

EUDET兼容型的束流望远镜研制

TaichuPix3束流望远镜的CERN束流验证



刘义
郑州大学
2025/8/15

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

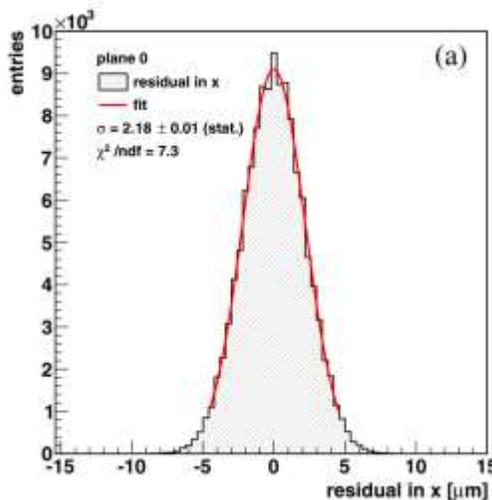
提供了高精度位置测量：

- 小于3 μm 的径迹分辨

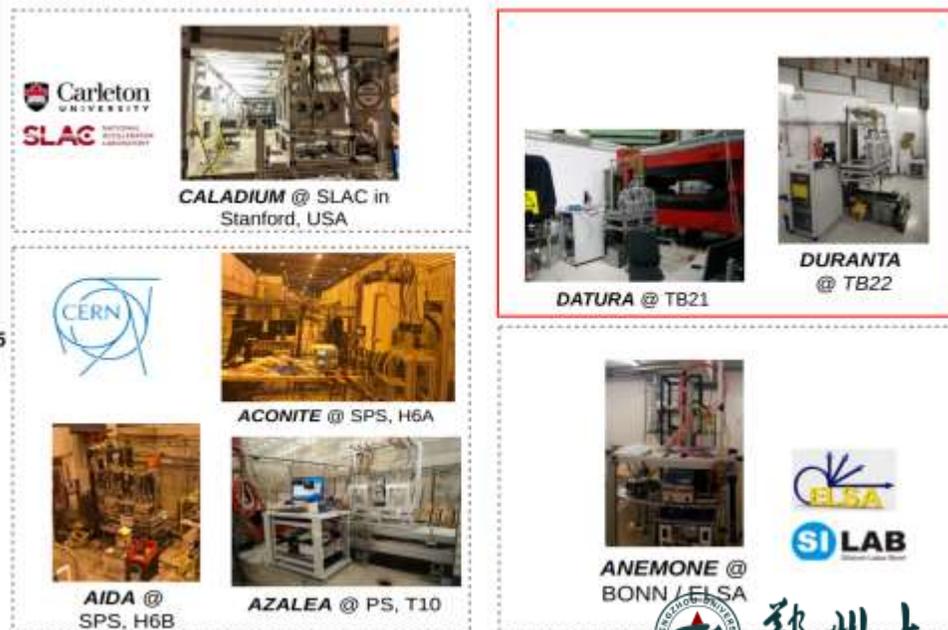
Mimosa26不足点：

- 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



EUDET束流望远镜的7个复制

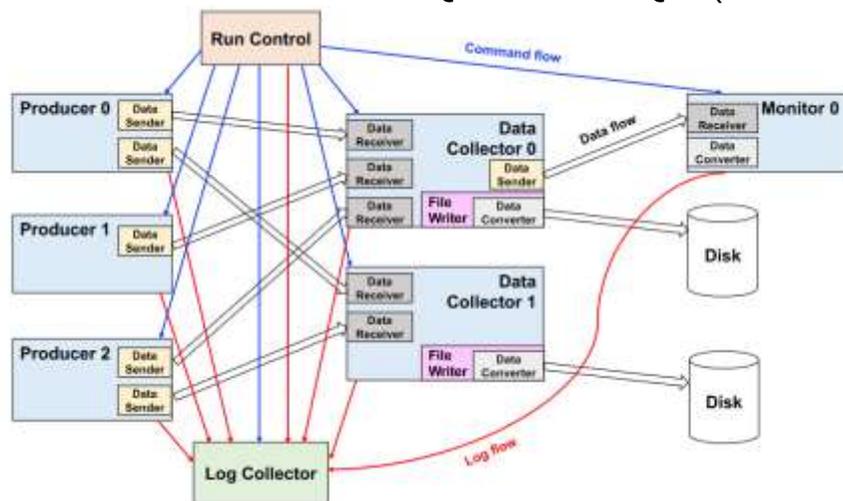


EUDET束流望远镜的软件接口

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)

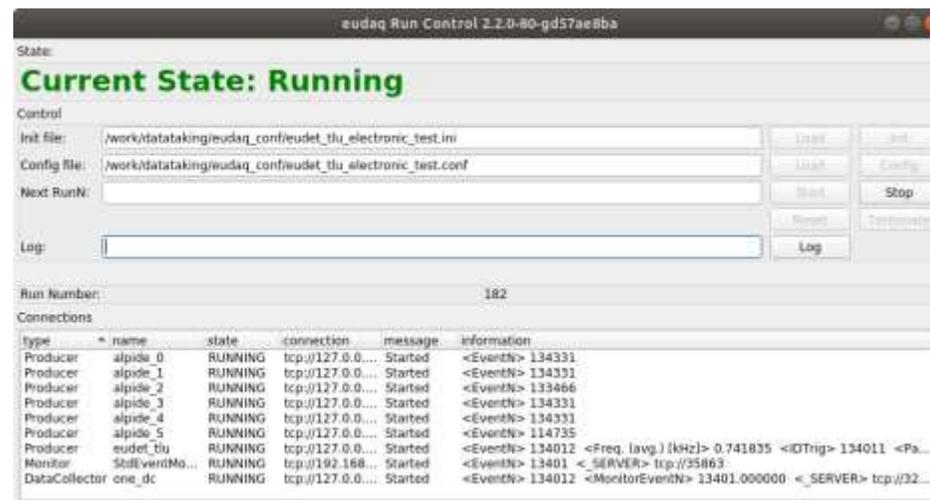


EUDAQ2数据控制流

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

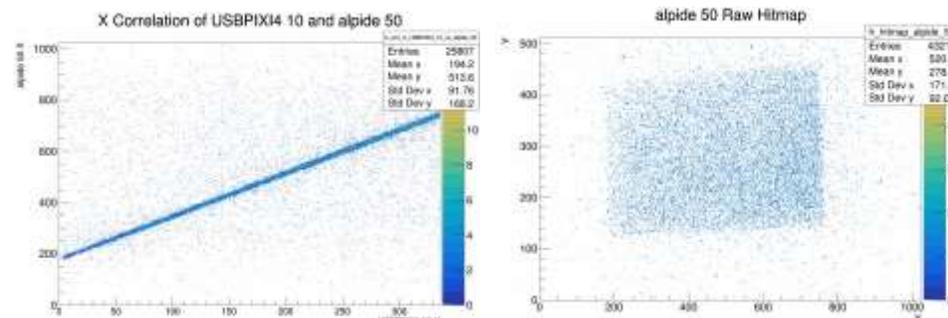
EUDAQ2 User Manual: AIDA-2020-NOTE-2018-001

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

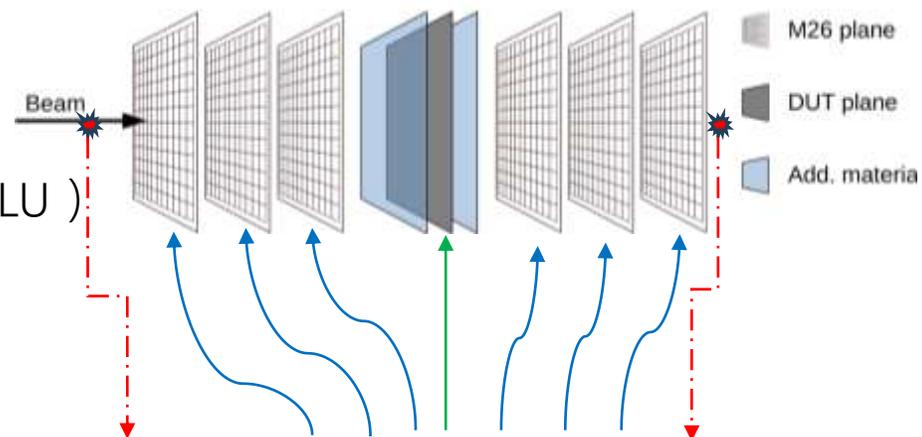


EUDET束流望远镜的硬件接口

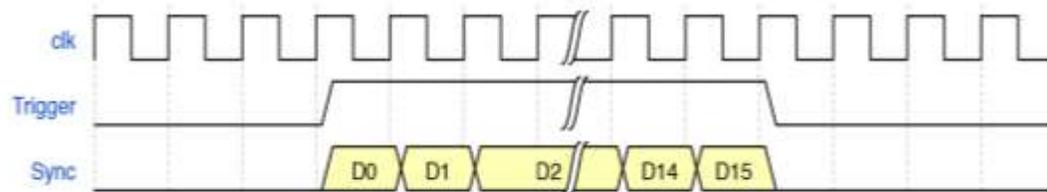
触发逻辑单元

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)

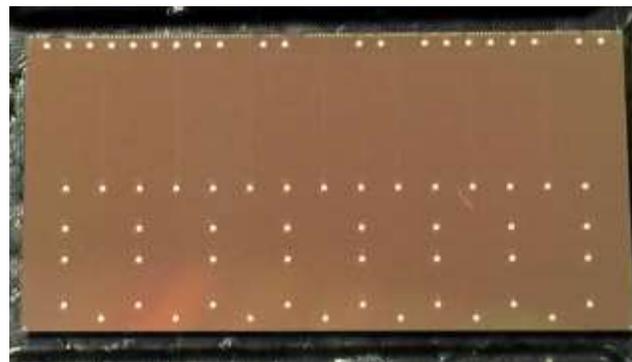
ADEMIUM束流望远镜是DESY EUDET束流望远镜的备份

选用了当时的现有芯片 ALPIDE

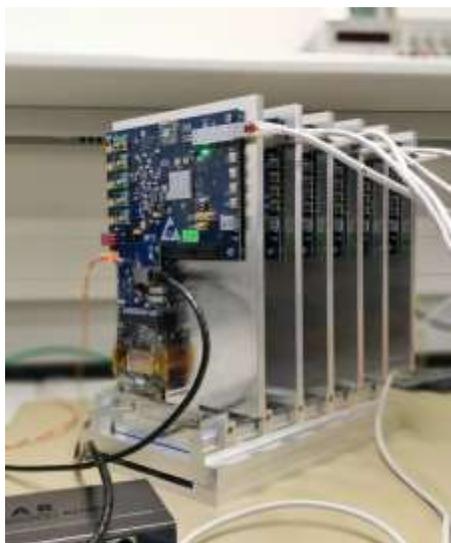
- 优势: 低噪声, 全局触发, 高触发率 (50kHz)
- 劣势: $\sim 30\mu\text{m}$ Pitch (1.5x mimosa)

26.88um X 512 pixel \sim 15mm

29.24um X 1024 pixel \sim 30mm



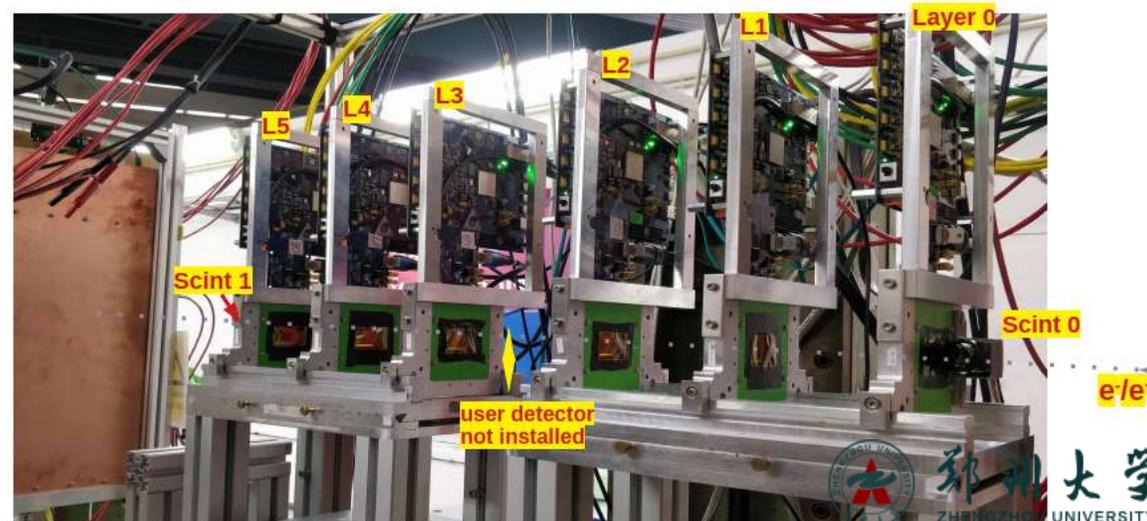
快速开发的ADEMIUM束流望远镜DAQv1原型 (2019)



DAQv1.0

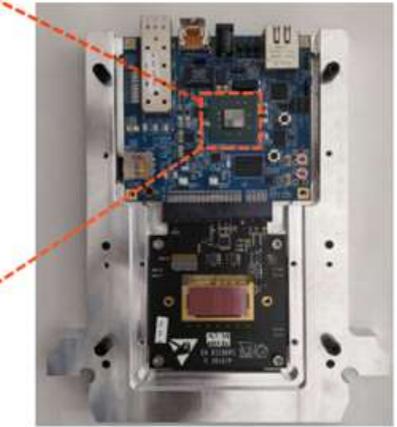


DAQv1.1



DAQv1.2

ADEMIUM束流望远镜 (EUDET兼容)



ADEMIUM束流望远镜DAQv2 (单平面, 2020)

2019 2020
DAQv1 → DAQv2

An ALPIDE based high resolution tracking telescope as upgrade for the DESY-II test beam

Y. Liu, C. Tang, J. Dingyong, E. Schmitt, C. Ferry, M. Gregori, L. Roth, M. Wastjer, Y. Teng

DESY

ALPIDE Pixel Sensor
by ALICE collaboration (CERN)

DESY-II test beam facility & EUDET-type telescopes

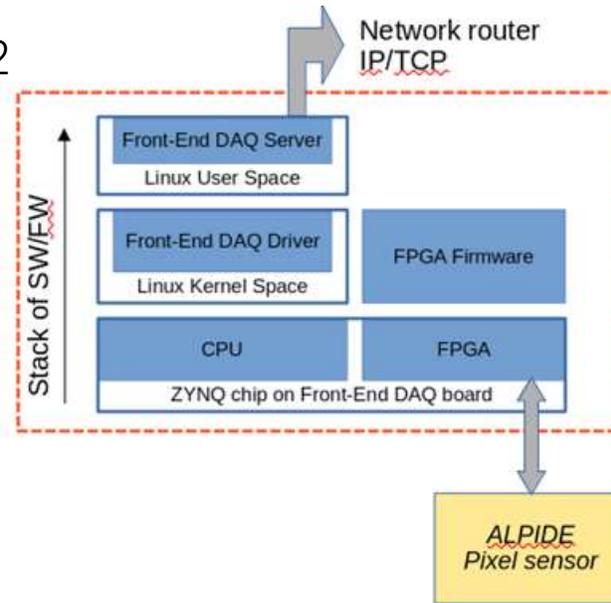
ALPIDE telescope datataking & interface

First assembled system

Preliminary performance results

DESY TEST BEAM, AIDA 2020, 中国科学院大学, IEEE NPSS

Poster 2019 IEEE-NPSS
ADEMIUM束流望远镜DAQv1原型



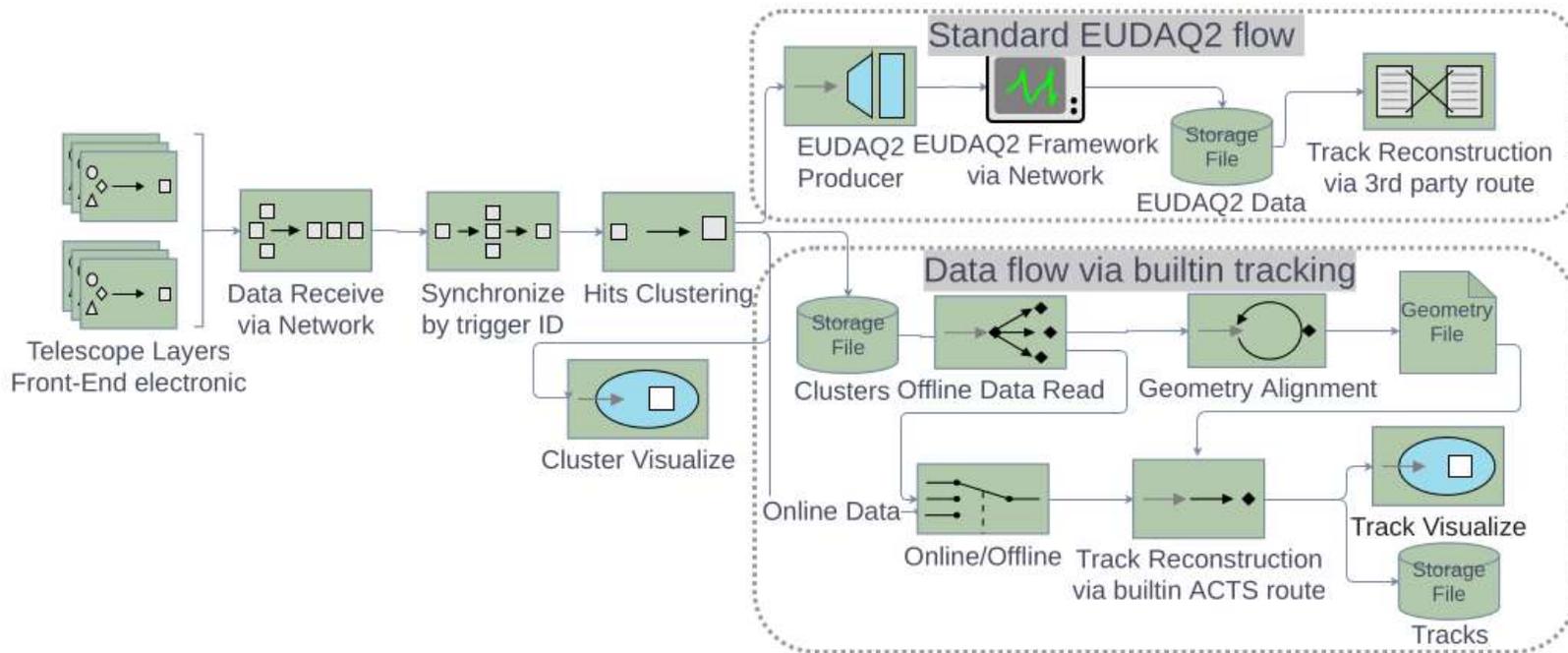
Zynq-FPGA作为探测器平面的前端主控，其内的arm处理器运行标准linux(centos8)，其中运行前端服务进程。

典型配置时：
6层探测器平面，即6个前端读出主控及前端服务进程

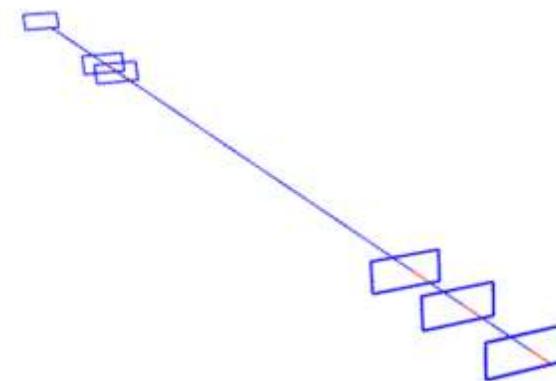


ADENIUM束流望远镜 (EUDET兼容)

在兼容EUDET的EUDAQ2软件框架之外，ADENIUM的DAQ也集成了基于ACTS的在线重建



ADENIUM束流望远镜DAQv2

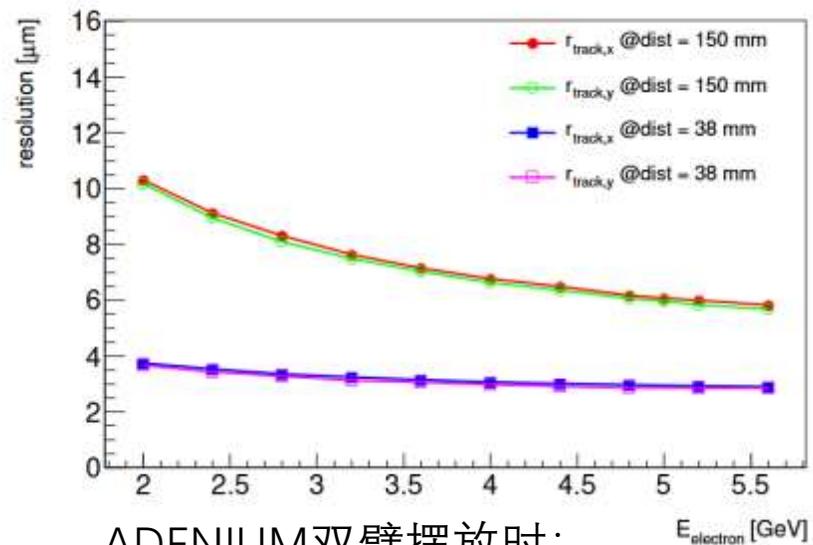
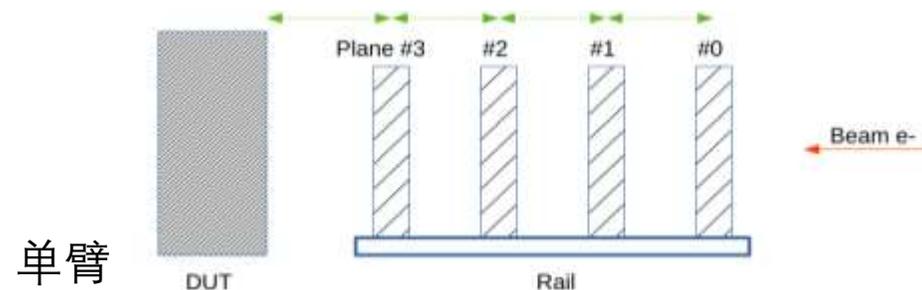
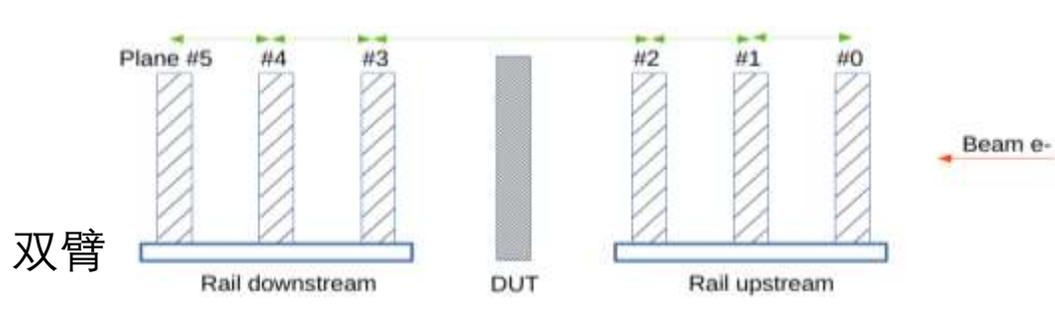


CALICE AHCL beam test setup
基于OpenGL的在线显示

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

ADENIUM束流望远镜的束流寻迹位置分辨

束流望远镜分组摆放方式：双臂，单臂



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

主要应用场景为双臂模式。

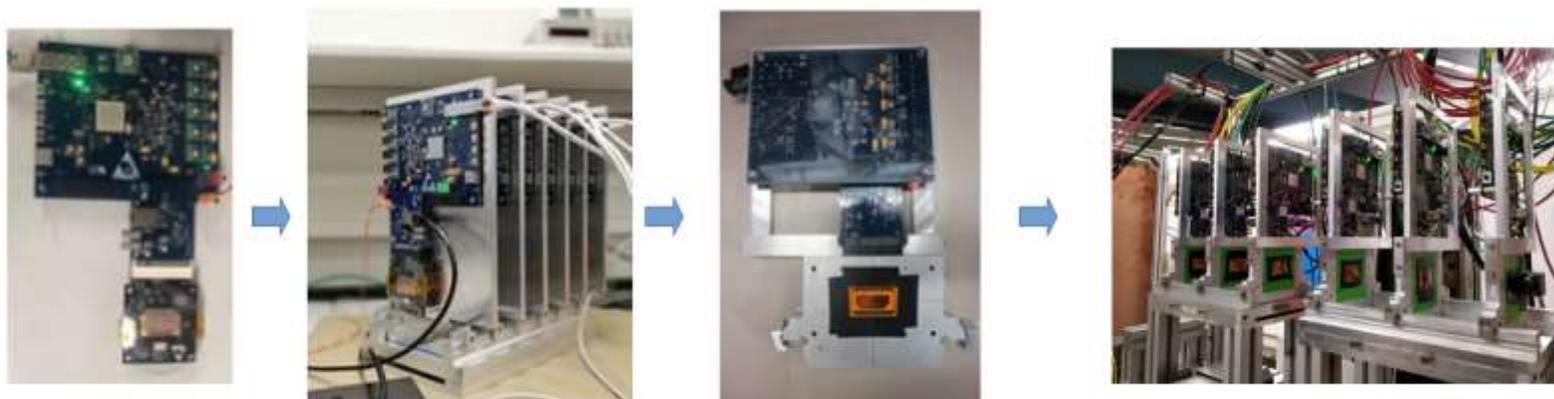
针对不同用户的探测器物质量及体积，各层间距需要频繁变动。

分析软件能重建径迹并推导到被测位置。

分析软件能对安装间距/角度做校准。(每次被触碰之后)。

复用开发经验于TaichuPix3

在2019年时，在短时间内快速实现了ADENIUM束流望远镜的第一个原型版本（DAQv1.x）

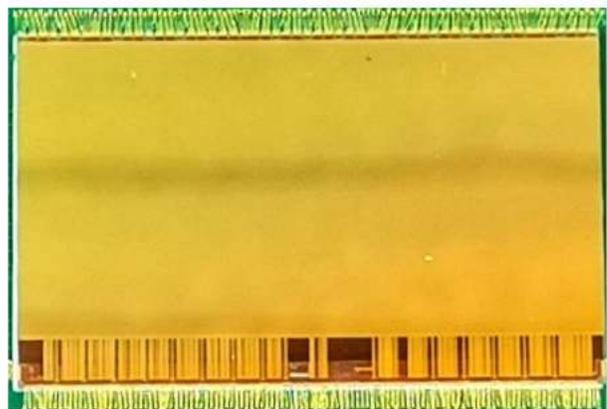


Year 2019, hardware V1.x development, (provide v1.3 for testbeam early user)



2020 @DESY

2024年:



TaichuPix-3

致谢TaichuPix3 开发团队

开发工作策略

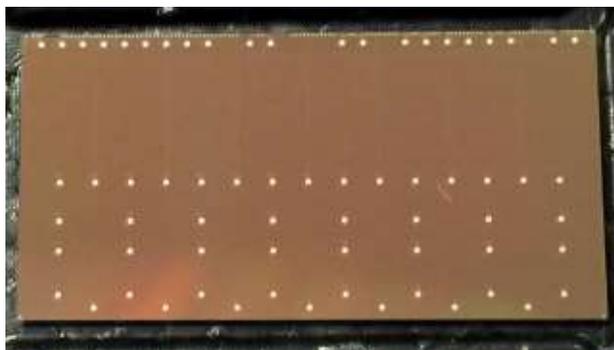
- 选用国内硅像素芯片TaichuPix3
- 参考TaichuPix3的测试用电子学（致谢胡俊）
- 复用ADENIUM束流望远镜的开发经验
 - ✓ 全套读出电子学设计构架
 - ✓ 全套DAQ软件
 - ✓ 全套在线重建软件

束流望远镜共同开发:

ZJU 朱宏博
USTC 封常青



复用开发经验于TaichuPix3



ALPIDE

2019-2021
@DESY Yi LIU

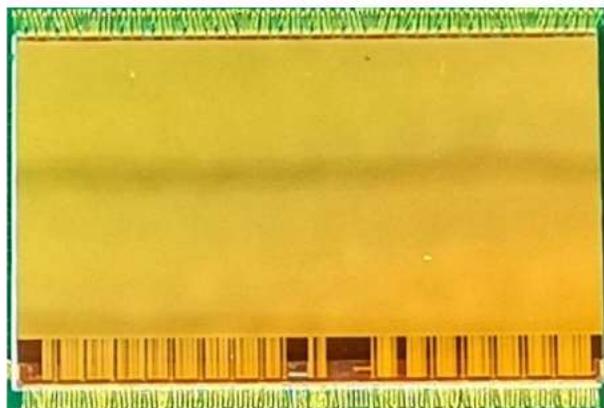
共同开发：
USTC封常青



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 SPS

CERN SPS束流测试

望远镜系统全功能验证测试

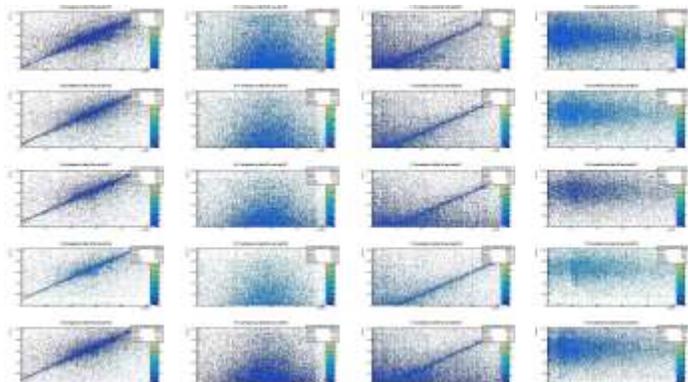
2025年7月16日-22日 CERN SPS



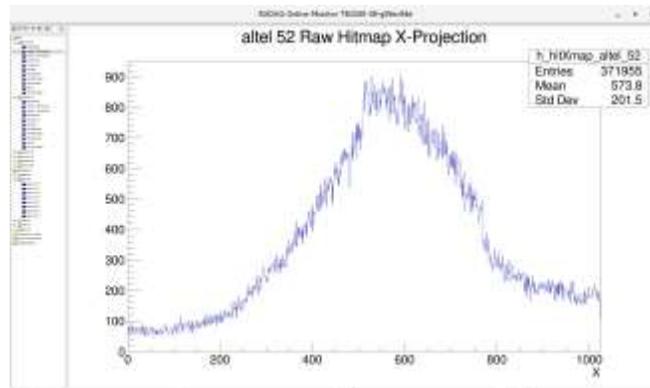
感谢高能所刘勇老师分享了CEPC量能器在SPS的束流机时。（10-300GeV 电子，Pion）
实测验证了基于taichupix3的束流望远镜，确认了软硬件接口与EUDET束流望远镜的兼容性

CERN SPS束流测试

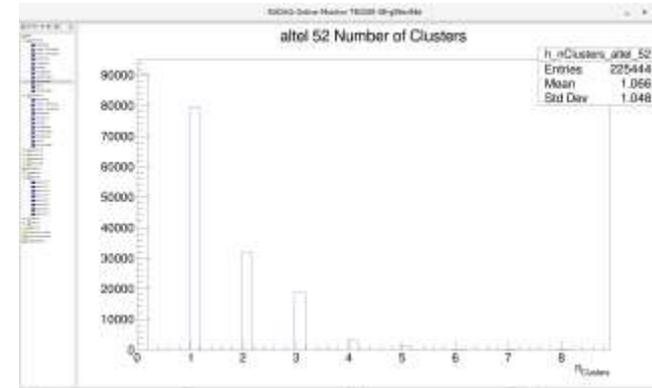
在线显示系统提供数据质量快速反馈--- 基于EUDAQ2



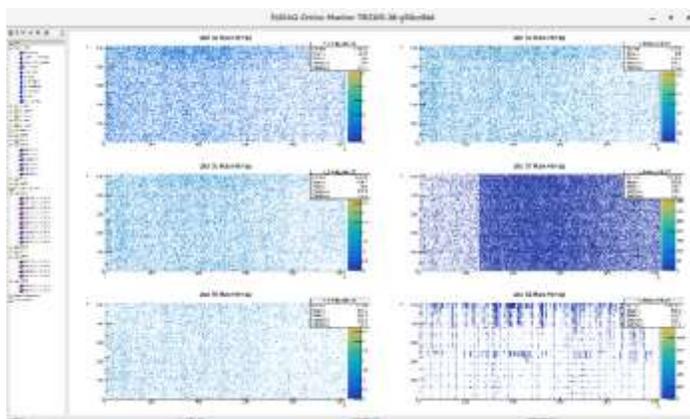
击中位置在平面间的关联 (correlation)



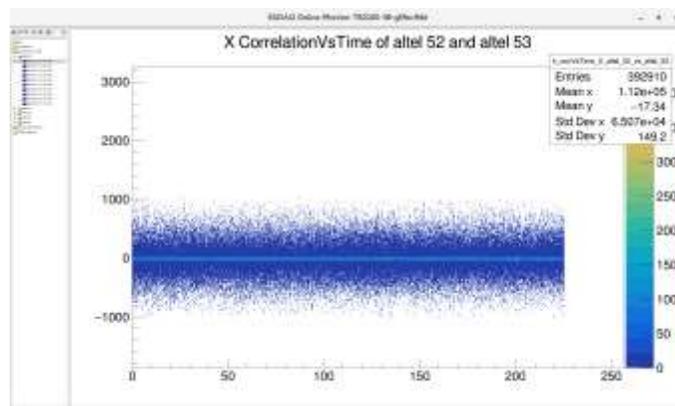
单平面击中位置统计



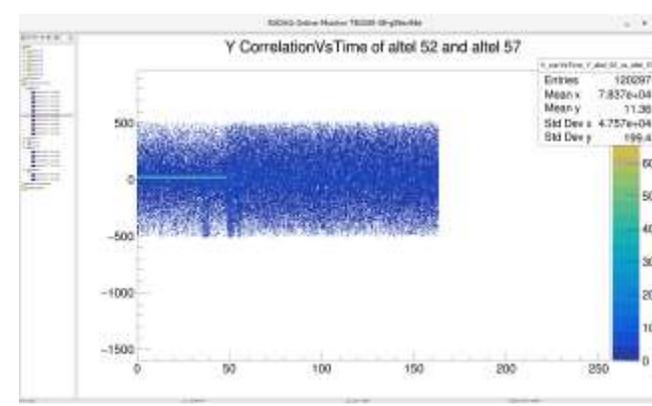
单平面单次触发的cluster统计



平面击中点累积显示
其中两个平面出错



correlation随时间变化

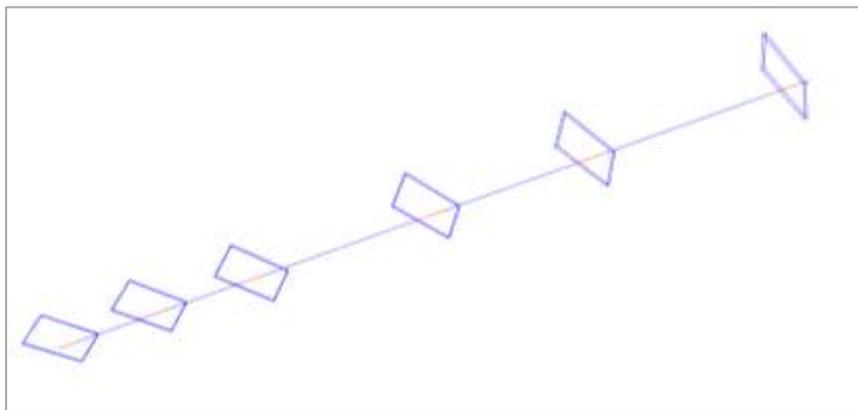


correlation随时间变化
(数据出错)

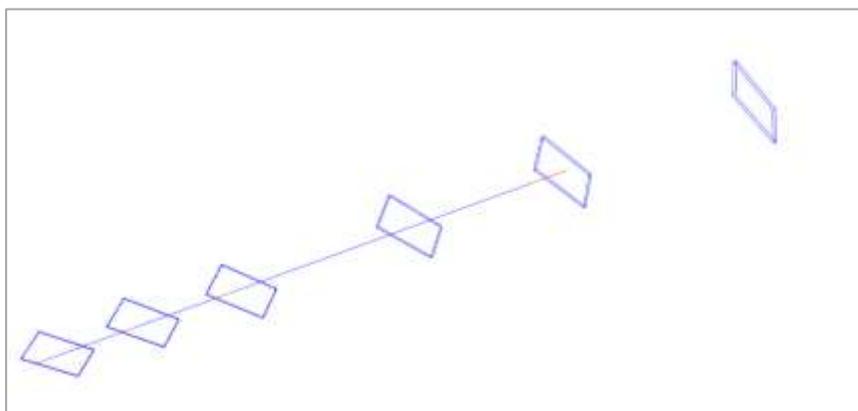


CERN SPS束流测试

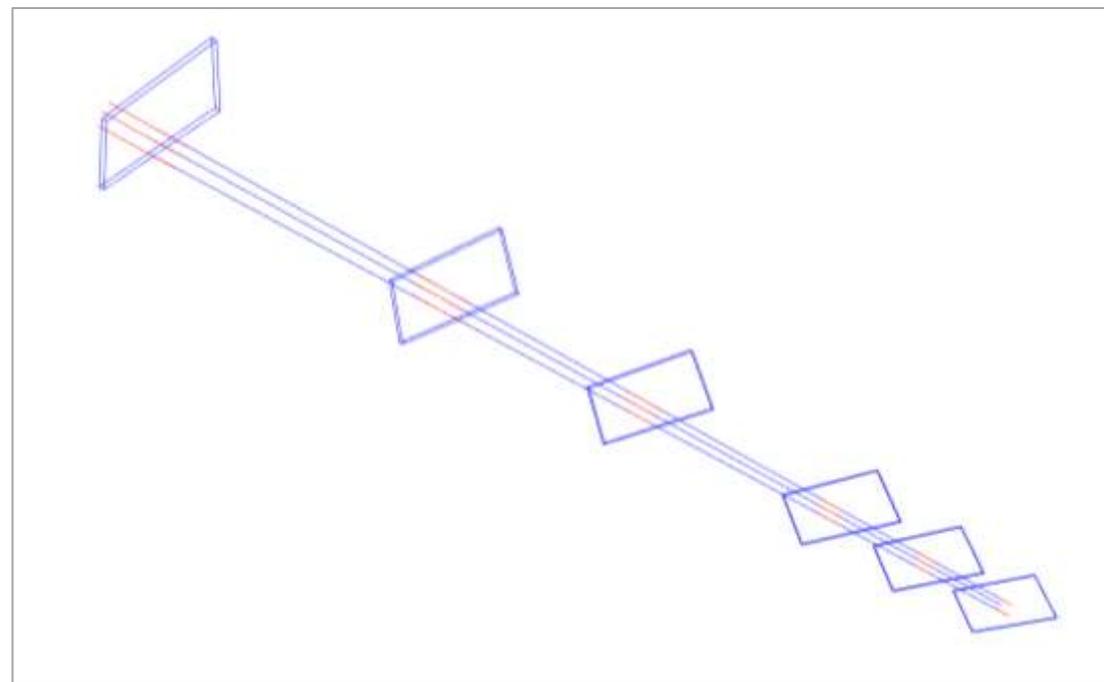
基于ACTS的径迹重建及在线显示



完整径迹（全部平面都有击中）



部分径迹（部分平面丢失击中）

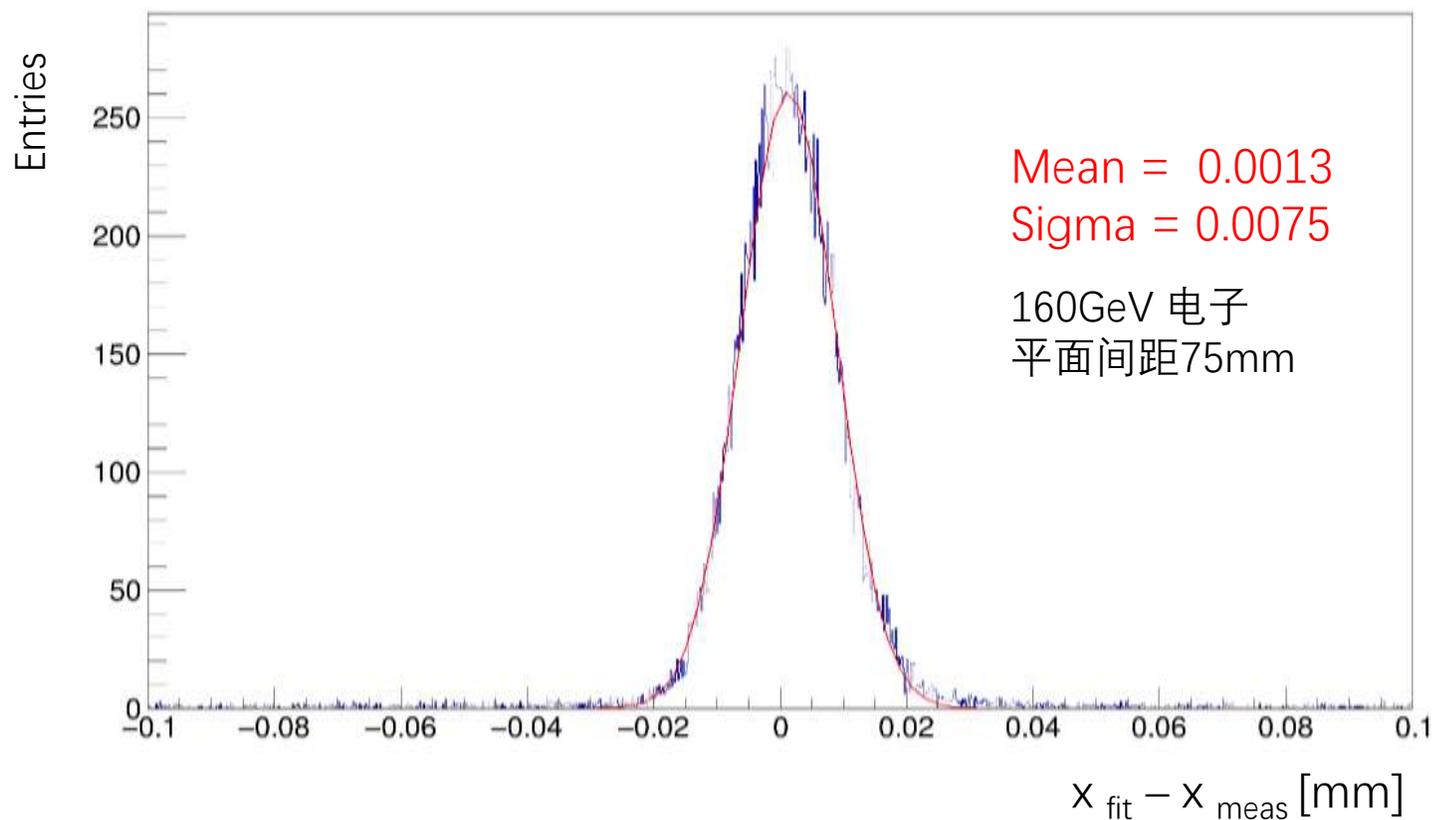


单触发多径迹

CERN SPS束流测试

*TaichuPix3*望远镜的分辨/*Residual*

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）



$$\sigma_{res} = \sqrt{\sigma_{track}^2 + \sigma_{DUT}^2}$$

新设计束流望远镜的触发模块

AIDA2020-TLU对于束流望远镜需求存在过度设计。

AIDA2020-TLU触发单元是一个完全开源的硬件项目

-> 合法的复制 -> 合理的参考

-> 兼容触发模块的新设计:

易用的软件接口，低硬件成本

AIDA2020-TLU使用开发板加扩展板模式

- 新设计为单一PCBA

AIDA2020-TLU使用的IPBUS的网卡兼容性问题较大

- 新设计使用标准IP/TCP协议

AIDA2020-TLU的触发下发接口数量不足（4个）

- 新设计加倍（8个）

AIDA2020-TLU的配置及配套软件结构复杂

- 新设计将采用web方式直观配置

后续计划集成IEEE1588 PTP时钟同步，

100ns级精度（低成本，工业级）。

可用于两套独立触发系统的时钟对齐，数据同步。



AIDA2020-TLU 硬件复制



触发模块的兼容设计
(研究生 王龙@ZZU)

束流望远镜的可用性

束流实验站是将会是一个面向外部用户的实验平台，束流望远镜系统在用户实验期间会由实验用户独立操作，我们注重：可维护性，用户易操作。

我们注重：稳定兼容的用户接口

1. 硬件接口：触发同步（AIDA2020-TLU兼容触发模块）
2. 取数软件接口：望远镜系统取数软件 and 用户取数软件的整合（EUDAQ2）

我们希望改进的问题：

改进机械导轨结构，改进机械稳定性

震动检测（+震动传感器）

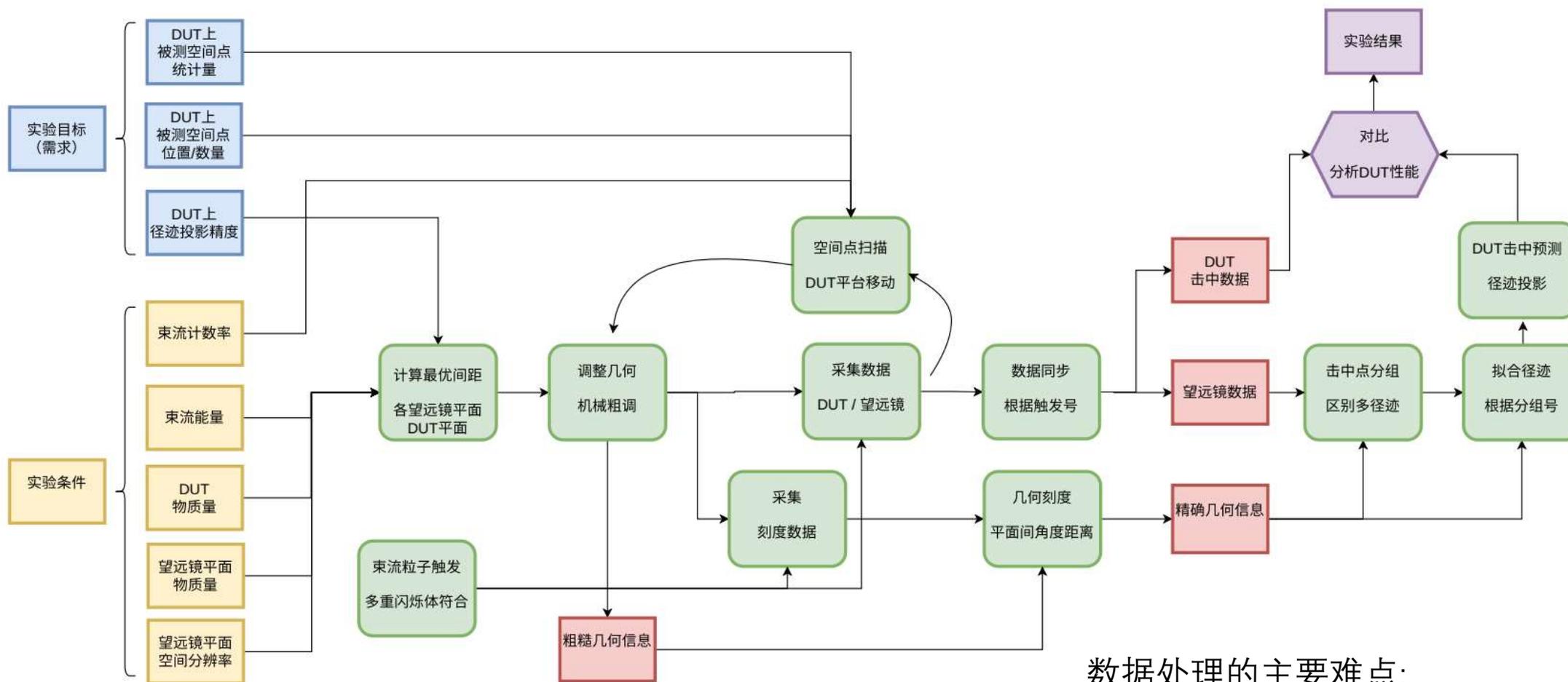
简化机械几何校准（自动化的几何校准）

简化实验数据分析（直接提供重建好的径迹）



END

BACKUP



数据处理的主要难点：
精确校准探测器位置, 重建径迹