HERD量能器研究进展

王志刚， HERD项目组
中国科学院高能物理研究所
2021.08.17

中国物理学会高能物理分会第十三届全国粒子物理学术会议，山东 青岛

中国空间站高能宇宙辐射探测设施HERD

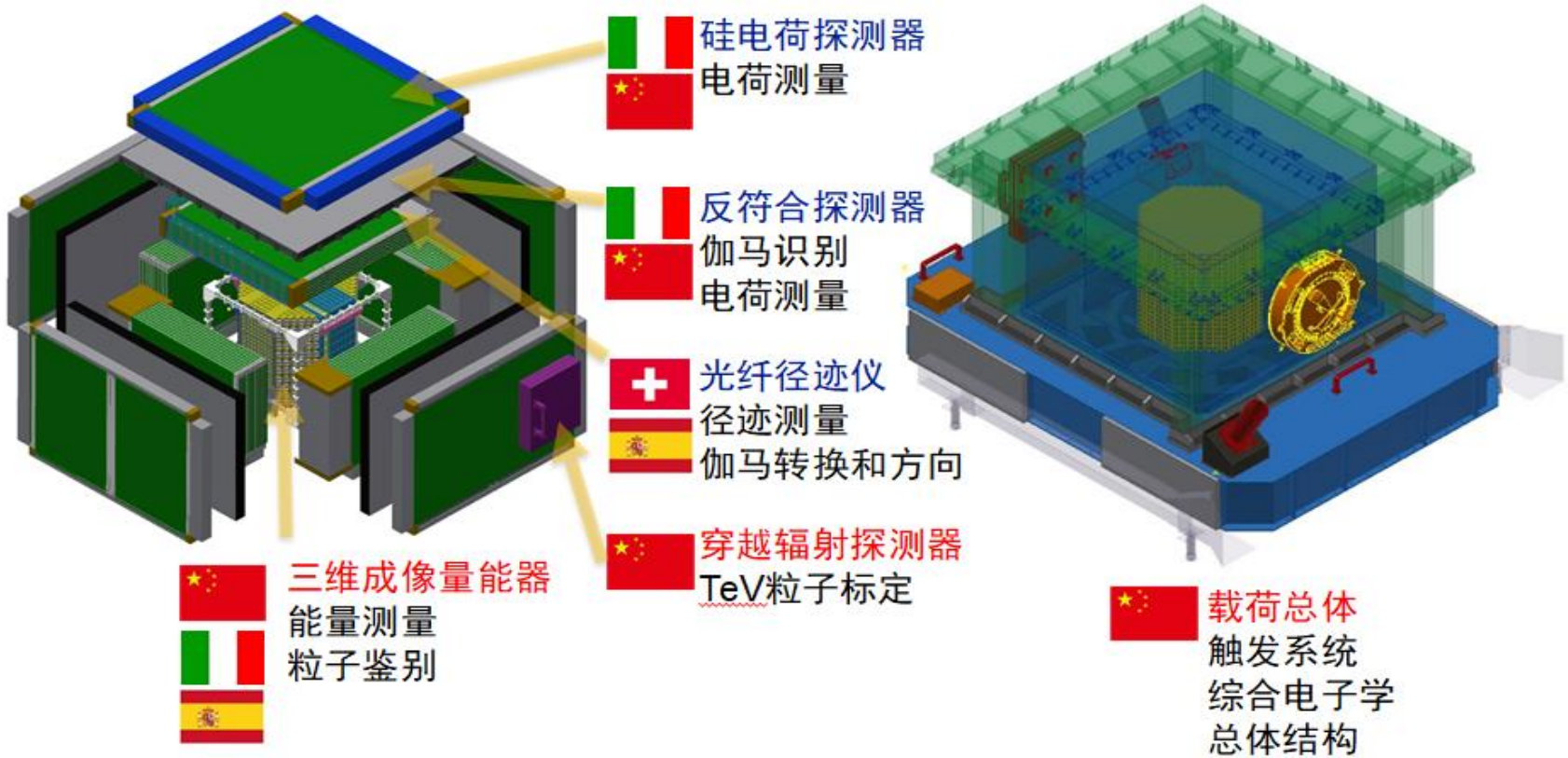
HERD项目是空间天文和粒子天体物理实验，预计在中国空间站上运行10年以上。

HERD采用三维位置分辨、五面灵敏的创新设计，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。

- 核心科学目标
  - **以前所未有的灵敏度搜寻暗物质**，保证中国占领空间暗物质搜寻的制高点，为解决天文和物理的最重大疑难之一暗物质问题做出关键贡献
  - **探究宇宙线起源的世纪之谜**，可望在宇宙线物理上取得革命性的突破
    - 首次直接精确测量“膝”区宇宙线能谱和成分
- 天文台科学目标
  - **以前所未有的大视场开展高能伽马射线巡天和监视**
    - 牵引国际高能天体物理界的重要科学发现，理解宇宙极端条件物理
  - **通过多颗脉冲星同时观测探索脉冲星导航的新体制**
    - 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

载荷实施方案：中欧各贡献~1/2

HERD有效载荷包含五种仪器，从内而外分为三维成像量能器CALO、光纤径迹仪FIT、反符合探测器PSD、硅电荷探测器SCD和穿越辐射探测器TRD。



载荷总重：~4吨；　载荷包络：~3.0*2.3*1.7 m^3；　载荷视场：+/-90°；
载荷功耗：~1800 W；　测控数传：100 Mbps(平均)；　工作寿命：10年以上
总电子学路数：~60万路

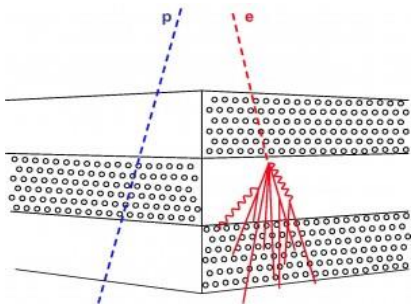
各空间实验主要性能参数对比

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)	e/p鉴别	电子接收度m^2sr	质子接收度m^2sr
美国卫星 FERMI (2008)	1GeV-300GeV	30GeV-10TeV	10%	40%	10^3	0.9	<0.28
ISS-AMS02 (2011)	1GeV-1TeV	1GeV-1.8TeV	2%	-	10^6	0.12	0.12
ISS-CALET (2015)	1GeV-10TeV	50GeV-10TeV	2%	35%	10^5	0.12	--
中国悟空卫星 DAMPE(2015)	5GeV-10TeV	40GeV-100TeV	≤1.5%	25-35%	$3*10^4$	0.3	0.04
中国空间站 HERD(~2027)	10GeV-100TeV 0.5GeV-100TeV (γ)	30GeV-PeV	1%	20%	10^6	>3	>2

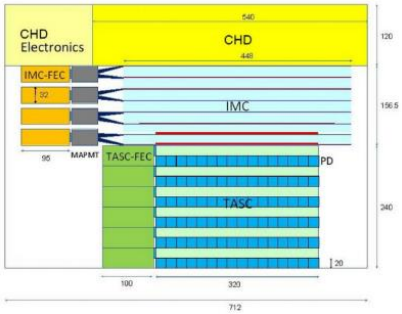
HERD是国际空间站AMS和悟空卫星的后续项目，科学性能有显著提升，重量不到AMS的一半，只比其它实验略重。

中国提出的创新方案-量能器

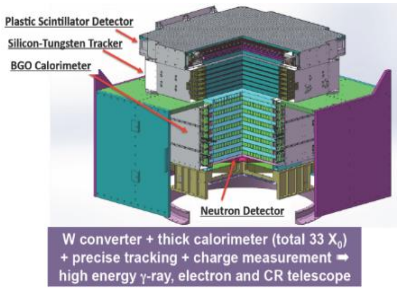
- 中国提出、得到验证并且被国际同行接受的创新方案
  - 三维成像、五面灵敏量能器概念
    - 以较少的资源实现世界领先的接收度；显著提升几何因子，改善粒子鉴别能力，系统误差更小，实测结果更可靠
  - 光纤+增强相机读出：系统简单，便于晶体热控



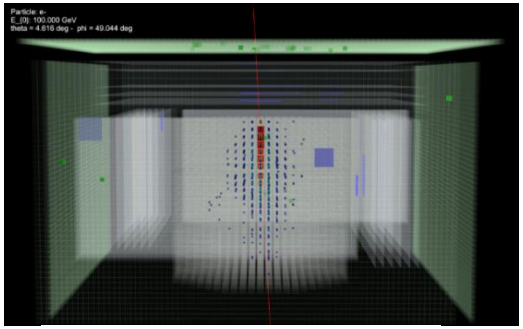
AMS-02



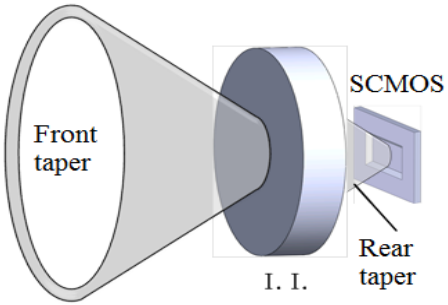
CALET



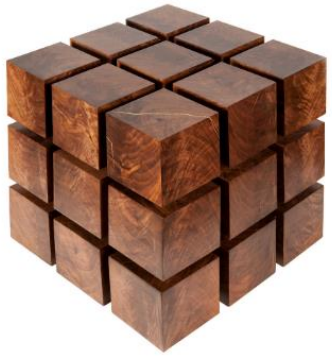
DAMPE



高能粒子簇射

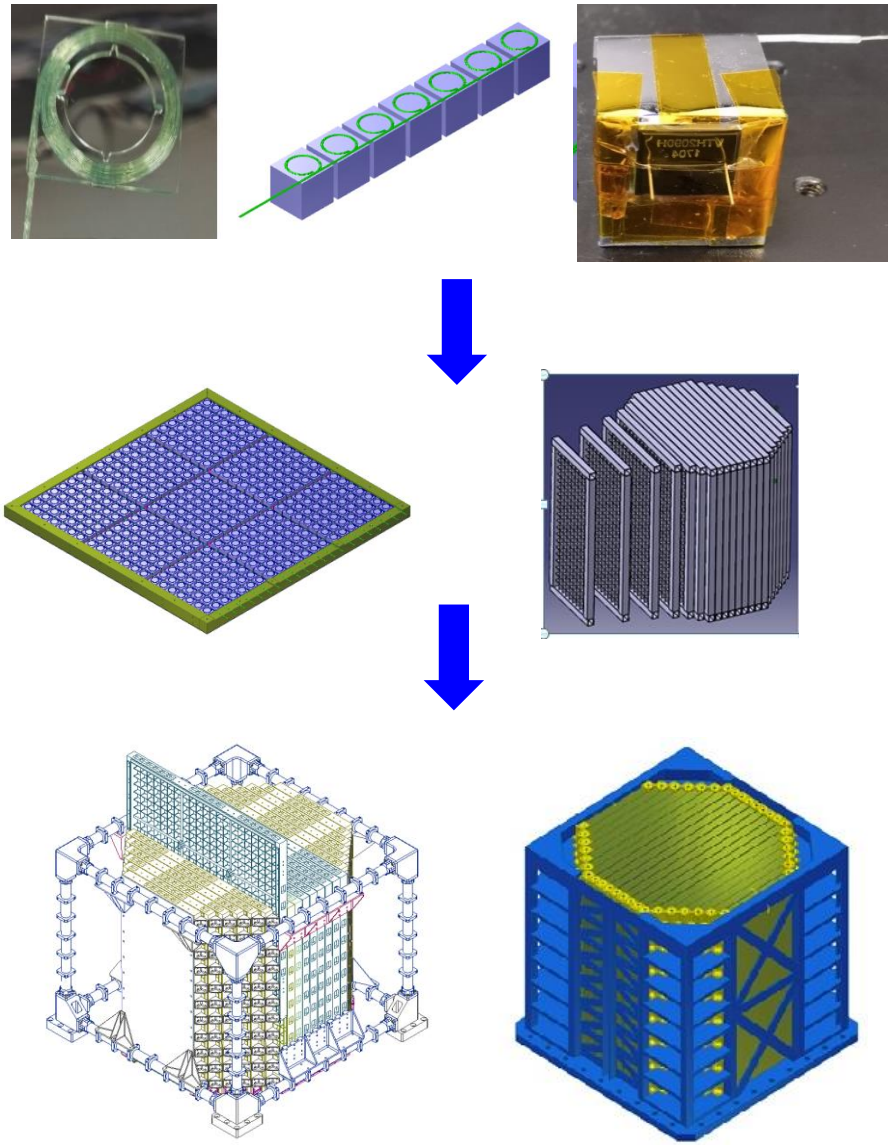


增强相机+相机



HERD

量能器结构

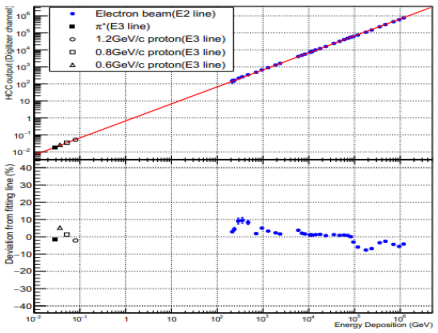


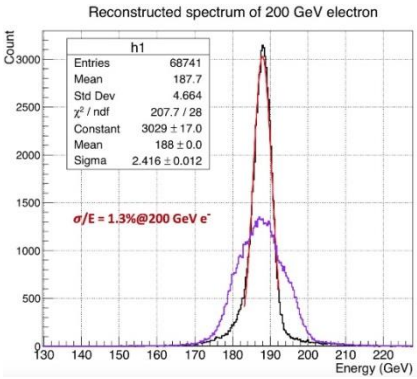
量能器(55个辐射长度，3个核作用长度)：

- LYSO（30mm*30mm*30mm）
- 三维晶体阵列（~7500 LYSO）
- 增强型相机读出系统
- PD读出系统
- 触发系统
- 反向标定系统

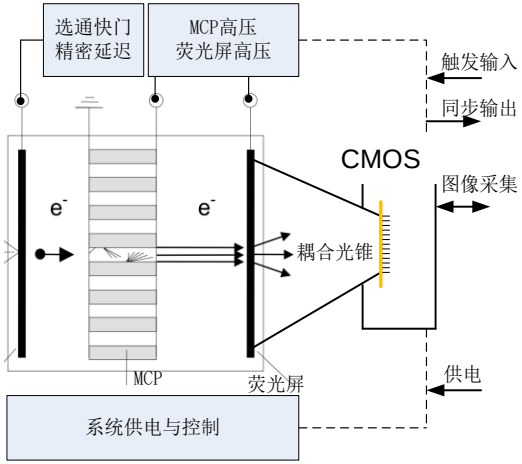
增强型相机读出系统

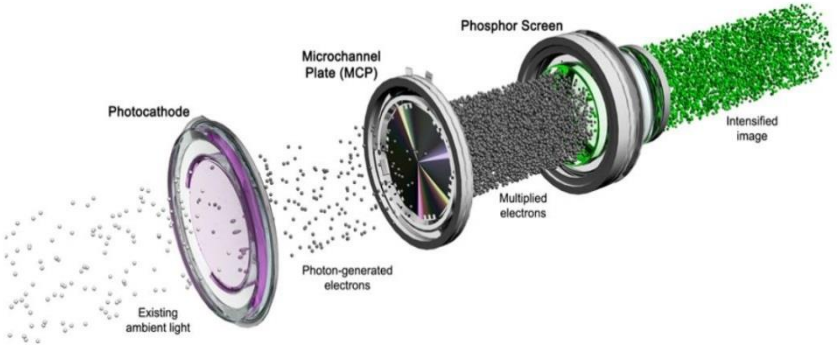
- WLSF+IsCMOS
- 晶体+WLSF线性得到验证
- WLSF+IsCMOS 能量分辨率得到验证

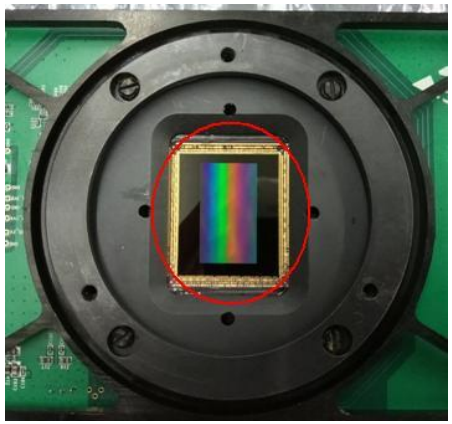


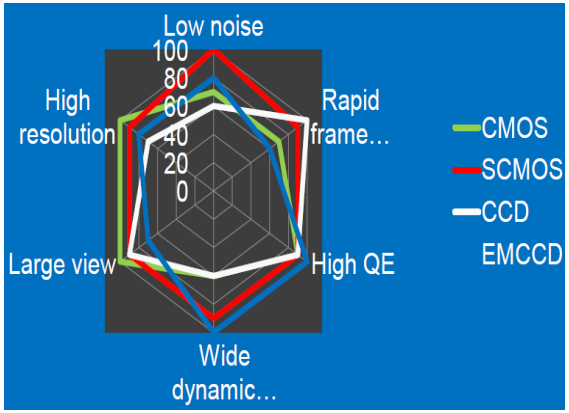


IsCMOS 读出系统









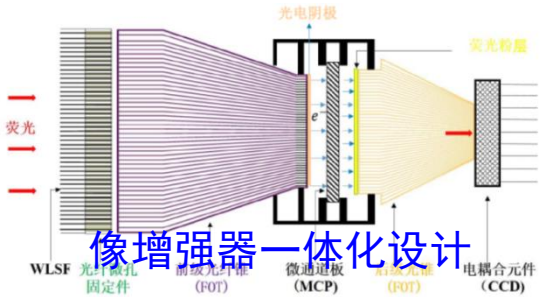
IsCMOS系统用于收集量能器7500块LYSO晶体光纤信号。
为了满足动态范围需求，HERD采用两套IsCMOS系统作为高低量程用于读出。

特种像增强器国产化研制

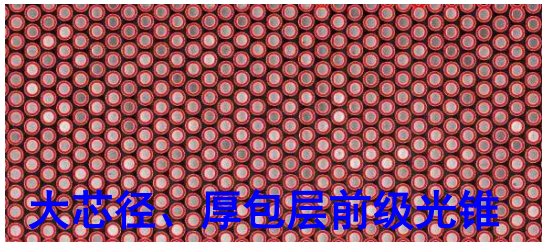
现有科学型像增强器不能满足HERD应用需求，而且存在禁运的可能，国产化势在必行。

国产化研制为各种结构优化提供了可能性

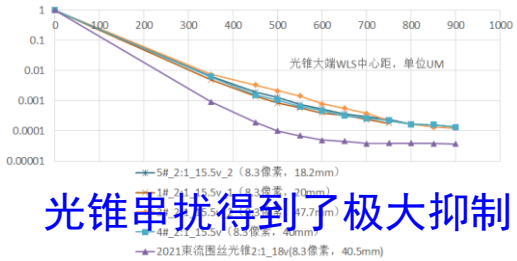
- 前后级光锥、像增强器一体化设计：减少耦合面、提高传输效率
- 大芯径、厚包层前级光锥设计：提高透过率、降低串扰
- 前级光锥、光纤微孔板一体化成型设计：优化光纤排布、减少错位
- 低体电阻、ALD MCP设计：提升动态范围和工作寿命
- 荧光屏选型优化：P24荧光粉有利于改善拖尾、提高触发帧频



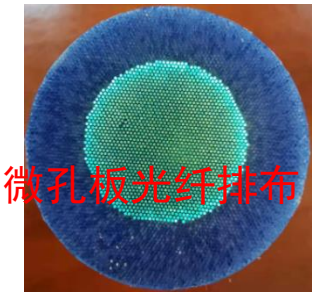
像增强器一体化设计



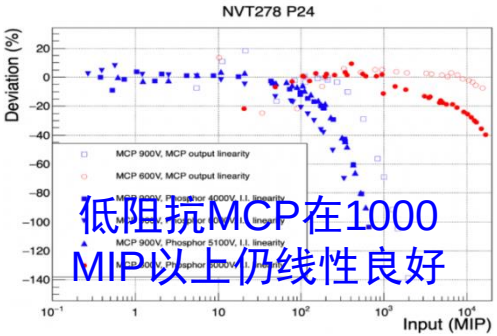
大芯径、厚包层前级光锥



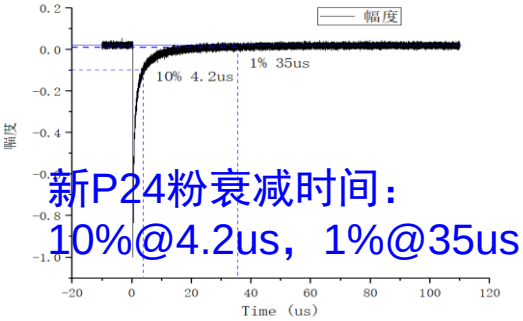
光锥串扰得到了极大抑制



微孔板光纤排布

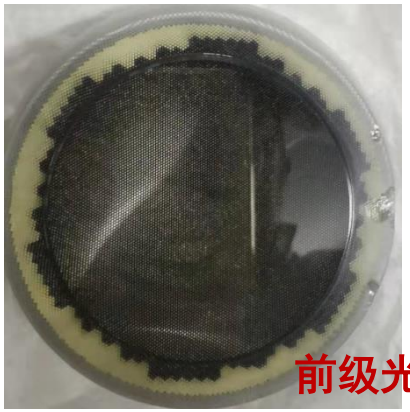
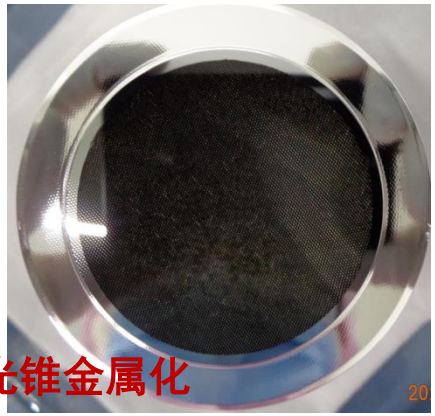


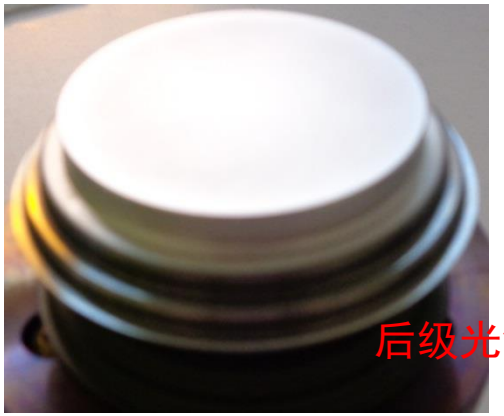
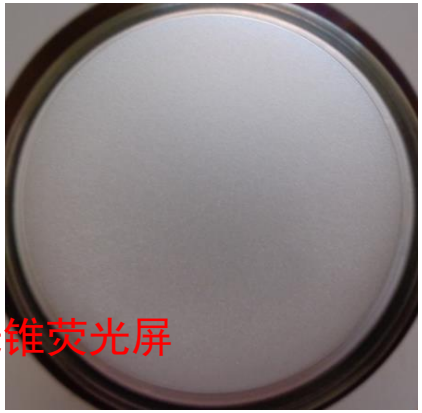
低阻抗MCP在1000 MIP以上仍线性良好

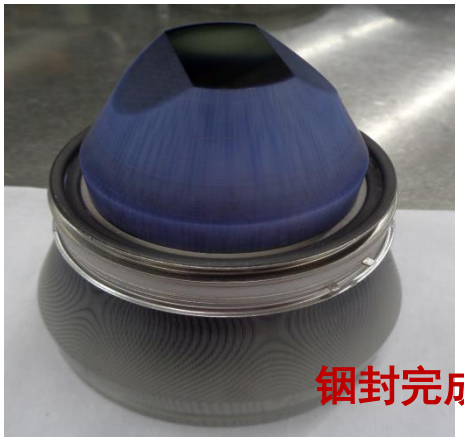
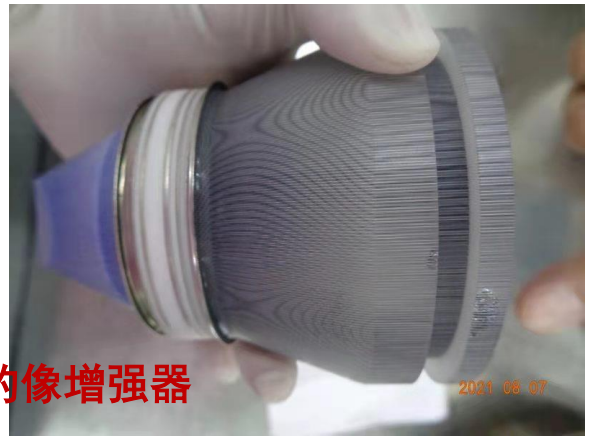


新P24粉衰减时间：10%@4.2us，1%@35us

特种像增强器国产化研制-第一只样管

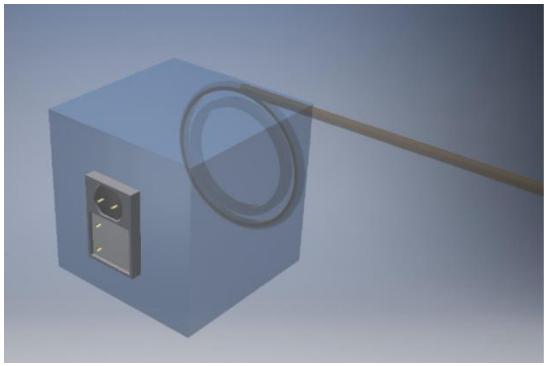


前级光锥金属化

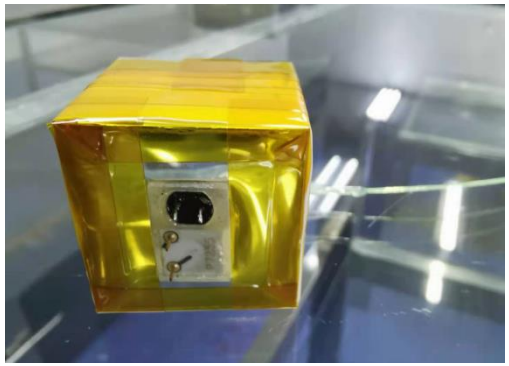


后级光锥荧光屏

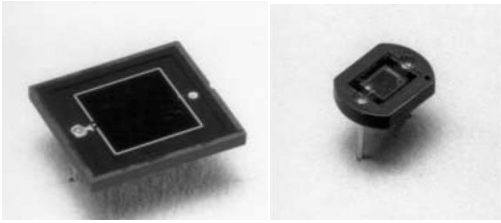


铟封完成的像增强器

- 组织国内光锥、像增强器优势厂家，进行了技术攻关
- 顺利完成了关键部件加工以及器件研制，成功获得了国产化第一只样管。
- 即将开始性能测试。

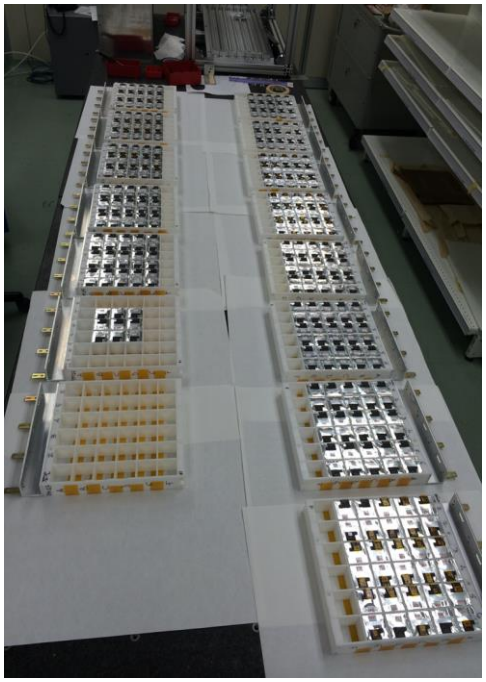
量能器PD读出系统

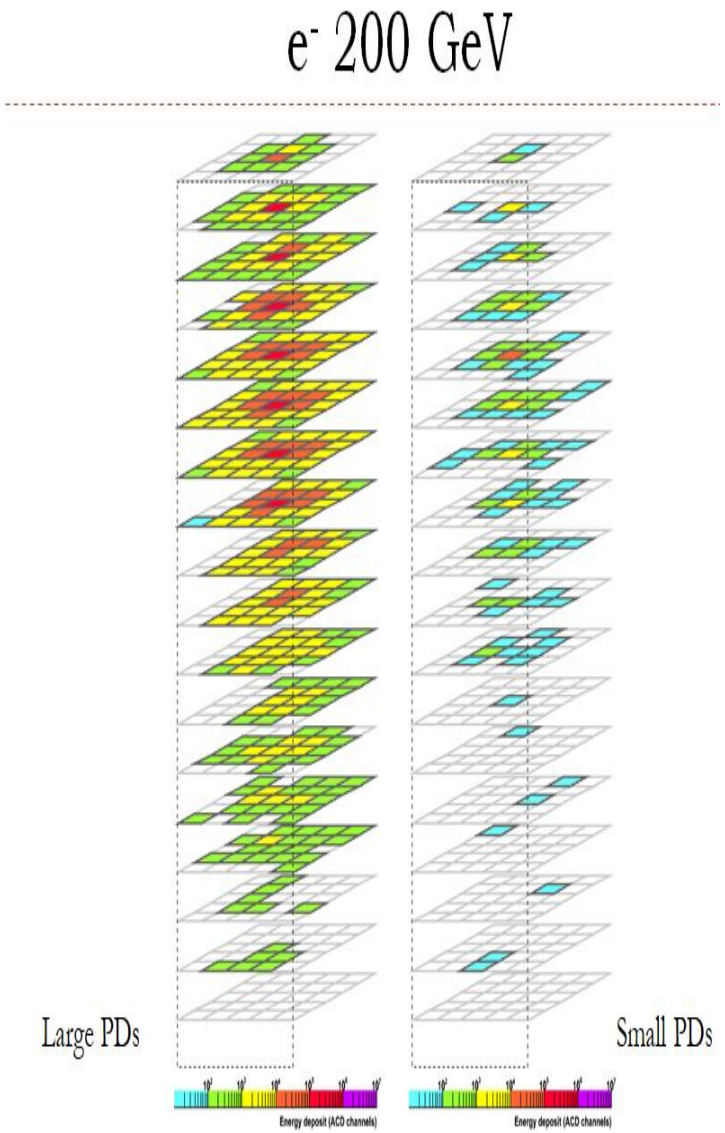






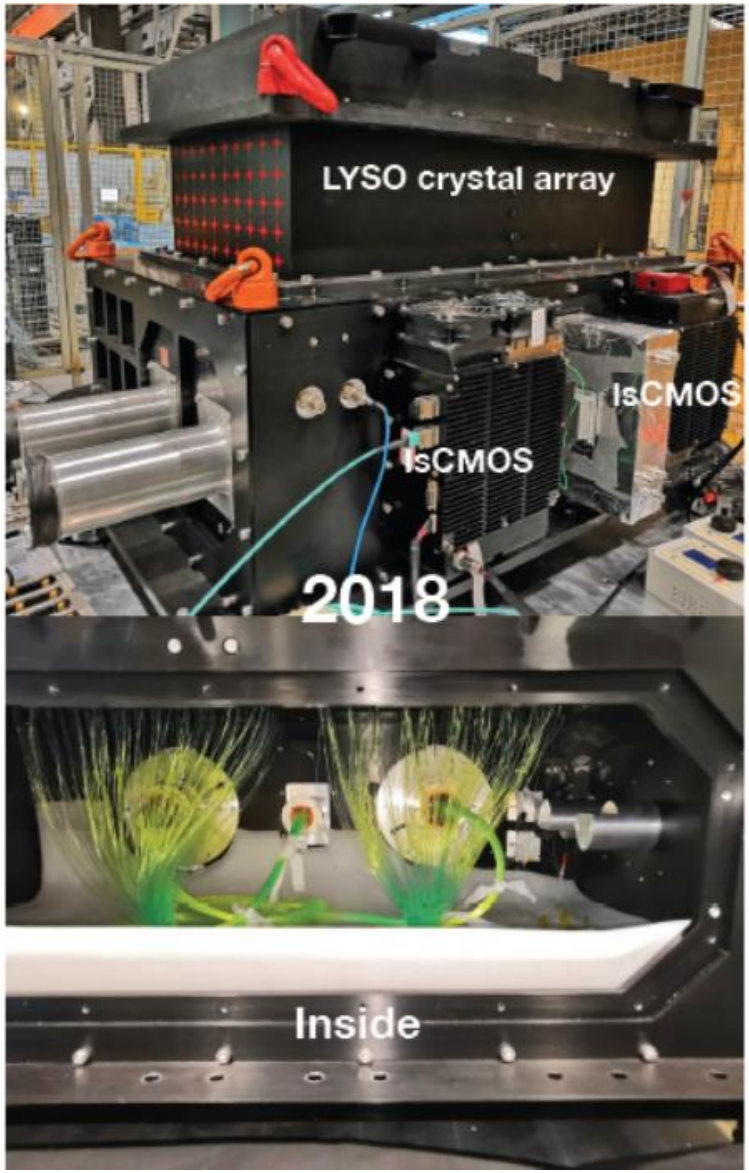
	VTH2090	VTP9412H
Active area (mm^2)	84.6	1.6
Sp.response range/peak (nm)	400÷1100 / 960	400÷1150 / 925
C_J(pF)	70 @30V	6 @15V





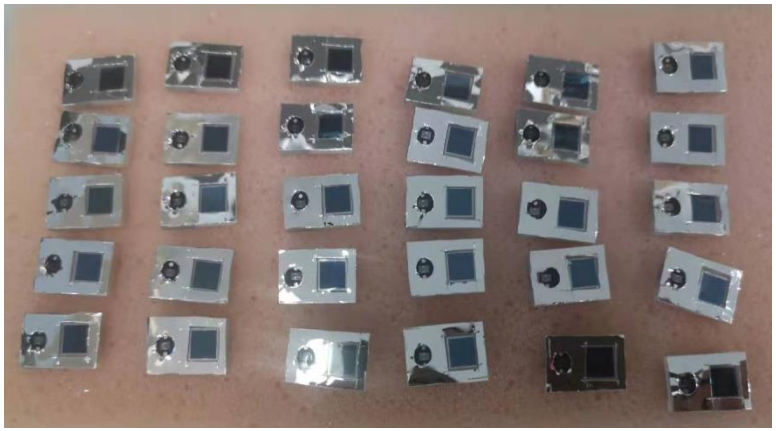
PD 读出系统由欧方人员主导，与光纤＋IsCMOS 组成量能器双读出系统

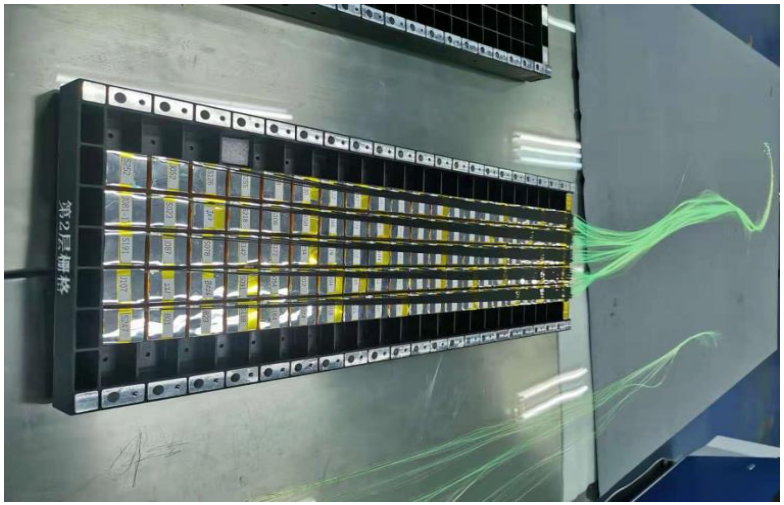
原理样机研制进展-2015/2017/2018



光纤＋增强相机读出系统

原理样机研制进展-2021

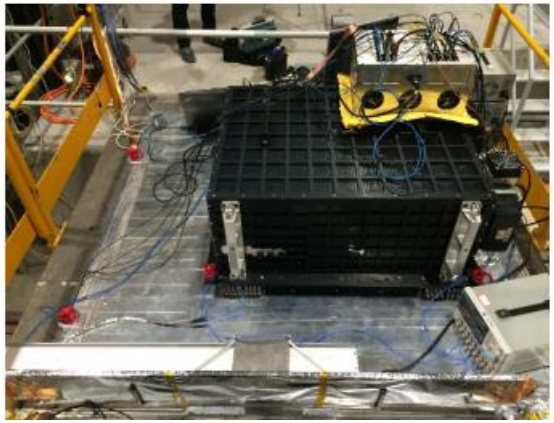




首次实现量能器双读出系统原理样机建造

原理样机研束流实验结果

	2015年	2017年	2018年	2021年(预期)
量能器规模	5*5*10	5*5*10	5*5*20	5*5*21
MIP信号幅度	120 p.e	>100 p.e.	>150 p.e.	>200 p.e.
电子能量分辨率 @200 GeV	4.3%	1.3%	2.0%	1.0%
质子能量分辨率 @350 GeV	48%	43.6%	20%	20%
e/p 鉴别	$1e^3$	$1e^4$	$3e^5$	$1e^6$
读出帧频	300 fps	300 fps	500 fps	800 fps



International collaboration (180+ colleagues)

CMS

CSU
CENTER FOR SPACE UTILIZATION · CAS

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

NAOC

NVT

CNBM

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

GSSI

UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES

EPFL

Ciemat
Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

IFAE
Institut de Física d'Altes Energies

ICCUB
Institut de Ciències del Cosmos

upf.