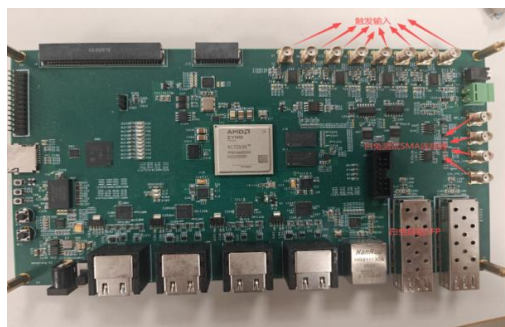
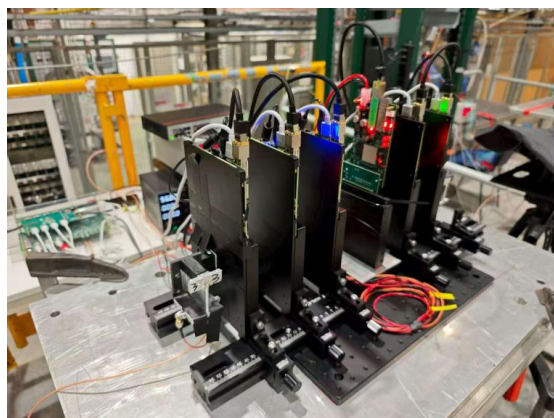


硅像素束流径迹测量的通用化方案 及TaichuPix3原型望远镜测试



刘义
郑州大学
2026/10/10

粒子探测器束流验证的高位置精度标定平台

EUDET束流望远镜

- 6层Mimosa26平面及读出电子学+FEI4像素平面
- 机械平台：滑动导轨，冷却系统
- 触发硬件：AIDA2020-TLU 触发逻辑单元
- 配套DAQ软件
- 配套数据分析软件

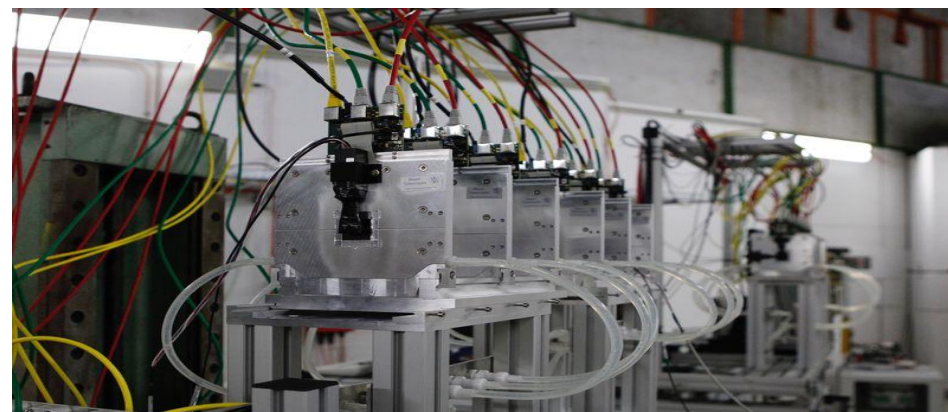
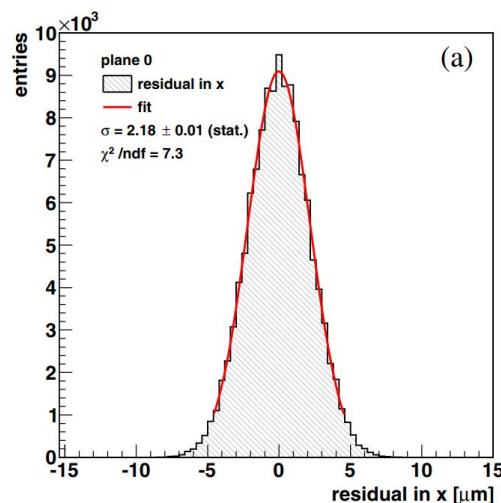
提供了高精度位置测量：

- 小于3 μm 的径迹分辨

Mimosa26不足点：

- Rolling shutter模式
- 较高的噪声水平
- 较高的开窗时间 (112.5 μs)

Jansen, H. et al. Performance of the EUDET-type beam telescopes.
EPJ Techn Instrum 3, 7 (2016).



EUDET束流望远镜@DESY



CALADIUM @ SLAC in Stanford, USA



DURANTA @ TB22

DATURA @ TB21



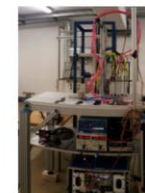
ACONITE @ SPS, H6A



AIDA @ SPS, H6B



AZALEA @ PS, T10



ANEMONE @ BONN / ELSA



SI LAB



郑州大学
ZHENGZHOU UNIVERSITY

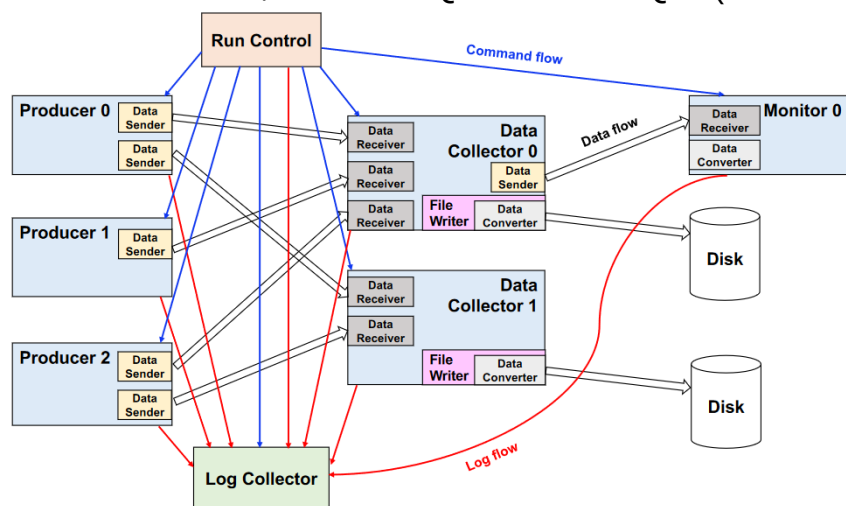
EUDET束流望远镜的7个复制

EUDET束流望远镜的软件接口

EUDAQ2数据采集软件

EUDAQ2是为EUDET束流望远镜专门开发的分布式跨平台DAQ软件构架。

2016-2018, EUDAQ->EUDAQ2 (Yi LIU@DESY)

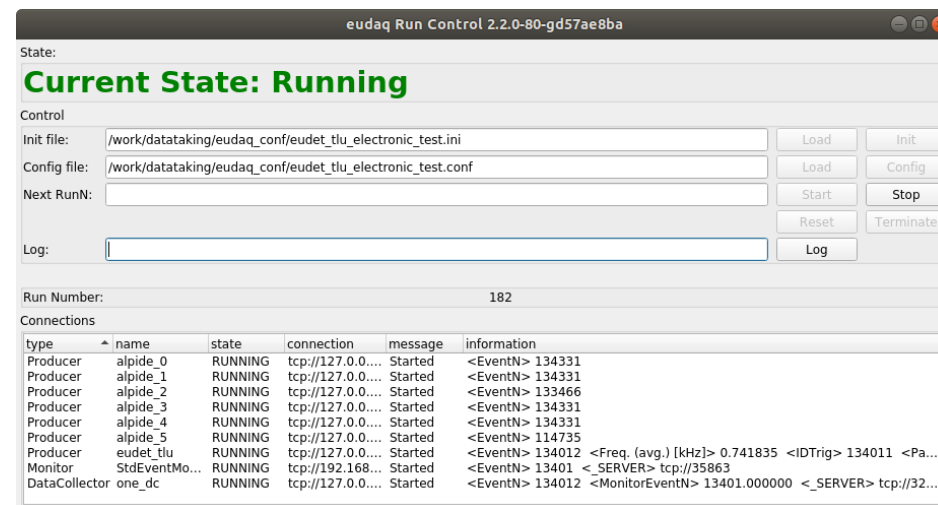


EUDAQ2数据控制流

开放代码: <https://github.com/eudaq/eudaq>

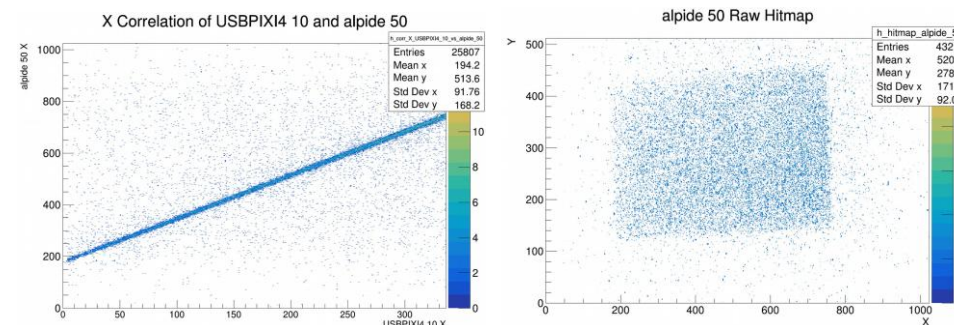
EUDAQ2 User Manual: AIDA-2020-NOTE-2018-001

Y. Liu *et al* 2019 *JINST* **14** P10033



EUDAQ2 Run Control 中心控制界面

EUDAQ2数据监控, 需要在线实时提供给用户



击中位置的层间关联

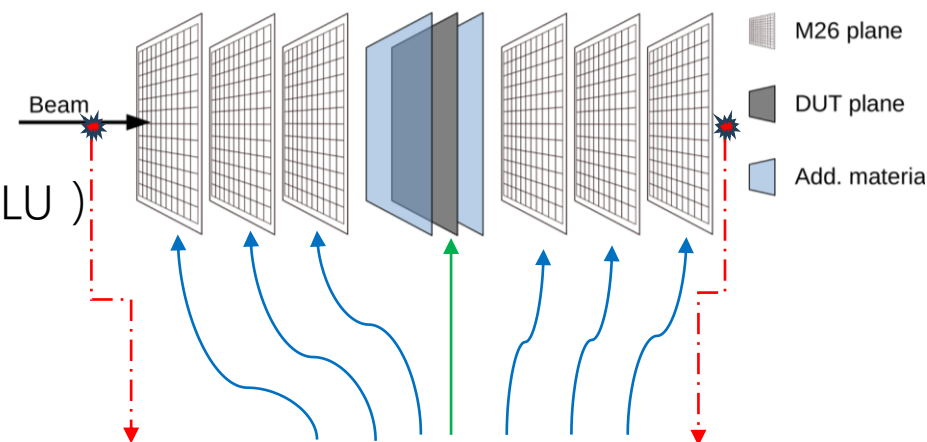
击中位置累计

EUDET束流望远镜的硬件接口

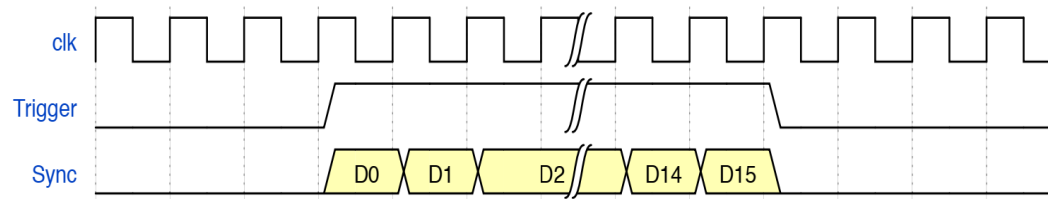
触发逻辑单元

触发逻辑单元 用于全局触发同步 (Bristol University, AIDA2020-TLU)

- 输入接受多路塑料闪烁体击中信号
 - 可配置的阈值电平
 - 可配置的输入延迟
 - 可配置的输入脉冲展宽、
- 触发符合逻辑可配置
 - 可配置64种触发逻辑的组合
- 输出公共给束流望远镜和被标定设备 (DUT)
 - 任意输出端口独立配置触发协议
- 提供同步时钟输出
- 提供可调节塑闪PMT模块电源



AIDA2020-TLU



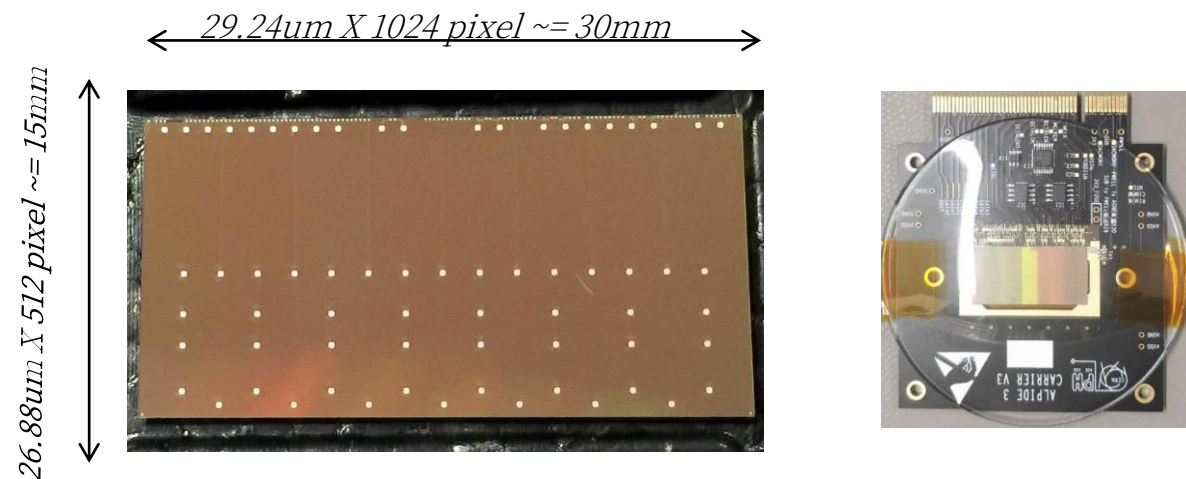
AIDA 模式触发协议, HDMI承载

ADEMIUM束流望远镜 (EUDET兼容)

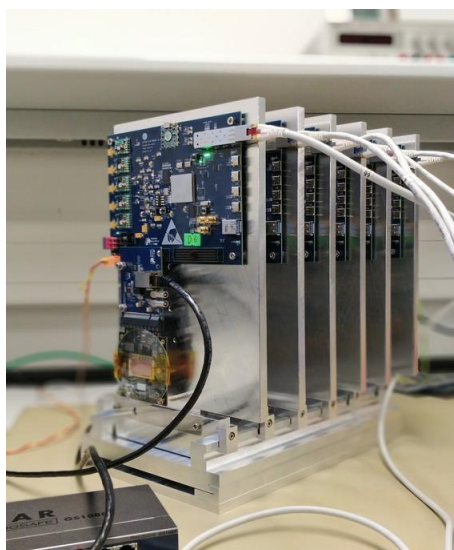
ADEMIUM束流望远镜是DESY EUDET束流望远镜的备份

选用了当时的现有芯片 ALPIDE

- 优势：低噪声，全局触发，高触发率 (50kHz)
- 劣势：~30um Pitch (1.5x mimosa)



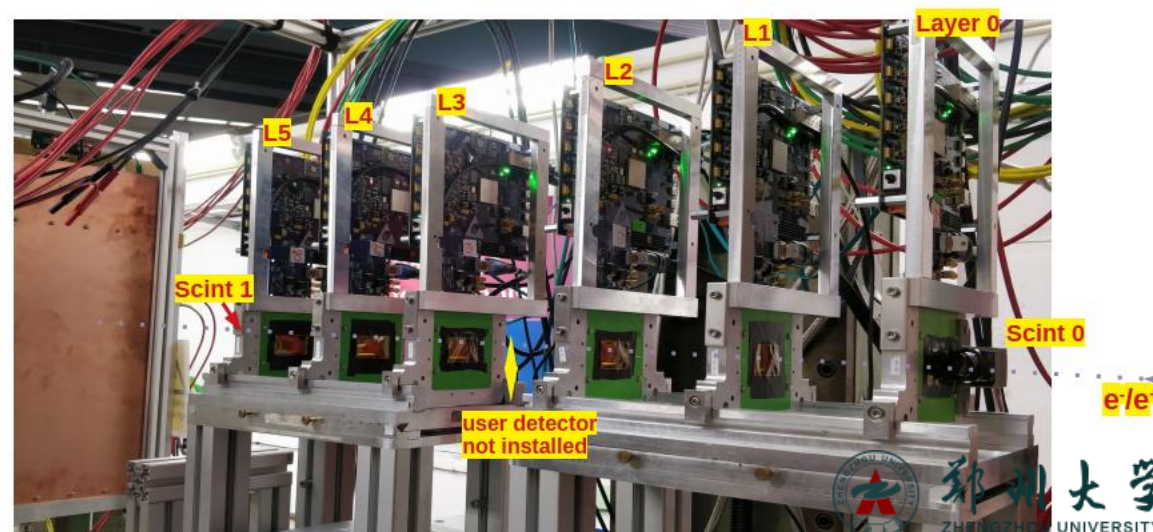
快速开发的ADEMIUM束流望远镜DAQv1原型 (2019)



DAQv1.0



DAQv1.1

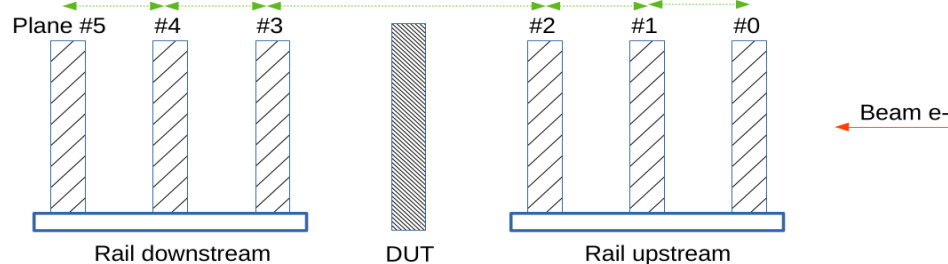


DAQv1.2

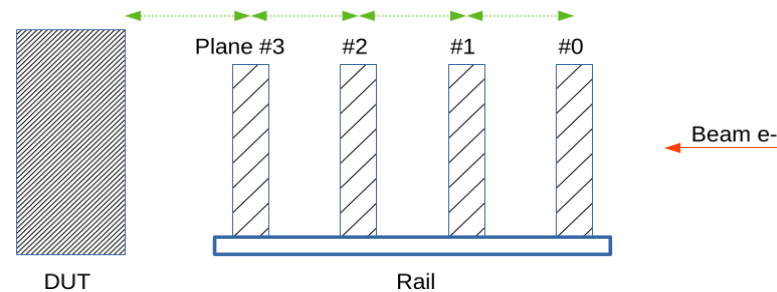
望远镜平面灵活组合（像素平面独立读出电子学）

束流望远镜分组摆放方式：双臂，单臂

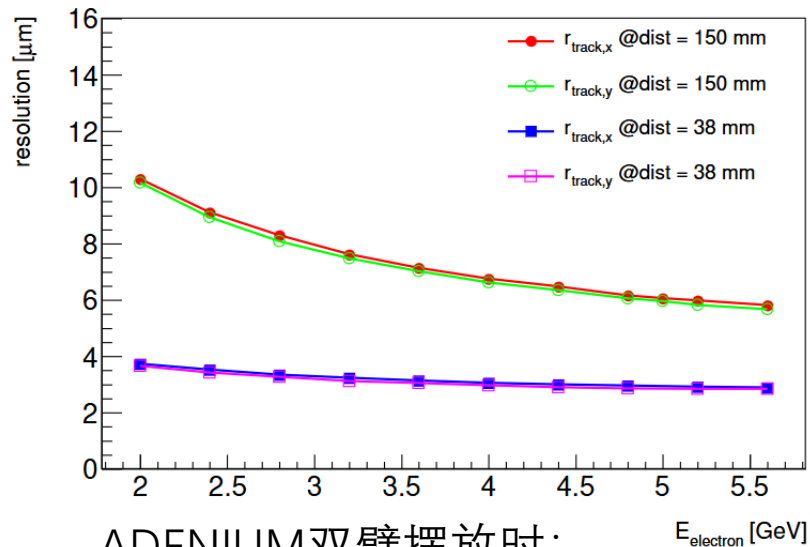
双臂



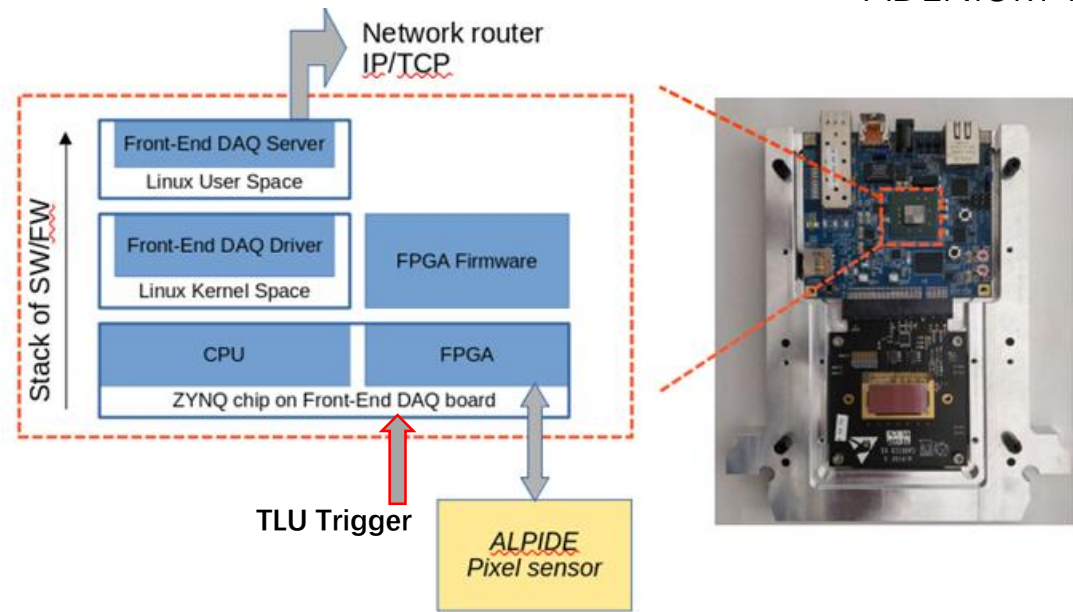
单臂



ADENIUM TEL DAQv2 @DESY

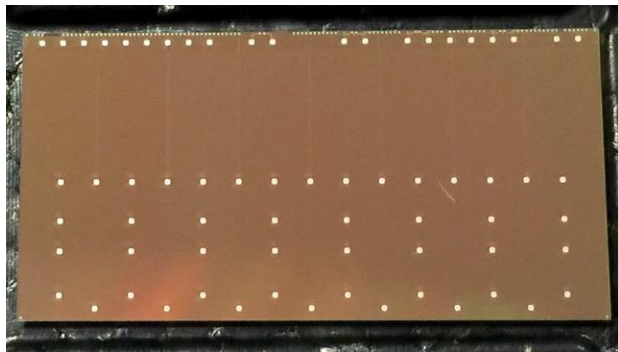


ADENIUM双臂摆放时：
寻迹位置分辨率与电子能量关系
最好~3um@6GeV



Yi Liu et al 2023 JINST 18 P06025

复用开发经验于TaichuPix3



ALPIDE

2019-2021
@DESY Yi LIU

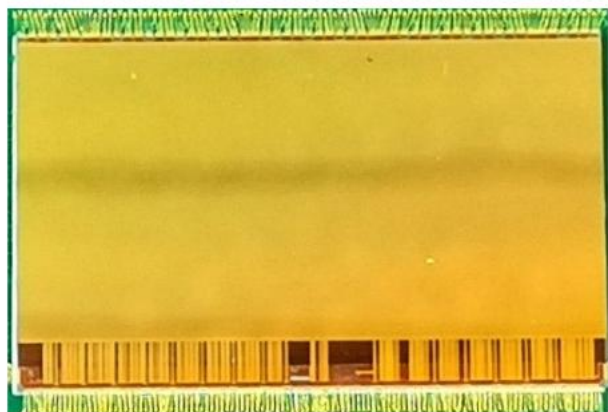
共同开发:
USTC



单片望远镜平面
ADENIUM DAQv2



ADEMIUM束流望远镜
(2021年 交付终端用户)



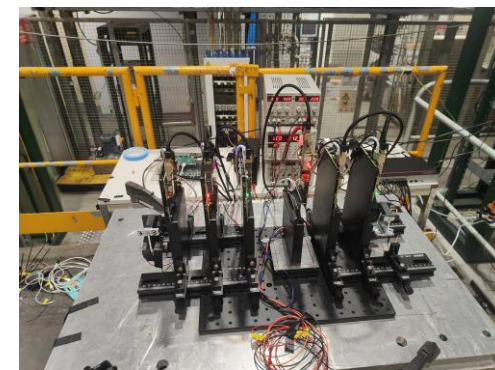
TaichuPix-3

开发工作策略

- 选用国内硅像素芯片TaichuPix3
- 参考TaichuPix3的测试用电子学
- 复用ADENIUM束流望远镜的开发经验
 - ✓ 全套读出电子学设计构架
 - ✓ 全套DAQ软件
 - ✓ 全套在线重建软件



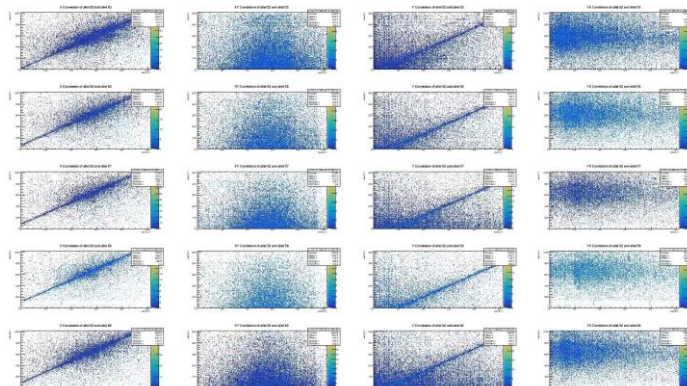
单片望远镜平面
2024年12月



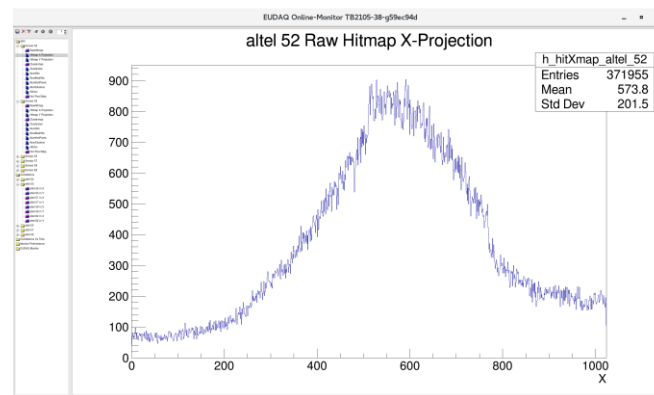
Taichupix3束流望远镜
2025年7月 @CERN SP5

CERN SPS束流测试

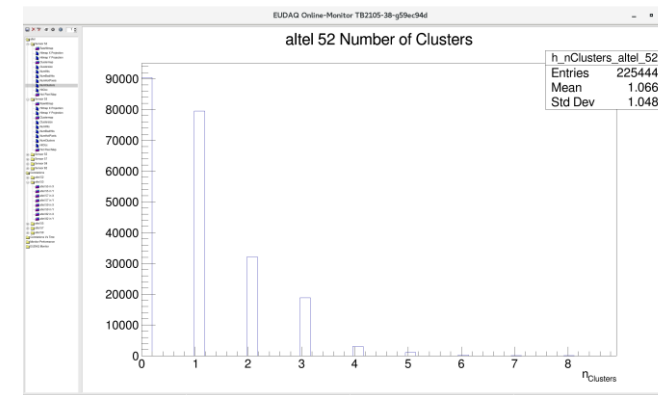
在线显示系统提供数据质量快速反馈--- 基于EUDAQ2



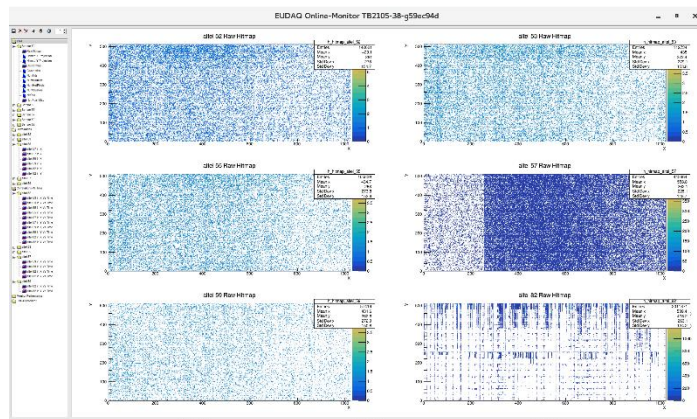
击中位置在平面间的关联 (correlation)



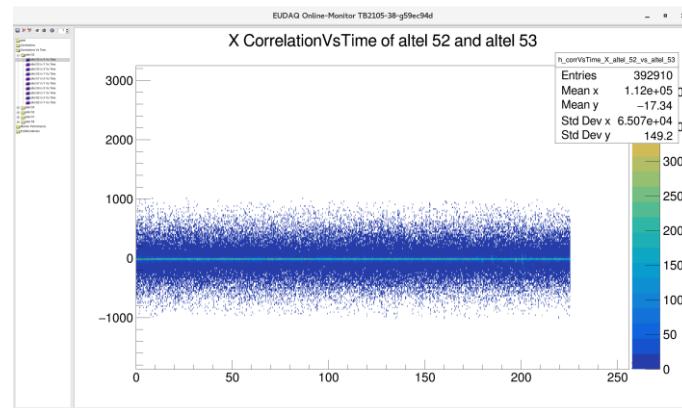
单平面击中位置统计



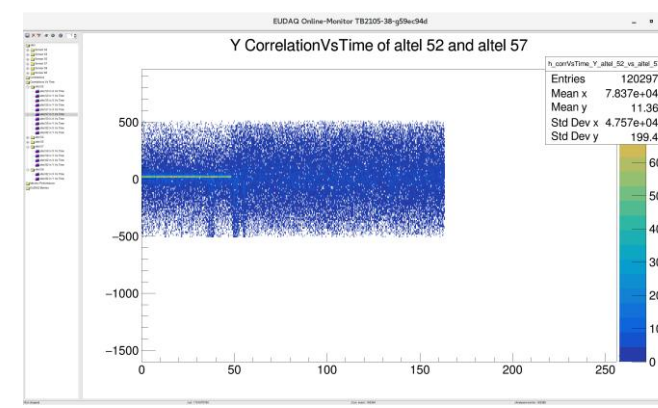
单平面单次触发的cluster统计



平面击中点累积显示
其中两个平面出错



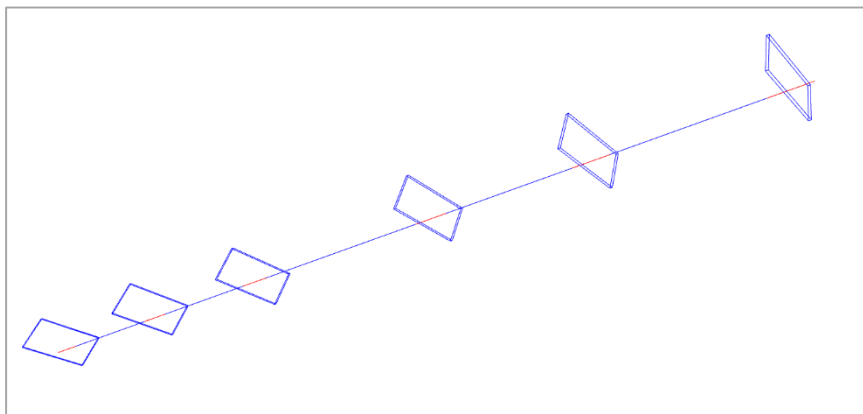
correlation随时间变化



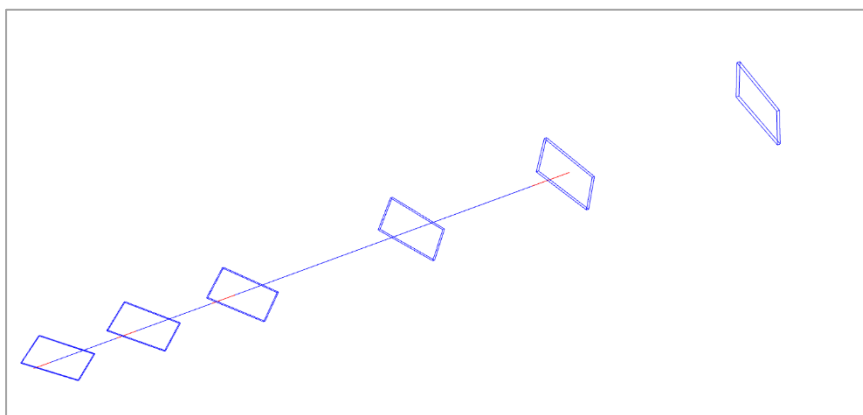
correlation随时间变化
(数据出错)

CERN SPS束流测试

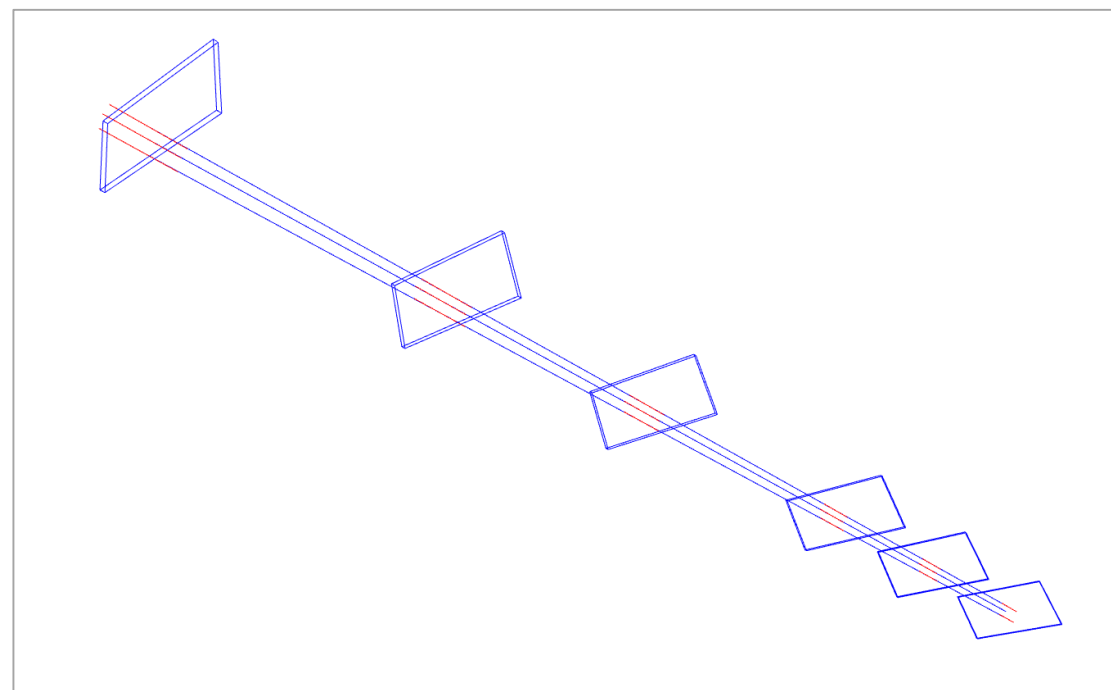
基于ACTS的径迹重建及在线显示



完整径迹（全部平面都有击中）



部分径迹（部分平面丢失击中）



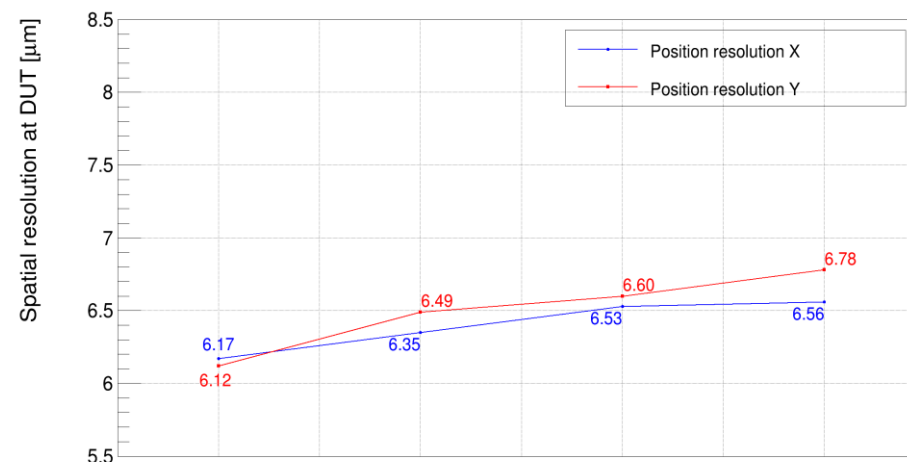
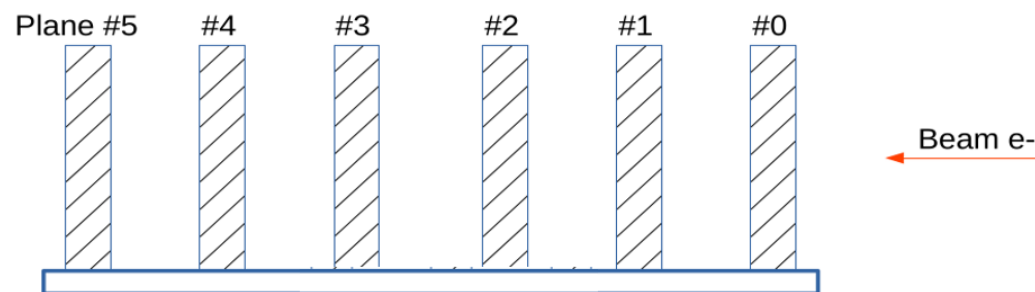
单触发多径迹

Source code repo: https://github.com/eyiliu/altel_acts

CERN SPS束流测试 (160GeV e-)

TaichuPix3望远镜的分辨

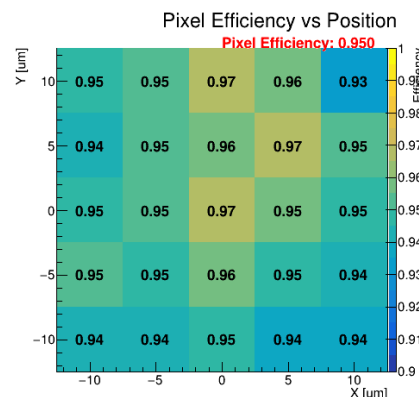
配置: 6个TaichuPix3平面, 用5个平面重建径迹, 匹配第6个平面 (DUT) 的击中 (3+ DUT + 2)



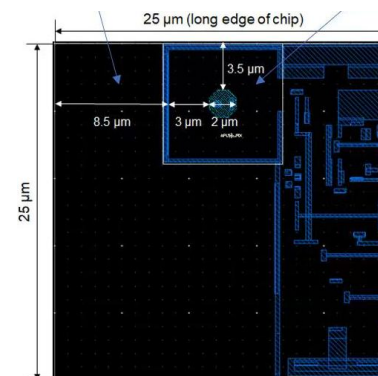
位置分辨与TaichuPix3阈值电压关系 X-ITHR

25um像素内的效率分布与版图对比

像素电极位置效率最高97%



像素内效率分布

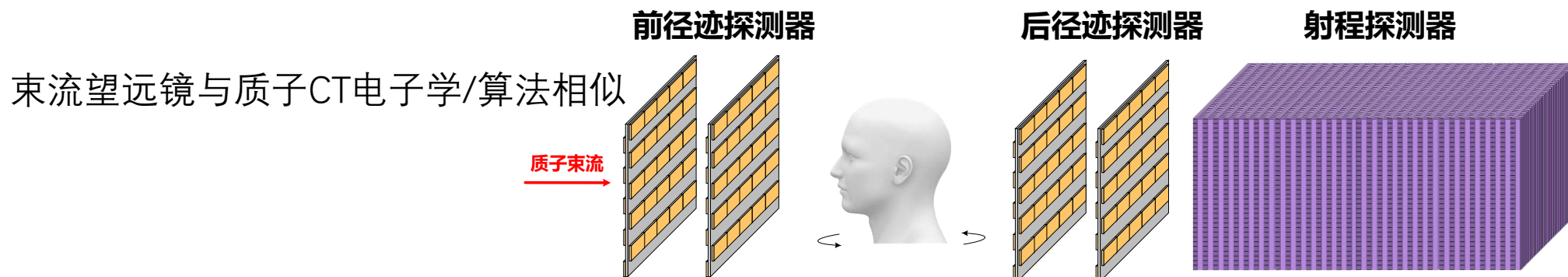
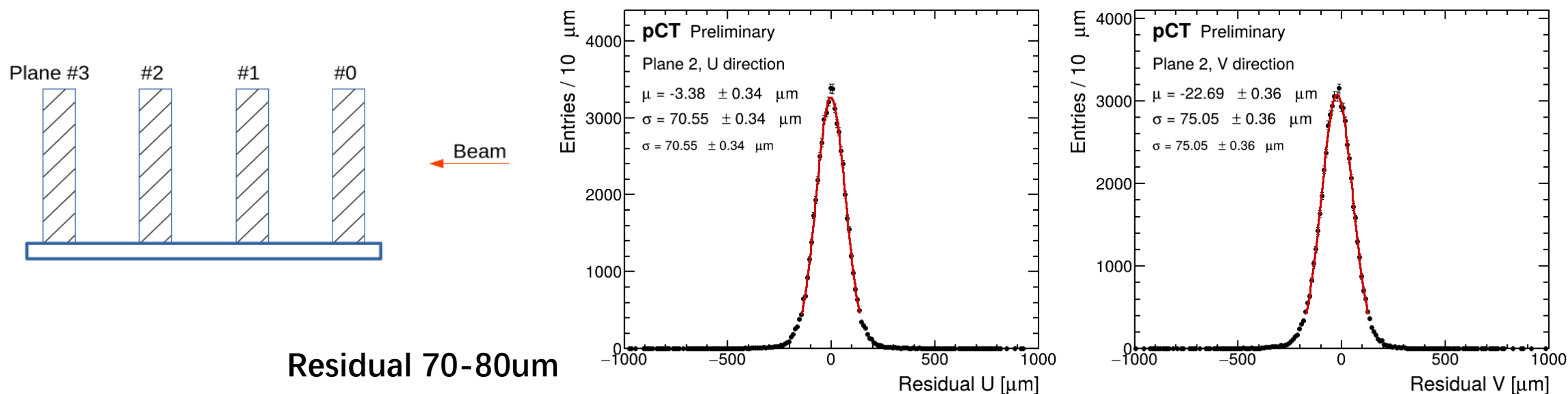


Pixel版图

原子能院束流测试 (100MeV 质子)

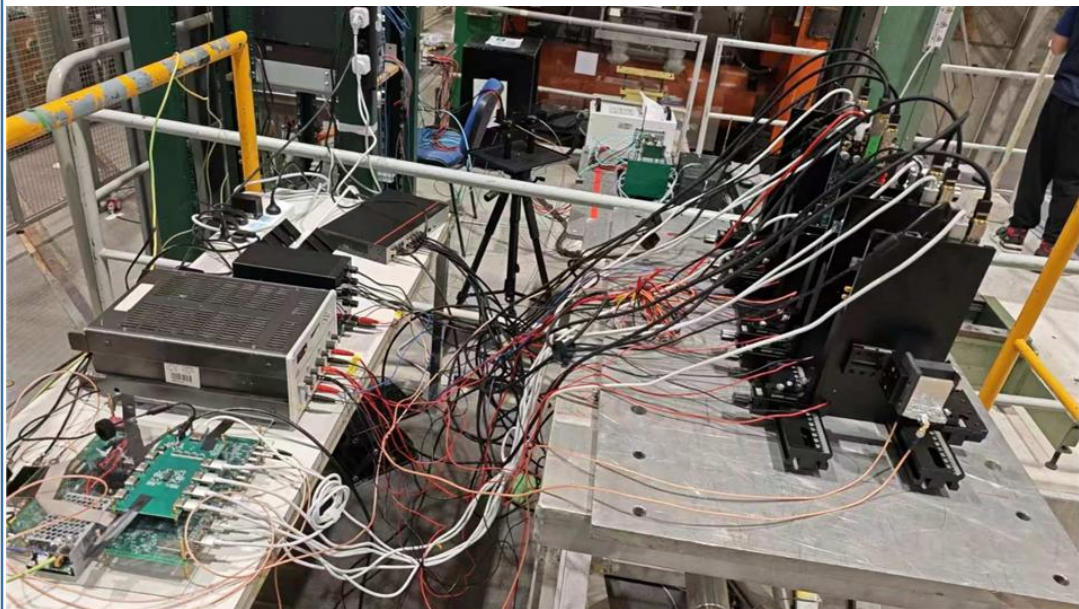
TaichuPix3望远镜的分辨

配置: 4个TaichuPix3平面, 用3个平面重建径迹, 匹配第6个平面 (DUT) 的击中 (2+ DUT + 1)

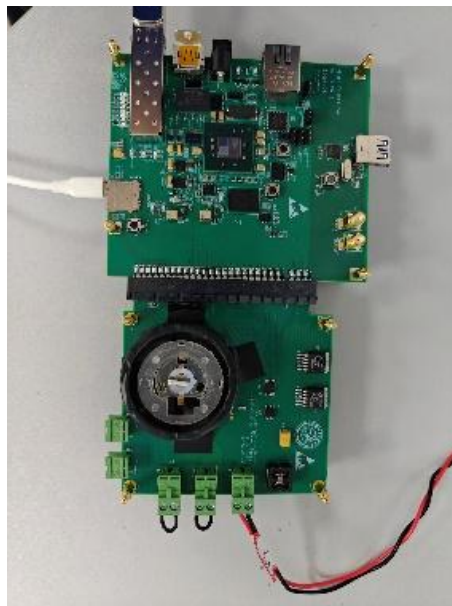


郑州大学
ZHENGZHOU UNIVERSITY

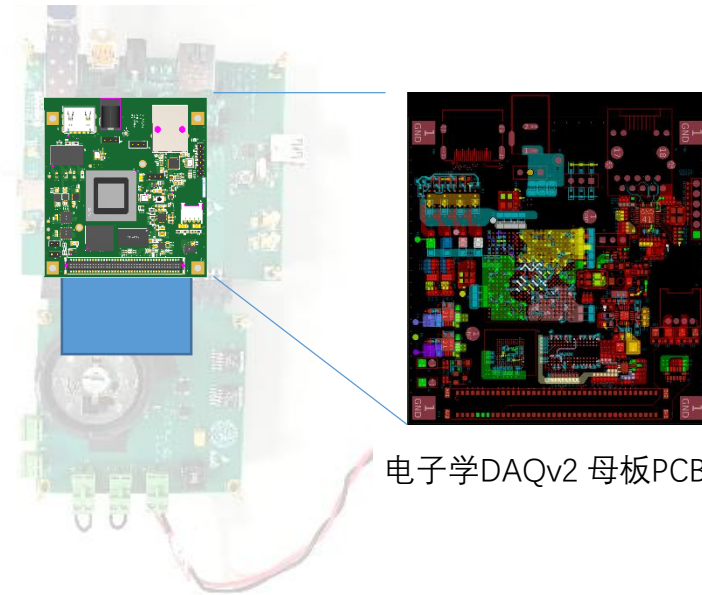
TaichuPix3束流望远镜的第二版硬件（2026）



Taichupix3束流望远镜原型v1
2025年7月 @CERN SPS



望远镜平面电子学DAQv1



电子学DAQv2 母板PCB layout

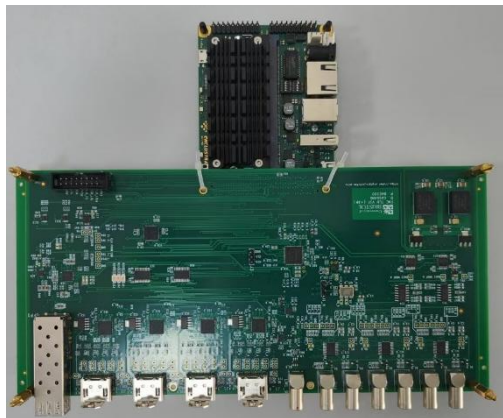
电子学DAQv2 与 v1版本尺寸对比

第2板电子学（郑大研究生：曹寿瀚）：

- 优化PCB面积、散热、供电、偏置电压、接插件、机械保护壳体安装。
- 减少使用电感、磁性元件（可能的磁场下运行环境，例如DESY TB21二极铁，TB24超导铁）
- 增加震动监测传感器
- TaichuPix3 CML接口

像素平面独立读出电子学要求多端口TLU

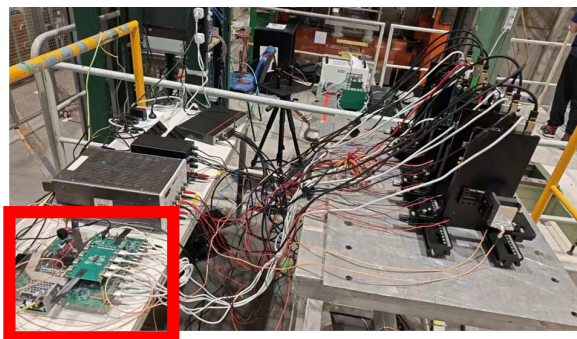
2025年末流实验使用AIDA2020-TLU 加 fanout模式分发触发：AIDA2020-TLU提供4路，实验需要7路。



AIDA2020-TLU 简单硬件复制



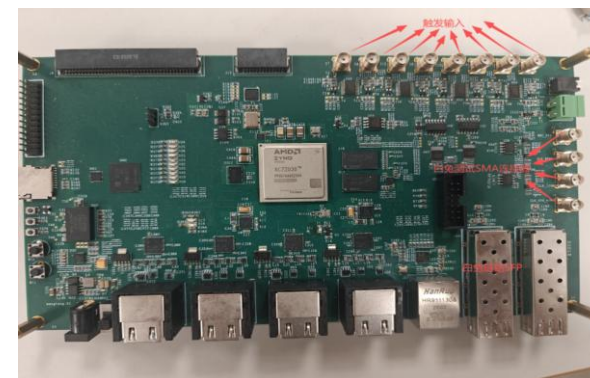
触发Fanout 扩展模块



Taichupix3束流望远镜原型v1
2025年7月 @CERN SPS



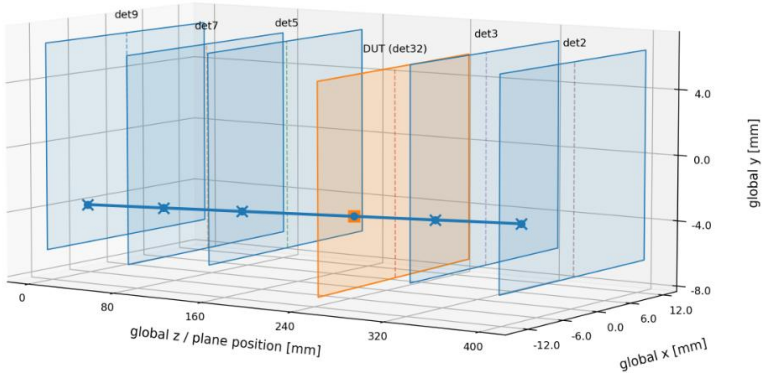
8端口触发分发端口TLU
(郑大研究生 王龙 2025)



WR-TLU 融合跨设备时间戳同步
(郑大研究生 王龙 2026)

把数据分析流程打包为供AI调用的MCP服务

Telescope 3D view (non-projected)



束流实验之后的数据分析比较费时，把标准流程打包为MCP服务，解放束流实验的数据分析，
TaichuPix-3 自动化结果查看

输入请求:

我想看第3条径迹

1

查看

2

示例

给我最新残差分析结果

我想看第十条径迹

我想看10条径迹, tag=mcp_split_test

我想看 run30 原始数据第十个事件

重建径迹查看

输入: 我想看第3条径迹

ROOT: /home/pub/B/alte_acts/analysis/mcp_client_test_full/track/detresid.root

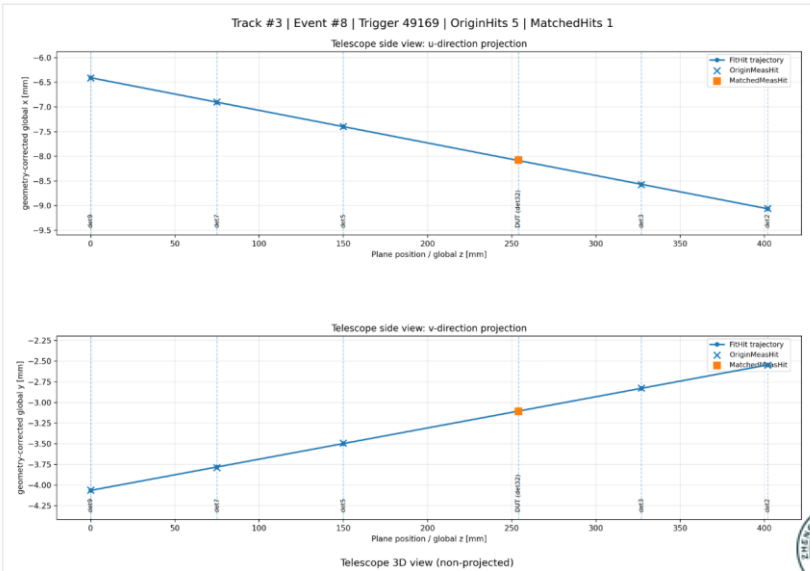
Geometry: /home/pub/B/alte_acts/analysis/mcp_client_test_full/align/final_geometry/geo_final.json

JSON: /home/pub/B/alte_acts/analysis/mcp_client_test_full/viewer/trajectory_3/trajectory_3.json

Trajectory Summary

global_track_index_1based	3
event_index_1based	8
event_entry_index_0based	7
event_number	11
trigger_clock	49169
num_traj_hits	6
num_origin_meas_hits	5
num_matched_meas_hits	1

Trajectory Plot



郑州大学
ZHENGZHOU UNIVERSITY

总结+期望

- 继承了EUDET束流望远镜的架构：软件接口EUDAQ + 硬件接口AIDA2020-TLU
- 集成ACTS做在线径迹重建，事例显示
- 具备基于Alpide + 基于TaichuPix3束流望远镜开发与测试经验
- 迭代开发了第2版TaichuPix3束流望远镜电子学（目标：稳定成熟的仪器产品）
- 迭代开发了包含WhiteRabbit时间同步的触发硬件WR-TLU（保持AIDA2020-TLU兼容）
- 束流数据数据分析流程打包为MCP服务（初步验证）

软件方面的下一步工作：

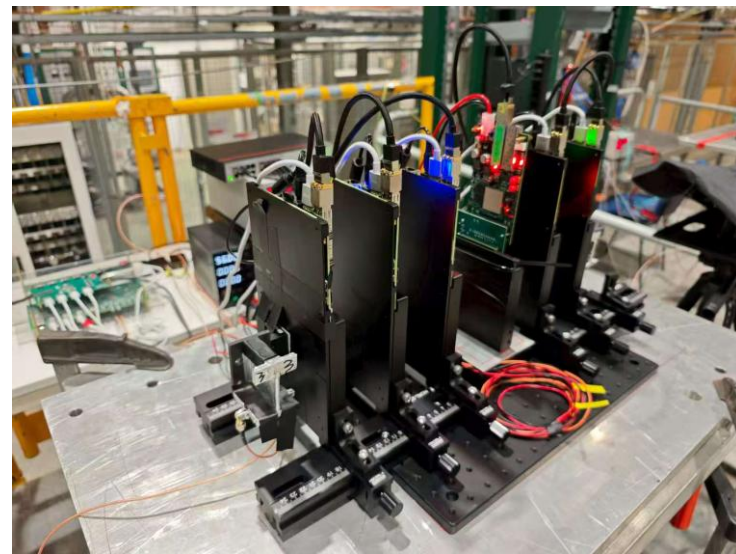
- 简化机械几何校准（自动化的几何校准）
- 简化实验数据分析（直接提供重建好的径迹）
- 可供AI调用的MCP束流数据分析服务

期望：

更多的硅像素芯片开发成熟，非常乐意协助硅像素芯片束流验证

期望：

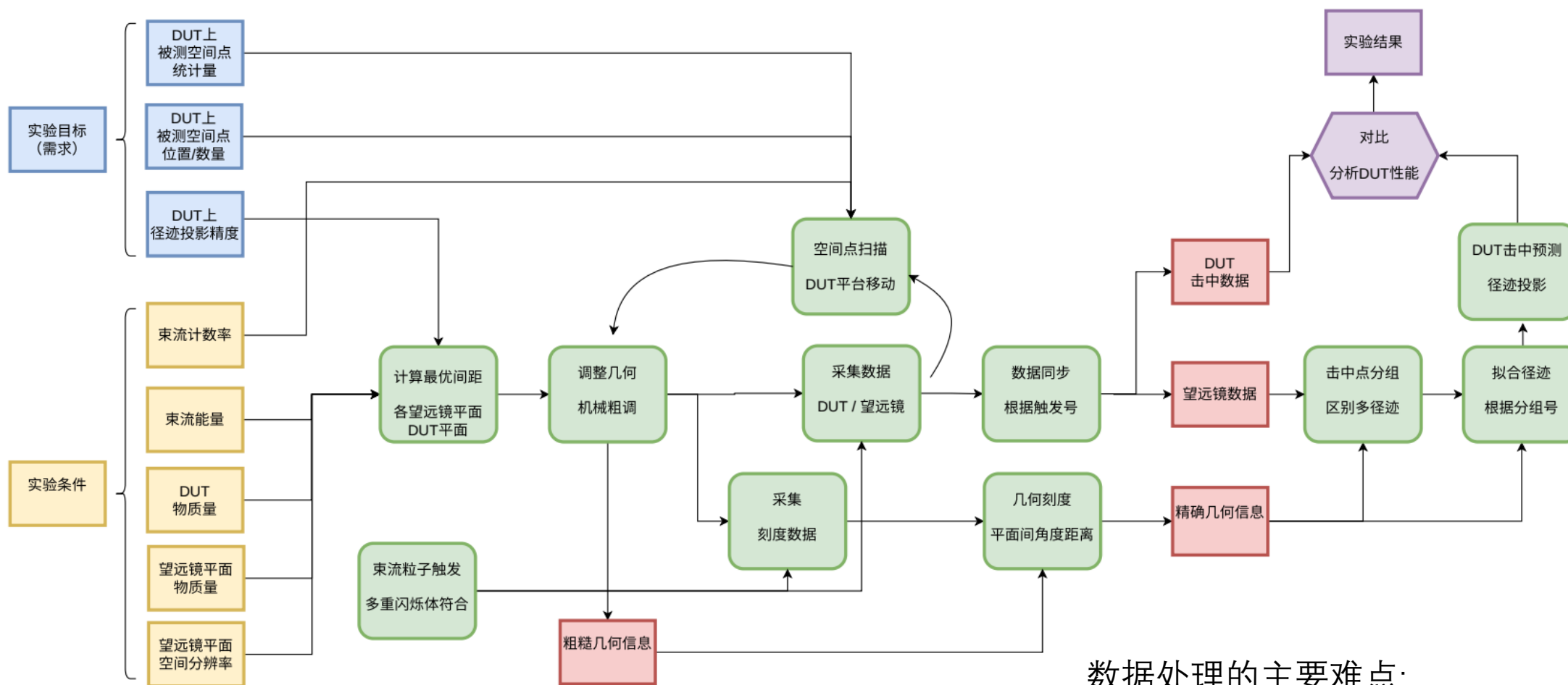
望远镜平面不限硅像素芯片方案，组合为一个Hybrid望远镜，
联合触发，联合取数，相互刻度



郑州大学
ZHENGZHOU UNIVERSITY

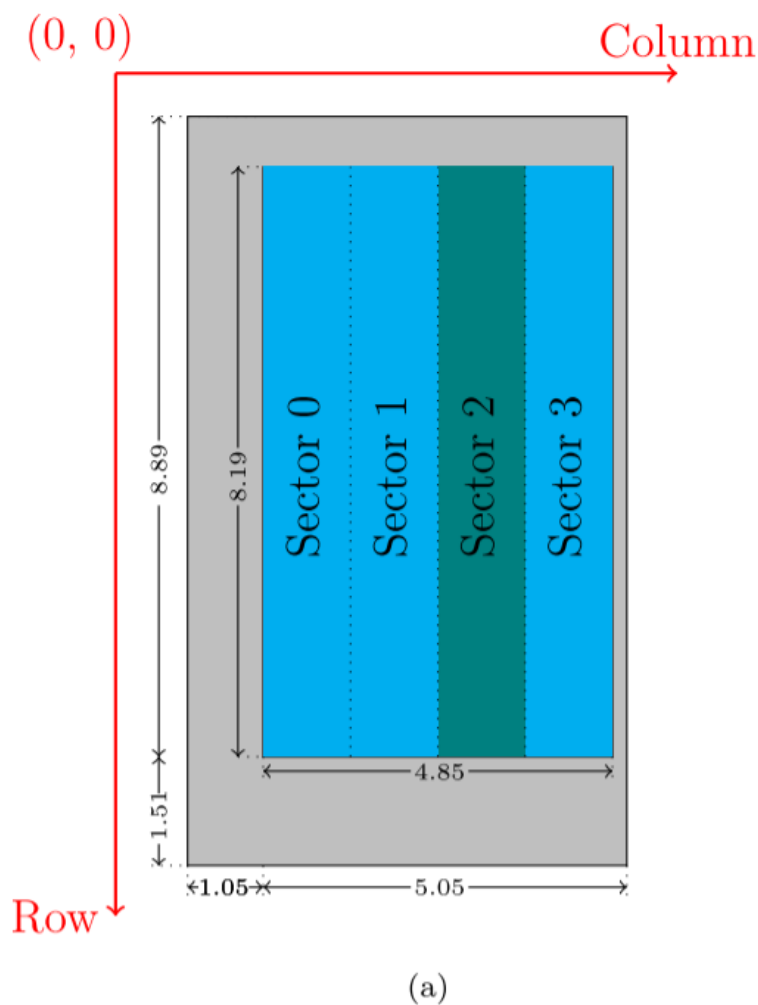
END

BACKUP

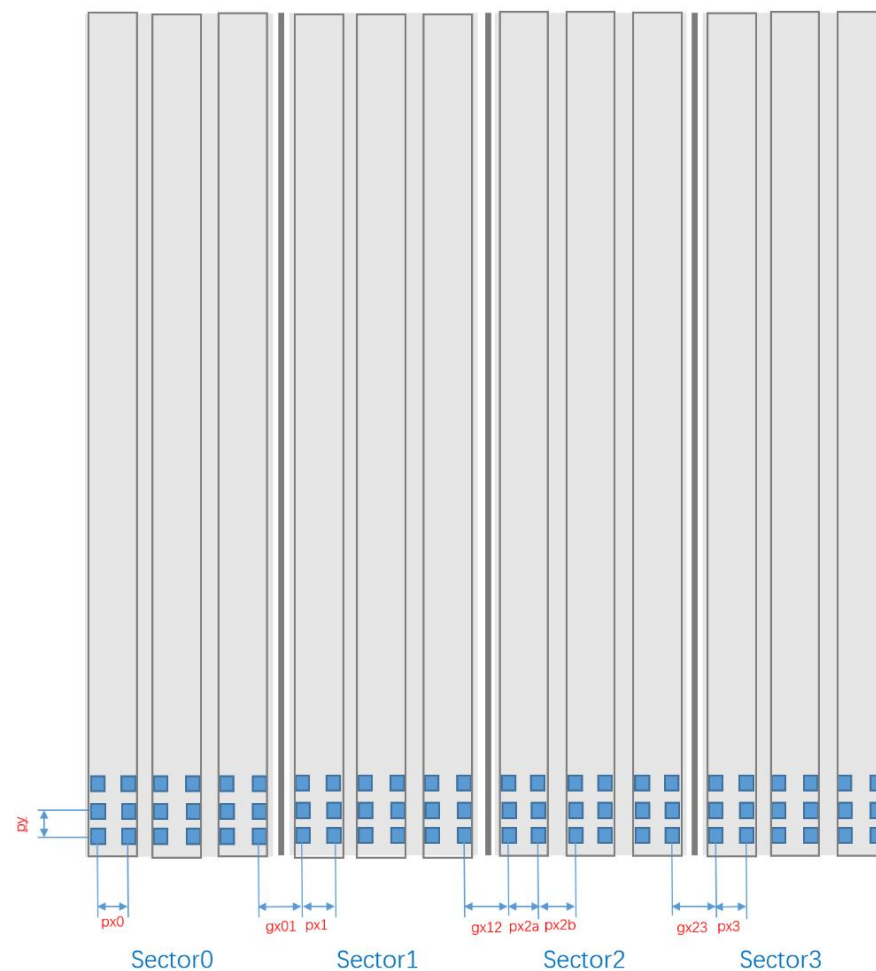


数据处理的主要难点:
精确校准探测器位置, 重建径迹

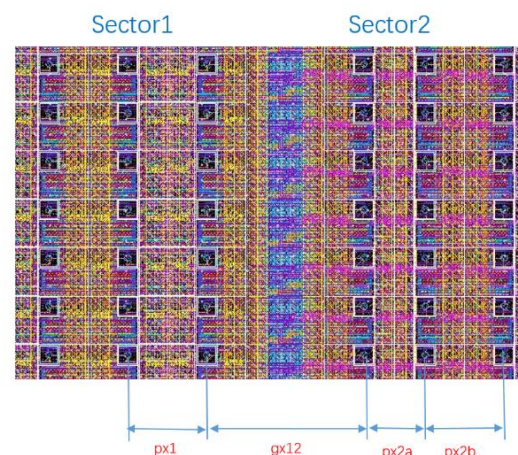
BACKUP



show 3 dual-columns per sector



Pitch_y	py	16
Pitch_x_sect0	px0	26
Pitch_x_sect1	px1	26
Pitch_x_sect2_a	px2a	20.22
Pitch_x_sect2_b	px2b	26
Pitch_x_sect3	px3	26
Gap_x_sect0_sect1	gx01	?
Gap_x_sect1_sect2	gx12	?
Gap_x_sect2_sect3	gx23	?



束流数据分析软件适配场景：
Jadpix3内部具有多尺寸像素pitch和gap