

# BLUET框架下的全模拟算法优化 & 基于MTPC的n-p散射实验进展

汇报人：陈海铮

部门：散裂中子源科学中心 & 西安交通大学

指导老师：樊瑞睿、易晗 & 张清民

2024年12月01日

时间投影室实验技术暨第二届MTPC研讨会，深圳

# 目录

CONTENTS

01、BLUET程序框架介绍

02、全模拟算法优化

03、 $n$ - $p$ 散射实验进展

04、数据分析及问题

05、结论与展望

# 01

# BLUET程序框架介绍

⊕ 应用背景

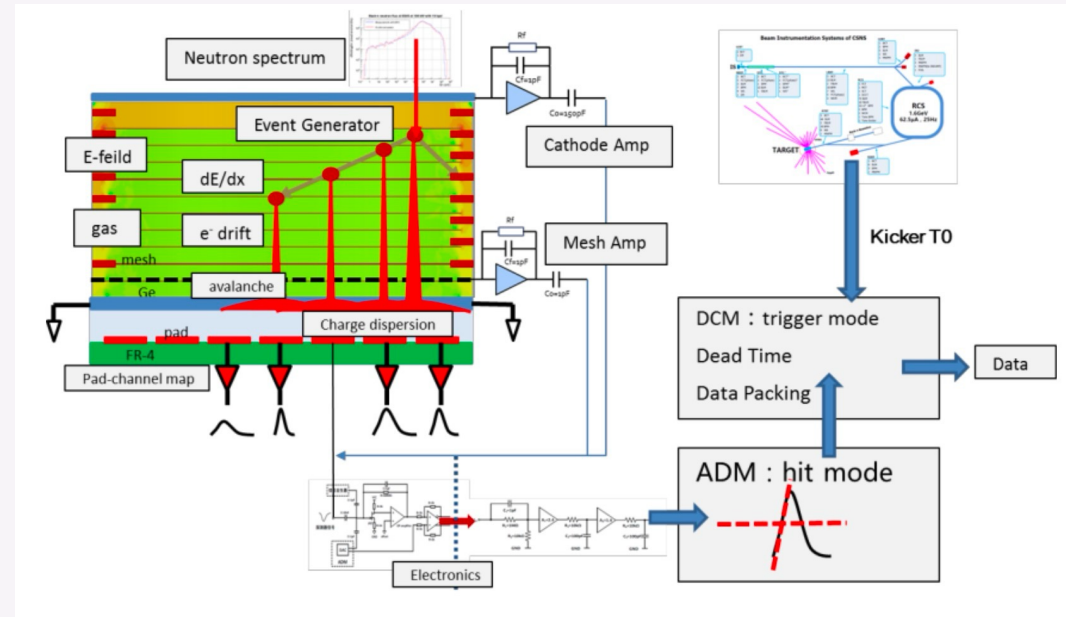
⊕ 开发需求

⊕ 物理背景

# 物理背景

TPC工作原理介绍:

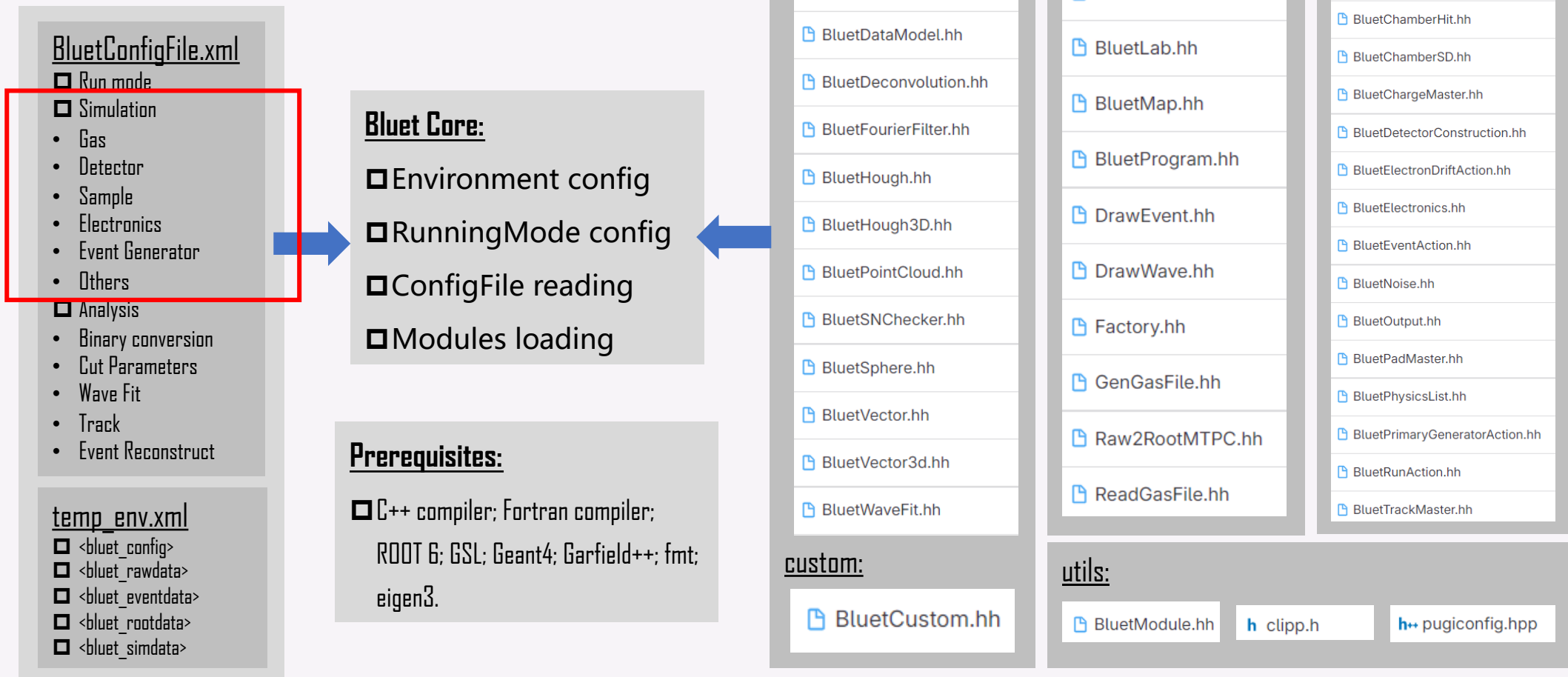
- 中子与核发生反应放出带电粒子，带电粒子在气体中运动引起气体原初电离，原初电离会在强电场下被抑制复合（阳极-栅极区会雪崩放大），电子在漂向两极的过程中通过感应在外电路产生电流信号。
- 目标对象：中子辐射场；
- 直接测量对象：带电粒子。
- 电流信号经前置放大器、信号成形电路后被记录。
- 数字信号可用于后续分析。





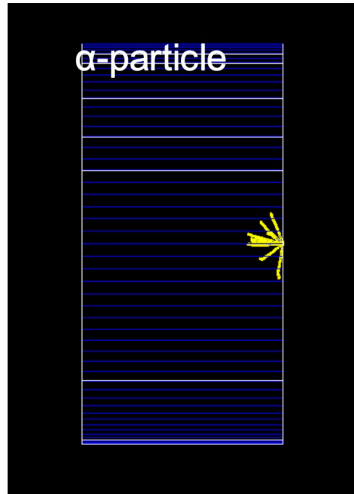
## BLUET程序框架介绍

# BLUET-v5框架

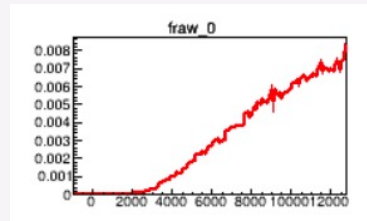
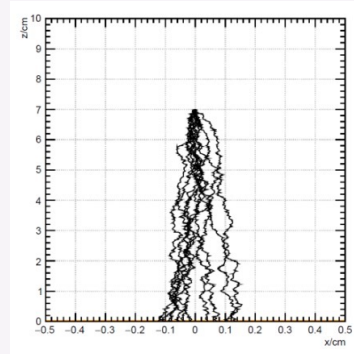


## BLUET程序框架介绍

# 全模拟运行流程：



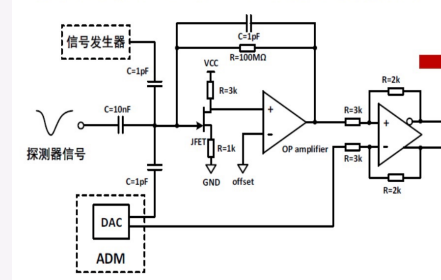
(一)  
辐射场输运模块  
(核反应与电离)



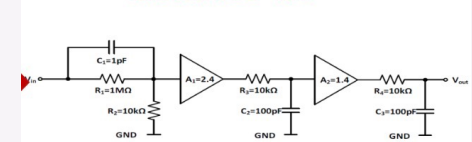
(二)  
探测器信号仿真模块  
(电子漂移、雪崩与信号产生)

## 修改部分

### 模拟硬件电路：电荷灵敏前放



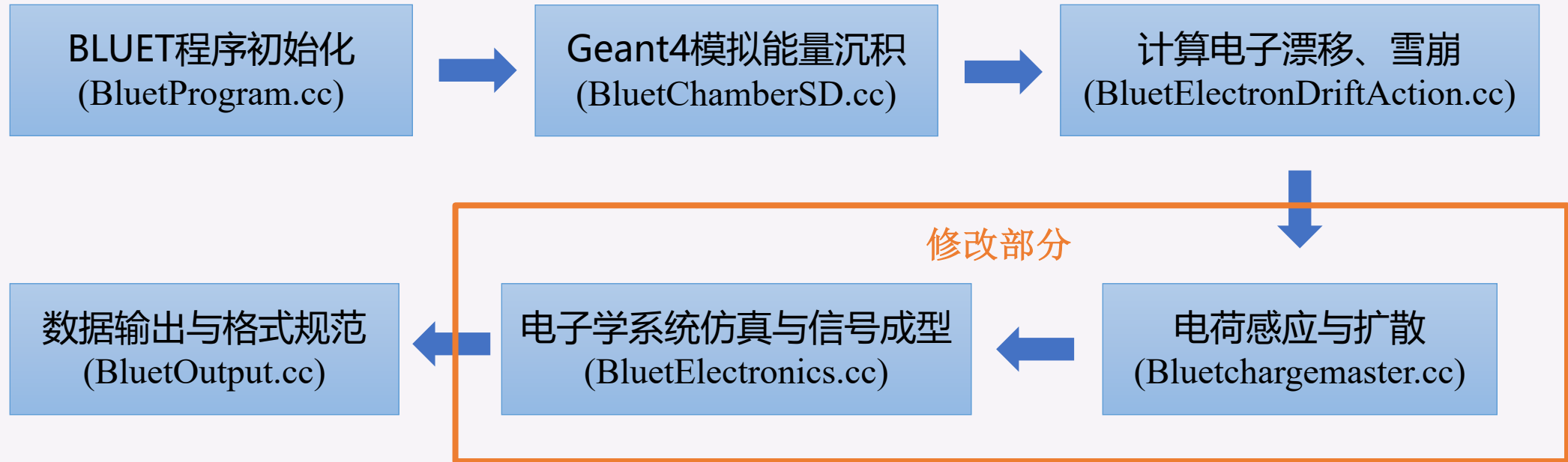
### FPGA数字波形处理：极零-RC1-RC2



(三)  
电子学系统计算模块  
(传递函数与卷积)

## BLUET程序框架介绍

### 算法实现办法:



# 02

# 全模拟算法优化

+ 物理原理

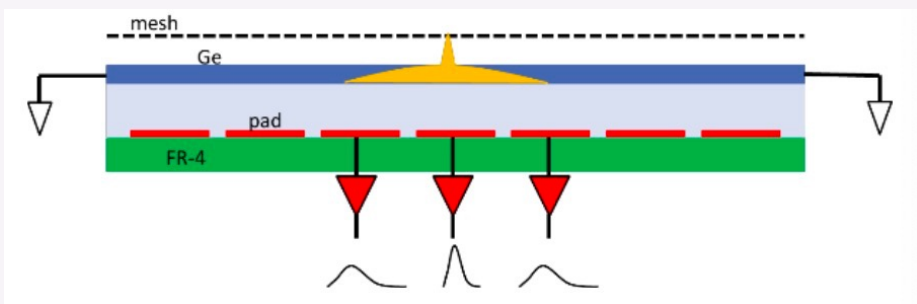
+ 考虑因素

+ 算法设计

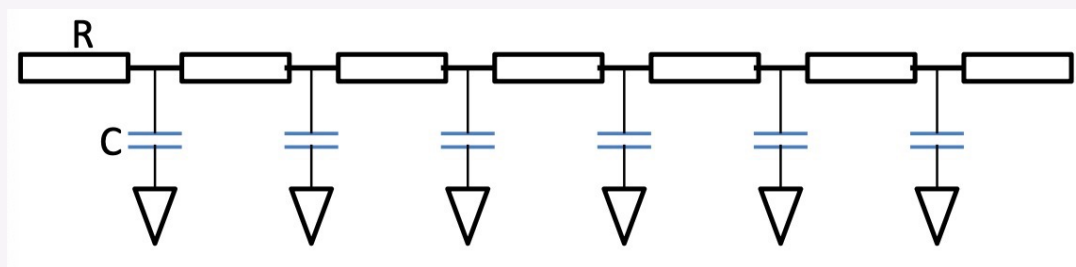
# 电荷扩散原理

### 阻性层电荷扩散

- 雪崩产生的电荷沉积在阻性锗层上，向周围扩散。这样造成除了正对雪崩的pad会产生感应信号外，附近的pad因为电荷扩散，也会产生幅度较小前沿较慢的信号。
- 电荷扩散产生的信号大小和快慢，取决于阻性层的面电阻及阻性层与pad层之间的耦合电容。



阻性层原理图



阻性层等效电路

# 单一电荷扩散计算

### 电荷扩散方程与分布

- 阻性层看作二维电阻，阻性层与pad层之间是电容耦合，因此阻性层与pad层构成二维RC网络，可定量求解二维RC网络的电荷扩散问题。
- 电荷扩散呈高斯分布， $\sigma = \sqrt{2t/RC}$ ，随时间增加 $\sigma$ 增大。

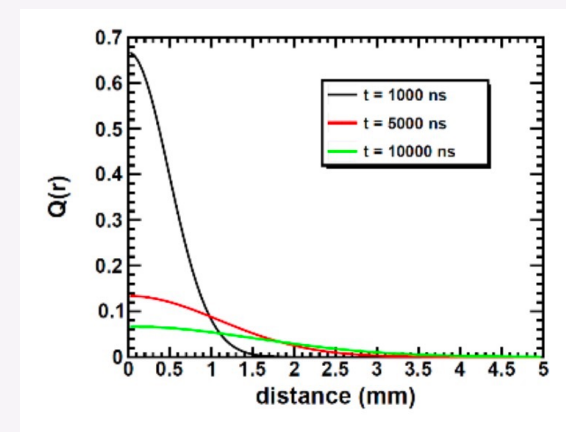
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = h \left( \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} \right)$$



$$\rho_{\delta}(x, y, t) = \left( \frac{1}{2\sqrt{\pi th}} \right)^2 e^{-(x^2+y^2)/4th}$$

### 计算参数：

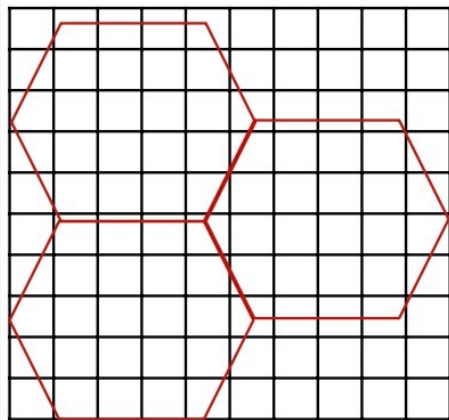
- 锗层面电阻 $R=100\text{M}\Omega$ ；
- 环氧树脂厚度 $400\ \mu\text{m}$ ，介电常数4；
- 阻焊油厚度 $20\ \mu\text{m}$ ，介电常数4；
- 阻性层与pad的二维结构 $RC=8.4\ \mu\text{s}/\text{mm}^2$ 。



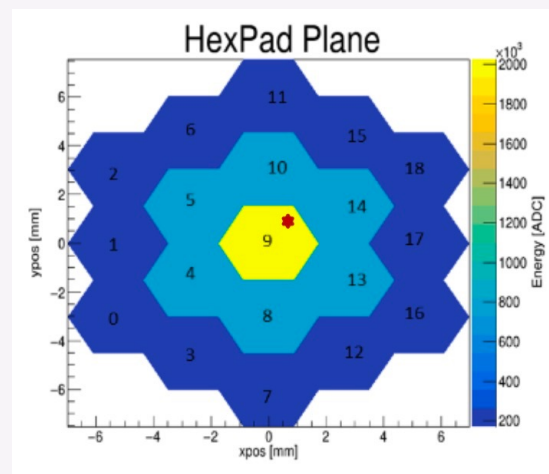
不同时间下的电荷分布

# 电荷单元划分

- 将整个平面划分为网格，落在一个网格单元内的所有电荷看作一个点电荷，单元中心坐标作为点电荷坐标，单元内电荷平均漂移时间作为点电荷漂移时间，单元内的总电荷数作为权重，将所有单元的扩散函数相加得到全局电荷分布。
- 网格单元面积为pad面积的十分之一。



划分单元示意图



计算后的结果



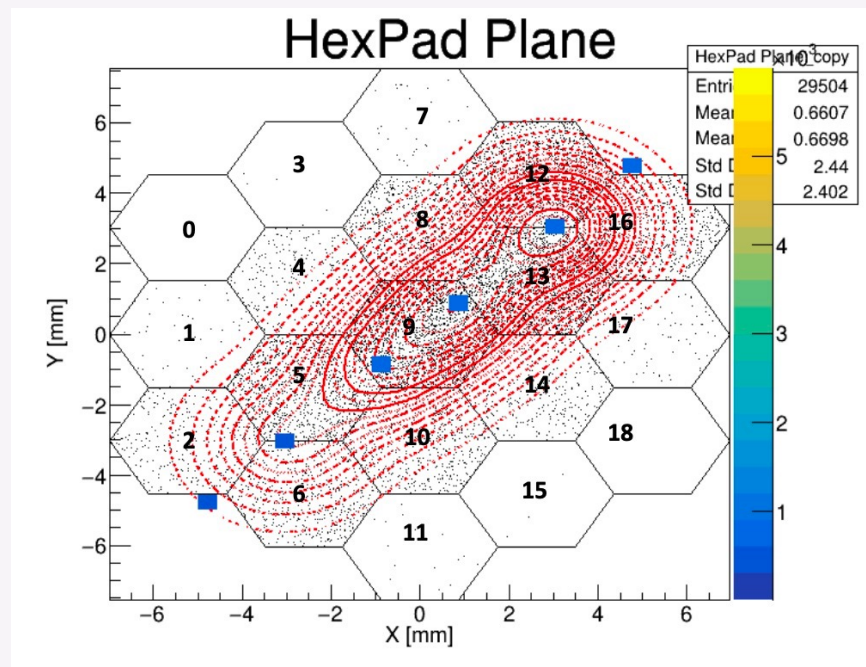
## 全模拟算法优化

### 原抽样算法展示

- 使用2层pad共19个pad进行测试
- 5个电荷单元（图中一个方点代表一个电荷单元）
- 模拟采样频率20MHz（50ns采样间隔）
- 时间窗宽度150个采样点（7500ns）。

### 算法优化

- 蒙特卡罗抽样算法耗时较长，考虑换作积分算法。
- 优化循环逻辑，减少计算所需的次数。（如：原循环次数为 $19 \times 5 = 95$ 次；现循环次数为 $5 \times 7 = 35$ 次）



计算后的结果



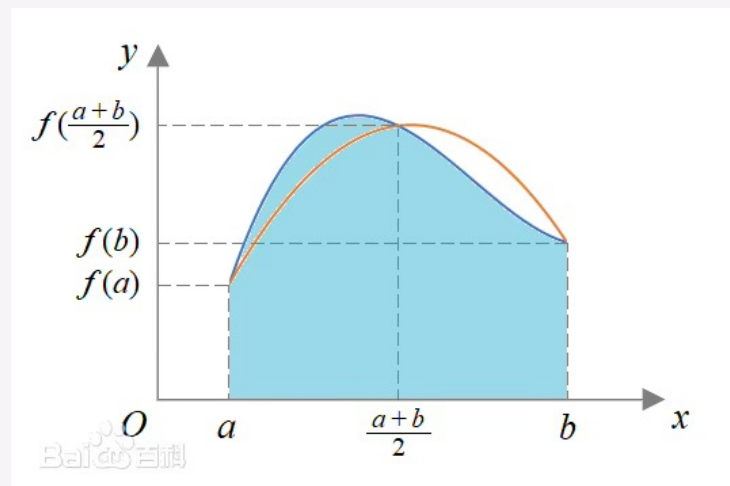
# 辛普森积分算法（二次函数逼近）

- 将区间端点和区间中点三个点近似看成抛物线上对应的三个点，以二次曲线逼近方式取代矩形积分公式，得到数值解。
- 经计算，将积分区域划分为15\*15时，使用辛普森计算结果与TF1函数积分结果一致。

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \frac{a}{3}x^3 + \frac{b}{2}x^2 + cx + d$$

$$\int_L^R f(x)dx = F(R) - F(L) = \frac{R-L}{6} [f(L) + 4f\left(\frac{L+R}{2}\right) + f(R)]$$



## 全模拟算法优化

# 速度提升效果 (100 ~ 600倍)

- 辛普森算法与蒙卡算法速度比较:

新方法: 老方法: 时间比例

|          |          |         |
|----------|----------|---------|
| 0.009051 | 0.369633 | 40.8389 |
| 0.016434 | 0.594614 | 36.1819 |
| 0.022266 | 0.95358  | 42.8267 |
| 0.023623 | 0.803964 | 34.0331 |
| 0.026415 | 0.616326 | 23.3324 |
| 0.023131 | 0.512301 | 22.1478 |
| 0.025817 | 0.460798 | 17.8486 |
| 0.023936 | 0.424644 | 17.7408 |
| 0.023054 | 0.393509 | 17.069  |
| 0.021572 | 0.379372 | 17.5863 |

- 优化循环逻辑后整体速度比较:

新方法: 老方法: 时间比例

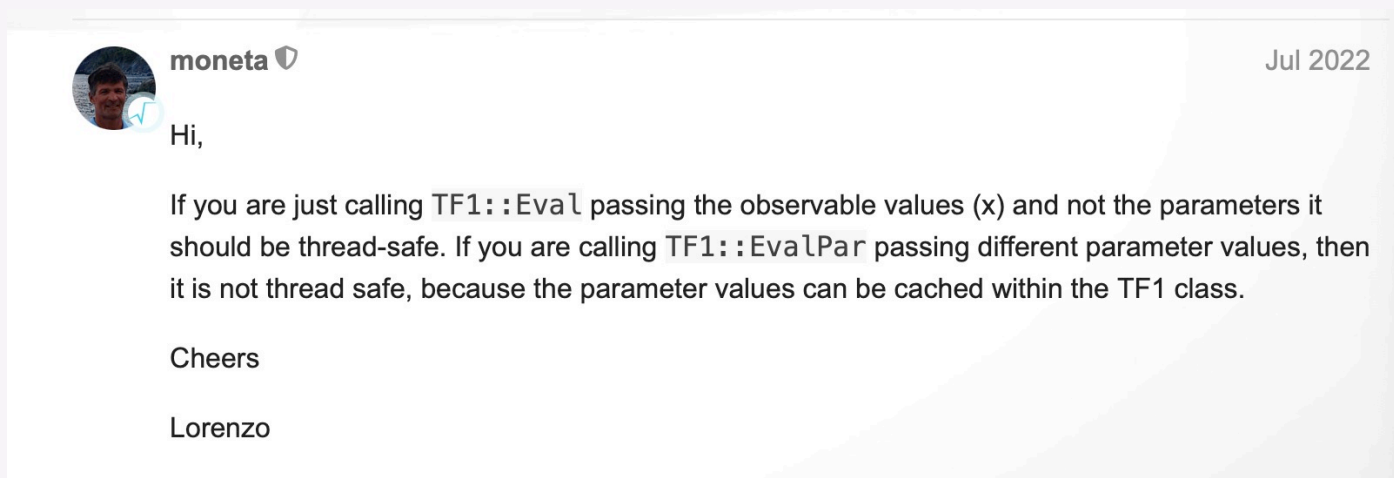
|          |          |         |
|----------|----------|---------|
| 0.001266 | 0.442202 | 349.291 |
| 0.002451 | 1.11403  | 454.519 |
| 0.00264  | 0.955835 | 362.059 |
| 0.002636 | 0.690952 | 262.121 |
| 0.002618 | 0.572991 | 218.866 |
| 0.002616 | 0.503645 | 192.525 |
| 0.00263  | 0.462536 | 175.869 |
| 0.002701 | 0.43095  | 159.552 |
| 0.00269  | 0.402343 | 149.57  |
| 0.002648 | 0.378976 | 143.118 |

# 电子学系统仿真优化

- TF1Convolution::MakeFFTConv函数并行问题：出现Segmentation fault
- 官方说明，EvalPar函数并非线程安全，且在ROOT函数内部进行使用；

```
103 private :
104
105     Func fFunc;
106
107     // structure to distinguish pointer types
108     template <typename F,typename T> struct FuncEvaluator {
109         inline static T Eval( F & f, T *x, double * p) {
110             return f(x, p);
111         }
112     };
```

出现异常。 ×  
Segmentation fault



# 卷积算法优化

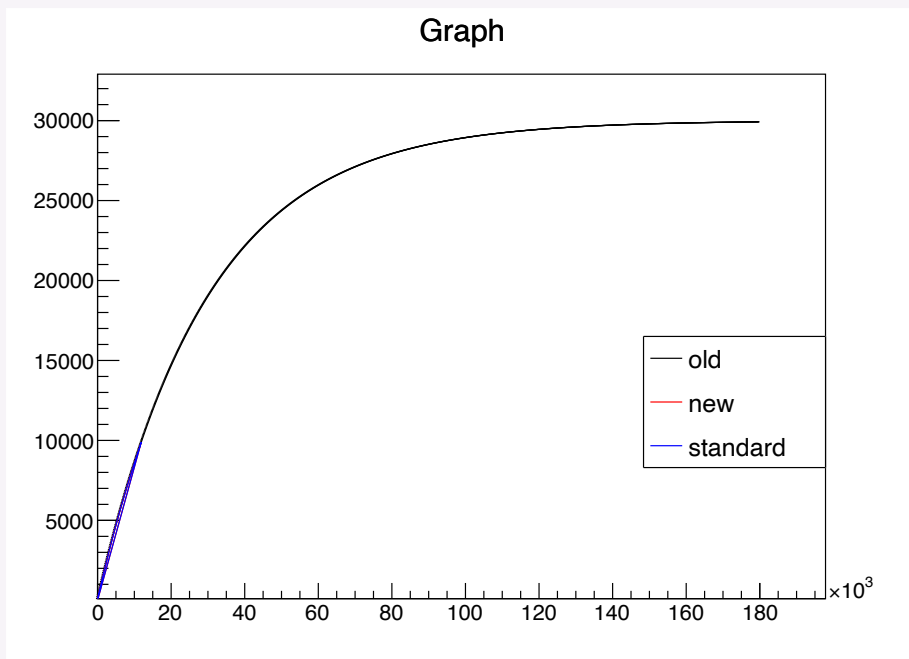
- 根据卷积的定义，编写离散卷积函数。

$$\begin{array}{c} f(x) \\ \hline f(x_0) \\ f(x_1) \\ f(x_2) \\ \dots \\ f(x_{n-2}) \\ f(x_{n-1}) \\ f(x_n) \end{array} \otimes \begin{array}{c} g(x) \\ \hline g(x_0) \\ g(x_1) \\ g(x_2) \\ \dots \\ g(x_{n-2}) \\ g(x_{n-1}) \\ g(x_n) \end{array} = \begin{array}{c} h(x) \\ \hline f(x_0) * g(x_0) \\ f(x_0) * g(x_1) + f(x_1) * g(x_0) \\ f(x_0) * g(x_2) + \dots + f(x_2) * g(x_0) \\ \dots \\ f(x_0) * g(x_{n-2}) + \dots + f(x_{n-2}) * g(x_0) \\ f(x_0) * g(x_{n-1}) + \dots + f(x_{n-1}) * g(x_0) \\ f(x_0) * g(x_n) + \dots + f(x_n) * g(x_0) \end{array}$$

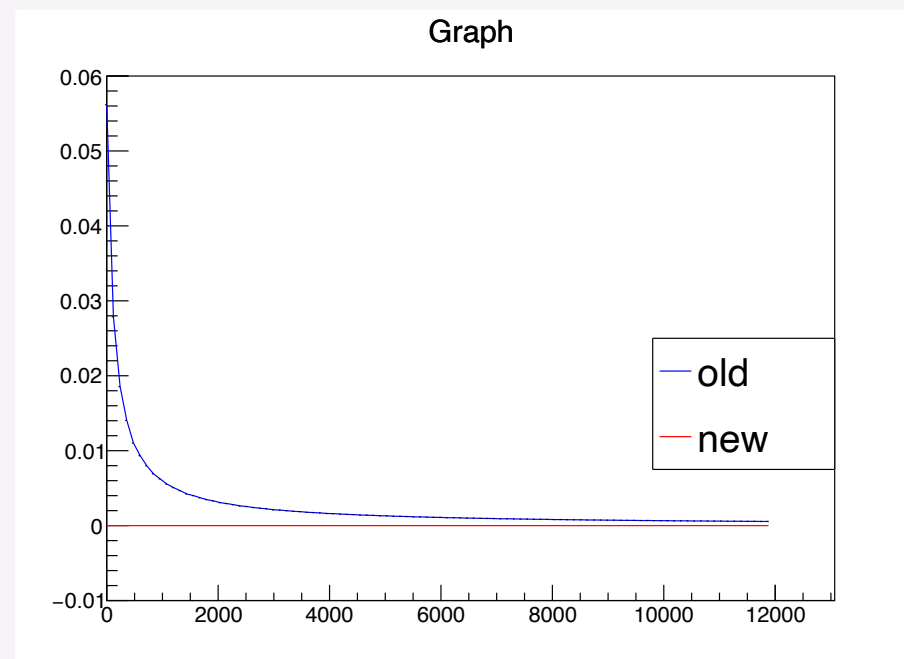
## 全模拟算法优化

### 算法验证

- 使用阶跃函数作为输入，使用指数函数进行卷积测试。Output:  $g(x) = \frac{1}{c_0} * e^{-x/c_1}$



卷积结果

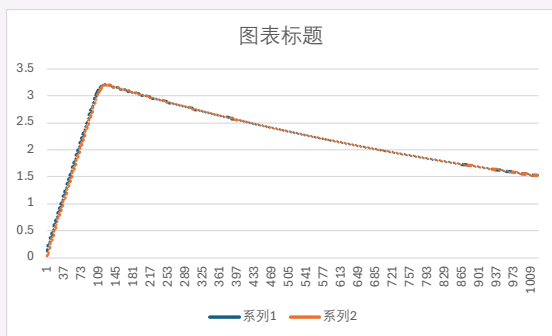


计算误差

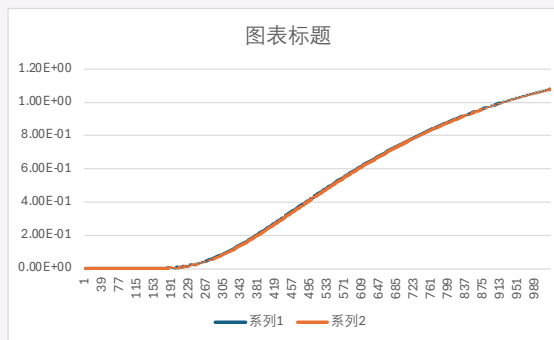


# 全模拟算法优化

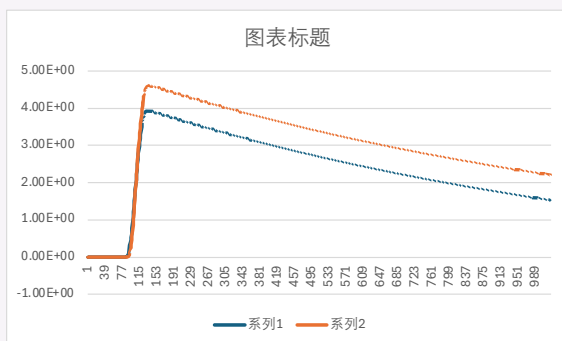
## 结果对比



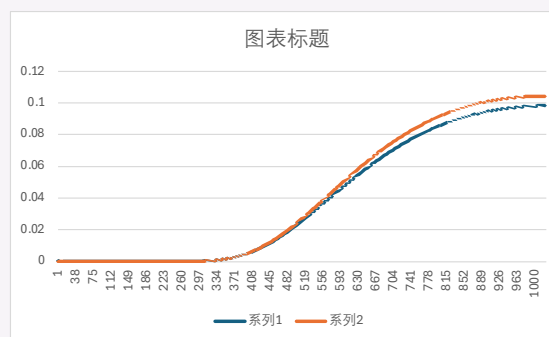
Cathode amp



Pad amp



Mesh amp



Pad pz

|          |           |
|----------|-----------|
| 4.65276s | 0.530661s |
| 8.35214s | 0.844131s |
| 7.1365s  | 0.778673s |
| 6.91002s | 0.811879s |
| 8.31311s | 0.976764s |
| 5.52278s | 0.685429s |
| 8.6506s  | 0.916553s |
| 7.07195s | 0.958201s |
| 7.57119s | 0.893452s |
| 8.18084s | 0.909518s |
| 4.26365s | 0.489533s |
| 7.2048s  | 0.811376s |
| 6.901s   | 0.723459s |
| 7.79258s | 0.806578s |
| 8.16082s | 0.836586s |

新老时间比较

# 03

## n-p 散射实验进展

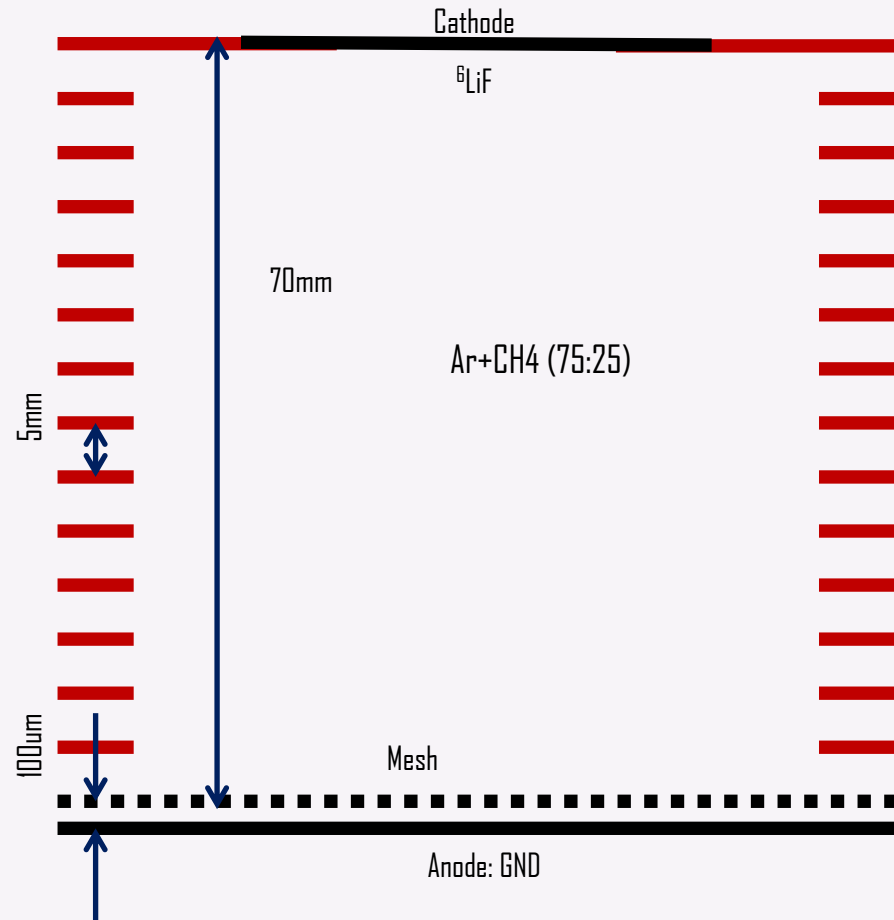
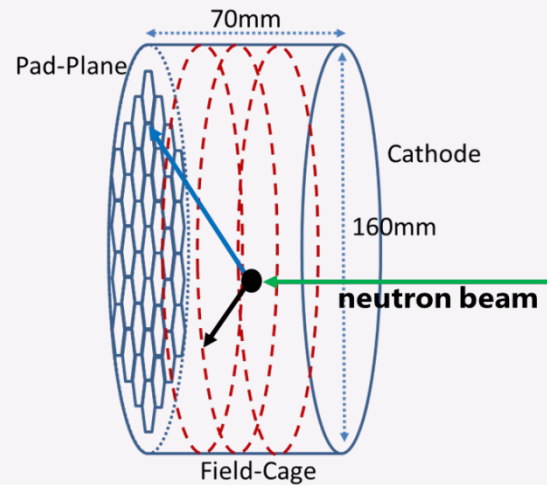
+ 总体框架

+ 数据结构

+ 模块开发

# n-p散射实验设计

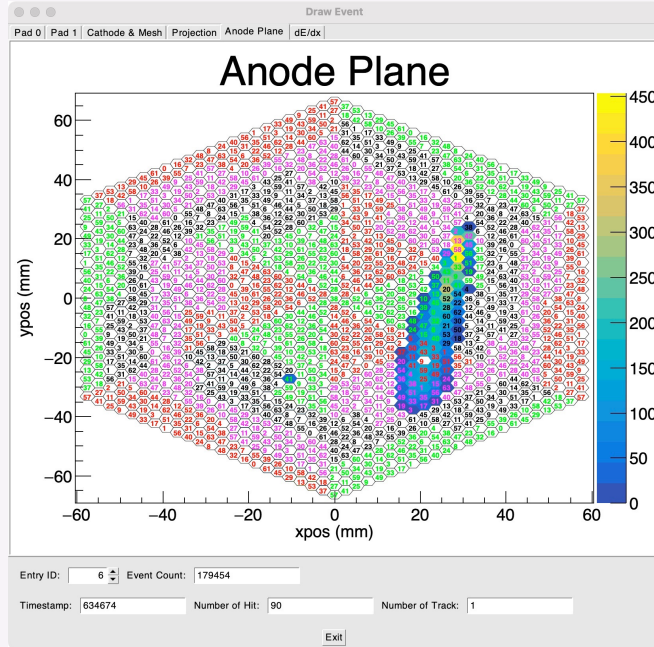
- 中子能量范围：100keV-500keV
- 漂移长度：70mm
- 工作气体为75%Ar+25%CH<sub>4</sub>混合气体，以H为靶核
- 阴极中心放置<sup>6</sup>LiF样品，作为截面刻度的标准样品



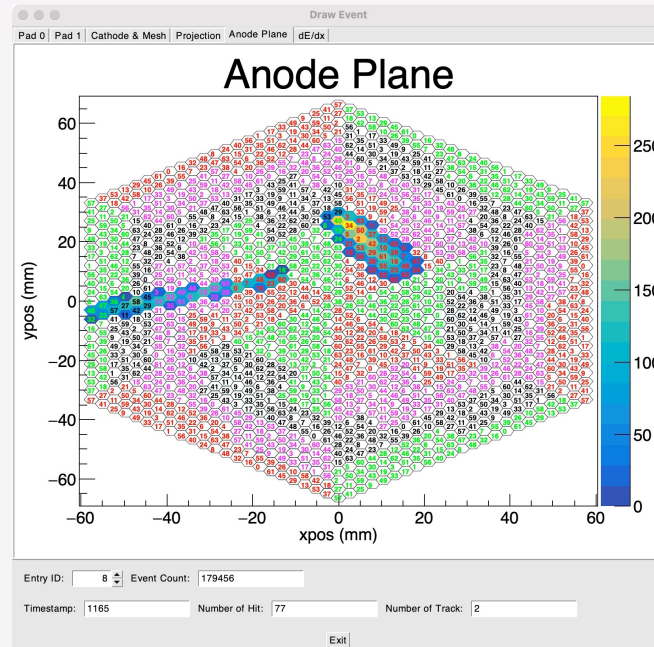


## 事例分析

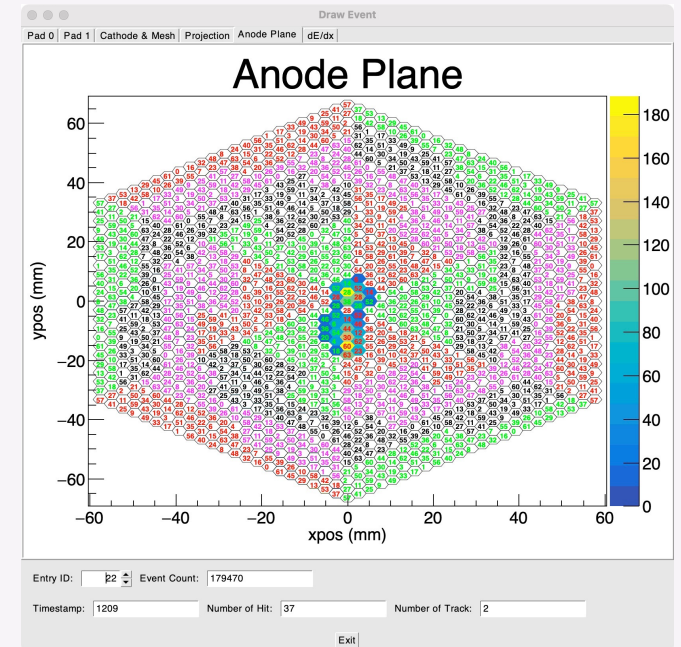
- 实验中事例分布可分为三类：1. 单事例；2. 多事例离散分布；3. 多事例叠加分布



(1)



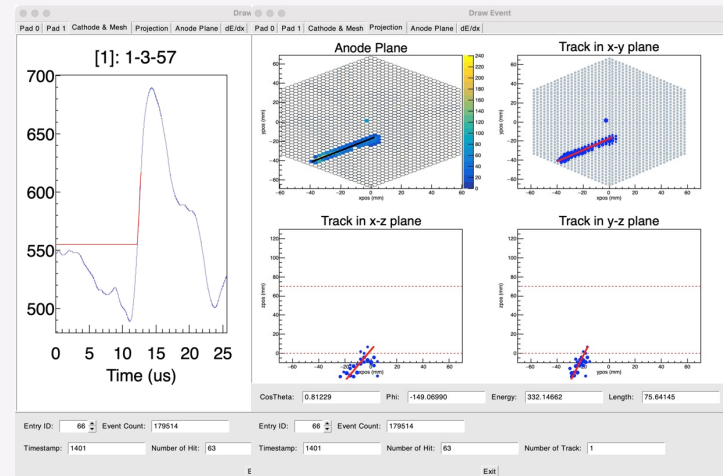
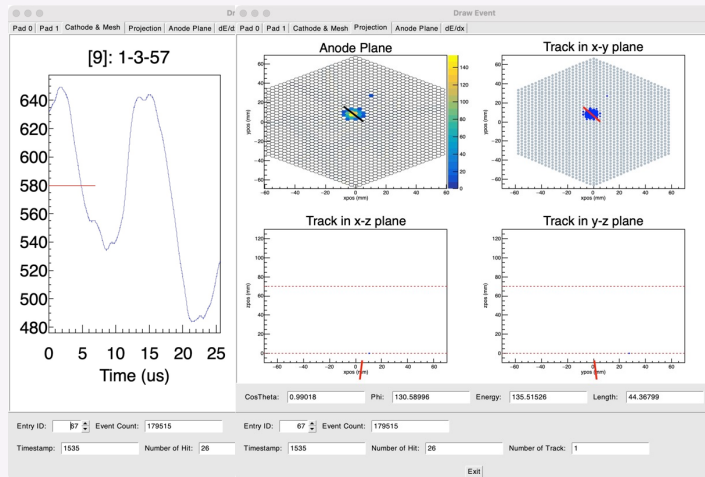
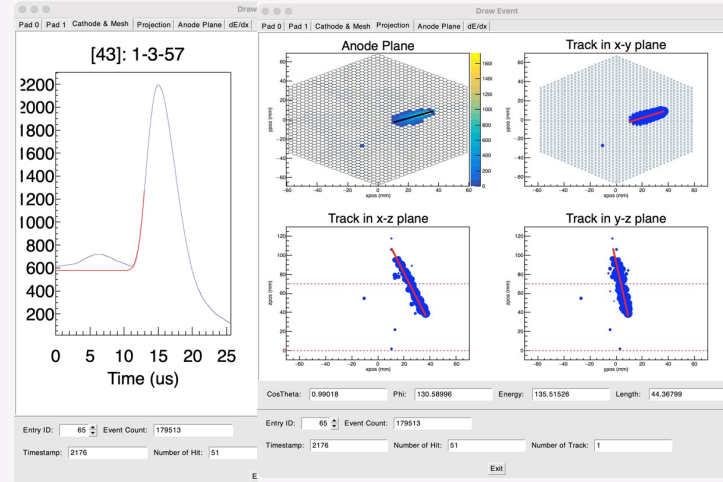
(2)



(3)

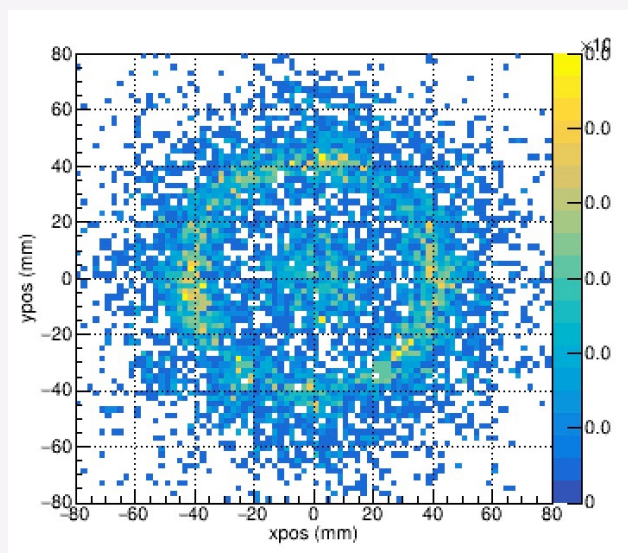
## 事例分析

- 事例来源有三类：
  1. alpha, 能量沉积大, 阴极幅度高, 容易鉴别
  2. triton, 相对proton来说射程长
  3. proton, 更多是“小团簇”

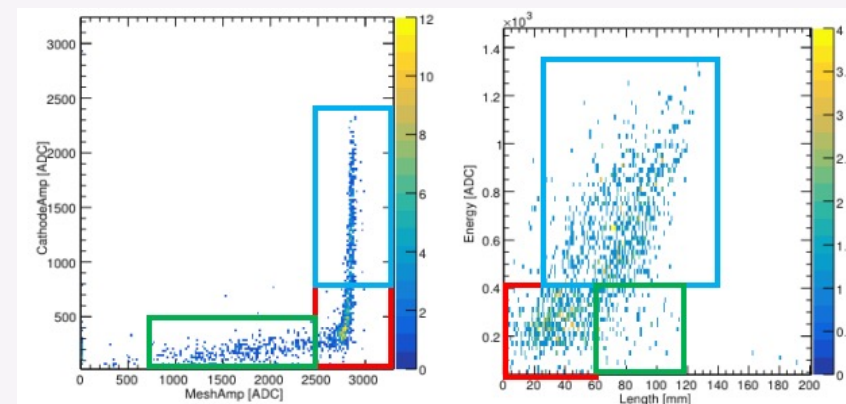


# 环状分布

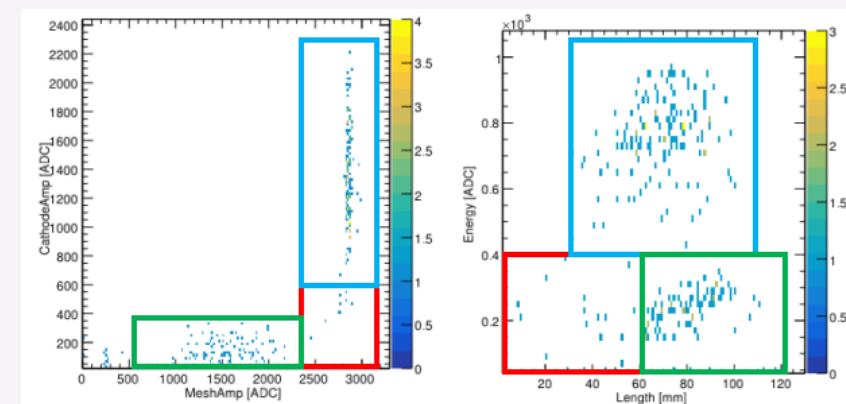
- PCB环导致事例响应：
  - Cut 50keV以下的中子能量进行统计
  - 发现产物产生位置分布与束斑不匹配
  - 怀疑来源于天然放射性物质产生的alpha粒子



产生位置分布



阴极-栅极幅度分布 (环)



阴极-栅极幅度分布 (束斑)

# 04

## 数据分析及问题

⊕ 运行逻辑

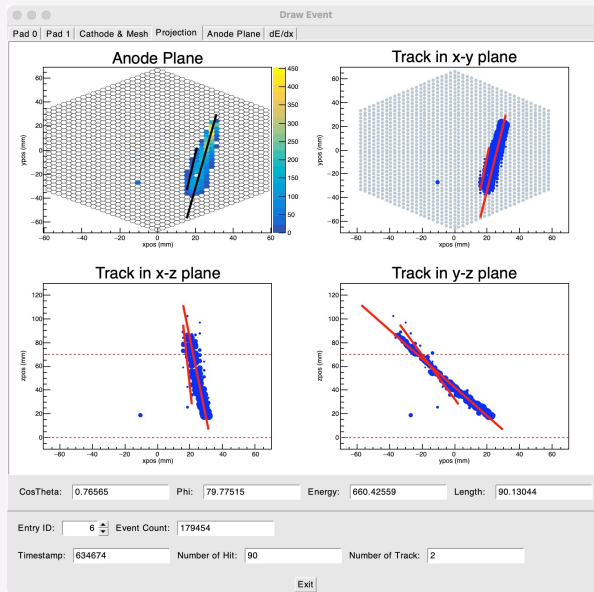
⊕ 功能测试

⊕ 实验对比

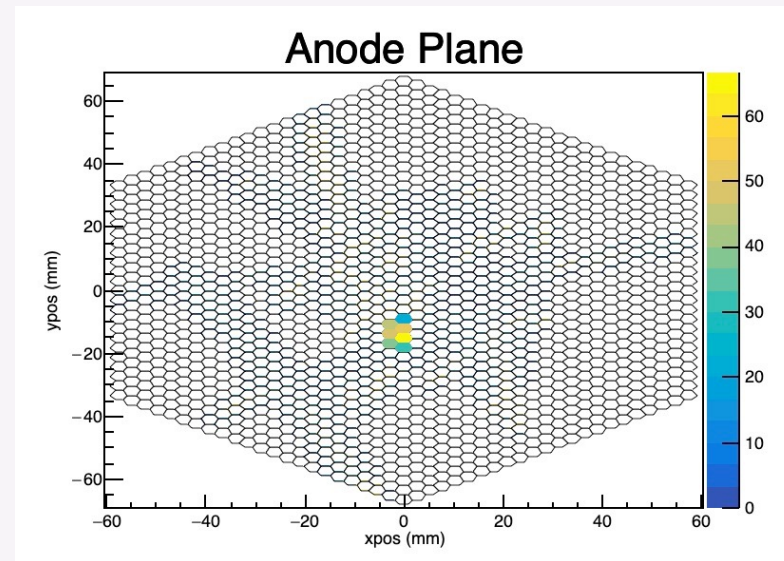


## 径迹重建问题

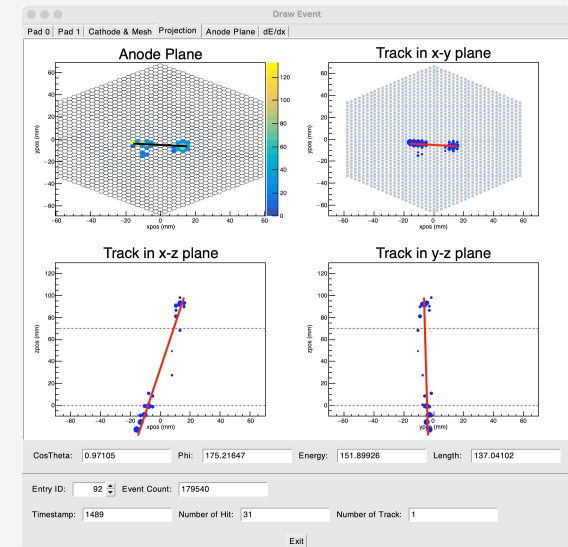
- BLUET框架下，径迹重建算法采用“霍夫变换”。
- 1. alpha事例径迹宽、射程长，容易被识别为多条事例
- 2. proton响应pad少，小信号容易无法识别
- 3. 多个proton事例容易被识别为一条径迹



(1)



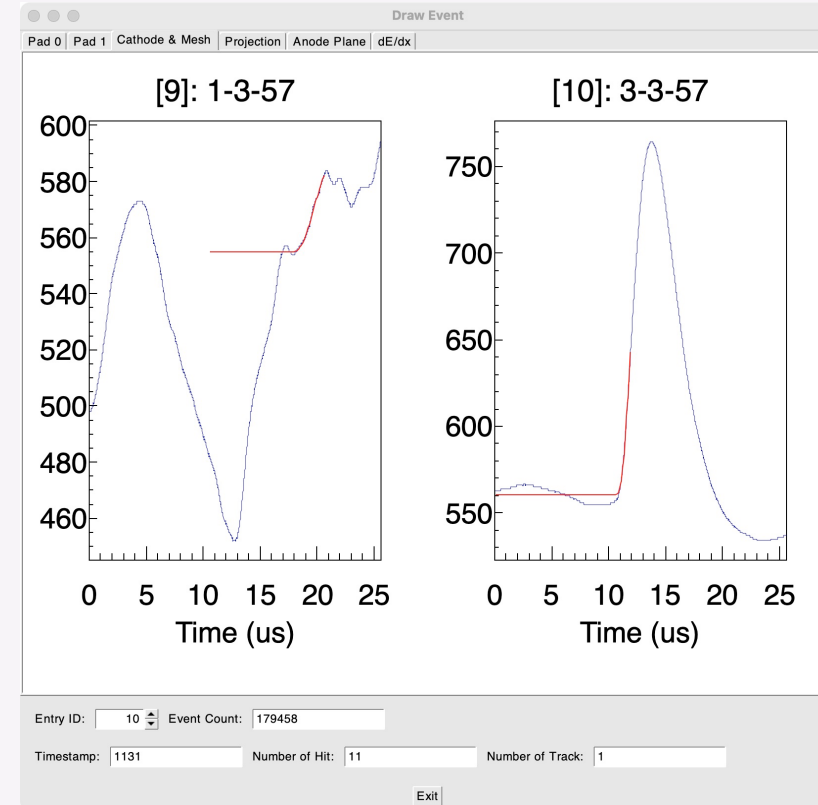
(2)



(3)

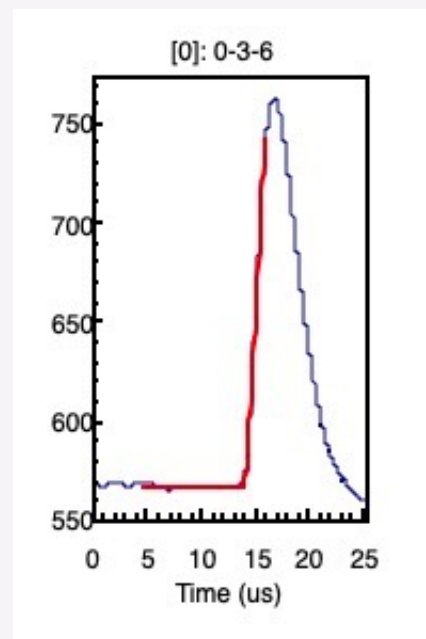
# 定时问题

- 现有定时存在问题：
  1. 受限于阴极信号的信噪比，对于np散射事例而言，阴极信号容易淹没与噪声中，无法得到起始时间
  2. 这影响到proton产生位置的判断以及反应中子能量的获取

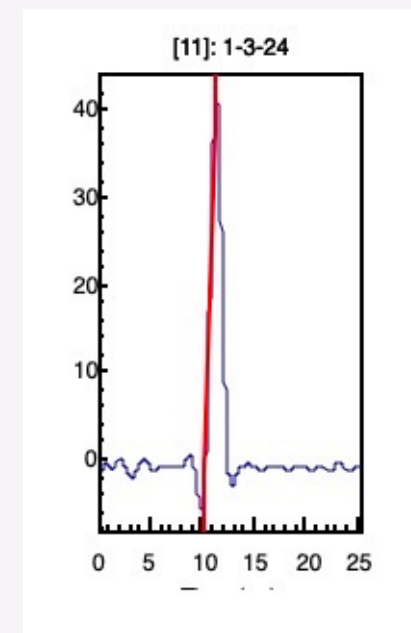


# 解决思路

- 利用反卷积波形获取时间：
  1. 原有方法只考虑pad信号的起始时间；
  2. 增加“终止时间”以反映每个pad在z方向上的投影长度。
- 利用机器学习算法在三维空间 (x-y-z(t))中重建径迹：
  1. 考虑使用DBSCAN密度聚类获取团簇；
  2. 在团簇中使用“霍夫变换”、卡尔曼滤波等算法重建径迹；
  3. 使用最小二乘法拟合进行径迹评价。



原始波形



反卷积波形

# 05

## 总结与展望

⊕ 完成情况 ⊕ 获取方式 ⊕ 后续计划



## 总结与展望

---

### 工作总结

- BLUET全模拟算法的升级可满足大量事例的模拟计算；
- n-p散射实验已顺利开展，但基础算法存在问题，无法进行深入研究；
- MTPC实验过程中受PCB板的本底影响较大，后续实验需考虑该问题。

### 下阶段计划

- 对BLUET全模拟算法进行实验验证；
- 在BLUET框架下升级径迹重建算法；
- 分析n-p散射实验数据，尝试进行截面获取。

thank you for your appreciation

# 感谢您的欣赏

By faith I mean a vision of good one cherishes and the enthusiasm that pushes one to seek its fulfillment regardless of obstacles. By faith I mean a vision of good one cherishes and the enthusiasm that pushes one to seek its fulfillment regardless of obstacles. By faith I

汇报人：陈海铮

部门：散裂中子源科学中心 & 西安交通大学

2024年12月01日