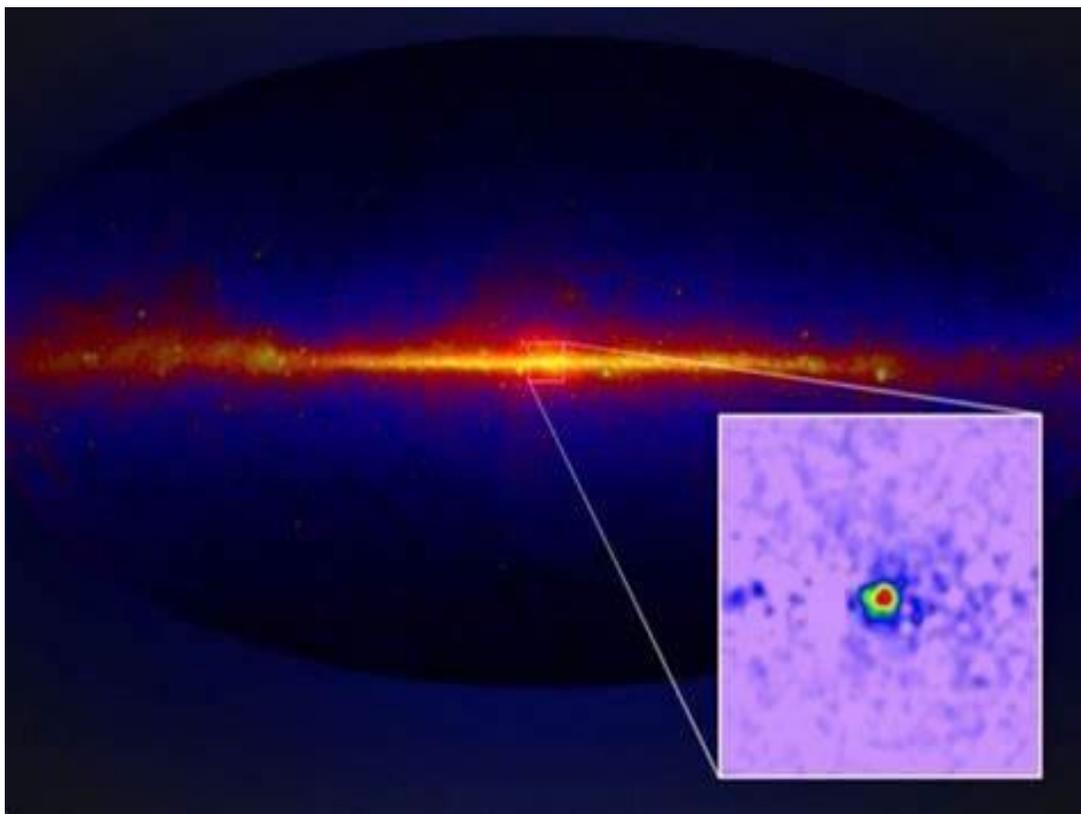
# 暗物质间接探测研究现状 (1/2)



- PAMELA, AMS02, DAMPE, Fermi, CALET等实验发现宇宙线正电子存在相对宇宙线背景模型的超出，可能来自暗物质或脉冲星的贡献
- 如果用暗物质解释，那么暗物质粒子质量 $\sim 1 \text{ TeV}$ ，湮灭截面 $\sim 10^{-23} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$



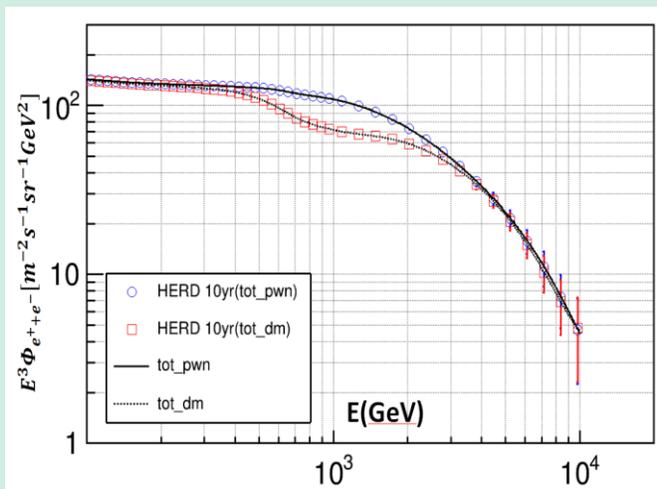
# 暗物质间接探测研究现状 (2/2)



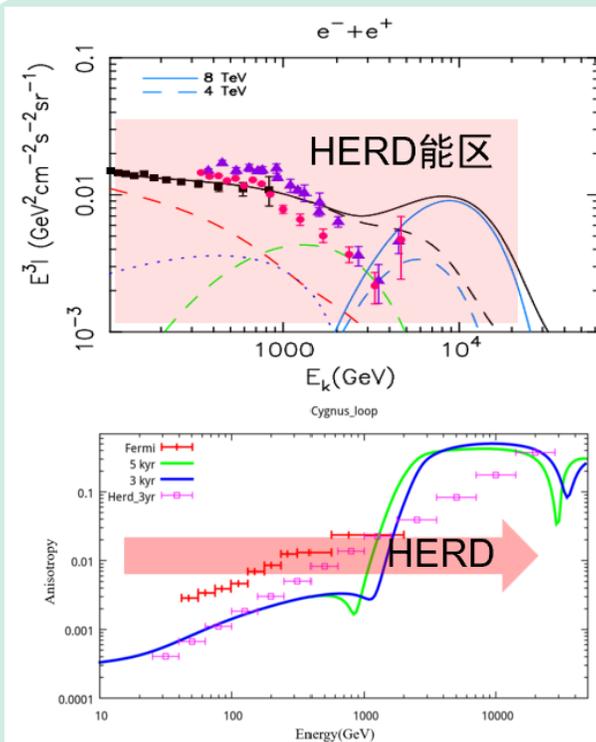
- 利用Fermi观测数据，多个研究小组发现银河系中心区域存在伽马射线超出，也可用暗物质湮灭模型解释
- 对于的暗物质粒子质量 $\sim 50$  GeV，湮灭截面 $\sim 10^{-26} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$



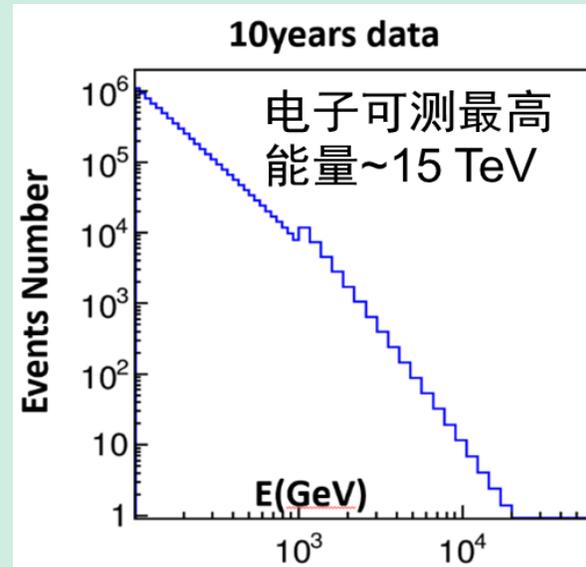
# HERD精确测量高能电子谱并扩展至15TeV



HERD具有鉴别暗物质模型、探测谱结构的优越能力



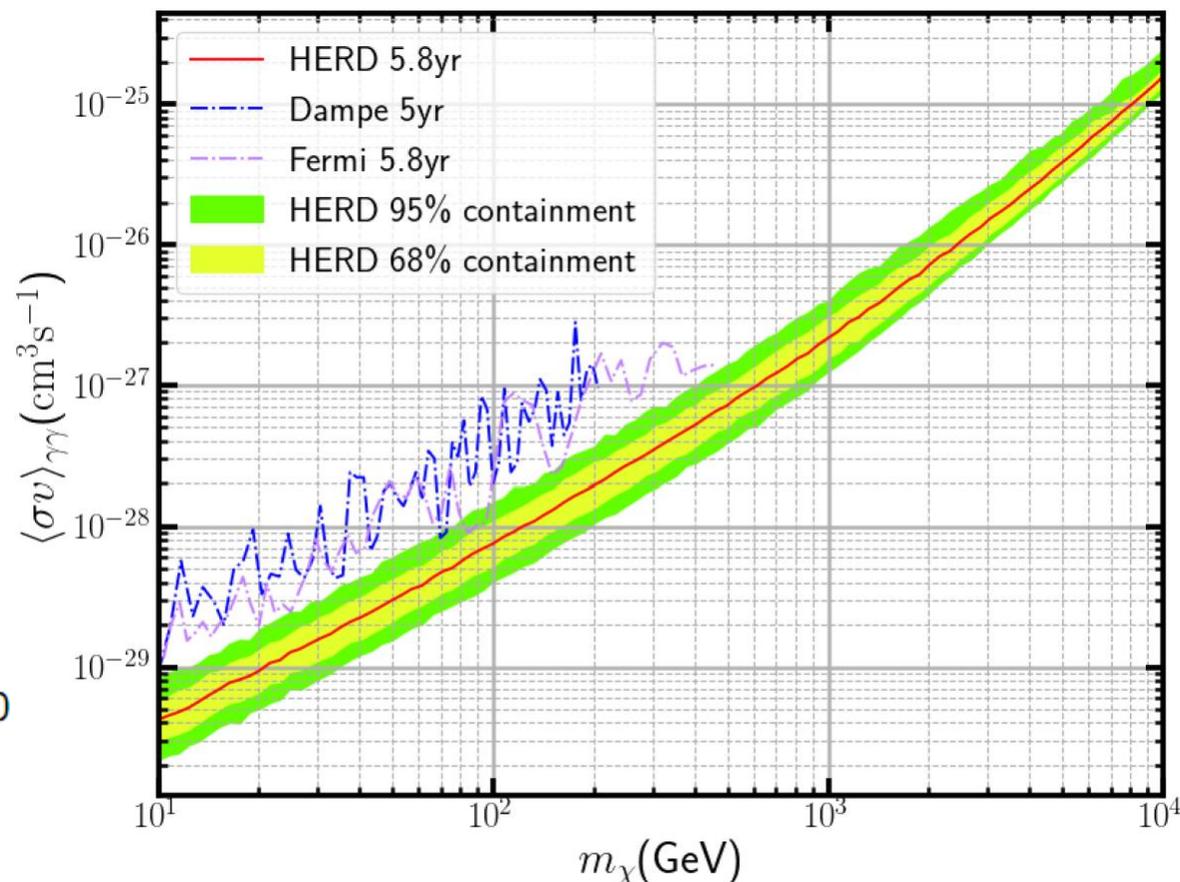
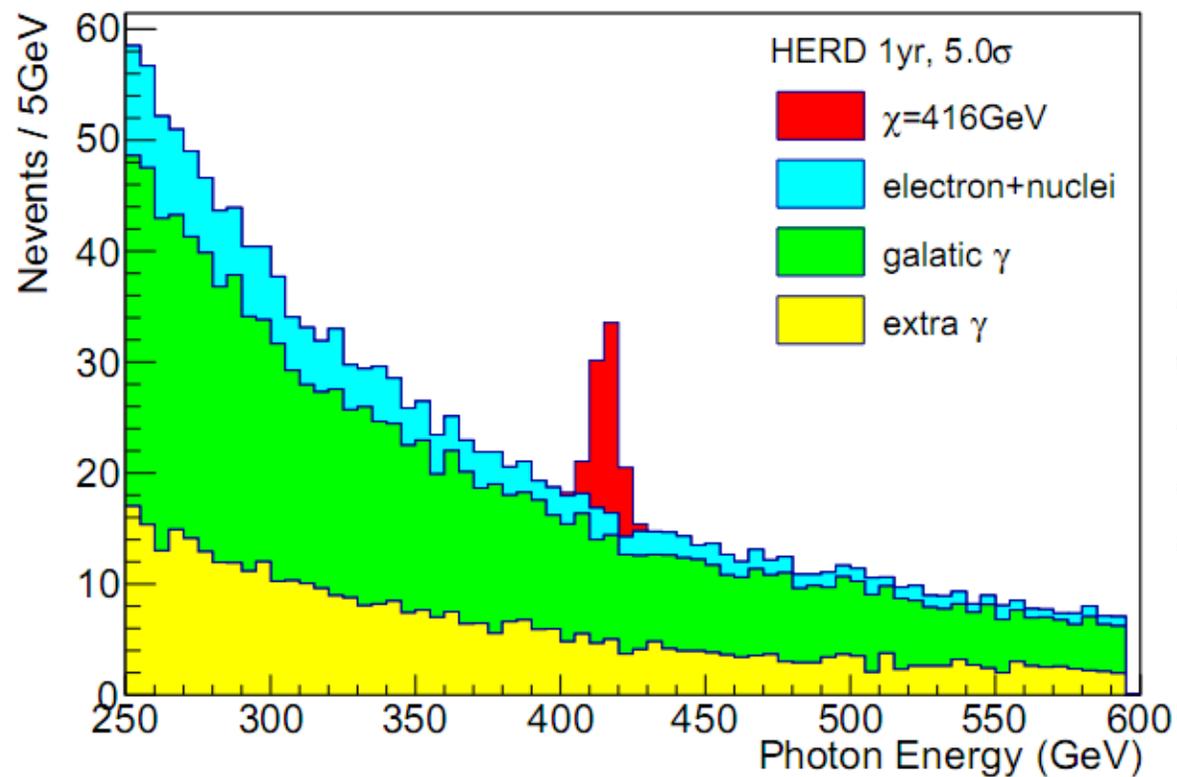
HERD具有高能区能谱和各向异性优势，探测临近的宇宙线源



HERD对高能电子谱的精确测量和能区的显著扩展，有显著的新发现空间



# HERD能够高灵敏度搜寻暗物质湮灭伽马谱线



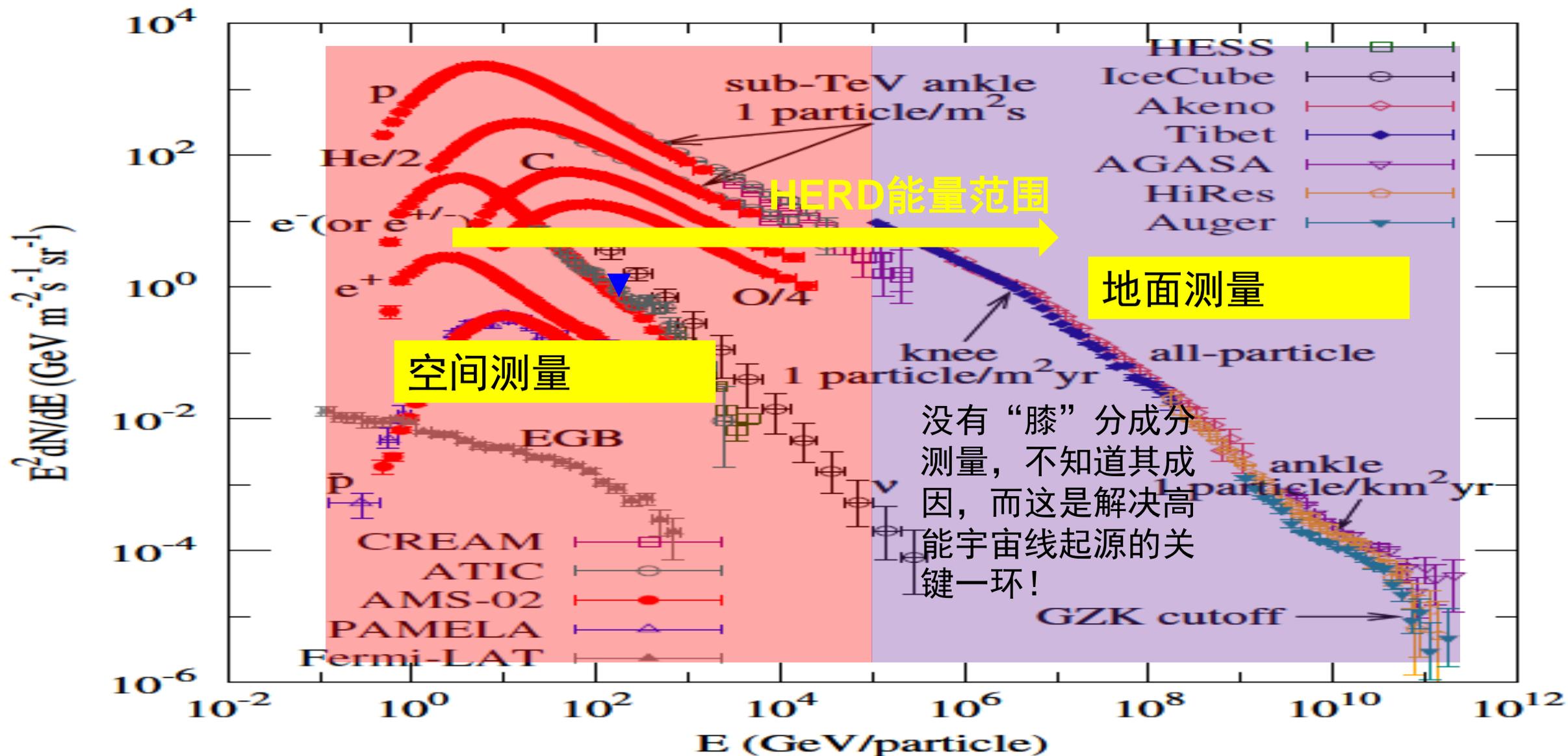
HERD具有发现暗物质湮灭信号的可靠途径

HERD对暗物质湮灭线谱探测灵敏度

HERD暗物质湮灭线探测灵敏度优于其他实验

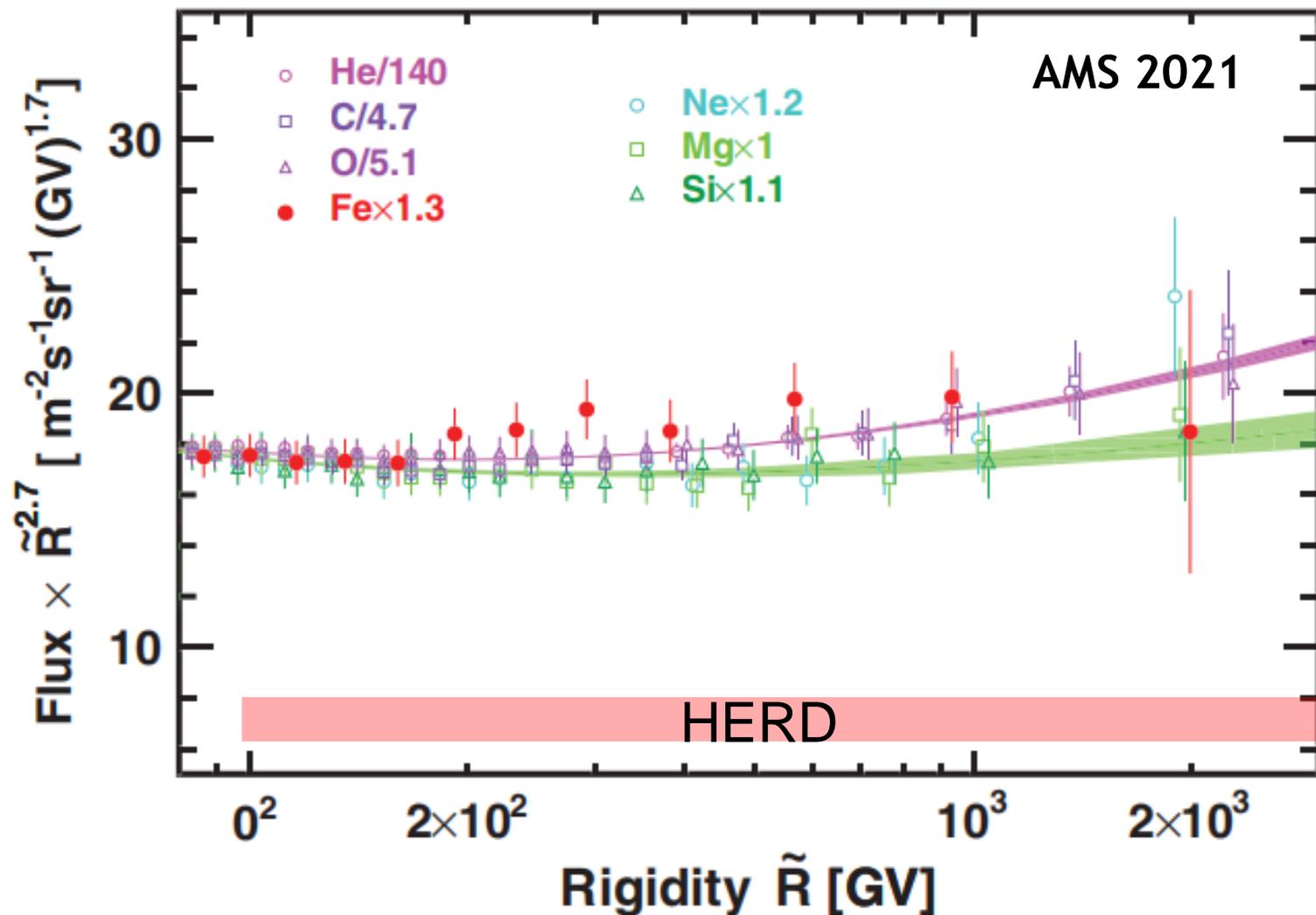


# 宇宙线世纪之谜：HERD预期将揭开“膝”的成因





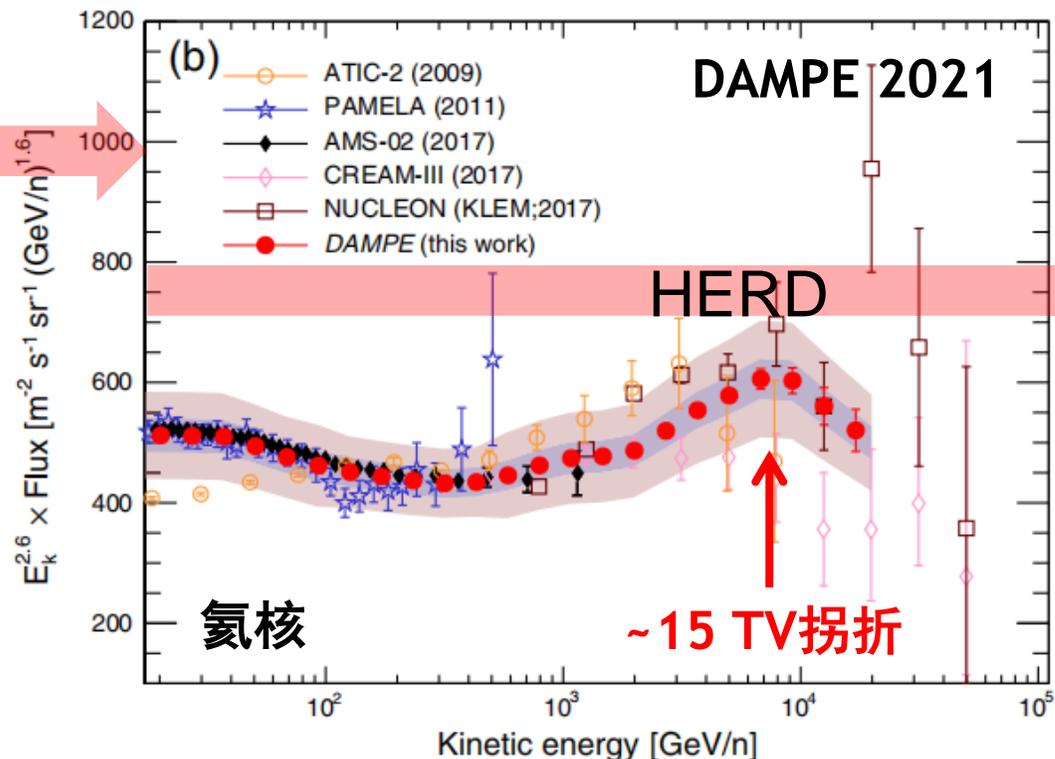
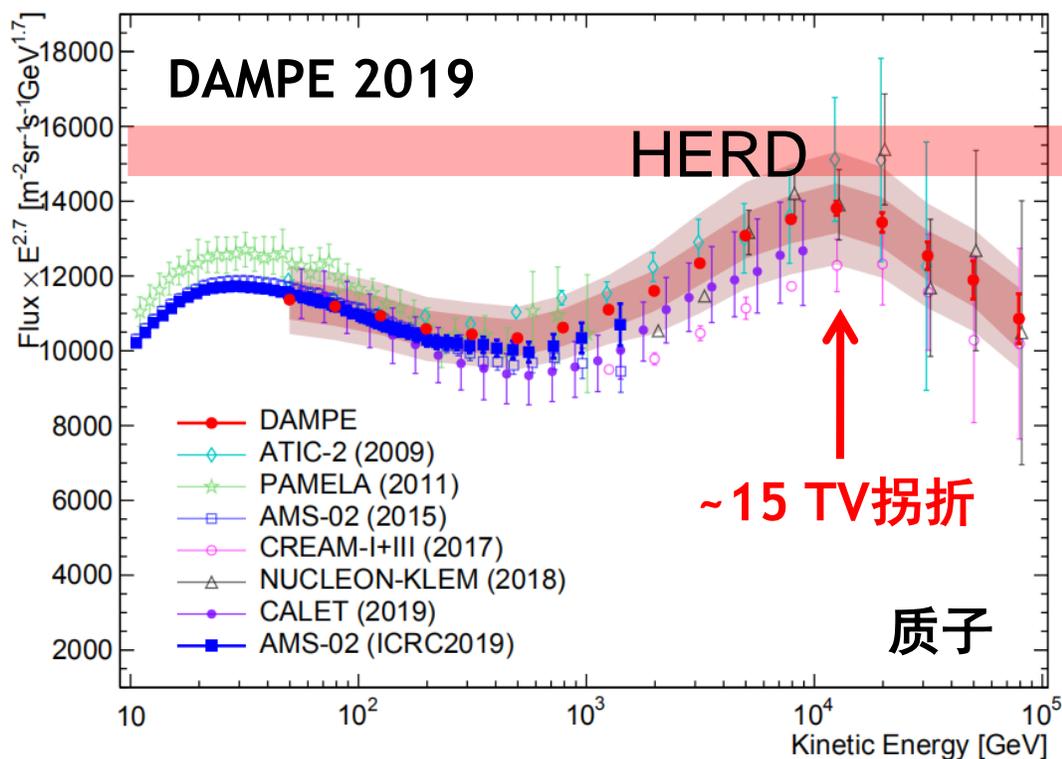
# 原初宇宙线能谱直接测量现状 (1/2)



- AMS02, PAMELA, DAMPE, CALET等测量结果发现原初宇宙线能谱在刚度  $\sim 200$  GV 普遍存在偏离幂律谱的拐折现象
- 对这一拐折的物理成因尚没有明确的解释



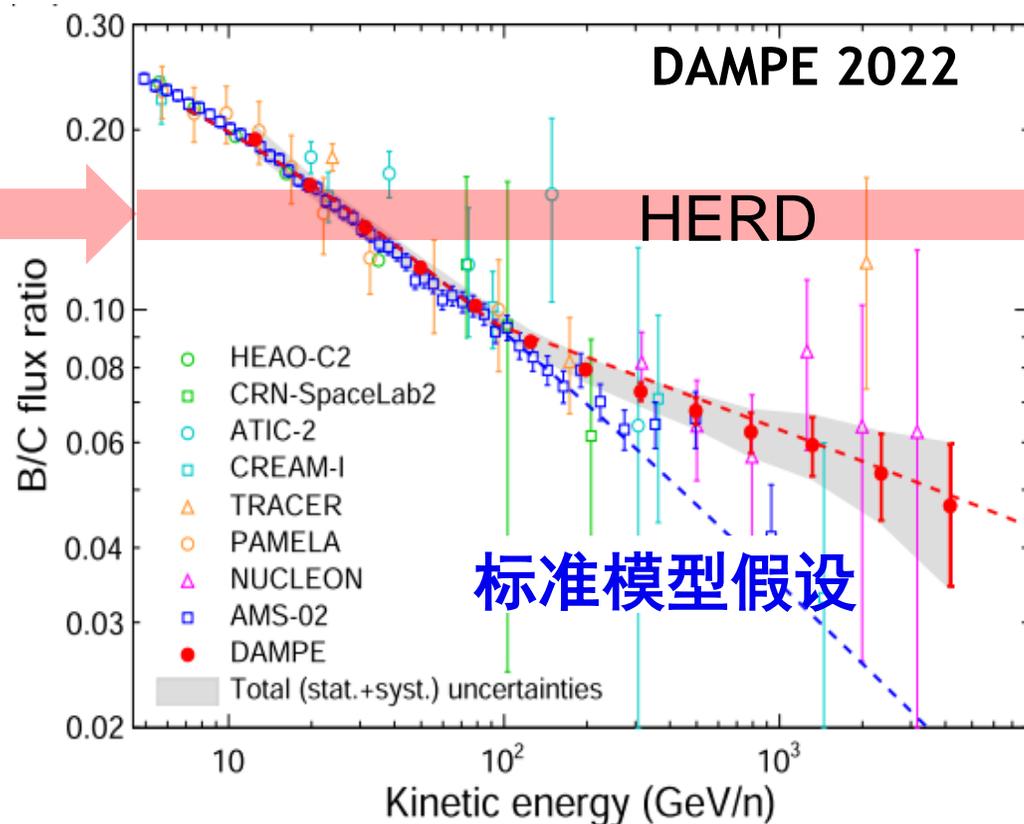
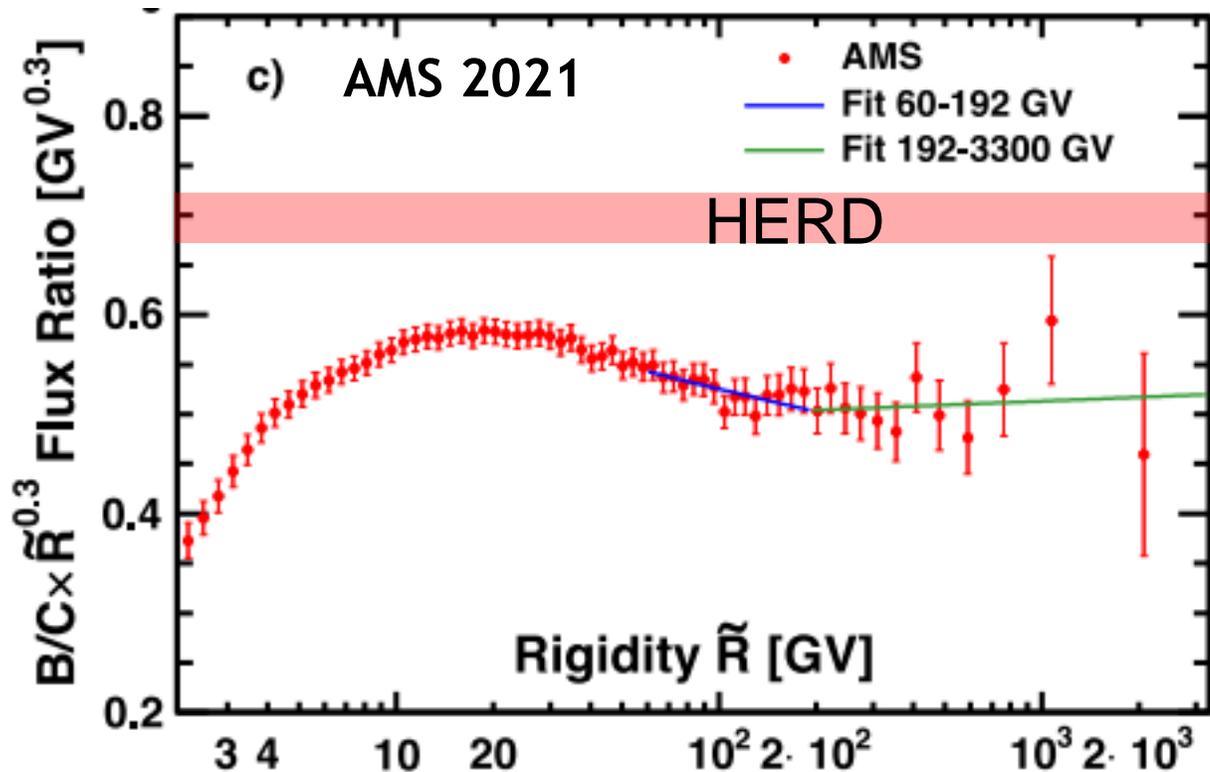
# 原初宇宙线能谱直接测量现状 (2/2)



- DAMPE以高置信度发现宇宙线质子、氦核在磁刚度~15 TV处存在变软的现象，更加丰富了宇宙线能谱结构的认识
- 这一能谱先变硬后变软的“鼓包”状结构可能来自邻近未知加速源



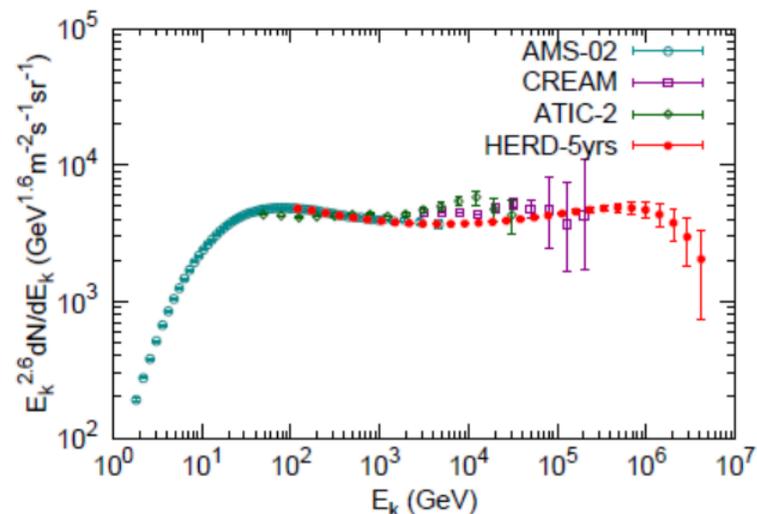
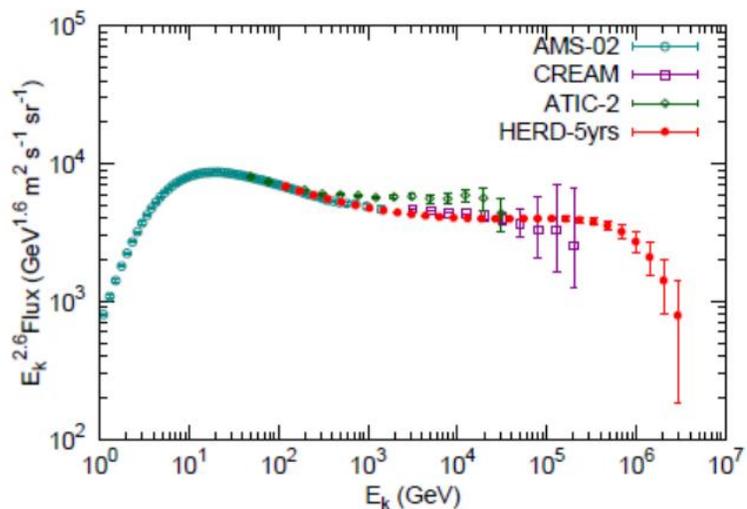
# 次级/原初宇宙线比例测量现状：HERD能够显著扩展



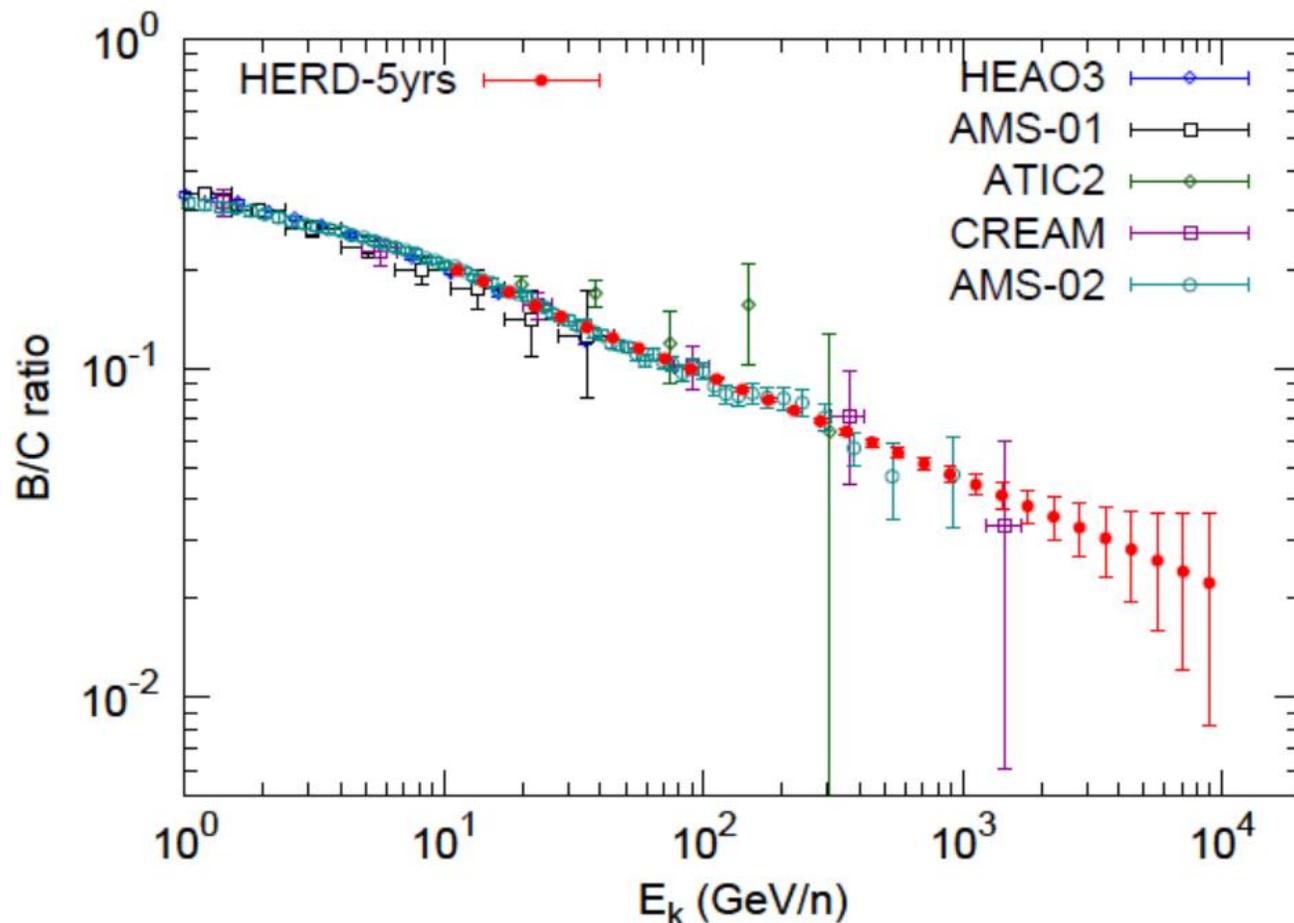
- 宇宙线次级/原初粒子比例（如B/C）是研究宇宙线传播的重要探针
- AMS02, DAMPE等发现B/C, B/O等在~200 GV处存在变硬拐折，偏离经典宇宙线传播模型（Kolmogorov 1941）预期，可能表明高能宇宙线经历了相对更慢的传播



# 原初&次级宇宙线能谱新结构：HERD高能区有新发现空间



HERD预期测量质子、氦等到“膝”区，发现可能的新结构，搜寻临近天体源



HERD预期极大提高B/C的能量范围和测量精度



# 什么天体产生高能宇宙线和中微子？需要伽马大视场巡天。



HERD将成为最大视场和高能最大接收度的伽马射线天文台



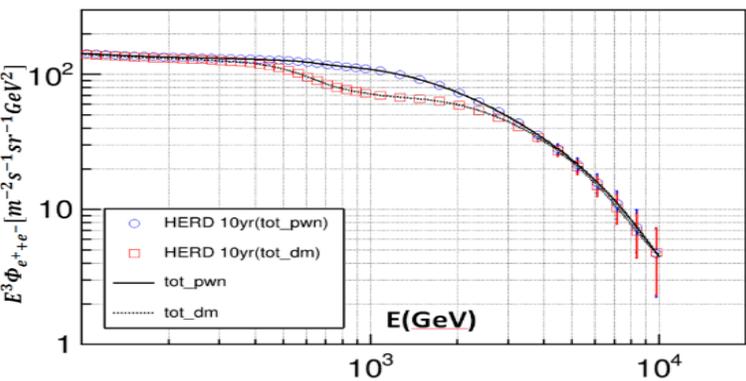
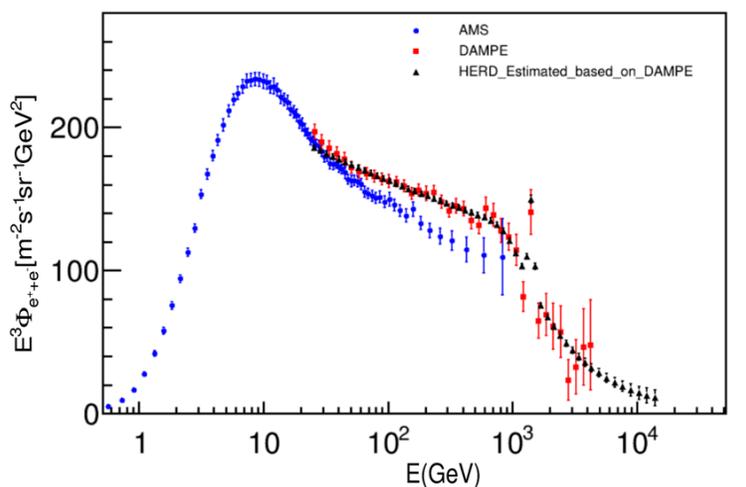
# 高能宇宙辐射探测设施HERD科学目标

科学目标	类型	主要研究内容以及科学意义	测量手段
宇宙线电子能谱精确测量及暗物质信号搜寻	核心	精确测量宇宙高能电子能谱及其各向异性，寻找临近高能电子源，以更高精度和更高灵敏度开展空间暗物质粒子信号的搜寻。	高能电子能谱和各向异性测量
宇宙线成分能谱精确测量和宇宙线性质研究	核心	精确测量宇宙线能量高达“膝”区的成分和能谱，解决宇宙线“膝”的成因难题，理解宇宙线起源、加速和传播等重要问题。	宇宙线成分高能量和高精度测量
大视场高能伽马射线全天观测和监视	兼顾	对动态高能伽马射线天空巡视，搜寻高能中微子天体源对应体、暗物质粒子湮灭谱线、纳赫兹引力波和轴子信号，探索洛伦兹破缺等新物理。	宽能区、大视场高能伽马射线

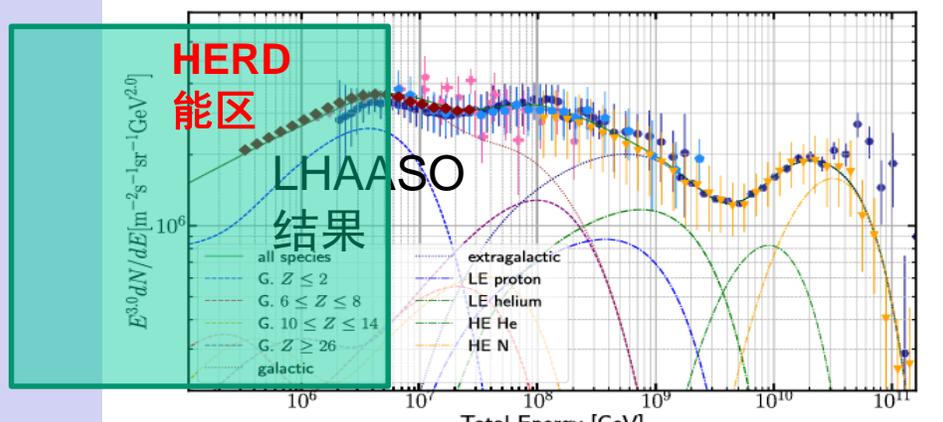
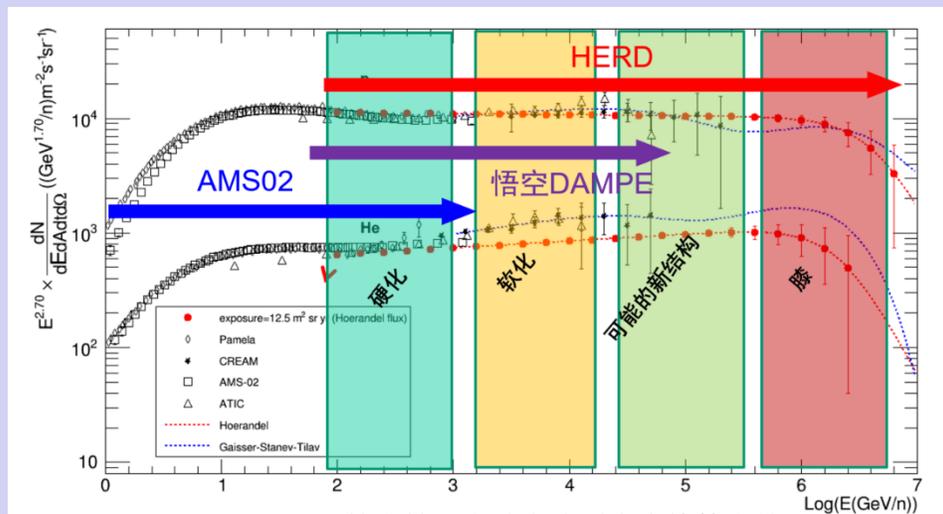


# HERD科学意义：空间高精度宽能段大视场直接测量

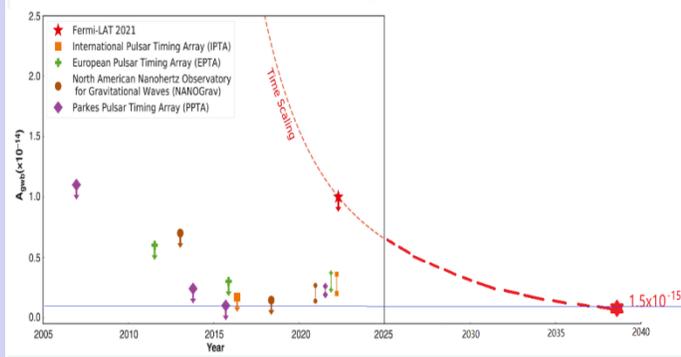
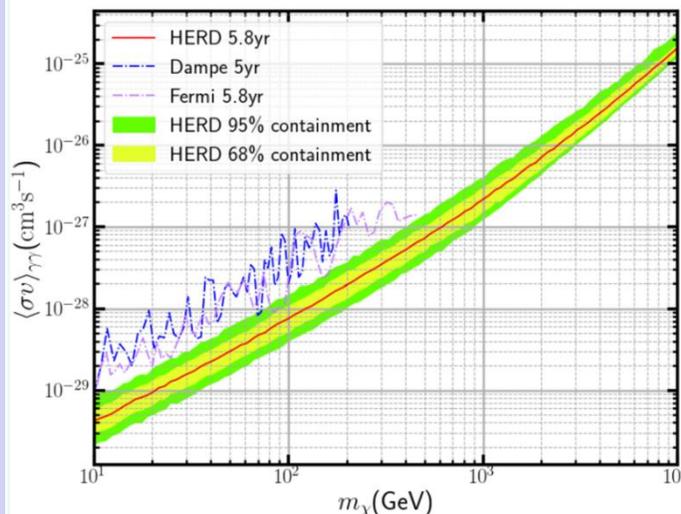
**1.** 高精度、大范围的电子能谱和各向异性精确测量，寻找邻近高能电子源，搜寻暗物质信号，确定高能电子谱精确结构。



**2.** 大能量范围宇宙线能谱精确测量，预期将解决宇宙线‘膝’成因问题，确定邻近宇宙线源及宇宙线传播模型。



**3.** 伽马天文研究和新物理信号。提高暗物质线谱探测灵敏度。伽马射线脉冲星阵列搜寻引力波信号。





# HERD科学需求指标 (1/2)

指标名称	科学需求	探测器指标需求	设计指标
电子接收度	高于10TeV大于10个事例（基于DAMPE的测量结果外推）	> 1m <sup>2</sup> sr@10TeV 2m <sup>2</sup> sr@1TeV 2.3m <sup>2</sup> sr@200GeV	>3m <sup>2</sup> sr@200GeV
质子接收度	高于3PeV观测大于10个事例（基于Horandel模型）	>1.3 m <sup>2</sup> sr@3PeV 1.6m <sup>2</sup> sr@100TeV	>2m <sup>2</sup> sr@100TeV
电子探测能区	测量TeV拐折后的谱，探测临近源的高能电子能谱结构	10GeV - 10 TeV	10GeV – 100TeV
光子探测能区	伽马天文，暗物质信号	0.5GeV - 10 TeV	0.5GeV–100TeV
质子探测能区	测量质子膝区能谱	100 GeV – 5PeV	30GeV – 5PeV
电荷探测范围	测量质子到镍的能谱	Z=1-28	Z=1-28
电荷分辨	精确区分不同原子核	质子：≥0.15电荷单位， 碳核：≥0.2电荷单位	质子：≥0.15电荷单位， 碳核：≥0.2电荷单位



# HERD科学需求指标 (2/2)

指标名称	科学需求	探测器指标需求	设计指标
电子能量分辨	线谱搜寻	$\geq 2\% @ 200\text{GeV}$	$\geq 1.5\% @ 200\text{GeV}$
质子能量分辨	质子能谱上结构的测量	$\geq 40\% @ 200\text{GeV}$	$\geq 25\% @ 100\text{GeV} \sim \text{PeV}$
粒子鉴别能力	剔除质子本底	100GeV电子效率90%时, 质子排斥率 $\leq 3 \times 10^5$	100GeV电子效率90%时, 质子排斥率 $\leq 3 \times 10^5$
累积观测时间	高于3PeV观测大于10个事例 (基于Horandel模型) 高于10TeV大于10个事例 (基于DAMPE的测量结果外推)	$\geq 10$ 年	$\geq 10$ 年

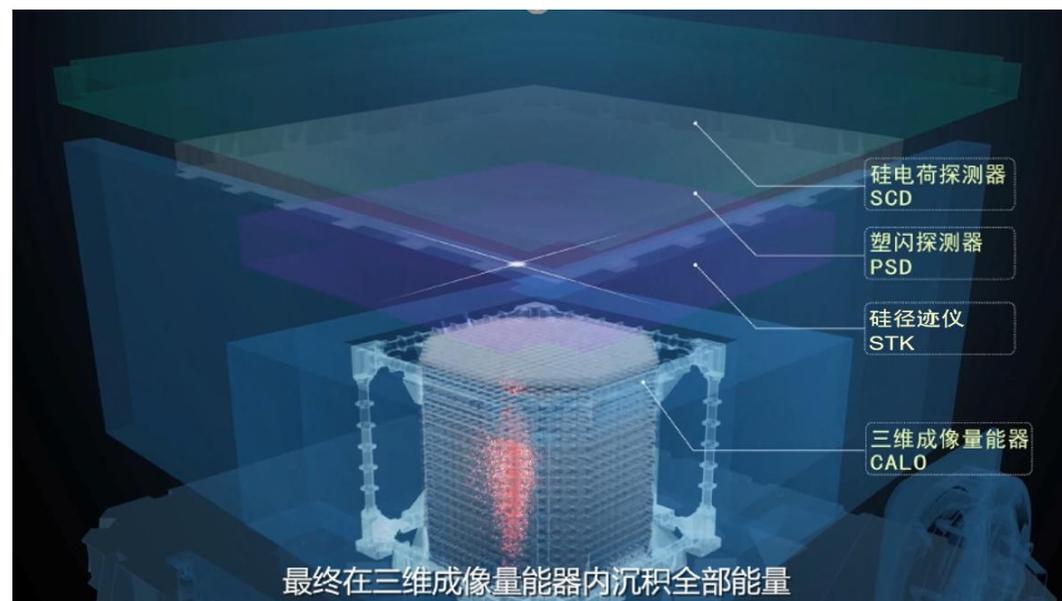
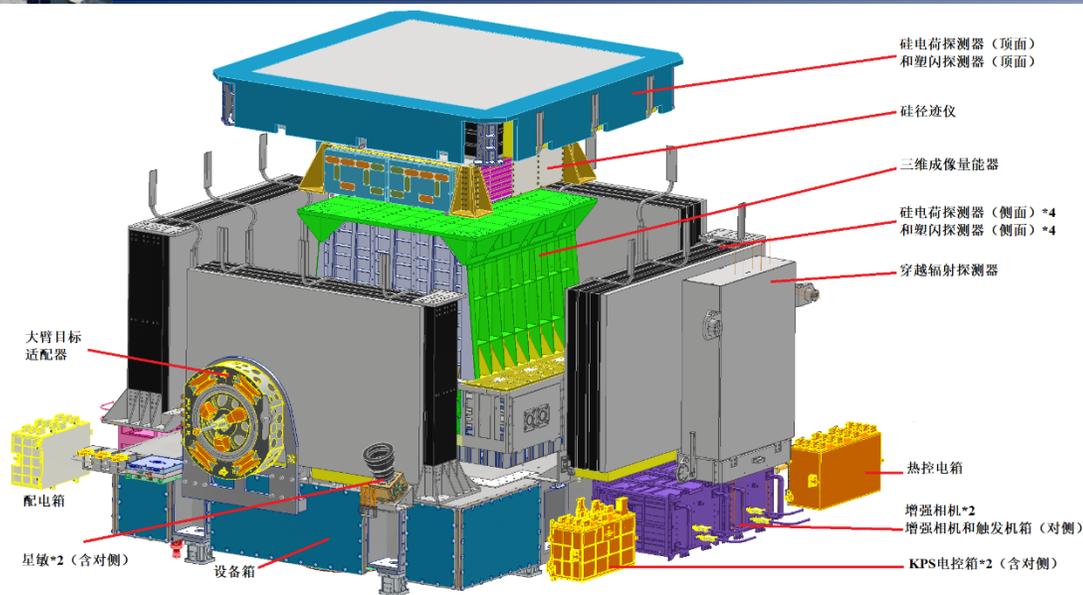


# 各空间实验主要性能参数对比

实验 (运行时间)	探测能区(e/γ)	探测能区(p)	能量分辨 (e/γ)	能量分辨(p)	电子接收度 m <sup>2</sup> sr	质子接收度 m <sup>2</sup> sr
美国卫星FERMI (2008)	1GeV-1TeV(e) 20MeV-1TeV(γ)	30GeV-10TeV	10%	40%	0.9@1TeV	<0.28
ISS-AMS02 (2011)	1GeV-1TeV	1GeV-1.8TeV	2%	-	0.12	0.12
ISS-CALET (2015)	1GeV-10TeV	50GeV-10TeV	2%	35%	0.12	--
中国悟空卫星 DAMPE(2015)	5GeV-10TeV	40GeV-100TeV	1.5%	25-35%	0.3@>30GeV	0.04@10TeV
中国空间站 HERD(本项目)	10GeV-100TeV 0.5GeV-100TeV(γ)	30GeV-5PeV	1.5%	25%	>3@200GeV	>2@100TeV
同等条件下性能 比较	提升10倍以上	提升50倍以上	领先	领先	提升10倍以上	提升7倍以上

AMS02实验计划于2026年完成在轨升级，将电子接收度提高到300%。  
而HERD电子接收度仍将是AMS02升级后的8倍以上。

# 载荷组成与工作原理：中心三维量能器+外围多功能探测器



子系统	功能
量能器CALO	能量测量、粒子鉴别
硅径迹仪STK	伽马径迹测量
塑闪探测器PSD	伽马识别
硅电荷探测器SCD	电荷测量
穿越辐射探测器TRD	TeV粒子绝对能标
增强相机	量能器大动态高速读出系统
触发探测器	提供公共触发；辅助能量测量
综合电子学 (舱外和舱内)	载荷供配电、运控管理等
热控	载荷热控
结构机构	载荷支撑、分离与对接



# 量能器子系统

## ■ 主要功能:

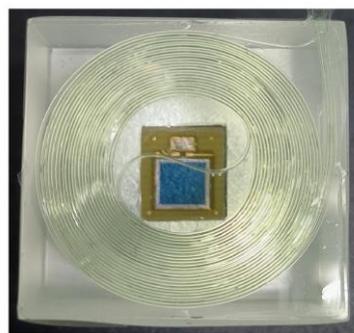
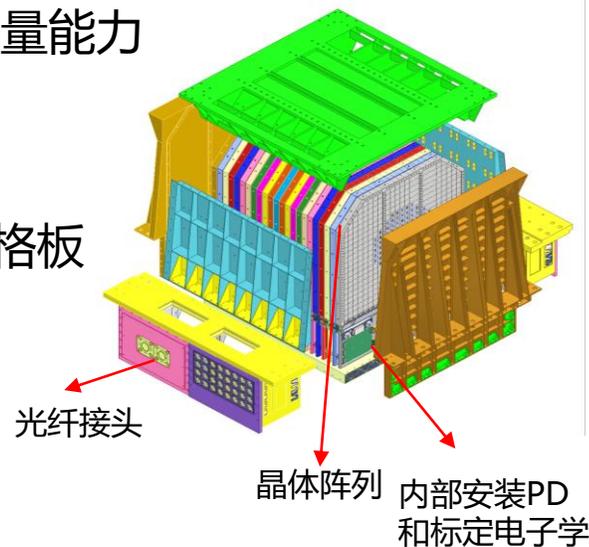
- ◆ 具备对高能宇宙辐射粒子的大视场、大接收度的全天观测能力
- ◆ 具有对探测能区宇宙线（电子、质子、核子等）、高能光子的高分辨能量测量能力
- ◆ 具有对电子和质子的高鉴别能力

## ■ 包含3个组件，外包络尺寸>1488mm×1150mm×1118mm，总重近2吨

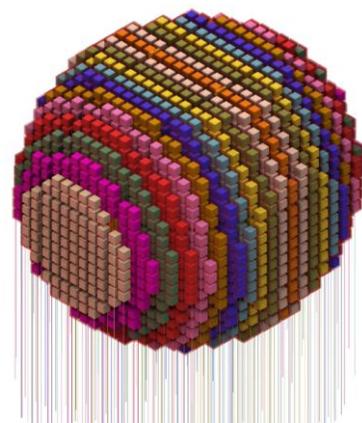
- ◆ 晶体阵列：约7500块边长3cm立方晶体，约3万个光纤通道；分布在23层栅格板
- ◆ PD读出：壳层满配，芯层1/4配备；23层前端板，2块电源板，2块主控板
- ◆ 标定光源：约3/7光纤配备；23层前端板，2块主控板

## ■ 工作原理:

- ◆ 粒子在晶体阵列内发生簇射，损失能量转换为荧光，由波移光纤线性引出
- ◆ PD将荧光转换为电信号读出，与增强相机互为独立/备份
- ◆ 颗粒晶体组成类球形阵列，在相同晶体规模下，具有更大的有效接收度
- ◆ 通过非线性A-B测量法，在轨标定增强相机



晶体单元

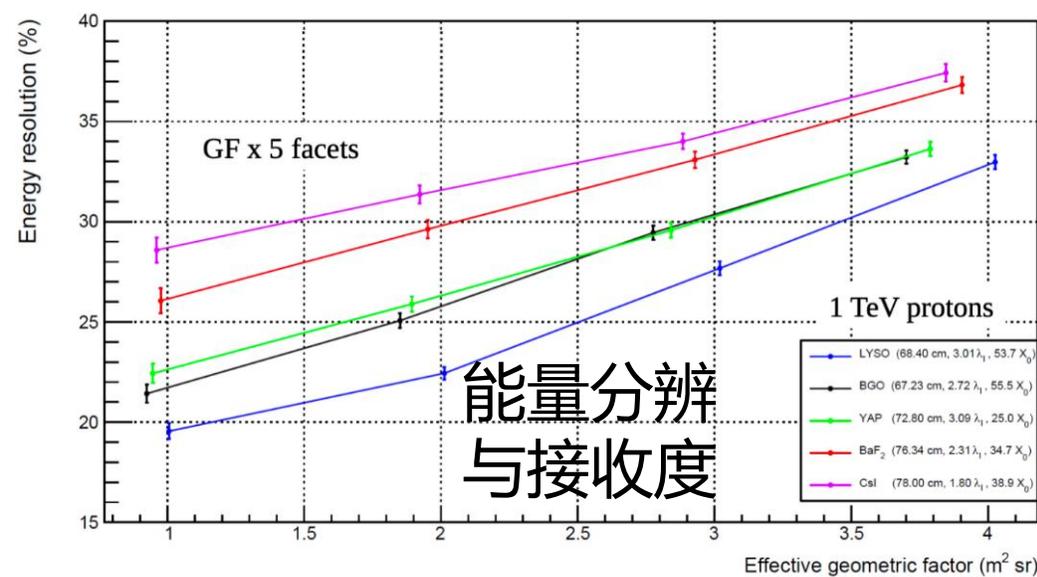
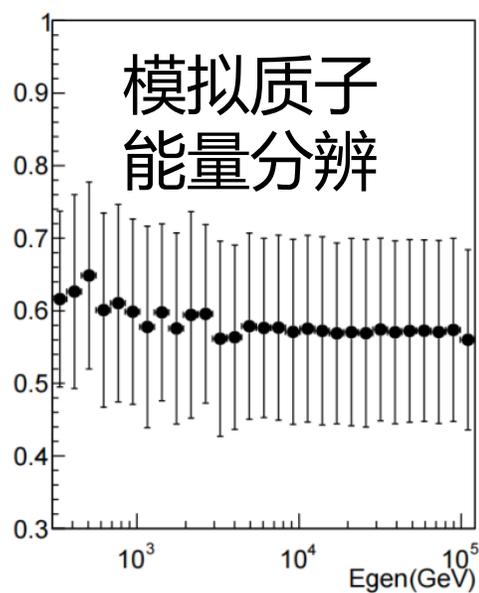
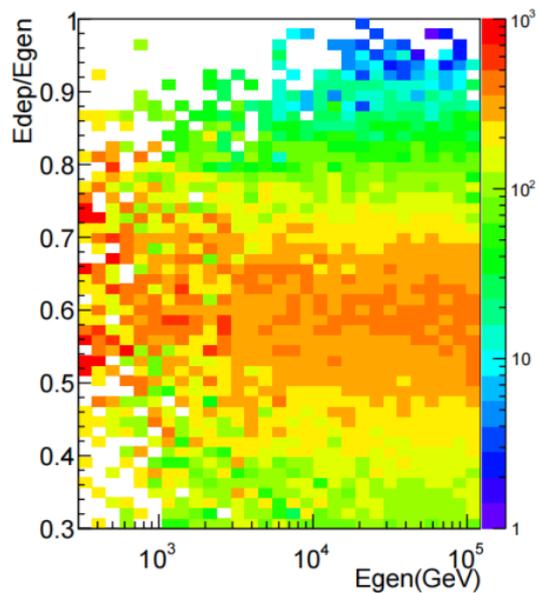
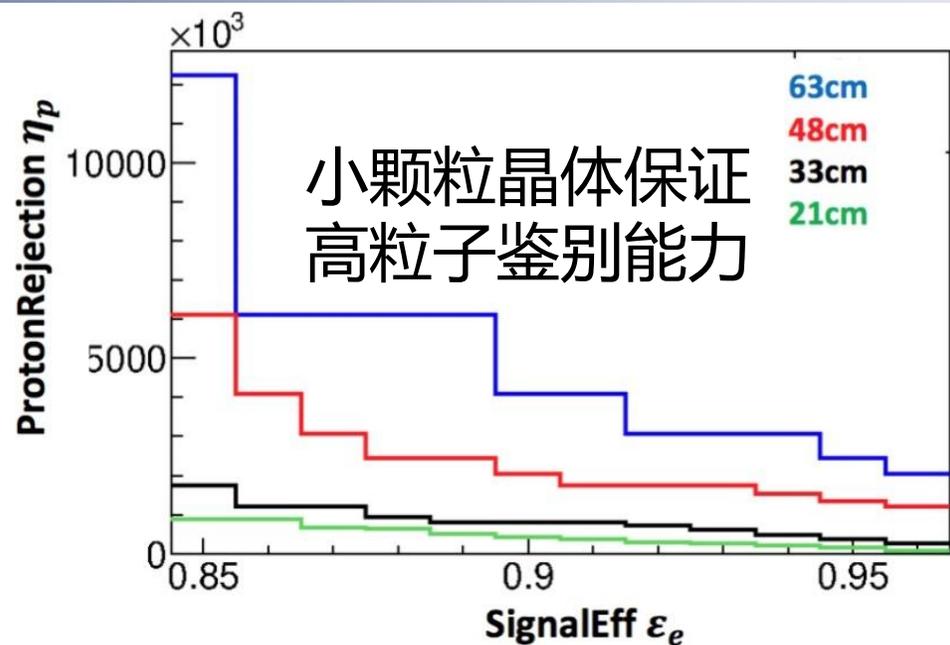
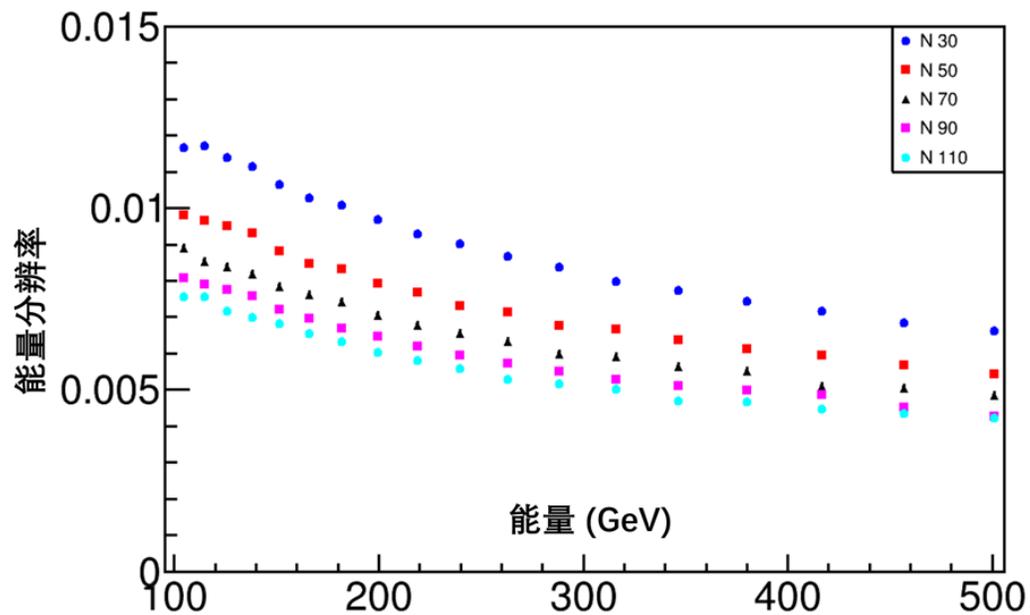


$$NL = \frac{Q_{ab} - (Q_a + Q_b)}{(Q_a + Q_b)}$$

A-B测量法公式



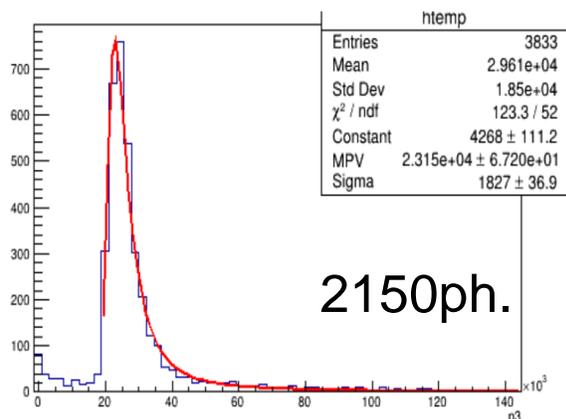
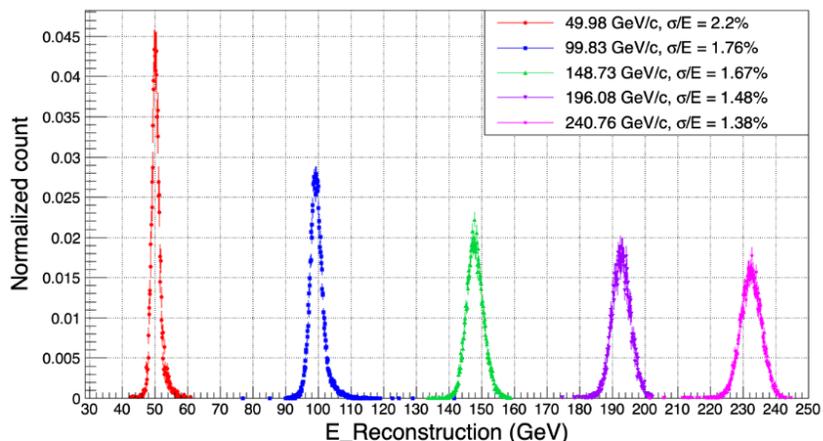
# 模拟验证



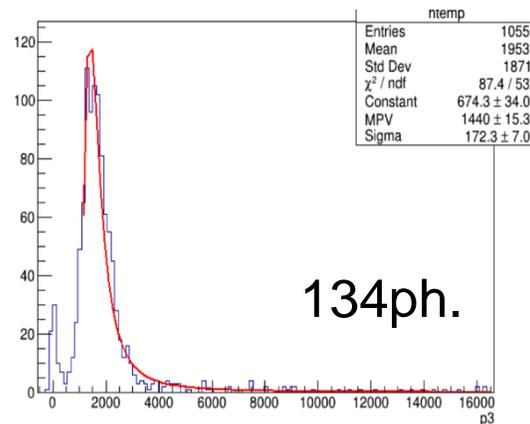


# 实测验证

- 研制束流件，在CERN验证电子能量分辨，质子能量分辨，e/p粒子鉴别能力
- 关键技术攻关，验证波移光纤信号输出能力和标定能量范围
- 研制束流件验证PD读出能量范围和读出死时间

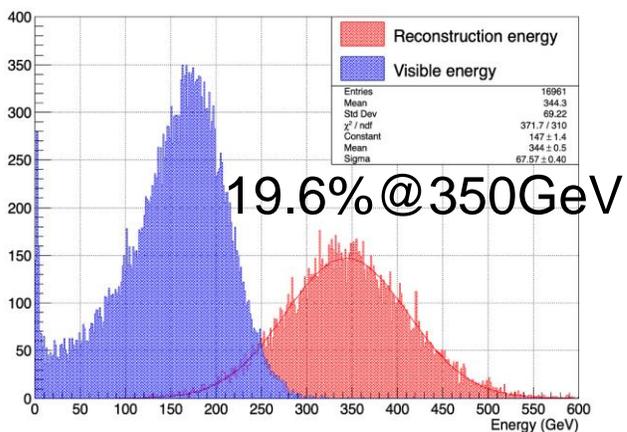


2150ph.

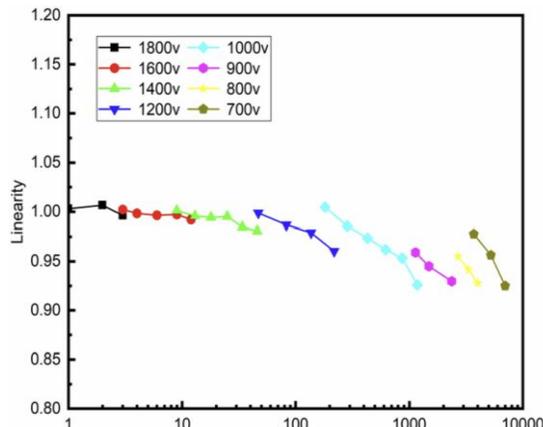


134ph.

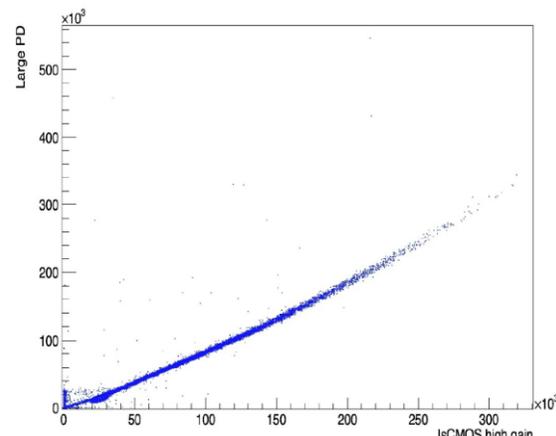
高、低增益光纤MIP信号



19.6% @ 350GeV



标定能量范围 (低量程)



光纤与PD读出信号关系



# 增强相机：关键技术攻关成功

■ **主要功能：**晶体信号幅度测量，响应触发机箱分发的触发信号，对光纤输出信号进行增强、延迟、大动态、高速采集读出。

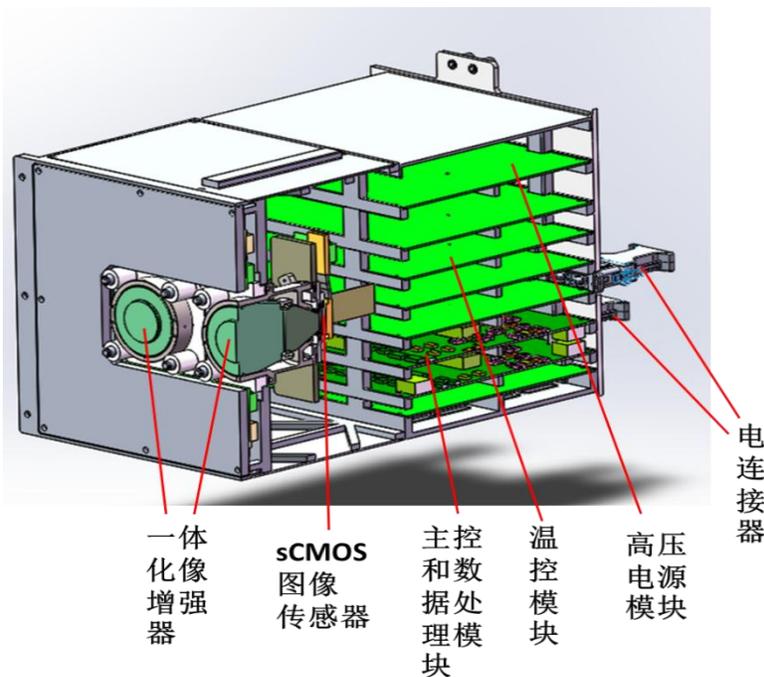
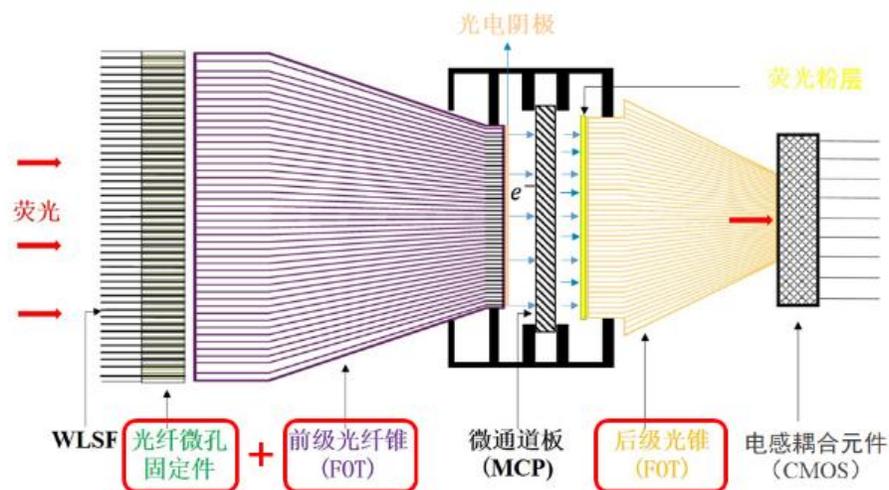
- ◆ 总动态范围**一千万倍**，单机动态范围 $\leq 1000$ 倍
- ◆ 帧频  $> 800\text{fps}$  (全局复位模式)
- ◆ 高精度在轨精密重耦合
- ◆ 数据零压缩

## ■ 工作原理

- ◆ 约7500根波移光纤经**前级光锥**，在**像增强器**内发生光电转换，由**微通道板倍增**后轰击**荧光屏**产生荧光，经**后级光锥**后的**二维图像**由sCMOS收集

## ■ 增强相机组成：低/中/高三量程

- ◆ 一体化封装像增强器
- ◆ 高均匀大动态微通道板
- ◆ 高均匀低串扰光锥
- ◆ **定制大动态范围sCMOS芯片**





# 硅径迹仪STK

- **主要功能：顶部入射伽马光子转换和方向测量**→点源观测高精度

- **工作原理**

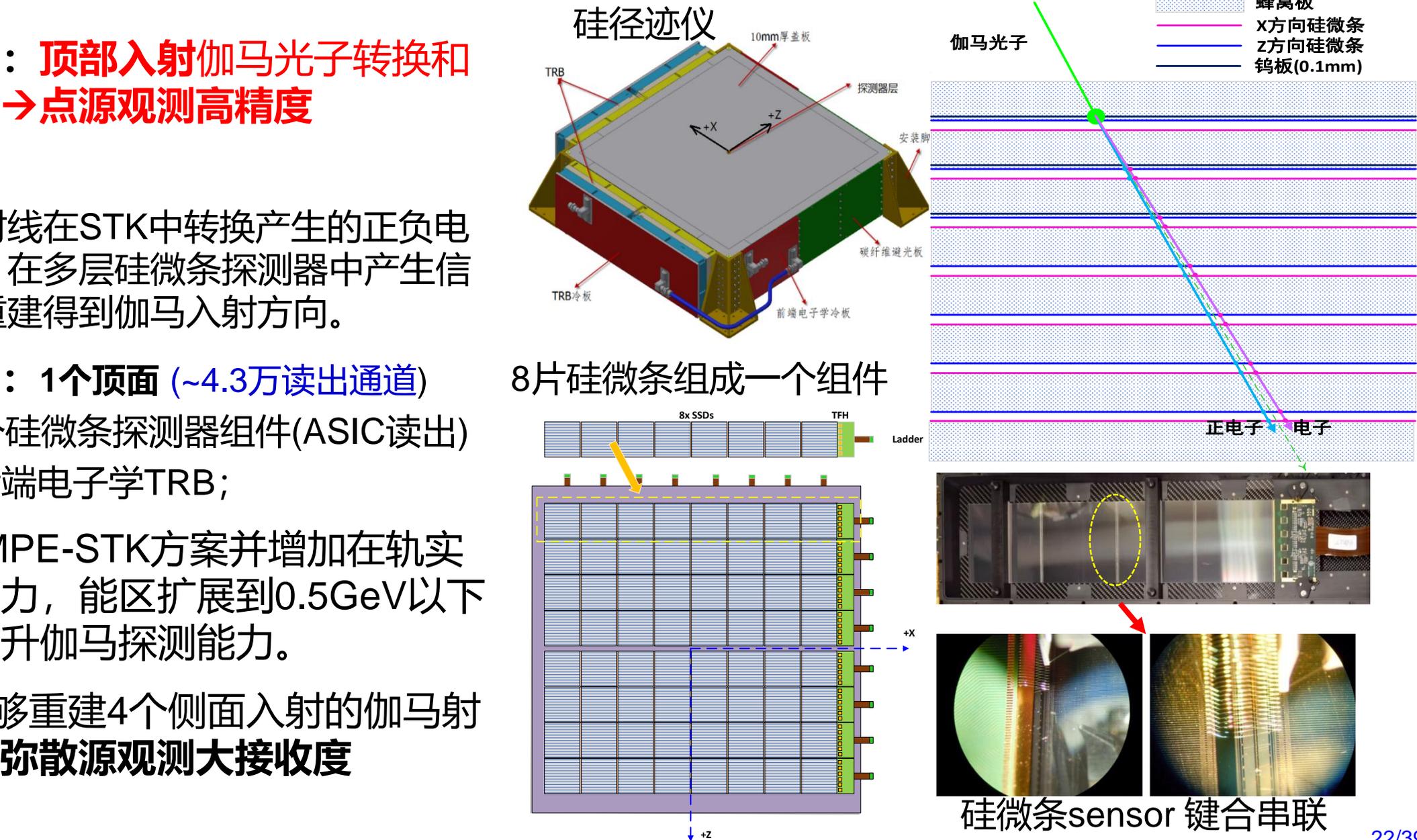
- ◆ 伽马射线在STK中转换产生的正负电子对，在多层硅微条探测器中产生信号，重建得到伽马入射方向。

- **STK组成：1个顶面 (~4.3万读出通道)**

- ◆ 112个硅微条探测器组件(ASIC读出)
- ◆ 4个后端电子学TRB;

- 继承DAMPE-STK方案并增加在轨实时触发能力，能区扩展到0.5GeV以下，大幅提升伽马探测能力。

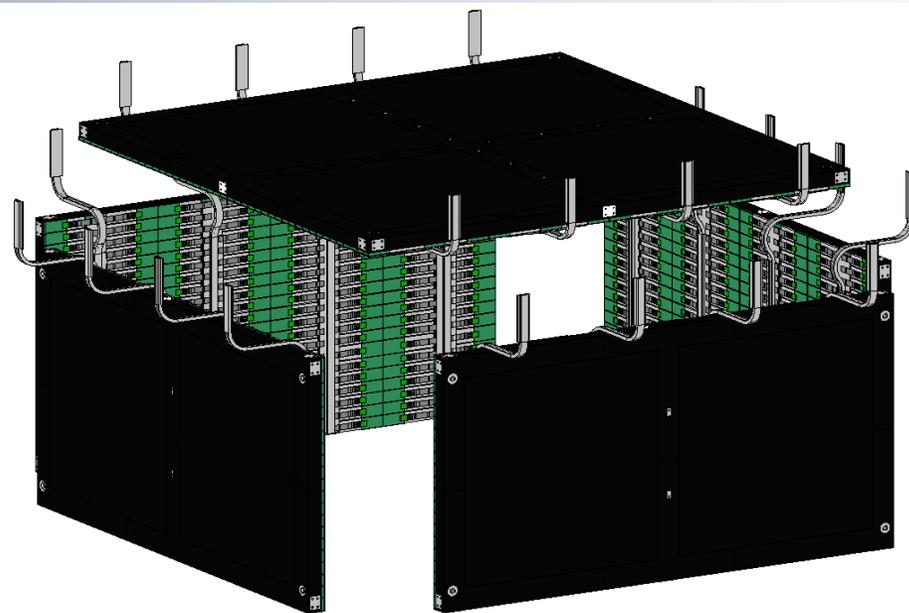
- CALO能够重建4个侧面入射的伽马射线方向





# 塑闪探测器PSD：伽马射线探测的关键

- **主要功能：**伽马识别，在轨实时反符合(带电粒子)
- **工作原理**
  - ◆ PSD对伽马光子几乎无响应，而带电粒子会产生电离能损。PSD信号用于标记或实时排除大量低能带电粒子，保证伽马光子被探测。
  - ◆ 电离能损在PSD中产生的荧光，被耦合的多个SiPM收集并转换成电信号；
- **PSD组成：**
  - ◆ 5面~3600读出通道：1个顶面+4个侧面  
每面在SCD与STK中间，空间限制
  - ◆ 每面单层塑闪单元，梯形/平行四边形拼接  
长45~50cm，中心宽4cm，厚1cm
  - ◆ 2个SiPM板位于塑闪单元两侧，表面读出
  - ◆ 读出电路Ebox

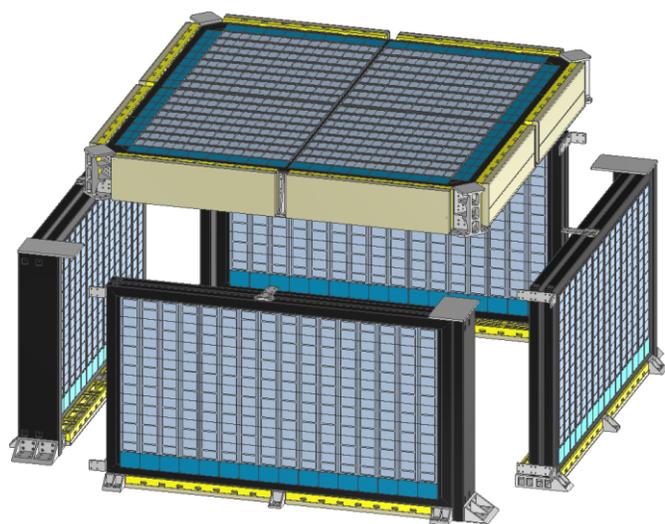


塑闪短条单元+SiPM表面读出

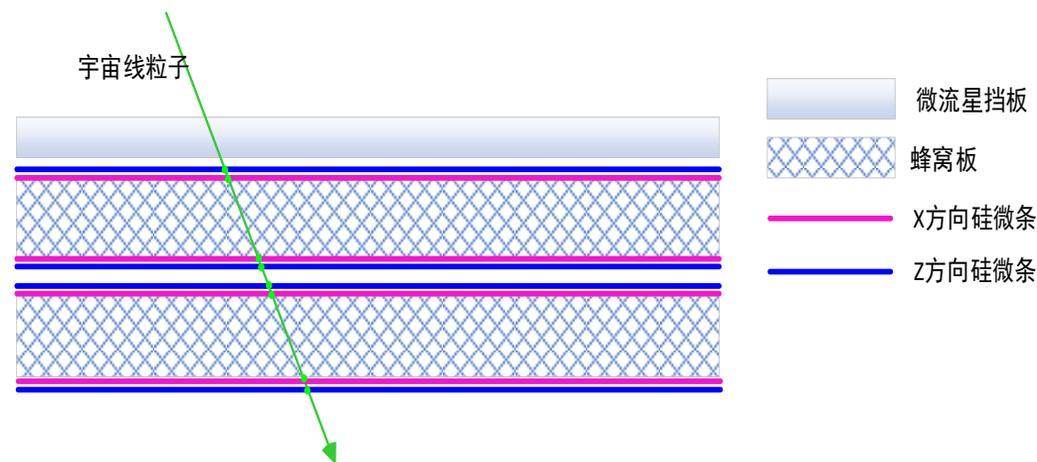


# 硅电荷探测器SCD：放到最外层确保测量原初电荷

- **主要功能：** 电荷测量 $Z=1\sim 28$ 。对质子和碳的分辨分别优于0.15 c.u.和0.20 c.u.
- **服务的科学目标：** 宇宙线起源、加速和传播机制
- **工作原理：**
  - ◆ 宇宙线沉积能量与 $Z^2$ 成正比
  - ◆ 4大层X/Y硅微条，精确测量电荷，并提供方向测量
  - ◆ 覆盖HERD的顶面和4个侧面(~40万读出通道)，极大增加接受度
  - ◆ 物质质量轻、且处于HERD最外层，减少原子核碎裂



SCD包含1个顶面和4个侧面  
每面包含1个探测器机箱和若干FFE



探测器机箱包含  
4大层XY硅微条探测器



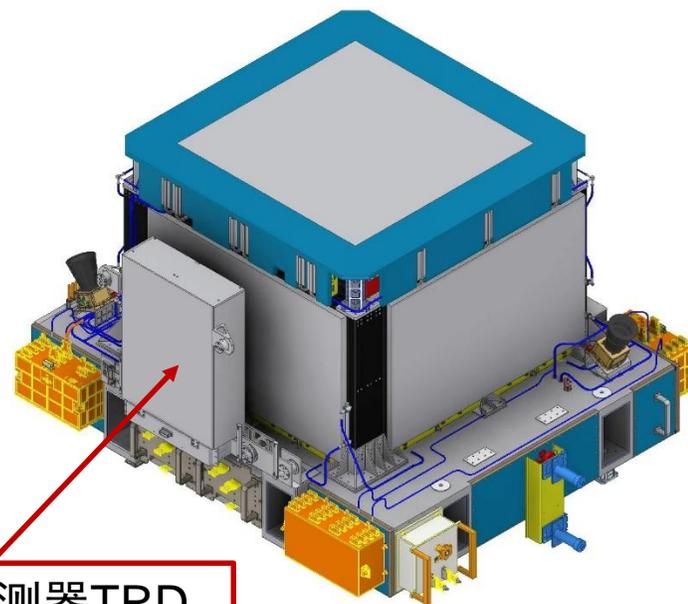
# 穿越辐射探测器TRD：功能与技术指标

## ■ 主要功能：TeV核子绝对能标

- ◆ 能量标定，在HERD触发系统的触发控制下探测高能宇宙线质子，获取高能带电粒子的穿越辐射信号，通过TRD地面标准刻度曲线对高能质子进行能量标定；
- ◆ 独立观测，以探测器的背面作为入射面独立开展X射线全天观测和GRB监测。

## ■ 科学需求

- ◆ 穿越辐射标定能区0.8~3.2TeV
- ◆ 穿越辐射标定精度 $\gt 10\%$



穿越辐射探测器TRD

指标项	数值
探测单元数	6
单元探测面积	$\leq 300 \text{ cm}^2$
辐射体膜厚度	$20 \pm 5 \text{ } \mu\text{m (PI)}$
单模块辐射体总厚度	$9.6 \pm 0.3 \text{ cm @ 230 层}$
探测效率	$\geq 40\% @ 8.05 \text{ keV}; \geq 40\% @ 17.5 \text{ keV}$
死时间	$\leq 1.25 \text{ ms}$



# 触发探测器：组成与工作原理

## 功能与技术指标

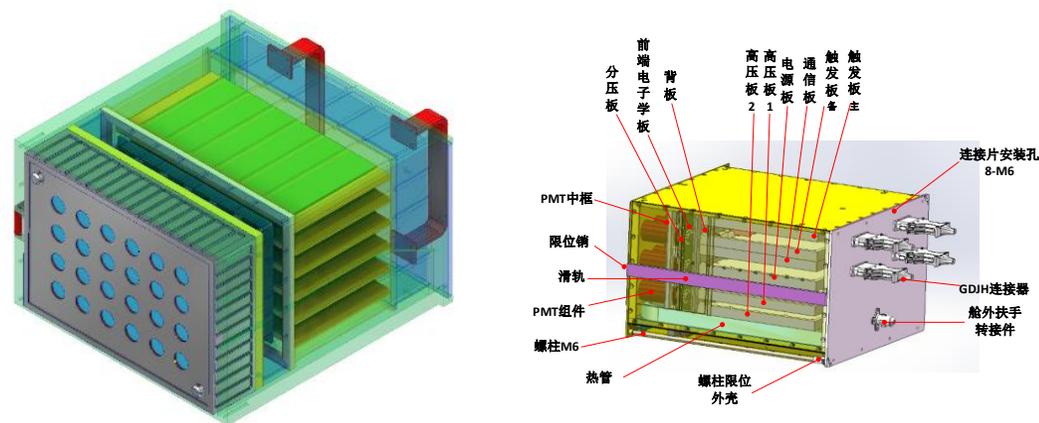
- ◆ 触发能区芯层分区触发下限 $\leq 2.5\text{GeV}$ ，壳层分区触发下限 $\leq 0.25\text{GeV}$
- ◆ 低触发延迟和低抖动 $> 1\mu\text{s} \pm 50\text{ns}$
- ◆ 分级触发预触发L0，主触发L1
- ◆ 辅助能量测量

## 工作原理

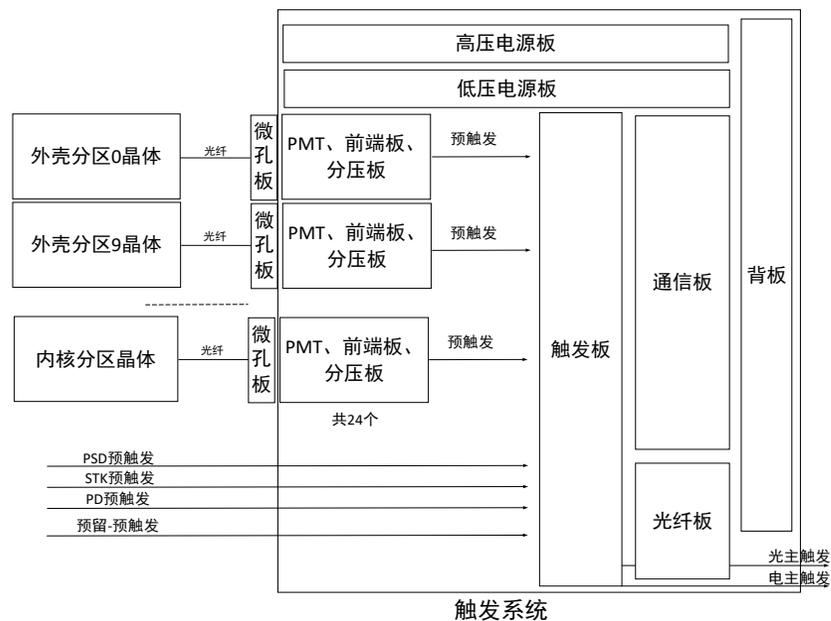
- ◆ 利用多探测器的能量、时间和位置预触发信息，识别粒子并形成主触发信号，通过触发光网络(或异构备份电网络)，统一进行低延迟、可靠分发

## 触发系统组成

- ◆ 组成：PMT与前端板、分压板、高压电源板、低压电源板、触发板、通信板、光纤板、背板、结构与热控组件等
- ◆ 高压安全性设计：过压与过流保护(1250V\*0.5mA)、留足安全距离、采用高绝缘板材与线缆、封闭金属结构机箱



触发探测器机箱



触发探测器系统组成



# 触发探测器：系统分区与物理设计

## 分区设计

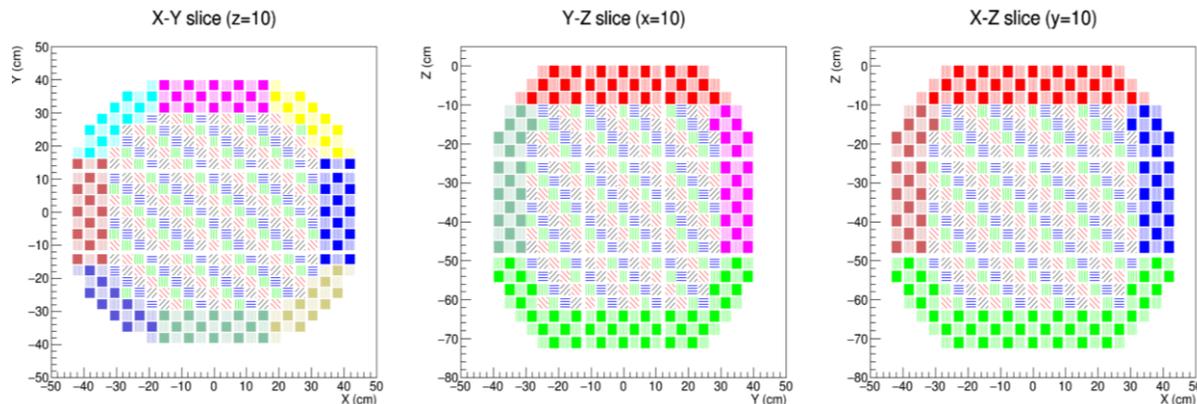
- ◆ 实现物理备份：24组探测模块对应棋盘分区
- ◆ 兼顾触发与能量获取：20个壳分区与4个芯分区
- ◆ 双量程读出：保障动态范围
- ◆ 触发道：不同分区间逻辑组合实现不同触发道

各分区晶体数量

分区编号	晶体数量	分区编号	晶体数量
顶面外壳 A0	330	顶面外壳 B0	329
侧面外壳 A1-A4	151	侧面外壳 B1-B4	148
侧面外壳 A5-A8	103	侧面外壳 B5-B8	95
底面外壳 A9	682	底面外壳 B9	653
内核 A	867	内核 B	867
内核 C	884	内核 D	884

各分区动态范围 (单位eV)

分区	生成信号	触发路量程	高增益能量路量程	低增益能量路量程
外壳 A0-A9	触发和能量	100M-2G	100M-2G	1.8G-37G
内核 A	触发和能量	100M-2G	100M-2G	1.8G-37G
外壳 B0-B9	触发和能量	100M-2G	100M-2G	1.8G-37G
内核 B	触发和能量	100M-2G	100M-2G	1.8G-37G
内核 C	能量	N/A	36G-702G	695G-13.5T
内核 D	能量	N/A	13T-253T	256T-5P



触发探测器分区

触发道与筛选条件

粒子种类	筛选条件/GeV	筛选比例	参与子系统	T0 触发来源
高能	$E_{total} > 15$	1	PMT	PMT
低能伽马	$E_{sh} > 0.35$ & $E_{psd} < 0.001$ & $E_{sh\_bot} < 0.1$	待定	PMT PSD	PMT
低能电子	$E_{sh\_trd} > 0.35$ & $E_{sh\_others} < 0.1$ & $E_{total} < 5$	1/20	PMT	PMT
无偏	$(E_{sh} > 0.1)$ & $(E_{core} > 0.1)$	1/1000	PMT	PMT
刻度	$(0.1 < E_{sh\_sum} < 0.8)$ & $(E_{core} > 0.5)$	待定	PMT	PMT
高 Z	$(E_{total} > 2 \text{ 或 } 5)$ & $E_{psd} > 5\text{MeV}$	1	PMT PSD	PMT
超低能伽马	$E_{sh} > 0.1$ & PSD_VETO & STK_3IR	待定	PMT PSD STK	STK



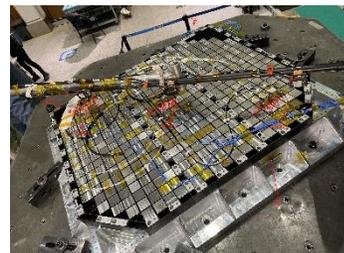
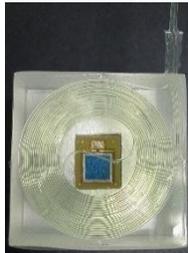
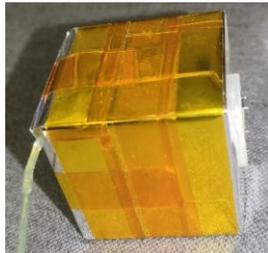
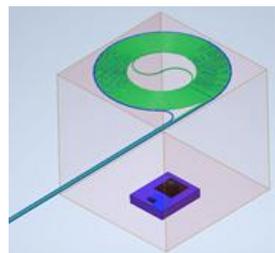
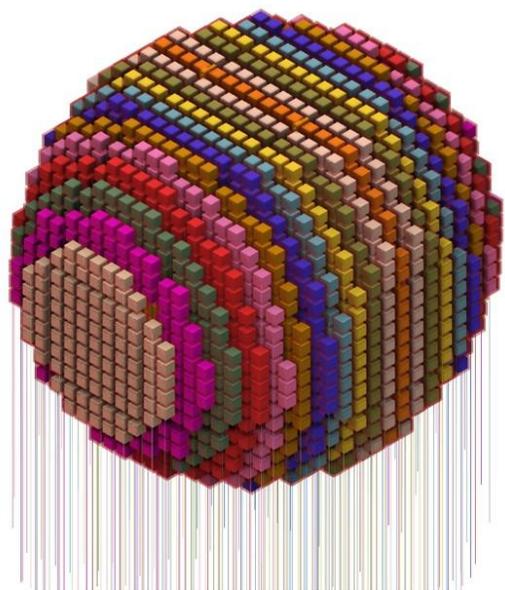
# 识别出关键技术并且完成攻关

- 结合载荷创新方案，提炼识别出三项关键技术
- 2022年2月，启动载荷关键技术攻关工作。
- 2022年11月，三项关键技术攻关研制的原理样机的性能指标全部达标，并通过项目组评审。
- 2023年7月，三项关键技术攻关研制的样机全部通过相关环境摸底试验，并通过项目组评审。
- 国内定制科学级sCMOS芯片流片成功，性能满足要求。

创新方案	关键技术名称	相关科学指标	攻关结果	是否通过环模 摸底试验
三维成像量能器	晶体多量程信号线性引出技术	动态范围、能量分辨	性能满足	是
增强相机	高速大动态范围低串扰一体化封装增强相机技术	动态范围、能量测量精度	性能满足	是
穿越辐射标定	新型闭气侧窗式大面积穿越辐射探测器技术	能标刻度	性能满足	是



# 攻关完成 “晶体多量程信号线性引出技术”



晶体更高  
光输出

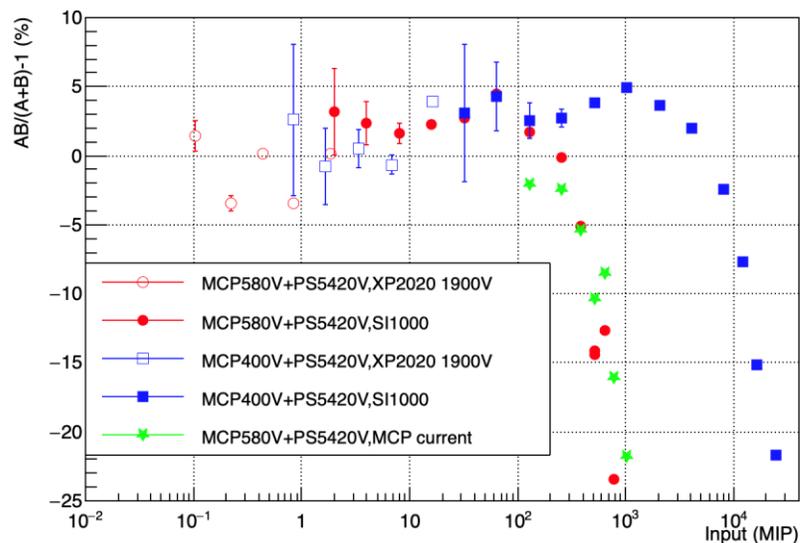
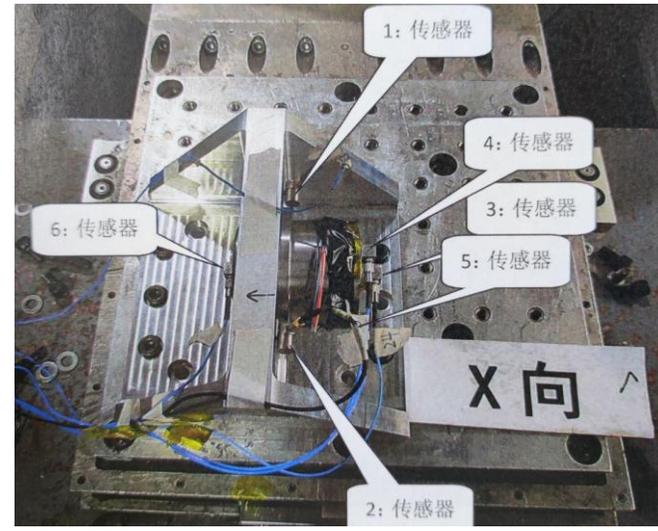
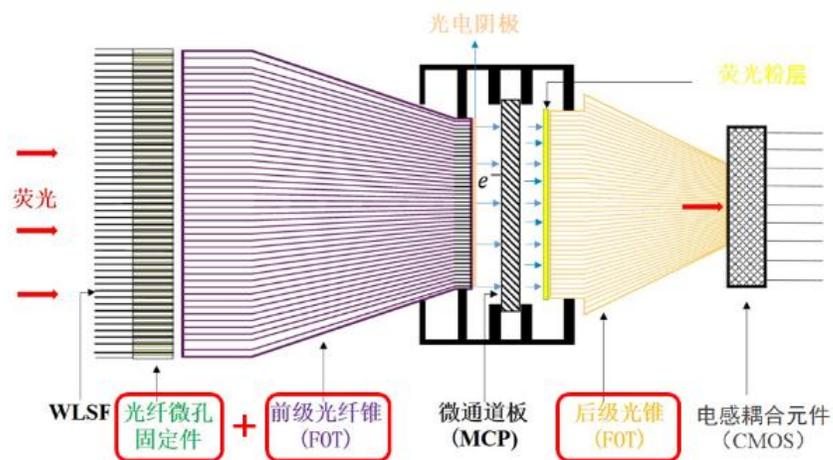
批量一致  
性控制

在轨增益  
标定手段

参数类型	技术指标要求	实现情况
低量程光纤输出闪烁光子强度	$\geq 1000 \text{ ph.}@30 \text{ MeV}$	2694 ph.@30 MeV
低/高量程光纤输出信号比例	$\geq 10$ 倍	14.8-16.5
同功能光纤光输出不一致性	$\leq 1.5:1$	1.16:1
相邻光纤串扰	$\leq 1\%$	0.06%
标定光源能量范围	1-6000 MIP (低量程) 2000-60000 MIP (高量程)	1-10000(低量程) 10-100000(高量程)
标定光源不稳定性	$< 0.5\% @ 2000 \text{ MIP}$ (连续1 小时脉冲工作, 100Hz)	0.4%

有效扩展动态范围，提高能量分辨

# 攻关完成 “高速大动态范围低串扰一体化封装增强相机技术”



一体像增强器动态范围**好于1万倍**，比传统器件提升两个量级

参数	技术指标要求	实现情况
像增强器低量程动态范围	1-5000MIP(非线性好于25%)	<b>1-10000MIP</b> (非线性好于25%)
像增强器高量程动态范围	2000- $10^7$ MIP(非线性好于25%)	-(相机两量程改为三量程)
像增强器中心距串扰	$\leq 3\text{‰}$	2.7‰
像增强器非均匀性	$\leq 1.8:1$	1.73:1@6400
像增强器频率相关性	$\leq 1\text{‰}@1.25\text{ms}$	余晖<0.2ms

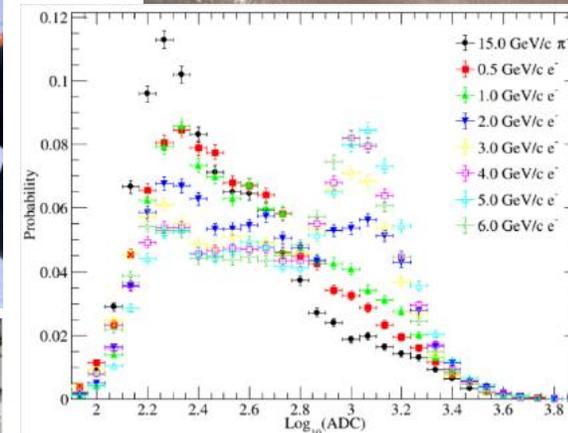
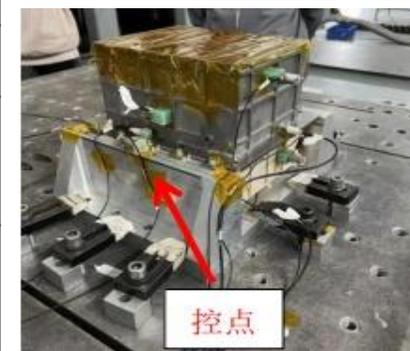
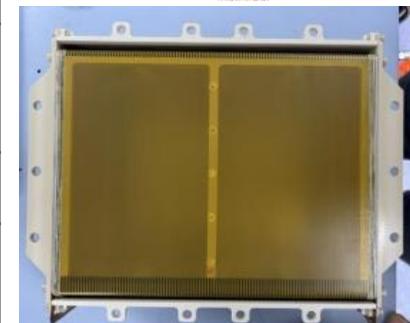
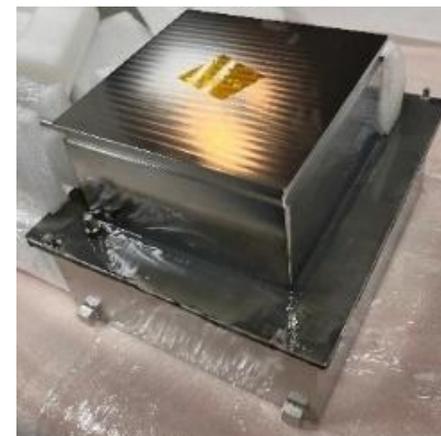
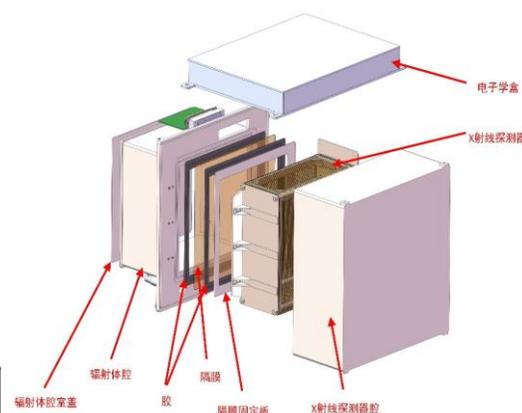
有效扩展动态范围，提高测量精度



# 攻关完成 “闭气侧窗式大面积穿越辐射探测器技术”

- 完成了探测单元设计
  - ◆ 辐射体腔和探测腔室 “共腔不共气”
  - ◆ 双向漂移
- ◆ 已完成并通过环境力学摸底试验

参数类型	技术指标要求	实现情况
探测器单体几何面积	$\geq 200 \text{ cm}^2$	$225 \text{ cm}^2$
探测器漏气率	$\leq 1.0\text{E-}9 \text{ Pa m}^3/\text{s}$	$0.36\text{E-}10 \text{ Pa m}^3/\text{s}$
辐射体腔室隔膜渗透率	$\leq 1.4\text{E-}8 \text{ Pa m}^3/\text{s}$	$0.8\text{E-}8 \text{ Pa m}^3/\text{s}$
规则辐射体层数	$\geq 200$ (总厚 $\leq 12 \text{ cm}$ )	204 (总厚=12 cm)
探测器电场不均匀性	$\leq 10\%$ @10 mm	已完成仿真优化, 正在进行实测验证
X射线探测器能量分辨率	$< 35\%$ @5.9 keV (FWHM)	$30\%$ @5.9 keV



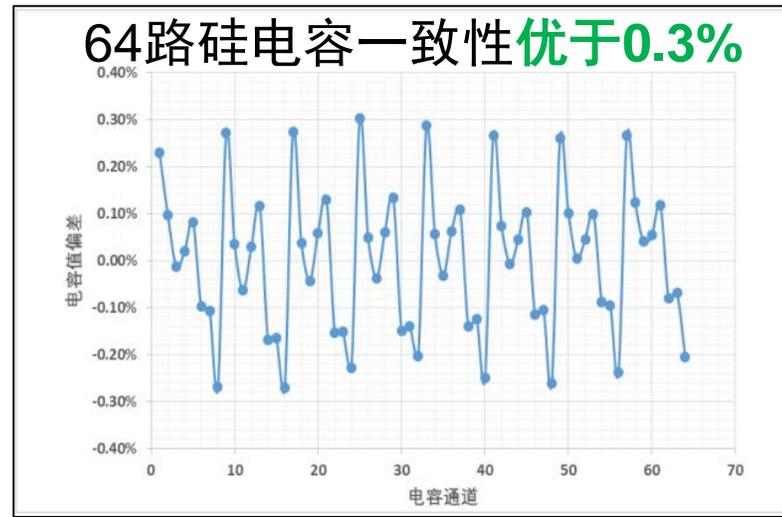
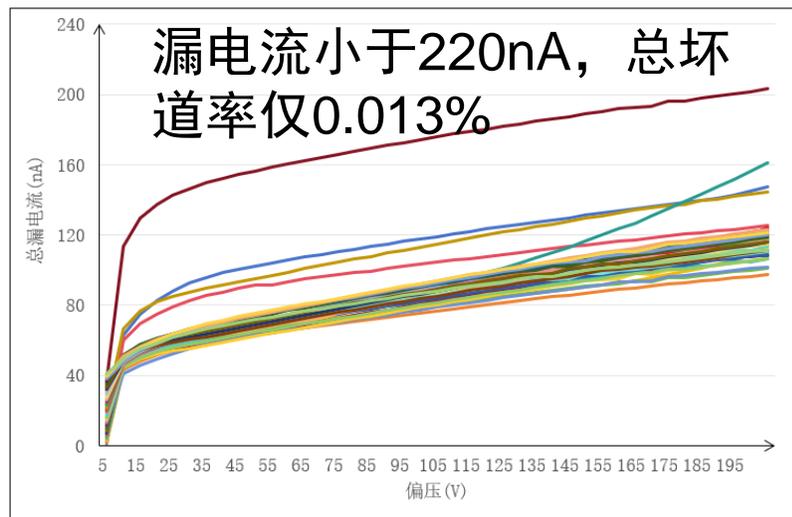
TRD可识别0.5~6.0 GeV 电子产生穿越辐射信号

高效完成能标标定, 兼具独立X射线探测能力

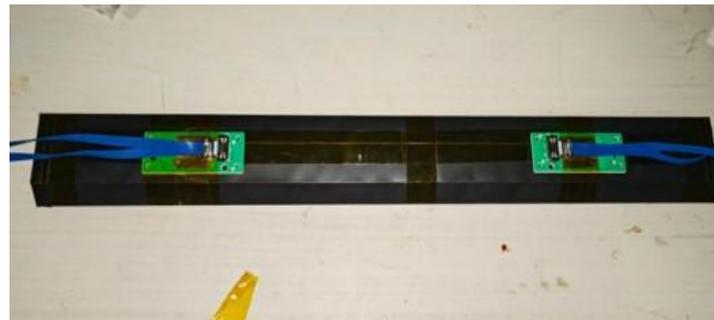


# 自主研制探测器研制成功

- 自主研制方案中，SCD和PSD探测器改为完全国内负责；FIT改为STK方案并改为国内负责
- 自主研制完成硅微条探测器
  - ◆ 硅微条片（低漏电流）
  - ◆ 硅电容阵列（一致性）
- 自主研制完成塑闪探测器
  - ◆ SiPM（高信噪比）
- 以上产品性能均满足要求



硅微条探测器全尺寸Ladder



PSD塑闪单元（含SiPM组件）



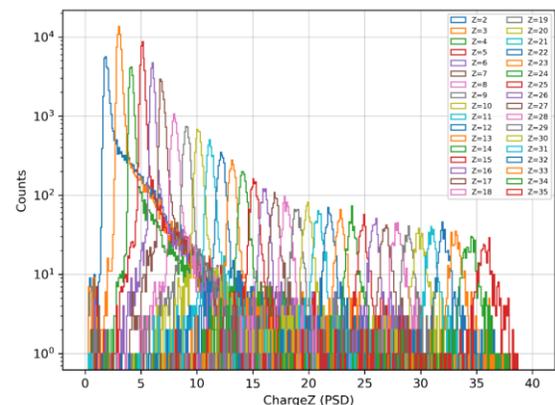
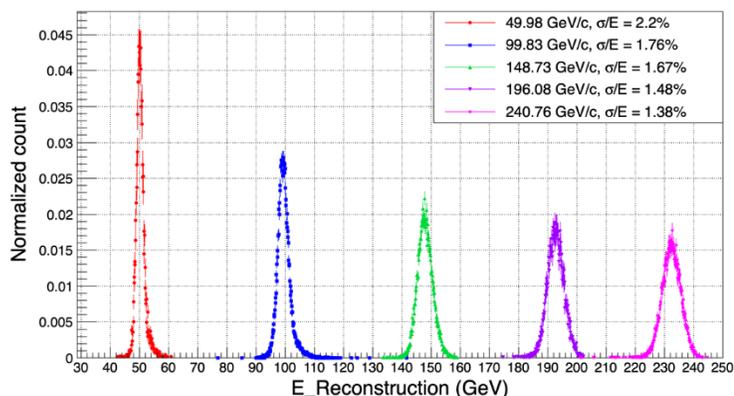
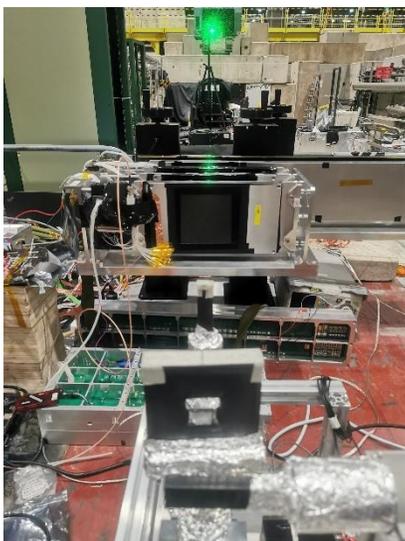
# 自主研制方案束流件通过束流试验验证

## 2024年CERN束流参试设备

- ◆ 1/8规模量能器 (含两台增强相机)
- ◆ SCD探测器3个Ladder
- ◆ PSD探测器5个探测单元
- ◆ STK探测器2个Ladder
- ◆ 1/4规模触发机箱

## 试验结果符合预期，关键技术指标见底，可以满足科学目标需求

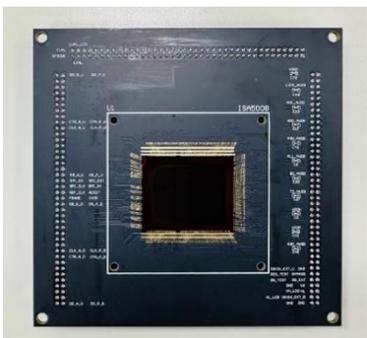
序号	指标	相关探测器	指标需求	束流试验实测	满足度
1	电子能量分辨率	量能器	$\gt 1.5\% @ 200\text{GeV}$	1.48% @ 196 GeV	满足
2	质子能量分辨率	量能器	$\gt 25\% @ 100\text{GeV} \sim \text{PeV}$	19.6% @ 350 GeV	满足
3	电荷分辨率	SCD	$\gt 0.15\text{c.u.} @ Z=1,$ $\gt 0.2\text{c.u.} @ Z=6$ (8层)	0.18c.u. @ Z=1, 0.20c.u. @ Z=6 (单层) 0.06c.u. @ Z=1, 0.08c.u. @ Z=6 (8层, 分析)	满足
4	电荷探测范围	SCD	Z=1~28	Z=1~28	满足
5	电荷分辨	PSD	$\gt 0.2\text{c.u.} @ Z=1$	0.12c.u. @ Z=1	满足
6	位置分辨	STK	$\leq 72\mu\text{m} (0^\circ \text{入射})$	优于54 $\mu\text{m} (0^\circ \text{入射})$	满足
7	触发延迟	触发子系统	$\gt 1\mu\text{s}$	960ns	满足
8	触发抖动	触发子系统	$\gt \pm 50\text{ns}$	$\pm 8\text{ns}$	满足
9	洛伦兹因子标定精度	TRD	不大于10% @ 洛伦兹因子 2000 (1 GeV电子)	< 10% @ 洛伦兹因子1200- 3000 (0.6-1.5 GeV电子)	满足



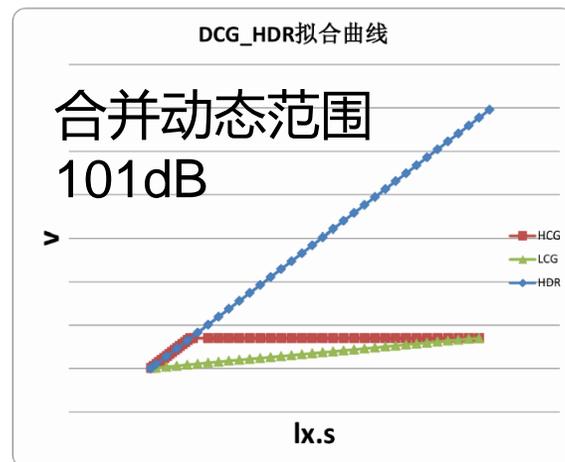
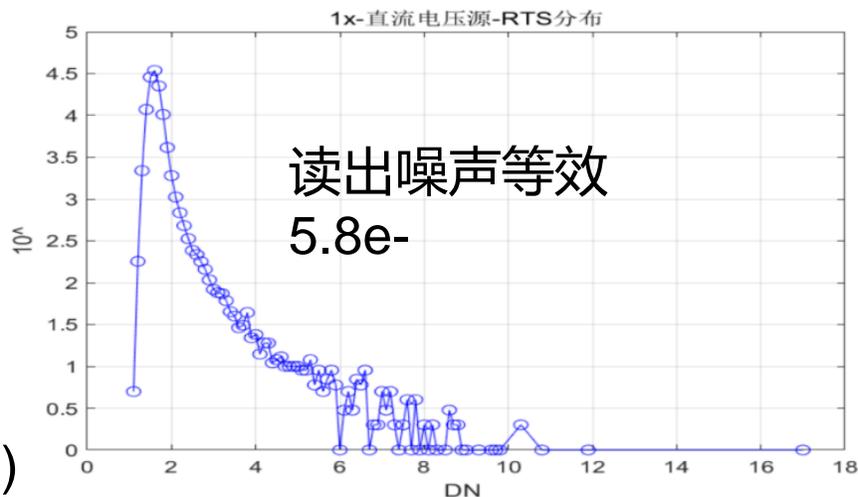


# 国产定制高速大动态sCMOS芯片研制成功

## 定制sCMOS芯片ISA5008研制测试完成，所有指标满足要求



sCMOS正式版  
ISA5008(COB封装)



测试项	指标要求	实测指标	满足度
sCMOS曝光模式	支持全局复位曝光，曝光时间可调	实现了Global Reset曝光模式，且曝光时间可调	满足
sCMOS动态范围	≥8000:1@LG; ≥30000:1@合并	83.5dB@LG, 101.35 dB@合并	满足
sCMOS读出噪声	≤10e-	5.8e-	满足
sCMOS帧频	≥800fps	1200fps	满足
sCMOS功耗	≤5W	1.3W	满足
sCMOS像素尺寸	≥22.5μm×22.5μm	39.6μm×39.6μm	满足
sCMOS感光面积	≥486mm <sup>2</sup>	513.9 mm <sup>2</sup>	满足

有效扩展动态范围，降低死时间

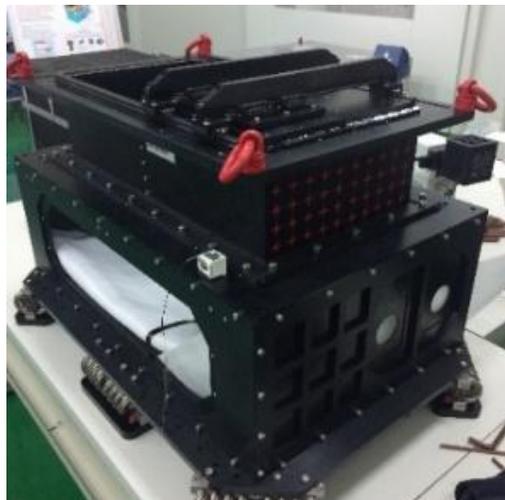


# 国际合作实验验证了方案的可行性

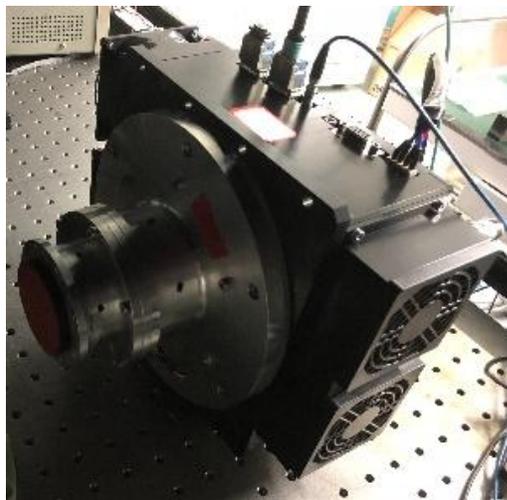
国际合作组于2015-2024年**七次**在欧洲核子中心进行了束流试验，验证了方案和工艺的原理可行性，验证了关键性能指标。



束流实验现场



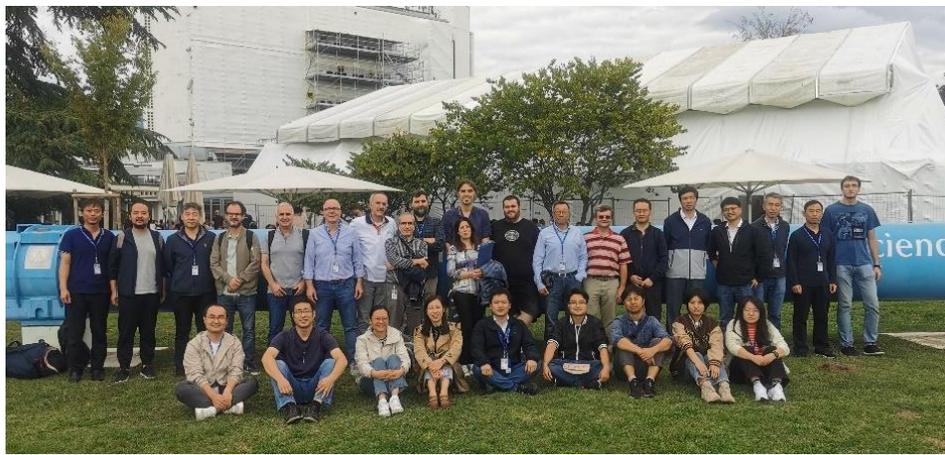
500块晶体阵列



增强相机

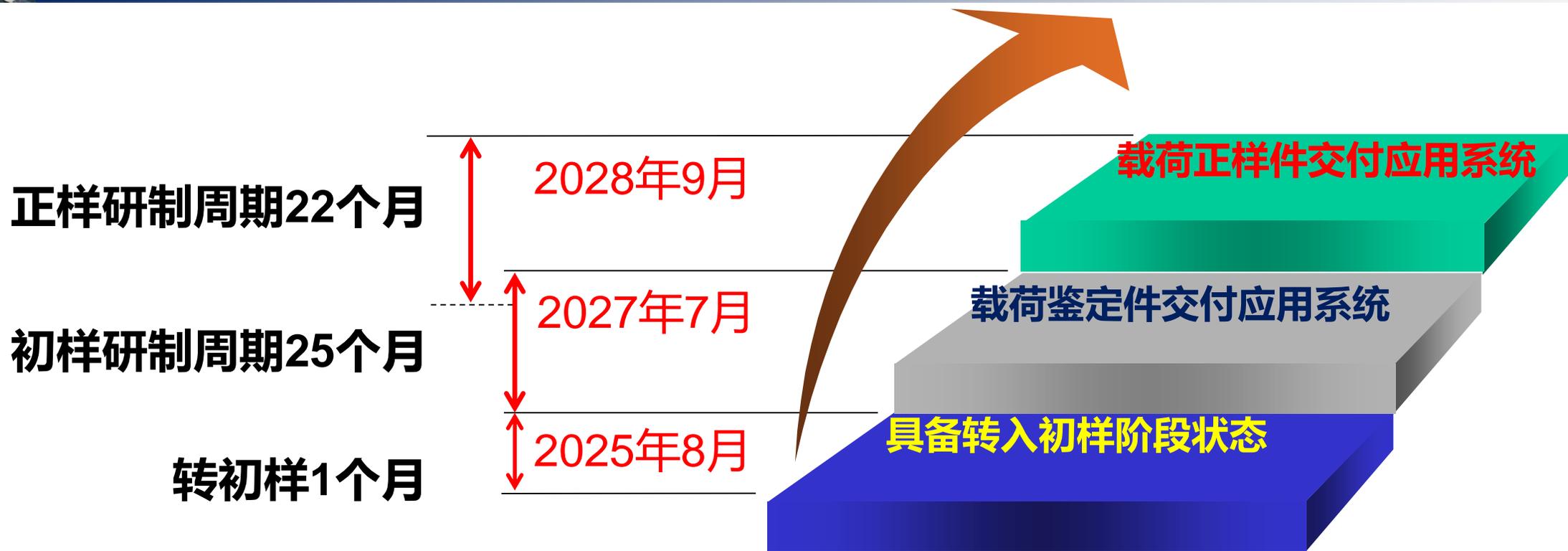


穿越辐射探测器





# HERD载荷里程碑节点（初步）



- 2023年 6月，全自主研制方案通过中科院重任局组织的专家论证
- 2024年10月，全自主方案设计通过束流试验验证
- 2025年 3月，HERD项目通过中科院重任局组织的科学目标论证评审
- 2025年 4月，HERD载荷研制技术流程计划节点通过专项评审
- 2025年 4月，HERD载荷标定方案通过专项评审
- 2025年 5月，HERD项目通过中科院重任局组织的立项论证评审



# 科学工作组：围绕4个主攻研究方向

工作组主题	研究内容	主要参加单位
一、宇宙线电子能谱精细测量	围绕HERD精确测量的电子谱开展工作，包括暗物质信号搜寻、电子流强各向异性研究、临近宇宙线源确认、宇宙线传播过程研究等	高能所、山东高研院
二、宇宙线核谱测量和宇宙线物理	围绕宇宙线核子谱测量和宇宙线起源问题开展研究，下分轻成分能谱、中质量成分谱、铁谱、超铁谱、次级元素谱、分数电荷粒子搜寻研究等	高能所、紫台
三、寻找暗物质和新物理信号	集中研究利用HERD数据搜寻新物理信号，包括通过电子谱和伽马射线测量搜寻暗物质信号、搜寻轴子所造成的伽马射线能谱改变以及洛伦兹对称性破坏效应等	高能所、理论所、紫台
四、伽马天文研究	河内超新星遗迹、脉冲星风云、双星系统及河外的活动星系核、伽马射线暴、纳赫兹引力波等不同天体源的伽马射线观测及相应研究，下分十余个不同的研究方向	南大、科大、上海台、云台等

\*国内20多个单位参加



# 科学运行与数据分析支撑科学研究

## ■ 科学运行与数据分析

- ◆ 国内团队来自高能所、山东大学、山东高等技术研究院、中国科学技术大学、西南交通大学、浙江大学、紫金山天文台等单位，包含了参加过AMS、DAMPE等粒子实验数据分析的绝大部分人员以及设计和维护慧眼、LHAASO、BES、JUNO、LHC和AMS等实验计算平台和数据管理的人员。

	任务内容	参加单位
科学运行和数据分析	离线数据处理框架	山东大学，高能所，中山大学
	载荷模拟	高能所，山东高研院，西南交大
	载荷刻度	高能所，山东高研院，中科大
	数据重建	高能所，山大，山东高研院，紫台
	数据分析工具	山东高研院，高能所，中科大，浙大
	科学数据管理	高能所
	科学数据处理平台	高能所



# HERD重要科学成果规划

- 运行**一年**积累足够的统计量，解决AMS02、悟空等关于能量高达 $10^{10}$  keV电子和 $10^{11}$  keV质子的能谱特征的争议，对暗物质模型做出严格约束。
- 运行**三年**积累足够的统计量，能量超过AMS02、悟空等数倍到数十倍的高能电子和宇宙线成分直接测量，首次实现空间和地面的能谱“对接”。
- 运行**五年**完成第一轮高精度全天观测，通过高能电子各向异性测量检验高能电子起源模型、通过高能伽马弥散辐射和伽马谱线搜寻暗物质和新物理信号。
- **探究宇宙线起源世纪之谜**：通过长达十年的运行，直接测量能量高达PeV的宇宙线成分，确定宇宙线膝的物理性质，理解宇宙高能宇宙线的起源。
- **机遇成果**：作为最大视场的宽能段伽马射线空间天文台，监视各种高能爆发，开展高能中微子和引力波爆发多信使天文学协同研究以及脉冲星计时阵列引力波探测。