基于Jadepix系列芯片的Telescope研发

TB&D-2

王泳棋[1,3]，卢云鹏[2]，郭宇航[2,3]，蒋伟[2,3]，樊瑞睿[2,3]

[1]电子科技大学，成都，611731
[2]中国科学院高能物理研究所，北京，100049
[3]散裂中子源科学中心，东莞，523803

电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

目录

1 研究背景及意义

2 Jadepix4芯片测试

3 束流测试及结果

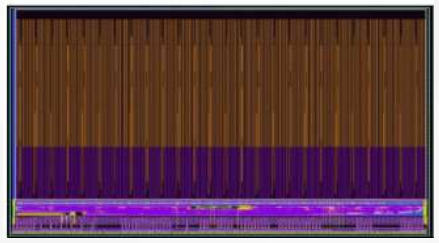
4 总结与展望

研究背景—高时空精度束流望远镜

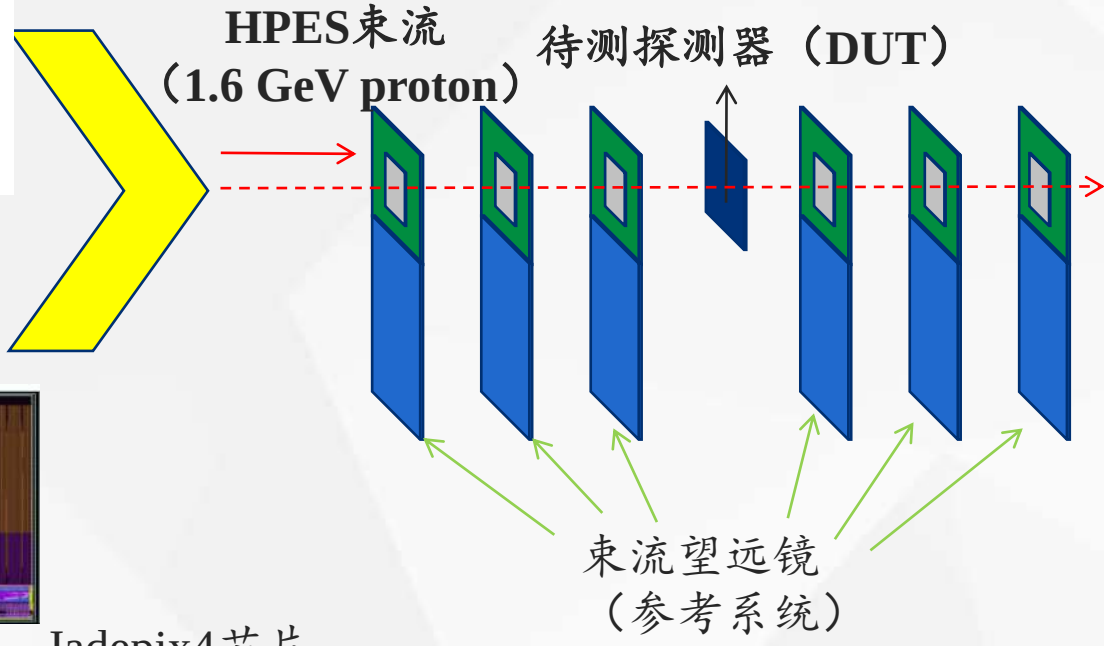
- 中国正在建设第一条1.6 GeV质子测试束(HPES)，目的是为位置灵敏探测器提供一个测试平台
- 位置灵敏探测器的测试需要束流望远镜的支持
- 基于HPES，以及**高能所自主设计**的JadePix系列硅像素探测器，研制高时空精度束流望远镜

束线(高能质子测试束)	进展	即将建成
	束流能量	1.6GeV
	质子束流强	≥2×10^6p/s
	束斑尺寸	≤Φ100mm
束流望远镜(JadePix-4)	进展	使用已有Jadepix3搭建的telescope对Jadepix4测试中
	芯片尺寸	14.8mm×8.6mm
	像素阵列	498×356
	时间分辨颗粒度	~1μs
	空间分辨率	~5μm





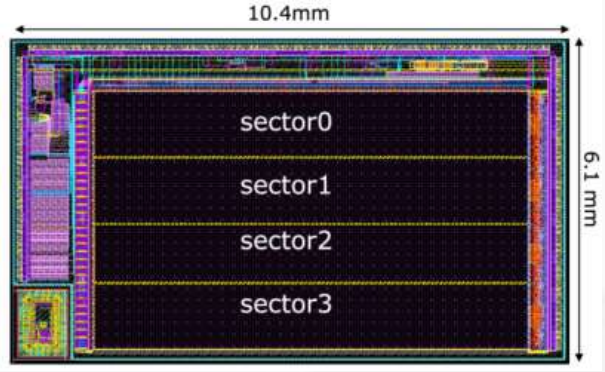
CSNS（位于中国东莞）在建的高能质子测试束线(HPES)

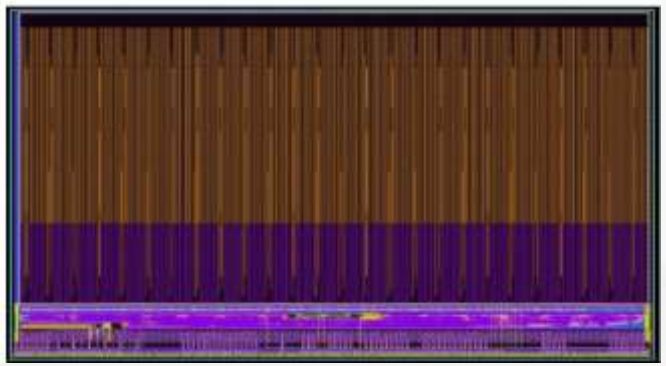


Jadepix4芯片

——中科院高能物理研究所/华中师范大学

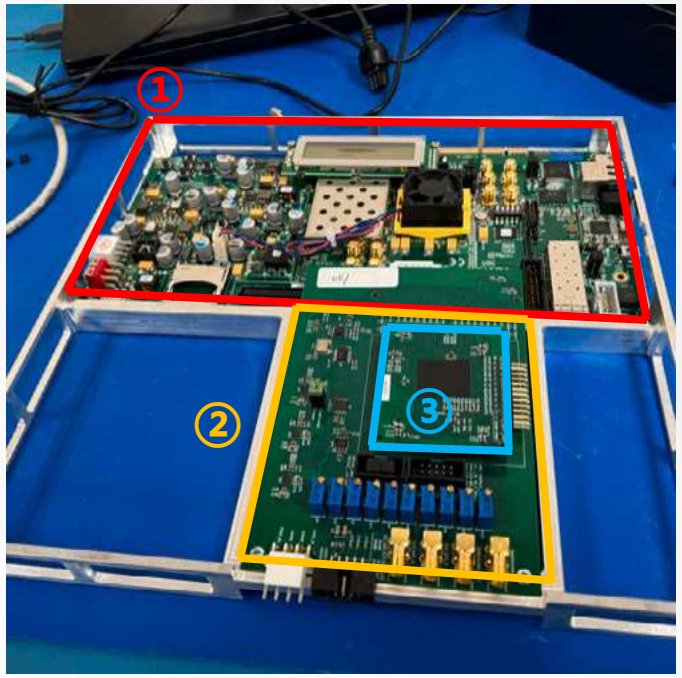
研究背景—Jadepix系列芯片

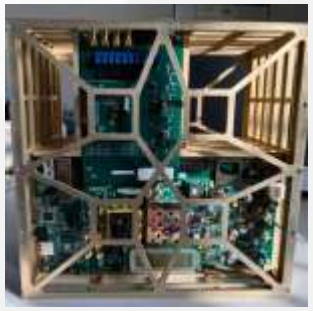




JadePix-3	JadePix-4 / MIC5
目标：全功能、小像素、低功耗，**~3 μm 空间分辨**	**目标：**全功能、小像素、低功耗，**~1 μs 时间分辨**
16 μm × 23.1 μm，512 行 × 192 列	**20 μm × 29 μm，356 行 × 498 列**
空间分辨 ~3 μm（束流测试 4.6 / 5.2 μm）	**时间分辨 ~1 μs（触发模式 50 ns/hit）**
读出时间 98.3 μs / 帧	**~1 μs时间精度**
FPN < 20 e^-	FPN < 20 e^-
功耗 < 100 mW/cm²（实测 87 mW/cm²）	功耗 < 100 mW/cm²
Rolling-shutter 读出	AERD 异步读出（data-driven）

Jadepix3 Telescope



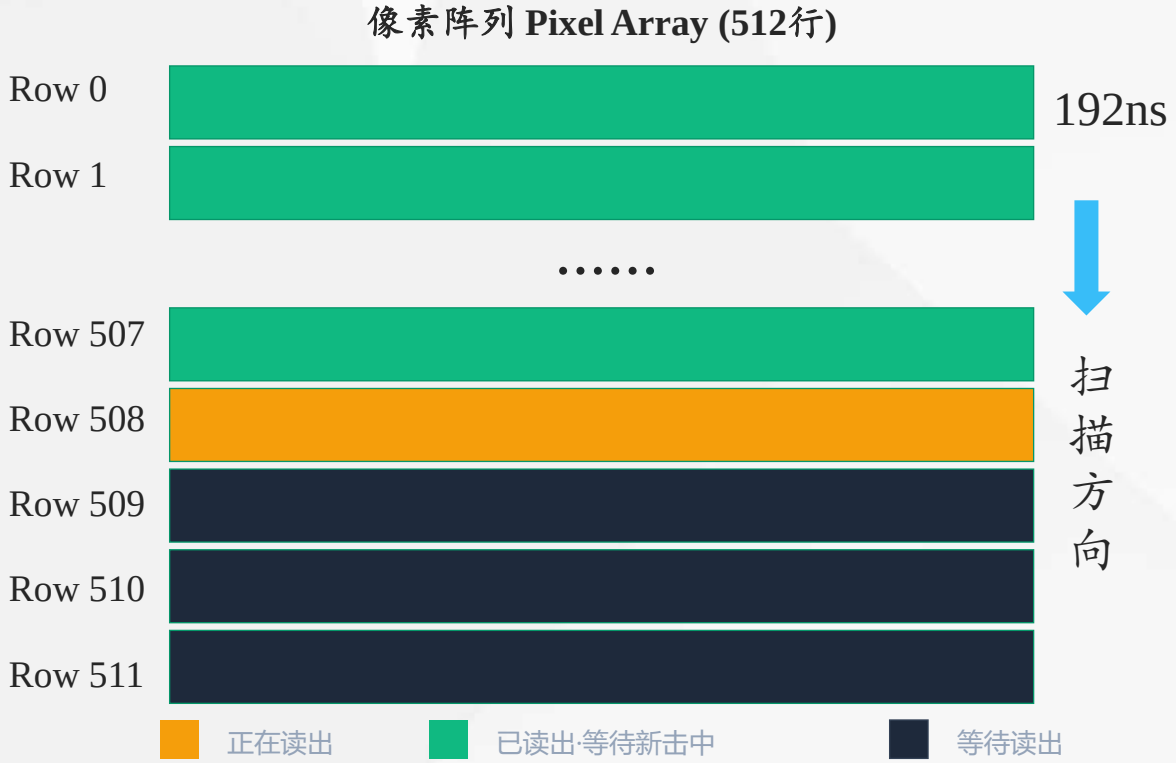




① 数字读出板:芯片控制，数据处理与收发

② 转接板：DAC,电源以及FMC接口等

③ 芯片载板：为Jadepix3/4芯片提供机械和电气连接

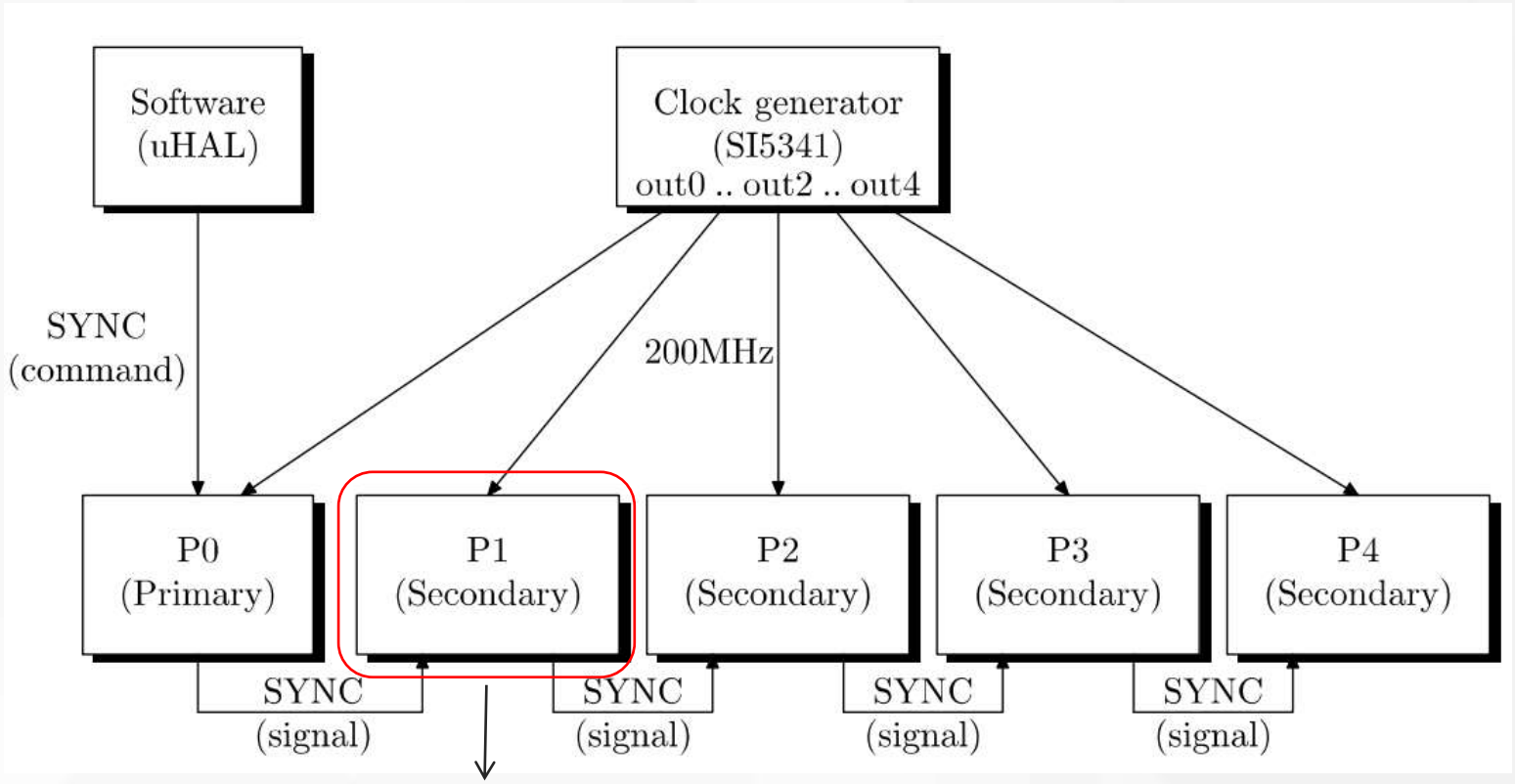


- 系统时钟：12ns
- 帧周期=192ns×(512+1)=98.316μs

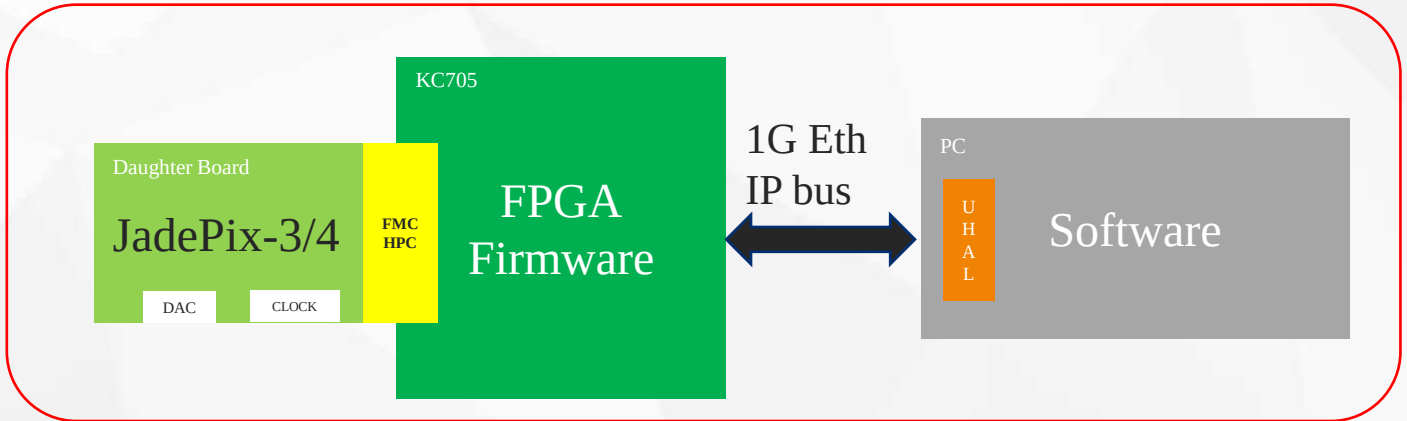
关键参数：

- 径迹空间分辨率：2.6/2.3μm(x/y)(5.4GeV DESY)
- 探测效率：＞99%
- 读出速度：98.316μs/帧

望远镜DAQ整体架构

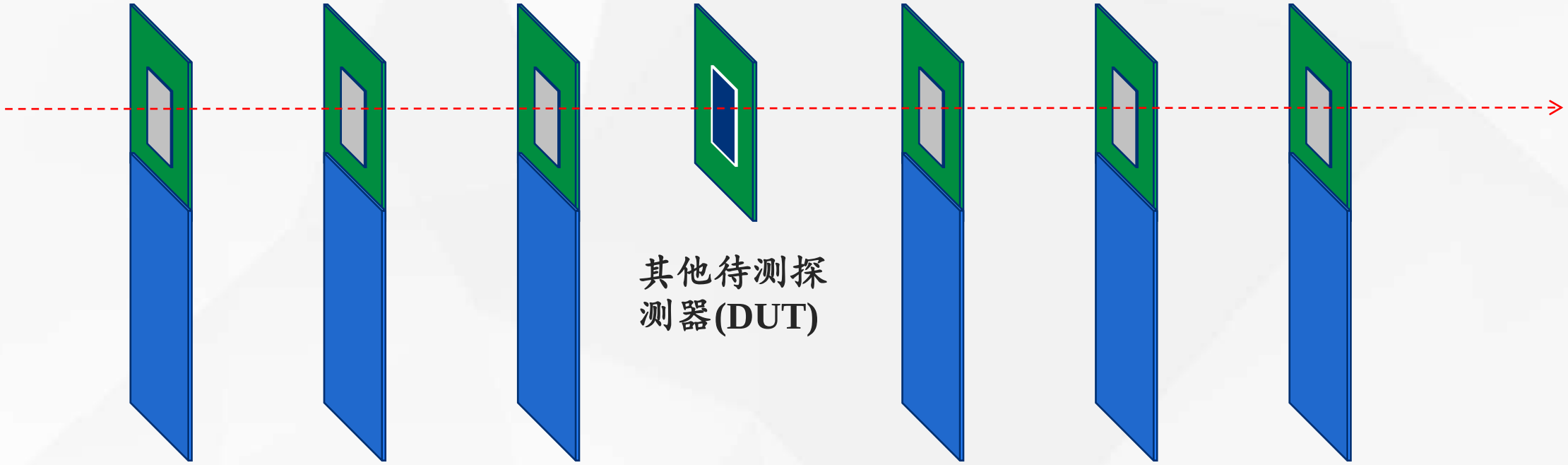


- 基于IPBus的DAQ系统
  - 可扩展性
- 200MHz同源时钟
- 菊花链SYNC信号链路
  - 延迟＜100ns



- 商用FPGA板(Xilinx，KC705)
- HPC FMC连接（芯片<=>读出板）
- 1Gb/s以太网连接（读出板<=>上位机）

Jadepix4望远镜预期

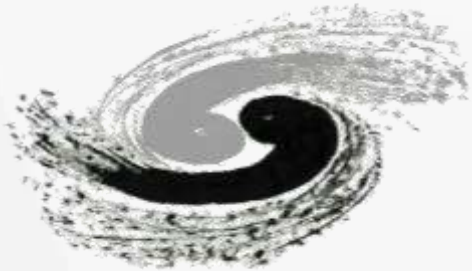


Jadepix4望远镜预期性能		
径迹空间分辨率	探测效率	时间颗粒度
~3μm	＞99%	1μs



电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

目录



1 研究背景及意义

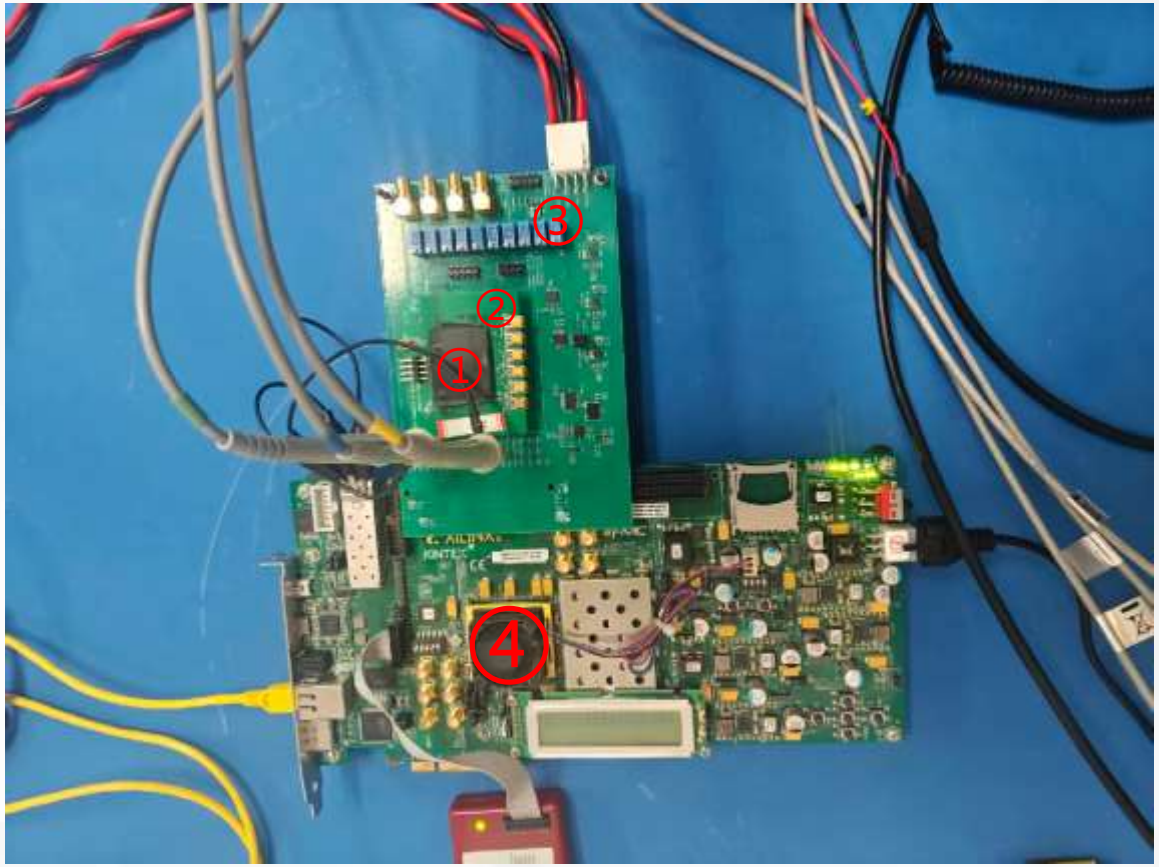
2 Jadepix4芯片测试

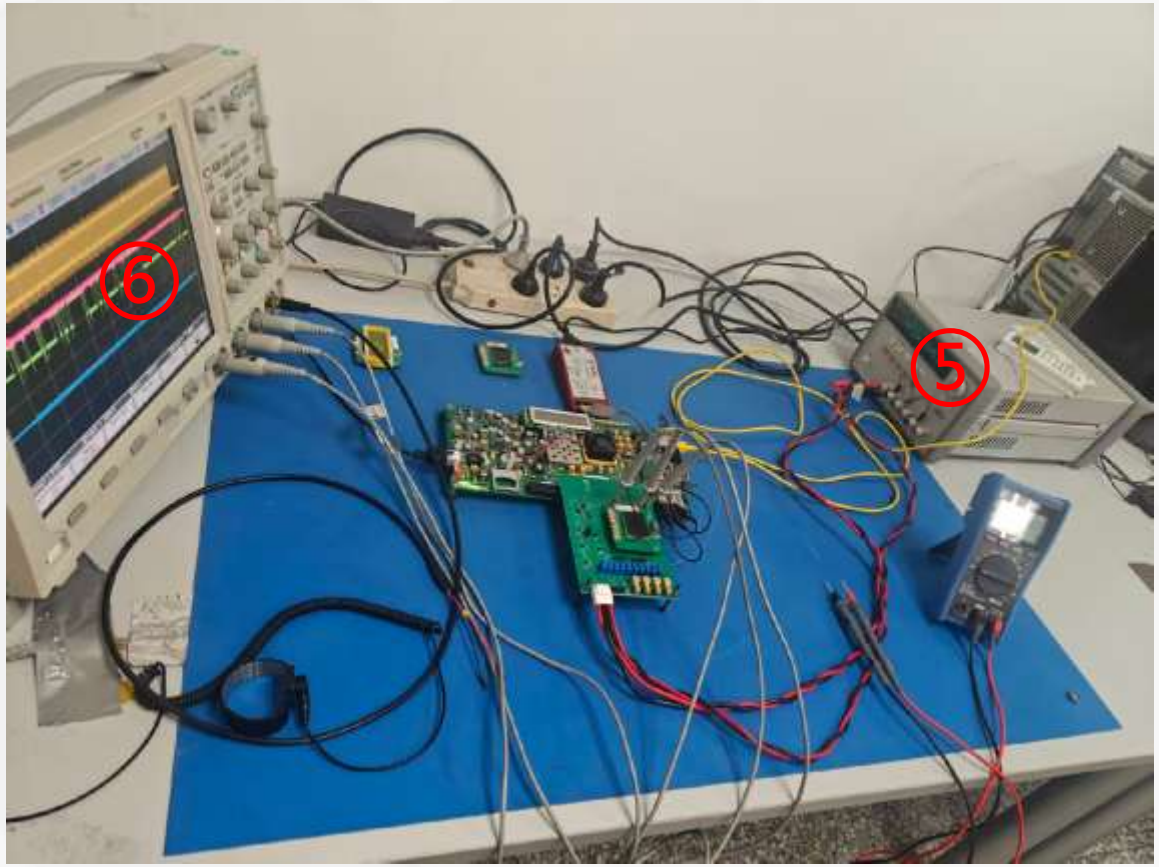
3 束流测试及结果

4 总结与展望



Jadepix4测试系统





①芯片：JadePix-4

②芯片载板-bonding板：为芯片提供机械和电气连接

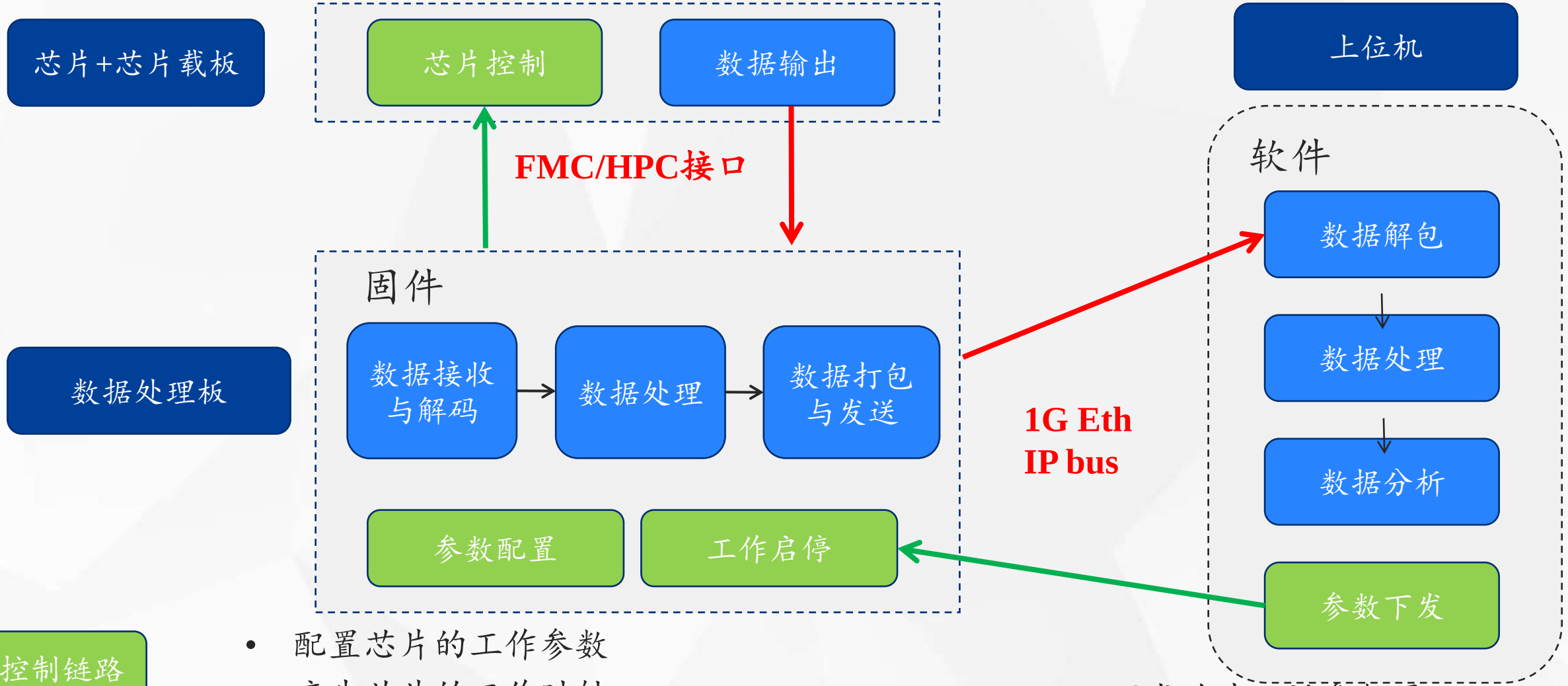
③转接板：DAC,电源以及FMC接口等

④数据读出板(FPGA板)：芯片控制，数据处理与收发

⑤电源：芯片测试子板（4V）

⑥示波器:通过转接板上测试点进行测试工作

控制及数据读出框架



控制链路

数据链路

- 配置芯片的工作参数
- 产生芯片的工作时钟
- 接收并处理探测模块芯片输出的数据
- 将处理后的数据发送给上位机

- 下发芯片预设参数至FPGA
- 控制采数启停
- 接收FPGA的数据，写入dat文件

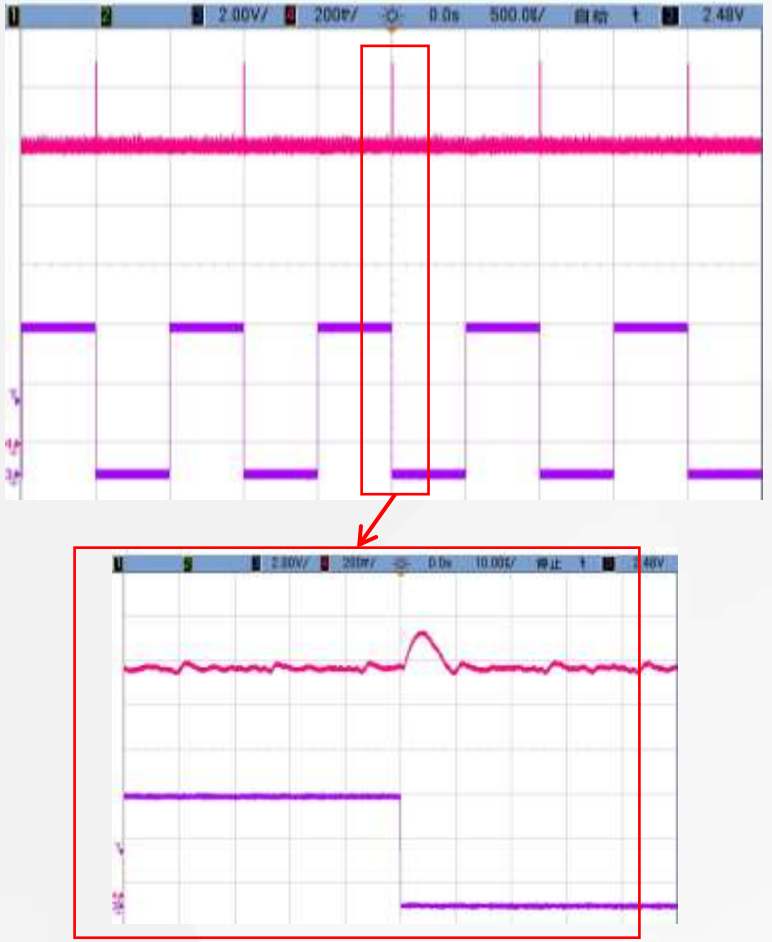
模拟前端测试

脉冲产生 → 电荷注入 → 像素 (355,497) →模拟读出 → 示波器观察

(Row，Col)	Col				
Row	0，0	0，1	……	0，496	0，497
	1，0	1，1	……	……	……
	……	……	……	354，496	354，497
	355，0	355，1	……	355，496	355，497

测试像素(Pulse=1,Mask=0)

其他像素(Pulse=0,Mask=1)

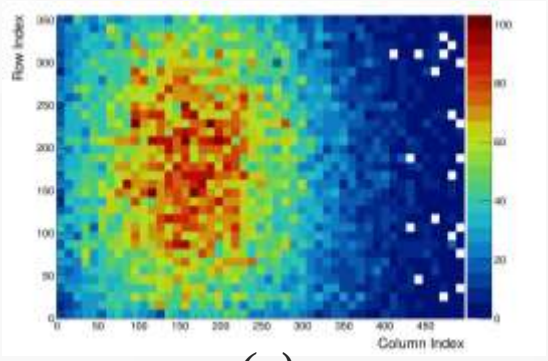


红色：像素(355.497)的模拟信号输出

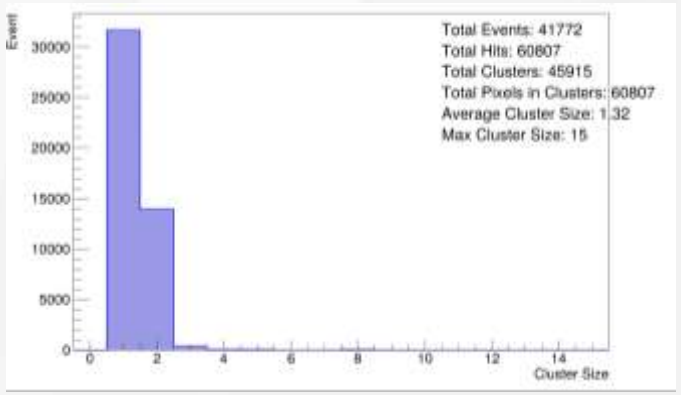
紫色：输入脉冲(V=200mV，T=1ms)

- ✓ **内部注入电容来模拟探测器产生的电荷信号**
- ✓ **验证芯片的模拟链路**
- ✓ **单像素测试、整行/列扫描**

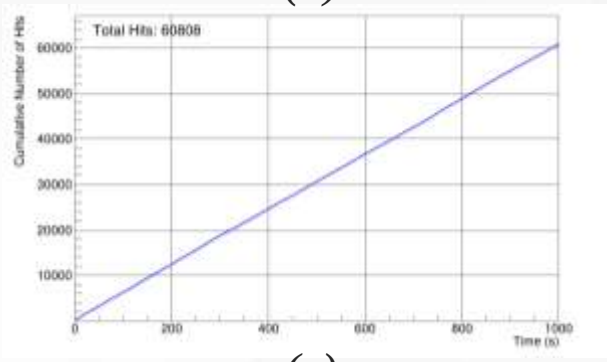
放射源测试



(a)

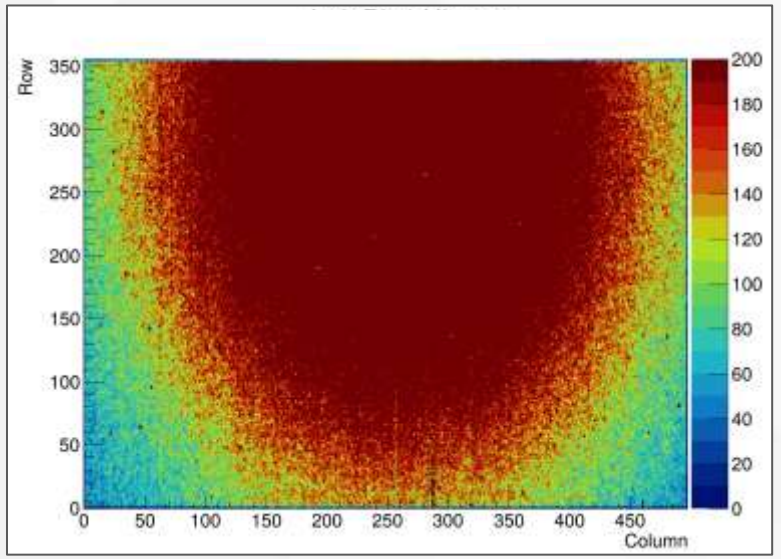


(b)

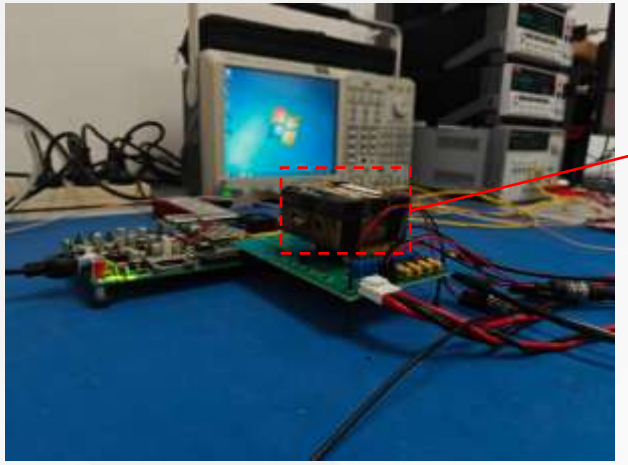


(c)

^{55}Fe 放射源测试:
(a)Hit map
(b)Cluster size
(c)Cumulative hits



^{90}Sr 放射源测试 — Hit map





^{90}Sr 带有准直孔

- ✓ ^{55}Fe 和 ^{90}Sr 放射源测试: 清楚的hitmap图和正常的cluster大小
- ✓ ^{90}Sr 长时间测试: 14 h 连续运行 (期间会定时/条件复位芯片)

电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

目录

1 研究背景及意义

2 Jadepix4芯片测试

3 束流测试及结果

4 总结与展望

测试条件及束流情况：

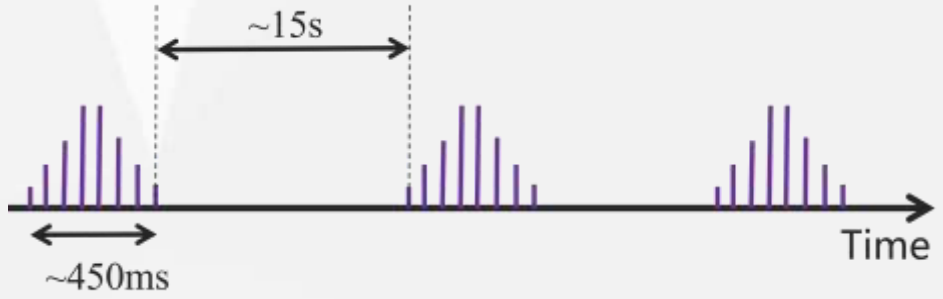
粒子种类: π^+

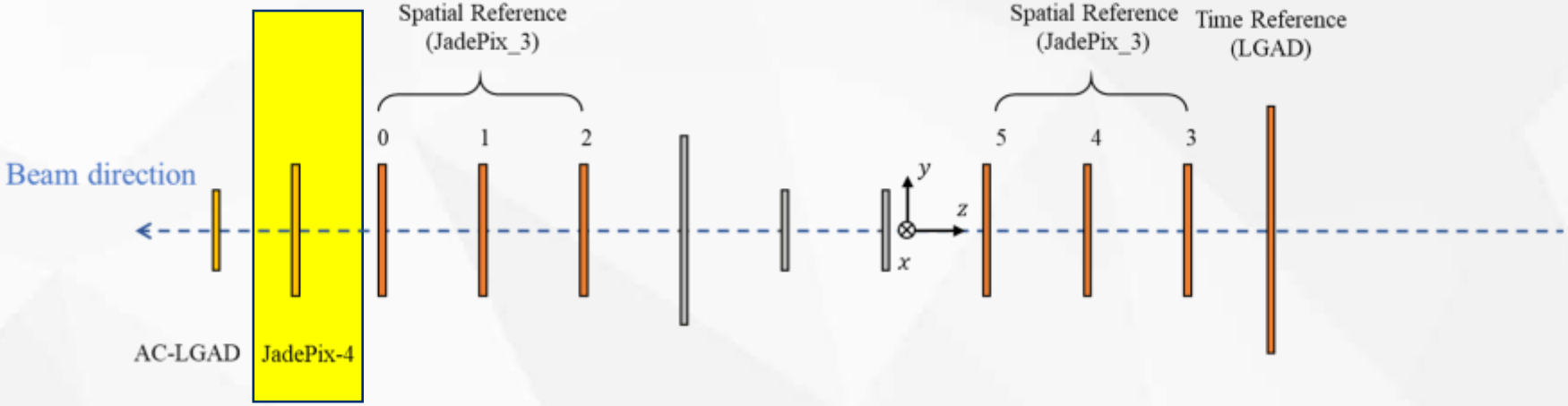
动量: 10 GeV/c

束团间隔: ~15 s

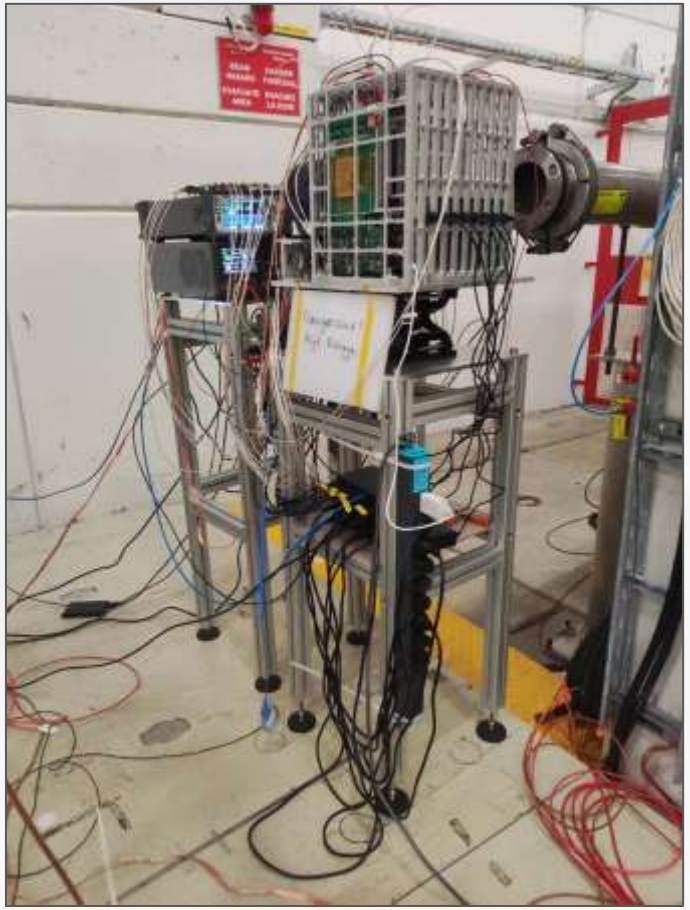
每次Run的采集时间: 20-30 min

每次Run径迹数: ~500k





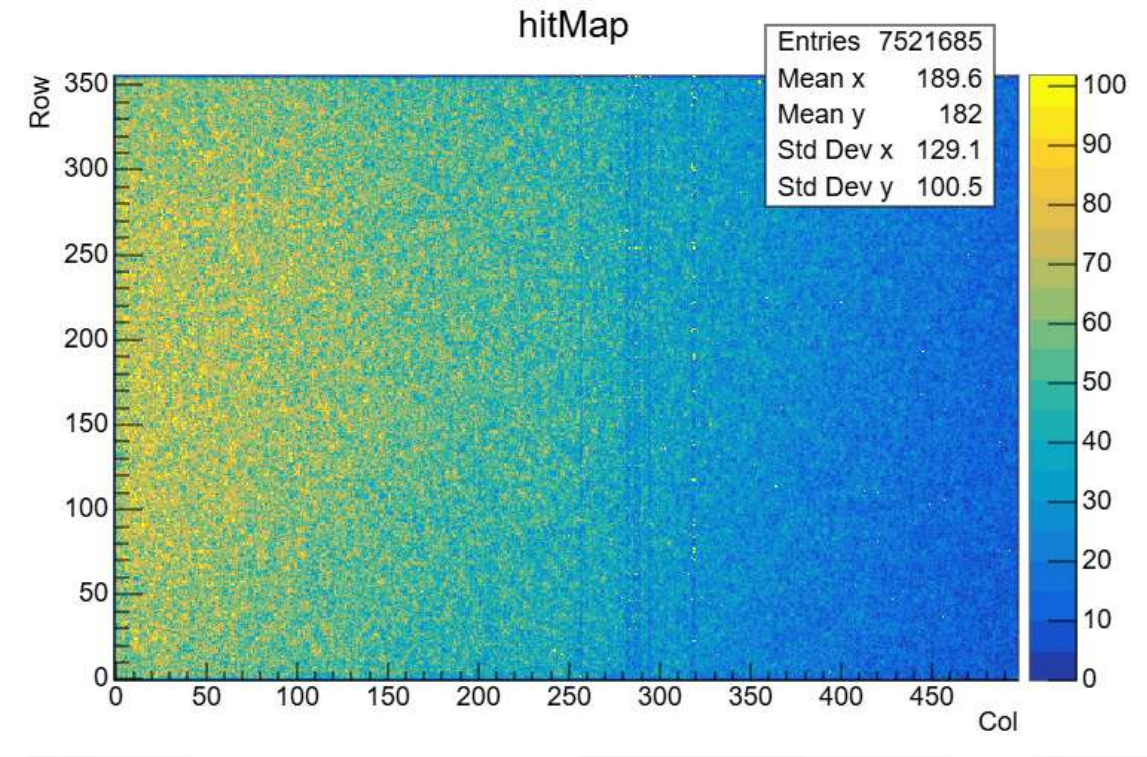
探测器布局 (JadePix-3作为望远镜, LGAD提供时间参考)



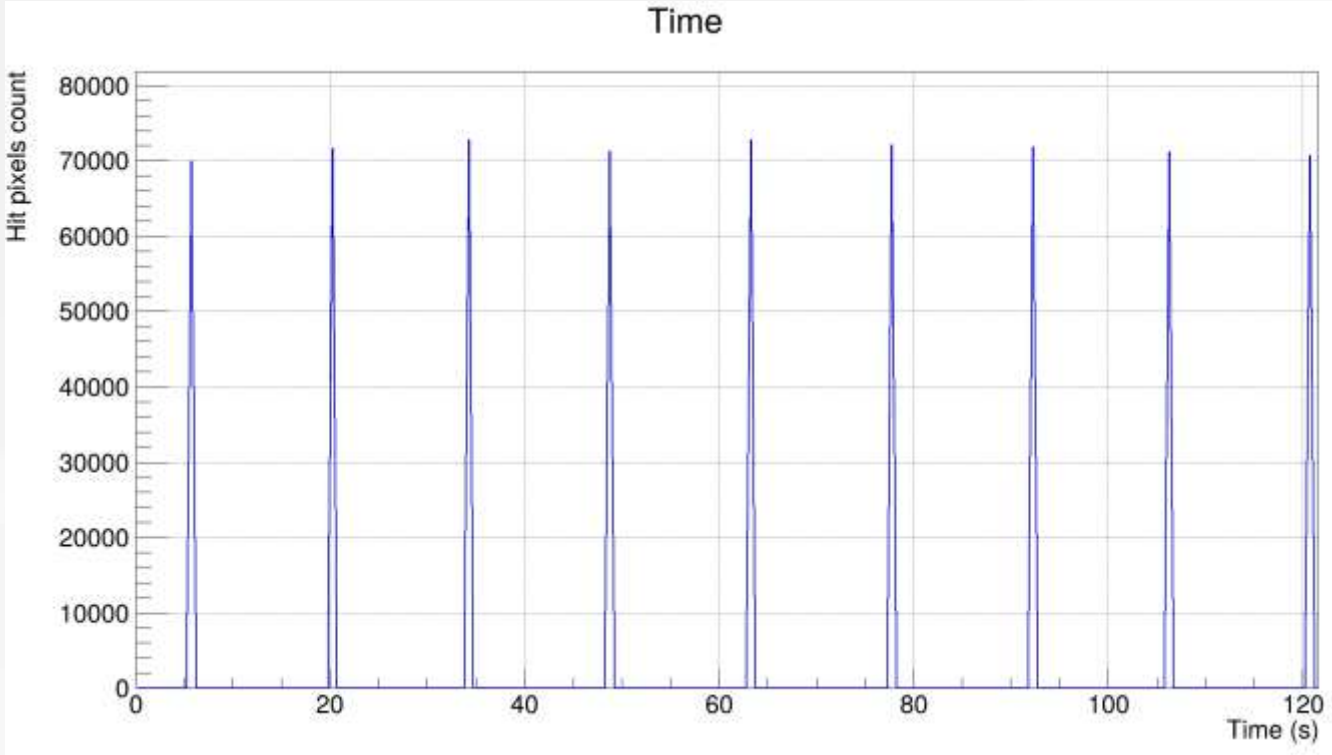
现场测试照片

CERN—Jadepix4芯片测试结果分析

Jadepix4芯片在本次束流测试中共计采集了35个Run，每个Run采数时间为30/20分钟，研究了不同阈值条件下芯片的响应情况与数据读出。



束流中心对准Jadepix3望远镜的正中心，但位于Jadepix4芯片的左侧

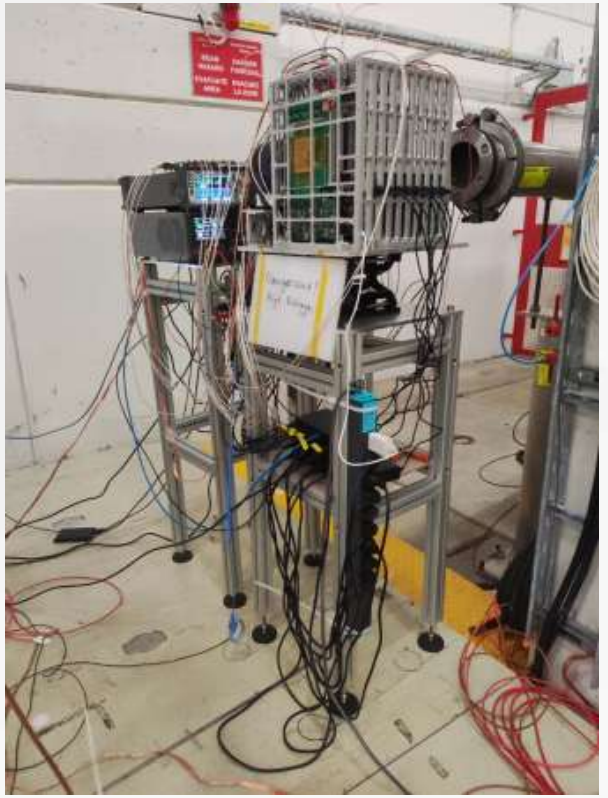


Jadepix4的计数率随时间分布，可以看到明显的束流时间结构

基于Corry的数据分析

❖ **束流测试目的：**验证Jadepix4芯片的正常工作及初步测试其性能

- 探测效率
- 位置分辨、时间分辨



❖ **数据分析基于软件Corryvreckan**

数据解码与聚类

解析原始数据中的像素命中，并将空间和时间上邻近的命中**组合成簇**（Cluster）。

↓

对准（Alignment）

包括**预对齐，望远镜对齐，DUT对齐**。通过迭代优化各探测器平面的位置和旋转参数，使径迹残差最小化，保证几何精度。

↓

径迹重建（Tracking）

利用对准后的望远镜层的cluster拟合出粒子径迹。

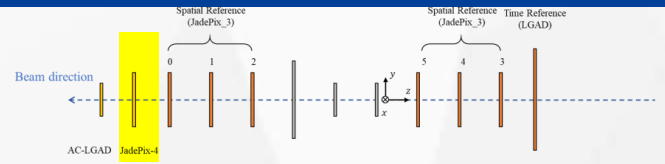
↓

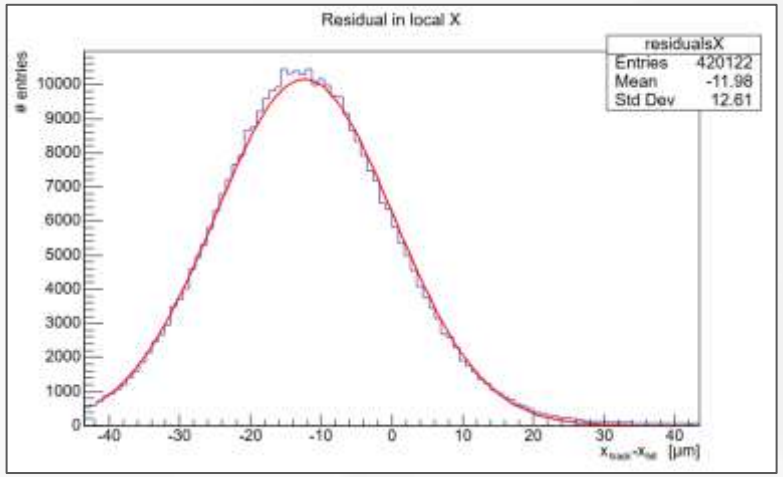
DUT 关联与分析

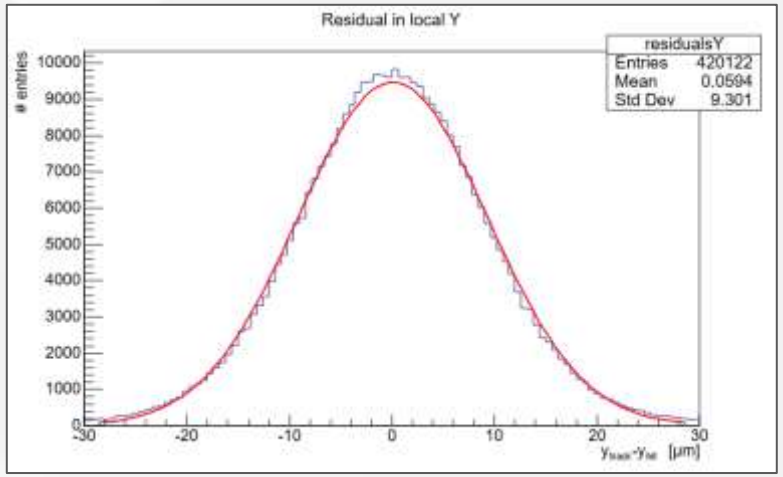
将重建径迹外推到 DUT 平面并与 DUT 簇匹配，进而计算探测效率、空间/时间分辨率等性能指标。

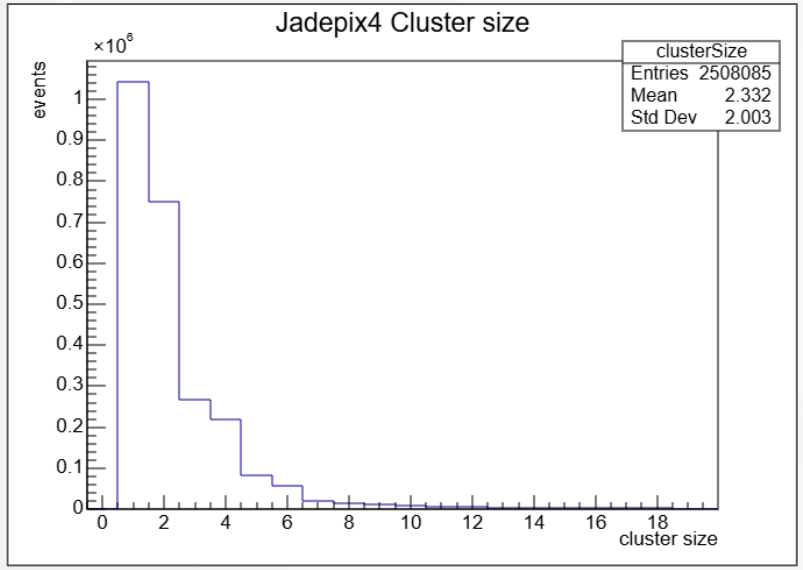
分析结果—空间分辨率

PRELIMINARY









测量残差_X　　测量残差_Y　　簇团尺寸分布

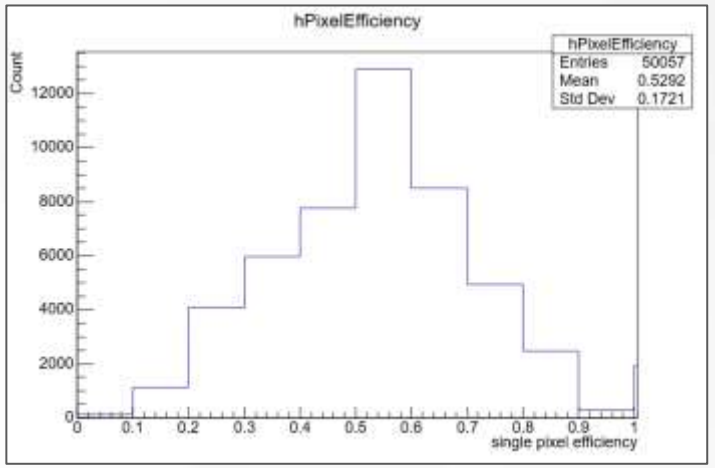
Jadepix4空间分辨率_X	Jadepix4空间分辨率_Y	平均簇团大小
9.7μm	**6.37μm**	2.3 pixels

初步测试结果的空间分辨率并没有达到预期水平！

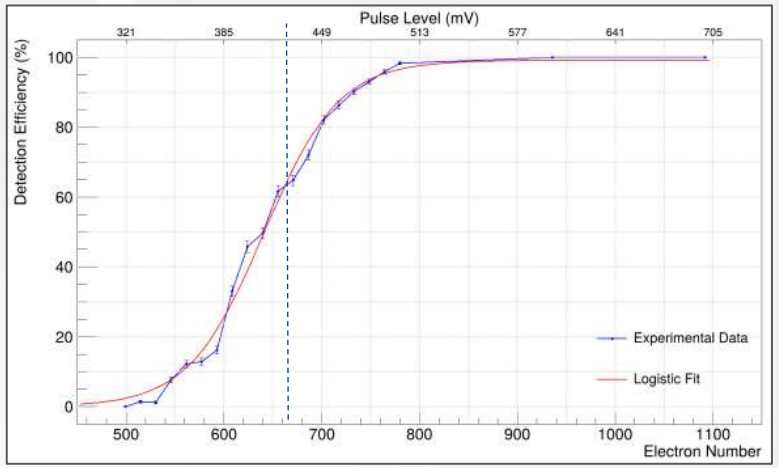
分析结果—探测效率

PRELIMINARY

平均探测效率仅有 52.7% —远小于99%的目标

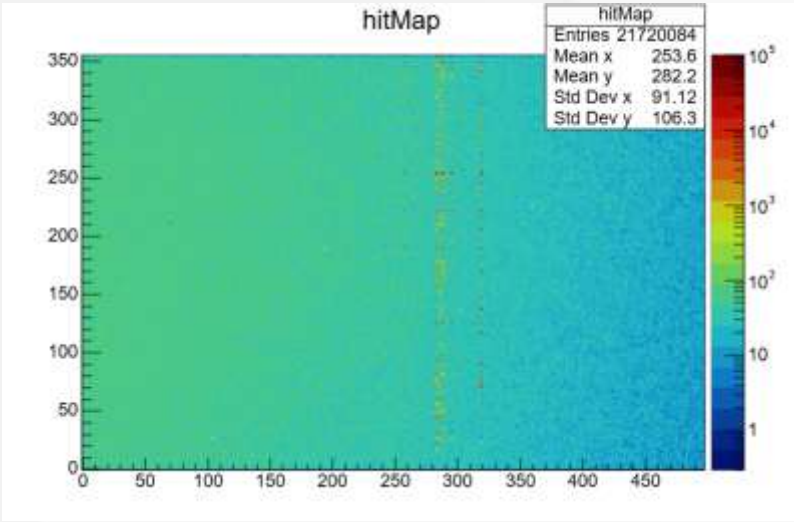


单个像素探测效率分布图



高阈值下的探测效率 VS 输入信号 (pulse test)

在CERN束流测试时，Jadepix4的阈值设置在了600-700e$^-$，影响了探测效率



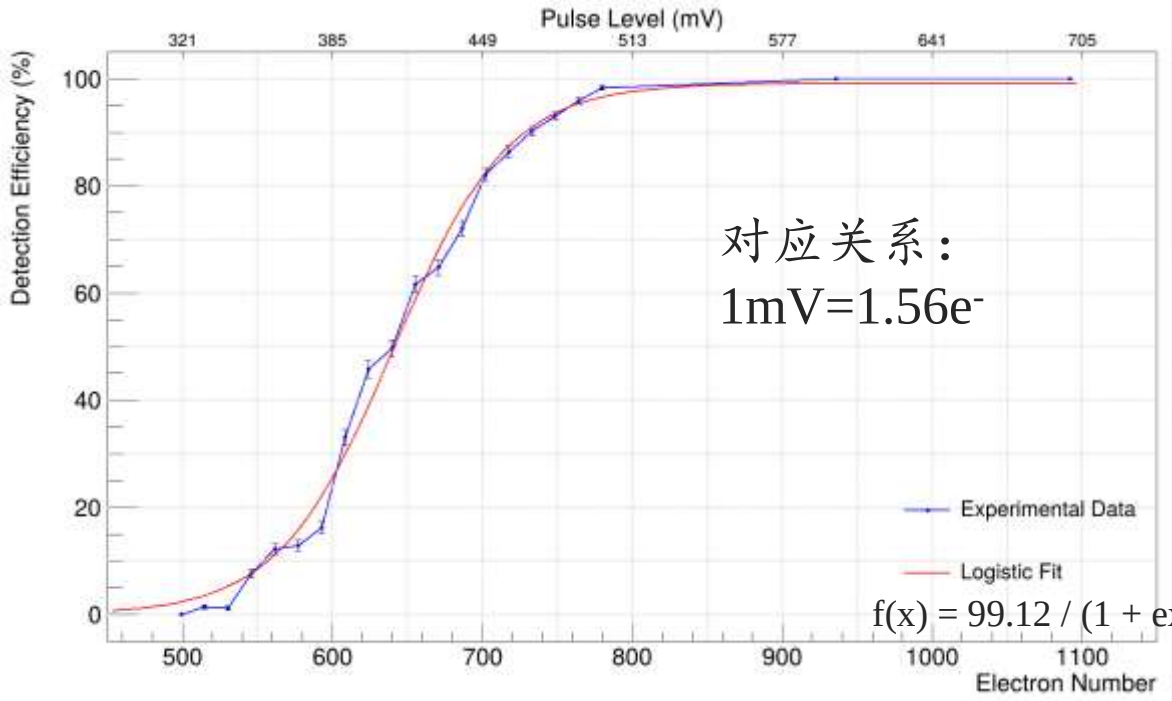
Jadepix4的击中分布图

部分像素列的数据异常多，挤占了正常数据的读出，同样影响探测效率

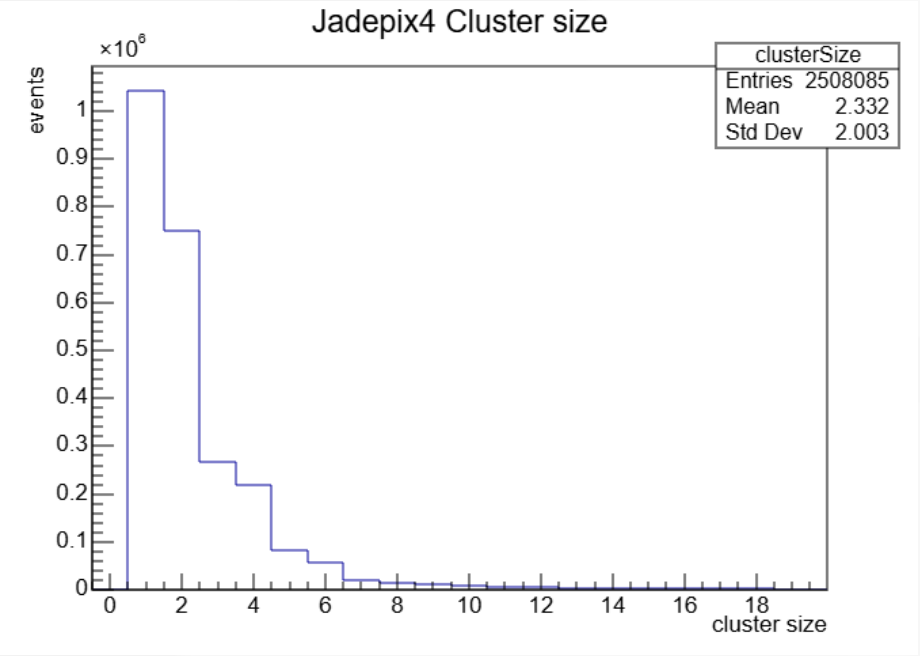
探测效率问题研究①

电脉冲幅度-阈值测试

- 10GeV的pion束流在300μm厚的芯片sensor上产生的电信号约为1000-1200e⁻（经验值）
- 束流测试时，芯片阈值约为680e⁻
- 故若单个粒子产生的电子扩散到3个以上的像素上时，有可能全部不过阈，导致探测效率损失



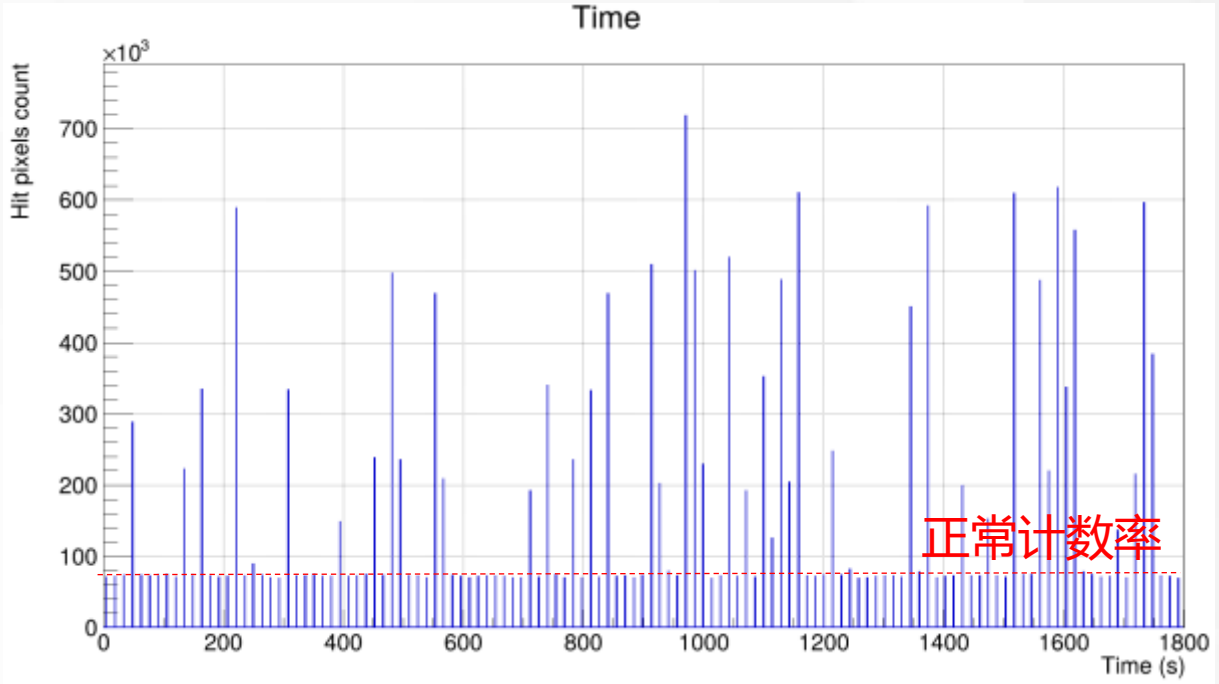
f(x) = 99.12 / (1 + exp(-0.02611 * (x - 640.7)))

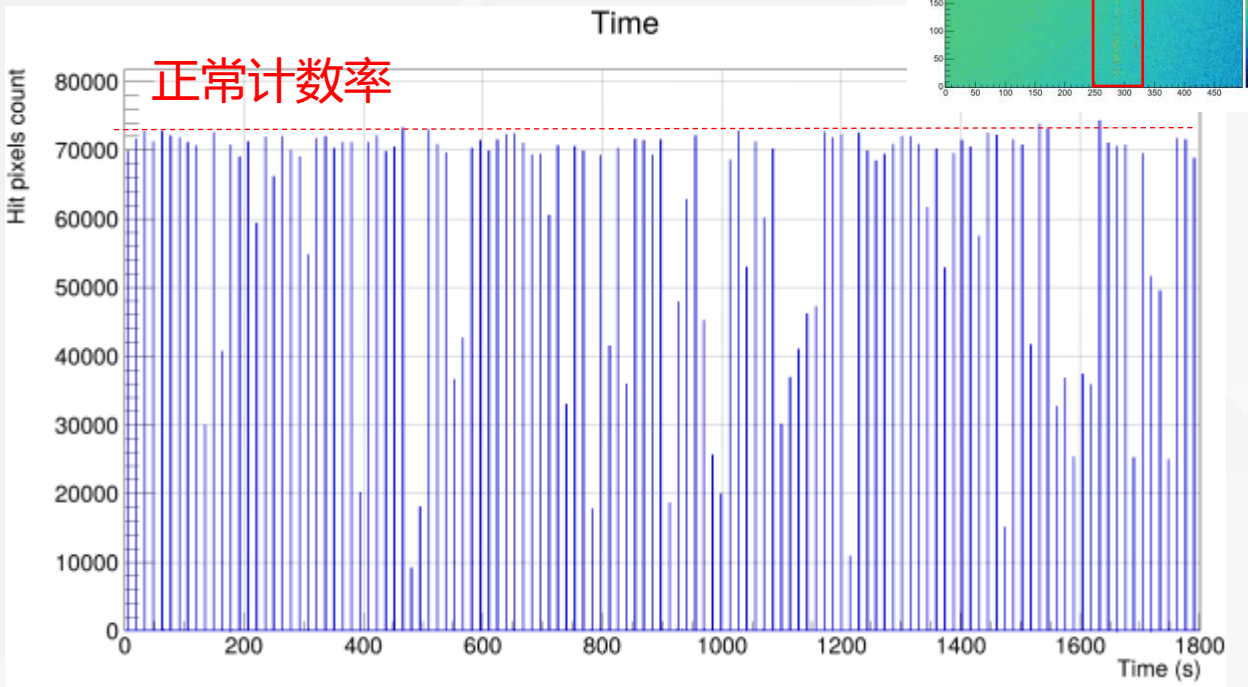


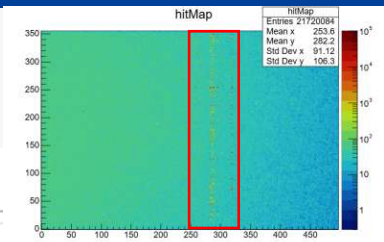
平均Cluster Size=2.3

阈值设置的问题导致了探测效率的主要损失

探测效率问题研究②







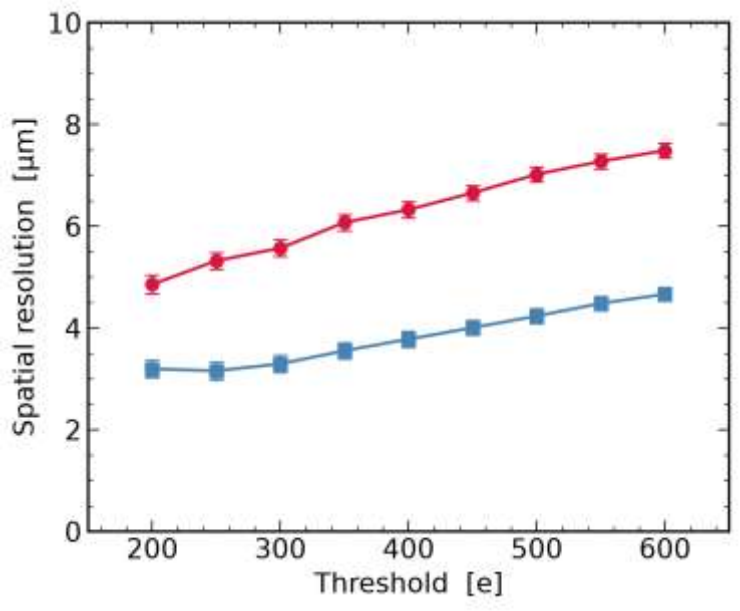
Run597**原始数据**的计数率，明显高于100k/spill
显然是发生了某些像素坏列异常读出

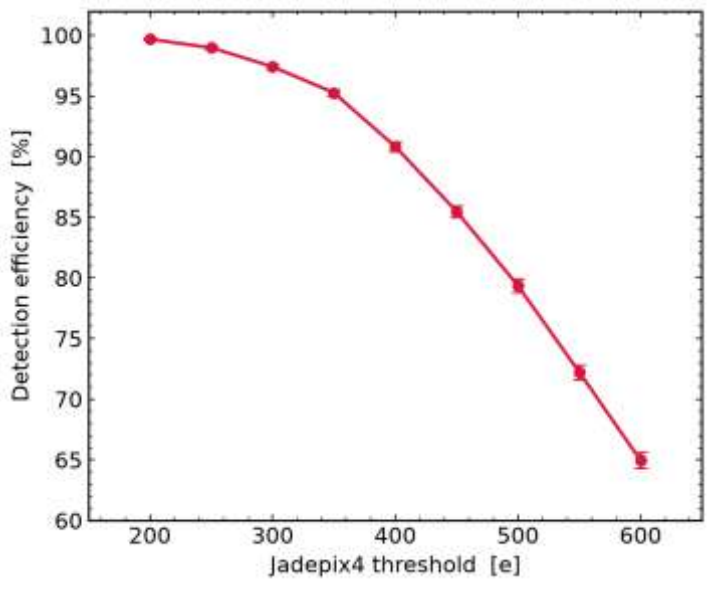
软件处理去除这些spill中的坏列的数据后，对应的spill计数率明显低于平均值

坏列异常读出的问题导致了探测效率的次要损失

最新的研究结果显示，Mask这些坏列后，芯片可以正常采集数据！

模拟验证





- Allpix² + Corryvreckan模拟复现了本次束流测试的探测器几何结构与数据分析过程
- σX / σY 从 200 e^- 时的约 4.86 / 3.20 μm 下降至 600 e^- 时的约 7.49 / 4.67 μm
- 效率从 200 e^- 时的约 99% 下降至 600 e^- 时的约 65%

效率损失和分辨率变差的主要原因是由于阈值设置得过高造成的！

电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

目录

1 研究背景及意义

2 Jadepix4芯片测试

3 束流测试及结果

4 总结与展望

总结与展望

- ✓ Jadepix3望远镜的恢复与集成
- ✓ Jadepix4芯片的测试系统开发
- ✓ Jadepix4芯片的实验室测试工作

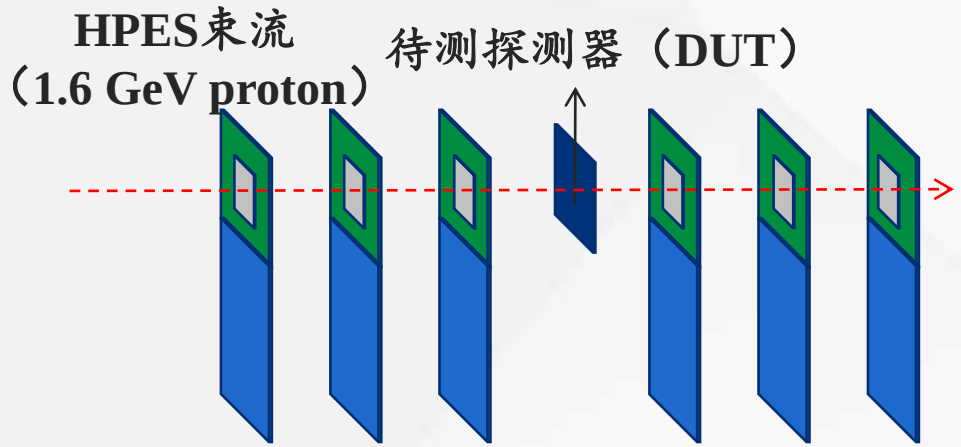
2025.12—2026.6

- ✓ CERN束流测试
- ✓ 测试结果数据分析

2026.6—2026.8

针对数据分析中发现的探测效率低的问题：

1. 对Jadepix4做阈值扫描，确定最佳工作点
2. 进一步研究坏列出现的情况及解决办法
3. 使用Jadepix3望远镜，将Jadepix4放在中间位置作为DUT进行补充测试



2026.9—2026.11

- ➢ Jadepix4做SCurve测试
- ➢ 测试至少六块可用Jadepix4芯片
- ➢ 集成Jadepix4束流望远镜
- ➢ Jadepix4望远镜固件/软件开发
- ➢ 日本KEK束流测试验证

电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

感　　谢！

王泳棋
TB&D-2
2026.10.10