闪烁光纤 (SciFi) 径迹探测器研制和 CERN 束流实验

中国科学院高能物理研究所

王俊静、王志刚、徐明、董永伟

2026 年 10 月 11 日

目录

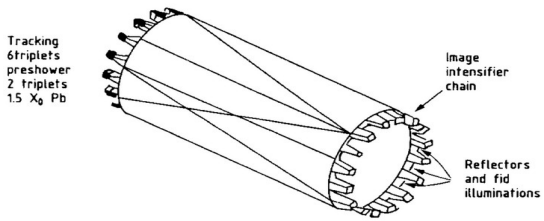


- SciFi 探测器与 HERD
  - SciFi 探测器发展
  - HERD 光纤径迹仪 (FIT)
- SciFi 国产化和束流实验
  - 探测器研制
  - CERN 束流实验 (24-26 年)
- SciFi 探测器应用

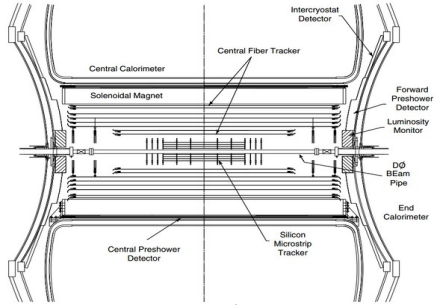
闪烁光纤探测器 (SciFi) 的发展

由闪烁光纤 (Scintillating Fiber, SciFi) 组成的粒子径迹探测器，是近三十年逐渐发展起来的新型探测技术。

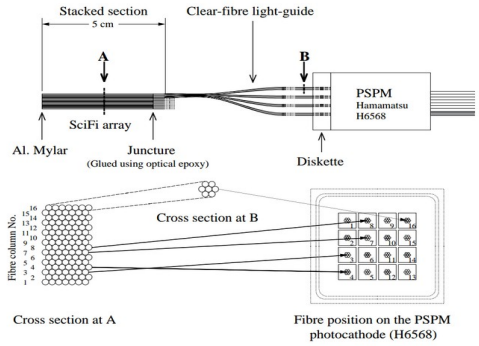
- 充分利用了闪烁光纤响应快、颗粒度高、衰减长度大的优点；
- 考虑到光纤光产额小、光收集效率低的缺点，多种光电探测器件应用：
  - 增强型 CCD 相机 (ICCD)
    - CERN-UA2, CHORUS
  - 可见光光子计数器 (VLPC)
    - DØ-CFT, MICE
  - 光电倍增管 (PMT)
    - COMPASS, CALET-IMC



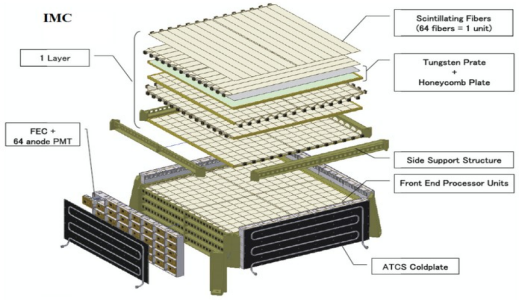
UA2



DØ



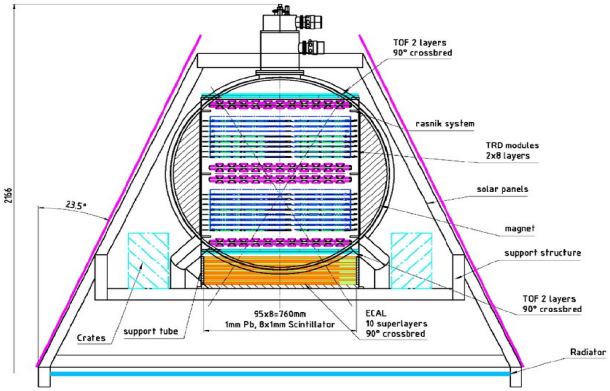
COMPASS

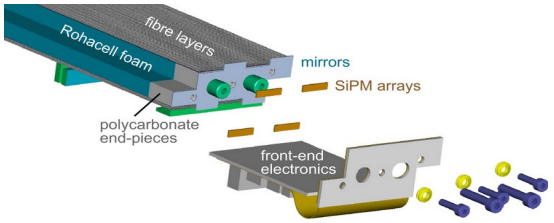


CALET-IMC

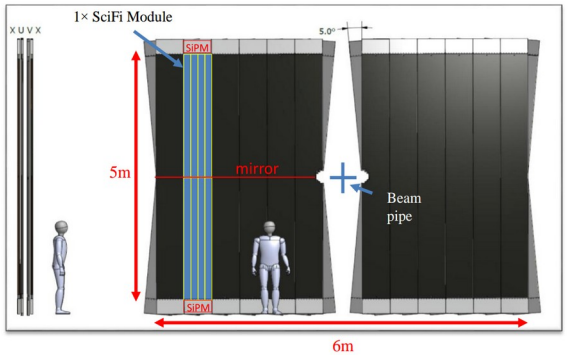
传统光电器件自身的缺点也同时限制了 SciFi 的发展，如低温环境 (VLPC)、功耗和磁场干扰 (CCD, PMT)、耦合方式（需借助额外的白光纤或者光导过渡）等

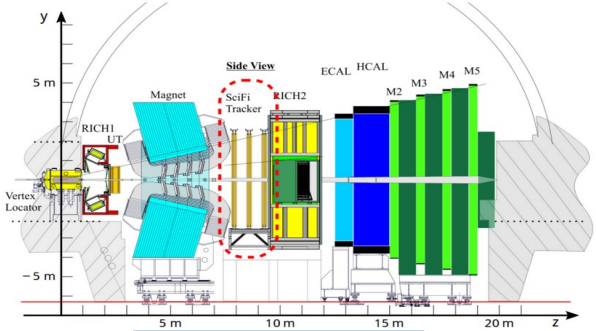
基于 SiPM 读出的 SciFi 探测器





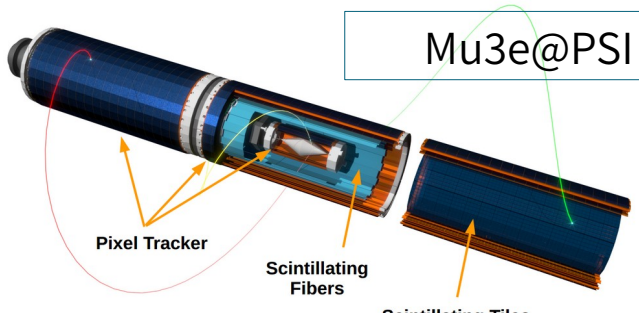
PEBS 气球实验

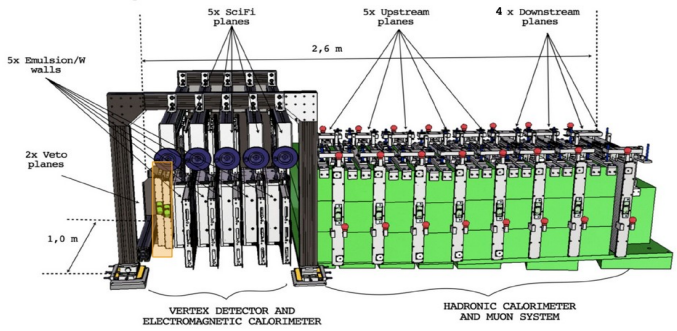




LHCb 实验

Mu3e@PSI





SND@CERN

新型光电器件硅光电倍增器（SiPM）的出现和 光纤工艺 的改进，进一步释放 Scifi 探测器的潜力

- 采用专门定制的高度分割化 SiPM 来读出光纤信号，在地面实验大规模应用
  - PEBS 和 LHCb 用作径迹测量，空间分辨率 < 70 μm，探测效率 >99%
  - Mu3e 用作时间测量，时间分辨率 < 250 ps； SND 实验，用于电磁量能器
- 迅速推广到空间和地面粒子物理实验（在研 & 概念）：中国空间站 HERD、德国 AMS100、 VLAST？ FCC？

SciFi 单元模块：光纤垫

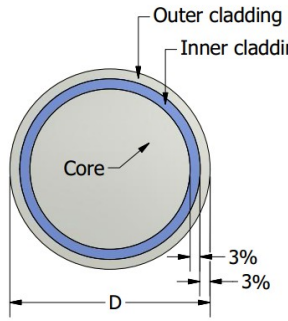
Kuraray 公司

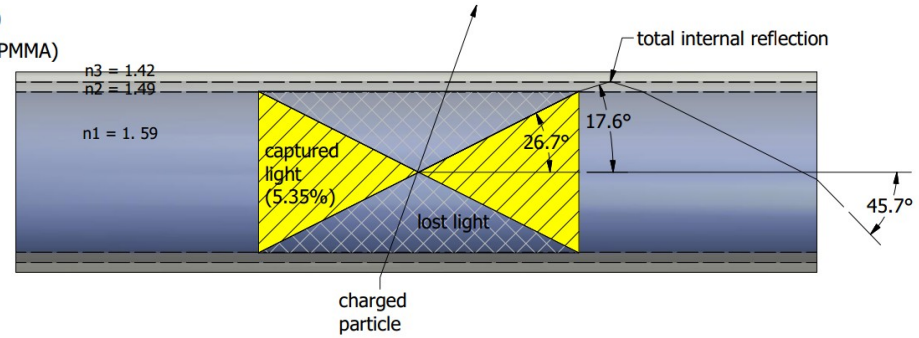
双包层光纤

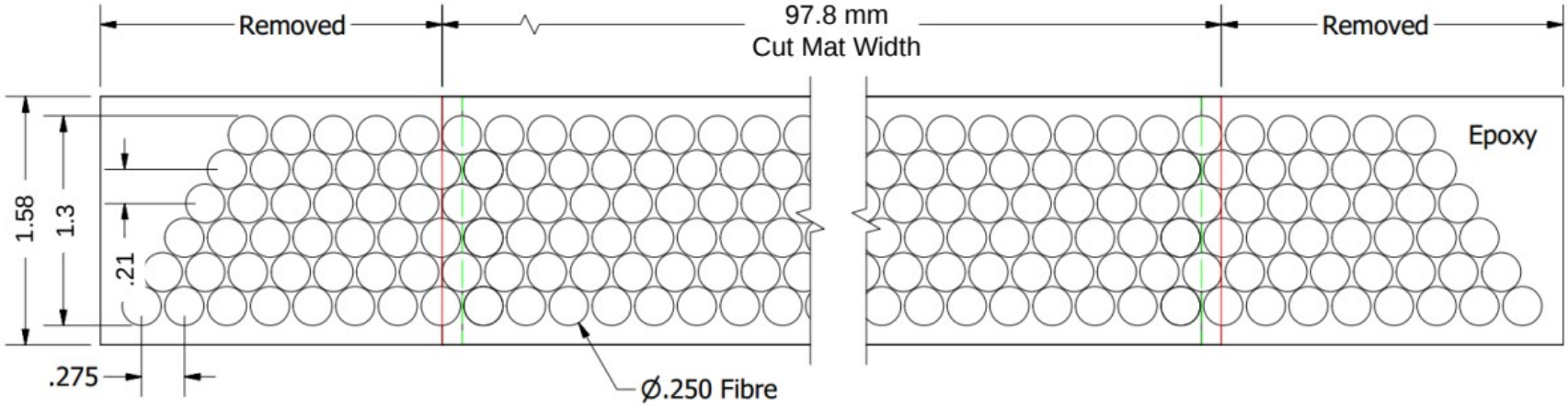
直径 250 μm

单向光俘获效率 5.4%

衰减长度 > 3m







- 6 层光纤，相互交叠错位排布，宽度 97.8mm
- 光纤之间用环氧胶固定，掺 氧化钛粉末减少光学串扰

SciFi 单元模块： SiPM

“LHCb” SiPM

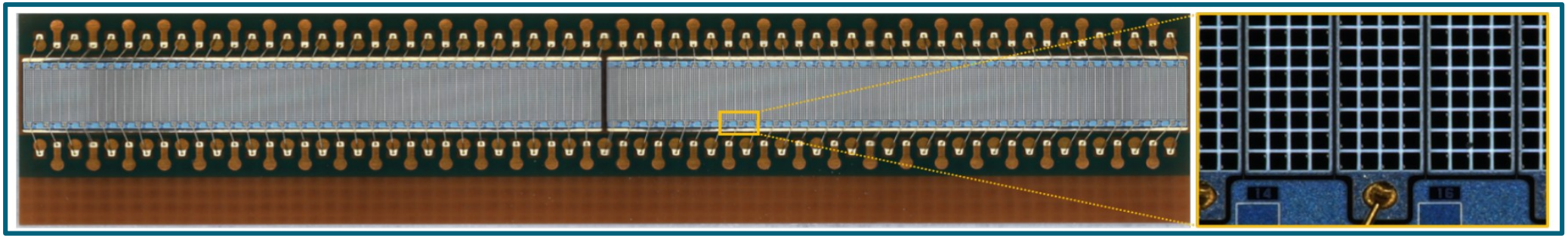
Hamamatsu S133552

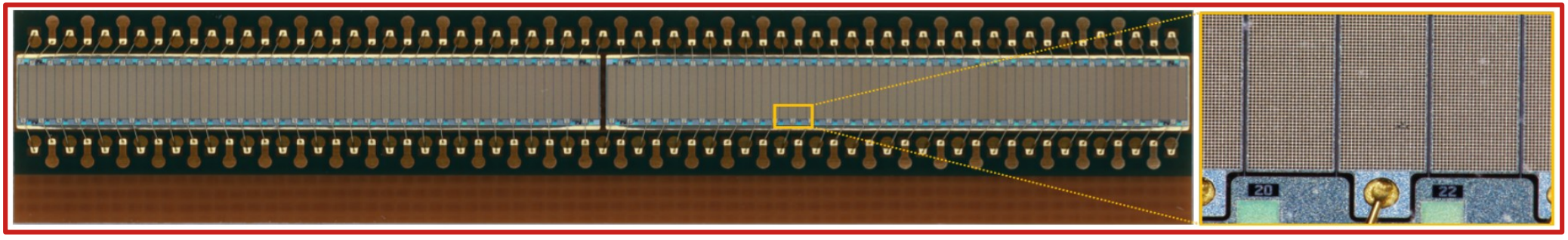
- 2 chips/array, 64 channels/chip
- 104 (4 × 26) pixels/ch
- **Pixel size: 57.5 μm × 62.5 μm**
- Channel size: 230 μm × 1625 μm
- **Channel pitch: 250 μm**
- Photon detection efficiency 45%
-

“10 μm” SiPM

Hamamatsu S13552-10

- 2 chips/array; 64 channels/chip
- 3749 (23 × 163) pixels/channel
- Pixel size: 10 μm × 10 μm
- Channel size: 230 μm × 1630 μm
- **Channel pitch: 250 μm**
- Photon detection efficiency 15%
-

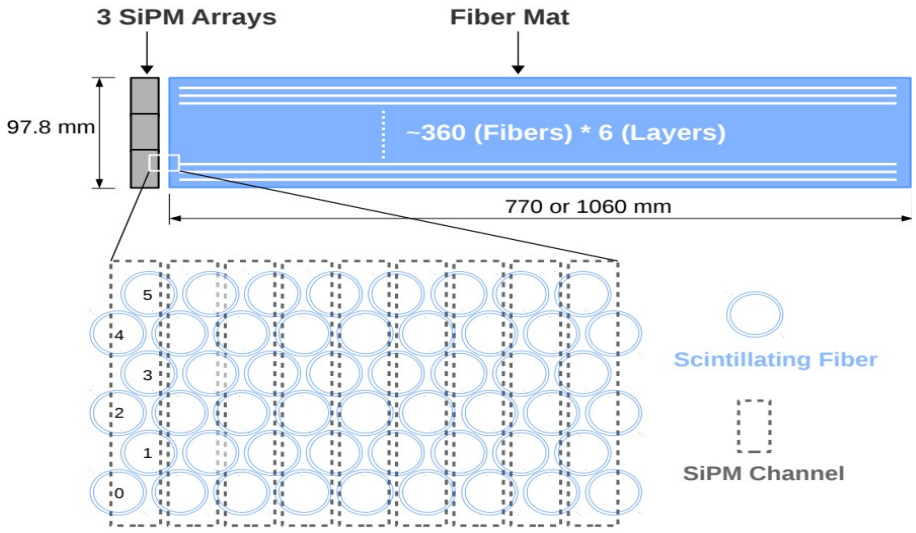


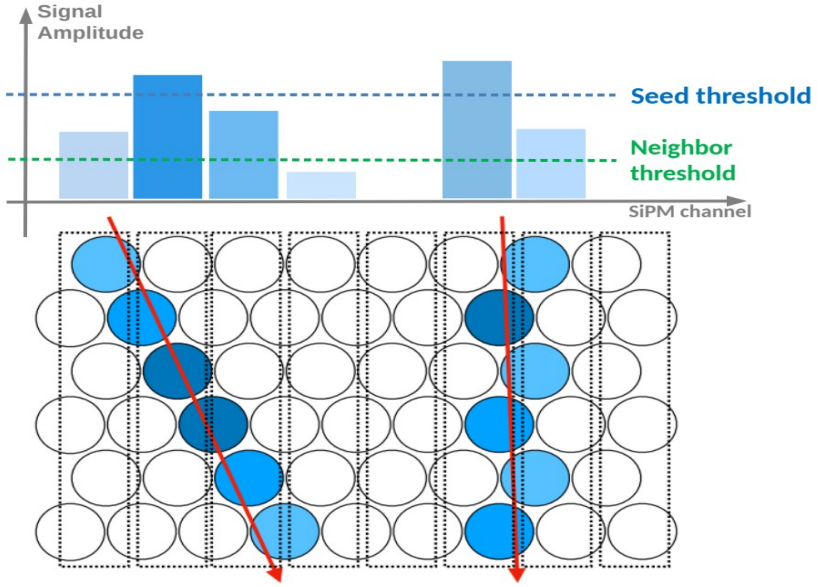


SciFi 结构和探测原理

SciFi 单元模块由 1 个光纤垫和 多个 SiPM 阵列构成。

光纤垫的一端直接与 SiPM 空气耦合，另一端贴反射膜或不做处理



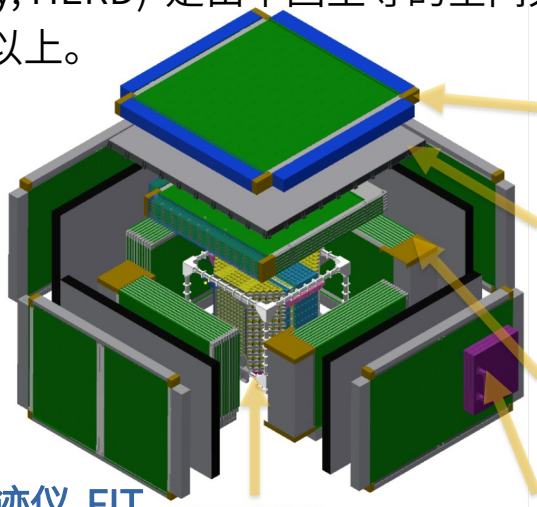


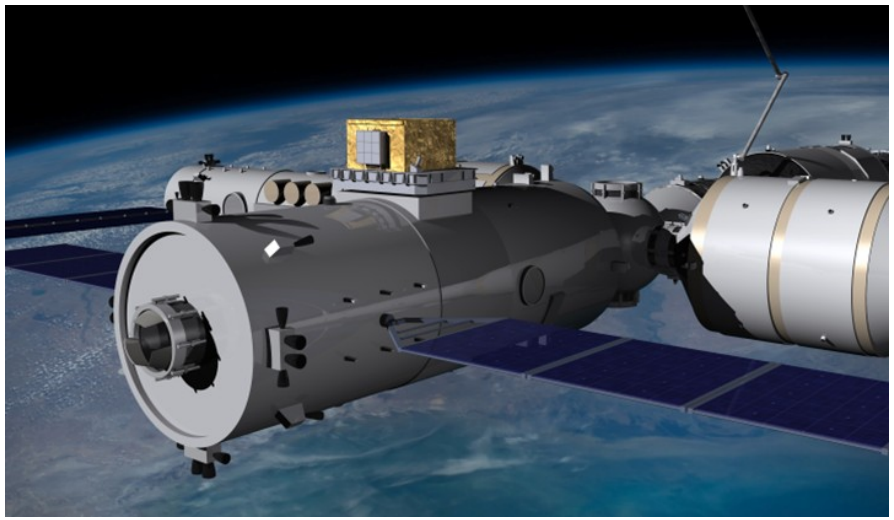
- 带点粒子穿过光纤垫激发的闪烁光，部分光子在光纤中全反射传输
- 到达光纤末端的光子出射，击中 SiPM 阵列并转换成电脉冲信号
- 一次粒子击中会**“点亮”多根光纤**，在**多个 SiPM 通道中**产生响应信号
- 通过**“簇找寻算法”**筛选连续着火通道，重建真实击中的**一维坐标信息**

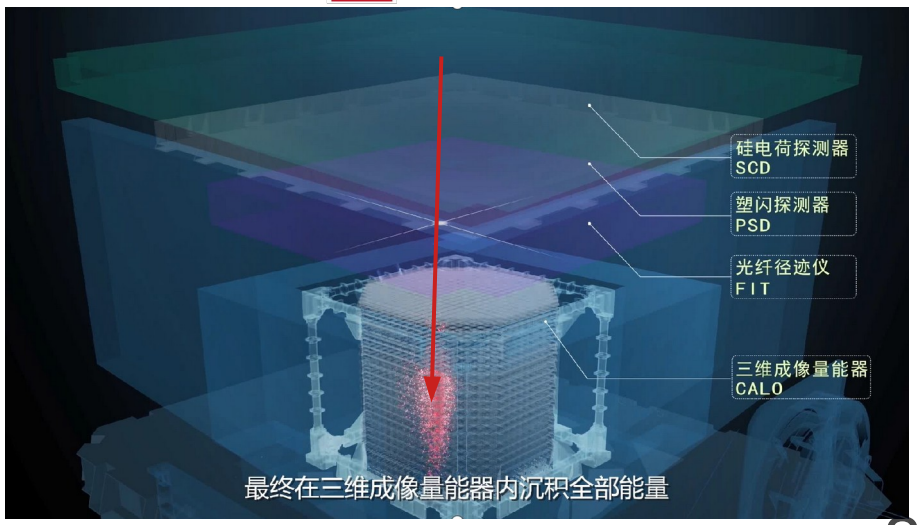
高能宇宙辐射探测设施（HERD）

高能宇宙辐射探测设施 (the High Energy cosmic-Radiation facility, HERD) 是由中国主导的空间天文和粒子天体物理实验，预计于 2030 年安装于中国空间站，在轨运行 10 年以上。

- 核心科学目标：
  - 暗物质间接探测：湮灭线、电子能谱、电子各向异性
  - 宇宙线各成分能谱精确测量：探测能区到达 PeV 附近
  - 伽马天文研究：开展大视场高能伽马射线巡天和监视
- 采用了**三维成像、五面灵敏**的创新型设计
  - **“国际合作版本”**从内到外依次为：核心量能器 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



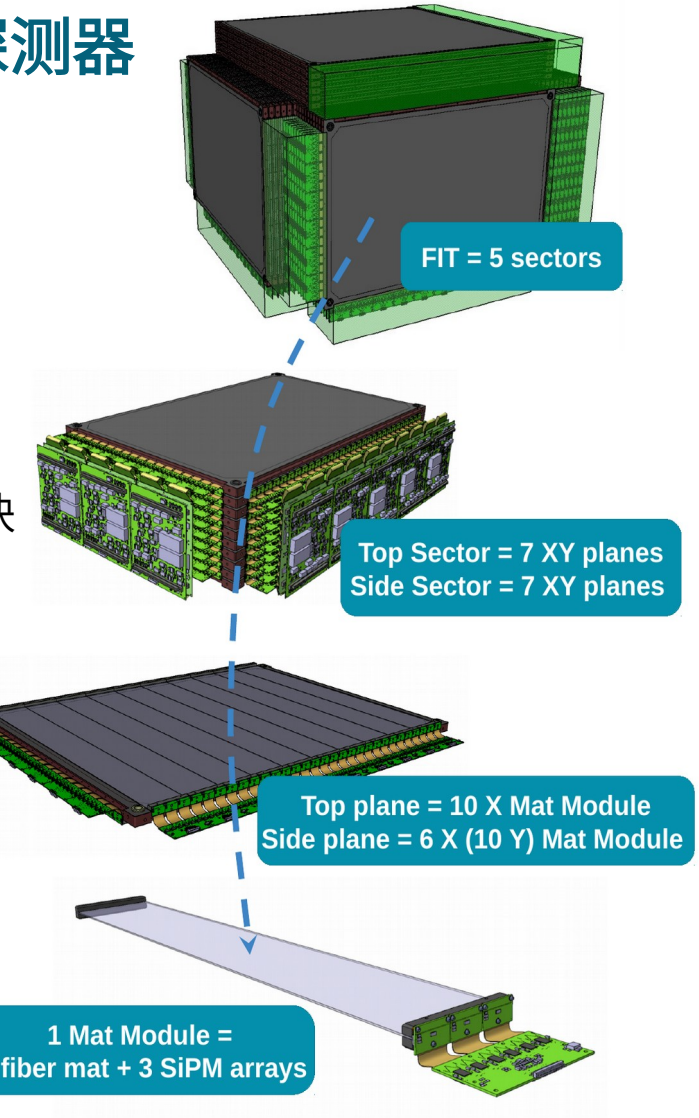




详见王志刚 / 权征报告《HERD 项目研制进展和未来标定需求》　官网 https://herd.ihep.ac.cn/

HERD 光纤径迹仪 (FIT)

- 五面灵敏设计，需要相匹配的**大面积外围径迹探测器**
  - 空间实验要求：**结构紧凑、模块化、低功耗、物质量少、造价低**
- **FIber Tracker 方案**
  - **瑞士日内瓦大学提出和牵头研制、西班牙参与**
  - 功能：径迹测量、伽马射线转换、宇宙线电荷测量
  - 构型：顶面 +4 个侧面扇区、 7 个 XY 大层、单层正交布置单元模块
  - **优势**
    - 闪烁光纤衰减长度大 (~ m), 大面积铺设 , 降低电子学路数和功耗
    - SiPM 读出结构紧凑 , 提高覆盖率 ; 收缩整体尺寸 , 减小外围探测器规模
    - 支撑结构薄 , 进一步减少载荷重量 ;
    - 单位面积成本远低于硅探测器
    - 位置分辨率小于 100 μm ， 与硅探测器相当（相同 pitch 情况下）



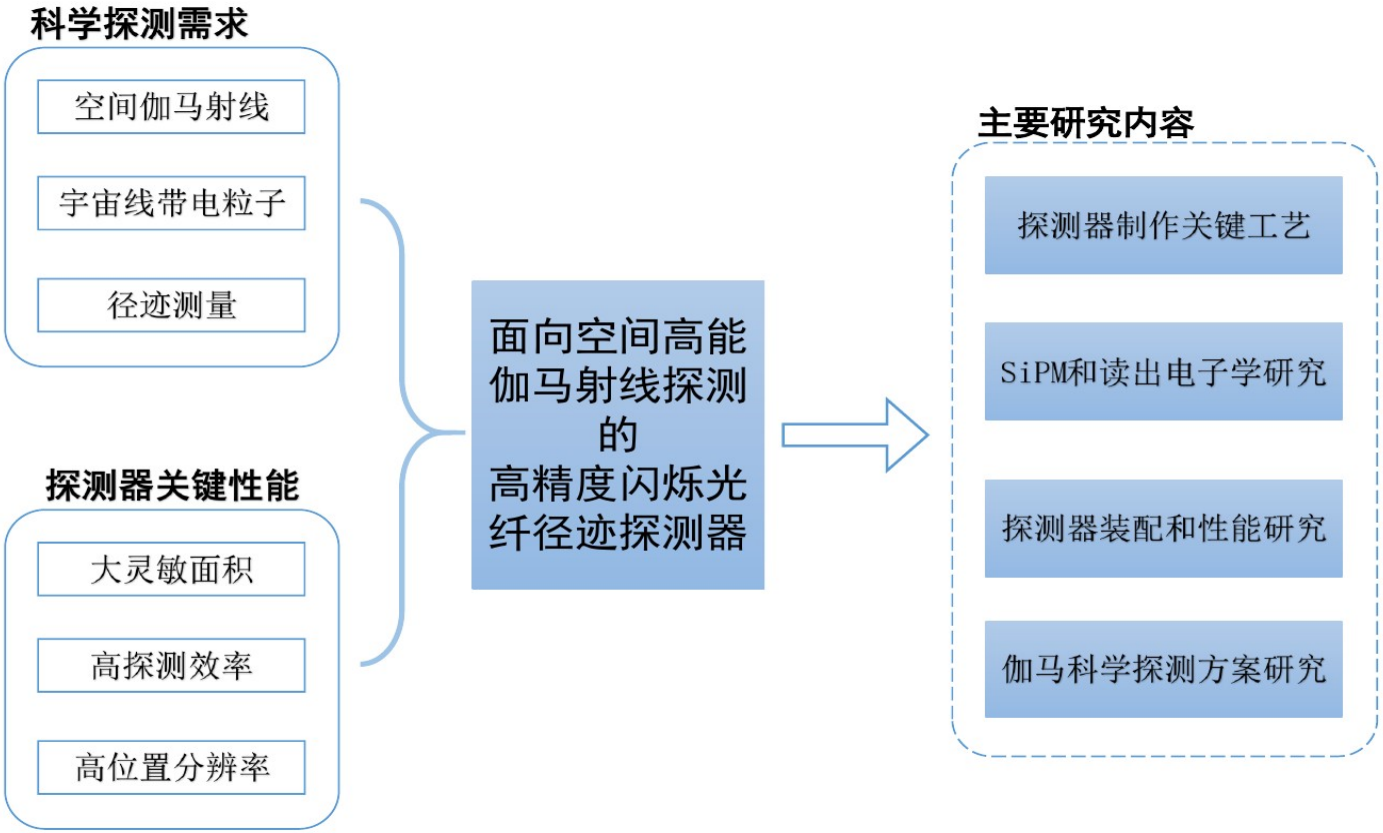
唯一由外方负责的探测器，我国在该技术领域存在缺口

在全国产化研制背景下， 5 面 FIT 替换为 仅顶面硅微条，伽马观测能力显著降低

SciFi 国产化

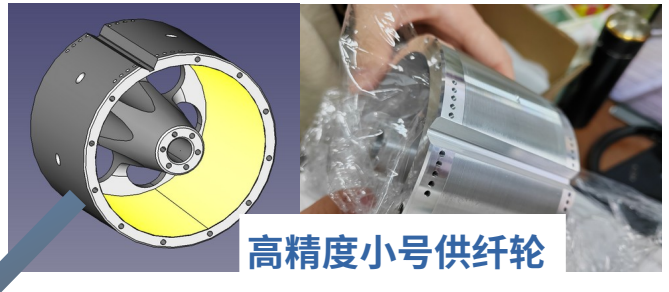


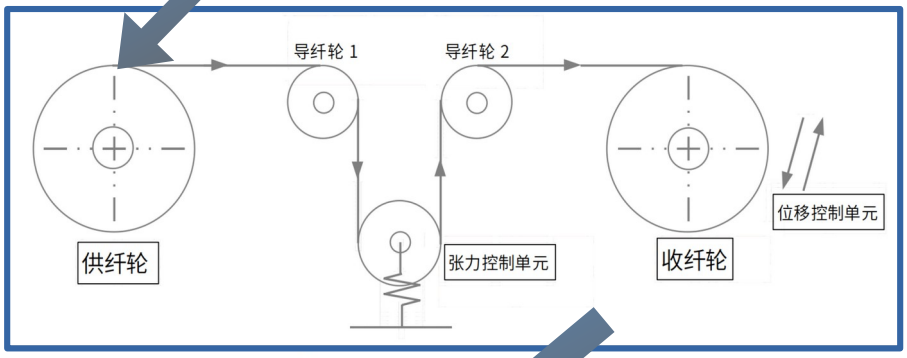
- 高精度 SciFi 探测器，在我国未来的空间和地面粒子探测项目中有广阔的应用前景
- 研制技术掌握少数欧洲研究单位内，国际合作容易受到地缘政治的影响
- HERD 项目中，中方人员从 **2017 年开始，深度参与 FIT 软硬件工作**，在探测器调试和束流实验等方面积累了宝贵经验
- HERD 全国产背景下，高能所团队于 **2023 年 12 月正式启动国产化的探索**

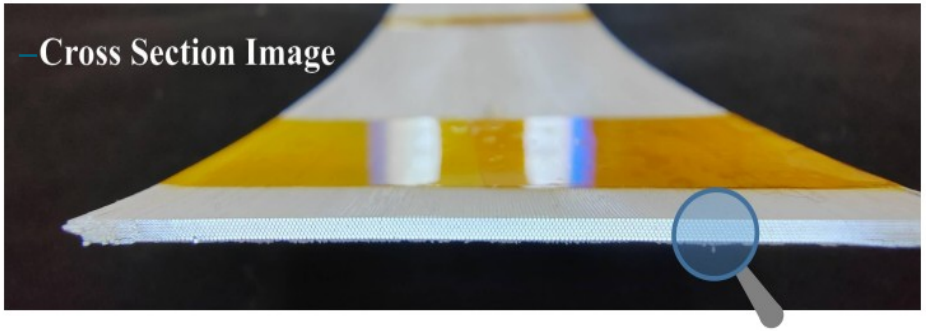


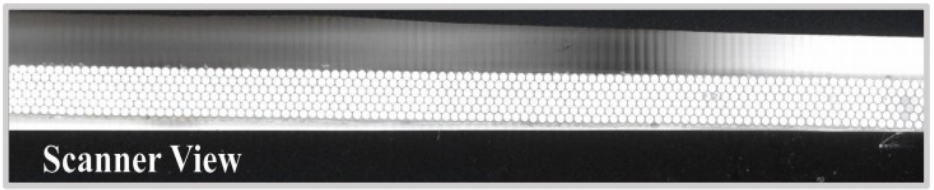
光纤垫制作关键工艺

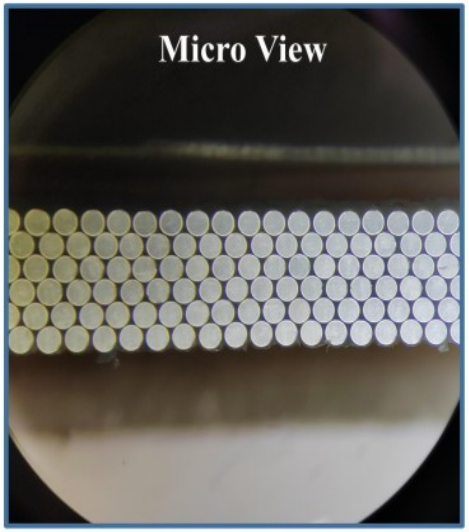
- 闪烁光纤垫 (Fiber Mat) 是由 数千根 250um 直径的闪烁光纤堆叠而成的阵列
  - **制作难点在于精确控制光纤之间的间距**
    - 位置涨落严重影响探测器响应和一致性，影响分辨率和探测效率
  - 研制 **光纤绕制设备**用于光纤垫的制作
    - 分解 供纤、收纤、排线控制 和 张力控制 4 个关键模块
    - 调研和摸底 国内厂家的多类型控制设备
  - 搭建缠绕设备，**小尺寸光纤垫试制和迭代**
    - “两步走”，先普通光纤，后闪烁光纤







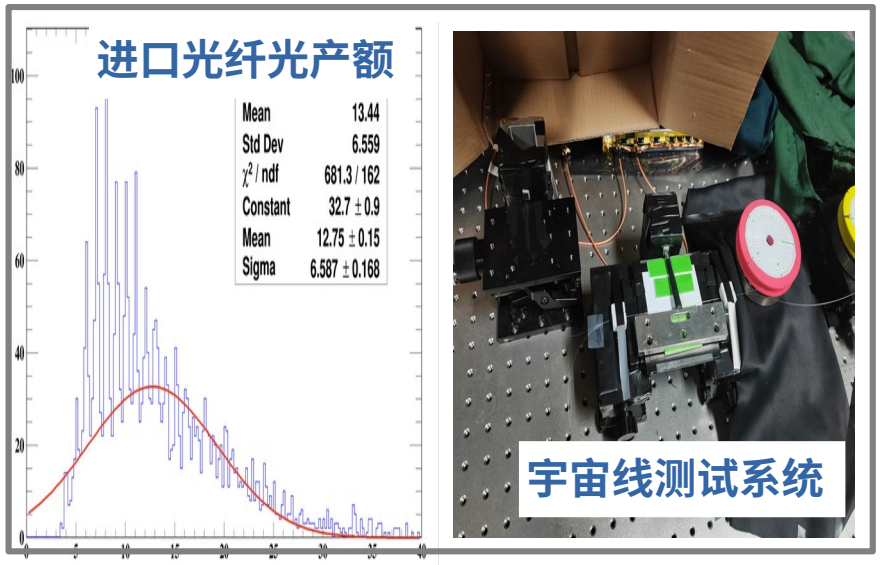




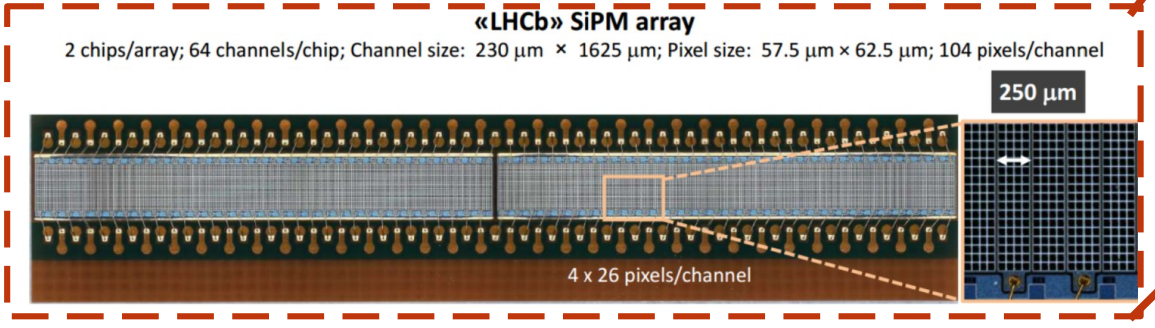


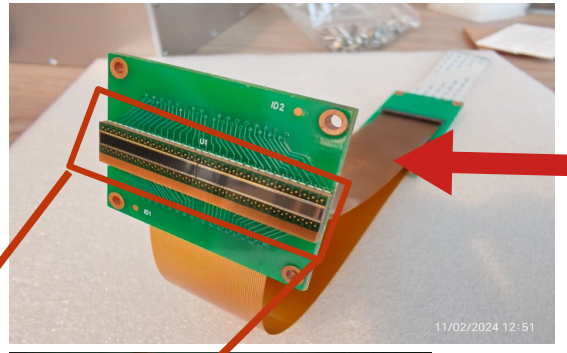
光纤性能研究和 SiPM 电子学

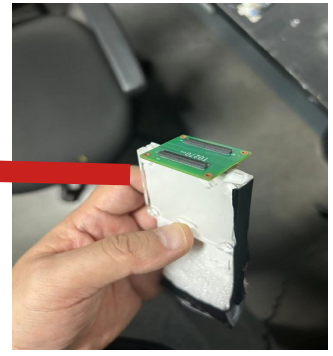
- **搭建实验室测试系统，研究闪烁光纤的光输出性能**
  - 放射源 Sr90 和宇宙线，模拟高能宇宙线粒子穿过
  - SiPM 读出塑闪条，组成望远镜系统，触发不同位置事例
  - 少量通道测试，桌面式数字化仪读取多路信号
- 采购 并 测试日本进口 Kuraray 光纤
  - 三根光纤重叠， 13 p.e. @ 30cm ，符合预期
- 利用该平台对国产光纤开展测试



- 采购 SiPM ，**定制电子学**背板和测试转接板
- **大批量的 SiPM 通道读出是另一难点**，需要专门 ASIC
  - CITIROC 芯片， HERD PSD 分系统应用
  - IDEAS 公司 VATA64 ， DAMPE 硅径迹仪应用
  - 西班牙 beta asic, HERD FIT 使用





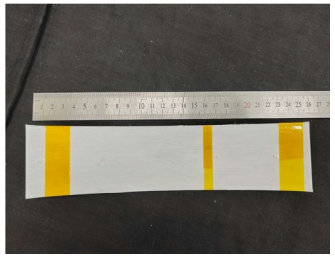




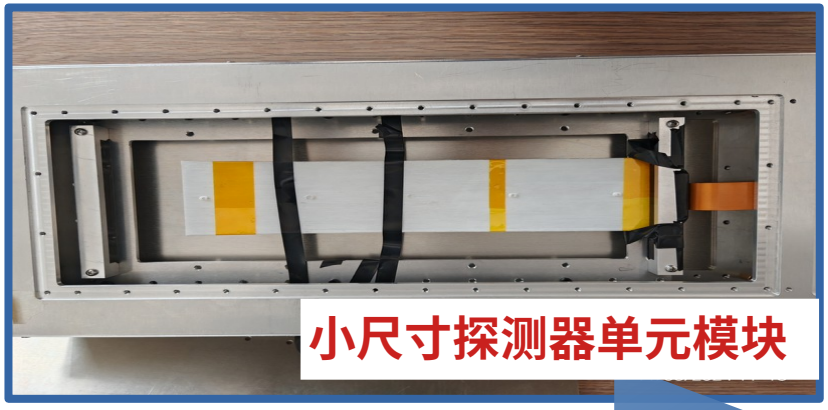


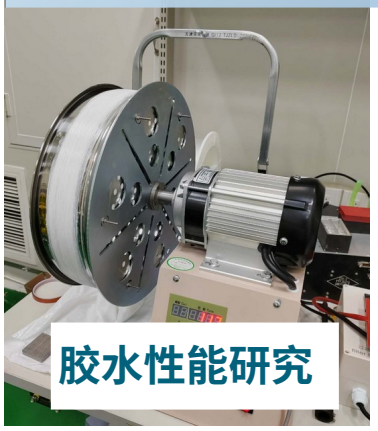
探测器全组件装配

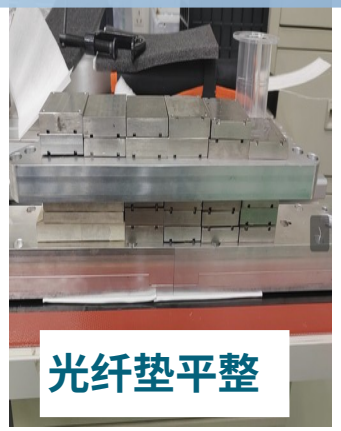
- 全组件装配对应从 光纤垫 到 探测器单元模块的集成
  - **光纤垫预处理，耦合 SiPM，电子学连接，全系统机械装配**
  - 其中，对光纤垫经历的一系列预处理工序包括：
    - 单元平整化（以避免形变），精细研磨（以提高光传输效率）；
    - 端面检测（以排除断纤和缺陷），基于 OpenCV 编写质检程序
  - 光纤垫固化和平整化，对温湿度和操作时间提出要求
- 充分借鉴 HERD 量能器团队处理波长位移光纤的经验，定制一系列工装，通过实践摸索关键工艺参数

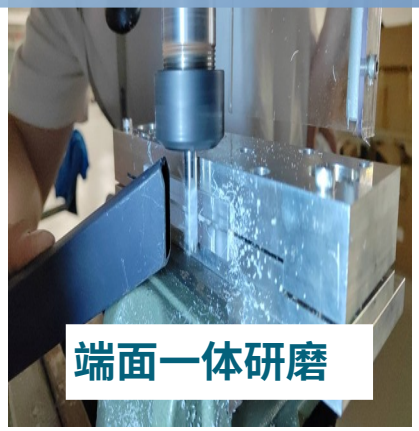


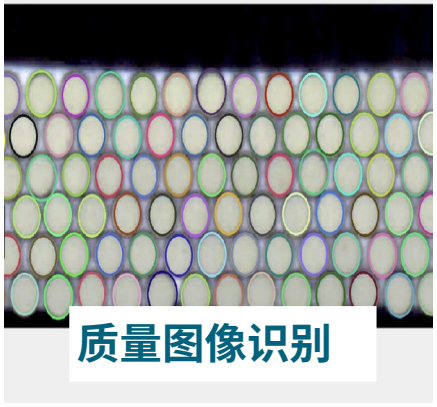














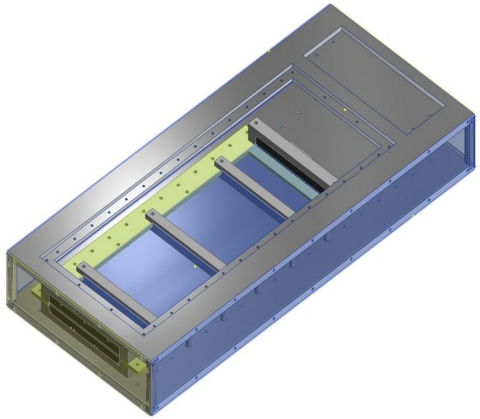
从 0 到 1，全流程开展光纤探测器研制，完成小尺寸模块制作 @2024.08

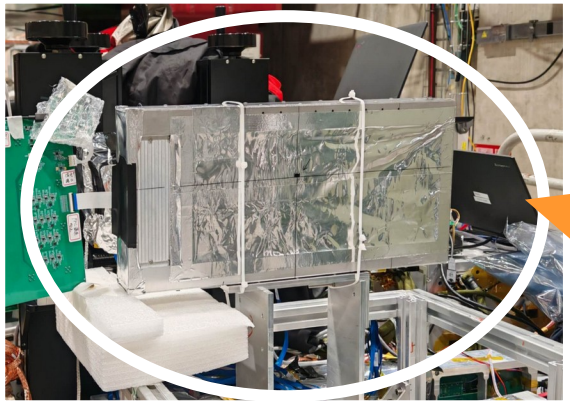
探测器性能评估 -24 年束流实验

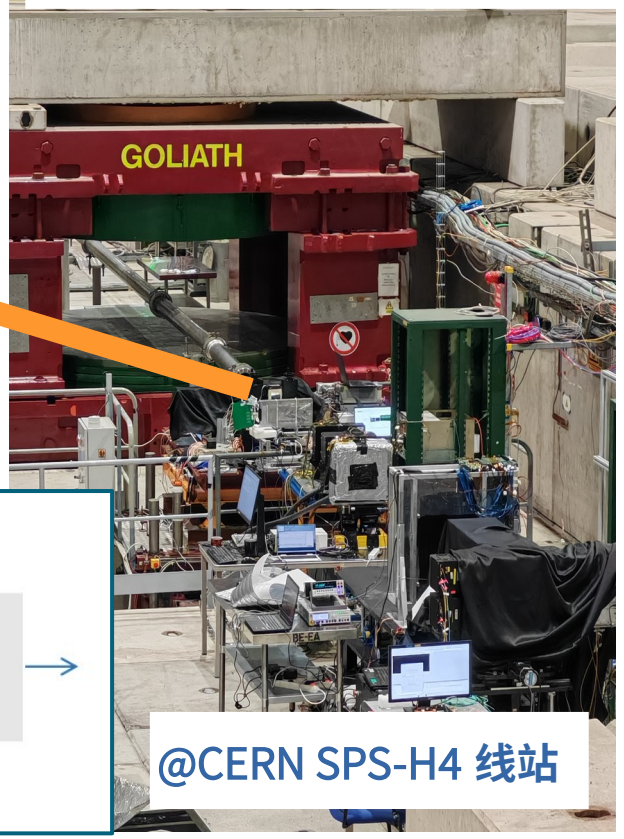
第一版单元模块组装完成， 11 月赴 CERN 参加束流实验，**利用高能粒子束流初步评估性能**

- 重离子束流，铅核打靶， 330GeV/c
- SciFi 探测器位于束线上游， DT 读出 SiPM 16 通道，逐事例采集脉冲信号
- AMS-L0 升级， BeamMonitor(BM) 探测器参与，位于 SciFi 下游
- 中欧团队多种探测器统一启停，重建粒子信息（电荷、位置、能量）

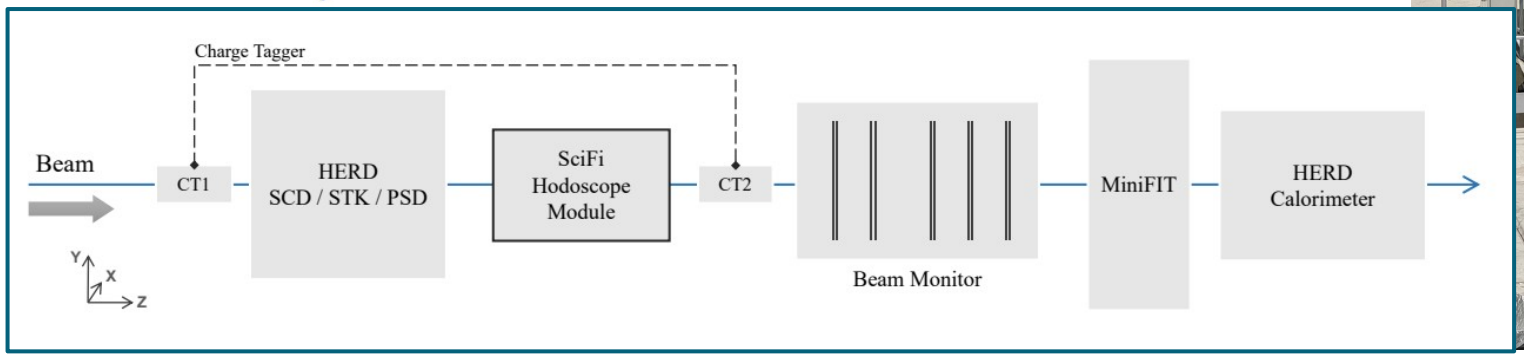
参见徐子骏 / 项治宇报告
《基于硅微条探测器的束流望远镜研发和测试应用》





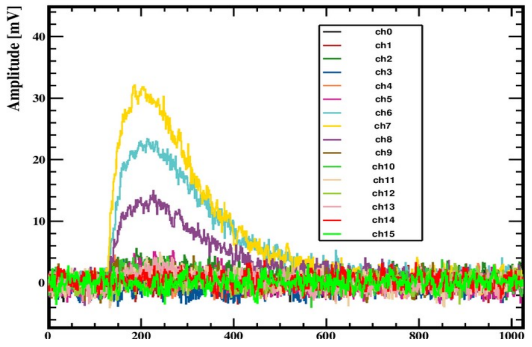


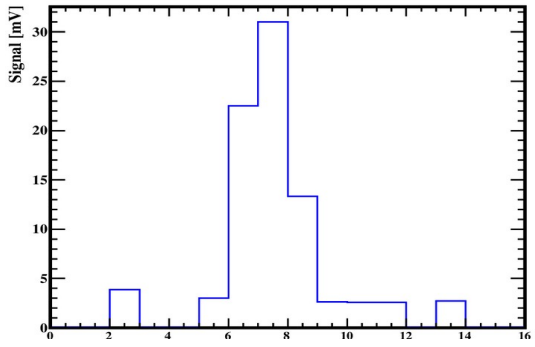
@CERN SPS-H4 线站

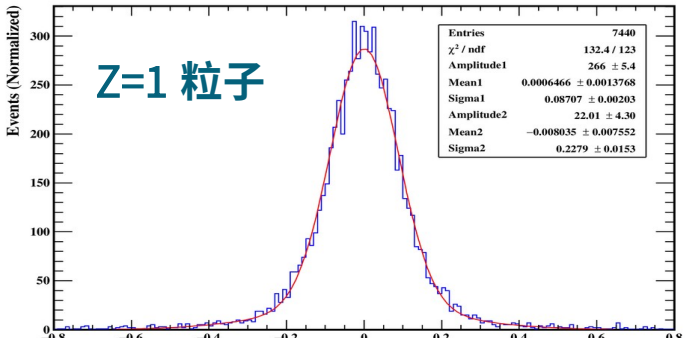


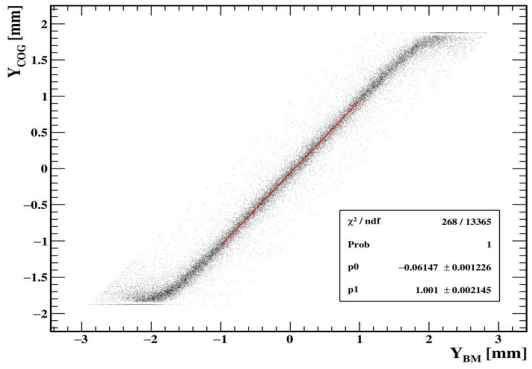
BT24 数据分析和结果

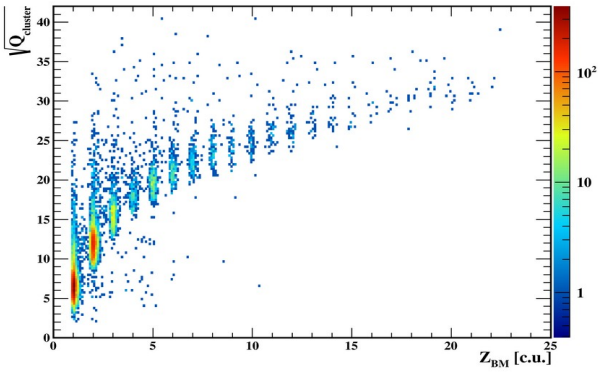
- 先后应用“波形分析”和“信号簇找寻”算法，重建束流在 SciFi 探测器上的击中位置
- 利用 BeamMonitor 重建电荷和径迹信息，筛选 Z=1 和 Z=2 粒子，校准 SciFi 相对位置关系
- 分析结果显示：对于 **Z=1 粒子**，扣除 BM 径迹外推贡献，**位置分辨率 71.3μm，效率 99.4%**

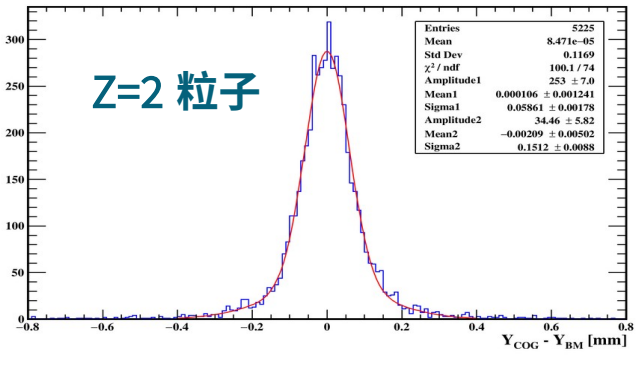












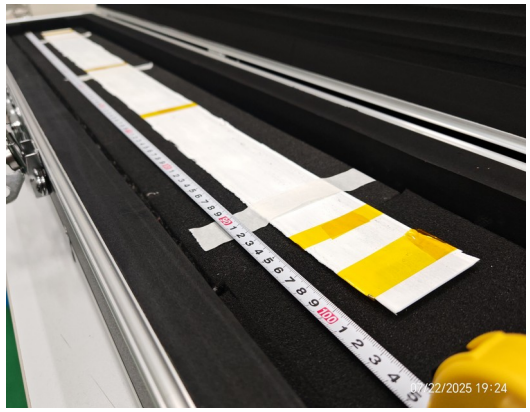
利用 CERN 束流实验，初步验证了 光纤径迹仪单元模块 国产化的可行性

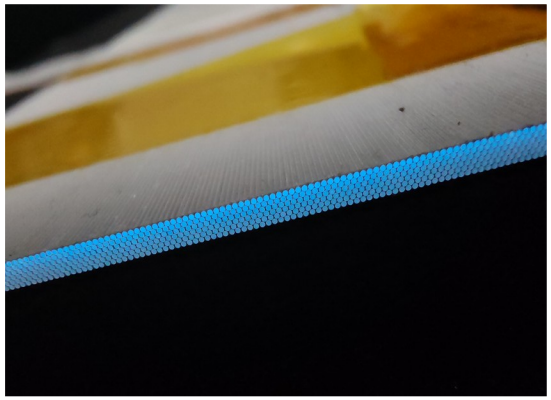
详见 *Beam test of a SciFi-based muon hodoscope module for HERD calibration on ground.* *Https://doi.org/10.1007/s41605-026-00690-5*

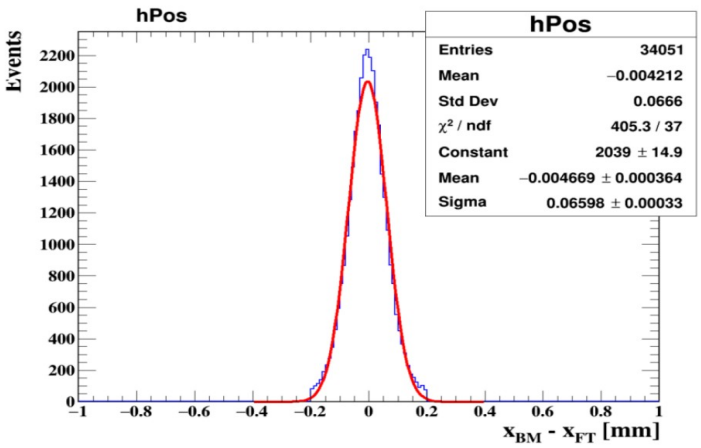
探测器性能评估 -25 年束流实验

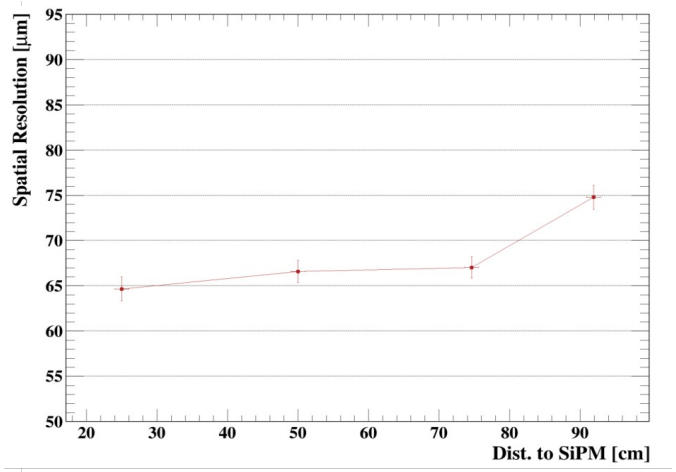
完成第二版单元模块的研制， CERN SPS&PS 线站 束流实验， 7-9 月

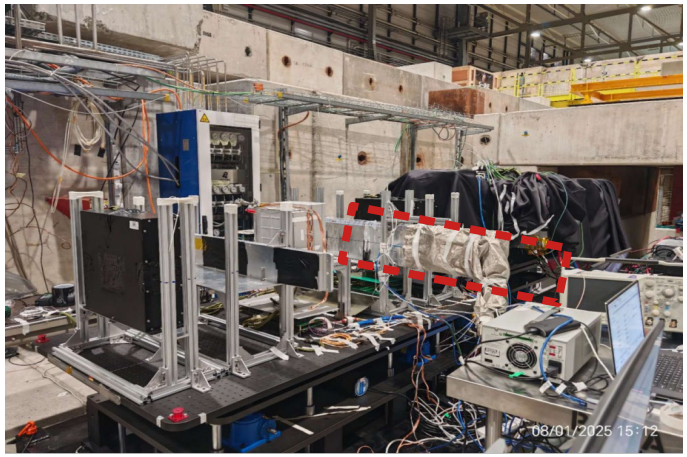
- 粒子种类 & 能量：质子 (350GeV) 、电子 (20-250GeV) 、 pion(10GeV) 、 muon(5GeV)
- **SciFi 探测器束流样机模块更新：**
  - 25cm 替换为 **1 米长光纤垫**
  - 基于 **CITIROC ASIC** 的读出电子学
- BeamMonitor 团队参与，与 24 年相同
  - SciFi 位于两个 BM 机箱中间
- 开展位置扫描，对比不同点位的性能差异









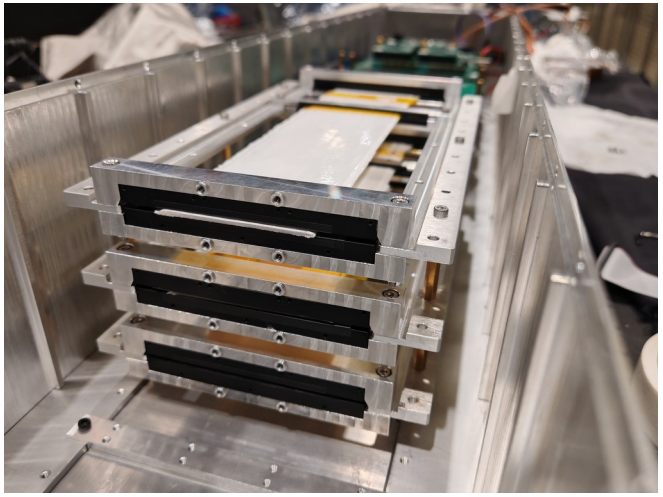


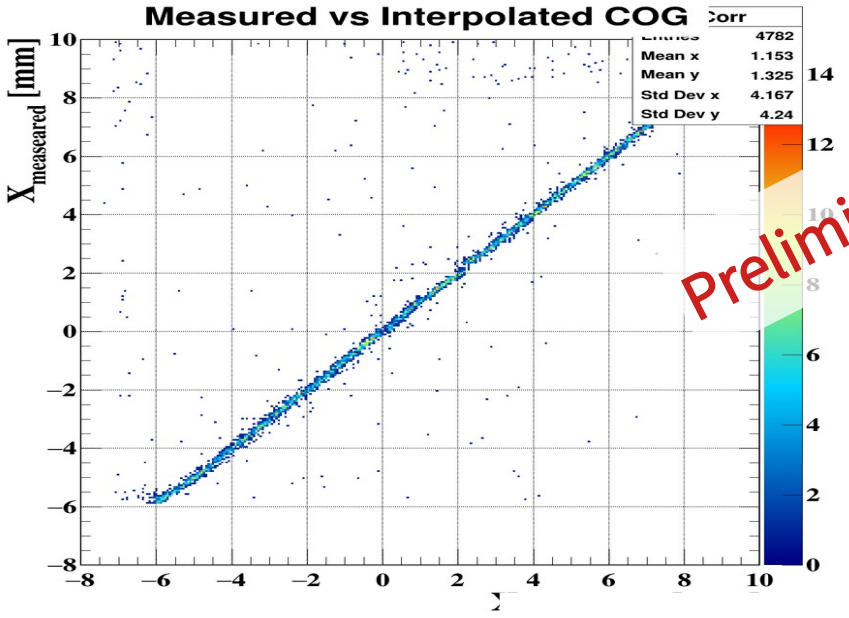
1 米长单元模块，位置分辨率 64.7 μm@25cm(近端) ， 74.8 μm@92cm(远端)

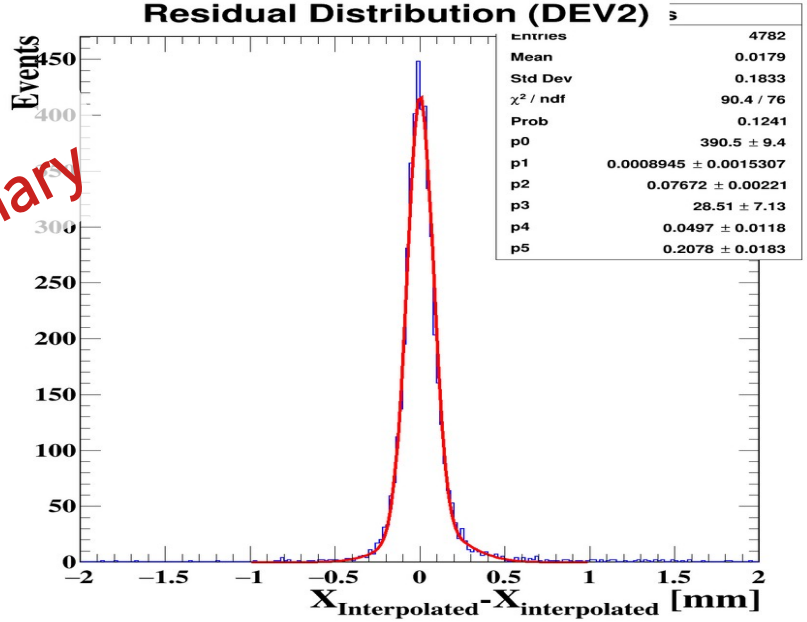
探测器性能评估 -26 年束流实验

完成第三版单元模块的研制， CERN PS/SPS 线站 ， 4/8 月， pion&ion

- **SciFi 探测器束流样机模块更新：**
  - **升级为 mini Tracker ， 25cm 短模块， 4 层**
  - **CITIROC 电子学，读出通道 64 路**，覆盖面积增加
- 初步结果
  - nimiTracker 中心层的插值残差为 77μm (@mixed heavy ion)
  - **预估单层位置分辨率 54μm** ，与之前实验结果相符
  - 4 层 Tracking ，并与 BM 联合分析进行中，综合评估 miniTracker 的性能







SciFi 国产化时间线

2015 年 HERD FIT 方案提出

2017 年
参与软硬研制

2022-2023 年
HERD 全国产化

2023 年底
SciFi 探测器
开始国产化调研

2024 年 8 月
国内首次完成
第一版样机

同年 11 月利用
CERN 束流完成
可行性验证

2025 年中完成
第二版 1 米长
单元模块样机

同年 7 月束流
验证关键性能

2026 年中完成
第三版样机模块
mini-Tracker

今年 8 月束流
实验，研究
径迹测量性能

下一步：
更大规模尺寸
更多读出通道
更大动态范围
时间测量功能
更多应用场景



HERD BT@SPS 2026.8

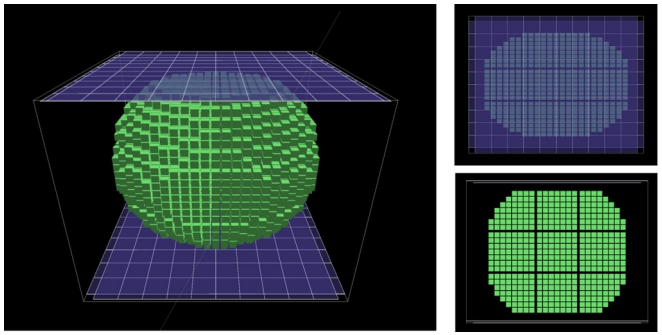

HERD BT@PS 2026.4

国产 1 米长
SciFi 探测器!

SciFi 探测器的国产化得到了高能所和 HERD 项目组的大力支持!

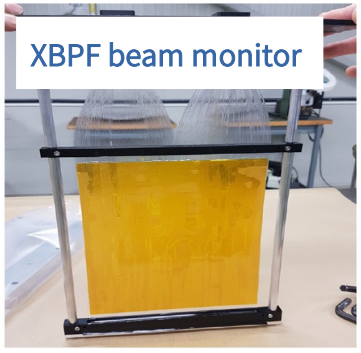
SciFi 探测器的应用

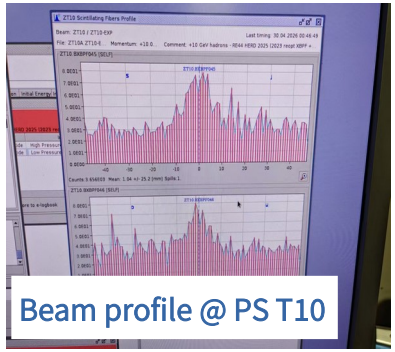
- **面向 HERD 地面标定需求，搭建基于 SciFi 的大面积高精度宇宙线描迹平台**
  - CERN Long Shutdown3, 26 下半年 -29 年无束流
  - HERD 所有探测器系统都需要建立详尽的标定数据库，
    地面宇宙线缪子可作为束流标定的重要补充
  - SciFi 描迹仪，上下各有 1 个 XY 大层， DUT 至于中间

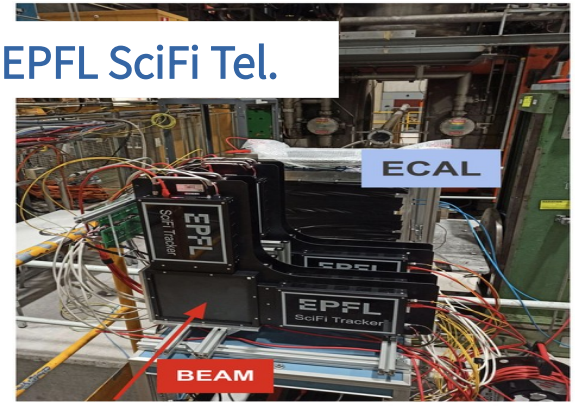


- **束流测量应用**
  - **CERN PS/SPS 束线监测， XBPF&XBTF**
    - 替换老化的气体探测器，如多丝正比室
    - 1mm 光纤，覆盖面积 20 x 20 cm^2
  - **束流望远镜， EPFL SciFi Telescope**
    - 主要服务探测器束流实验 (LHCb, SND 等)
    - 4 个 XY 探测模块； 0.25um 光纤，覆盖面积 13 x 13 cm^2
  - **放疗过程中（质子、重离子、中子）的束斑监测**





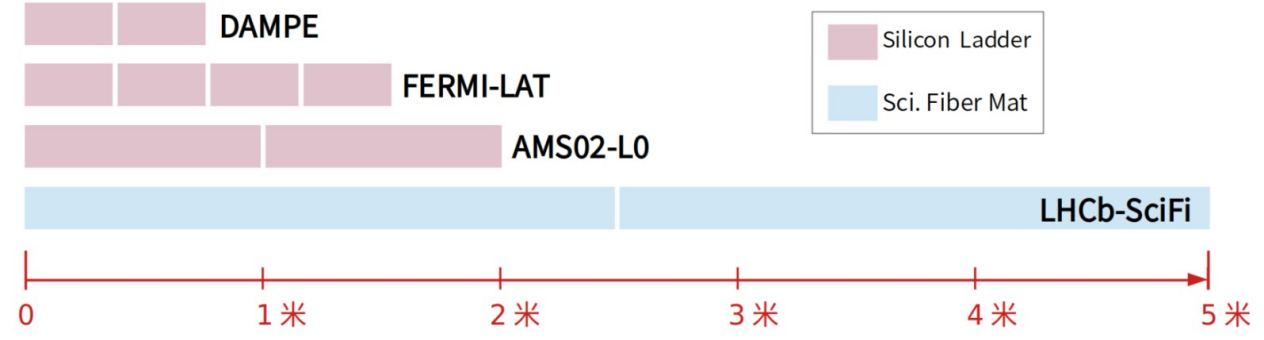


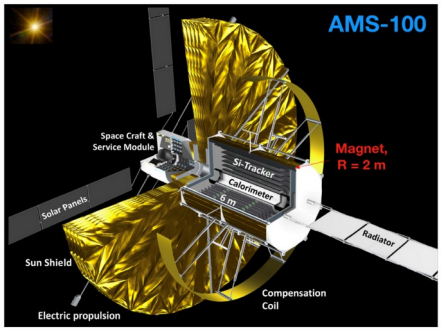


- 可以拓展到其它高能粒子探测领域，如地面缪子成像

总结

- 基于 SiPM 读出的 SciFi 探测器，由于结构紧凑、高精度、大面积铺设等优点，在未来空间和地面粒子物理实验，**以及束流诊断**中有广阔的应用前景
- HERD 全国产化背景下，基于国际合作经验，高能所团队**首次完成 SciFi 探测器模块的自研**，并利用 3 次 CERN 高能束流**验证了国产光纤径迹仪模块的性能，**位置分辨率优于 75μm，与 LHCb 一致
- SciFi 当前性能虽**较硅探测器仍有一定差距**，但其具有**成本低、结构灵活、易于大面积扩展等优势**，且随着光纤材料、读出器件和电子学的优化，**性能仍具备进一步提升潜力**



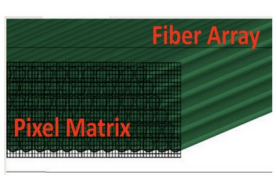


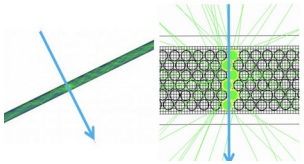
后续将继续推进 SciFi 探测器和电子学升级，欢迎束流测试相关方面（如径迹和形貌测量、快触发？）的指导和合作！

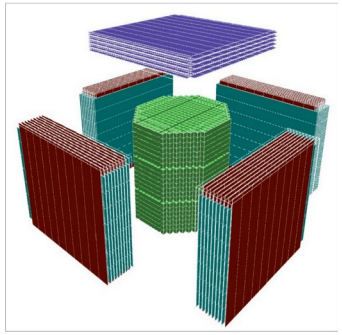
再次感谢 高能所王建春老师 Beam Monitor 团队、瑞士 FIT 团队的大力支持和指导！

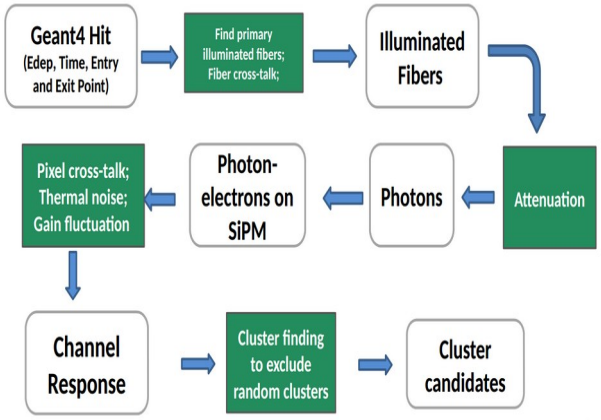
科学探测方案研究

- **探测器模拟和数字化**
  - 先后开发了针对探测器模块的光学模拟程序和**参数化快速模拟程序**
    - 能量沉积到 SiPM 电子学响应转换的全流程数字化
    - 模拟结果已得到了束流实验的验证
    - 拓展至 FIT 全系统物理性能评估和优化
    - 该程序并入 HERDOS 离线分析框架

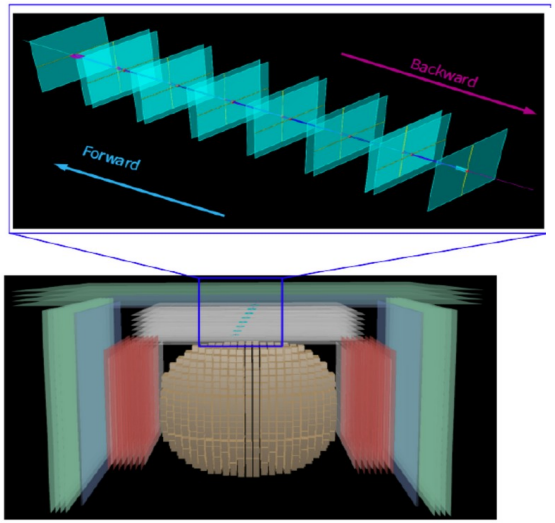


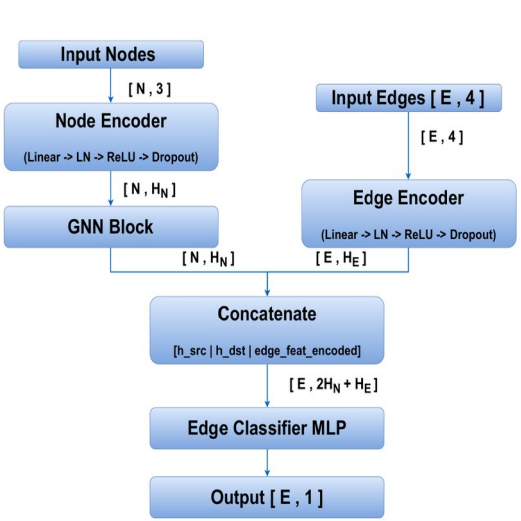






- **物理事例重建**
  - **信号簇重建**
    - 从通道响应到物理击中
    - 双阈值比较算法
  - **基于卡曼滤波的径迹重建**
    - 第三方软件包 Genfit 开发
    - 已并入 HERD 离线分析框架
  - **基于图神经网络 GNN 的径迹重建**
    - 将 Hit Finding 转换为图的边分类任务
    - 利用探测器响应构建图结构数据





快速模拟程序和基于卡曼滤波的径迹重建算法已经在 HERD 物理性能研究中成熟应用