

基于 μ RGroove的穿越辐射探测器研究

刘广旭 邵明 田相起

中国科学技术大学 近代物理系

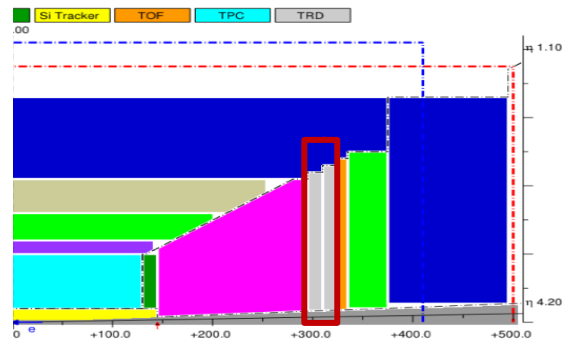
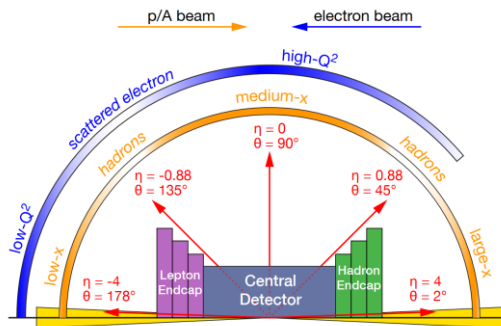
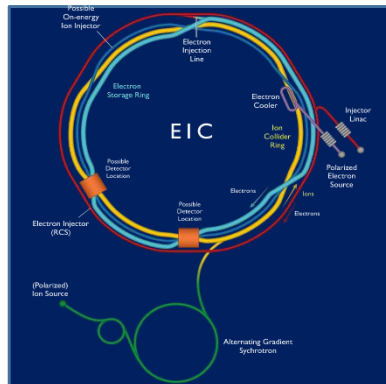
2026年7月



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

报告提纲

- 研究背景与目标
- μ RGroove TRD原理样机与束流测试
- 基于探测器响应的信号重建方法
- 基于二维能谱似然的粒子鉴别性能评估
- 总结



EIC (美国) Electron Ion Collider

EIC: 电子离子对撞的质心能量~20–140 GeV, 亮度高达 $\sim 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

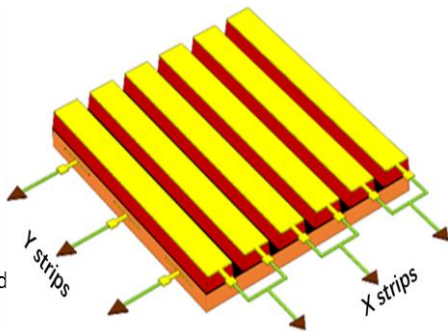
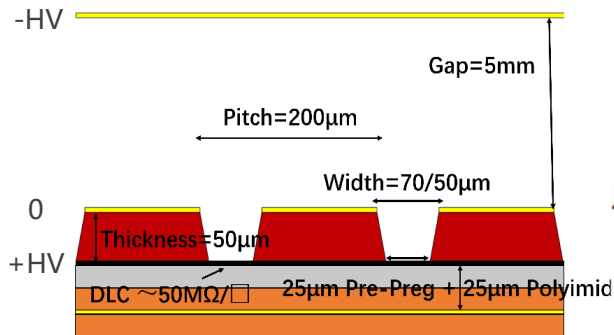
TRD负责强子端的电子识别, 为提升鉴别能力, TRD通常使用多层探测单元。

TRD位于RICH和ECAL之间, 覆盖角度 ($\eta=1\sim 4$), 其空间Z向只有50cm整体空间。

为了满足大面积覆盖, 以及高计数率, 可选择MPGD作为灵敏探测器

赝快度 (η)	探测器区域	粒子鉴别要求	强子($\pi/K/p$)鉴别	动量范围
-4~-2	电子端 (后向)	π/e 抑制: 1:10000	$\geq 3\sigma$	$\leq 10 \text{GeV}/c$
-2~-1		π/e 抑制: 1:100		$\leq 6 \text{GeV}/c$
-1~1	桶部	π/e 抑制: 1:100		$\leq 50 \text{GeV}/c$
1~4	强子端 (前向)	15GeV/c动量范围内 π/e 达 3σ 分辨		

μ RGroove (micro-Resistive-Groove)探测器

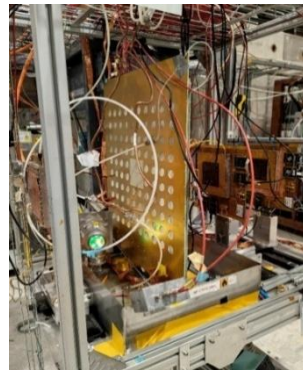


■ 倍增结构呈长槽型，阴极自身可作为一维条读出

- 颗粒度高，没有张力
- 避免电荷分享效应，相同气体增益下可显著增大感应信号幅度
- 机械结构简单、可拓展性强，利于大面积应用
- 兼容现有刻蚀与PCB相关工艺，加工难度相对更低。



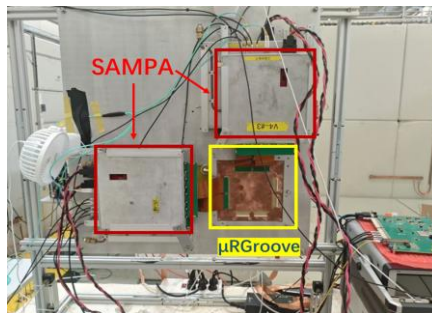
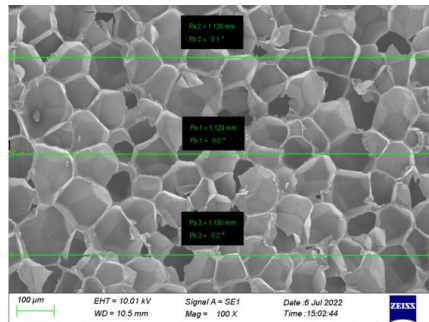
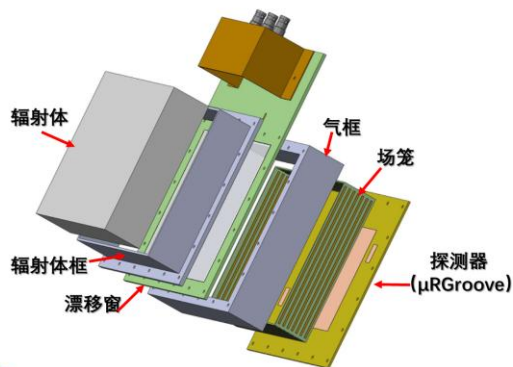
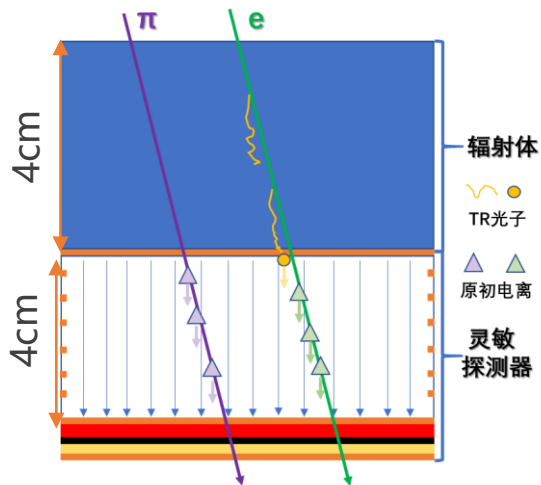
<https://indico.cern.ch/event/1543925/contributions/6540875/>
<https://indico.cern.ch/event/1662850/contributions/7137863/>



小面积原型样机(10cm × 10cm)，和大面积样机(50cm × 50cm, 100cm × 50cm)都经过测试，其性能优异

- 增益高， $\text{gain} > 10^3$
- 位置分辨好，好于百 μm
- 计数率能力好，达 $100\text{kHz}/\text{cm}^2$

TRD原理样机



■ 穿越辐射探测器 (TRD) 核心构成:

- 辐射体: 4cm ROHACELL HF71泡沫或国产泡沫
- 探测器: μ RGroove, 气隙大小为4cm, 气体为添加猝灭气体的Ar或Xe混合气
- 电子学: SAMPA, 采样间隔为100ns, 采样宽度最大100us, 成形时间160ns

TRD原理样机束流测试

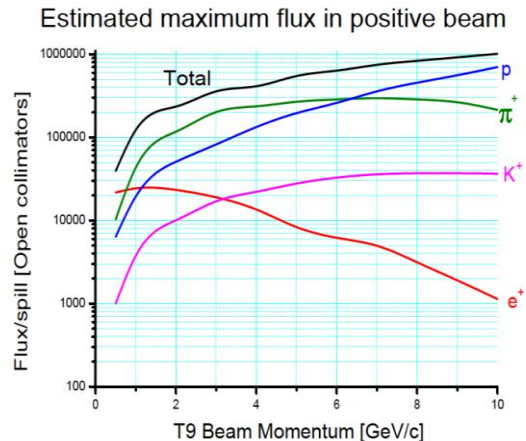
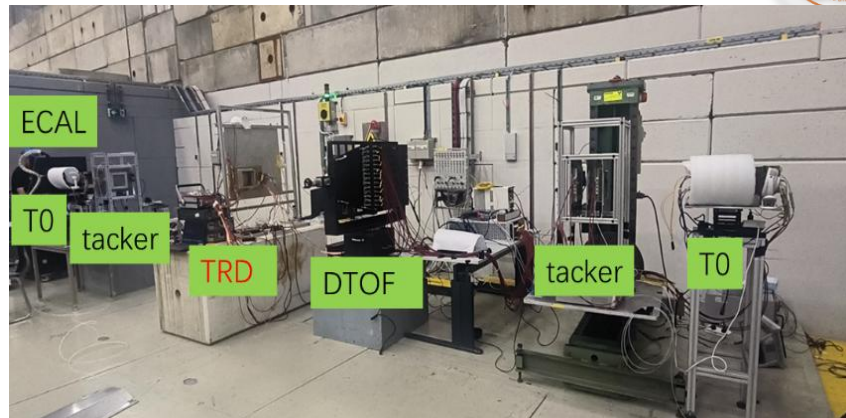


CERN PS beam:

beam: e/π ~ 5000 event/spill/0.5s 3, 4, 5 GeV/c

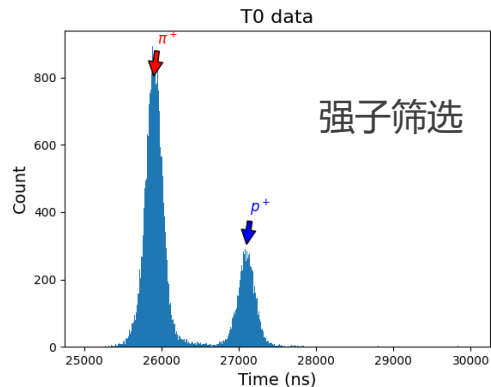
气体: Xe(48.85%)+Ne(48.85%)+isobutane (2.3%) or
Ar(45%)+CF₄(40%)+CO₂(15%)

辐射体: 国产泡沫, ROHACELL

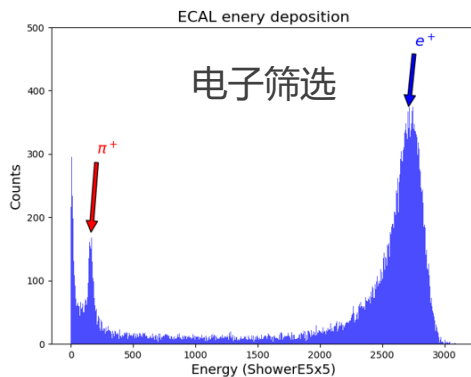


束流中多粒子混合, 需要借助STCF系统进行事例筛选

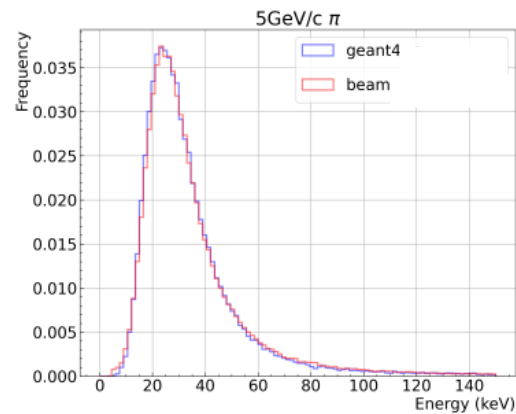
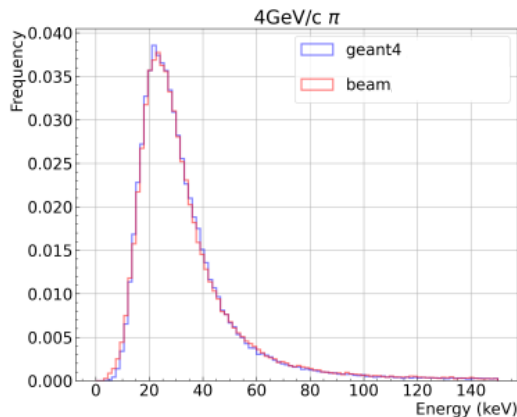
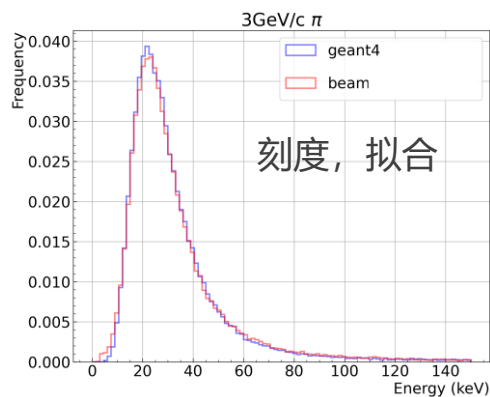
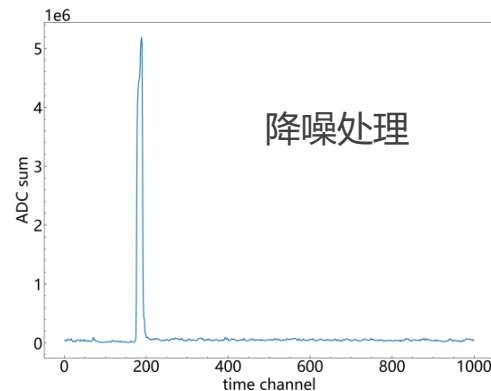
数据筛选，能谱重建



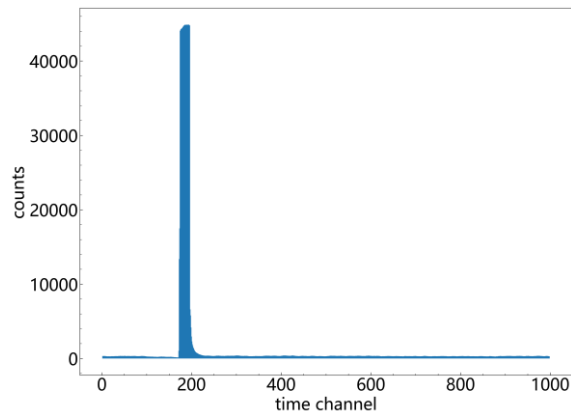
两个T0探测器构成TOF系统
时间分辨可达 88ps



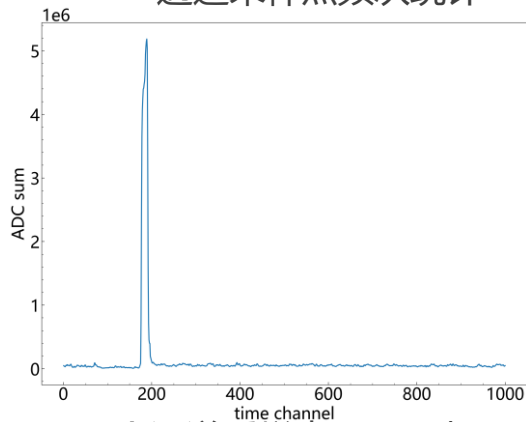
ECAL: 纯碘化铯晶体,
能量分辨率为 $\sim 2.5\%$ @1GeV/c



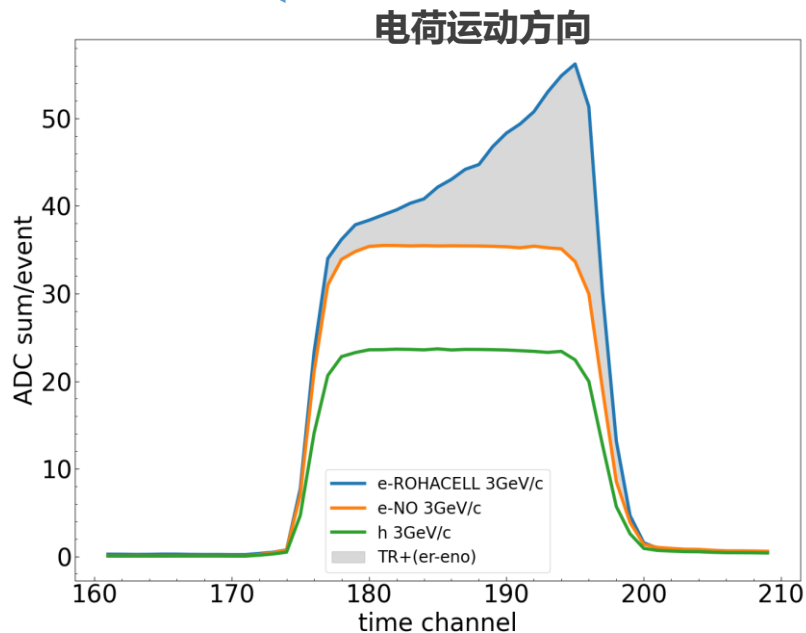
探测器信号特征



通道采样点频次统计

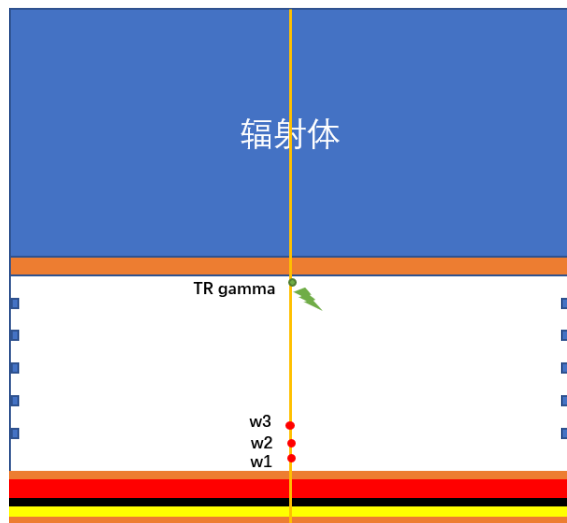


全通道采样点ADC叠加



对比不同情况的平均信号，电子束流打到有辐射体对应的探测器信号有明显的特征（灰色区域），时间靠后的地方有个峰，应是穿越辐射光子的贡献

探测器感应信号



$$\begin{bmatrix} \omega(t_1) & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \omega(t_2) & \omega(t_1) & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega(t_m) & \dots & \omega(t_1) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \omega(t_m) & \dots & \omega(t_1) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \omega(t_m) & \dots & \omega(t_1) & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \omega(t_m) & \dots & \omega(t_1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W(t_1) \\ W(t_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ W(t_{m+n-1}) \\ W(t_{m+n}) \end{bmatrix} \quad ($$

探测器响应

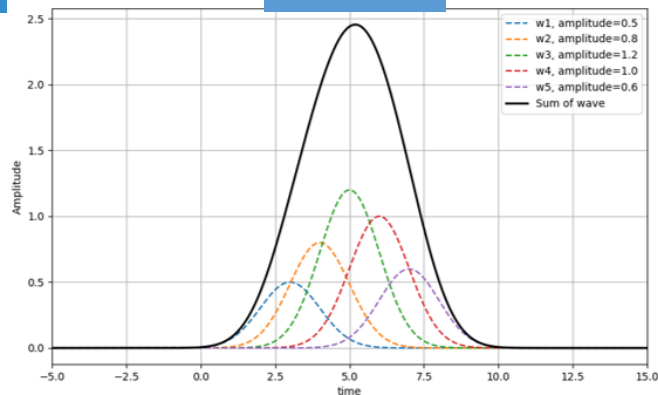
原初电荷

总波形

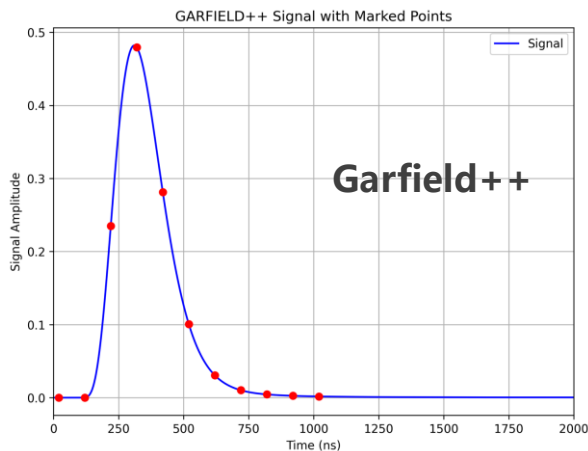
按电子学采样间隔划分，将探测器漂移区划分为n层：

总波形 $W(t) = \sum_{i=1}^n Q_i w_i(t)$ 。

参考波形 $w_i(t)$ 是第i层一定电荷量的电荷团簇漂移结合探测器响应的平均波形，每层的波形只是起始时间不同， Q_i 为第i层电荷在雪崩过程中相对电荷量的权重（之后为了方便，叫原初电荷）



响应函数及二维信息



基于SAMPA成型函数:

$$f(x) = S\left(\frac{x-t}{\tau}\right)^N e^{-N\left(\frac{x-t}{\tau}\right)} + d$$

在GARFIELD++中模拟恒定电荷数量倍增过后的信号。取信号平均后，基于电子学采样特性（采样间隔100ns）取样10个点作为 $\omega(t)$ 根据电子学的采样率和电子的漂移速度，4cm漂移区可以分成21层

$$\begin{matrix} \text{A} & & \text{Q} & & \text{B} \end{matrix}$$

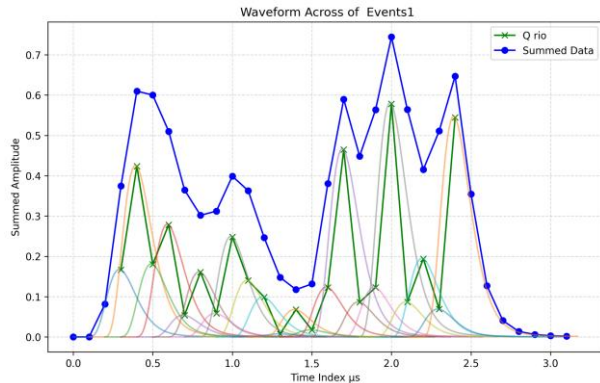
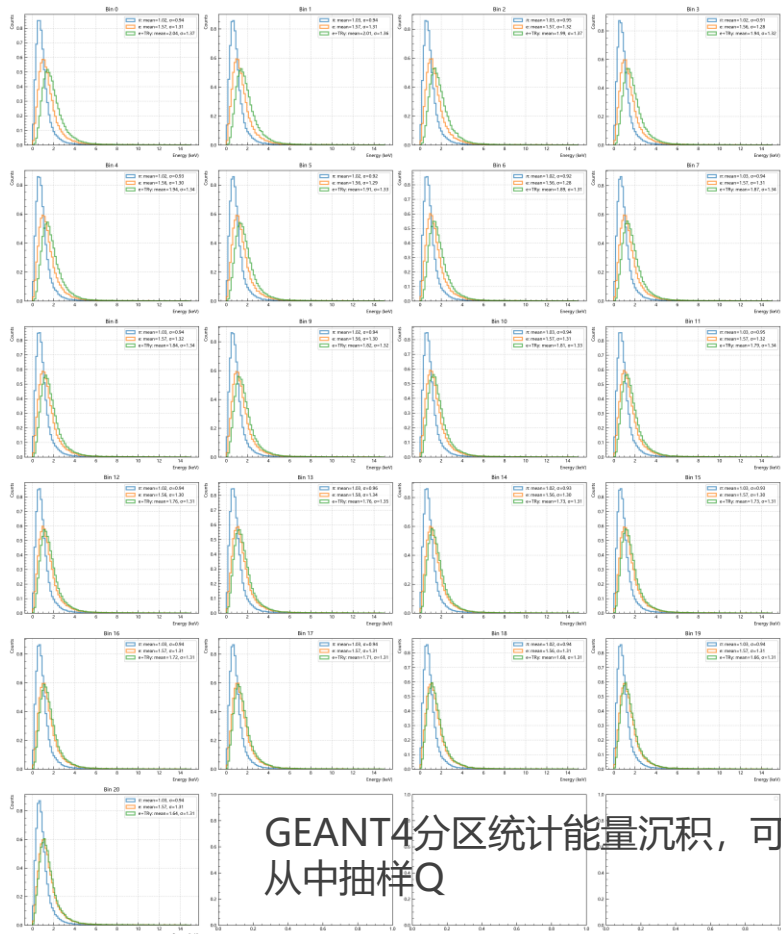
$$\begin{bmatrix} \omega(t_1) & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \omega(t_2) & \omega(t_1) & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega(t_m) & \dots & \omega(t_1) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \omega(t_m) & \dots & \omega(t_1) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \omega(t_m) & \dots & \omega(t_1) & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \omega(t_m) & \dots & \omega(t_1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W(t_1) \\ W(t_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ W(t_{m+n-1}) \\ W(t_{m+n}) \end{bmatrix}$$

$\hat{A}$ 为由 $\omega(t)$ 中元素构成的 31×21 矩阵 ($31 > 21$) , $\hat{A}Q = B$ 为超定方程，可通过最小二乘方法求解出Q。由于原初电荷 Q具有非负性约束，采用非负最小二乘方法 (NNLS)

$$\min_Q \|AQ - B\|_2^2, \quad Q_i \geq 0$$

Q 是一个与时间（位置）相关的向量，**以此为准将沉积能量（原初电荷团 $\propto Q$ ）与位置（时间）关联**

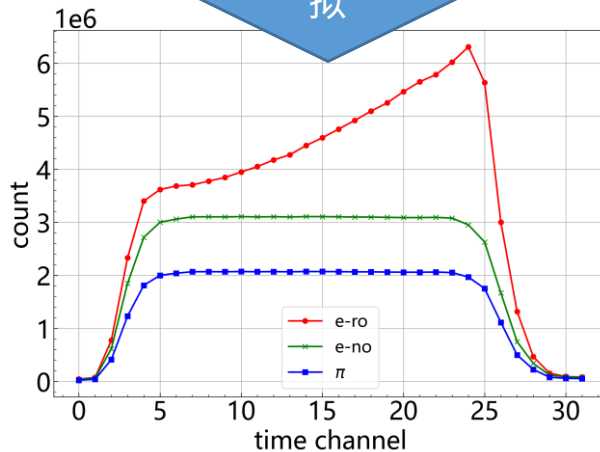
模拟验证



各区间波形叠加为单一事例波形:

$$\hat{A}Q = B$$

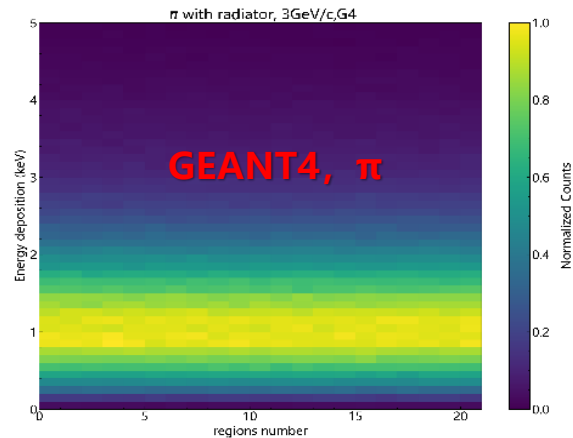
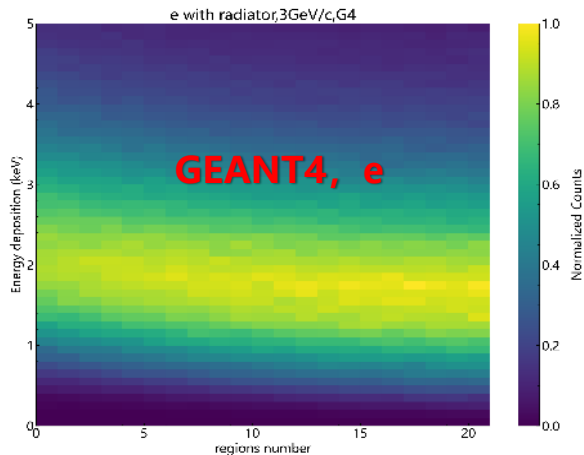
多次模拟



全事例叠加, B_{all} , 与实验数据吻合



二维能谱分布



构建二维能量沉积分布
归一化后可视作概率分布函数 $f(bin, dE)$

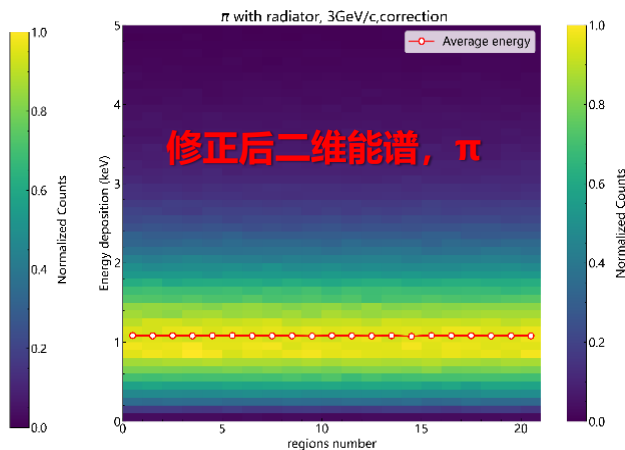
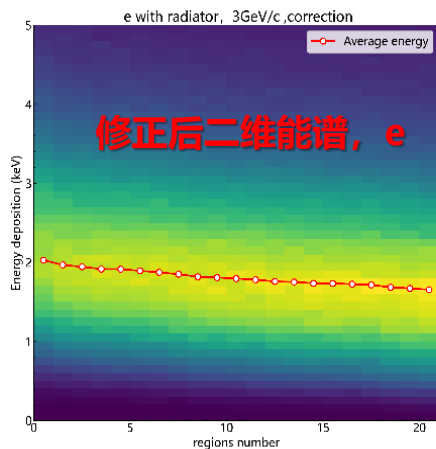
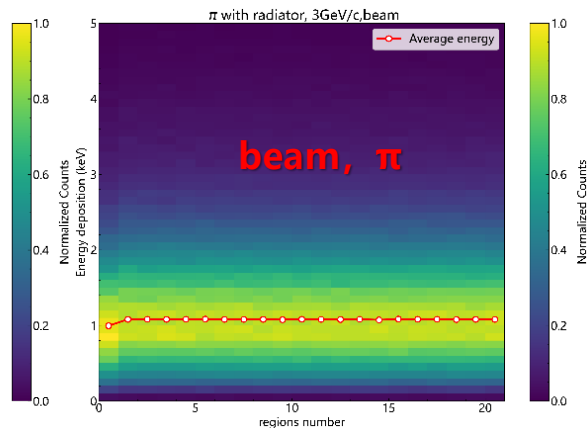
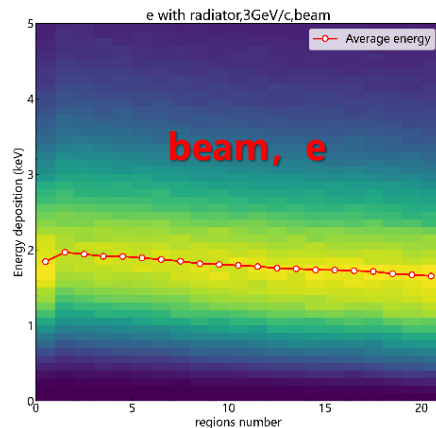
实验结果与修正



但实验中第一个区域存在
特定的能量沉积的偏移

(可能原因是触发时间与
探测器实际响应时间的偏
移, 或者气隙不是完美的
分成21层, 还可能是算法
本身)

利用强子 π 能量沉积在各
个区域分布均匀的特性,
将第一个区域进行修正
(系数1.104)





二维似然及结果

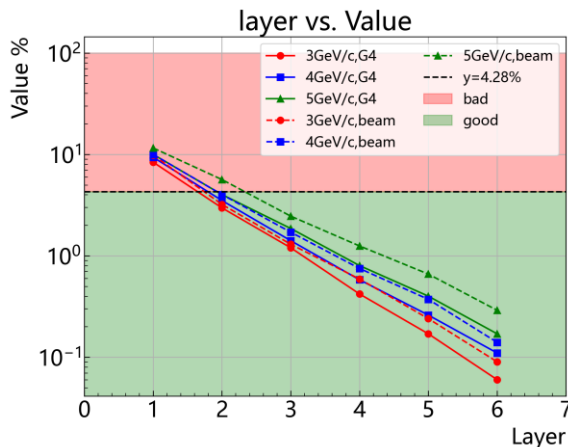
- 评估方法：**似然法**(Likelihood method)，将单层TRD的电子和 π 能谱作为概率分布来构造电子的归一化似然函数；若用到多 (n) 层TRD，有

$$\text{likelihood} = \frac{L_e}{L_e + L_\pi}, \quad L_e = \prod_{i=1}^n P(E_i|e), \quad L_\pi = \prod_{i=1}^n P(E_i|\pi)$$

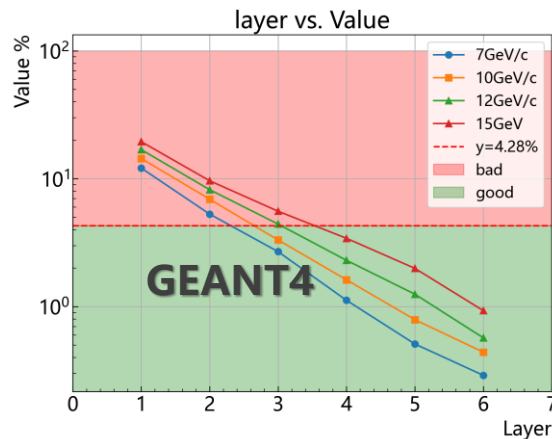
- TRD的**e/ π 鉴别能力**可量化为在给定电子探测效率的情况下 **π 被误判为电子的比例**
- 粒子鉴别能力 **N_σ** (3 σ)与电子探测效率 **ϵ** (90%)和 π 被误判为电子的比例 **η** 关系为：

$$N_\sigma = \sqrt{2}[\text{erfc}^{-1}(2\eta) - \text{erfc}^{-1}(2\epsilon)] \quad \text{其中} \text{erfc}^{-1} \text{为互补误差函数的逆函数}$$

由此可以给出强子端TRD系统e/ π 鉴别需求为：在90%电子探测效率下 π 被误判率**4.28%**

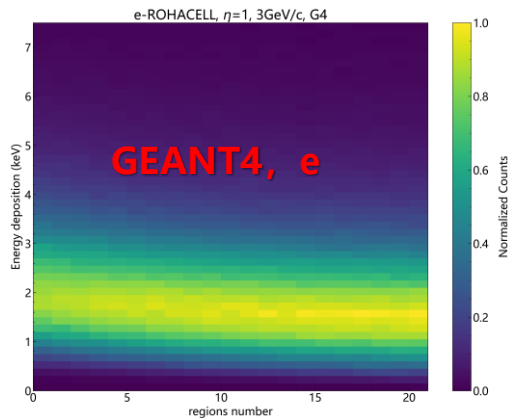


5GeV/c仅需三层即可达到鉴别要求
(π 误判率低至2.7%)

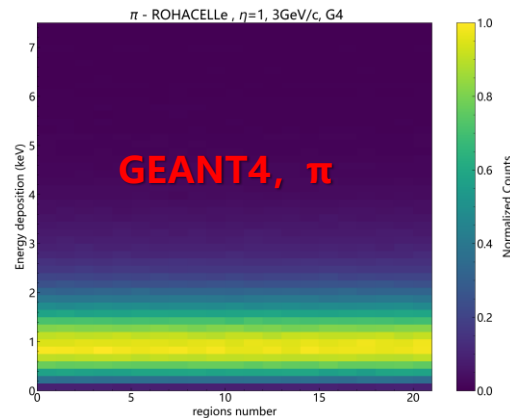


15GeV/c需四层即可达到鉴别要求
(π 误判率低至3.42%)

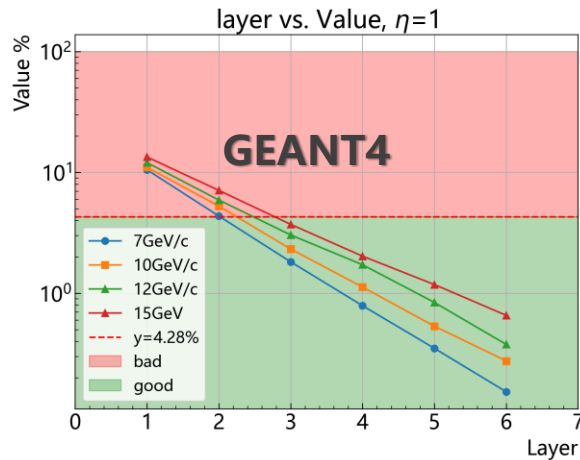
斜入射鉴别能力表现



强子端覆盖
 $\eta = 1 \sim 4$ 区域



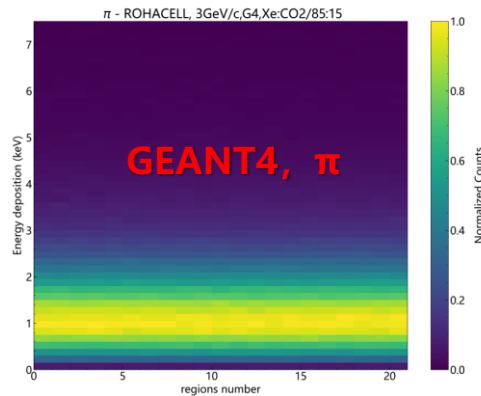
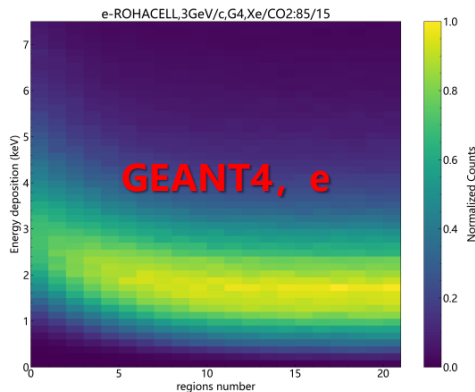
模拟显示当前方案在最大入射角
 $\eta=1$ 时, 只需要三层即可满足鉴
别要求 (π 误判率低至3.8%)



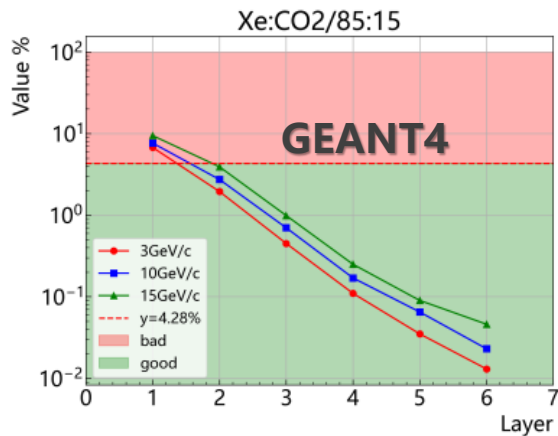
更换气体后鉴别能力表现



如果气体选用Xe:CO₂=85:15,鉴别能力显著提升



模拟显示, 15GeV/c需
两层即可达到鉴别要求
(π 误判率低至3.91%)



总结



- 介绍了基于 μ RGroove的TRD
 - μ RGroove的结构简单，可拓展性强，性能优异，适合做为大面积TRD的探测器
 - TRD的辐射体选择用4cm ROHACELL HF71泡沫，工作气体选择为4cm的添加猝灭气体的Xe气，探测器选择 μ RGroove，电子学选择用SAMPA
- 利用信号时间信息的二维能谱似然分布的方法提升了TRD的鉴别能力
 - 对实验数据分析当直入射时，5GeV/c的粒子仅需三层即可达到鉴别要求 (π 误判率低至2.7%)
 - 模拟显示15GeV/c需四层即可达到鉴别要求 (π 误判率低至3.42%)，而气体换为Xe:CO₂=85:15时，15GeV/c只需两层可以达到鉴别要求 (π 误判率低至3.91%)

谢谢！



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

Backup



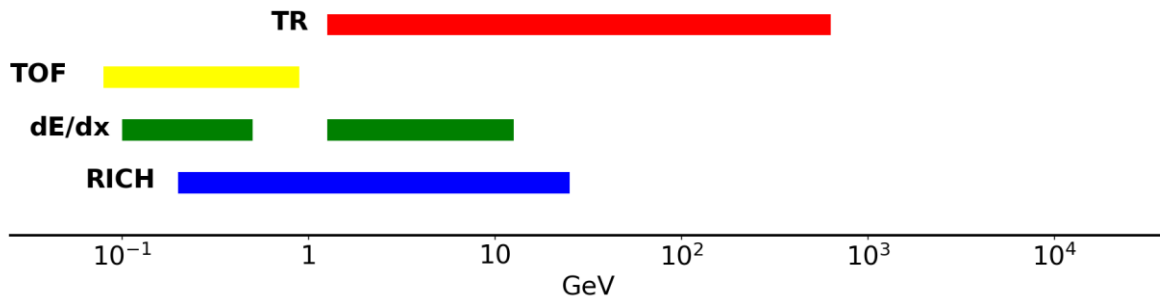
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



带电粒子鉴别的主要方法

粒子鉴别的方法:

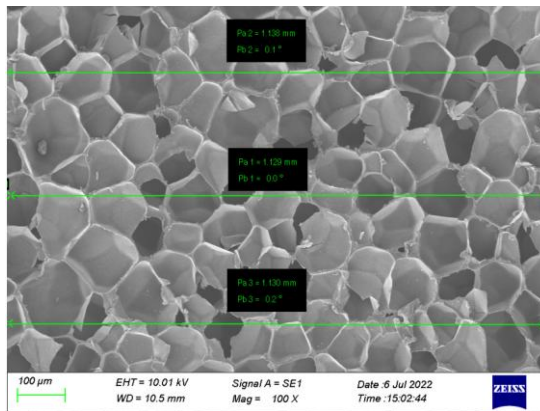
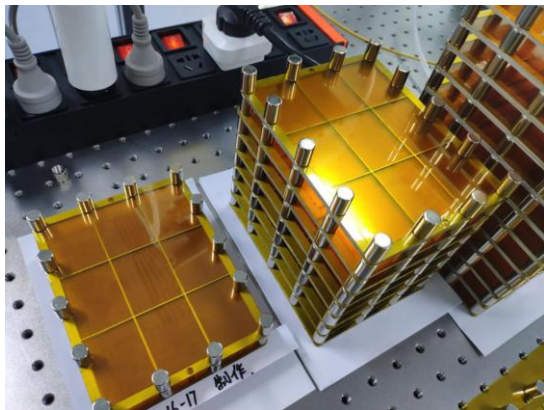
- dE/dx : $dE/dx \propto \ln(\beta^2\gamma^2)/\beta^2$
能损法(通常是测量气态介质中的能损);100MeV~1GeV
- TOF: $\Delta t = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right)$ (β)
直接测量粒子飞行时间与距离得出粒子的飞行速度, 结合径迹系统给出动量;2GeV以下
- 切伦科夫辐射: $\cos\theta_c(\lambda) = 1/[n(\lambda)\beta]$
探测切伦科夫光子如分阈式和测量切伦科夫角; HBD(阈式)、RICH(环形成像)、DIRC(内反射)等;
几GeV~百GeV
- 穿越辐射: $I = \frac{Z^2 e^2 \gamma \omega_p}{3c}$
探测穿越辐射光子 (TR) 极端相对论带电粒子鉴别的主要方法; 几GeV~1000GeV



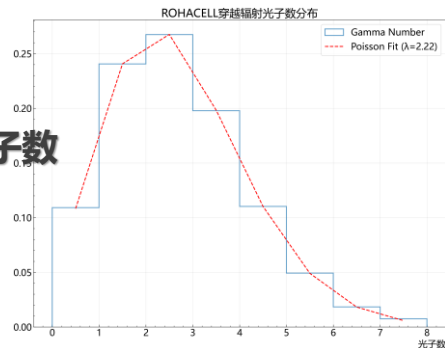
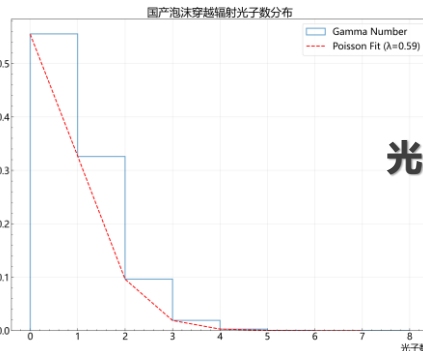
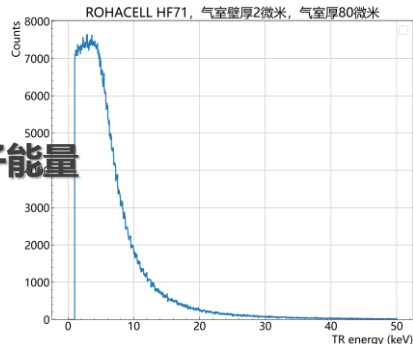
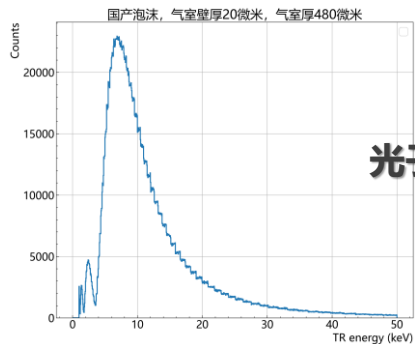
各个鉴别方法所覆盖的动量区间范围不同, 较于切伦科夫法(系统复杂, 高动量鉴别能力退化), 穿越辐射法(正比于 γ , 更高能区适用)更适用于EIC强子端(<15GeV/c)电子识别。

TRD—辐射体

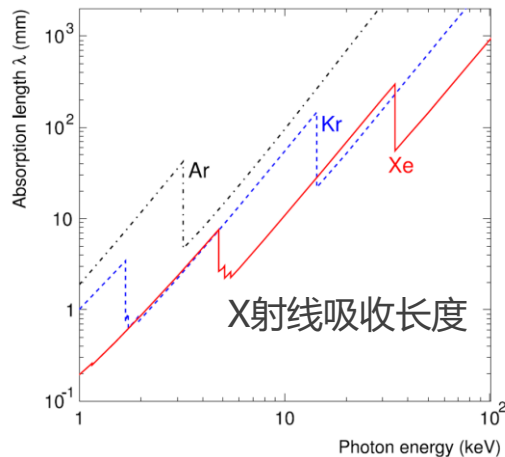
单层介质面产生的光子数约为 α ，需多界面的辐射体，，可选多层**规则薄膜**（规则可调）或**泡沫**（经济，安装简易，大面积更易制作）作为辐射体。



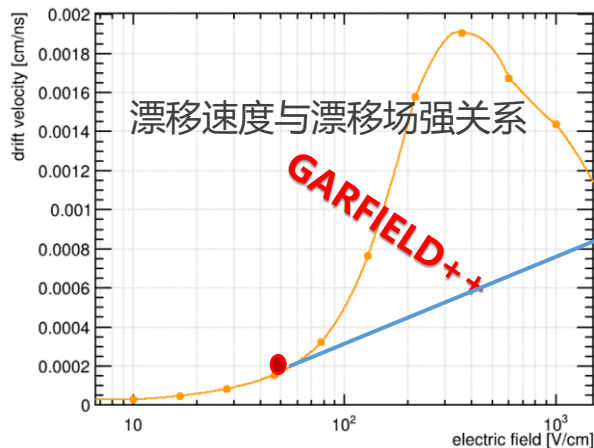
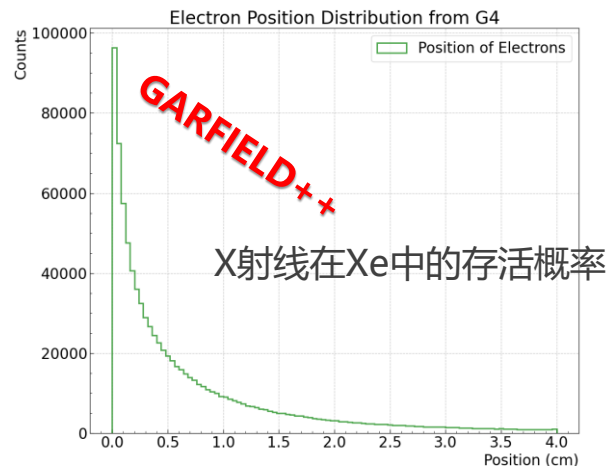
经济适用，大面积可选用泡沫，不同泡沫性能不同，geant4模拟确定最后参数为4cm ROHACELL HF71泡沫



TRD—气体及电子学适配



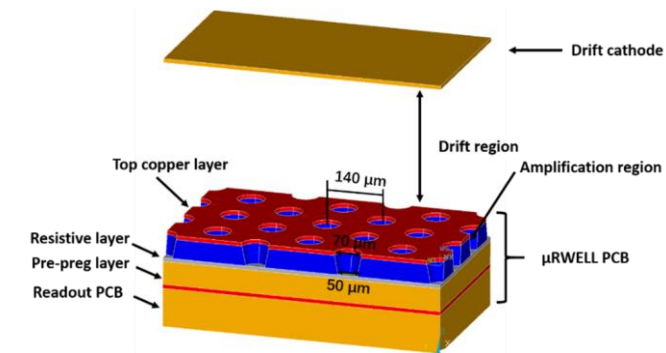
探测器工作气体选择需考虑X射线的吸收效率与整体空间配置，最终选用Xe作为主要介质，以及4cm厚度即可满足对X ($\sim 10\text{keV}$) 射线的全吸收



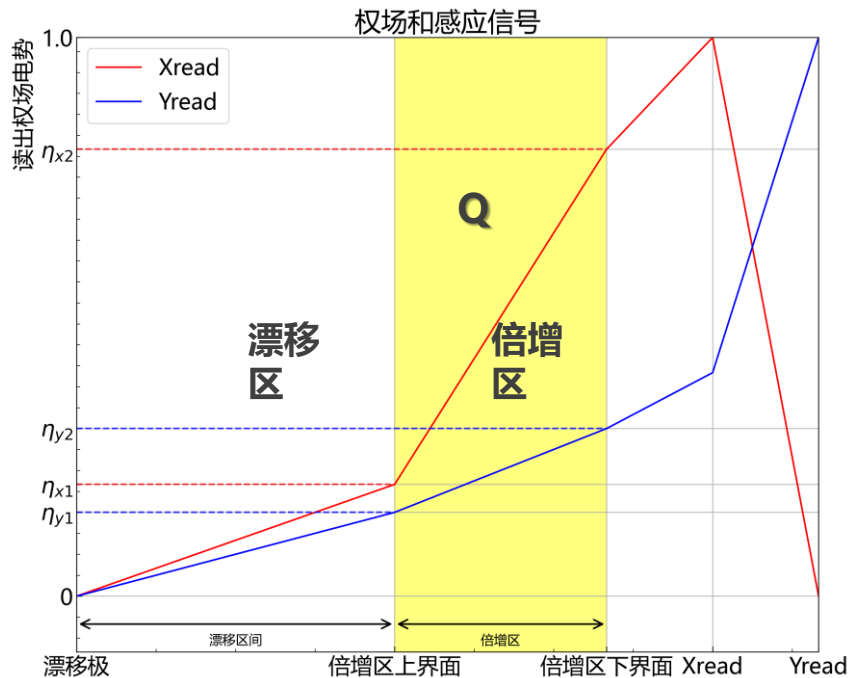
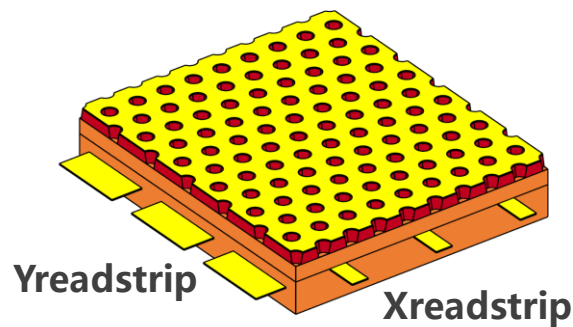
确定探测器内气体介质与空间配置后可对探测器适配电子学提出要求：
漂移场强度在 **500V/cm**，对于 4cm 的Xe气体厚度漂移时间 $\sim 2\mu\text{s}$ 电子学波形采样的时间需要超过 **2μs**
此外还需合适的成形时间；足够宽的动态范围；足够高的采样率

二维条读出感应信号共享效应

典型的二维读出权场分配，两个维度的读出电极位于倍增区同一侧，导致两个维度的读出条共享权场现象。



μRWELL

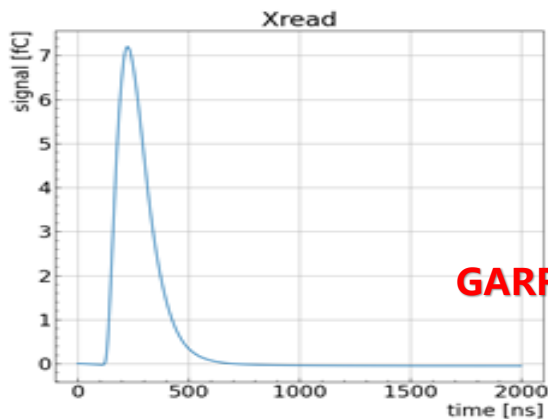
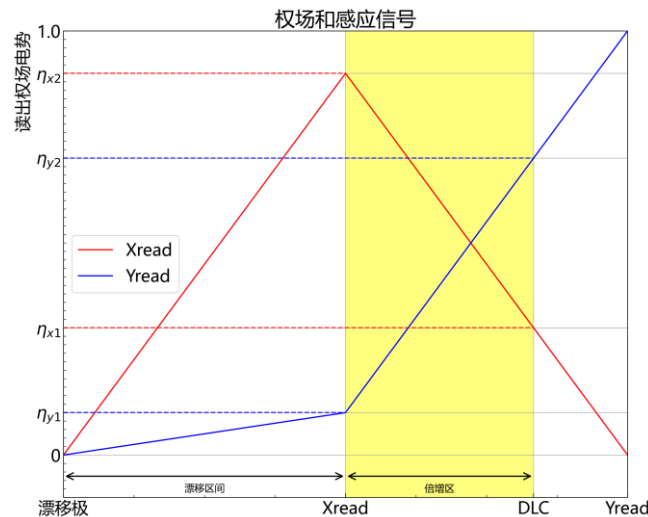


$$X: (\eta_{x2} - \eta_{x1})Q \quad Y: (\eta_{y2} - \eta_{y1})Q$$

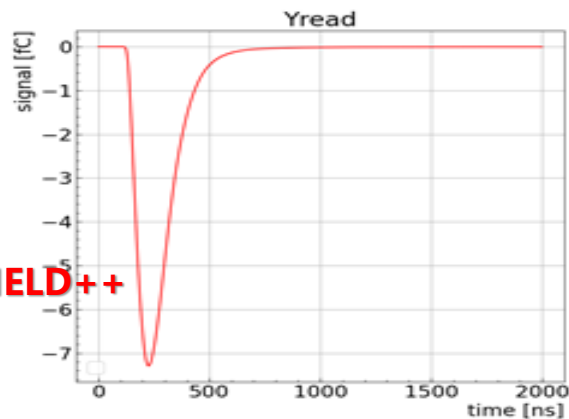
μ RGroove权场分布



改进后的两个维度读出权场分布以及对应的信号大小比对



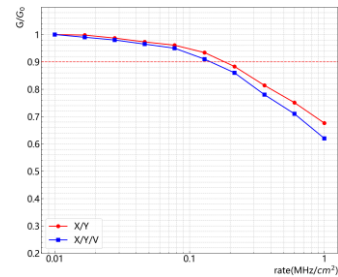
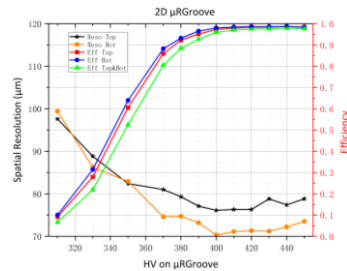
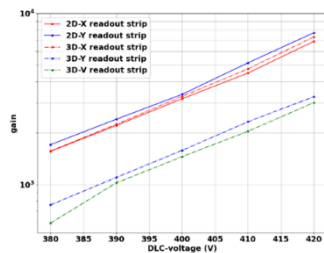
GARFIELD++



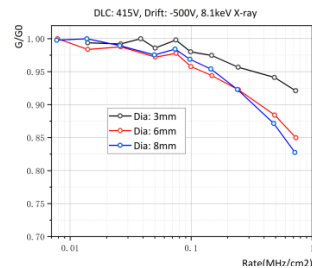
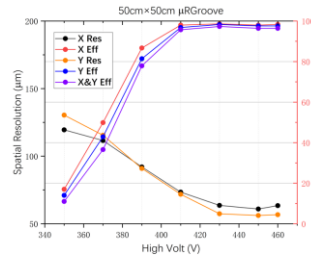
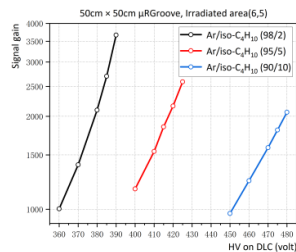
μ RGroove性能



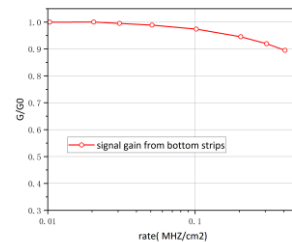
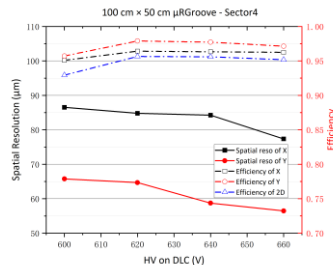
(10cm × 10cm)
小面积样机



(50cm × 50cm)
大面积样机



(100cm × 50cm)
大面积样机



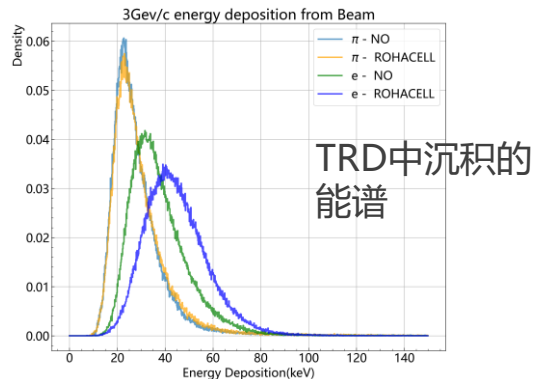
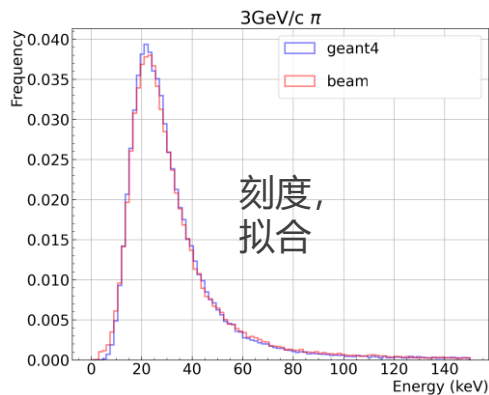
增益

位置分辨

计数率能力



性能评估-一维似然分布



- 评估方法：**似然法**(Likelihood method), 将单层TRD的电子和 π 能谱作为概率分布来构造电子的归一化似然函数; 若用到多 (n) 层TRD, 有

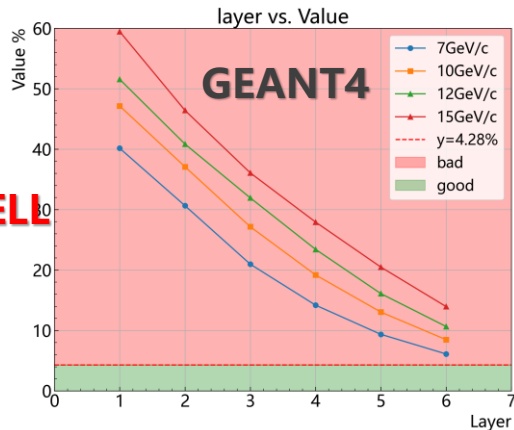
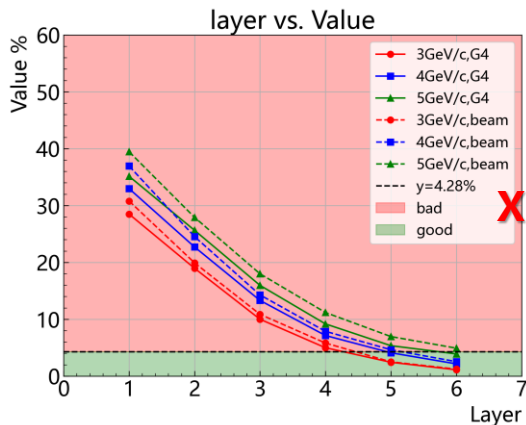
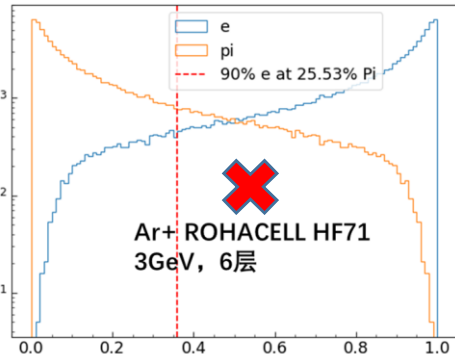
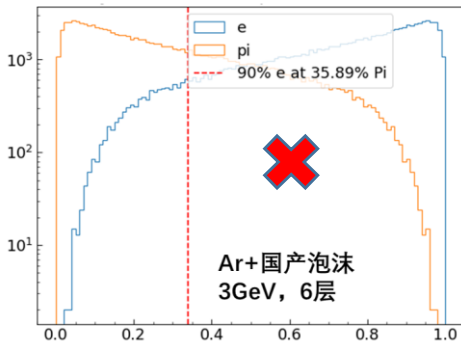
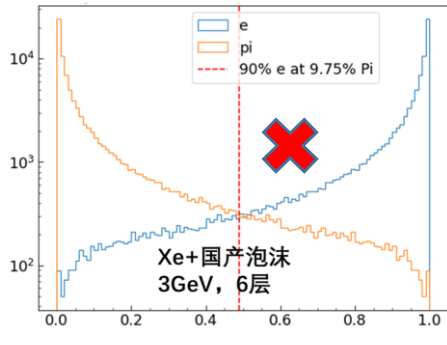
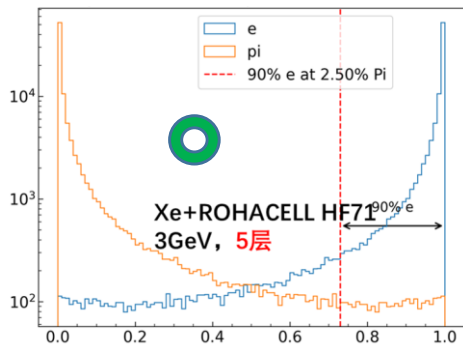
$$likelihood = \frac{L_e}{L_e + L_\pi}, \quad L_e = \prod_{i=1}^n P(E_i|e), \quad L_\pi = \prod_{i=1}^n P(E_i|\pi)$$

- TRD的 **e/π 鉴别能力**可量化为在给定电子探测效率的情况下 **π 被误判为电子的比例**
- 粒子鉴别能力 **N_σ** (3 σ)与电子探测效率 **ϵ** (90%)和 π 被误判为电子的比例 **η** 关系为:

$$N_\sigma = \sqrt{2}[\text{erfc}^{-1}(2\eta) - \text{erfc}^{-1}(2\epsilon)] \quad \text{其中} \text{erfc}^{-1} \text{为互补误差函数的逆函数}$$

由此可以给出强子端TRD系统 e/π 鉴别需求为: 在90%电子探测效率下 π 被误判率**4.28%**

结果

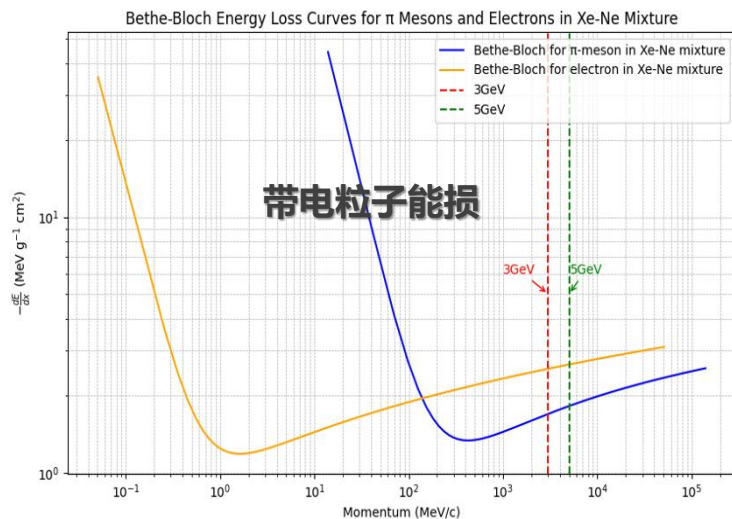


实验与模拟结果表明：
5GeV/c, 六层已不满足鉴别需求（实验
结果显示误判率为**4.91%**）

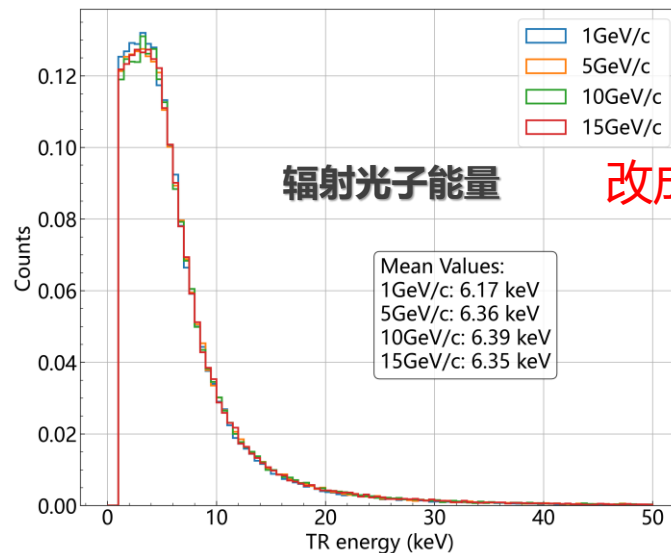
模拟中更高动量区间，均不达标



一维能谱似然法局限



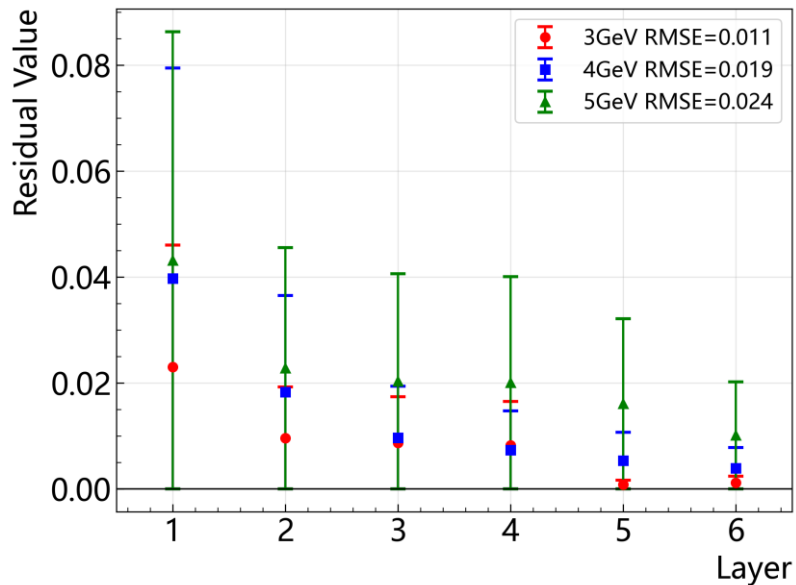
随着动量增加，电子e与强子 π 电离能损差异性变弱



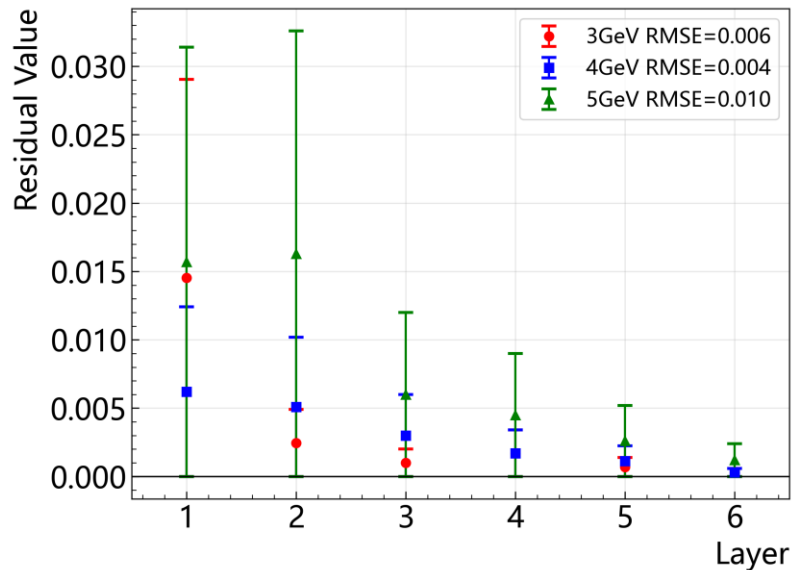
目标动量区间内的电子e在穿过辐射体后产生的TR光子能量已趋于饱和

一维能谱仅依赖总能量沉积（包含带电粒子自身电离能损与TR光子能损）的统计特征，无法区分电子穿越辐射光子与粒子自身电离的贡献，导致高动量下鉴别能力退化

模拟与beam误差分析



一维结果误差分析



二维结果误差分析



- 结合二维似然的分析方法来进一步的优化TRD原理样机参数，包括探测器结构参数，辐射体本征参数，气体比份（如模拟显示更高比份的Xe探测器鉴别能力更优）
- 二维似然的方法高度依赖于电子学参数（采样时间间隔，成型时间），优化电子学亦是提升探测器鉴别能力的方向之一
- 在 TRD本身可作为径迹探测器，结合束流中 Tracker 系统提供的径迹信息可以实现类似 TPC 工作模式的研究；
- 结合 ECAL 探测器开发专门算法，实现径迹与粒子鉴别结合，进一步提升电子识别能力。