



北京科技大学  
University of Science and Technology Beijing

# CMOS 像素探测器电荷收集效率研究

数理学院 应用物理专业 2014级

杨涛

指导老师：闻小龙（北科大）、史欣（高能所）

\*毕设答辩报告\*



## \*实验平台及背景简介\*

### 1、JadePix1 应用背景与几何构造

### 2、粒子与硅介质的相互作用

- $^{55}\text{Fe}$ : 光子与硅介质的相互作用
- $^{90}\text{Sr}$ : 带电粒子与介质的相互作用

### 3、数据读出系统

- 硬件测试系统结构
- 信号读出方式

## \*数据处理\*

### 4、原始数据处理

- 事例判选
- 簇团定义

### 5、 $^{55}\text{Fe}$ 辐射源测试

- 不同几何结构收集能谱的比较
- 增益计算及电荷收集效率分析

### 6、 $^{90}\text{Sr}$ 辐射源测试

- 带电粒子电离能谱的比较
- 电荷收集效率分析

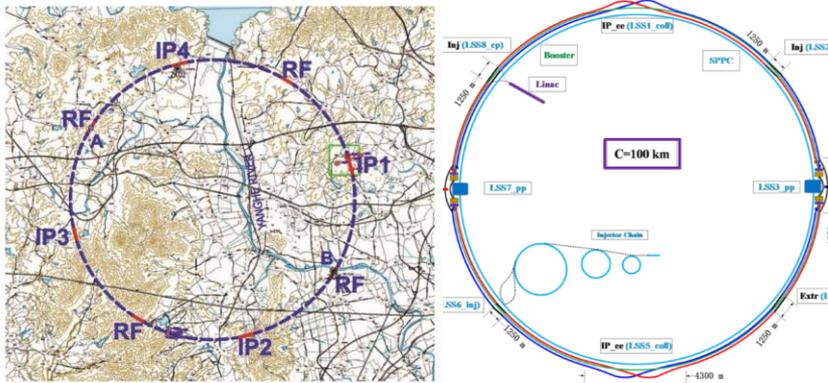


图 1. CEPC 在秦皇岛地区的假想图

2012年希格斯粒子的发现引发了新一轮世界高能物理领域的战略规划，环形正负电子对撞机(Circular Electron-Positron Collider, 简称 CEPC)的概念应运而生。

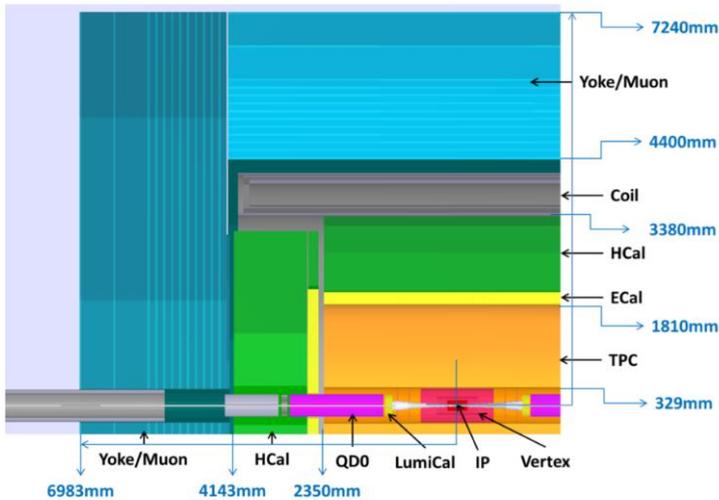


图 2. CEPC 探测器 1/4 截面图

CEPC 探测器的概念设计主要包括以下几个部分：

- **顶点探测器(Vertex)**
- **径迹探测器**：由硅基的内层径迹探测器(SIT), 前置径迹轮盘(FTDs), 硅基外层径迹探测器(SET), 外置径迹轮盘(ETDs)四个部分组成。
- **时间投影室(TPC)**
- **量能器系统**
- **超导螺线管**
- **$\mu$ 介子探测器**



**\*JadePix1 几何构造\***

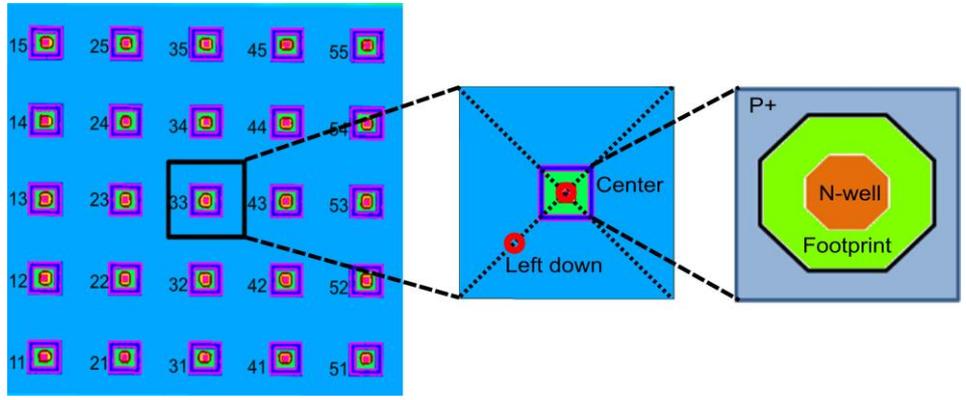


图 1. 像素阵列集电极(Diode)俯视图

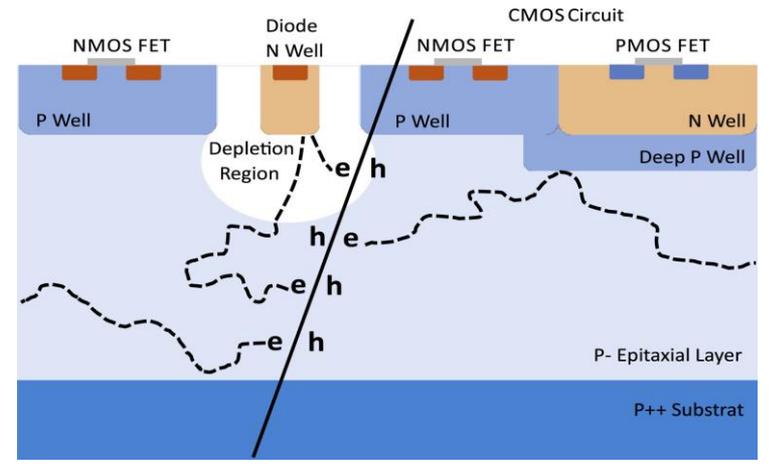


图 2. 单个像素及其MOS管截面

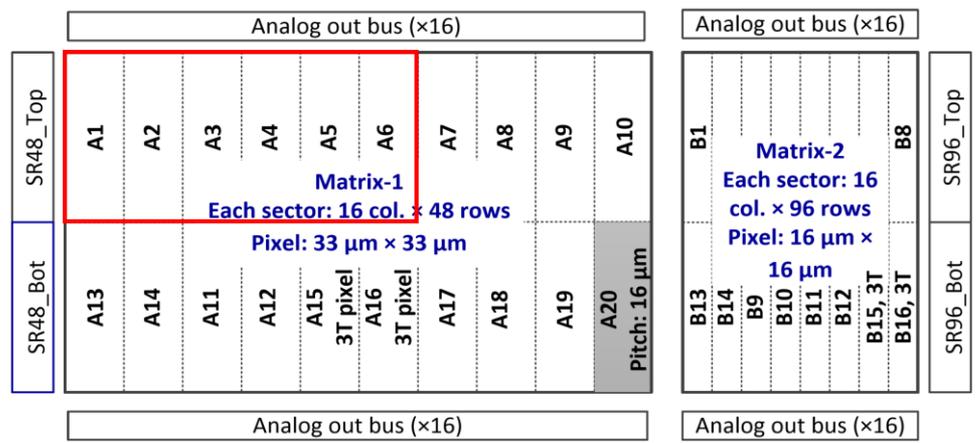


图 3. JadePix1像素阵列布局

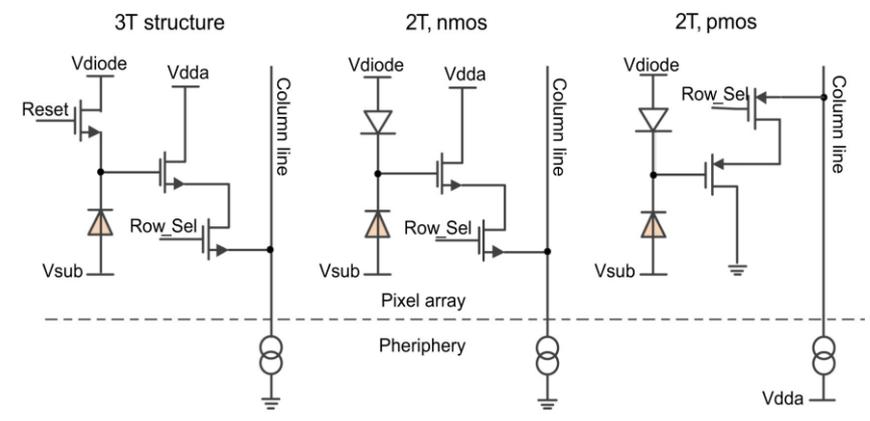
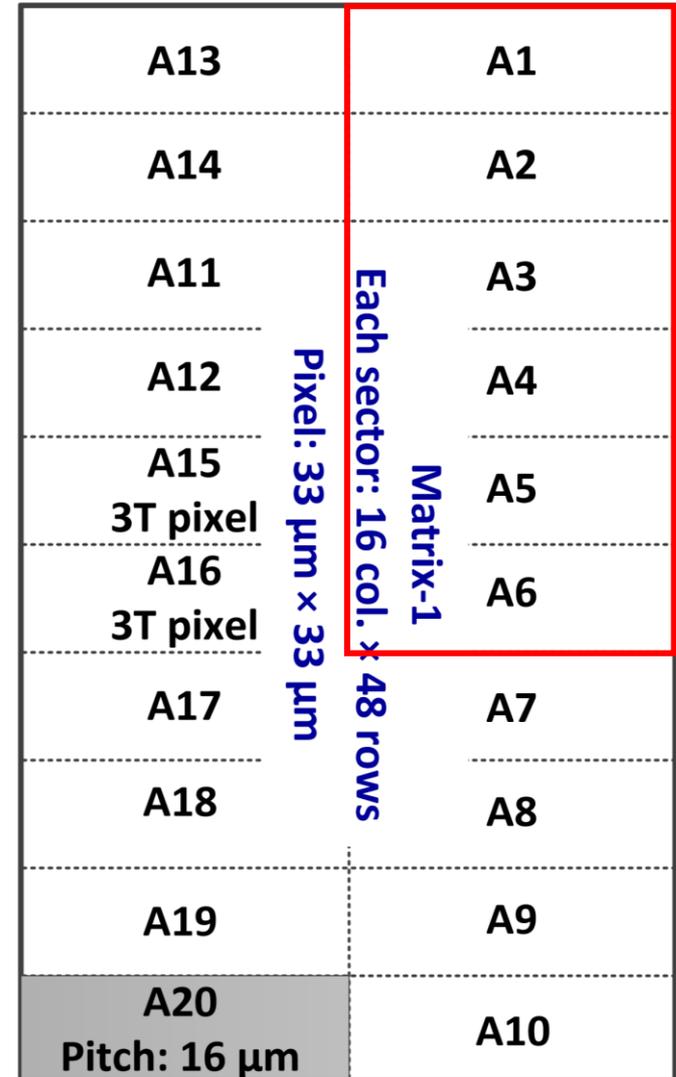


图 4 .3种不同的读出电子学电路



<i>Sector</i>	<i>Diode surface</i>	<i>Footprint</i>	<i>Structure</i>
A1	4 $\mu\text{m}^2$	30 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A2	8 $\mu\text{m}^2$	30 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A3	15 $\mu\text{m}^2$	30 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A4	4 $\mu\text{m}^2$	20 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A5	8 $\mu\text{m}^2$	20 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A6	15 $\mu\text{m}^2$	20 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A7	4 $\mu\text{m}^2$	15 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A8	8 $\mu\text{m}^2$	15 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A9	15 $\mu\text{m}^2$	15 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A10	3 $\mu\text{m}^2$	11 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A11	4 $\mu\text{m}^2$	11 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A12	8 $\mu\text{m}^2$	11 $\mu\text{m}^2$	2T_nmos
A13	4 $\mu\text{m}^2$	30 $\mu\text{m}^2$	2T_pmos
A14	8 $\mu\text{m}^2$	11 $\mu\text{m}^2$	2T_pmos
A15	4 $\mu\text{m}^2$	30 $\mu\text{m}^2$	3T_nmos
A16	8 $\mu\text{m}^2$	11 $\mu\text{m}^2$	3T_nmos





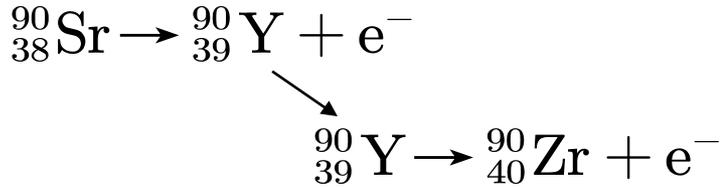
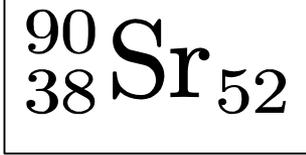
Energy(keV)	Intensity(%)	Assignment	
0.556	0.037	Mn L <sub>l</sub>	
0.568	0.025	Mn L <sub>h</sub>	
0.637	0.028	Mn L <sub>α2</sub>	
0.637	0.250	Mn L <sub>α1</sub>	
0.640	0.002	Mn L <sub>β6</sub>	
0.648	0.190	Mn L <sub>β1</sub>	
0.720	0.011	Mn L <sub>β4</sub>	
0.720	0.017	Mn L <sub>β3</sub>	
5.9KeV {	5.770	6.9e-6	Mn K <sub>α3</sub>
	5.888	8.5	Mn K <sub>α2</sub>
	5.899	16.9	Mn K <sub>α1</sub>
6.5KeV {	6.490	1.01	Mn K <sub>β3</sub>
	6.490	1.98	Mn K <sub>β1</sub>
	6.536	0.00089	Mn K <sub>β5</sub>
	6.539	8.5e-8	Mn K <sub>β4</sub>

**\*光子与硅介质的相互作用\***



电子俘获过程中会伴随发射标识X射线、γ射线和俄歇电子。辐射出两种主要的X射线光子，分别为5.9KeV (~90%) 和6.5eV (~10%)，半衰期为2.73年。以5.9Kev计，单个该光子被硅介质完全吸收后，由于光电效应产生的电子-空穴对数量约为：

$$J_p = \frac{5.9\text{keV}}{3.6\text{eV}} \approx 1640 \text{ pairs}$$



${}^{90}\text{Sr}$ (锶-90)是一种  $\beta$  射线源。 ${}^{90}\text{Sr}$  会进行  $\beta$  衰变, 放出电子和  ${}^{90}\text{Y}$  (钇-90), 并释放 0.546 MeV 能量的电子, 该反应的半衰期为 28.79 年。 ${}^{90}\text{Y}$  会进一步发生  $\beta$  衰变生成稳定的 (锆-90), 此反应的半衰期为 64.053 小时, 释放 2.28 MeV 能量的电子。

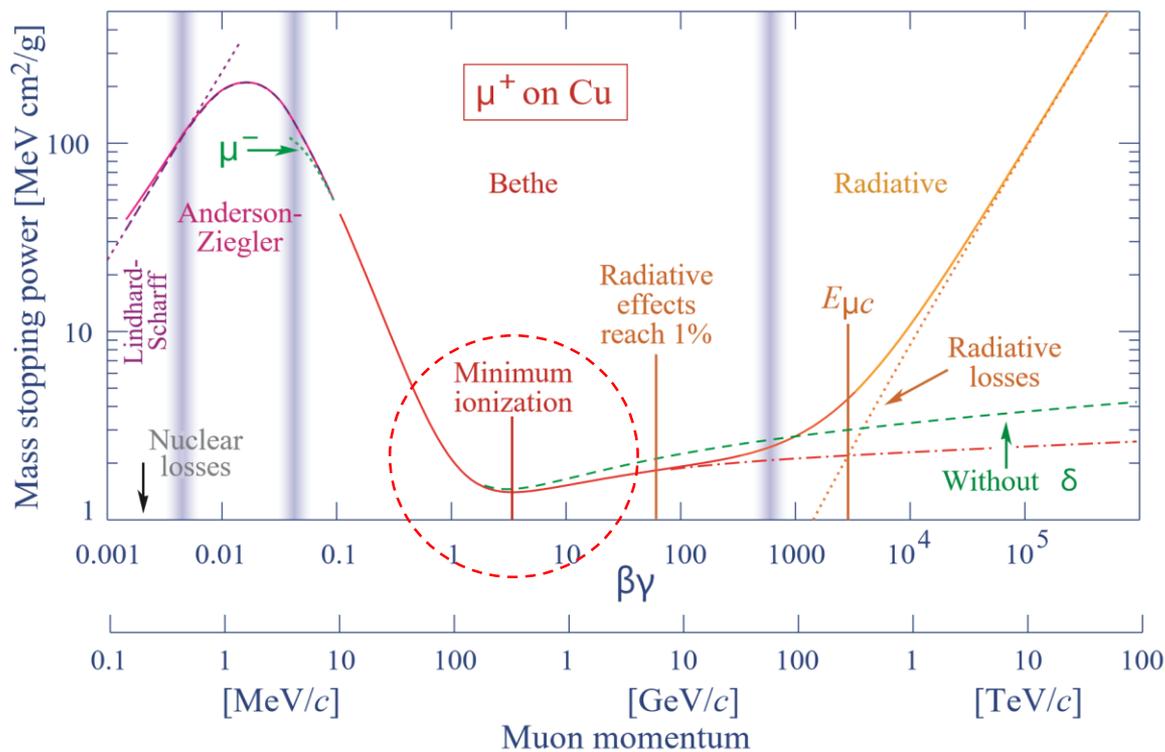
**\*带电粒子与硅介质的相互作用\***

**最小电离粒子(MIP)** 在单晶硅中的平均电离能损约为 388 eV/ $\mu\text{m}$  或 1.66 MeVg<sup>-1</sup>cm<sup>2</sup>。且最大概然能损约为平均电离能损的70%。对于最小电离粒子来说, 在 1 $\mu\text{m}$  厚的硅材料中**最可能产生**的空穴电子对数为

$$J_e = \frac{388\text{eV}/\mu\text{m}}{3.6\text{eV}} \times 70\% \approx 76 \text{ pairs}/\mu\text{m}$$



**Bethe-Bloch formula :** 
$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 z^2 \left(\frac{Z}{A}\right) \left(\frac{1}{\beta^2}\right) \left[ \frac{1}{2} \ln\left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2 T_{\max}}{I^2}\right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$



上图给出了  $\mu^+$  介子在 Cu 中的电离能损分布。在  $\beta\gamma \approx 3$  处粒子拥有最低的平均能损，我们把这个最小的能损值称为**最小电离能损**，位于该区域的粒子称为**最小电离粒子(MIP)**。事实上在高能物理实验中的绝大多数粒子(包括 $^{90}\text{Sr}$ 辐射出的  $\beta$  射线)的平均电离能损都位于这个最小值区域附近，所以在处理这些粒子的时候都近似当成最小电离粒子处理。 Ref : Tornqvist N A. [Review of Particle Physics](#)[J]. 中国物理c:英文版, 2016, 40(9):441-444.

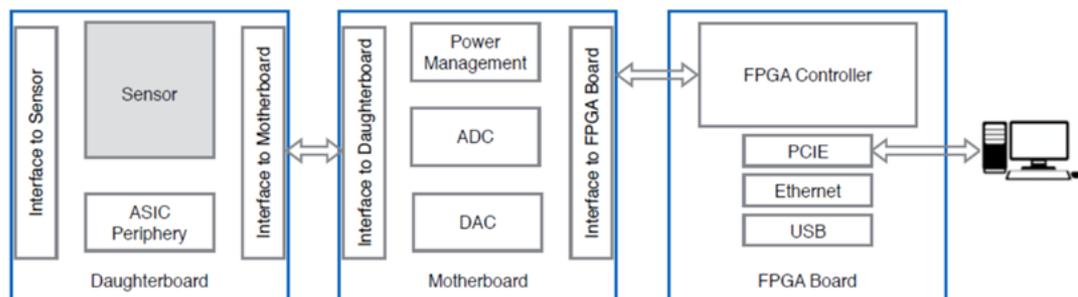


图1. 测试系统结构图

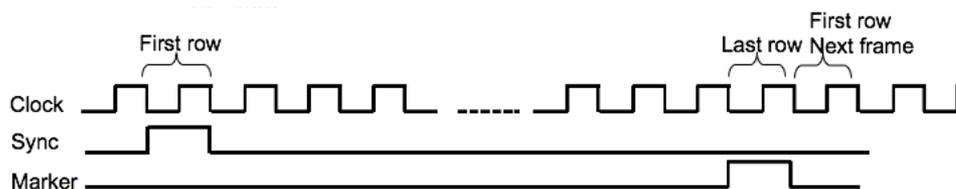


图2. 芯片信号发送时序图

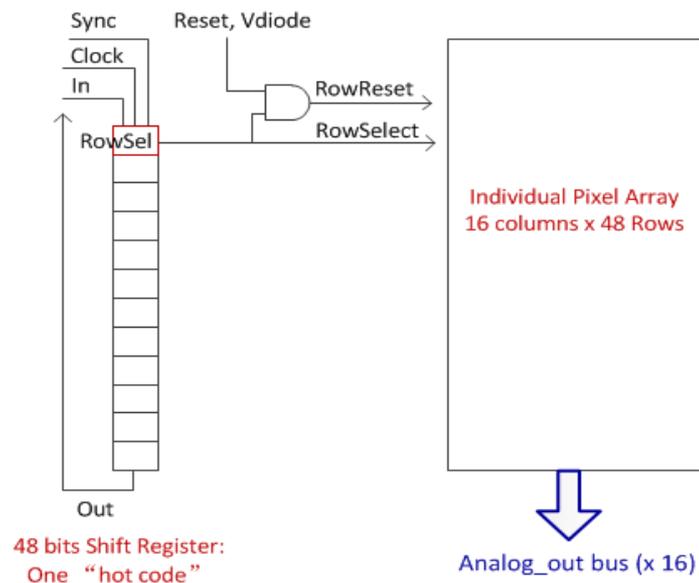


图3. 芯片信号发送流程

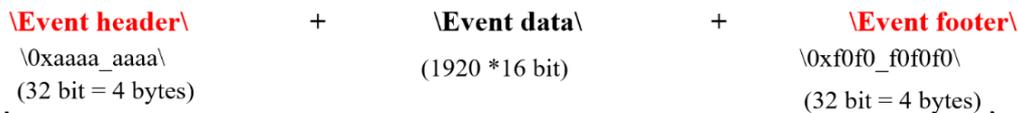
如图1所示，CMOS 芯片通过打线机 bonding 在子板上，然后连接到母板，经过 ADC 转换到 FPGA 开发板，最后将数据通过上位机的获取程序传出。图2和图3展示了时钟信号 Clock 和同步信号 Sync 等控制单个像素子阵列一行一行的读出每个像素格点。由于电荷收集转换的电压信号，每行有 48 个像素格点。采样时钟的频率是 2MHz，一个时钟脉冲信号触发探测器读出电路向外发送一个通道 48 个像素的模拟电压信号。



**\*原始数据处理\***

(1536 bytes + 48\*(4+4)bytes = 1920 bytes)

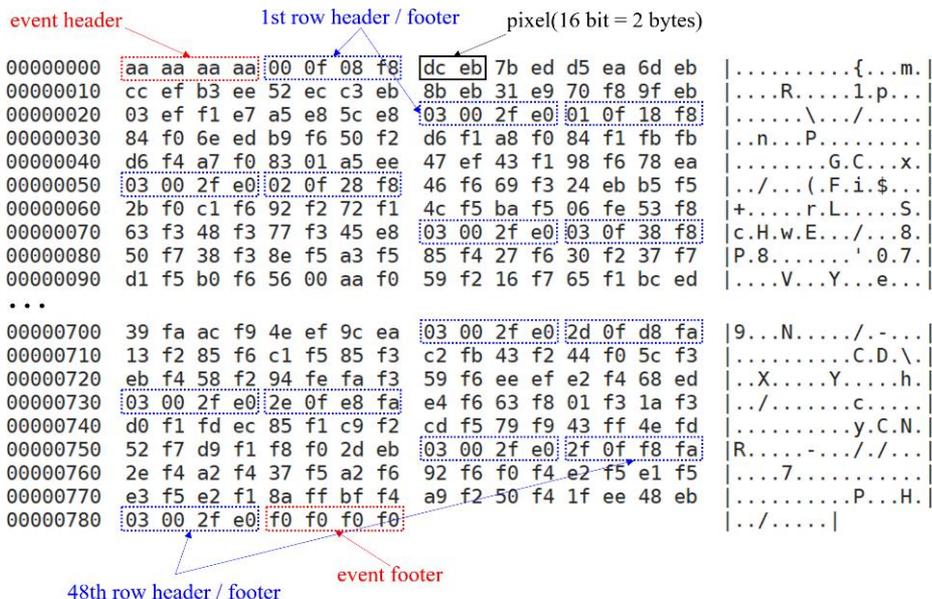
\Row header\ + \Row data\ + \Row footer\ + .....



1 Event : 1928 bytes

2MHz 的通道采样时钟的采样速度为:

$$\frac{1928 \text{ bytes} \times 2\text{MHz}}{48 \text{ row}} \approx 76.61\text{M/s}$$



处理原始数据时，需根据帧头和帧尾来查找一帧的数据，在确定没有数据破损的前提下，去除帧头/尾和行头/尾，保留干净的像素数据。

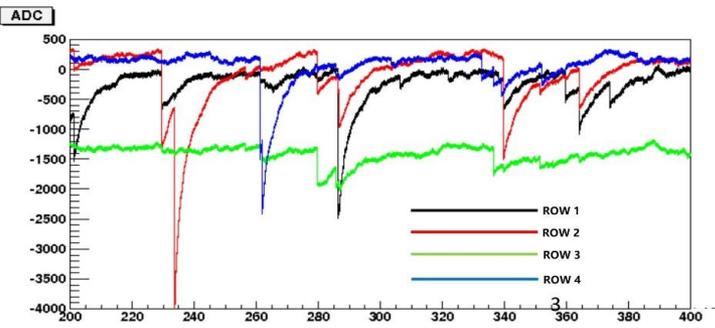


图1. 单个像素电荷信号沉积随时间变化\* (\*by Ryuta)

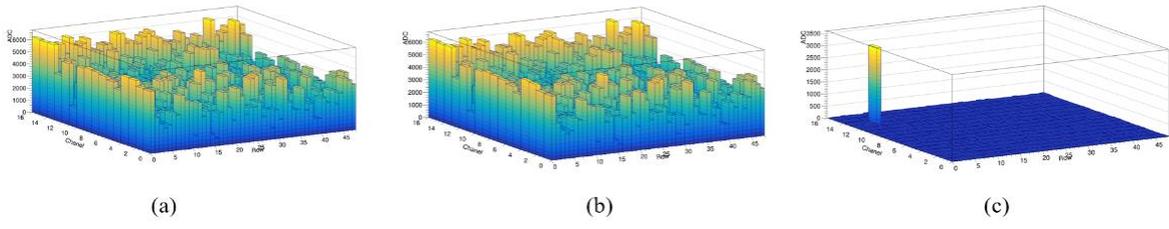


图2. 双采样之后突显的事例信号

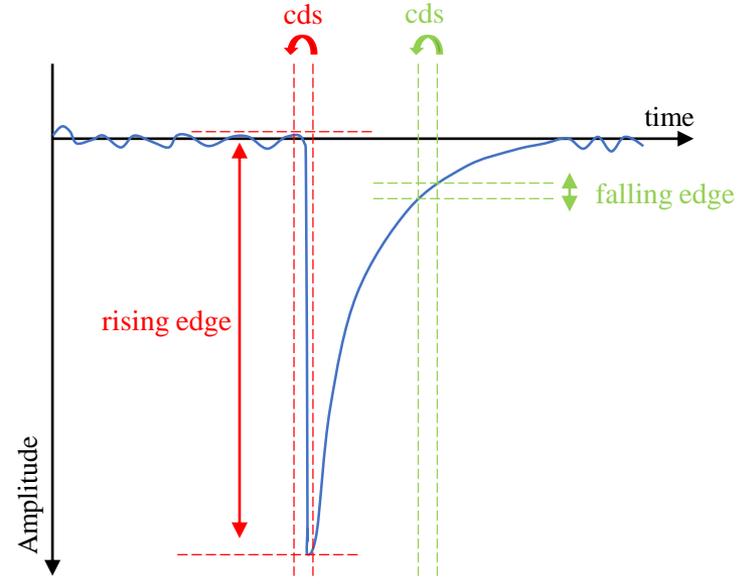


图3. CDS处理过程图

由于在实际的器件中，某个粒子在像素中产生的信号通常是一个突变的上升沿然后随时间缓慢下降。而两次数据的采样间隔远远小于信号的下降时间。再加之环境中的电磁辐射，宇宙射线以及器件电流的干扰，实际的有效粒子信号通常会叠加或淹没在背景噪声中。**在获取到一帧的数据之后，需要将当前帧的数据减去前一帧的数据，通过双采样(CDS)来找到有效的入射粒子信号。**

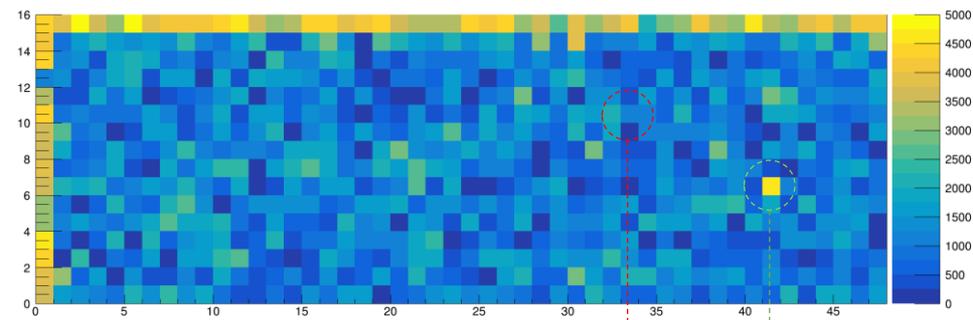


图1. 前一帧

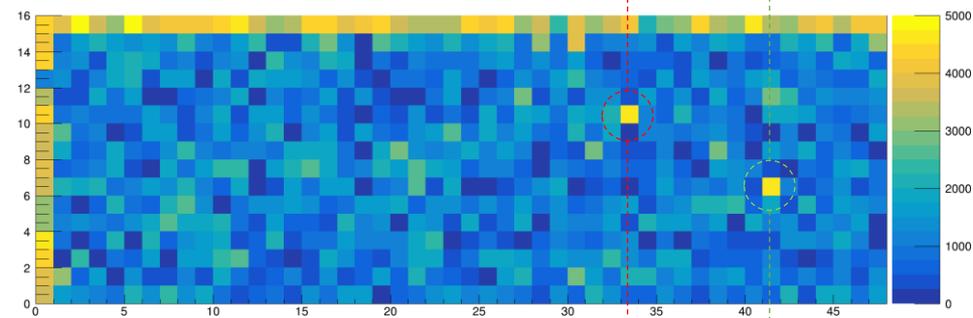
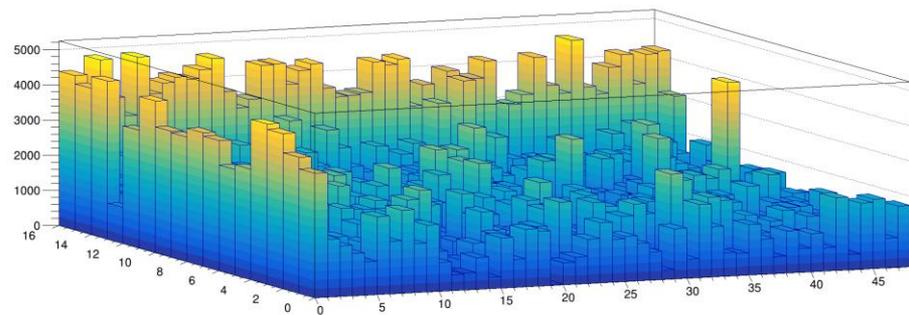
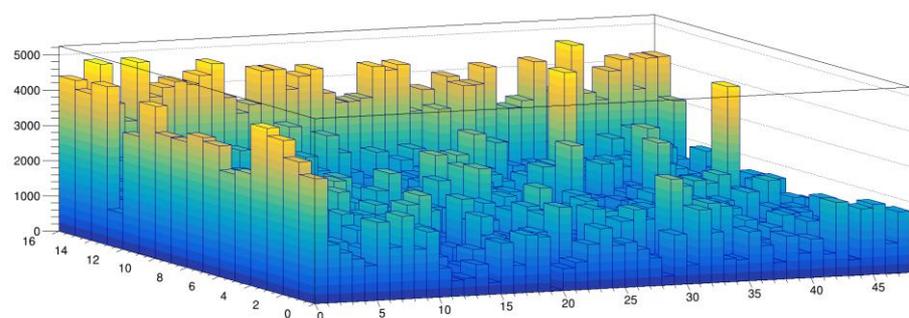


图2. 后一帧



双采样突显事例信号

双采样避免多次采样

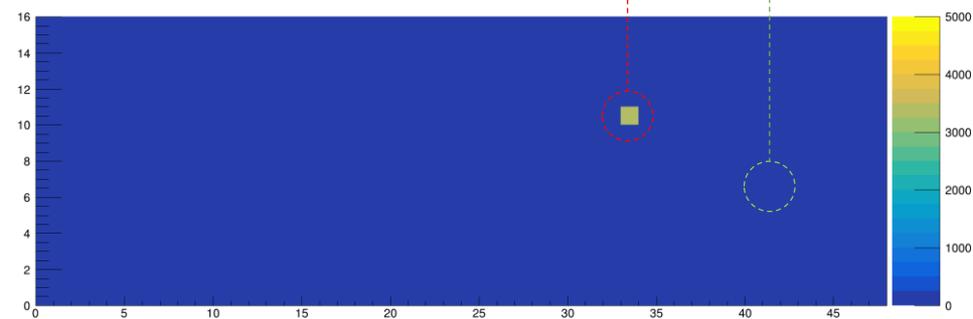
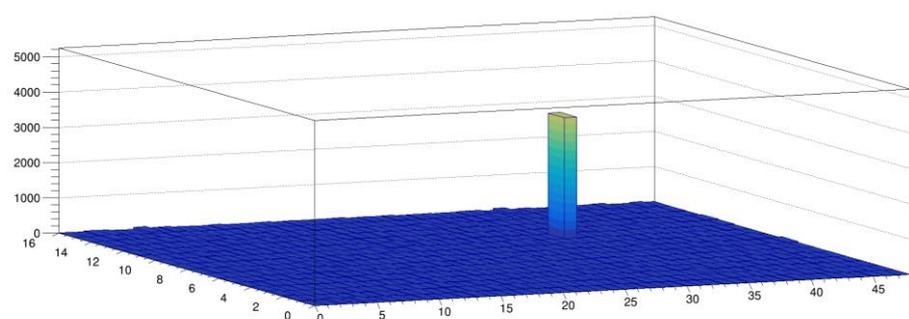
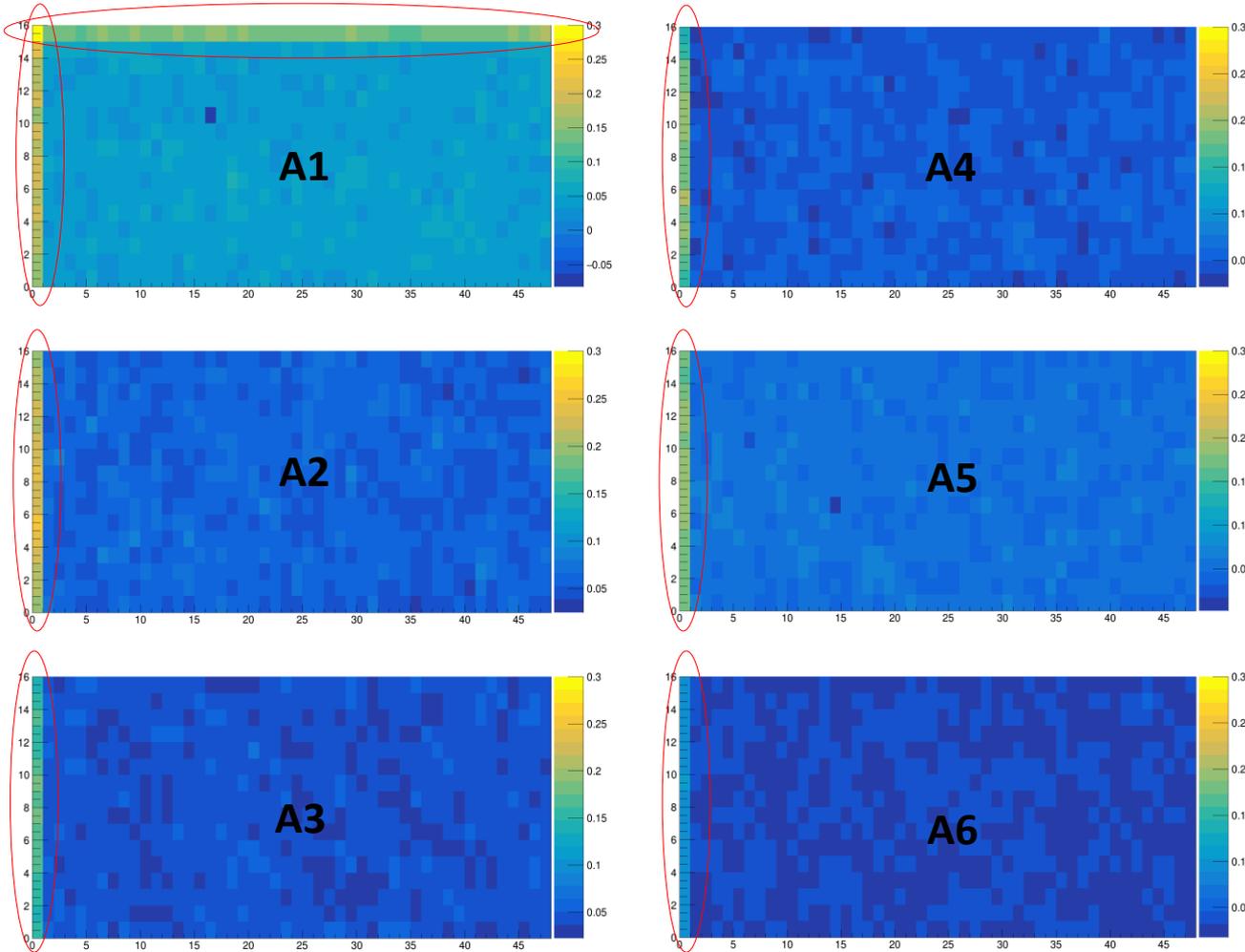


图3. 双采样结果





边界载流子反射对噪声基线的影响:



A13	Each sector: 16 col. x 48 rows Matrix-1 Pixel: 33 $\mu\text{m}$ x 33 $\mu\text{m}$	A1
A14		A2
A11		A3
A12		A4
A15 3T pixel		A5
A16 3T pixel		A6
A17		A7
A18		A8
A19		A9
A20 Pitch: 16 $\mu\text{m}$		A10

# \*事例判选及簇团定义\*

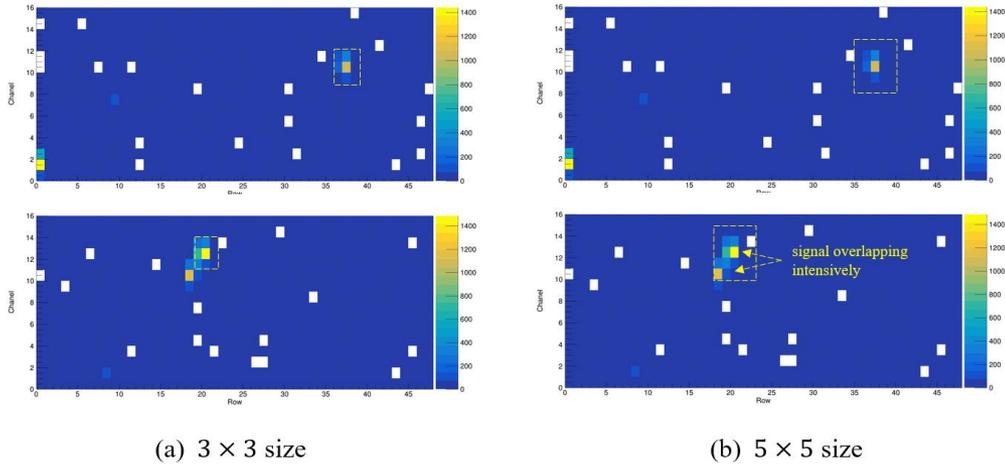
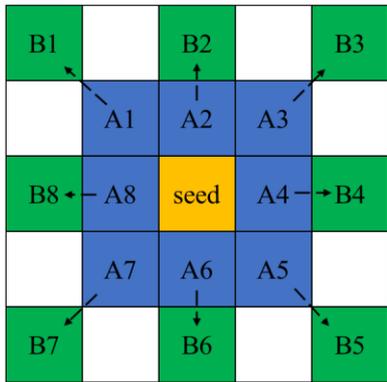


图1. 不同大小的簇团定义

为方便信号重建，通常是以击中点(Seed)为中心，向外扩散来统一定义簇团大小，这种固定大小的簇团也叫约化簇团。将簇团内的所有像素的ADC信号加起来，就是一个完整的事例信号。



$$B_n - A_n > \text{threshold (e.g. 200)}$$

图2. 重叠事例判断方法

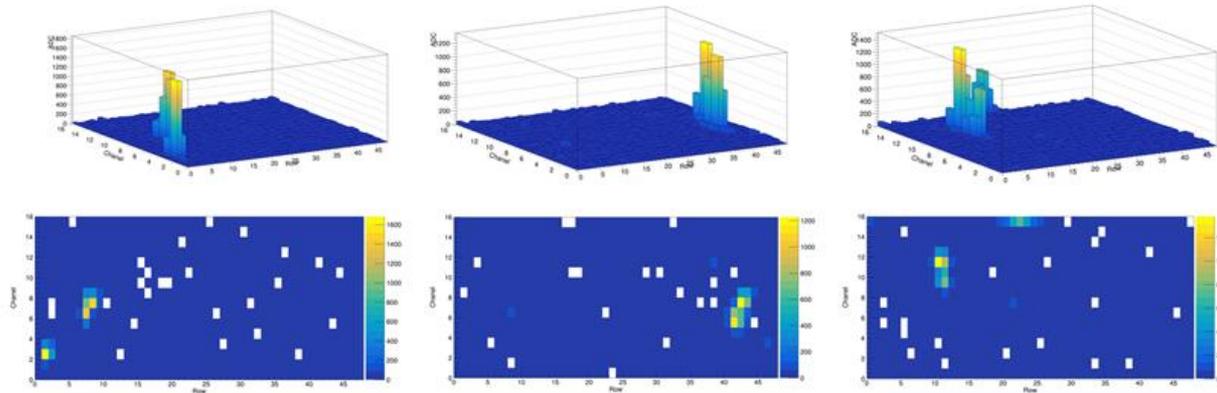
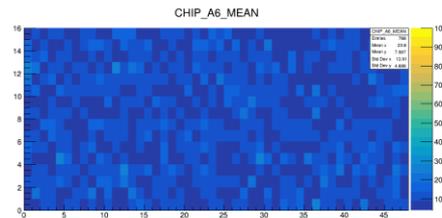
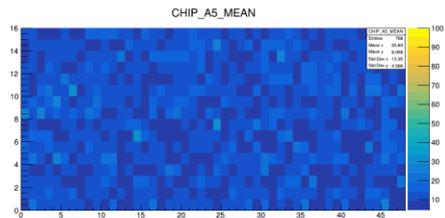
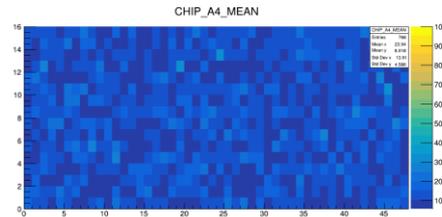
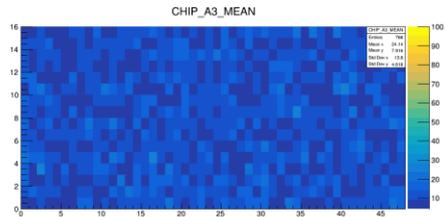
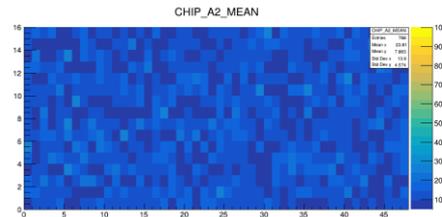
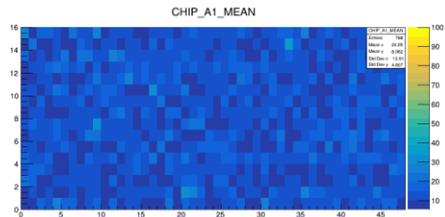
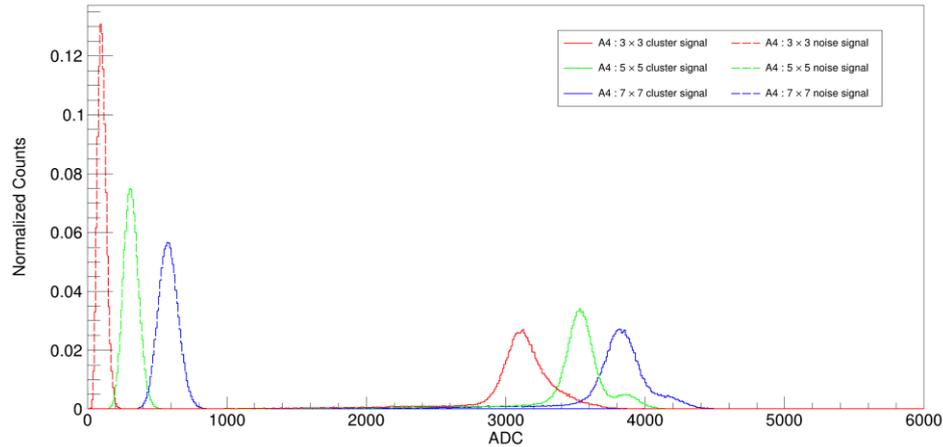


图3. 筛选出的信号重叠事例



较大的簇团会引入很高的噪声水平，使得谱峰右移，这非常不利于电荷收集效率的分析。同时，较大簇团的噪声更宽，这会使得能谱展宽，分辨率降低。虽然较小的簇团会引入较低的噪声水平，在实际计算的时候就会丢失部分电荷信号。簇团越小丢失信号电荷越多，对于<sup>55</sup>Fe源而言，由于电荷信号的衰减就会使得两个特征峰钝化合并，分辨率也会降低。



Diode 的面积越大，噪声水平和谱峰对应的 ADC 越大。这是由于 diode 的面积增大，单个像素的电容也相应的增大，相同数量的收集电荷所带来的电压信号会减小，即电容惩罚。电容的增大会使信号增益减小，特征峰的 ADC 左移。击中中心信号分布的主峰来源于非灵敏区收集的电荷信号。

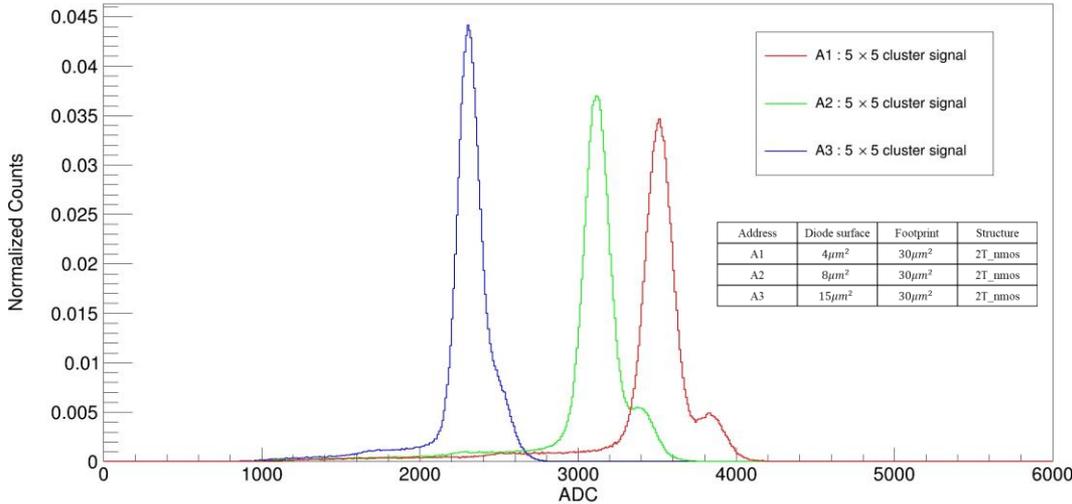


图1. <sup>55</sup>Fe源5 × 5簇团重建信号

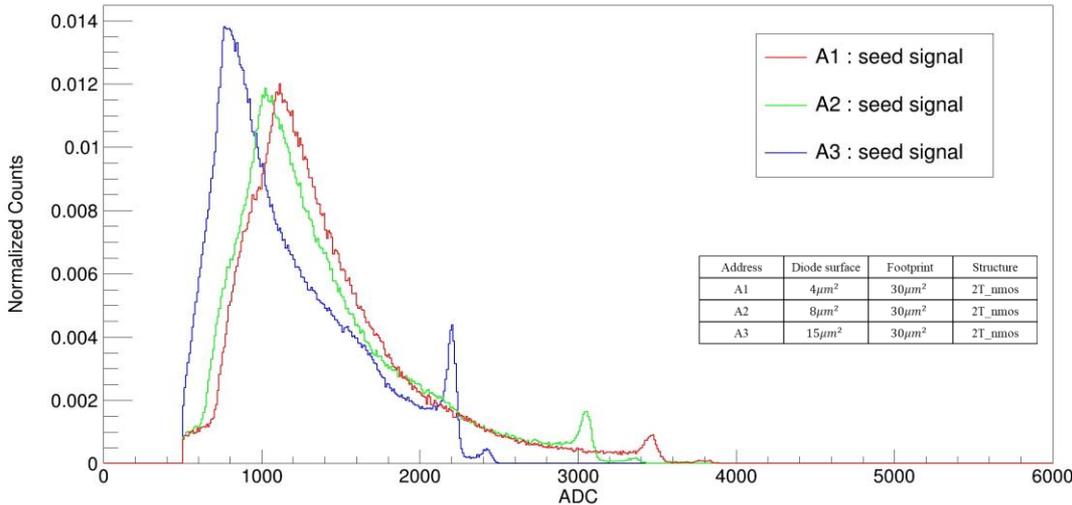


图2. <sup>55</sup>Fe源5 × 5簇团击中中心信号

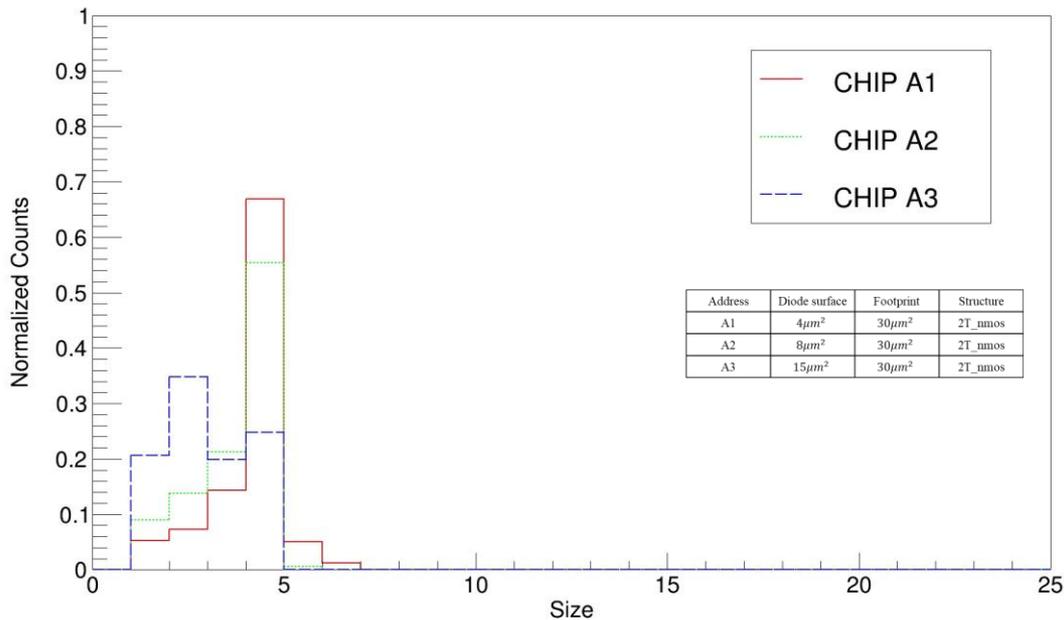


图1. <sup>55</sup>Fe源单光子像素触发分布

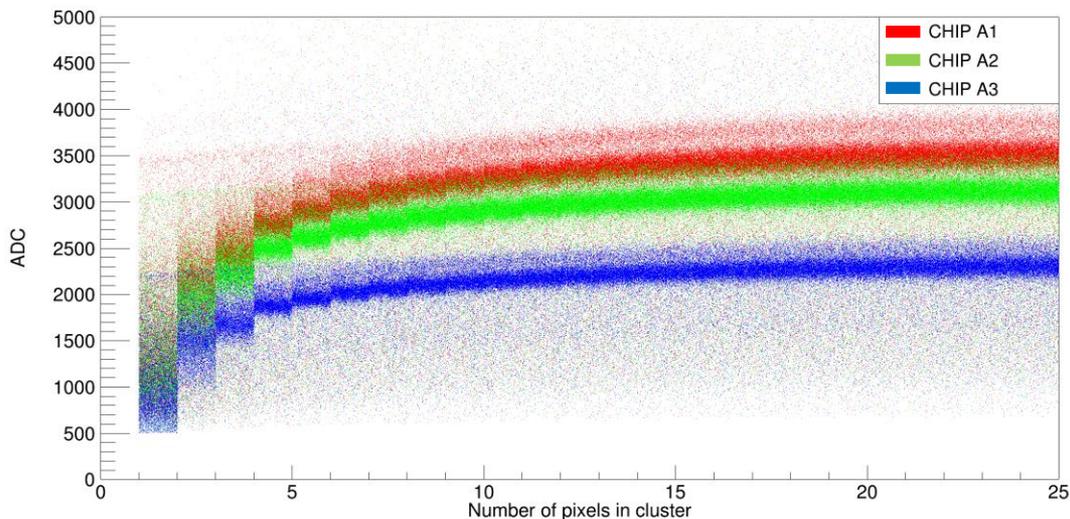
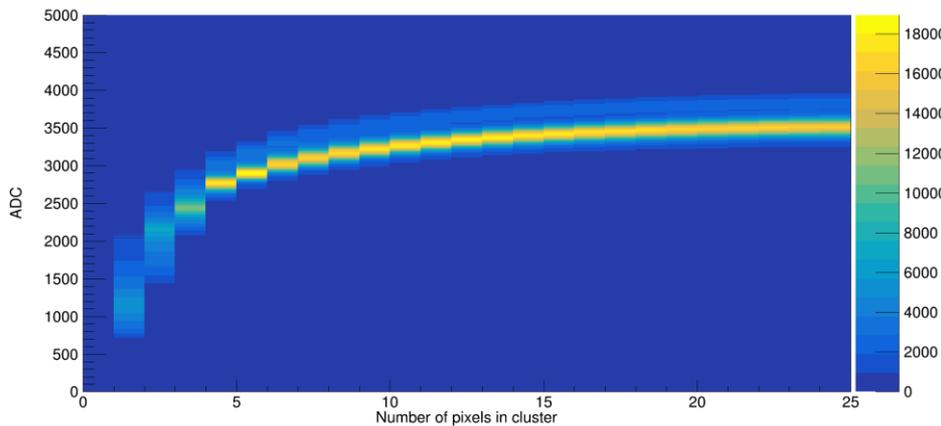


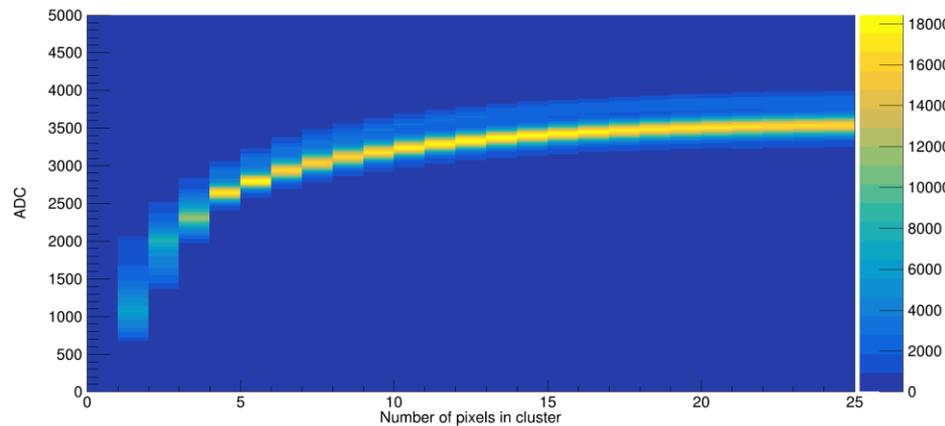
图2. <sup>55</sup>Fe源簇团信号重建效果图

耗尽区的横向范围随 Diode 的面积增大而增大，随着 Diode 面积的增大，载流子运动的漂移机制占比增强，电荷收集效率提高，电荷信号扩散就会减弱。拥有较大 diode 面积的像素阵列，单光子信号触发更为集中，表现为只触发较少像素个数的事例比重明显增加，即器件的电荷收集效果更好。

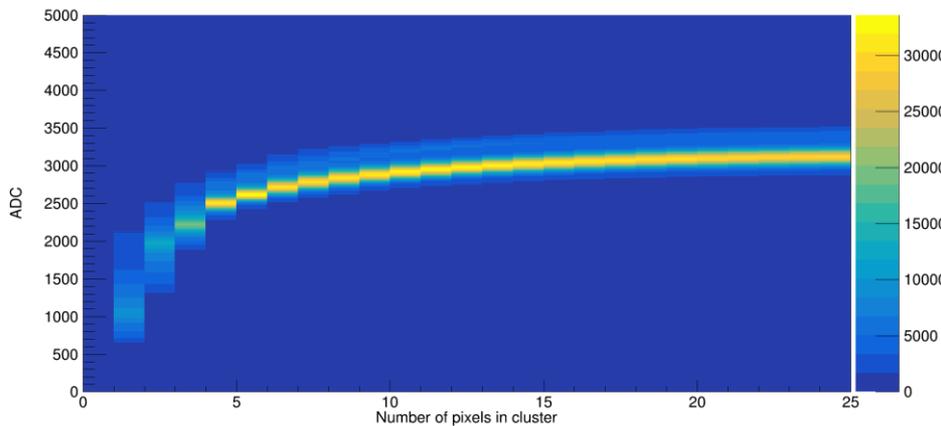
CHIP\_A1\_CLUSTER\_ADC



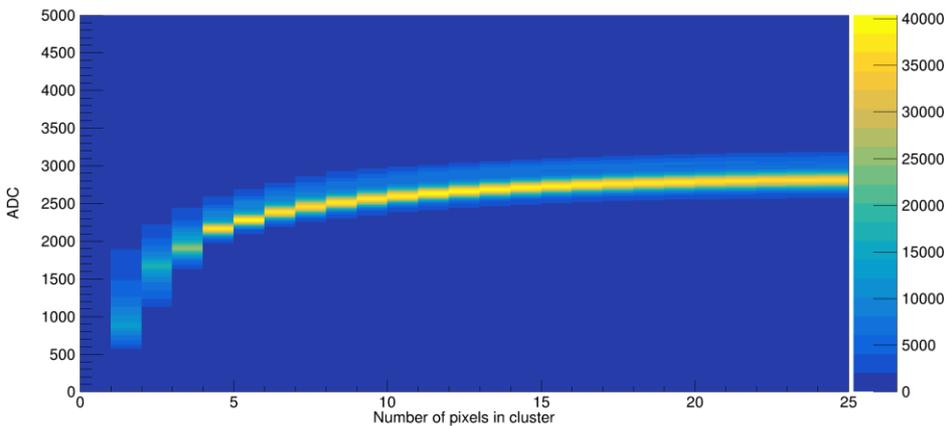
CHIP\_A4\_CLUSTER\_ADC



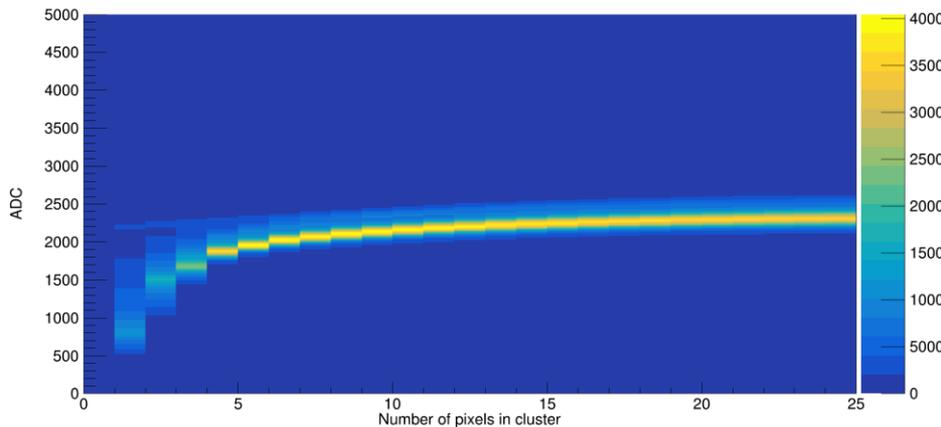
CHIP\_A2\_CLUSTER\_ADC



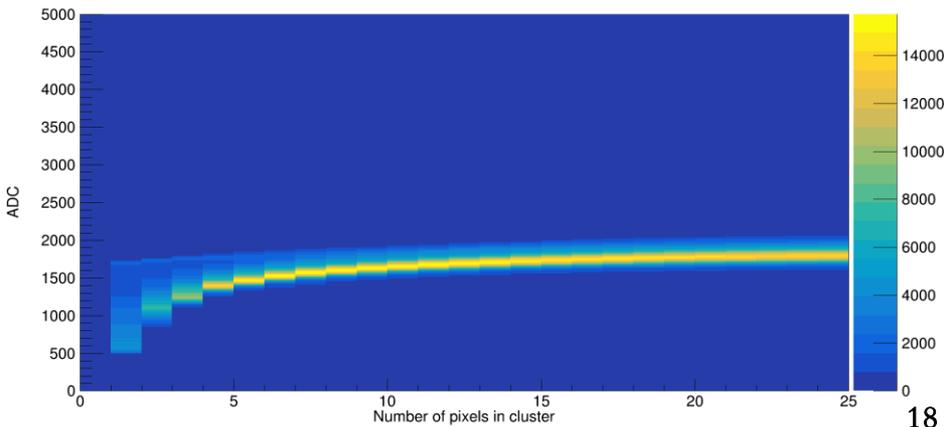
CHIP\_A5\_CLUSTER\_ADC



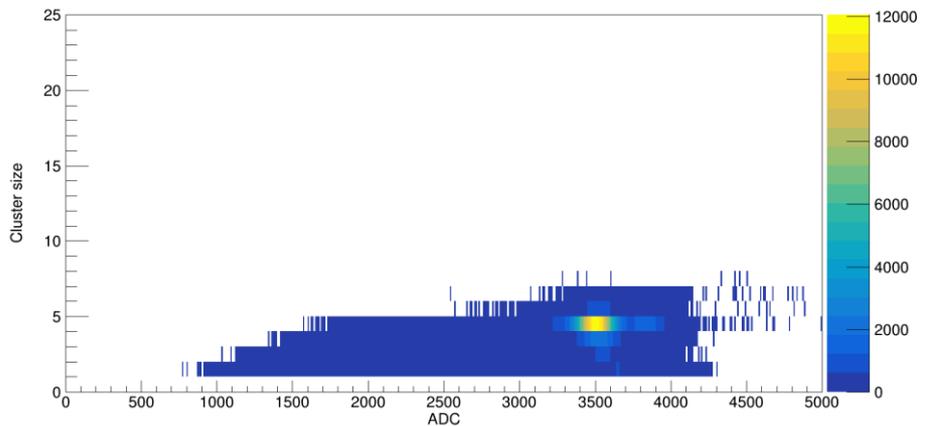
CHIP\_A3\_CLUSTER\_ADC



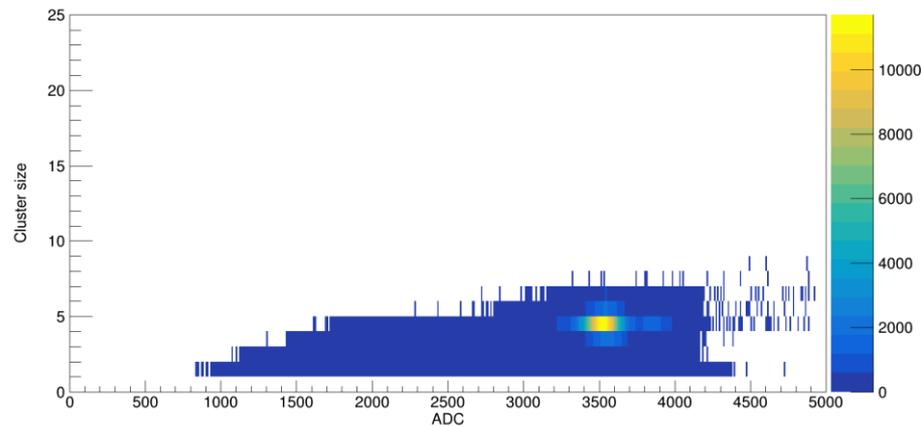
CHIP\_A6\_CLUSTER\_ADC



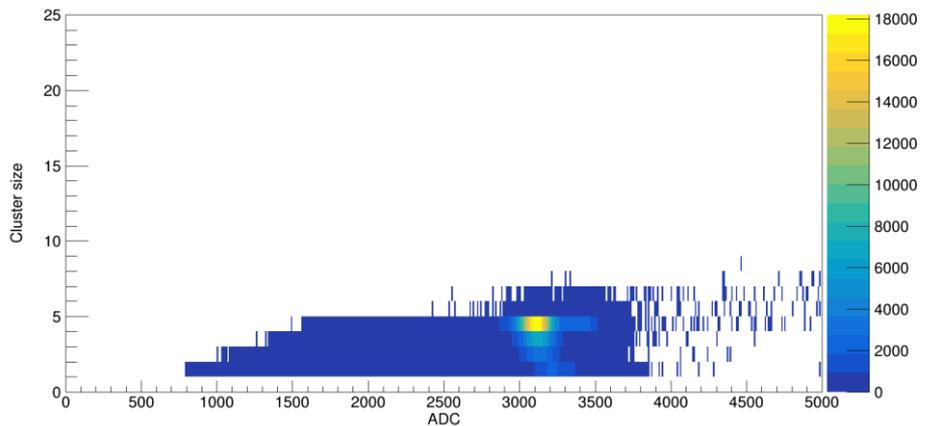
CHIP\_A1\_SIZE



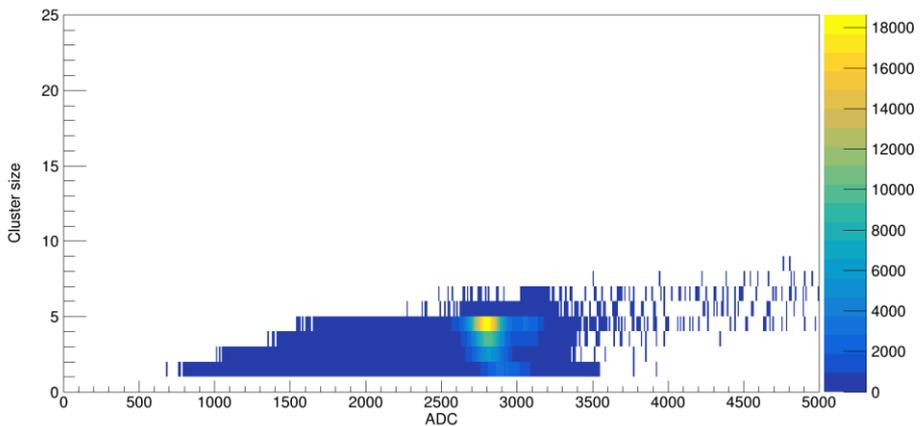
CHIP\_A4\_SIZE



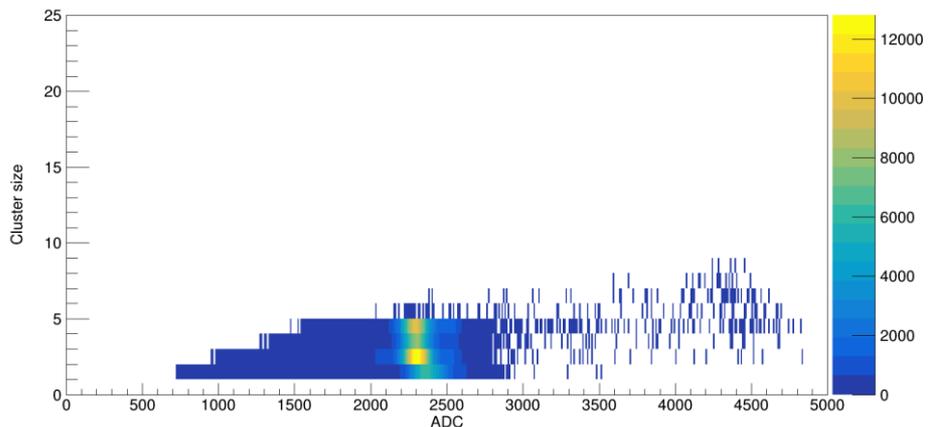
CHIP\_A2\_SIZE



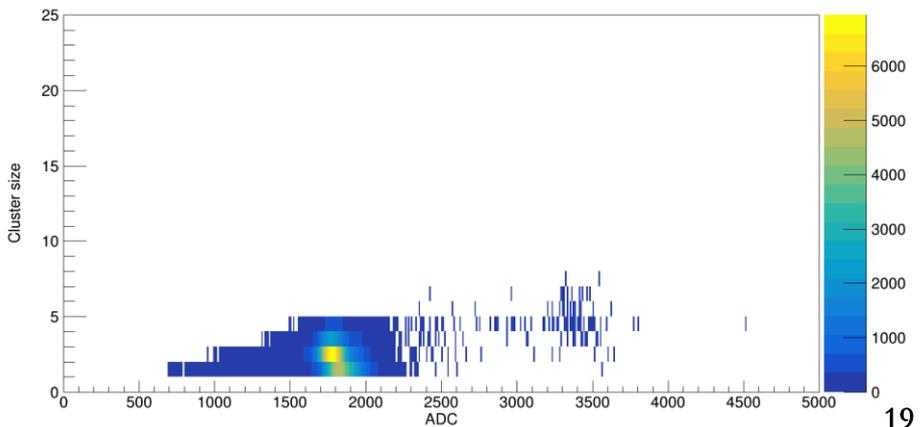
CHIP\_A5\_SIZE



CHIP\_A3\_SIZE



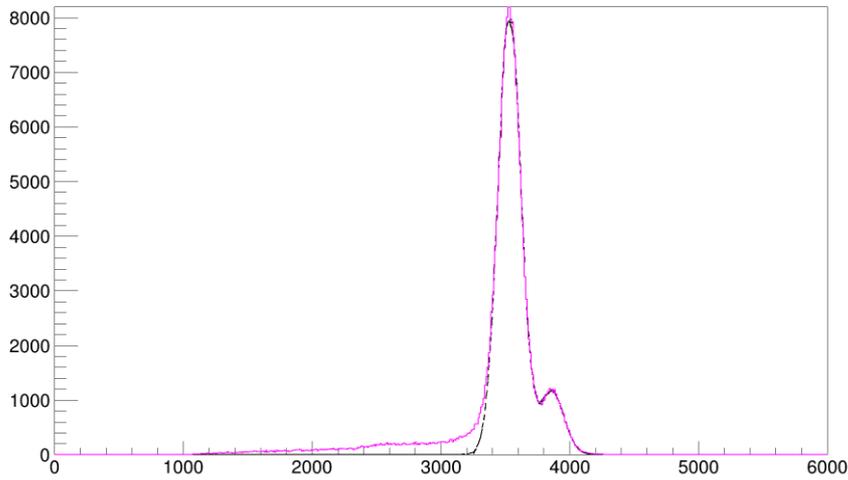
CHIP\_A6\_SIZE



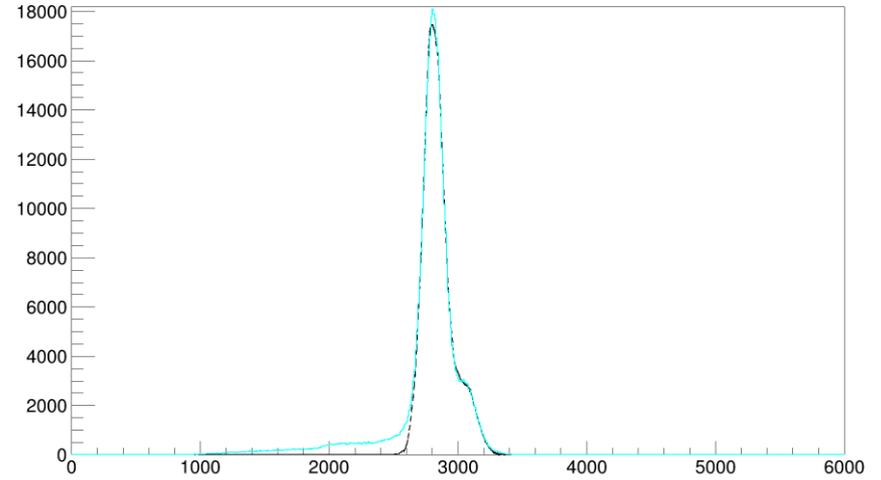


谱峰标定及双高斯拟合:

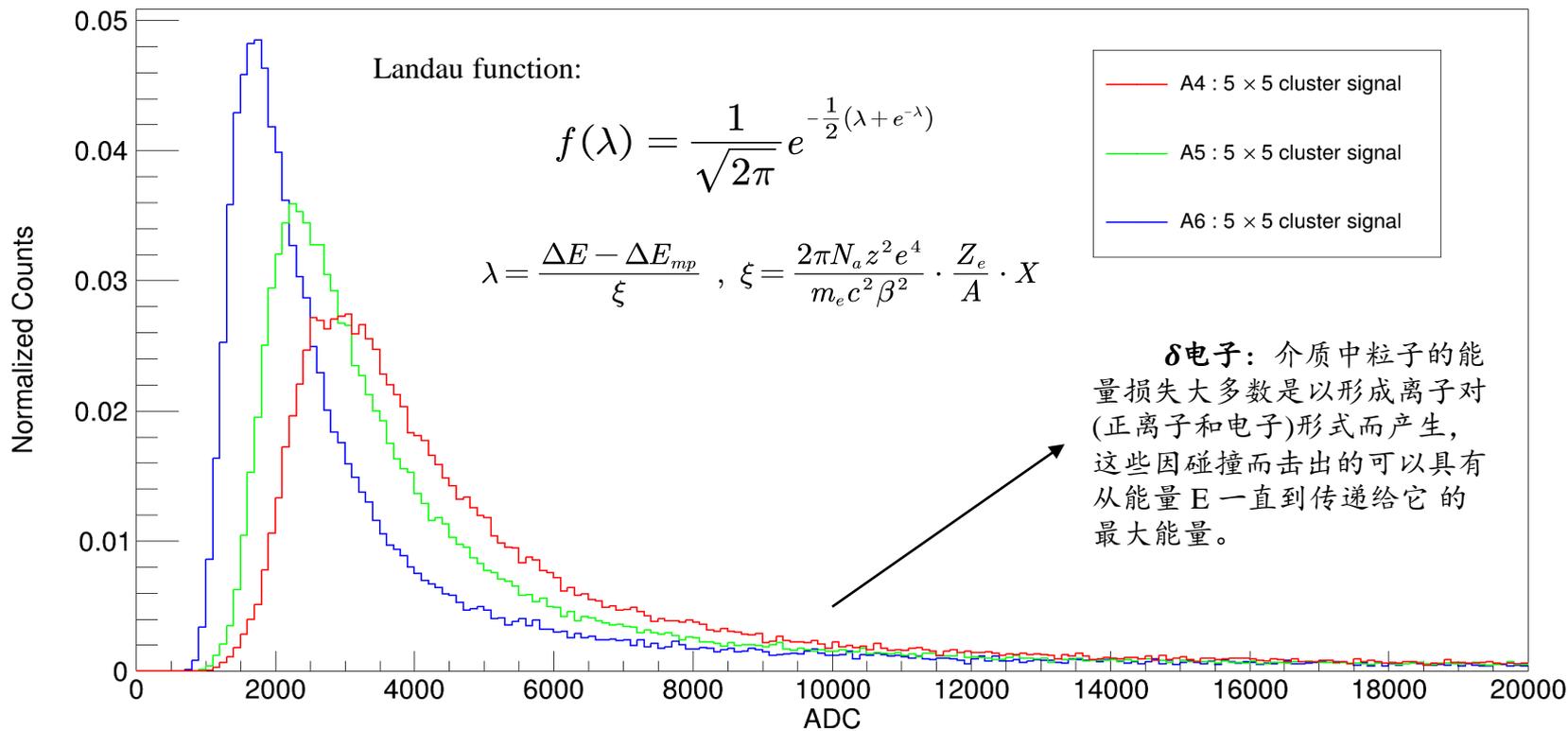
CHIP\_A4\_Double\_Gauss\_Fit



CHIP\_A5\_Double\_Gauss\_Fit



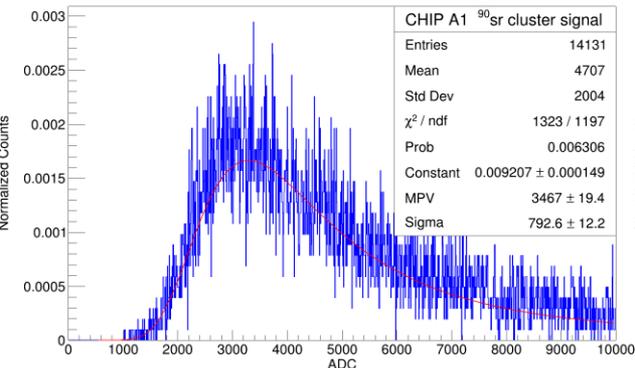
Sector	Pedestal (5*5 cluster)	5.9 keV peak (experimental)	5.5 keV peak (minus pedestal)	Gain/keV <sup>-1</sup>	6.5 keV peak (calculated)	Charge collection efficiency
A1	280	3520	3240	549.15	3849	85.96%
A2	300	3120	2800	474.58	3384	86.58%
A3	240	2310	2070	350.85	2280	-
A4	310	3520	3210	544.07	3846	85.80%
A5	250	2810	2560	433.90	3070	87.67%
A6	230	1790	1560	264.41	1948	-



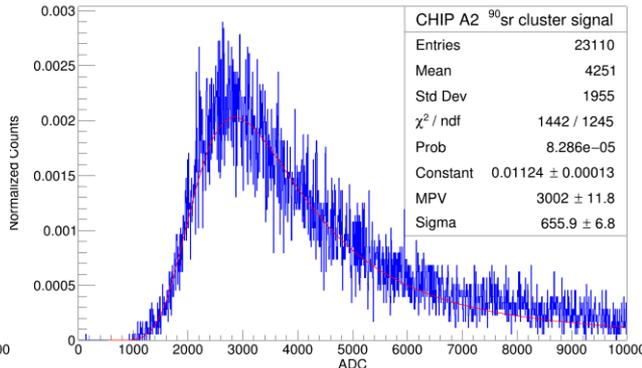
在有限的介质厚度范围内, 因为入射的带电粒子与介质原子的电子的碰撞是随机的, 碰撞过程具有统计性, 实际的电离能损会在平均值附近有一定的统计涨落。在介质层厚度很薄时, 由于会产生能量很高的电子就会使得能损分布的曲线变得很宽。在能量损失大的区域有δ电子造成的很长的尾巴延伸。



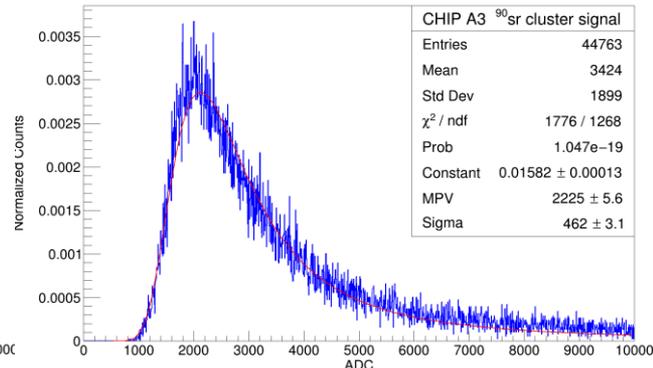
CHIP A1  $^{90}\text{Sr}$  Cluster Signal



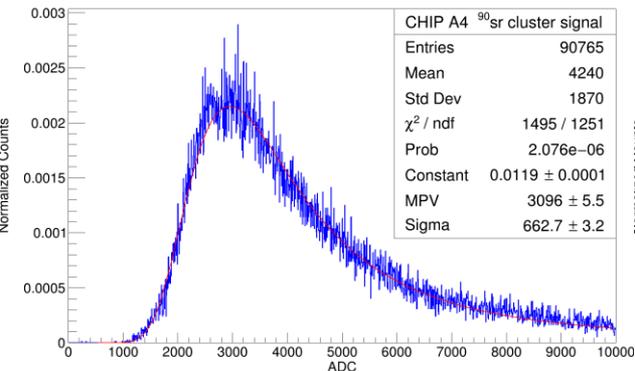
CHIP A2  $^{90}\text{Sr}$  Cluster Signal



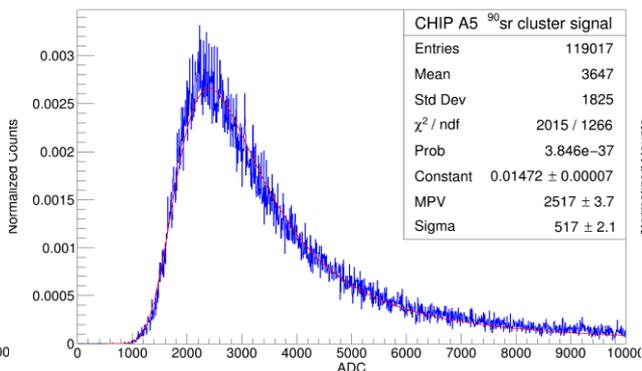
CHIP A3  $^{90}\text{Sr}$  Cluster Signal



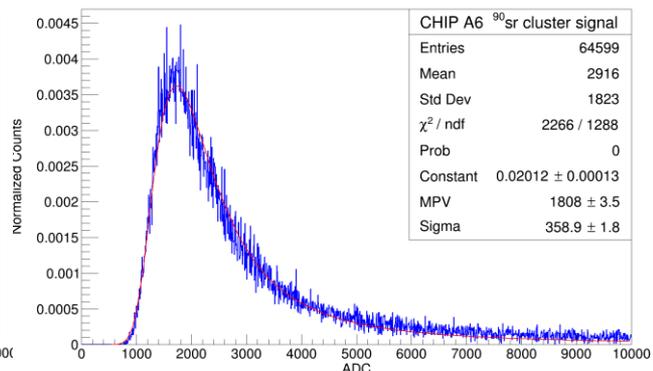
CHIP A4  $^{90}\text{Sr}$  Cluster Signal



CHIP A5  $^{90}\text{Sr}$  Cluster Signal



CHIP A6  $^{90}\text{Sr}$  Cluster Signal



最小电离粒子(MIP)在穿越硅介质的时候，由于电离能损所产生的电荷数目为  $76 e^-/\mu\text{m}$ ，实验用的探测器的硅介质层厚度约为  $20\sim 25 \mu\text{m}$ ，理论上能够产生  $1520\sim 1900$  个电子。

阵列	MPV	噪声水平	MPV(噪声修正)	增益/ $\text{keV}^{-1}$	收集电荷数
A1	$3467 \pm 19.4$	280	$3187 \pm 19.4$	549.15	1612
A2	$3002 \pm 11.8$	300	$2702 \pm 11.8$	474.58	1581
A3	$2225 \pm 5.6$	240	$1985 \pm 5.6$	350.85	1571
A4	$3096 \pm 5.5$	310	$2786 \pm 5.5$	544.07	1422
A5	$2517 \pm 3.7$	250	$2267 \pm 3.7$	433.90	1451
A6	$1808 \pm 3.5$	230	$1578 \pm 3.5$	264.41	1657



实验结果基于个人完成的整套独立的数据处理程序,满足大批量快速数据处理、筛选和存储的要求。

- 1、现有的重建算法能够有效的重建出入射粒子的电荷信号。事例筛选和判别条件能快速的筛选出符合条件的事例信息。针对两种不同性质的辐照源采取的电荷收集效率计算方法相互印证。实际运行结果满足大批量数据处理的要求。
- 2、不同像素的几何结构对器件的增益和电荷收集效率具有较大的影响。diode 的面积越大,电容惩罚越明显,信号增益就会减小。但是耗尽区的横向范围随 diode 的面积增大而增大,电荷收集效率就会提高,电荷信号扩散就会减弱。其次 Diode 相对于 footprint 越小, footprint 对增益的影响就越弱;反之, footprint 与 diode 面积接近时, footprint 对增益的影响越强。
- 3、带电粒子的辐照结果表明对于带电粒子, JadePix1 具有良好的电荷收集效率和信噪比。

**\*未来对于探测器的优化考虑要兼顾增益和电荷收集效率,其中要着重考虑增益**

**对能量分辨的影响。\***



- ▶ 对阵列 A1 的仿真模拟结果与实验结果的区别说明现有的模拟设置还远远达不到为下一步的器件制作提供优化参数的要求，需要做很大的修正和调试。
- ▶ 论文并未对单个像素进行信噪比的计算，而是在处理信号时统一设置了相同的阈值来判断像素是否为有效信号像素。筛选出的数据很大程度上依赖于设定的阈值。实际上不同像素的信噪比(SNR)是不同的，虽然说这种差别很小，但是会避免阈值对于某些信噪比较大像素设定过高的情况。未来的数据重建工作需要对每个像素进行信噪比的测量。
- ▶  $^{90}\text{Sr}$ 所释放射线的入射方向难以确定，使得无法对电荷收集效率做出有效计算。还有像素分辨率的检测等，未来使用束流测试就会使得这些问题迎刃而解。

\*测试工作止于此境，但不止于此步\*



感谢两位指导老师：闻小龙(北科大)、史欣(高能所)的帮助与付出。感谢数理学院各位老师四年来的谆谆教诲以及一路走来的物理1401的各位同学和辅导员！