

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

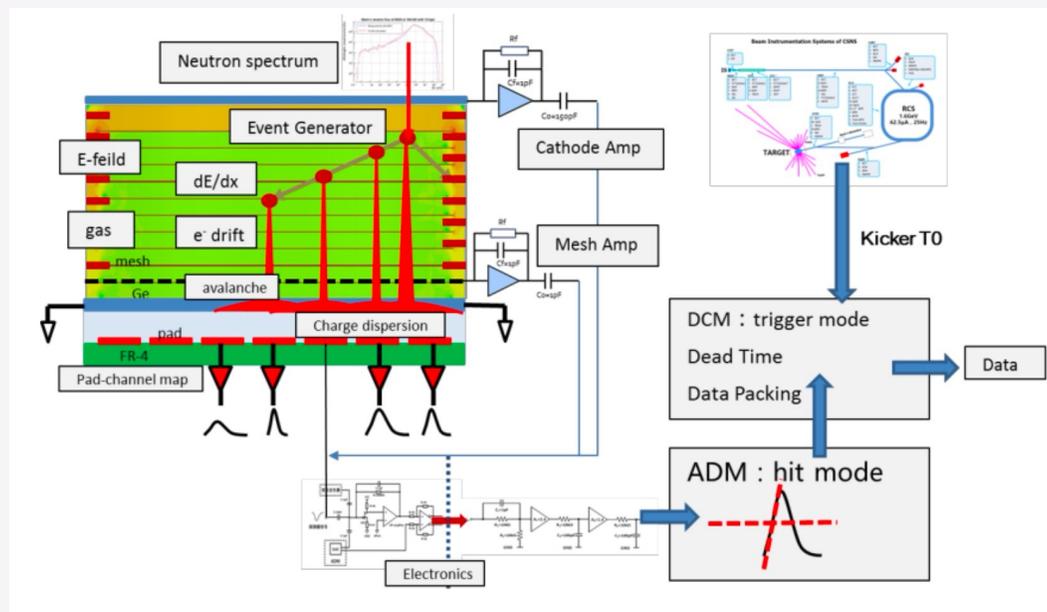
⊕ 开发需求

⊕ 物理背景

物理背景

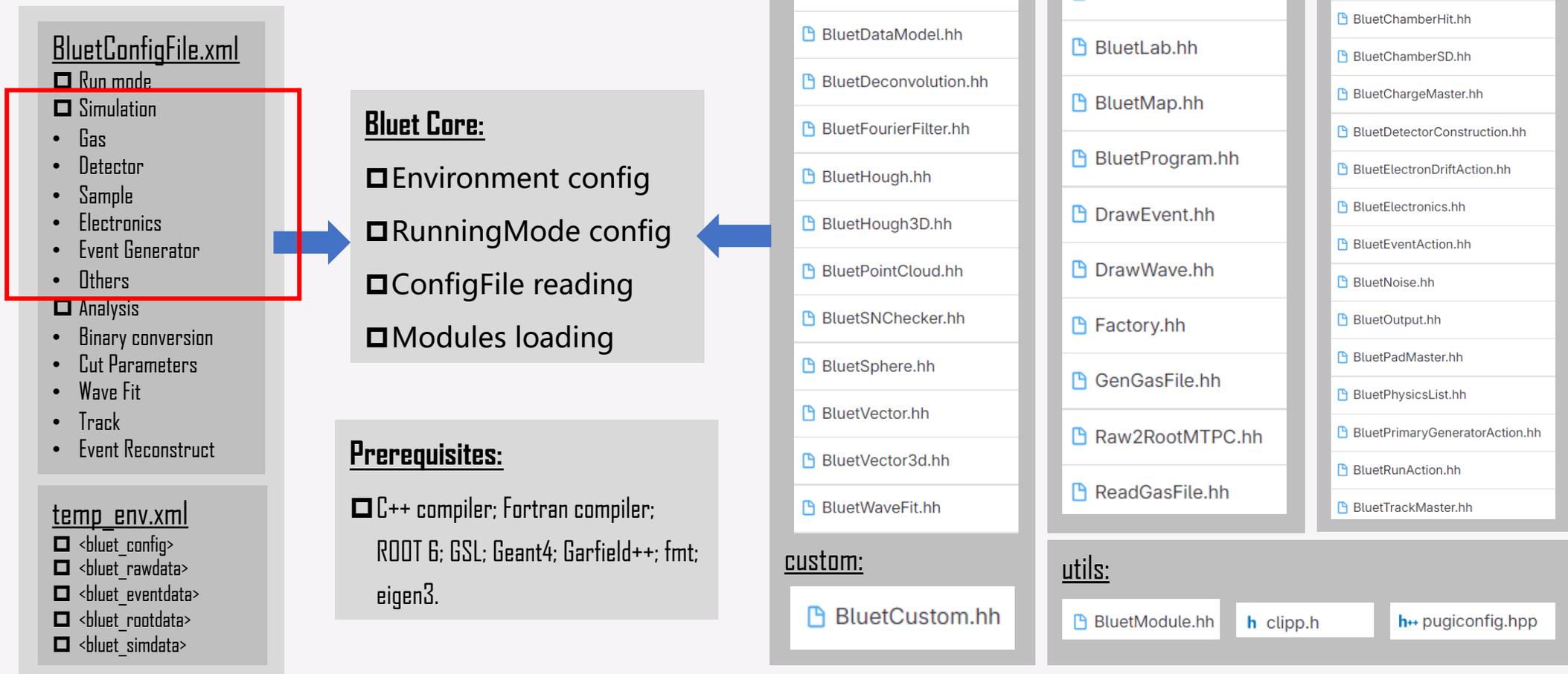
TPC工作原理介绍:

- 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。



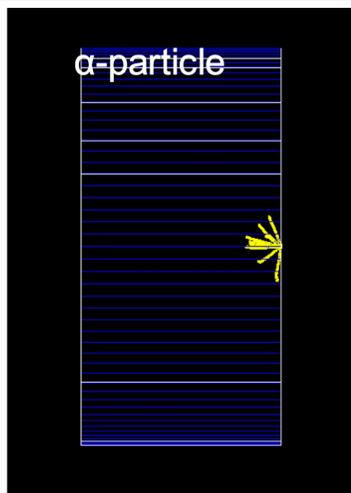
BLUET程序框架介绍

BLUET-v5框架

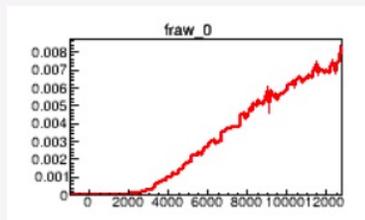
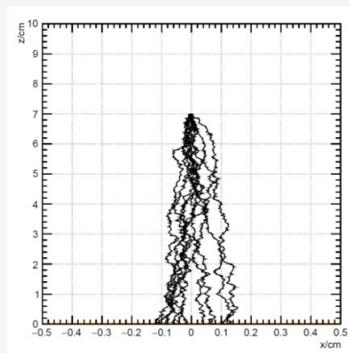


BLUET程序框架介绍

全模拟运行流程：



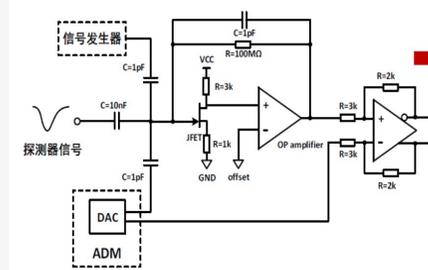
(一)
辐射场输运模块
(核反应与电离)



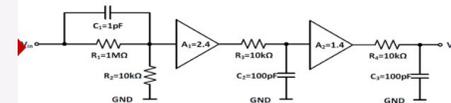
(二)
探测器信号仿真模块
(电子漂移、雪崩与信号产生)

修改部分

模拟硬件电路：电荷灵敏前放



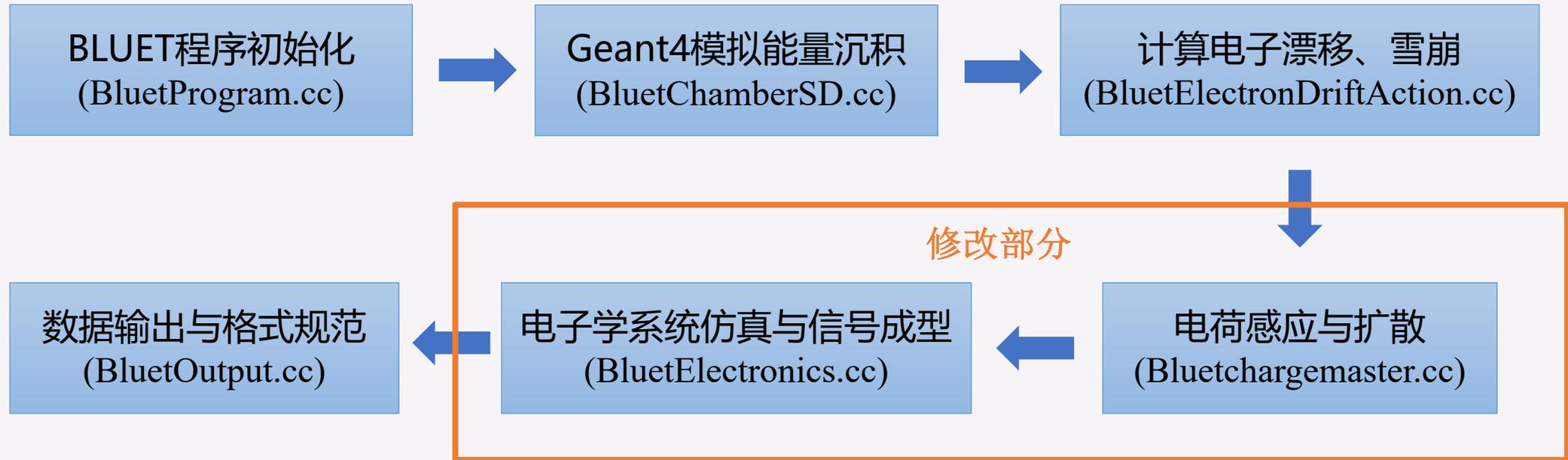
FPGA数字波形处理：极零-RC1-RC2



(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

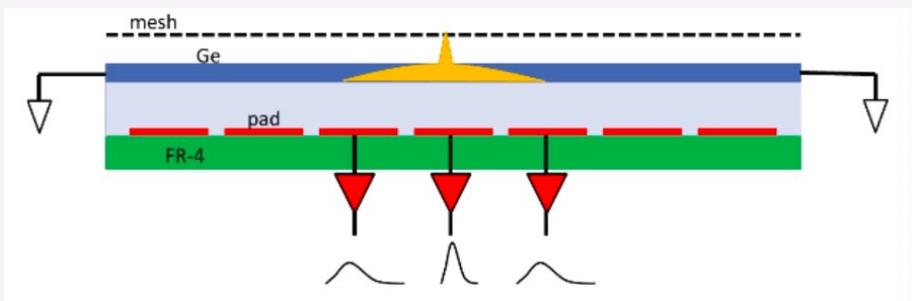
+ 考虑因素

+ 算法设计

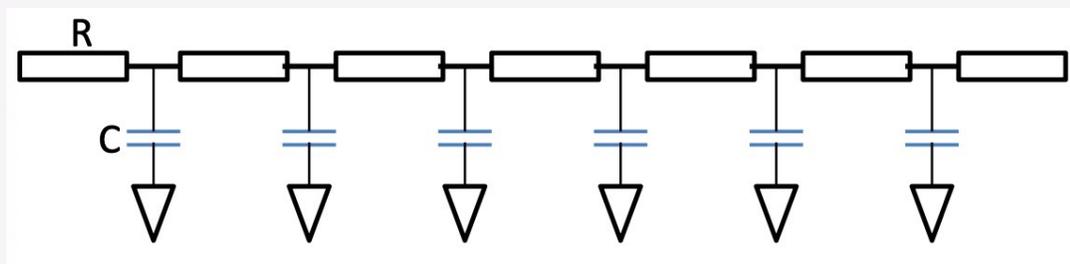
电荷扩散原理

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 σ 增大。

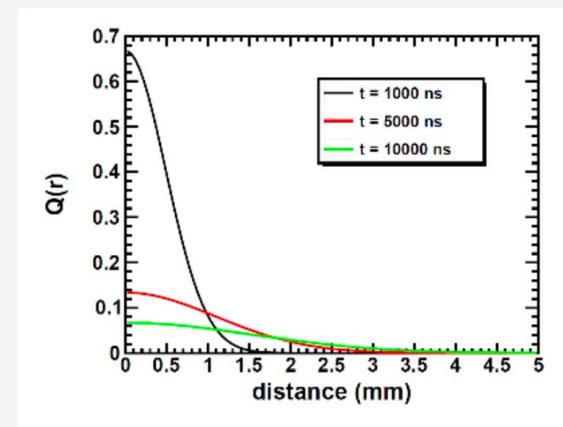
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = h \left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} \right)$$



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

计算参数：

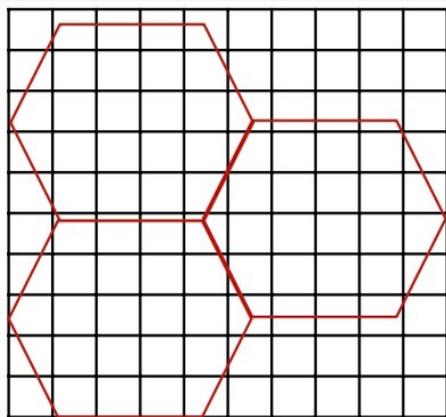
- 锗层面电阻 $R=100\text{M}\Omega$ ；
- 环氧树脂厚度 $400\ \mu\text{m}$ ，介电常数4；
- 阻焊油厚度 $20\ \mu\text{m}$ ，介电常数4；
- 阻性层与pad的二维结构 $RC=8.4\ \mu\text{s}/\text{mm}^2$ 。



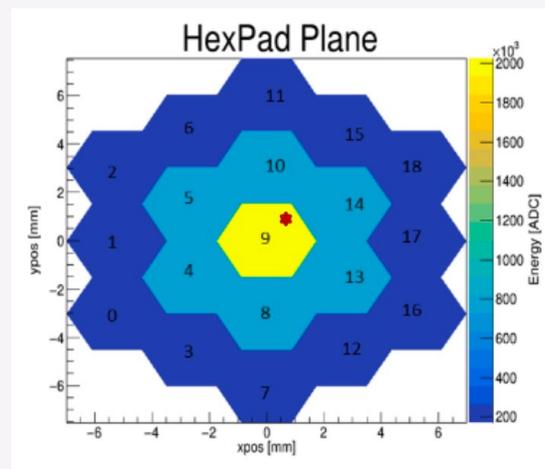
不同时间下的电荷分布

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

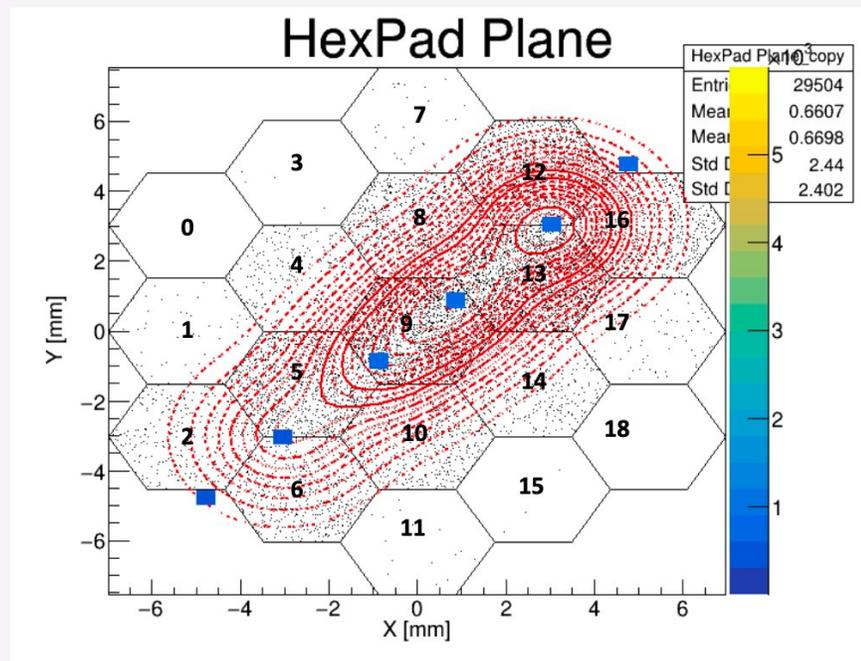
全模拟算法优化

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

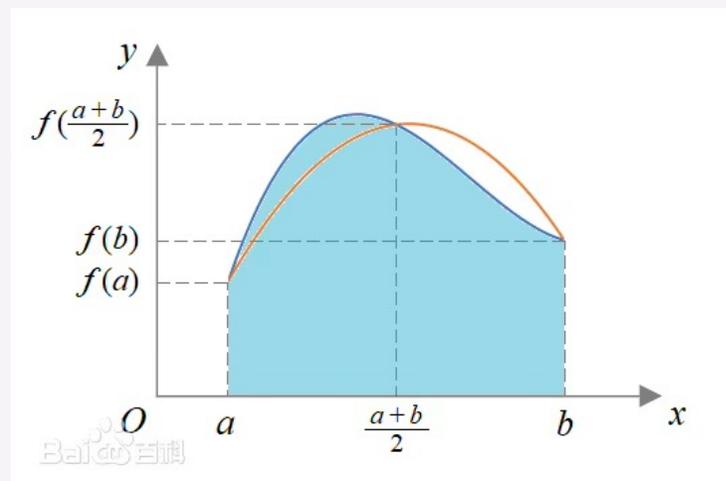
辛普森积分算法（二次函数逼近）

- 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

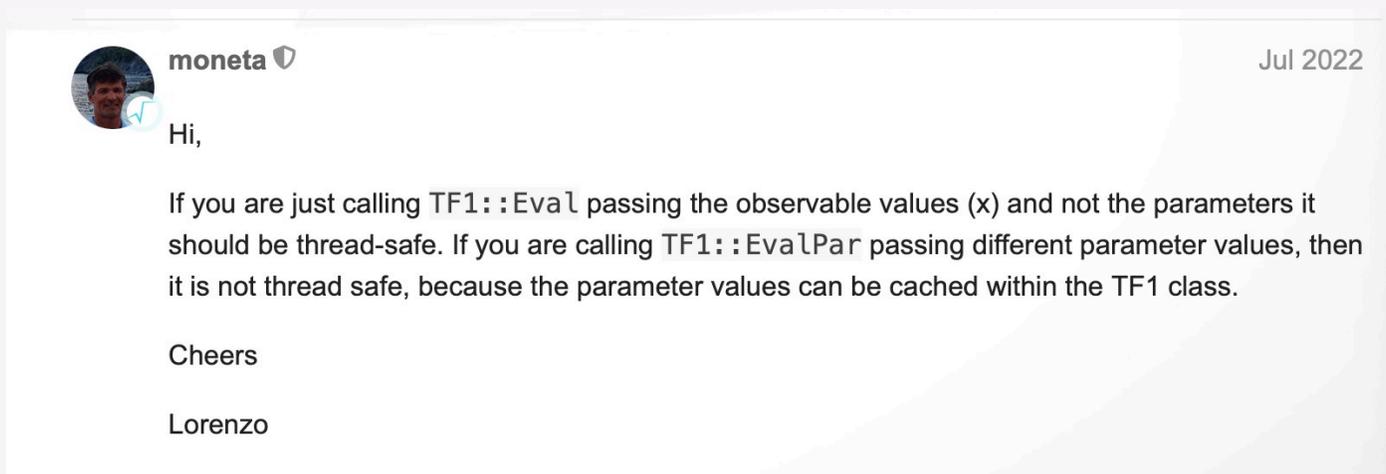
0.001266	0.442202	349.291
0.002451	1.11403	454.519
0.00264	0.955835	362.059
0.002636	0.690952	262.121
0.002618	0.572991	218.866
0.002616	0.503645	192.525
0.00263	0.462536	175.869
0.002701	0.43095	159.552
0.00269	0.402343	149.57
0.002648	0.378976	143.118

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

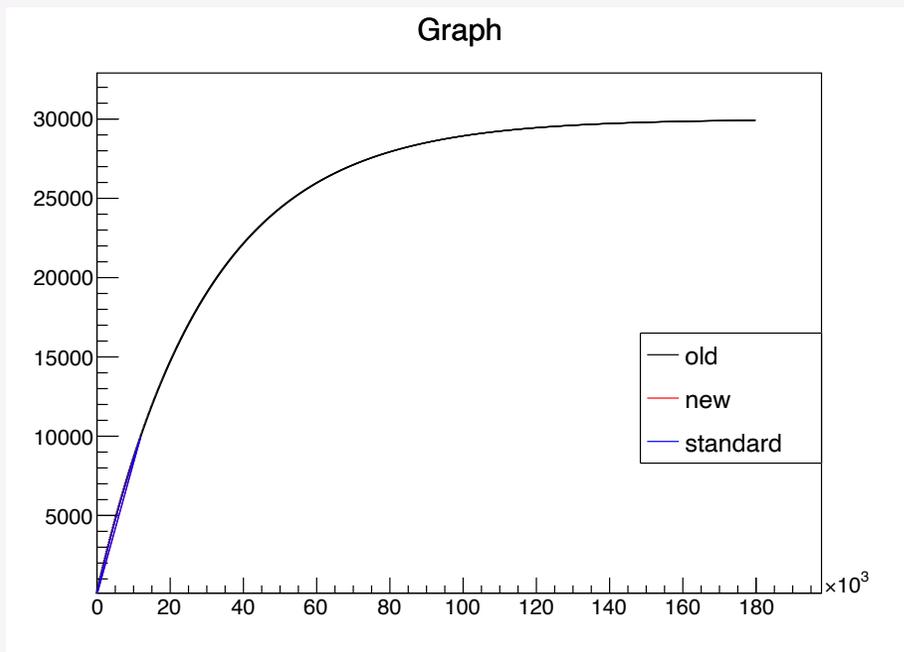
- 根据卷积的定义，编写离散卷积函数。

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

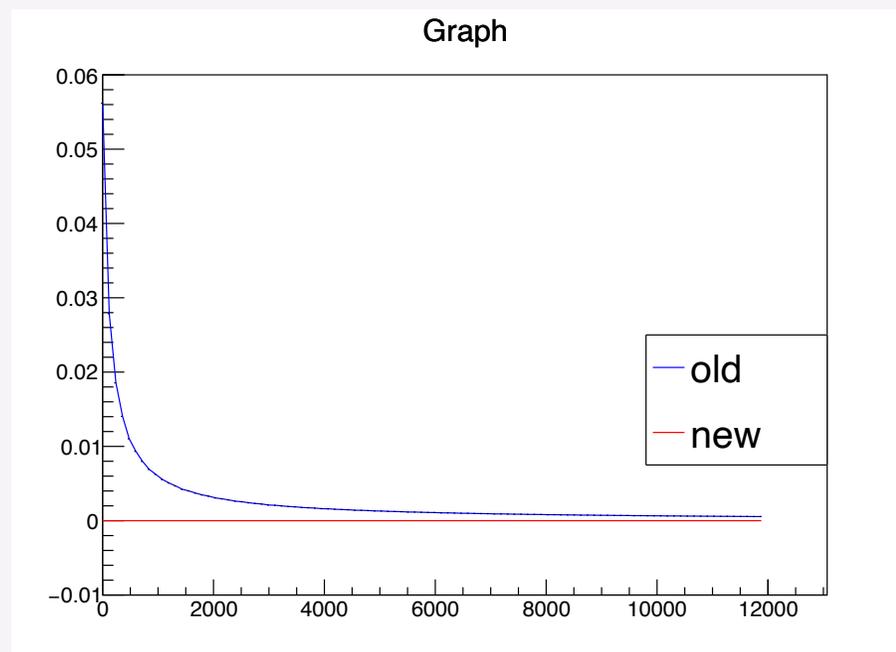
全模拟算法优化

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: $g(x) = \frac{1}{c_0} * e^{-x/c_1}$



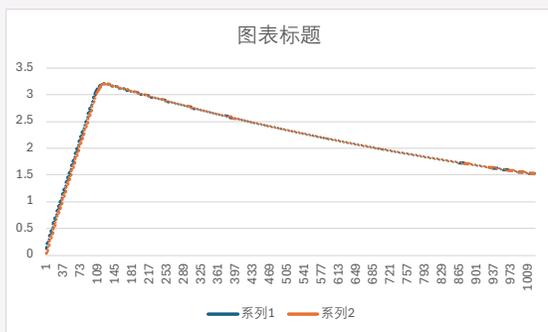
卷积结果



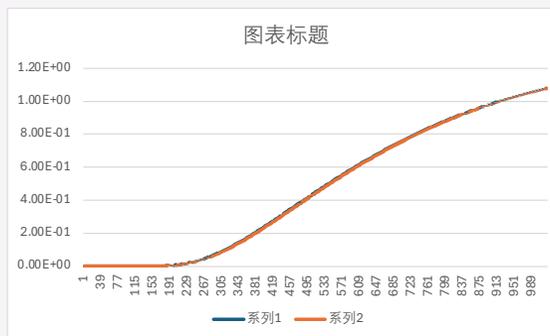
计算误差

全模拟算法优化

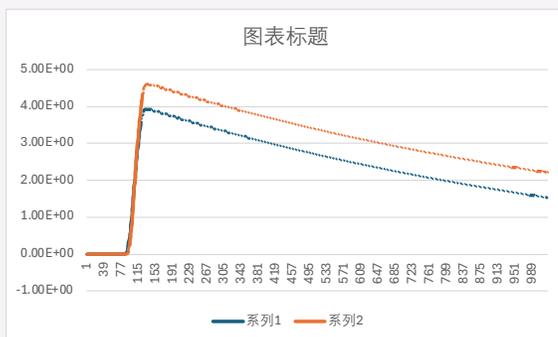
结果对比



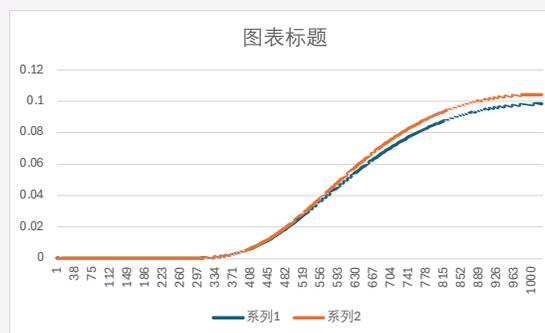
Cathode amp



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

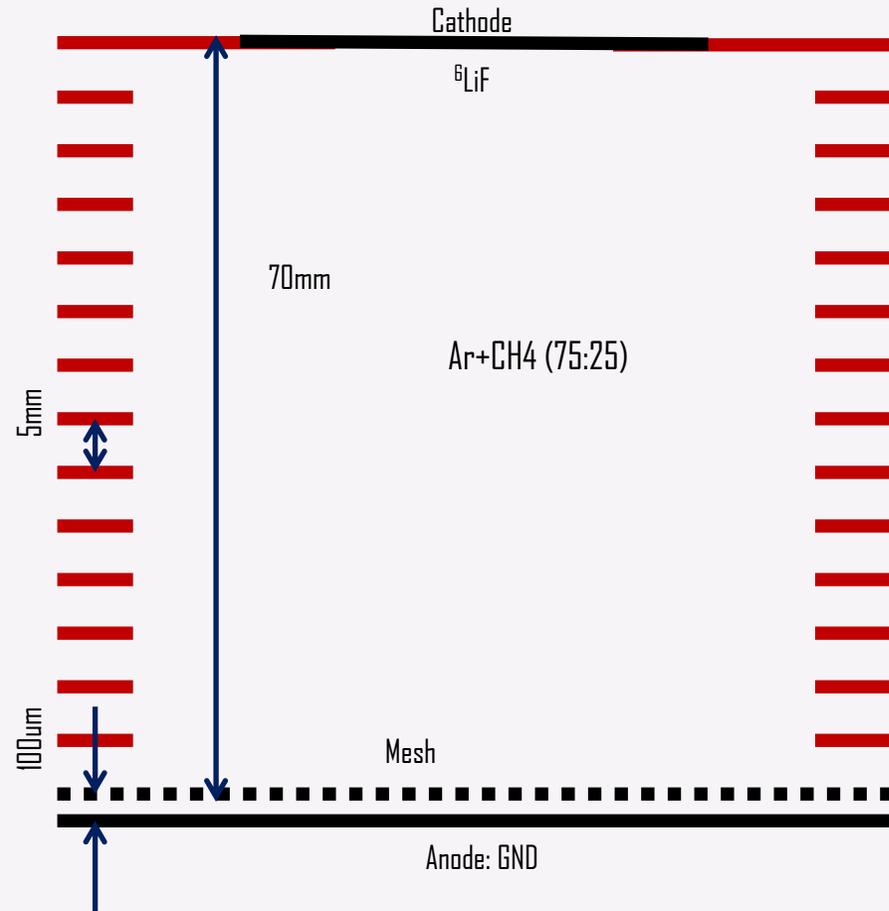
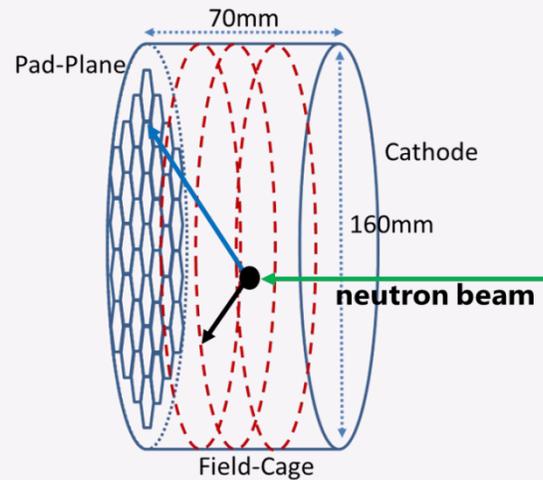
+ 总体框架

+ 数据结构

+ 模块开发

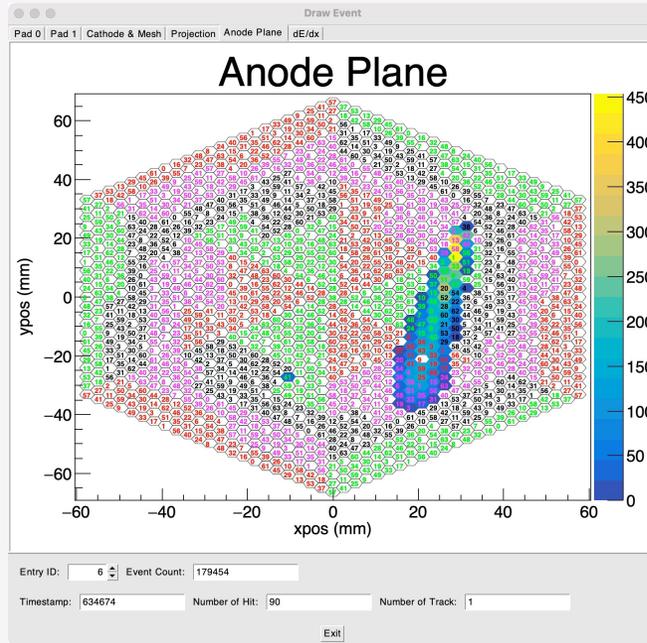
n-p散射实验设计

- 中子能量范围：100keV-500keV
- 漂移长度：70mm
- 工作气体为75%Ar+25%CH₄混合气体，以H为靶核
- 阴极中心放置⁶LiF样品，作为截面刻度的标准样品

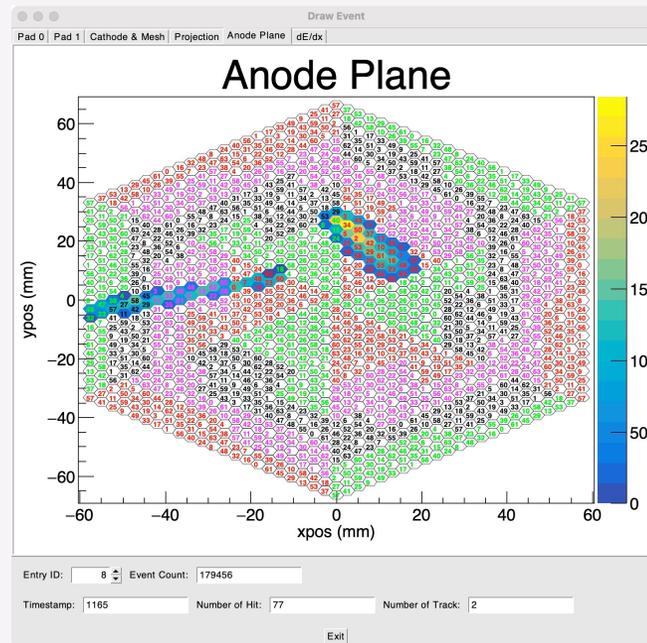


事例分析

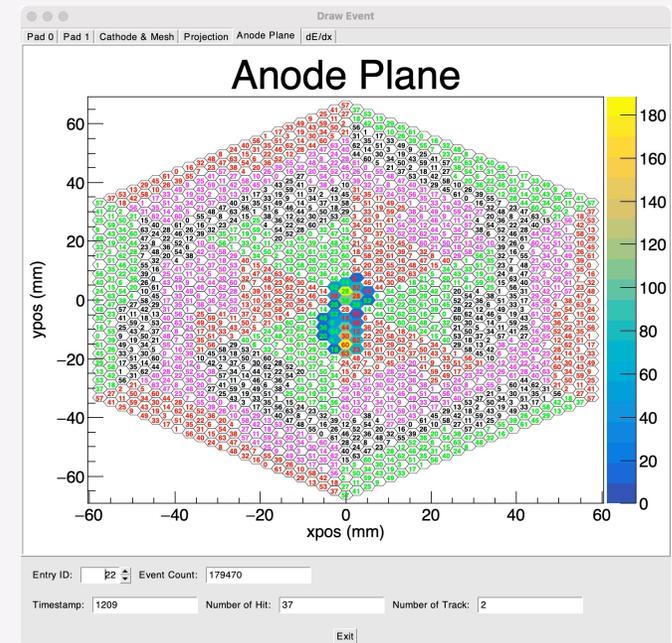
- 实验中事例分布可分为三类：1. 单事例；2. 多事例离散分布；3. 多事例叠加分布



(1)



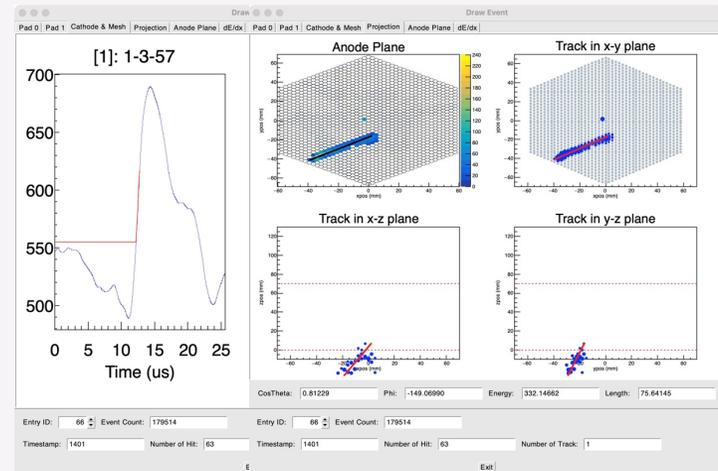
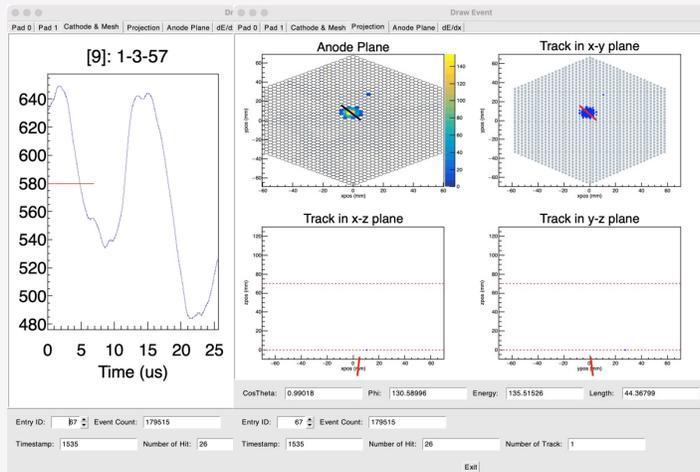
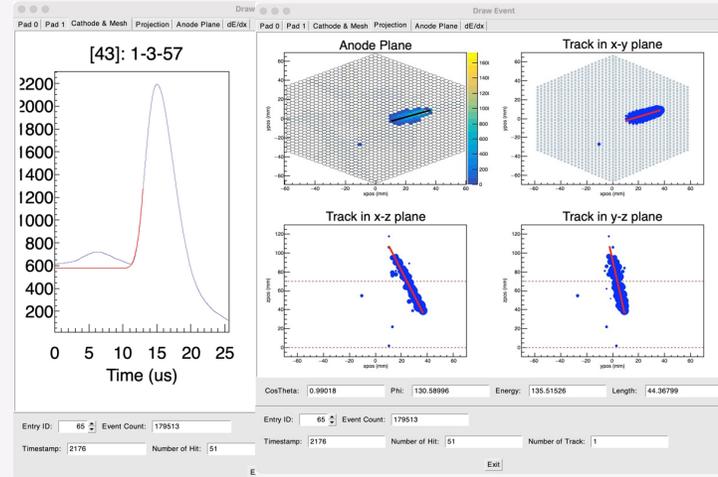
(2)



(3)

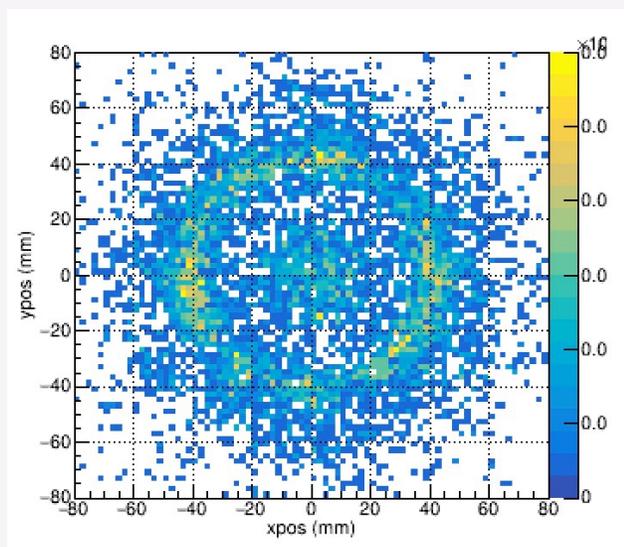
事例分析

- 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”

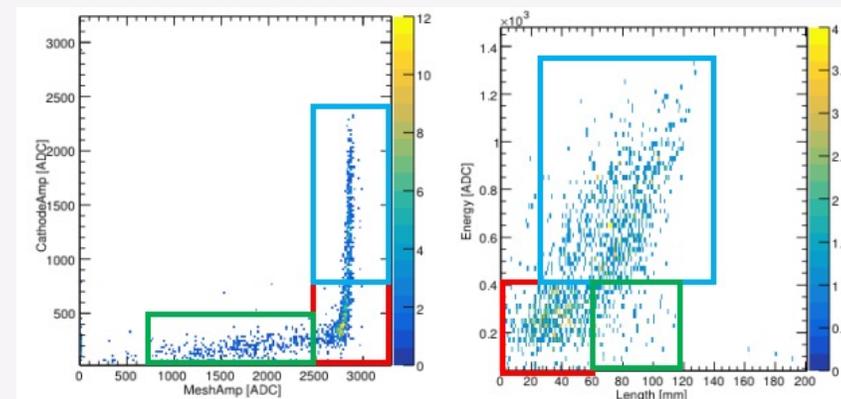


环状分布

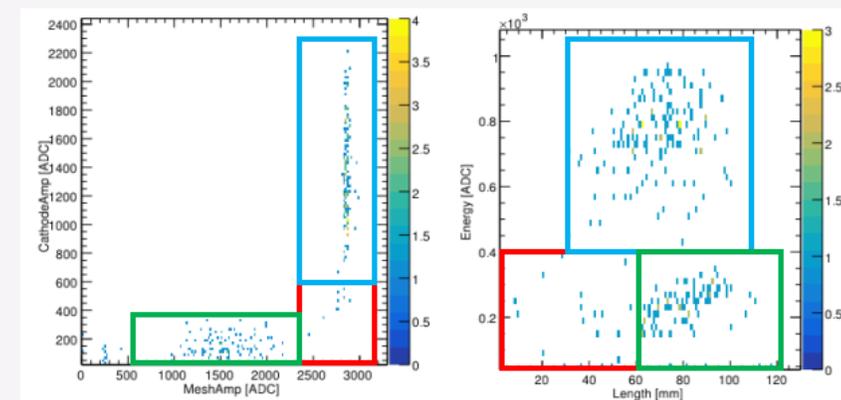
- PCB环导致事例响应：
 1. Cut 50keV以下的中子能量进行统计
 2. 发现产物产生位置分布与束斑不匹配
 3. 怀疑来源于天然放射性物质产生的alpha粒子



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

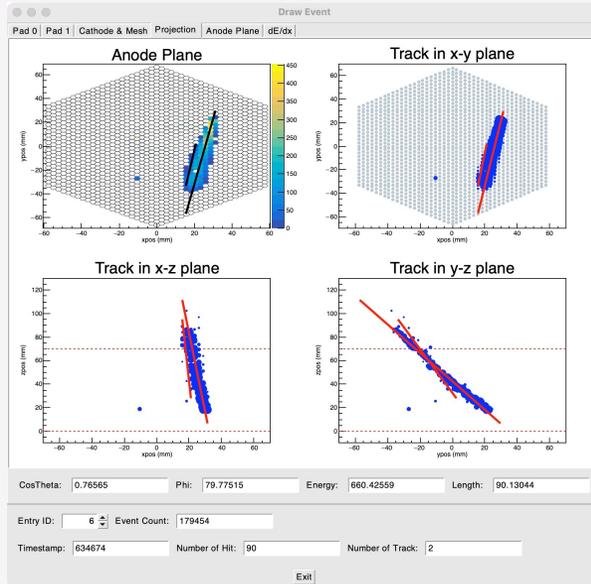
⊕ 运行逻辑

⊕ 功能测试

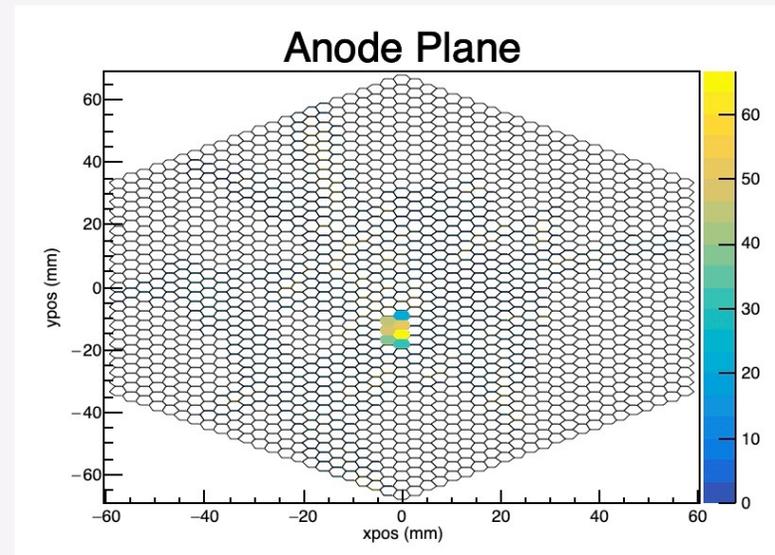
⊕ 实验对比

径迹重建问题

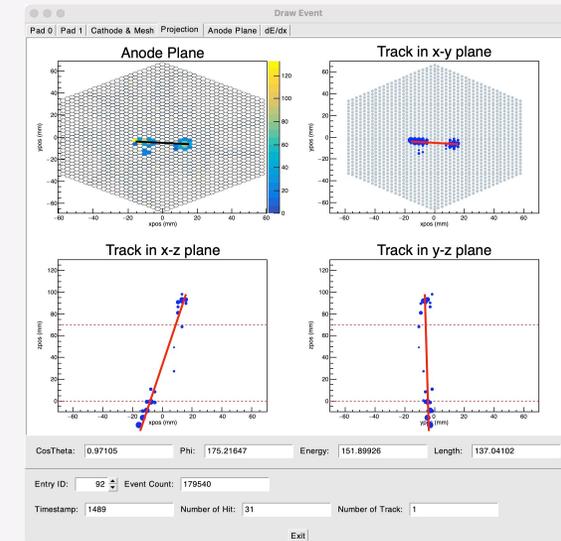
- BLUET框架下，径迹重建算法采用“霍夫变换”。
- 1. alpha事例径迹宽、射程长，容易被识别为多条事例
- 2. proton响应pad少，小信号容易无法识别
- 3. 多个proton事例容易被识别为一条径迹



(1)



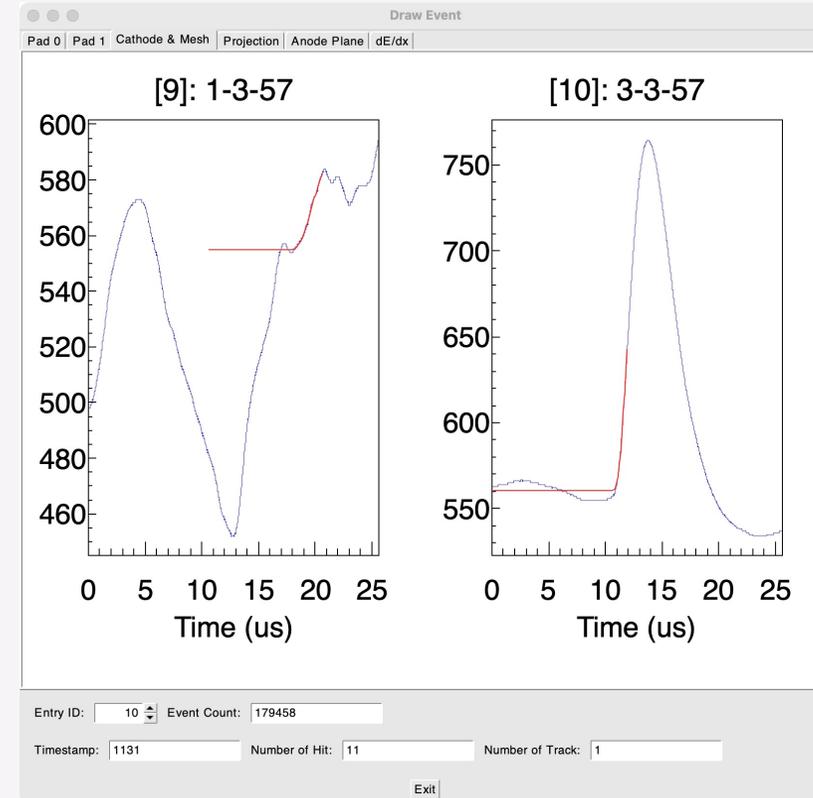
(2)



(3)

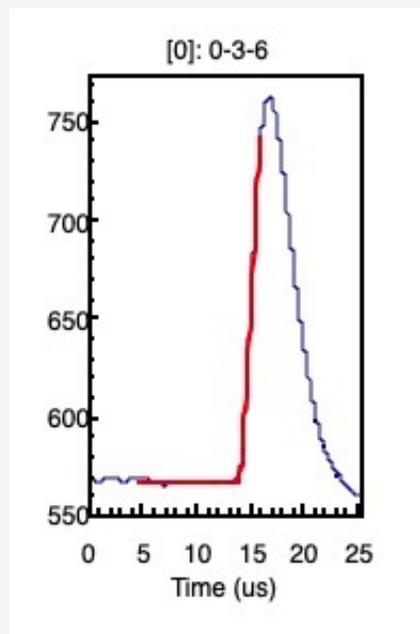
定时问题

- 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

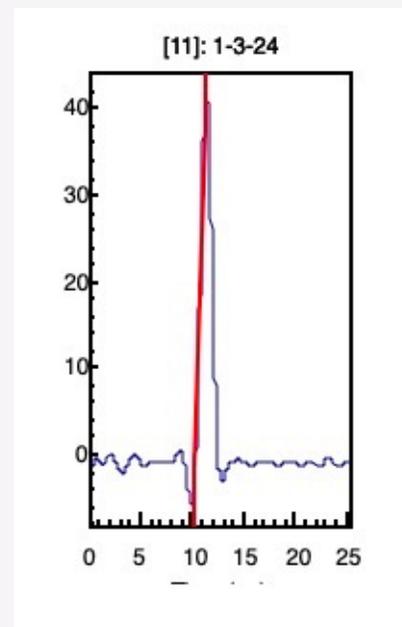


解决思路

- 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