

Large Array of imaging atmospheric Cherenkov Telescope

大型超高能伽马源立体跟踪装置 (LACT) 项目进展

报告人：王玉东 (张寿山)
(LACT合作组)



2024.8.15 青岛

报告内容

Contents

- 1 科学背景
- 2 总体设计和技术
- 3 方案和进展
- 4 总结

科学意义：世纪之谜——高能宇宙线起源

➤ 宇宙线是来自外太空的高能带电粒子

□ 氢、氦、锂、... 铁等原子核

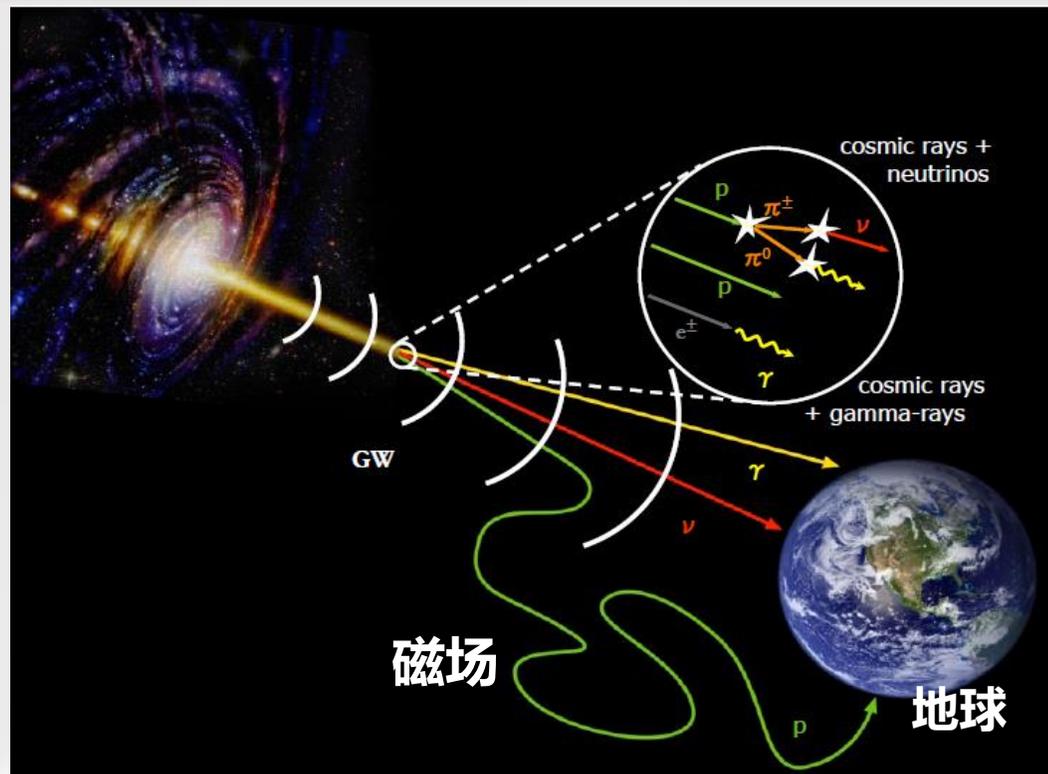
➤ 最高能量超过 10^{20} 电子伏特

□ 是人造加速器（LHC）粒子能量的一千万倍

➤ 高能宇宙线的起源仍未确定：

□ 《Science》发布的125个**重大科学问题之一**

➤ 破解途径：伽马天文学、中微子天文学、
极高能粒子天文学



国内外宇宙线实验

高能伽马射线实验

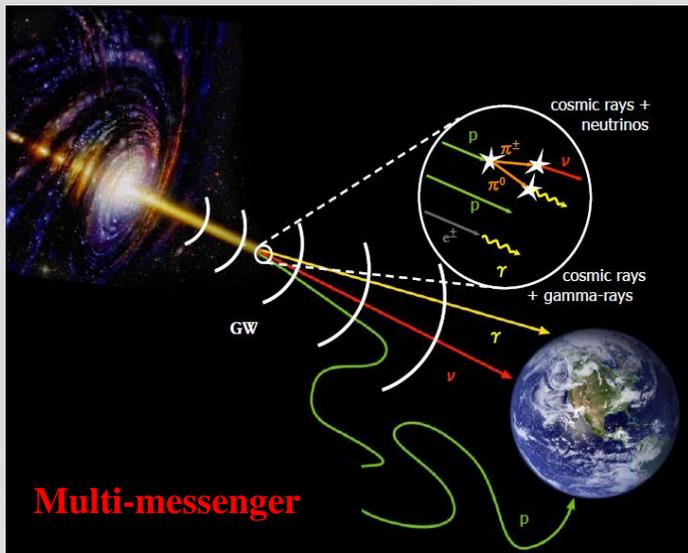
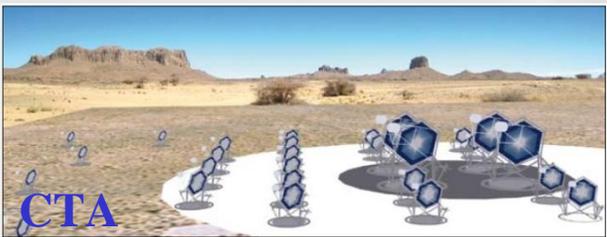
地面簇射阵列实验

LHAASO



成像大气切伦科夫望远镜

HESS、MAGIC、
VERITAS、CTA ...



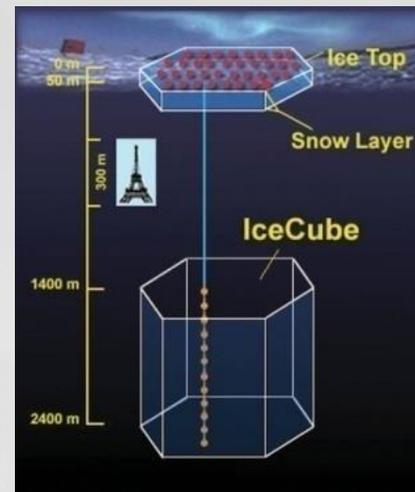
**Origin of CRs
A century-old
mystery**

伽马天文学是最活跃、产生成果最多的领域

近期有望取得重大突破性成果

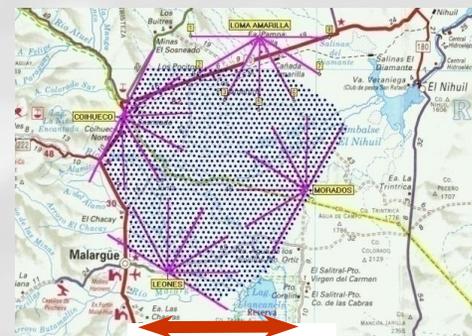
高能中微子实验

IceCube



极高能宇宙线实验

AUGER



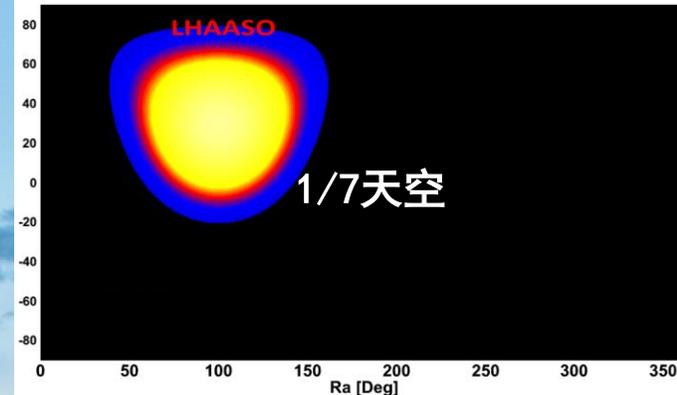
50km

高海拔宇宙线观测站 (LHAASO)

地点：四川甘孜州稻城海子山

海拔：4410 m

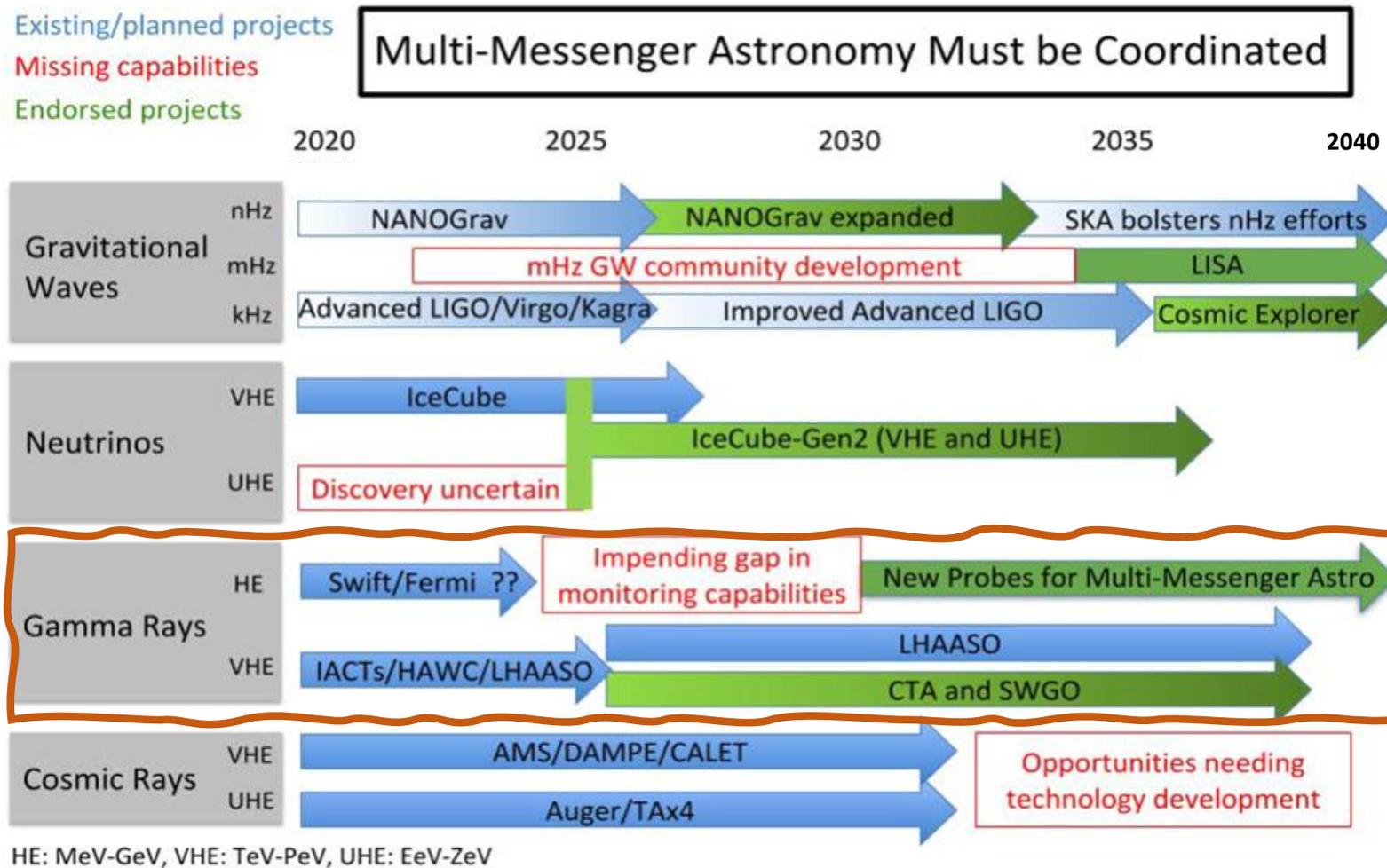
全阵列运行时间：2021年7月



国际上正在运行的**最强**
伽马源全天普查观测设备
大视场(100°)
高灵敏度

国际宇宙线未来大科学装置规划

2021年美国发布了天文和天体物理十年规划 (Astro2020)



□ LHAASO 被列为伽马射线和宇宙线研究领域的国际领先的实验装置，成为该规划中未来追赶的目标。

前沿学科领域：超高能伽马天文学现状



揭示迄今最亮伽马暴的秘密 《Science》
Science 380, 1390 (2023)

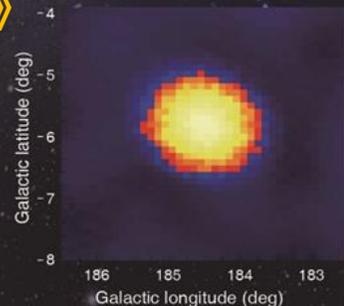
我国自主研制的大科学装置
被美国天文十年规划评价为
国际领先的伽马天文观测装置

高海拔宇宙线观测站 (LHAASO)
Nature Astron. 5, 8, 849 (2021)



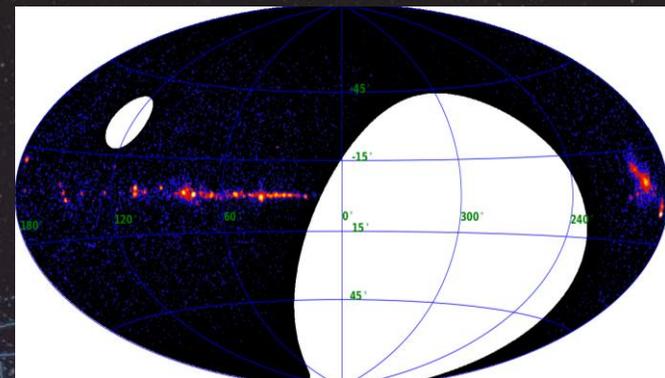
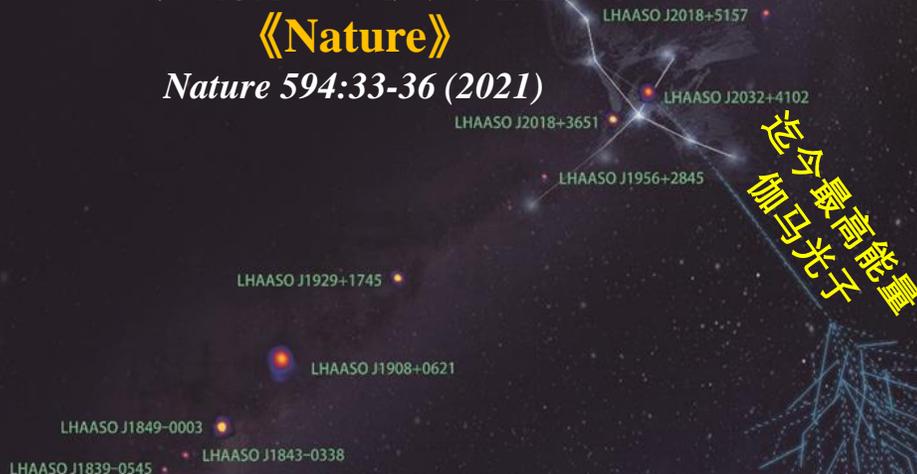
蟹状星云 《Science》

Science 373, 425 (2021)



银河拍电子伏加速器
《Nature》

Nature 594:33-36 (2021)



APJS, 271:25 (26pp), 2024

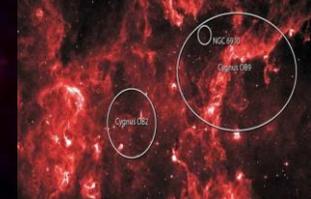
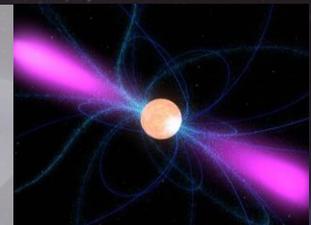
➤ LHAASO打开了“超高能伽马天文学”窗口

□ 发现43个超高能伽马射线源

➤ 全新的非热宇宙探索热潮：新现象爆发式出现

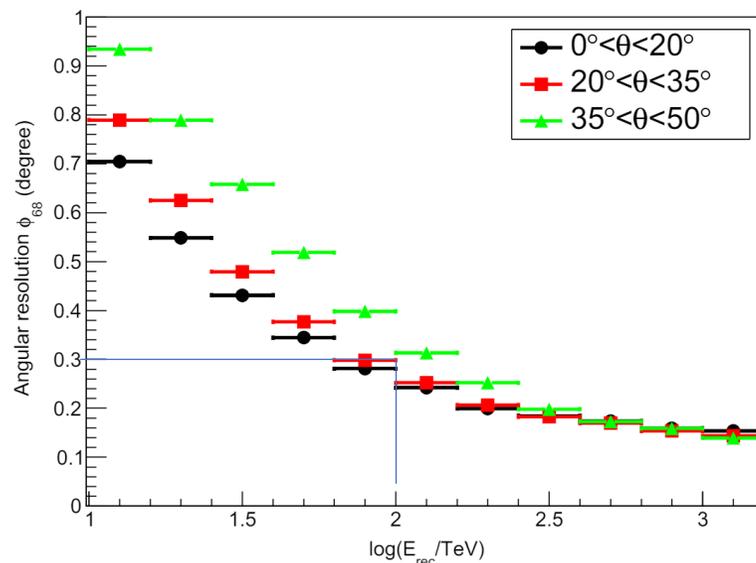
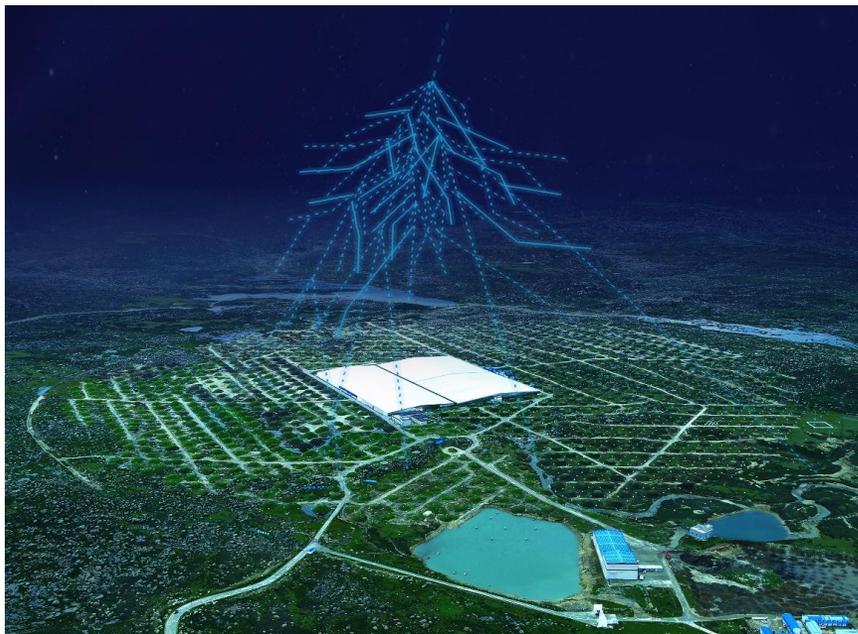
□ 几乎涵盖所有的高能天体：

超新星遗迹、脉冲星、脉冲星风云、大质量星团
伽马射线双星、星暴星系、活动星系核、伽马暴

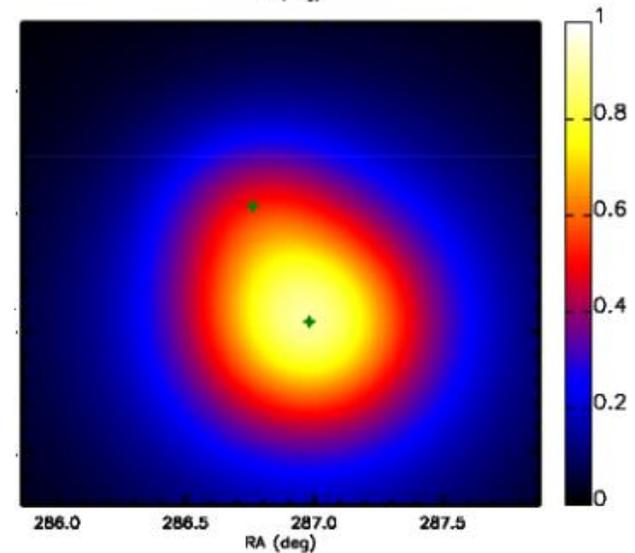
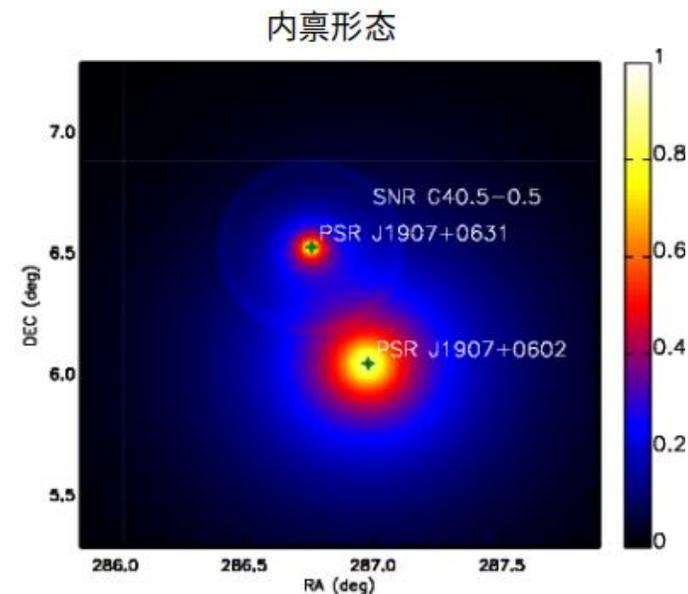


LHAASO阵列角分辨率现状

LHAASO全天普查观测设备，虽具有大视场、高灵敏度优势；但它的角分辨率受限，100TeV的角分辨率在 0.3° 左右，不足以区分临近源或者源的内部精细结构。

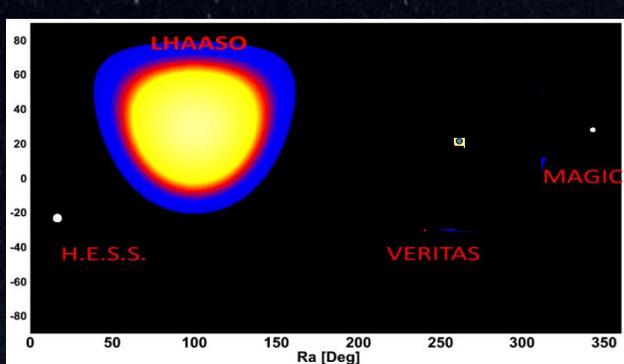


LHAASO-KM2A角分辨率



LHAASO 预期测量

成像大气切伦科夫望远镜



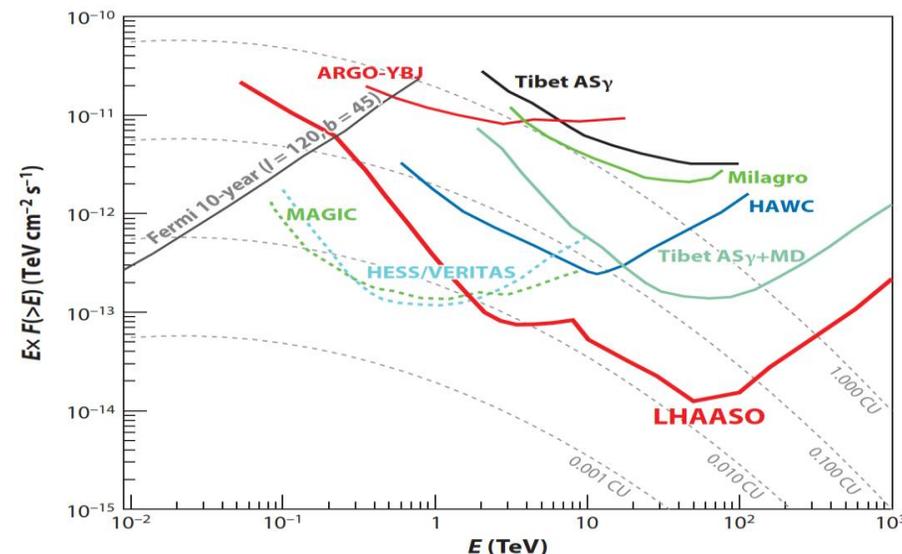
国际上正在运行的
伽马源跟踪观测设备
窄视场 ($<10^\circ$)
高角分辨

300 m \varnothing "light pool", 10^5 m^2



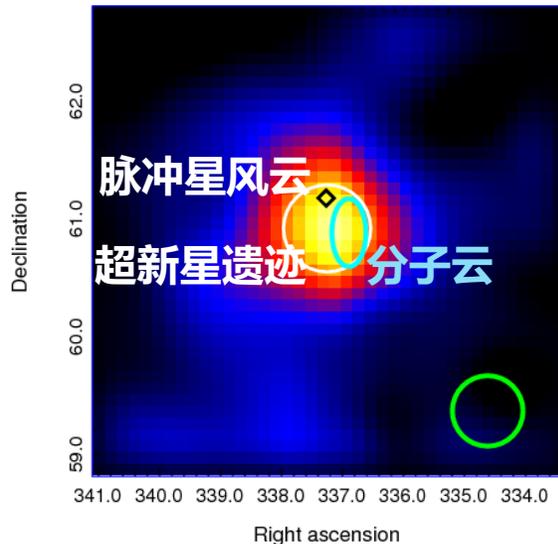
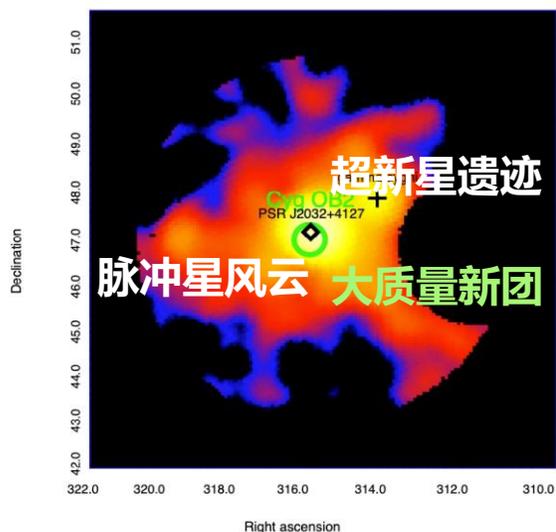
国际上**没有**同时具备高角分辨、高灵敏度的观测设备

- 全天普查观测设备LHAASO:
 - 有足够的灵敏度发现超高能伽马源
 - 但角分辨 ($\sim 0.3^\circ$) 制约其精确测量源的内部精细结构
- 已有的伽马源跟踪观测设备:
 - 角分辨 ($\sim 0.05^\circ$)
 - 但灵敏度不足以观测到超高能伽马源

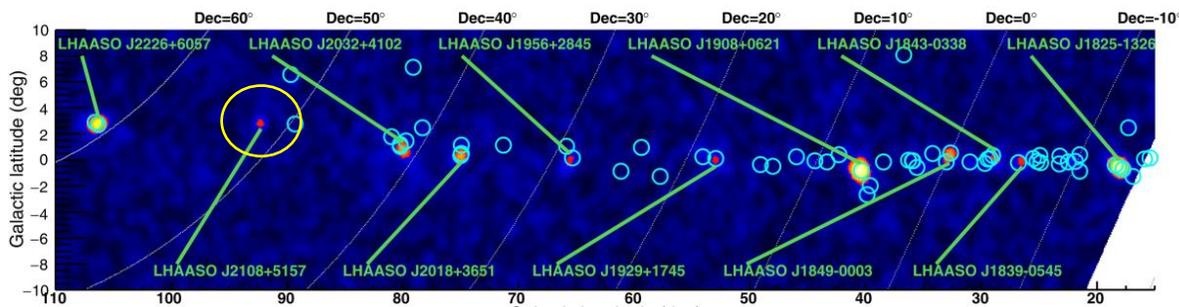


天鹅座宇宙线候选源天体

G106宇宙线候选源天体



CTA-LST、VERITAS、MAGIC 等跟踪观测设备均得到负结果：**灵敏度不足!**



LHAASO, Nature, 594, 33-36, 2021

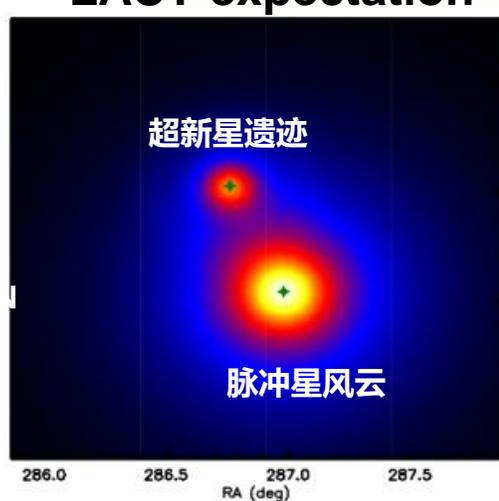
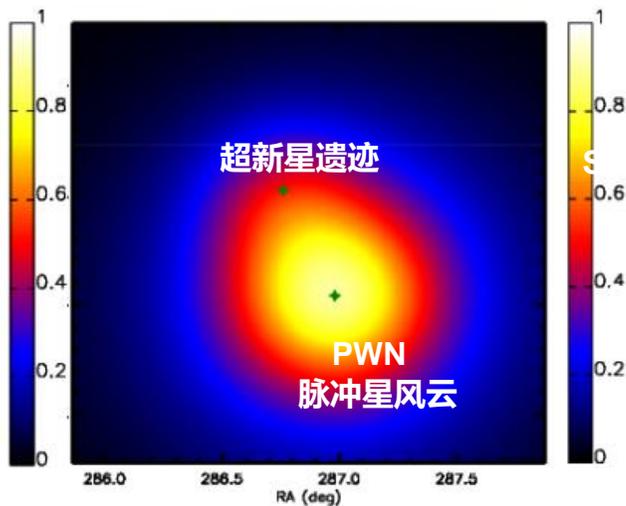
提出高角分辨、高灵敏度LACT计划

- LHAASO发现的超高能伽马源**大部分**都有结构 (LHAASO, Nature, 594, 33-36, 2021)
- 需要**高角分辨、高灵敏度**的超高能伽马射线源跟踪观测设备
 - **定位**超高能伽马射线**辐射位置**，**确定**超高能伽马射线**起源天体**
 - **测量**源天体的内部结构及其**光谱精细特征**
 - **破解**拍电子伏宇宙线起源---世纪之谜

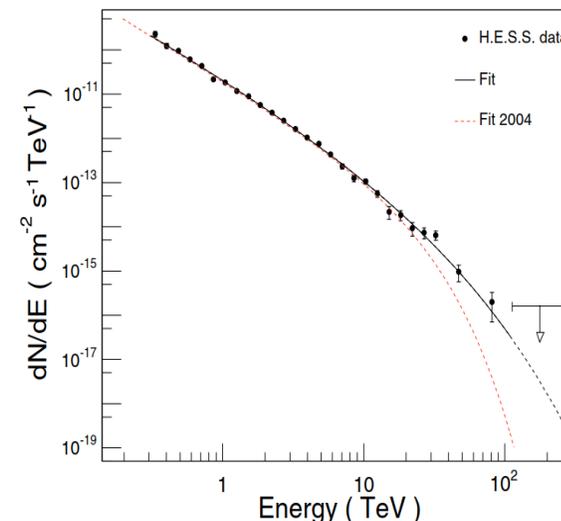
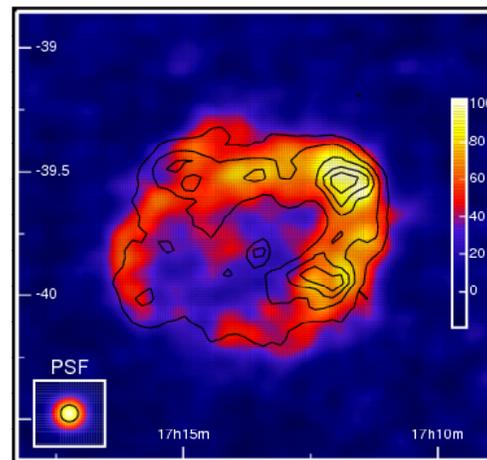
宇宙线候选源天体 (J1908)

LHAASO measurement

LACT expectation



HESS, Aharonian et al., 2006 (astro-ph/0611813)
天体源内部细致结构
天体源的光谱特征

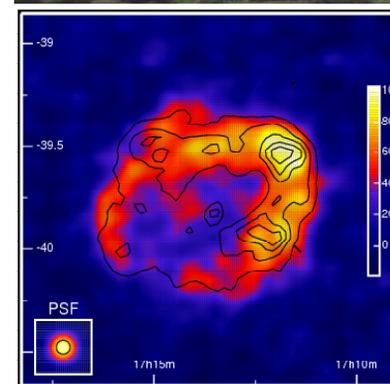




总体设计和技术

设计思想和总体结构

- LACT: 32台望远镜组成的空间立体成像观测装置
- **至少4台望远镜组成立体观测：实现高角分辨**
- **实现和LHAASO相当的灵敏度@100TeV**



Aharonian et al., 2006
(astro-ph/0611813)

灵敏度所及： < 0.07 PeV

三大
关键
技术

空间立体成像测量技术

同步跟踪观测技术

月夜观测技术

有效观测面积最大

有效观测时间成倍增长

伽马天体源
高分辨率成像

超高能伽马射线
最高探测灵敏度

关键技术-1: 伽马射线空间立体成像测量技术

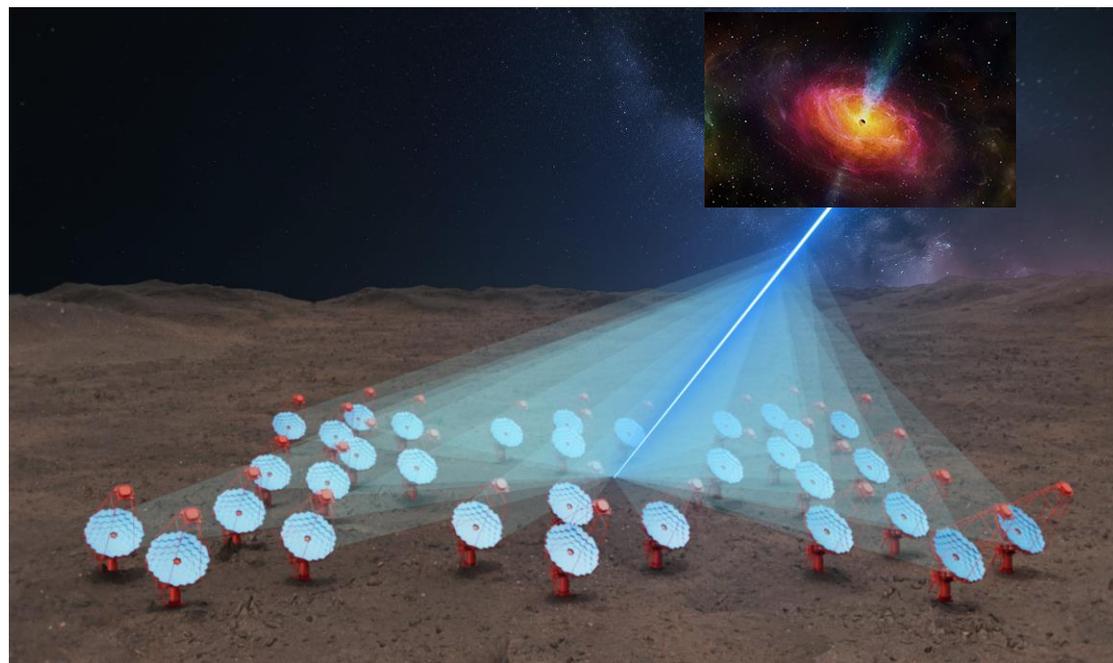
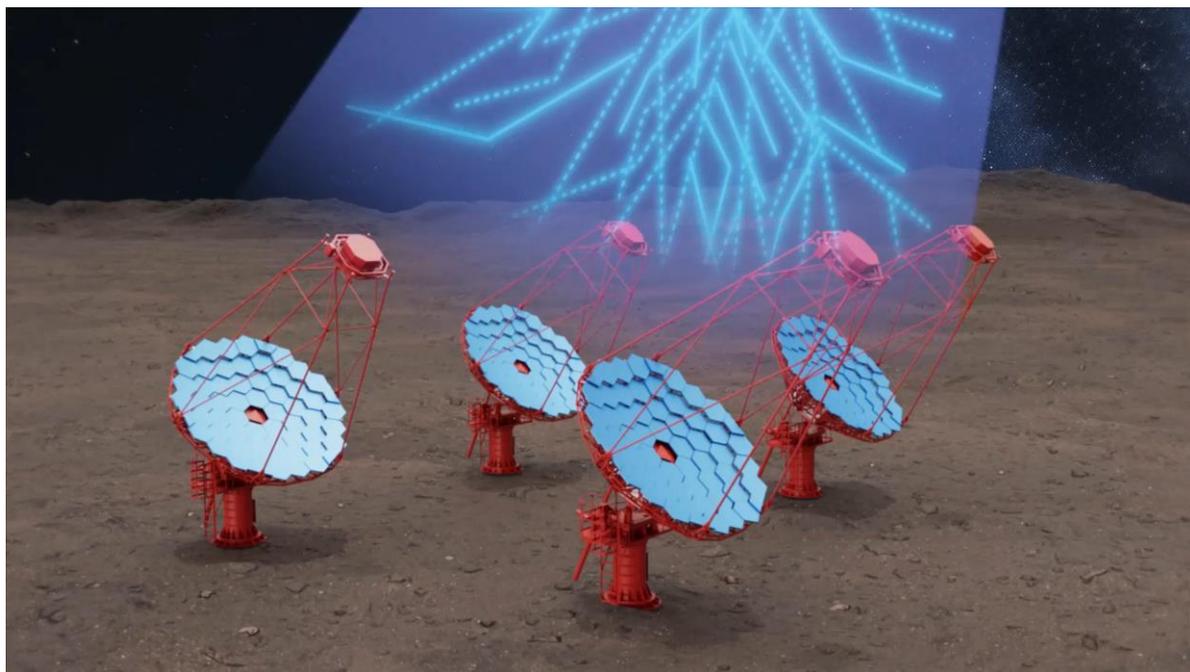
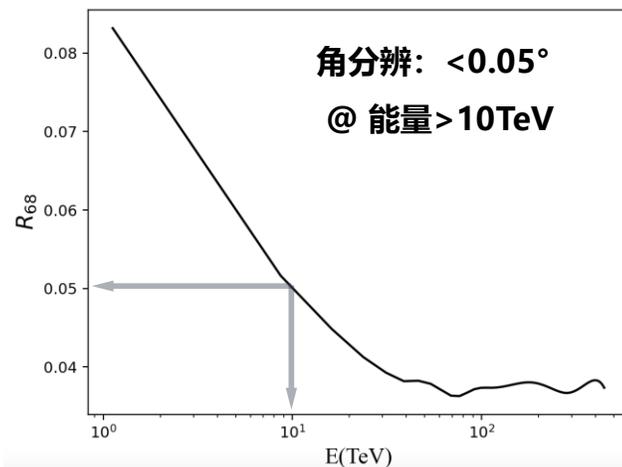
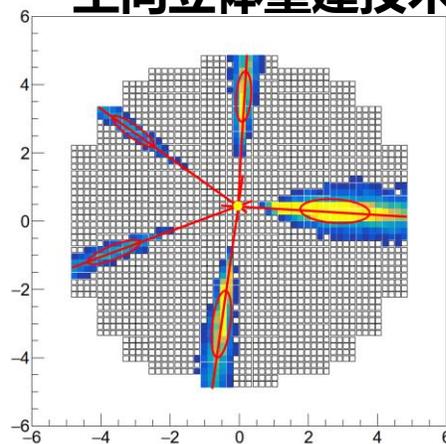
空间立体成像测量系统

每个伽马光子事例至少被4台望远镜同时测量

空间立体重建技术

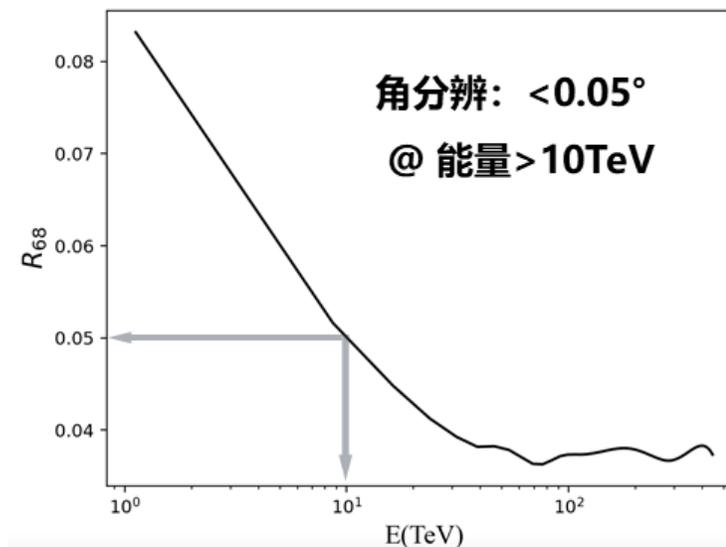
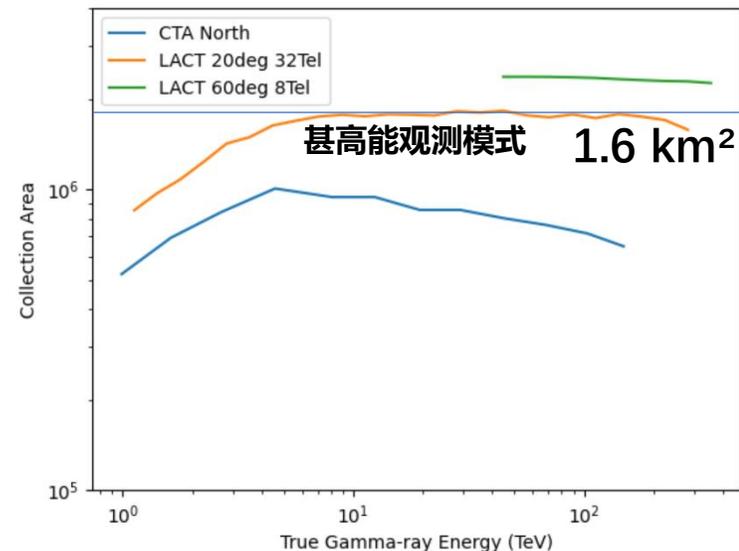
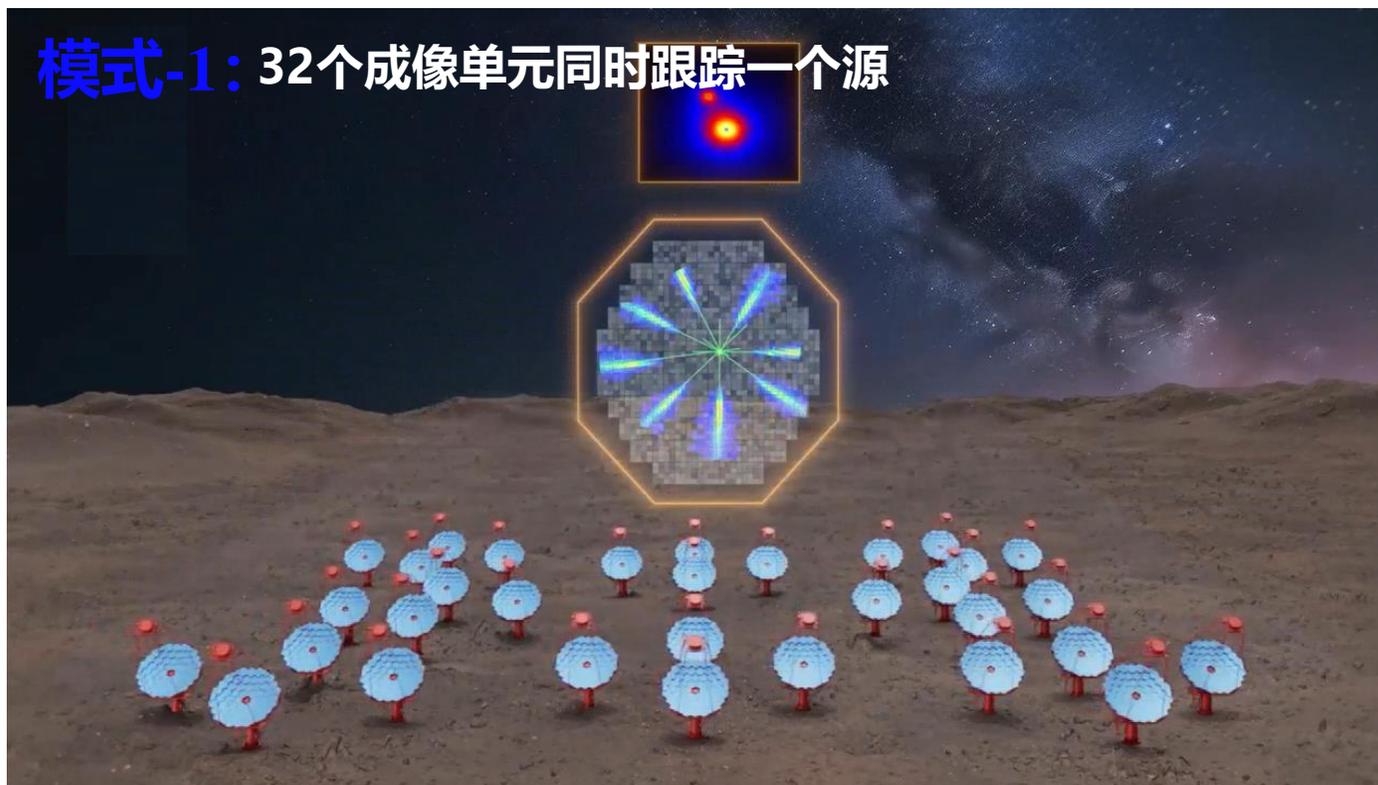
角分辨达到 $<0.05^\circ$ @ 能量 >10 TeV
(国际先进水平)

空间立体重建技术



关键技术-2: 32台望远镜同步跟踪观测技术 (1)

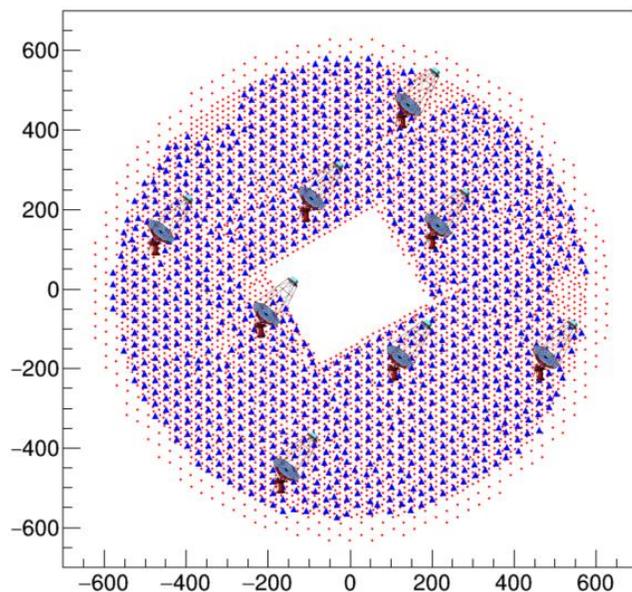
- 观测模式1: 甚高能观测模式 (小天顶角: $\theta < 45^\circ$)
- 32台望远镜同时跟踪一个源
 - 能量: 1 TeV – 50 TeV
 - 角分辨: $< 0.05^\circ$ @ $E > 10$ TeV



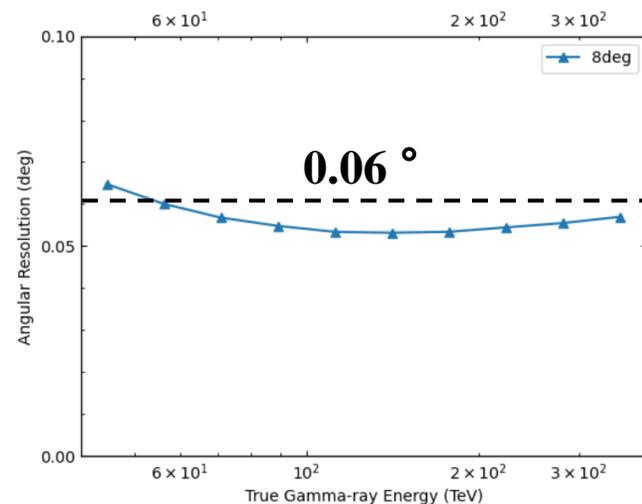
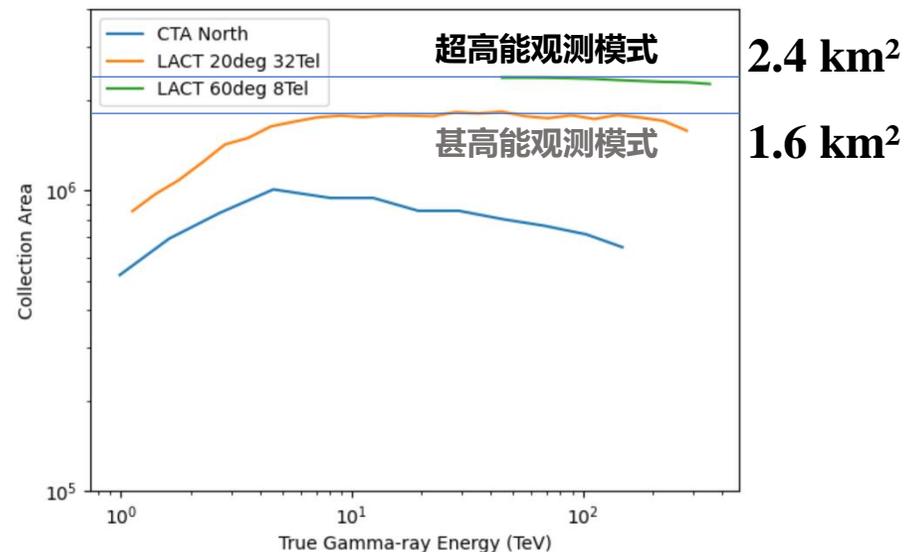
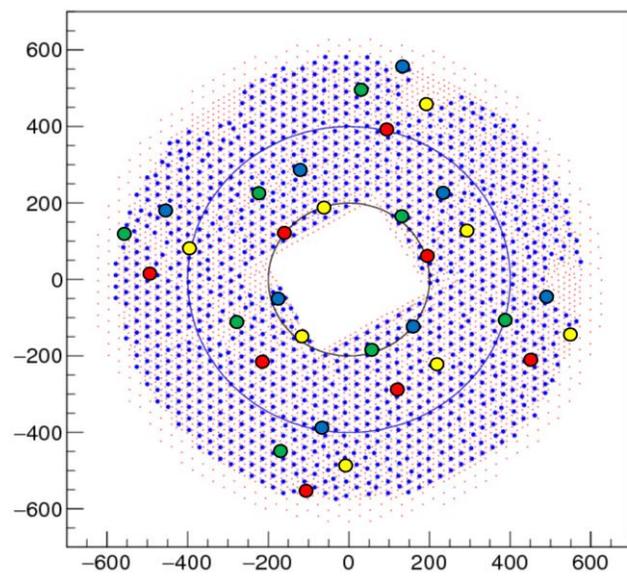
关键技术-2: 32个成像单元同步跟踪观测技术 (2)

- 观测模式2: 超高能观测模式 (大天顶角: $\theta > 45^\circ$)
- 8台望远镜同时跟踪一个源
 - 能量: 50 TeV – 1 PeV
 - 角分辨: $< 0.06^\circ$ @ $E > 50$ TeV
 - 32台分成4组, 同时跟踪观测4个源

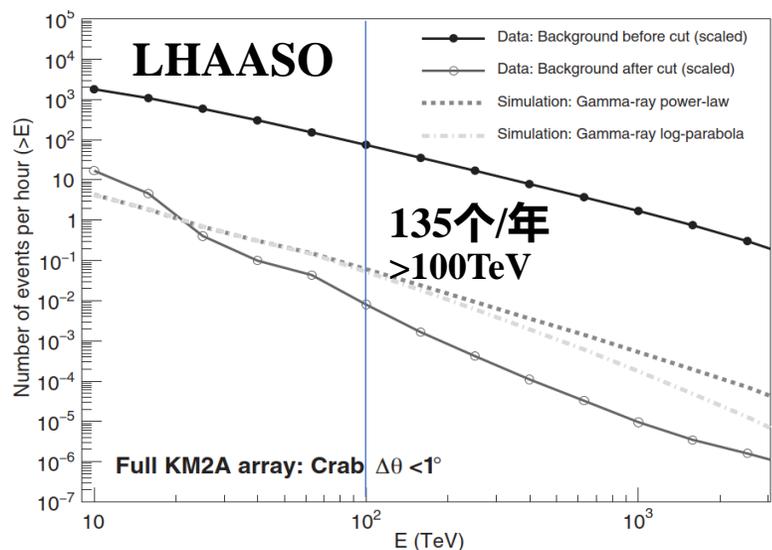
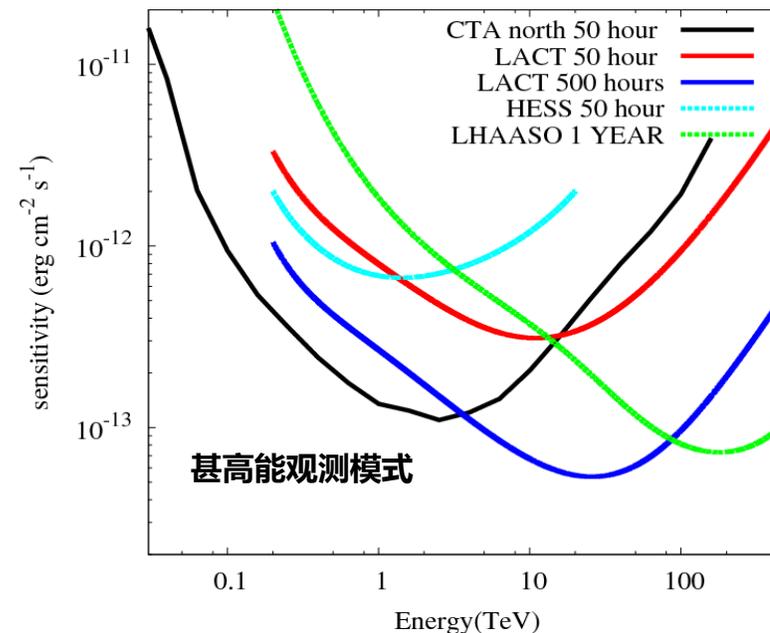
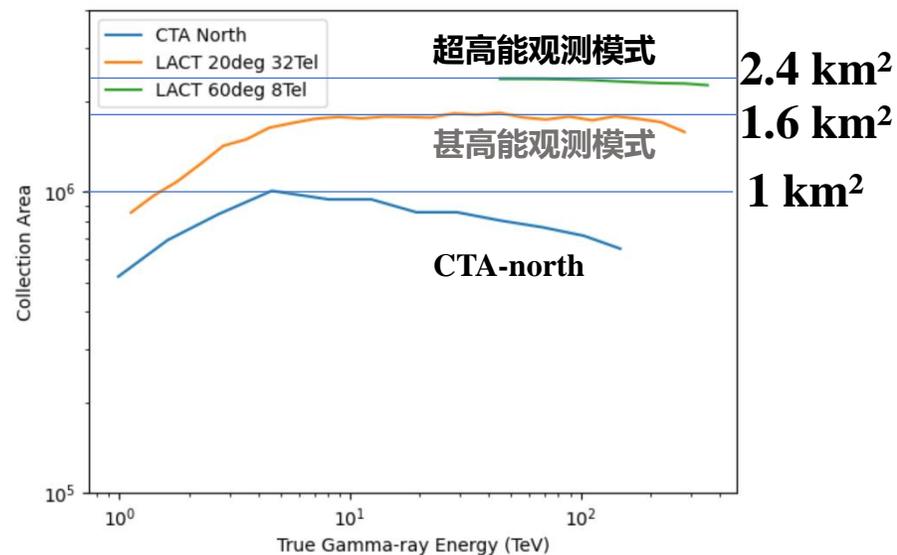
8 台望远镜



32 台望远镜



关键技术-2: 32个成像单元同步跟踪观测技术 (3)



➤ LACT超高能伽马光子估计: 来自Crab的超高能伽马光子 (>100TeV)

- 甚高能观测模式: 25个/年
- 超高能观测模式 (32台分4组观测):

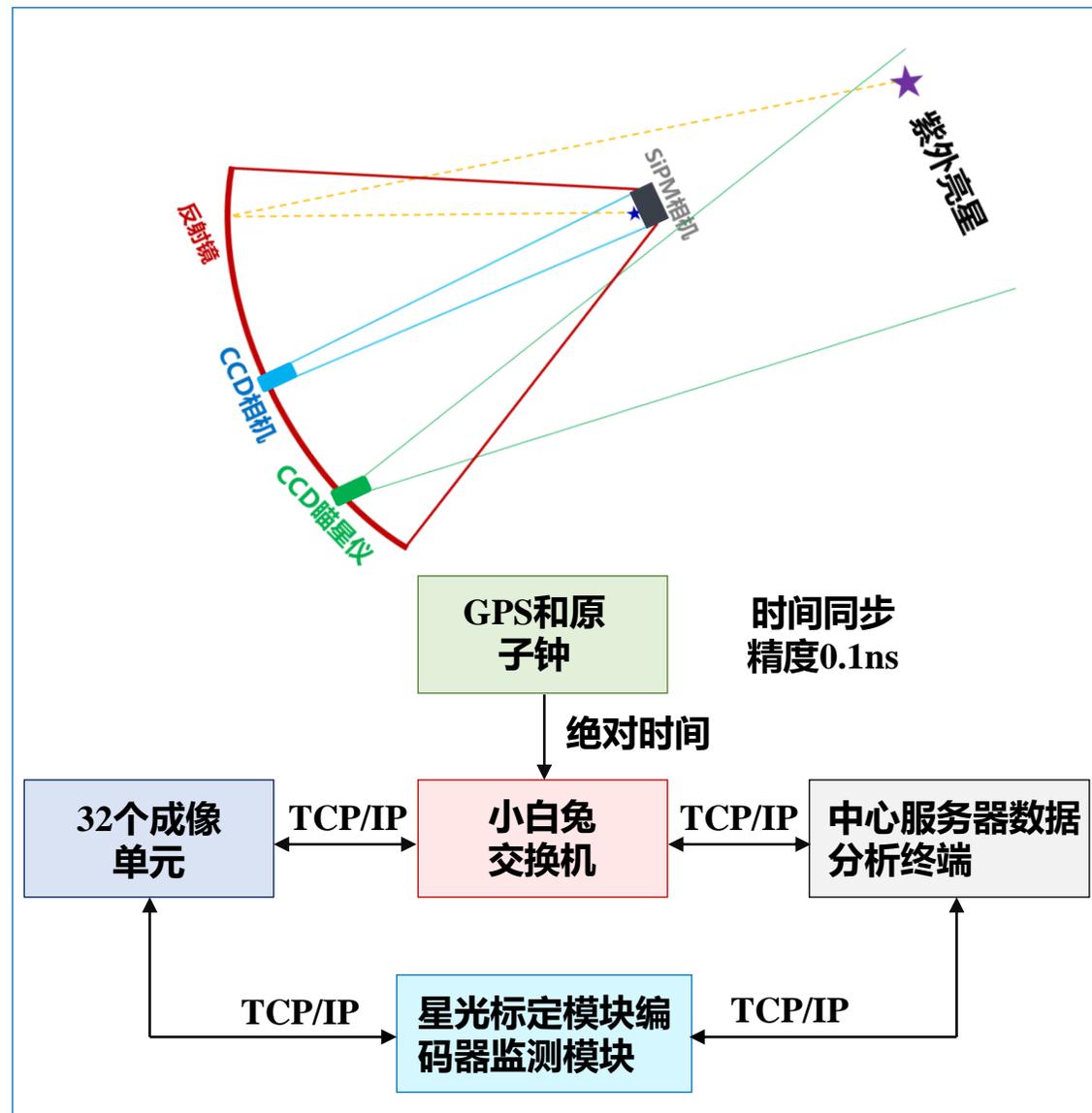
37个/年/组 × 4组 = 148个/年, 和LHAASO相当

关键技术-2: 32个成像单元同步跟踪观测技术 (4)

同步跟踪观测技术路线和指标

技术诀窍:

- 指令响应同步: 同步转动时间 < 0.1 s
- 指向绝对标定: 望远镜指向精度 < 36 角秒 (0.01°)
- 指向高精度实时监测: 监测精度 < 10 角秒 (0.003°)

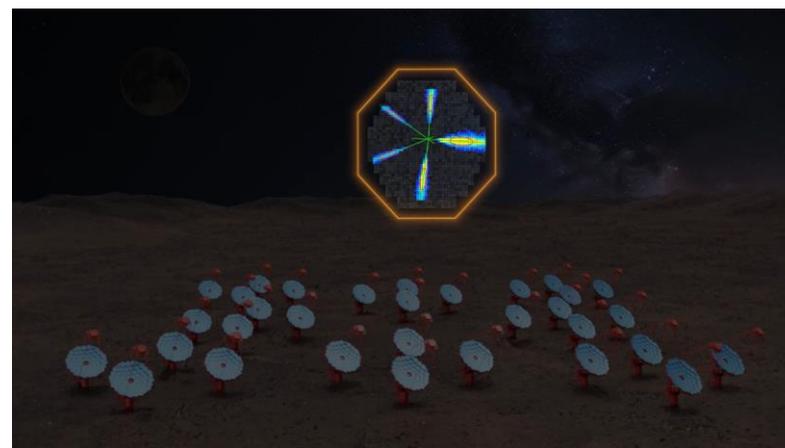


关键技术-3：月夜观测技术——观测时间增加2倍

➤ 技术路线

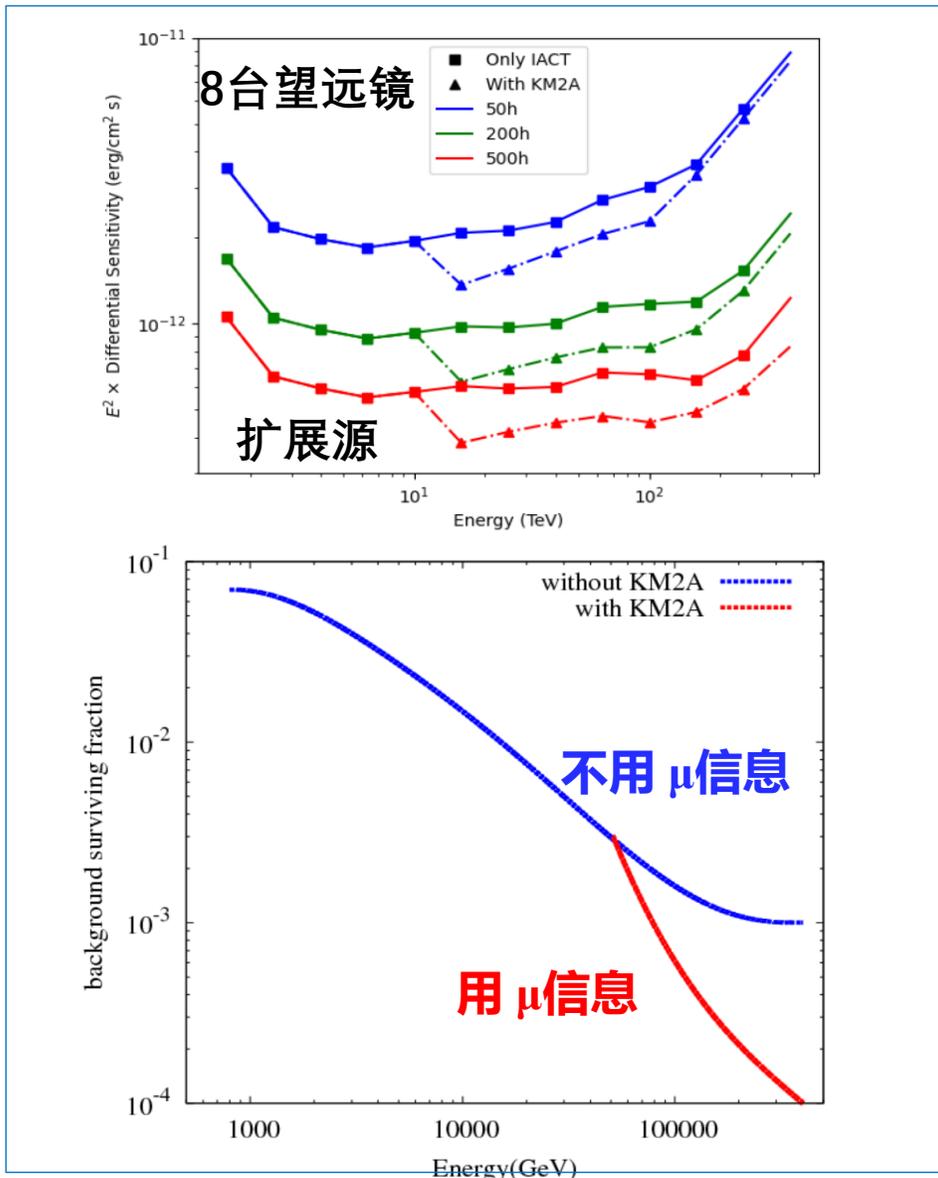
- 采用耐强光的先进硅光电管 (SiPM)
 - 遇强光照射不老化
 - 满月下可正常观测
- 采用夜空背景光压低技术，提高信噪比
 - 紫外带通滤波片：过滤长波段夜空背景光或月光
 - 缩小积分窗口：窄脉冲输出
- 采用高速专用集成芯片 (ASIC)
- 实现高集成低功耗读出电子学系统

参数	指标要求
SiPM相机总像素	1616
像素大小	$\sim 0.2^\circ$
视场范围	$\sim 8^\circ$
SiPM 输出脉宽	FWHM < 30 ns
动态范围	3.2量级
电荷测量分辨率	< 5% @ > 1000 P.E.

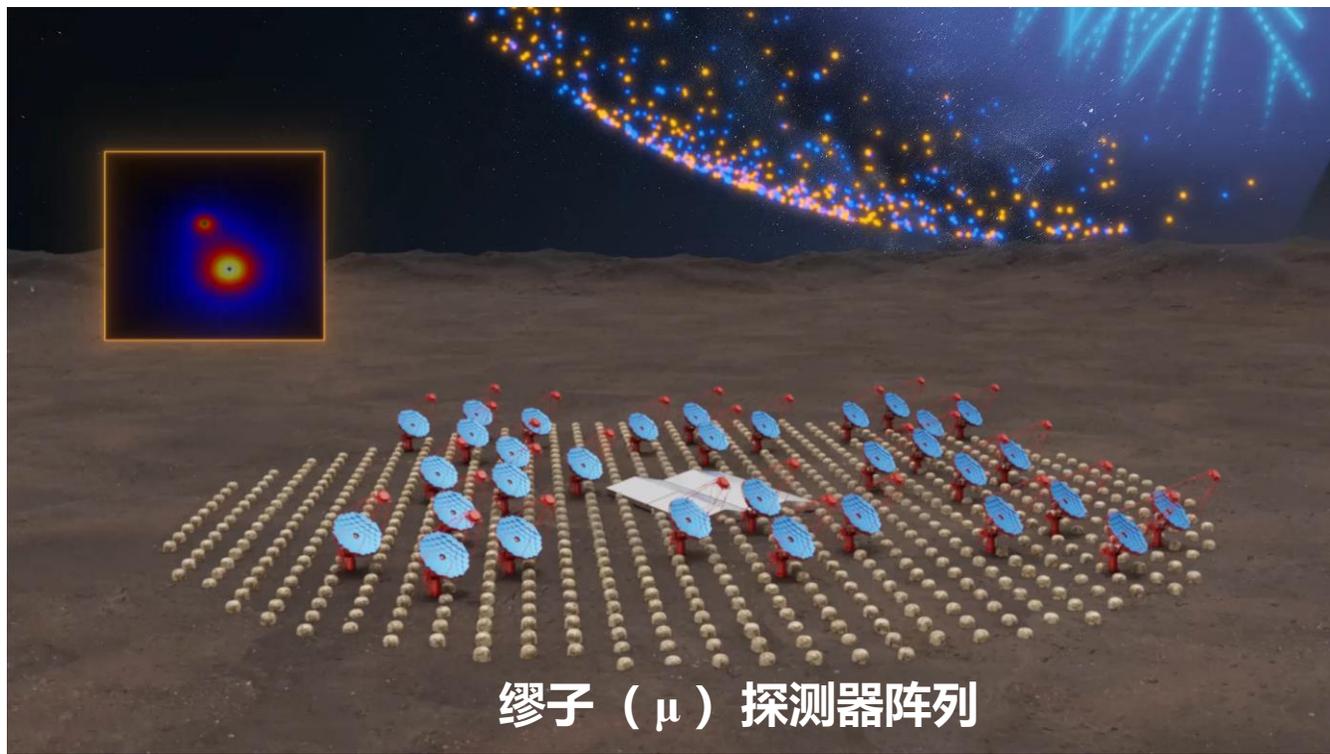


自研高速专用集成芯片
样片评估板
(1GSPS, 10-bit, 16通道)

LACT站址：LHAASO站点，现成的缪子测量信息



- LHAASO缪子 (μ) 探测器阵列
- 世界上面积最大的缪子探测器阵列
- 具有**国际领先**的超强抗背景噪声能力

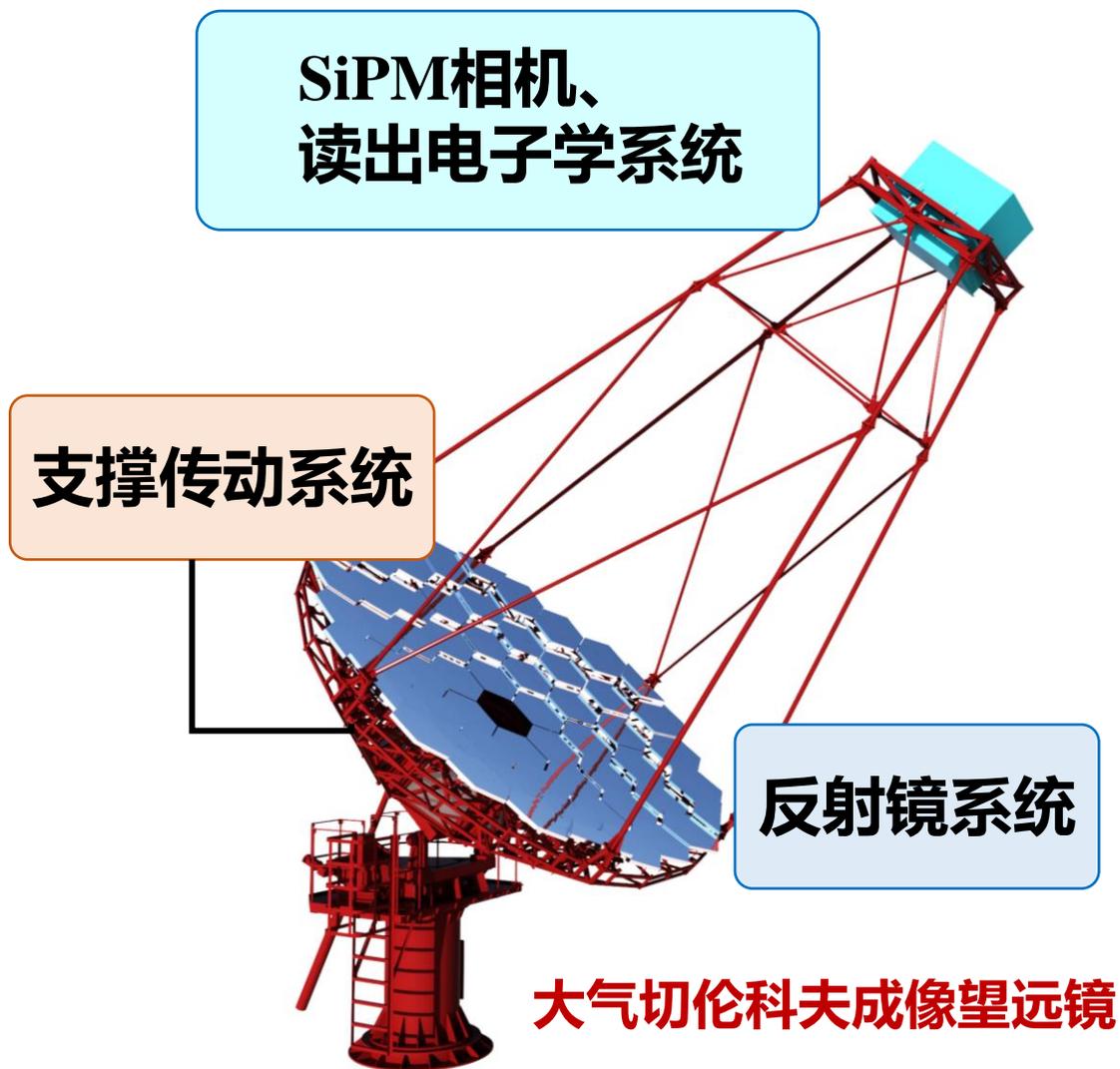


项目方案和进展

LACT-望远镜：成像大气切伦科夫望远镜

➤ 成像大气切伦科夫望远镜主要部分

- Davies-Cotton 反射镜系统
- 支撑传动系统
- 硅光电倍增管 (SiPM) 相机
- 读出电子学系统
- 慢控制与数据获取系统
- 望远镜标定系统



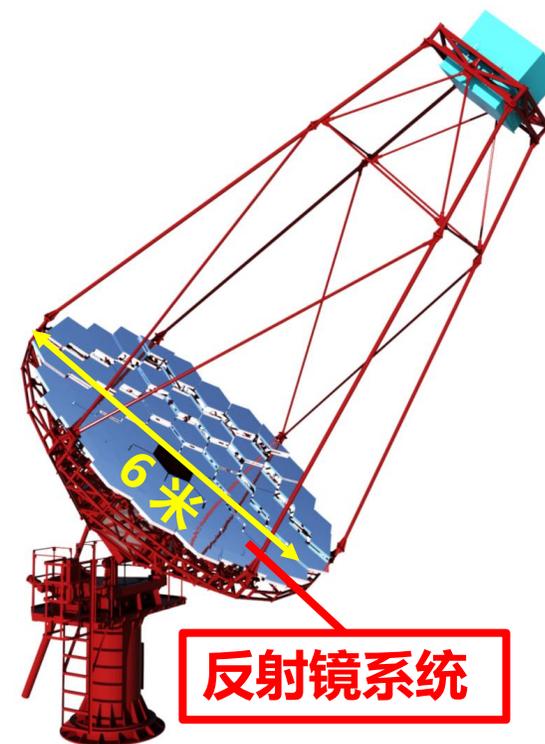
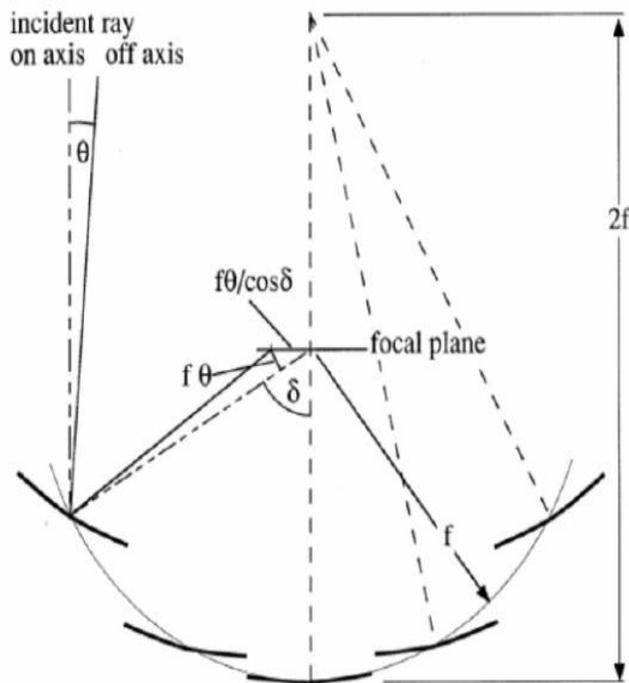
反射镜系统研制方案

➤ 采用类抛物面设计方案：Davies-Cotton设计方案

- 由54面六边形球面反射镜拼接而成
- 子镜：可批量生产，成本低
- 应用例子：国际同类实验HESS, CTA

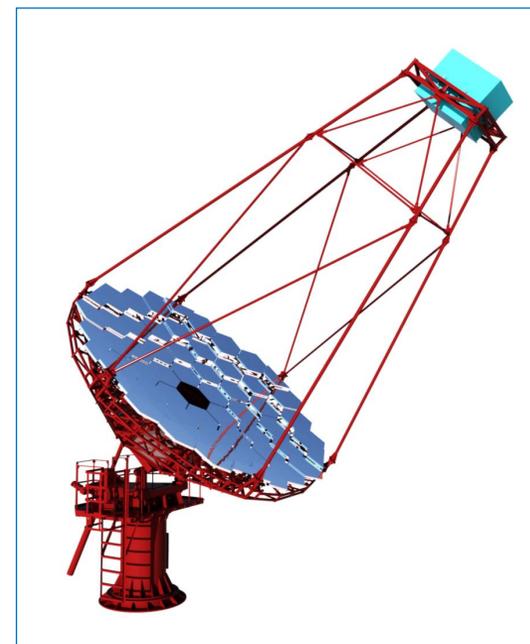
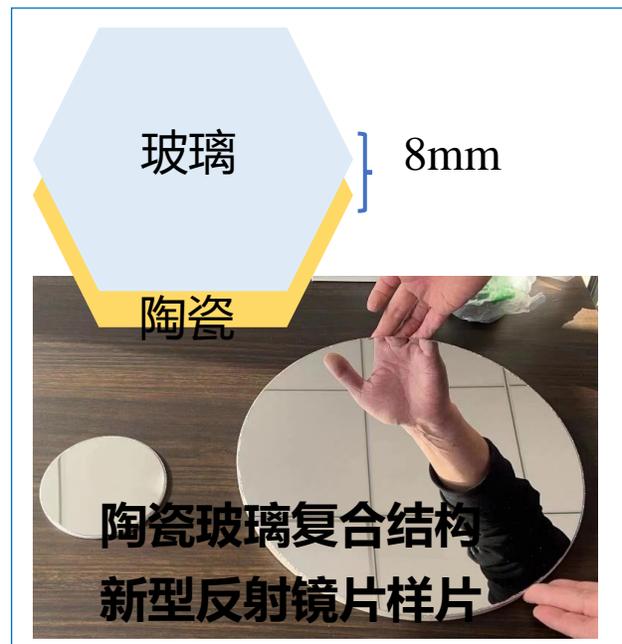
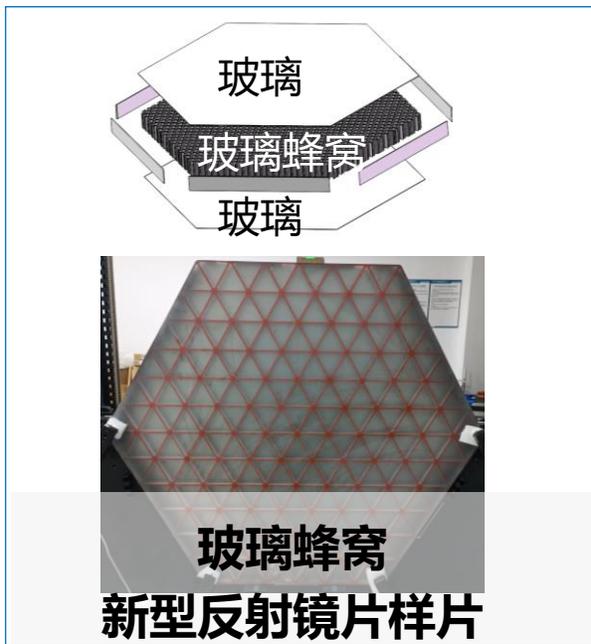
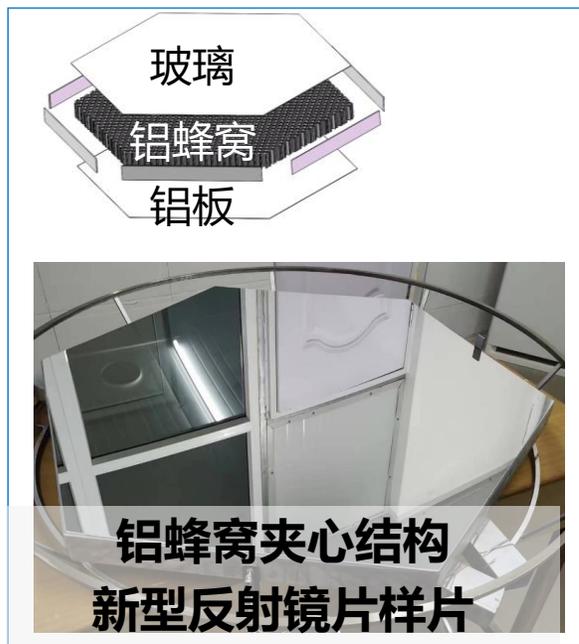
➤ 反射镜系统设计指标

参数	指标要求
反射镜口径	~6 m
光斑尺寸 (80%能量)	<25.8 mm
有效面积	~24 m ²
子镜曲率半径	16 m
主镜曲率半径	8 m



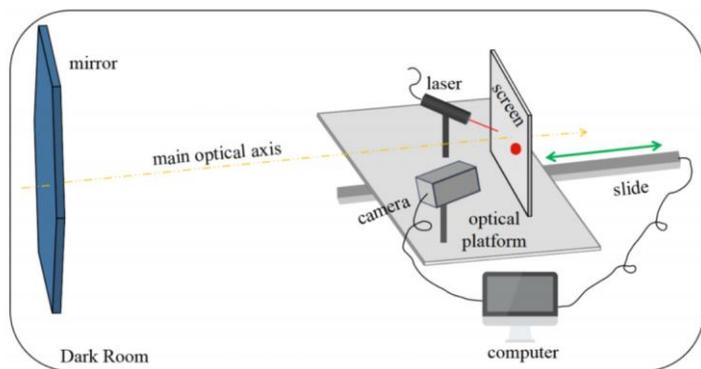
研制新型反射镜片（国际先进）：**降低自重**

反射镜片类型	重量	成本	生产效率	工艺成熟度
传统玻璃反射镜片	~23kg	高	低	LHAASO望远镜已采用此工艺
蜂窝夹心结构 新型反射镜片	~ 8kg	低	高	国际: MAGIC, CTA-LST已使用 本项目已研制等尺寸样片
陶瓷玻璃复合结构 新型反射镜片	~10kg	低	高	国内外 首次研制 本项目已研制小型尺寸样片



LACT反射镜检验

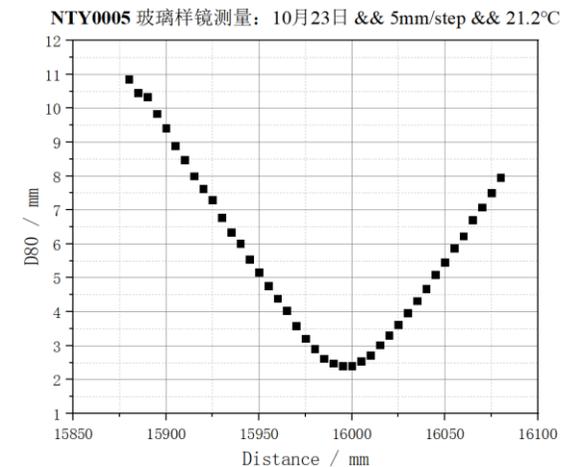
二倍焦距检验方法



传统玻璃反射镜
(已达标)

光斑大小:
2.4mm

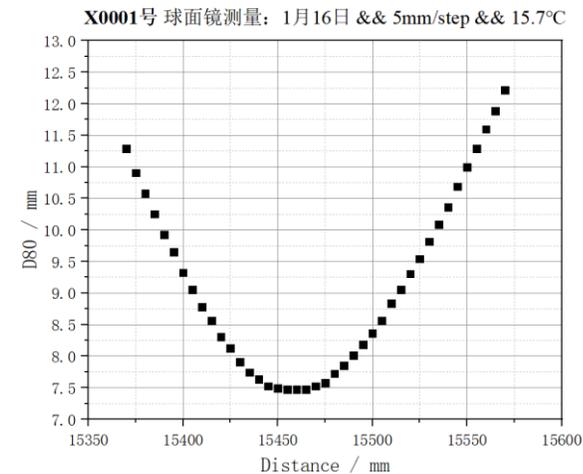
曲率半径:
15997.5mm



蜂窝夹心结构
反射镜
(基本已达标)

光斑大小:
7.5mm

曲率半径:
15460mm

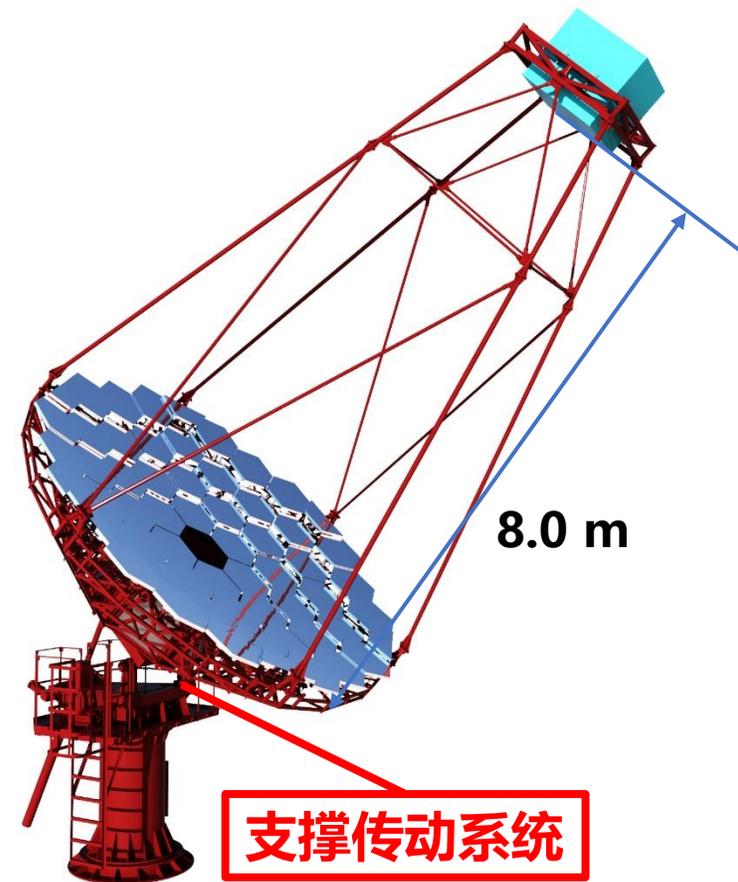


望远镜支撑传动系统

➤ 主要设计要点:

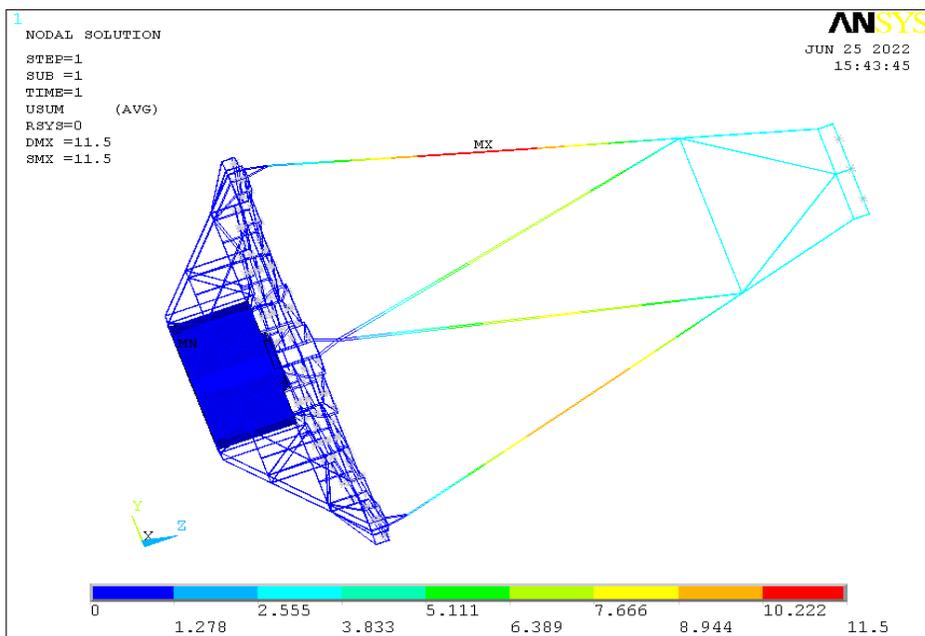
- 焦距较长: 8.0 米 (焦比=1.34)
- 相机较重: ~1000公斤

参数	指标要求
望远镜跟踪系统转动性能指标	a) 方位角: $\pm 270^\circ$ b) 仰角: $0-90^\circ$ c) 方位最大速度: $1^\circ/\text{s}$ 俯仰最大速度: $1^\circ/\text{s}$
焦距	8.0 米
指向精度	$\leq 0.01^\circ$
重复定位精度	$\leq 0.01^\circ$
相机支撑变形量	$< 4 \text{ mm}$
抗风性能	a) 风力10米/秒正常工作 b) 风力15米/秒可驱动至收藏位置 c) 风力30米/秒在收藏位置不破坏



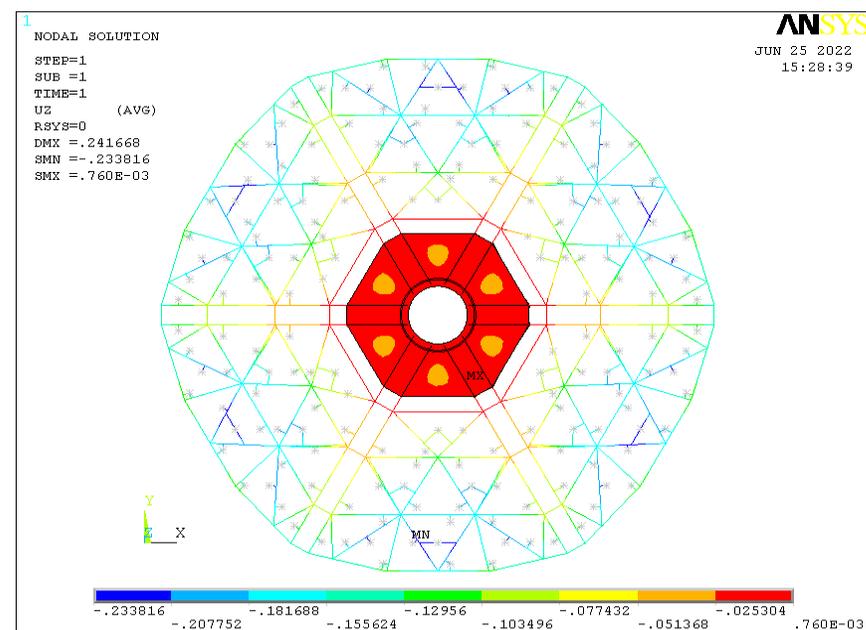
可行性分析：支撑传动系统和反射镜系统

借鉴国内大型射电望远镜设计经验，和国外大口径望远镜成功的设计经验
提出LACT望远镜支撑传动系统方案。模拟仿真结果满足设计指标要求。



支撑传动系统优化结果：

- 5级风力 (~10m/s) ， 俯仰角度 0° - 90°
- 对焦偏离度小于5.0 mm， 镜面最大变形小于1.0 mm



反射镜支撑背架优化结果：

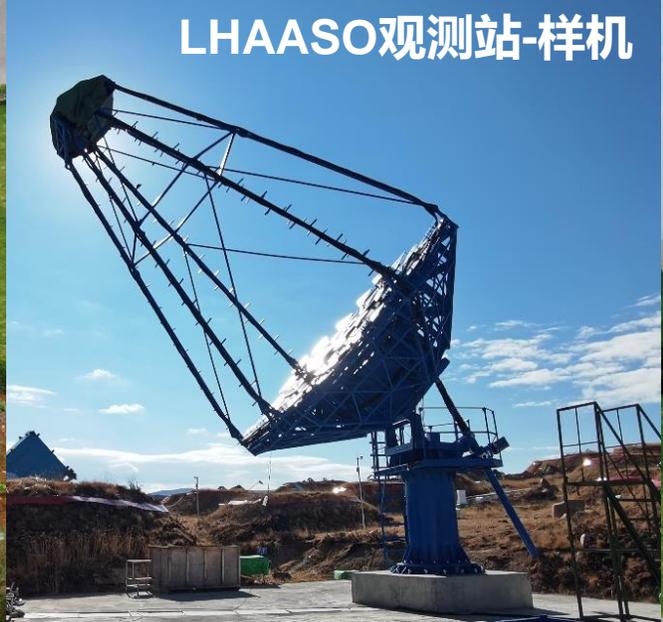
- 俯仰角度： 0° - 90°
- 镜面最大变形小于0.7mm

四川天府新区宇宙线研究中心

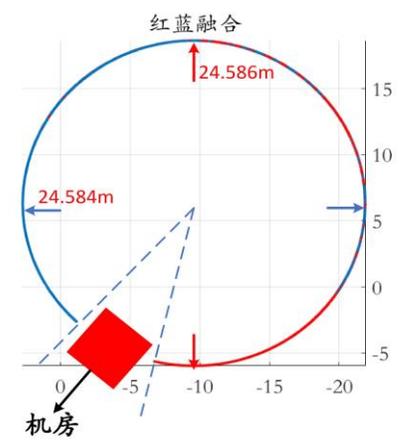
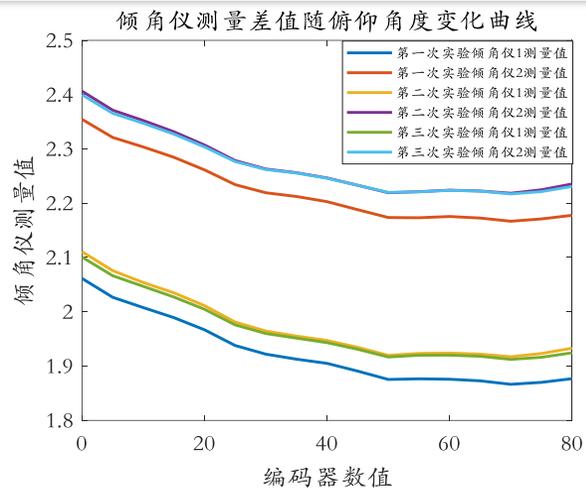
成都样机



LHAASO观测站-样机



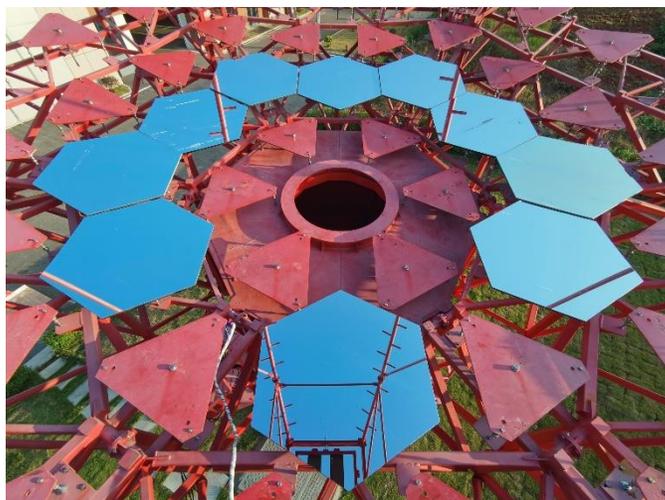
望远镜支撑传动系统



参数	指标要求	可行性分析
望远镜跟踪系统转动性能指标	a) 方位角: $\pm 270^\circ$ b) 仰角: $0-90^\circ$ c) 方位最大速度: $1^\circ/s$ 俯仰最大速度: $0.3^\circ/s$	样机测试合格
焦距	8.0米	样机测试合格
指向精度	$\leq 0.01^\circ$	样机测试合格
重复定位精度	$\leq 0.01^\circ$	样机测试合格
相机支撑变形量	$< 1.2 \text{ mm}$	样机测试合格
抗风性能	a) 风力10米/秒正常工作 b) 风力15米/秒可驱动至收藏位置 c) 风力30米/秒在收藏位置不破坏	仿真结果合格

LACT样机反射镜安装、调整和标定

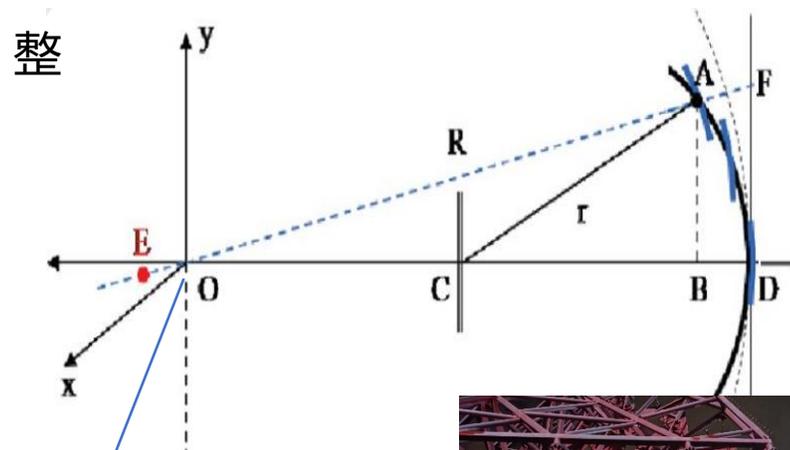
LACT反射镜安装



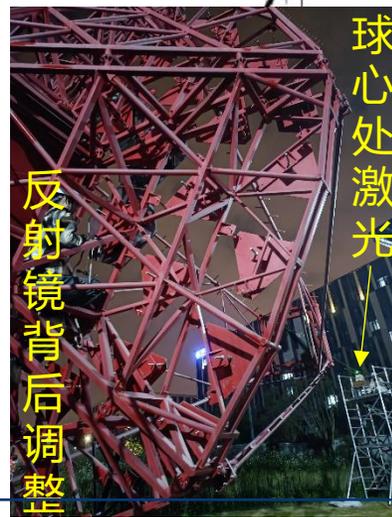
LACT反射镜调整 (Davies-Cotton, 无主动光学调节系统)

二倍焦距法调整:

借助**自研仪器**, 夜晚完成LACT反射镜的调
整

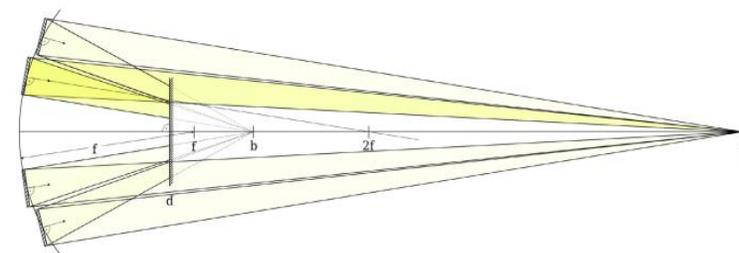


自研仪器

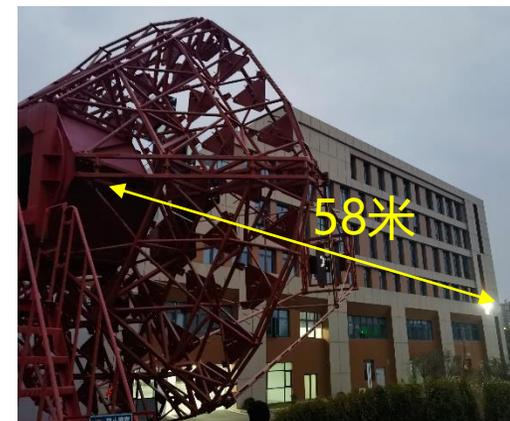


焦外成像法调整:

个别遮挡的反射镜完成调整

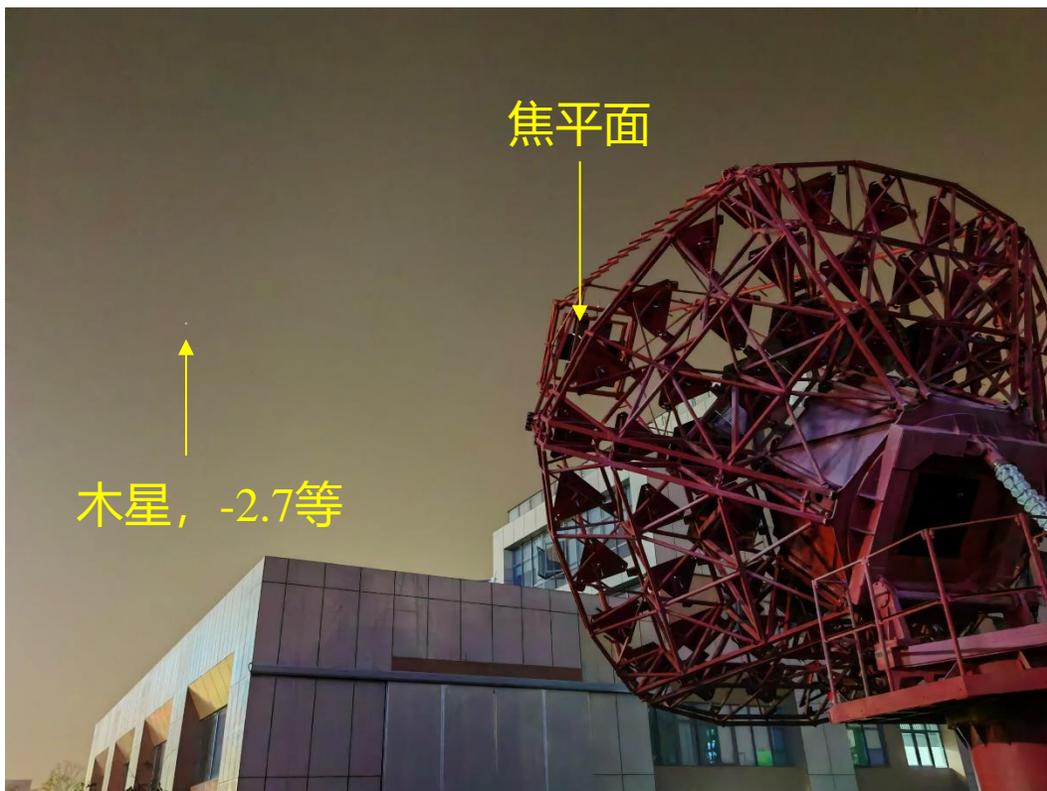
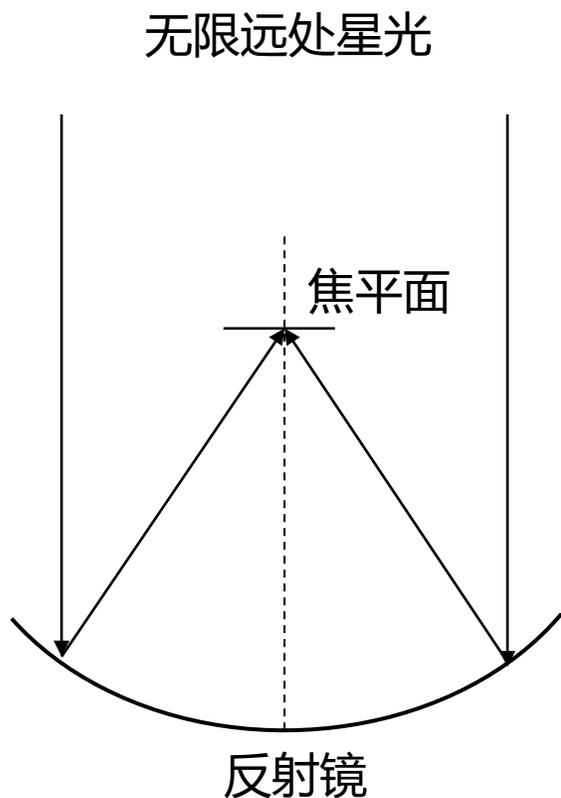


焦外成像法原理

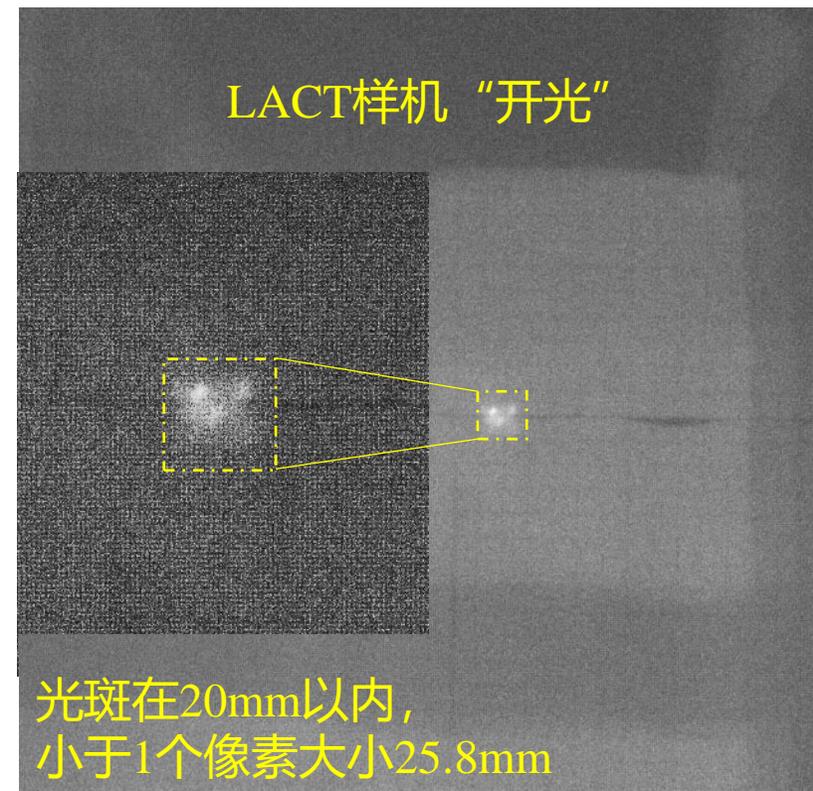


LACT反射镜安装、调整 and 标定

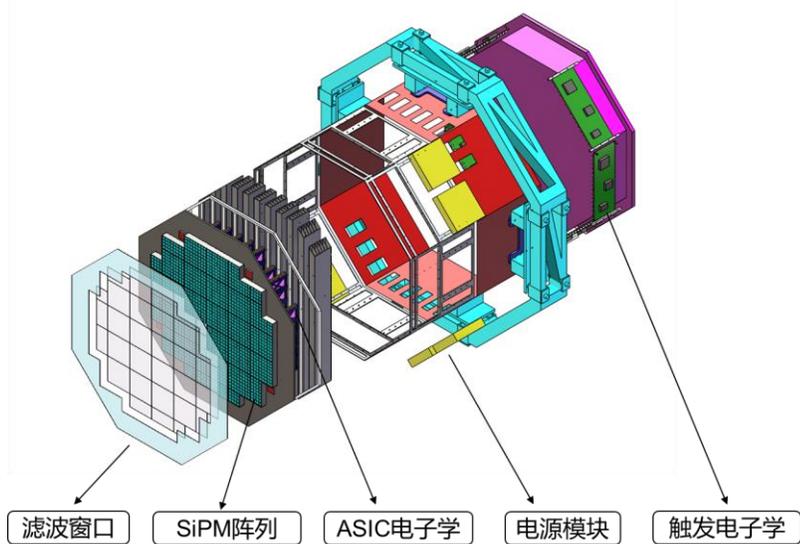
- 跟踪木星标定反射镜布局：**满足测试指标要求**



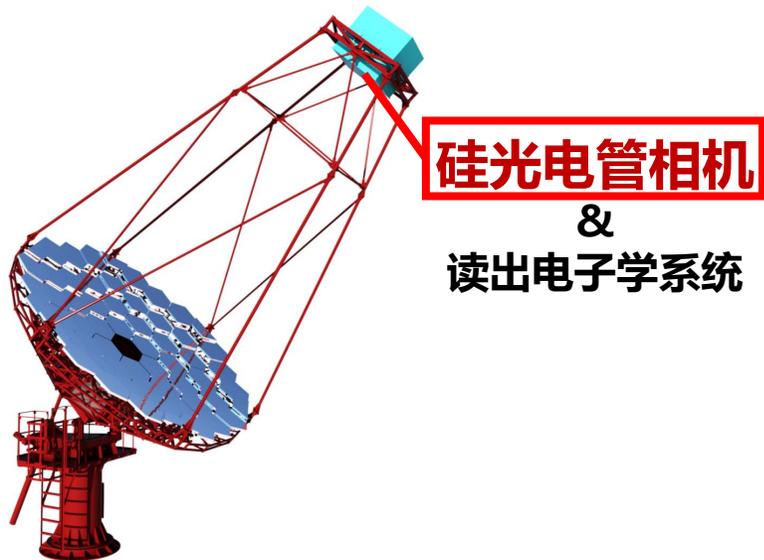
LACT样机首个光斑



硅光电管 (SiPM) 相机研制方案



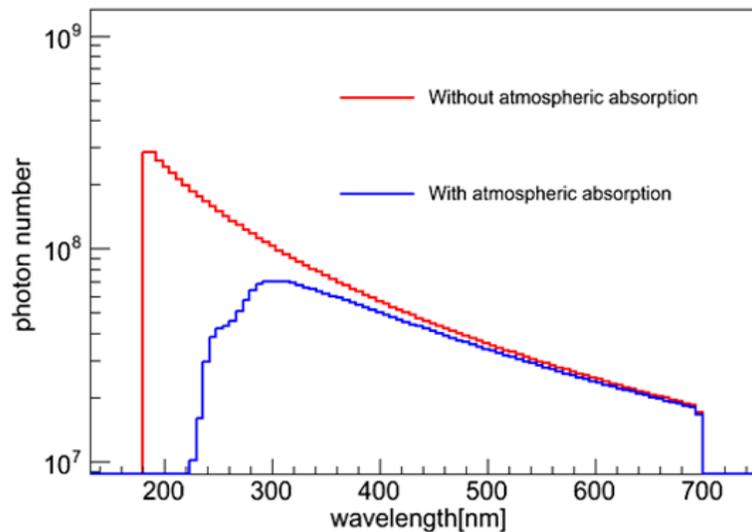
参数	指标要求
SiPM相机总像素	1616
像素大小	$\sim 0.2^\circ$
视场范围	$\sim 8^\circ$
SiPM 输出脉宽	$\text{FWHM} < 30 \text{ ns}$
动态范围	3.2量级
电荷测量分辨率	$< 5\% @ > 1000 \text{ P.E.}$



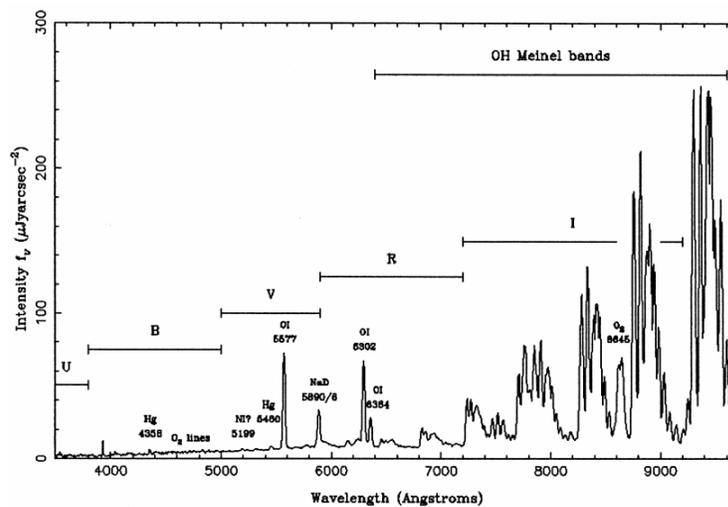
- 借鉴LHAASO 硅光电管相机成熟方案
- 指标提升方案: SiPM读出采用模拟求和电路, 输出脉冲宽度更窄, 具有更高的信噪比

夜空背景光影响抑制方案

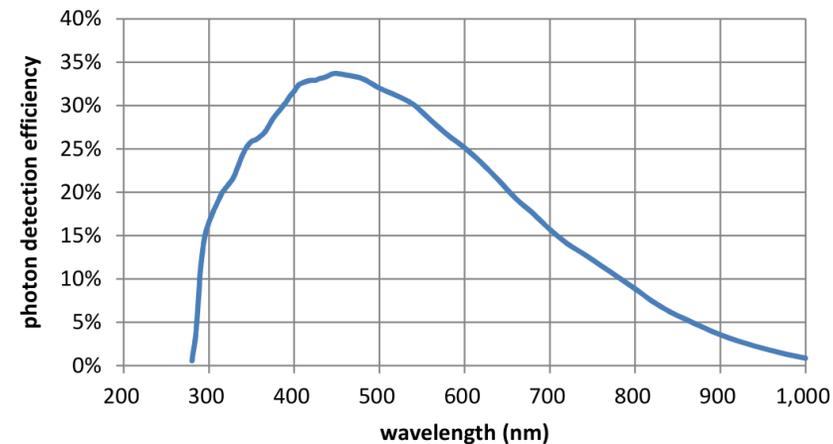
1. 相机光学窗：滤波片、背景光光谱过滤
2. SiPM光谱响应范围选择：从光谱角度提升信噪比
3. SiPM窄脉冲读出：时间上降低背景光干扰
4. 高速采样电子学：提升模拟信号测量精度
5. 触发逻辑：单道过阈触发+pattern符合触发



切伦科夫光谱



夜空背景光光谱



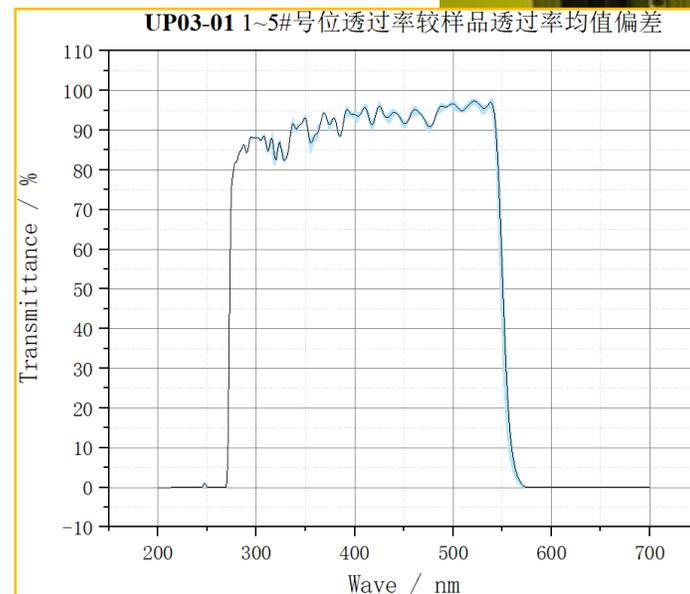
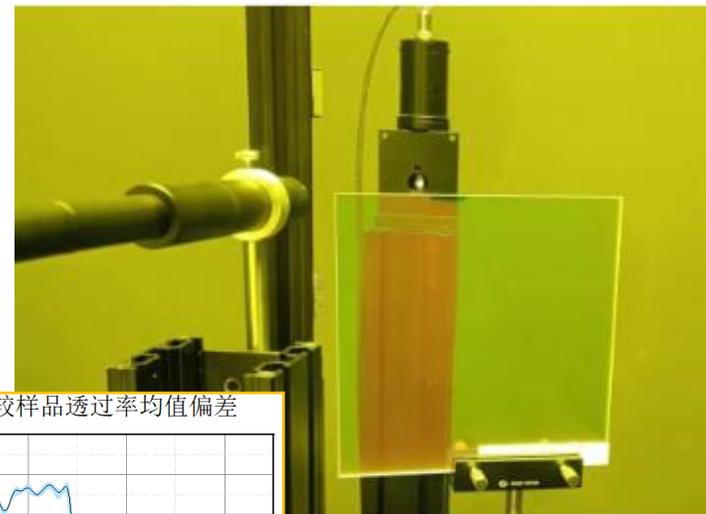
SiPM PDE光谱响应范围
(WFCTA HAMAMATSU-S14466)

建立大口径滤光片测量系统

1. 在宇宙线研究中心光学实验室建立大口径滤光片测量系统，**确保LACT望远镜相机窗口所需要的滤光片光谱透过率和均匀性满足要求。**
2. 完成多种不同规格紫外带通滤光片测试：
推动望远镜滤光片**国产化替代研制**。

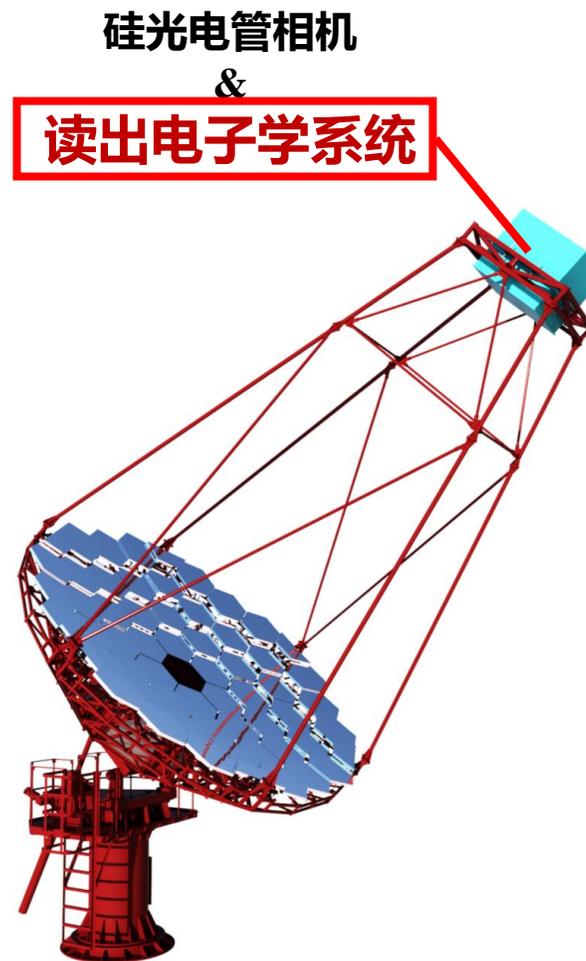
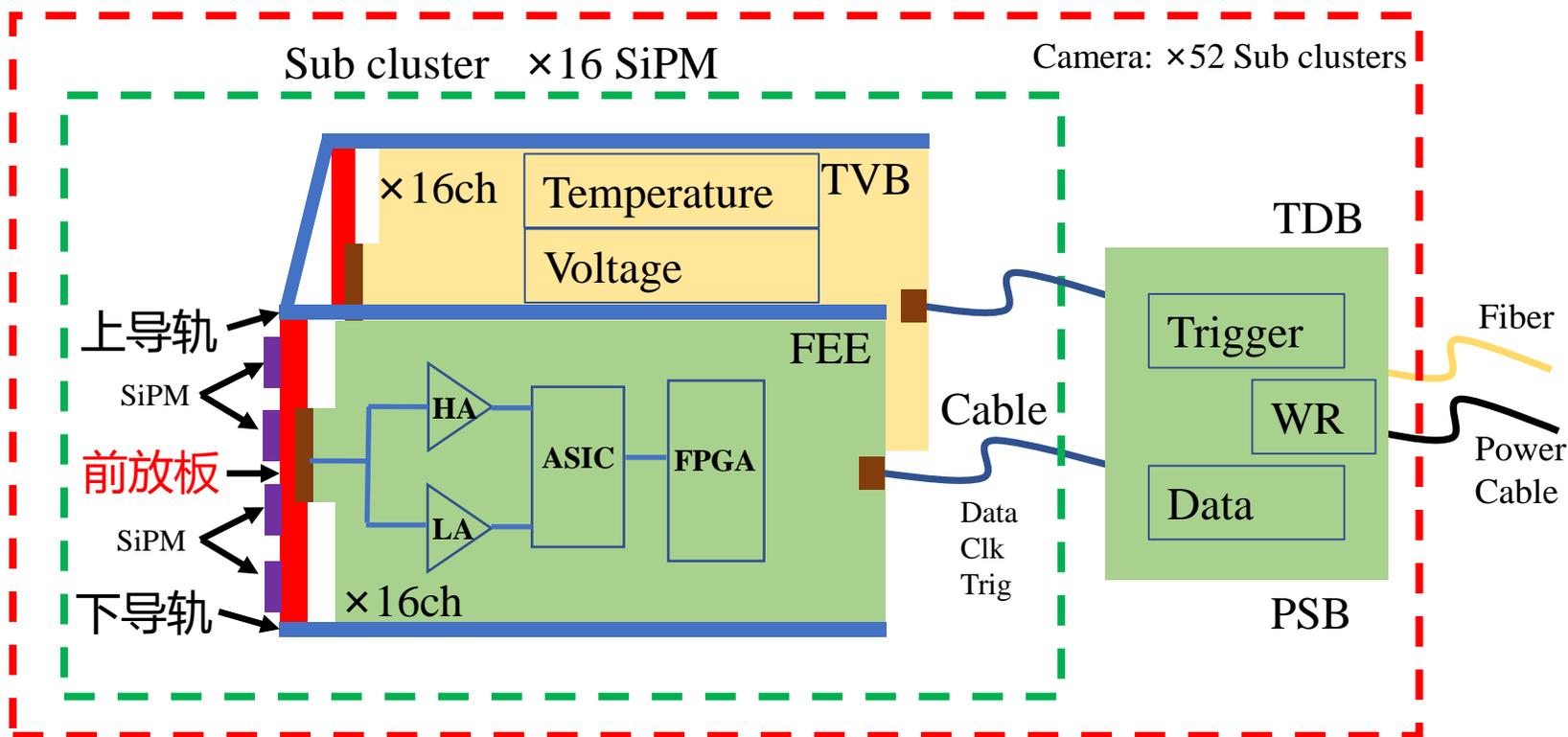


大口径滤光片测量



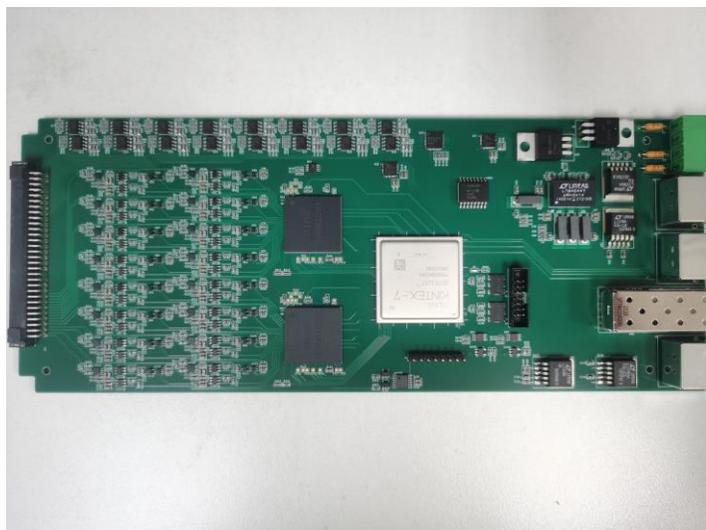
读出电子学系统研制方案

- 前置波形数字化方案：基于开关电容阵列**专用集成电路 (ASIC)**
功耗更低；
- 大动态范围：采用双量程波形数字化设计

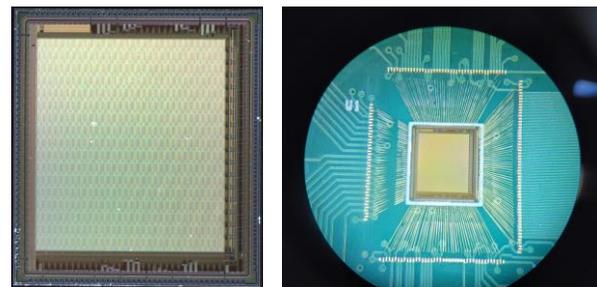
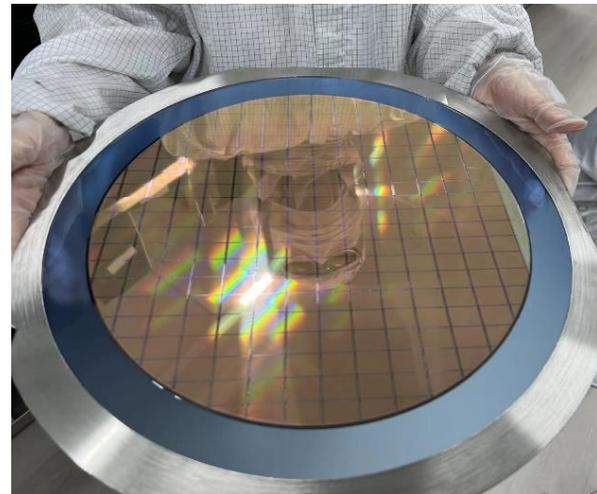
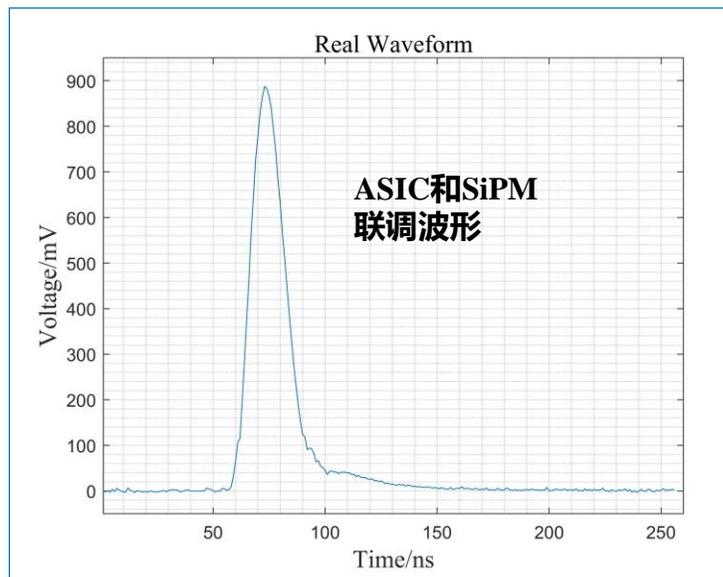


核心部件国产化

- 采用高能所自研专用集成电路（ASIC），**应对复杂国际形势，规避不可预测风险**
 - 测试结果满足要求，但仍有改进的空间
 - 等待批量生产



基于自研ASIC的前端电子学板



**高能所自主研发的
专用集成电路样片**

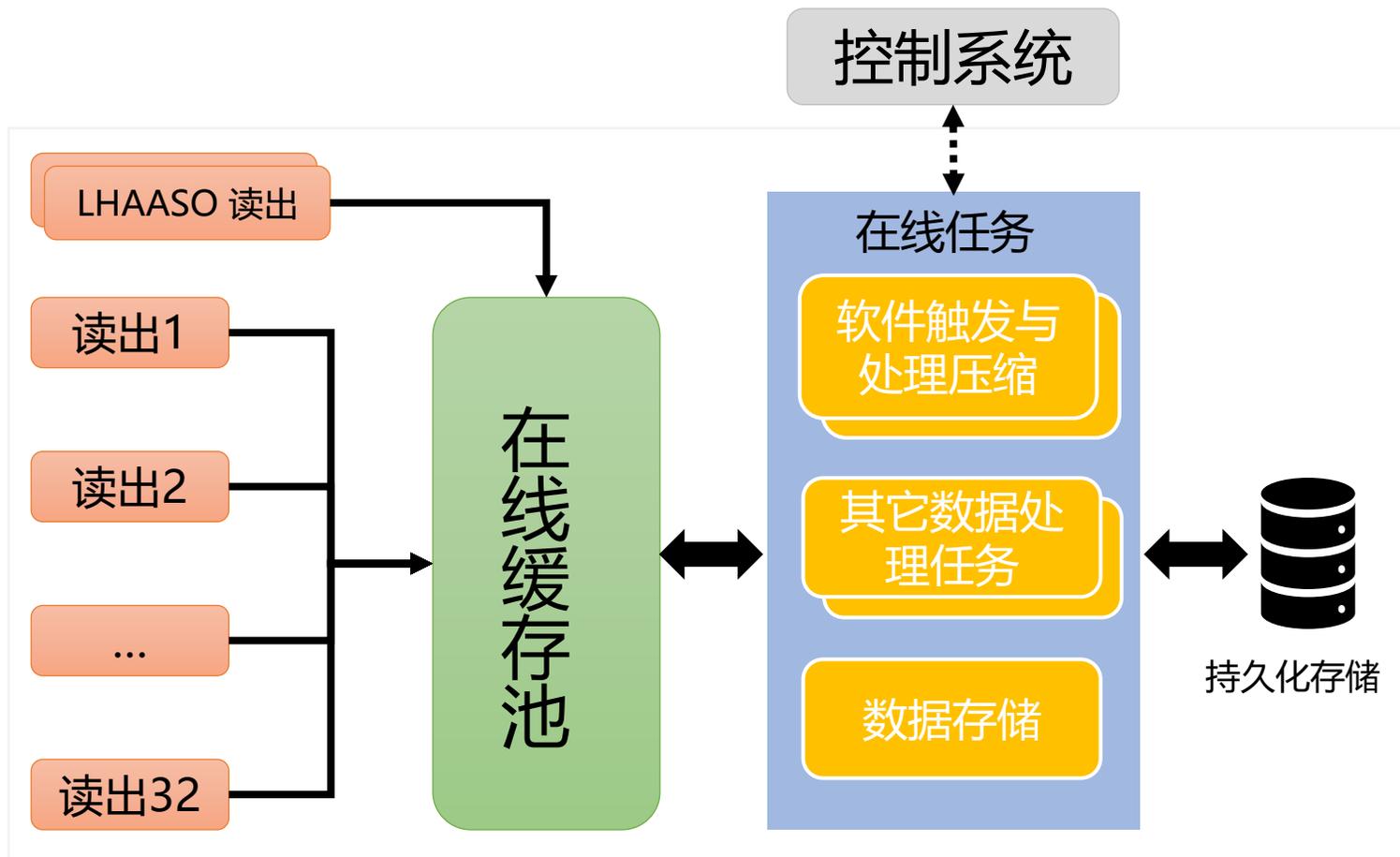
数据获取与在线数据处理

核心需求

- **LACT与LHAASO-KM2A联合触发**
- 数据压缩
- 数据质量监测、探测器自检等

性能指标

- 读出数据率：280MB/s
- 存储数据率：6MB/s



- 基于缓存池的流处理方案：实时任务调度，并为用户提供在线算法开发、调试与集成运行平台
- 缓存池：采用分布式内存方案，是数据交换中心，具备**高吞吐能力和高可靠性**

分布式内存缓存池技术验证

在线数据处理关键技术验证

性能和稳定性测试 (@6GB/s)



实际应用测试：缓存LHAASO WCDA数据



- LHAASO网络环境中 (10GbE) , 单节点吞吐能力接近网络上限
- 应用于LHAASO数据量最大的WCDA实验, 长时间稳定运行

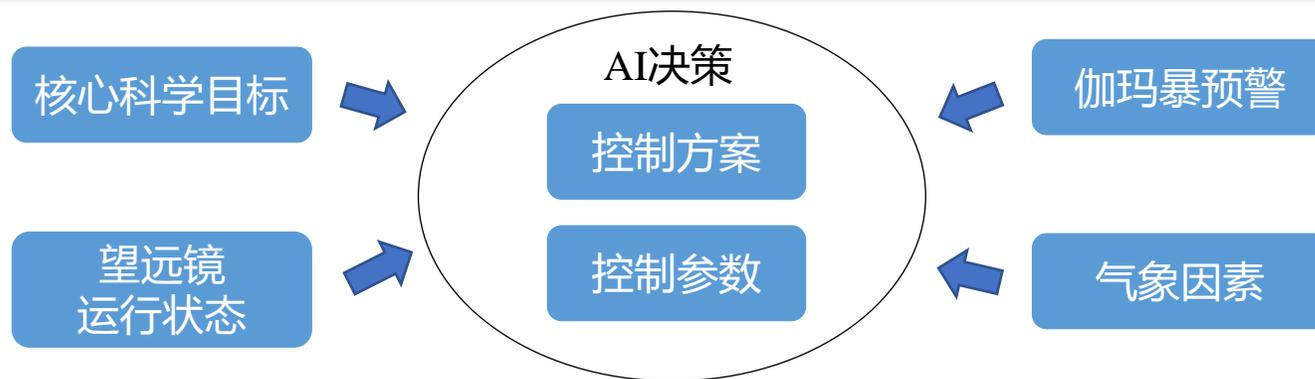
完成基于内存缓存在线计算系统关键技术验证, 满足LACT和LHAASO数据缓存需求

核心需求

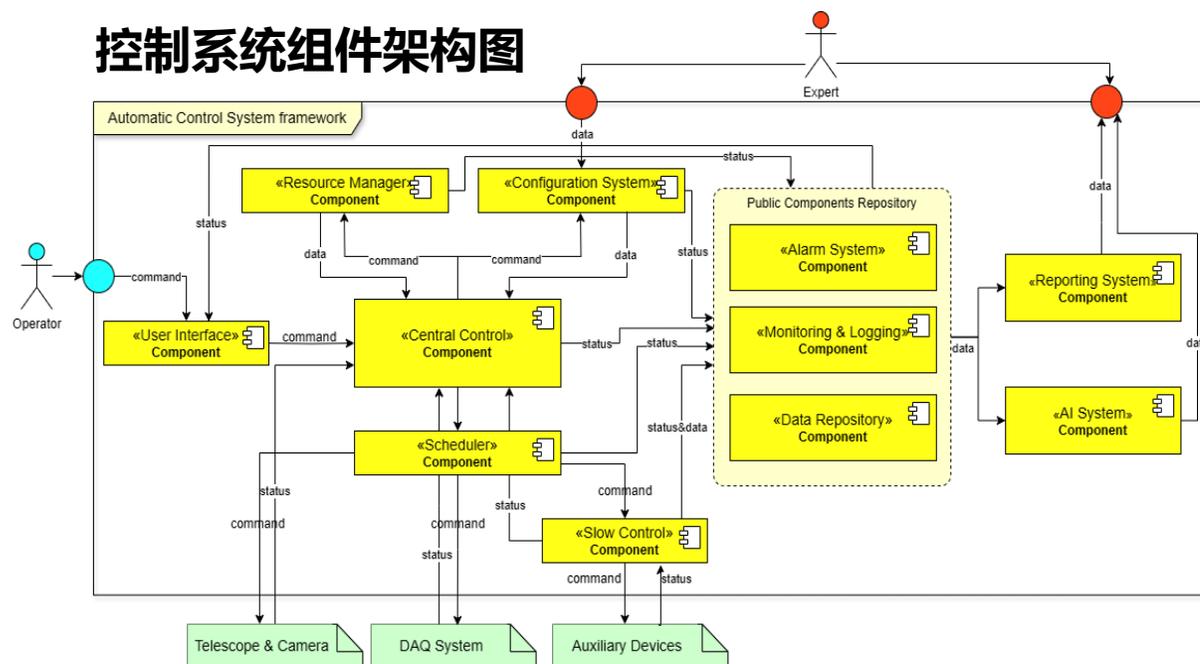
● 多数据源整合

- 望远镜系统
- DAQ与在线数据处理系统
- 标定刻度系统
- 辅助观测系统
- ...

● 自动化 & 智能运行观测



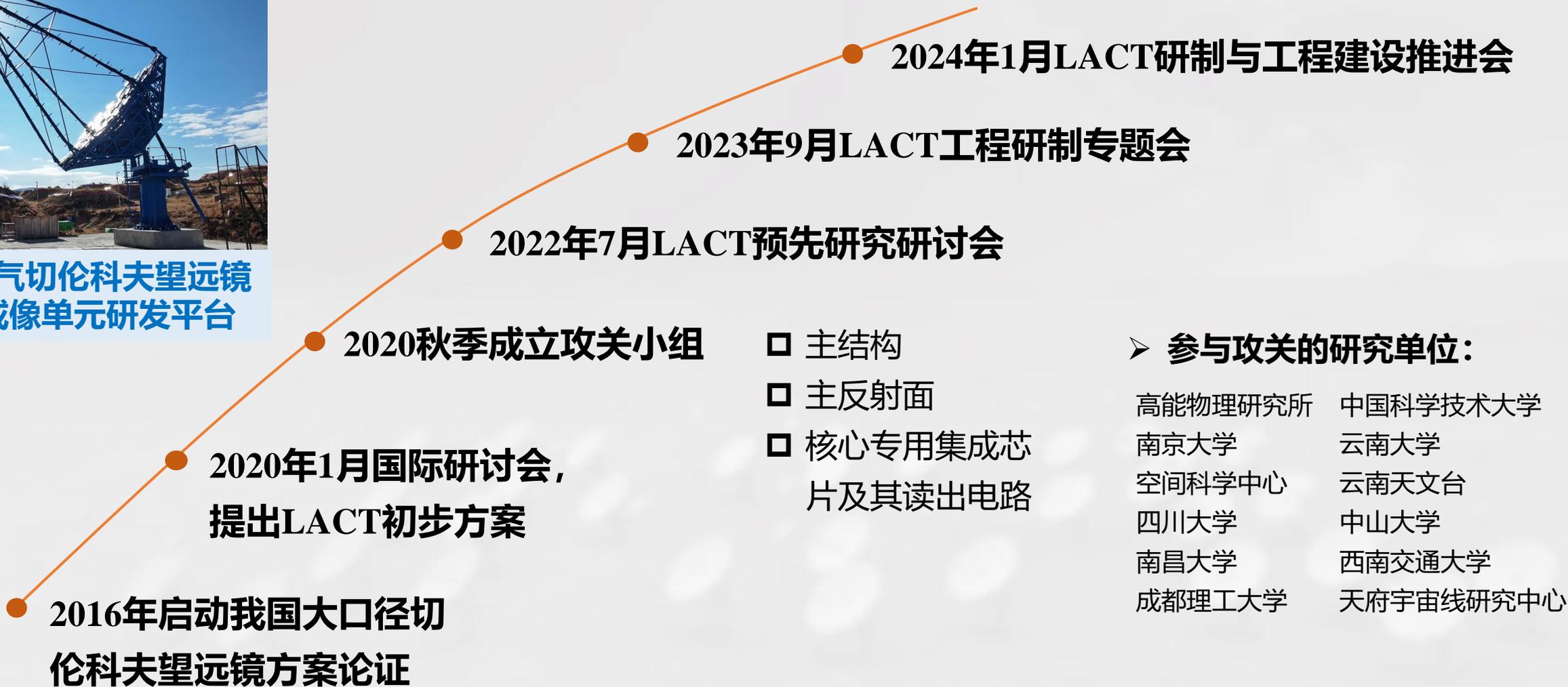
控制系统组件架构图



项目前期准备回顾



大气切伦科夫望远镜
成像单元研发平台



参与攻关的研究单位：

高能物理研究所	中国科学技术大学
南京大学	云南大学
空间科学中心	云南天文台
四川大学	中山大学
南昌大学	西南交通大学
成都理工大学	天府宇宙线研究中心

项目实施进度计划-LACT研制周期 (2024-2028)



项目实施进度计划-自初设批复日期起

建设周期4年：2024.9 – 2028.8

序号	阶段名称	2024年			2025年			2026年		2027年	2028年		
		1-3	4-8	9-12	1-5	6	7-12	1-9	10-12	1-12	1-9	10-11	12
1	第1台望远镜制作、安装调试分项 鉴定验收			■	■								
2	第1台望远镜整体验收					■							
3	第2-8台望远镜的制作与安装调试、 测试						■	■					
4	第9台-32台望远镜批量生产、安装、 测试								■	■	■		
5	全阵列试运行											■	
6	竣工验收												■

4 总结

1. LACT将利用自身高角分辨的优势，结合LHAASO世界最强的伽马/质子鉴别能力，开展超高能伽马源的精细结构观测；
2. 目前LACT项目正在进行样机的研制和建设，已在**自主知识产权ASIC读出电子技术，新型复合材料反射镜技术和大规模SiPM应用技术上**取得突破性进展。
3. 计划到**2026年9月完成8台望远镜**，边建设边运行，到**2028年完成全部32台望远镜建设**；
4. 建成后将是世界上灵敏度和角分辨综合能力最强的切伦科夫望远镜阵列。

谢谢!

