



超级陶粲装置
Super Tau-Charm Facility

STCF ECAL 研究进展

张云龙

核探测与核电子学国家重点实验室

中国科学技术大学

代表STCF ECAL合作组

2025年超级陶粲装置研讨会 湘潭

2025年7月2日-5日



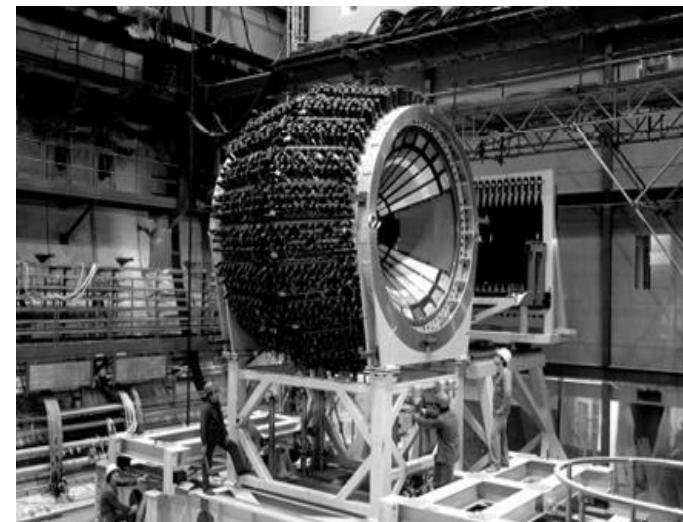
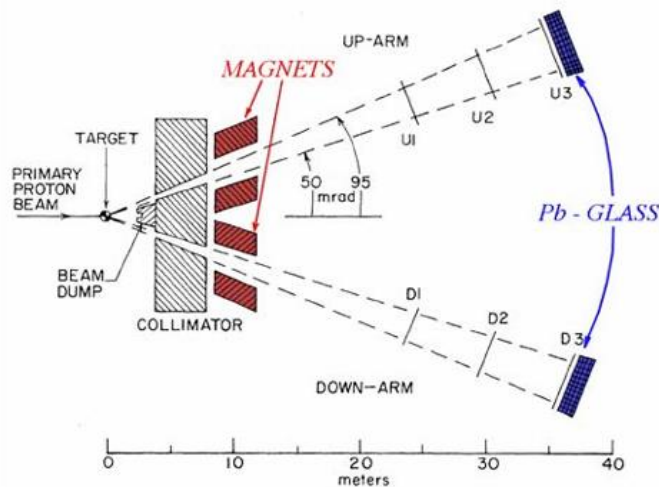
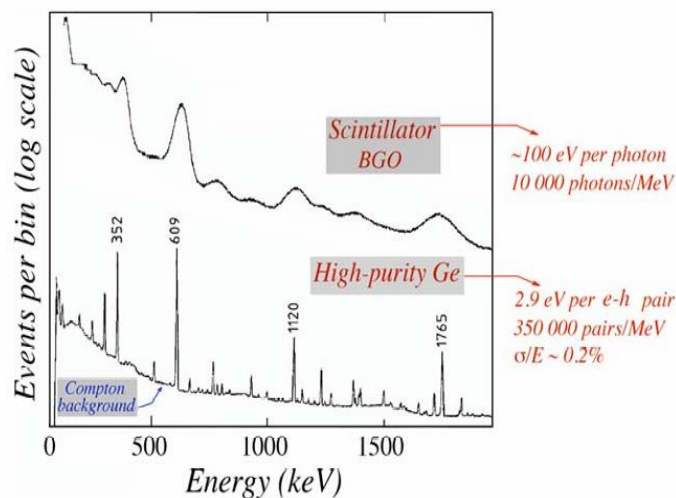
报告提纲

- 量能器
- STCF量能器回顾
- 研究进展
- 总结



量能器的历史

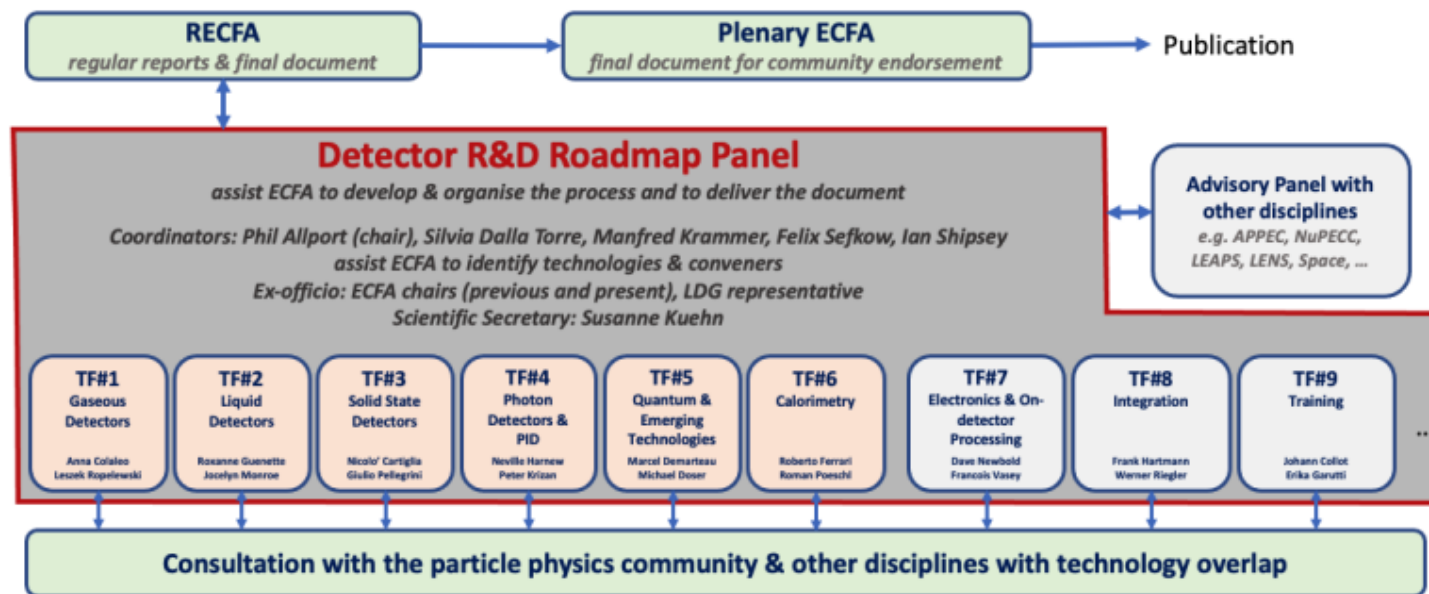
- 1950s, 闪烁晶体在核物理实验中用于伽马能谱测量
- ~1970, 量能器开始应用于粒子物理实验, 用于测量中性粒子, 作为shower counter
- 1980, 量能器在对撞实验谱仪中扮演了重要的功能, 分成电磁量能器和强子量能器



Fermilab E-70实验

CERN UA2实验

量能器技术前沿



先进量能器技术

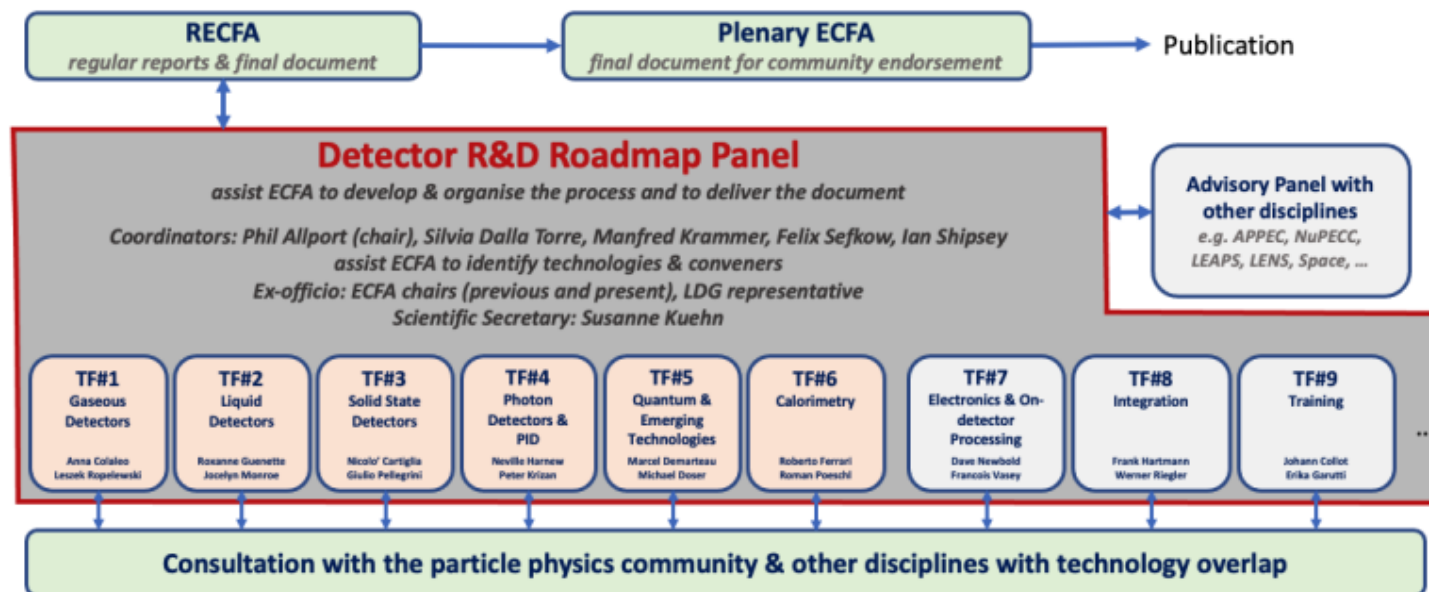
方向1:
读出电子学全嵌入式
“三明治”结构量能器

方向2:
液化惰性气体量能器

方向3:
闪烁体量能器



量能器技术前沿



先进量能器技术

方向1:
读出电子学全嵌入式
“三明治”结构量能器

方向2:
液化惰性气体量能器

方向3:
闪烁体量能器



下一代高亮度实验晶体量能器的选择

- 下一代晶体量能器
 - 要求晶体具有更快的发光衰减时间
 - 更高的抗辐照能力

Crystal	Pure Csl	LYSO	GSO	YAP	PWO	BaF:Y
Density (g/cm ³)	4.51	7.40	6.71	5.37	8.30	4.89
Melting Point (°C)	621	2050	1950	1872	1123	1280
Radiation Length (cm)	1.86	1.14	1.38	2.70	0.89	2.03
Moliere Radius (cm)	3.57	2.07	2.23	4.50	2.00	3.10
Refractive index	1.95	1.82	1.85	1.95	2.20	1.50
Hygroscopicity	Slight	No	No	No	No	No
Luminescence (nm)	310	402	430	370	425 420	300 220
Decay time (ns)	30 6	40	60	30	30 10	600 1.2
Light yield (%)	3.6 1.1	85	20	65	0.3 0.1	1.7 4.8
Dose rate dependent	No	No	TBA	TBA	Yes	No
D(LY)/dT (%/°C)	-1.4	-0.2	-0.4	TBA	-2.5	TBA
Experiment	KTeV Mu2e				CMS ALICE PANDA	
单价	0.5	4	-	-	1 (参考)	1.3

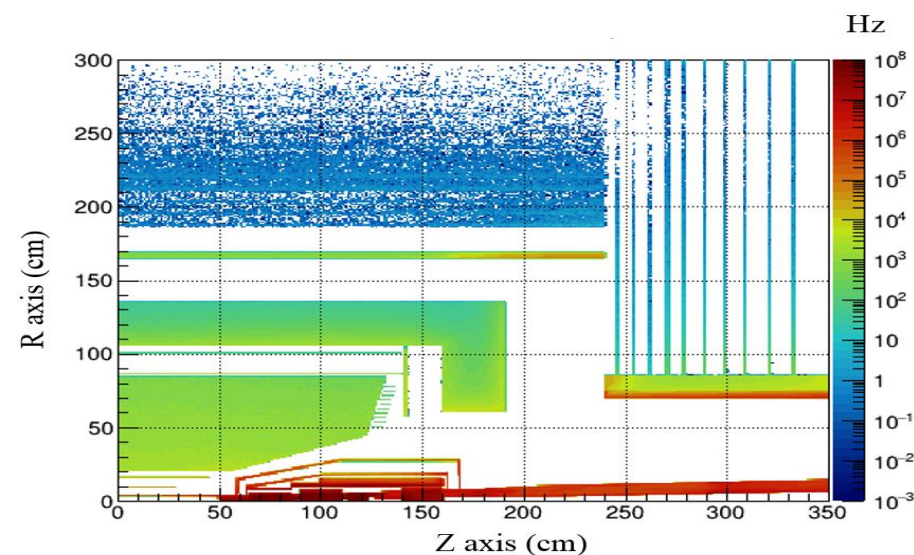
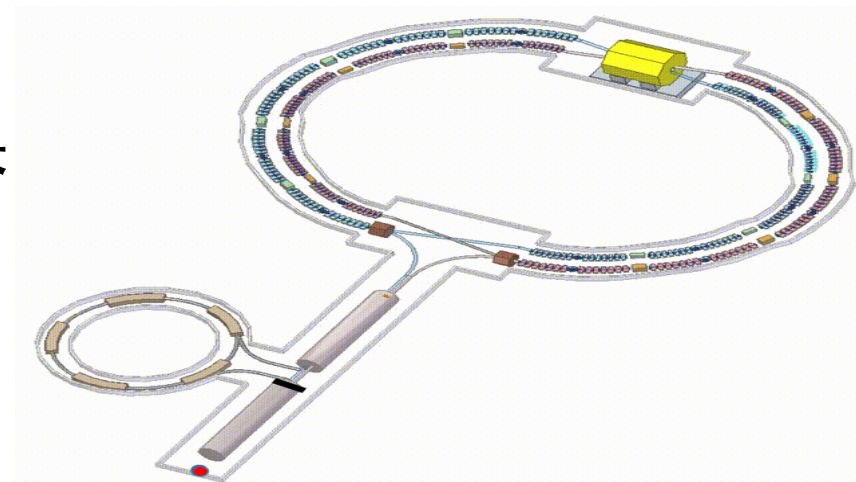


超级陶粲装置 (STCF)

Super Tau-Charm Facility

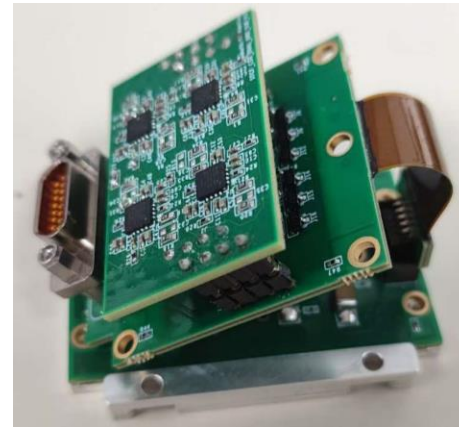
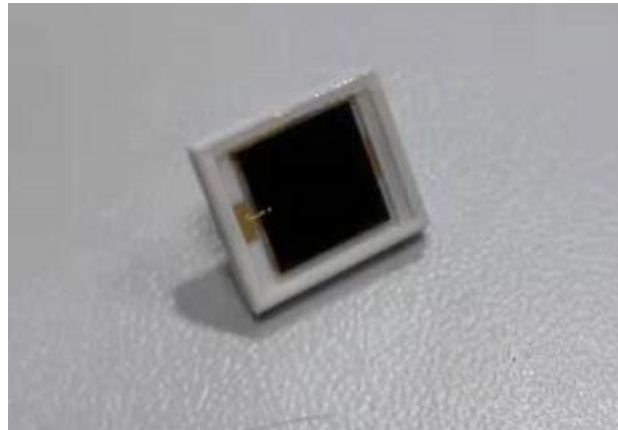
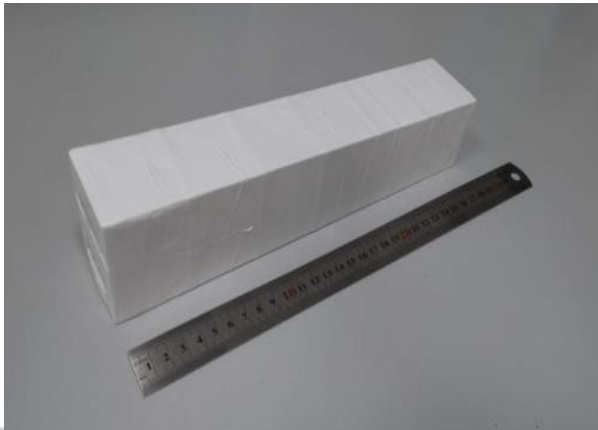
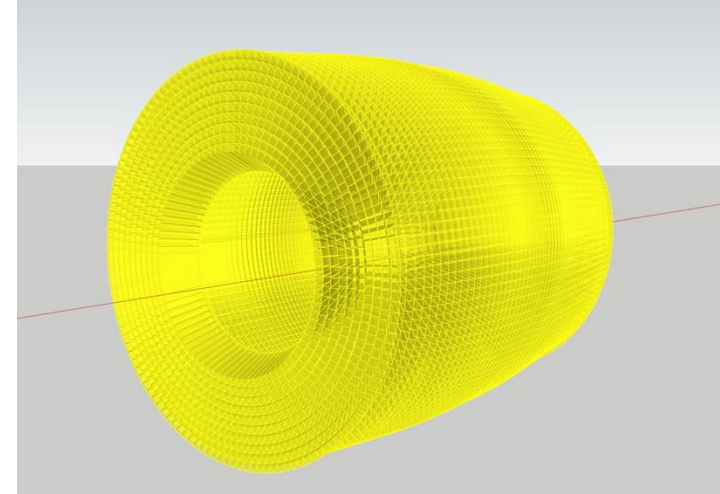
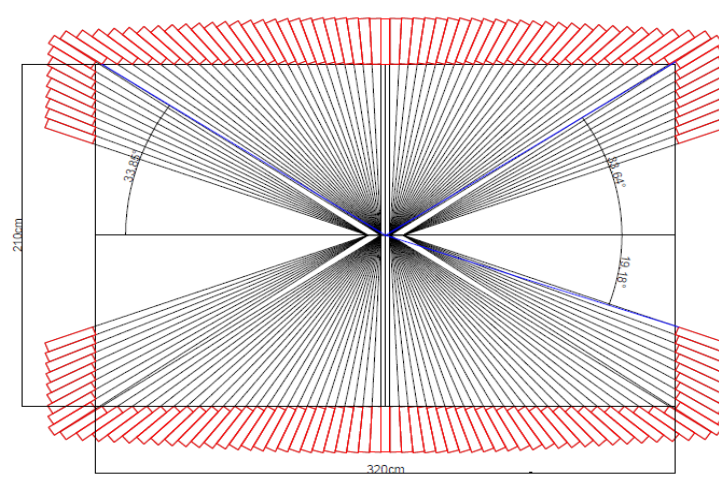
- ◆ 对称型双环对撞机： 注入器~300米，对撞主环~800米
- ◆ 质心能量： 2-7 GeV,
亮度： $> 0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ @ 4 GeV
- ◆ 具有进一步提升亮度和实现极化束流的潜力

- High Event Rate: ~ MHz background event rate
- Precise Energy Resolution: $< 2.5\%$ @ 1GeV
- Good Position Resolution: ~ 5 mm @ 1GeV
- Good Time Resolution: 300 ps @ 1 GeV



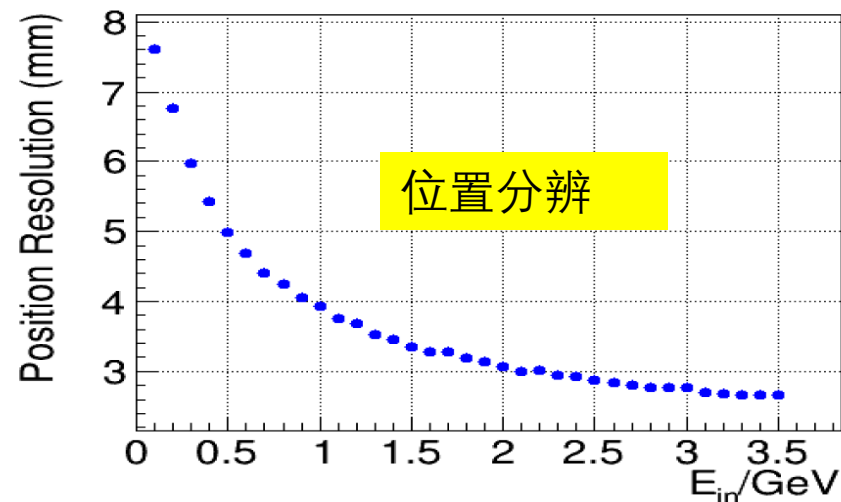
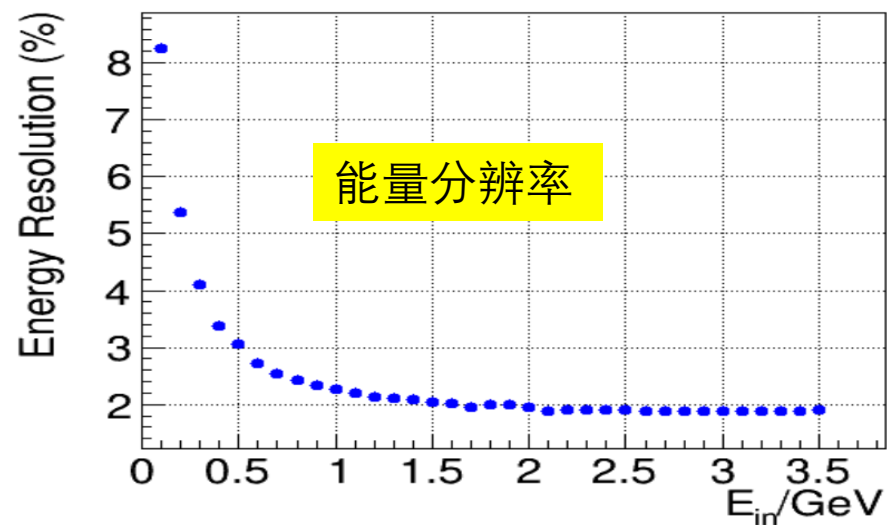
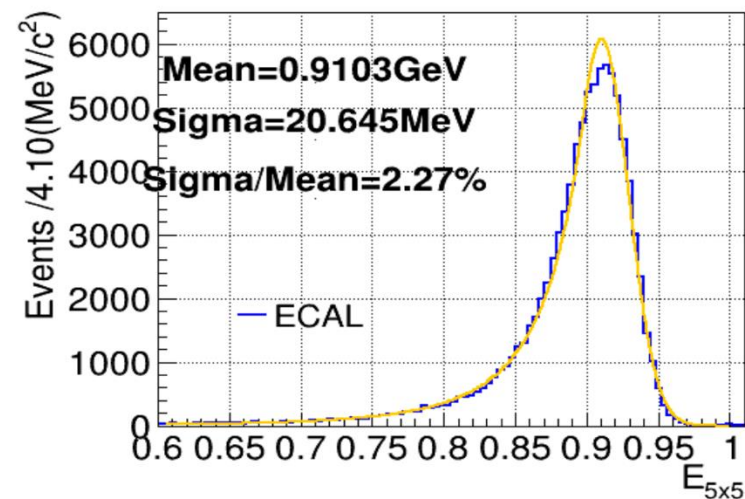
电磁量能器回顾

- 纯碘化铯晶体
 - 晶体数: 8670
- 雪崩光二极管
 - 大面积阵列拼装
- 电荷灵敏方案, 波形采样读出



电磁量能器性能模拟研究

- 能量分辨率 $\sim 2.5\%$ @ 1 GeV
- 位置分辨 ~ 5 mm @ 1 GeV

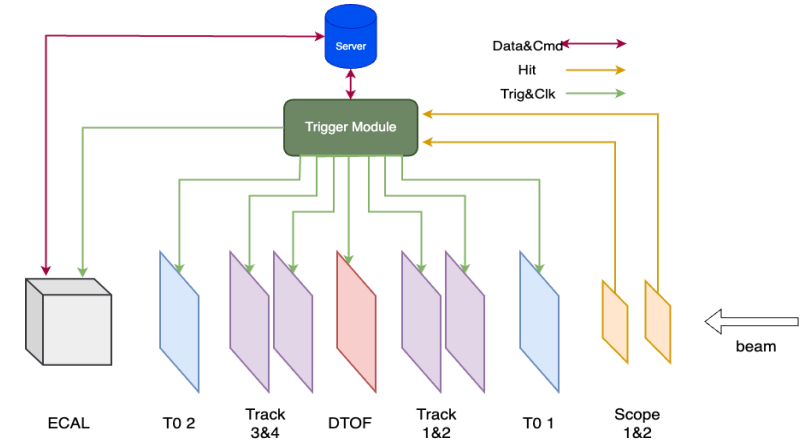


束流测试

● 束流测试

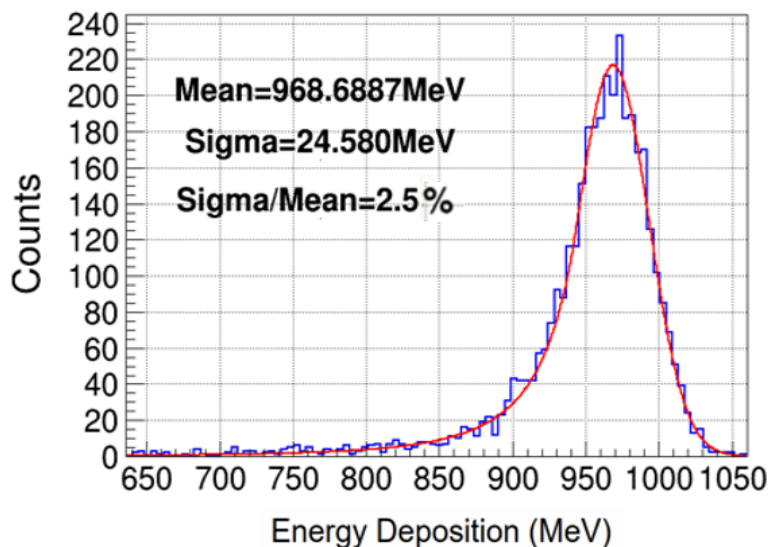
- CERN PS T09 beam line
- Multi-system beam test
 - T0 Detector
 - Track Detector
 - PID Detector——DTOF
 - ECAL
- Beam particle and momentum

Particle	Momentum
μ^+	$\sim 5 \text{ GeV/c}$
e^+	$0.5\text{-}5 \text{ GeV/c}$
$hadron^+$	$1\text{-}5 \text{ GeV/c}$

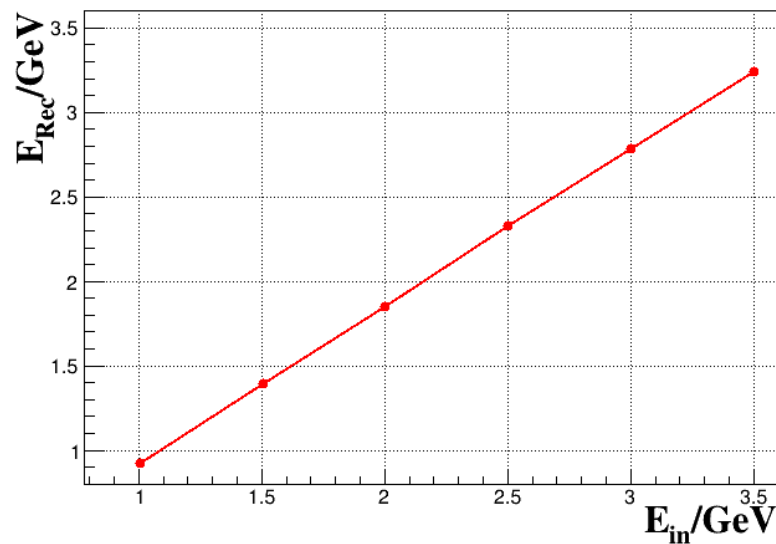


对电子的响应—能量重建

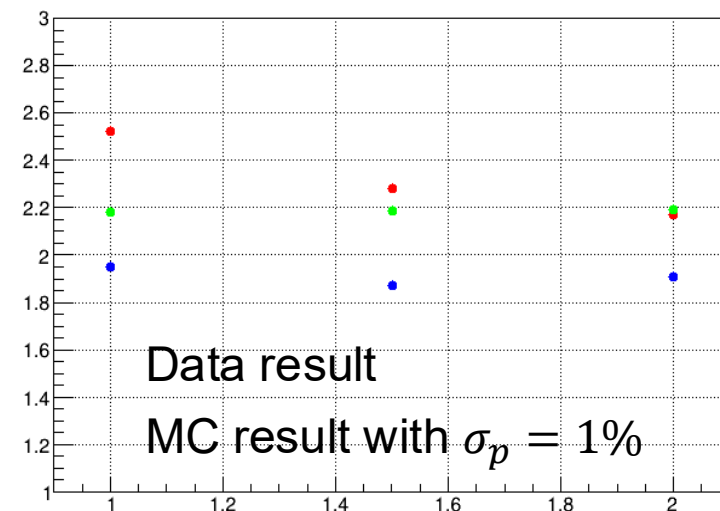
- 1 – 3.5 GeV电子
- 能量分辨率 $\sim 2.5\%$ @ 1 GeV
- 能量分辨率曲线比MC略差
 - 没有考虑束线上的物质质量及束流能散



Energy spectrum of 1 GeV e^+



Energy linearity

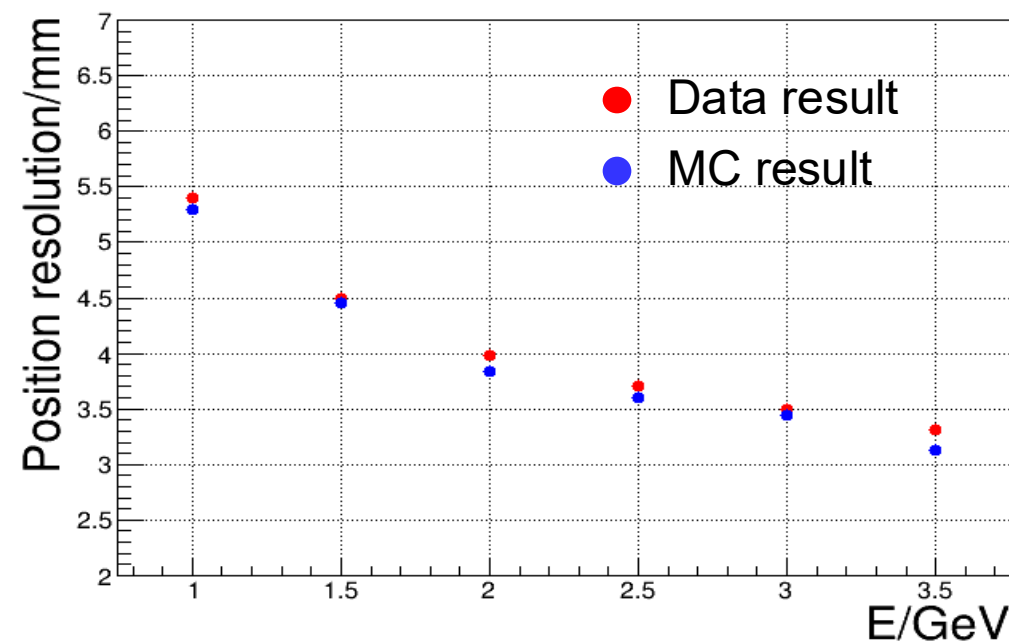
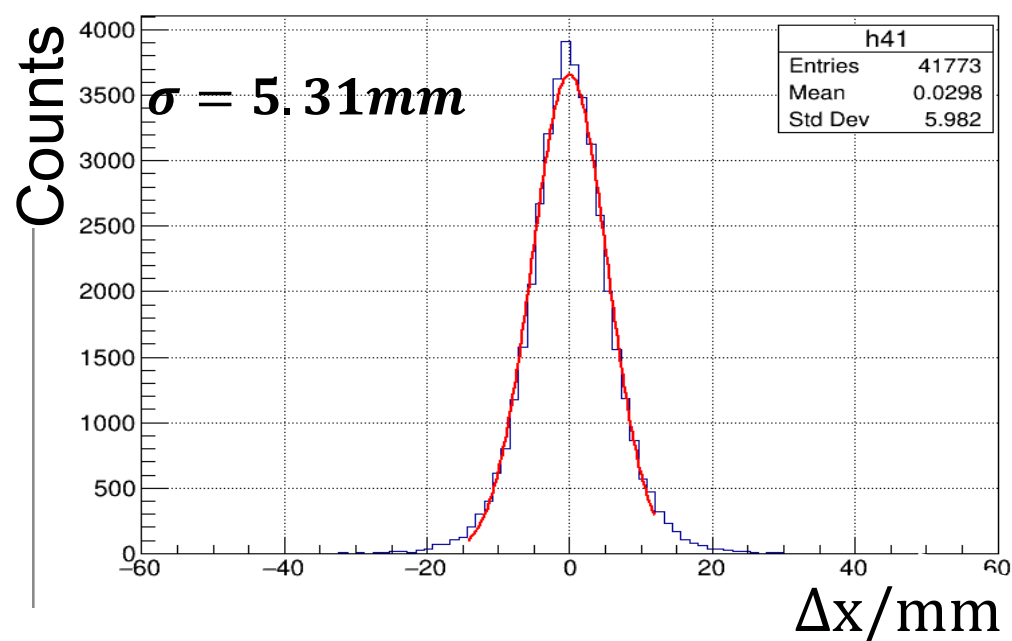


Energy resolution vs. Energy



对电子的响应—位置重建

- 利用束线上径迹探测器的信息，进行ECAL位置分辨的研究
- 1 GeV e^- 位置分辨 $\sim 5.3\text{mm}$ ($\Delta_x = x_{ECAL_rec} - x_{incident}$)
- 模拟与测试结果基本一致

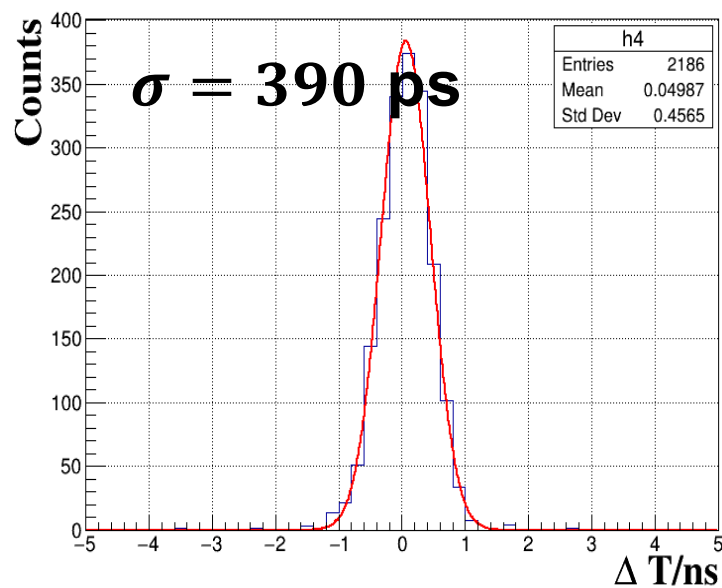


Position resolution vs. Energy

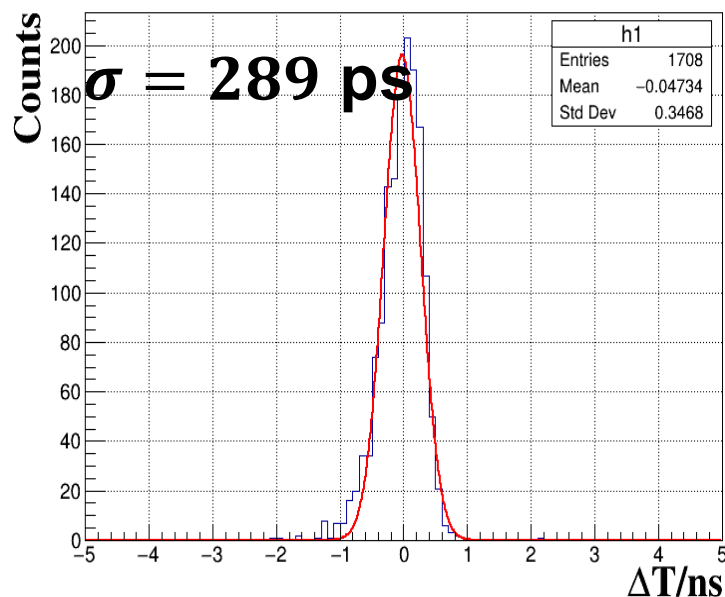
Position reconstruction results of 1 GeV e^+

对电子的响应—时间分辨

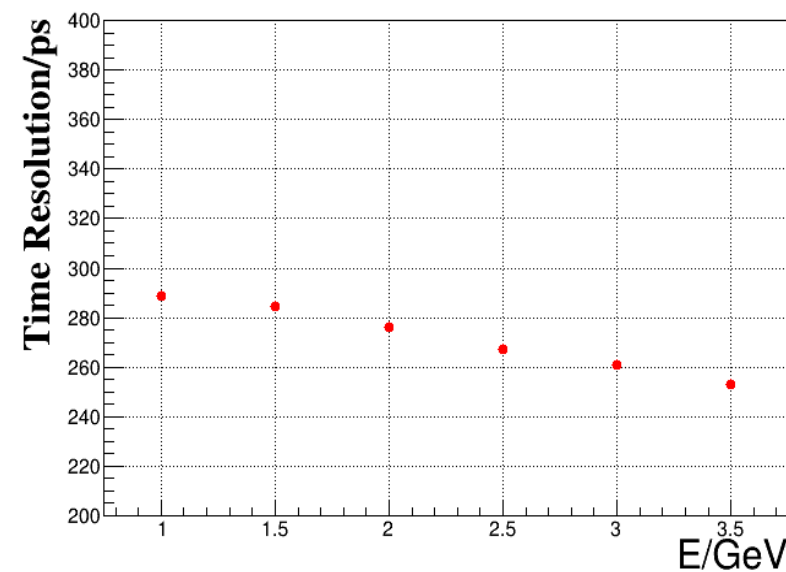
- 利用束线上的T0探测器（时间分辨45 ps）进行时间测量
- Muon (~180 MeV能量沉积), $\sigma_t \sim 390$ ps
- 1 GeV 电子, $\sigma_t \sim 290$ ps
 - 发现簇射起始点位置与时间重建的关系，后期还可以进一步修正



Time reconstruction results of MIPs

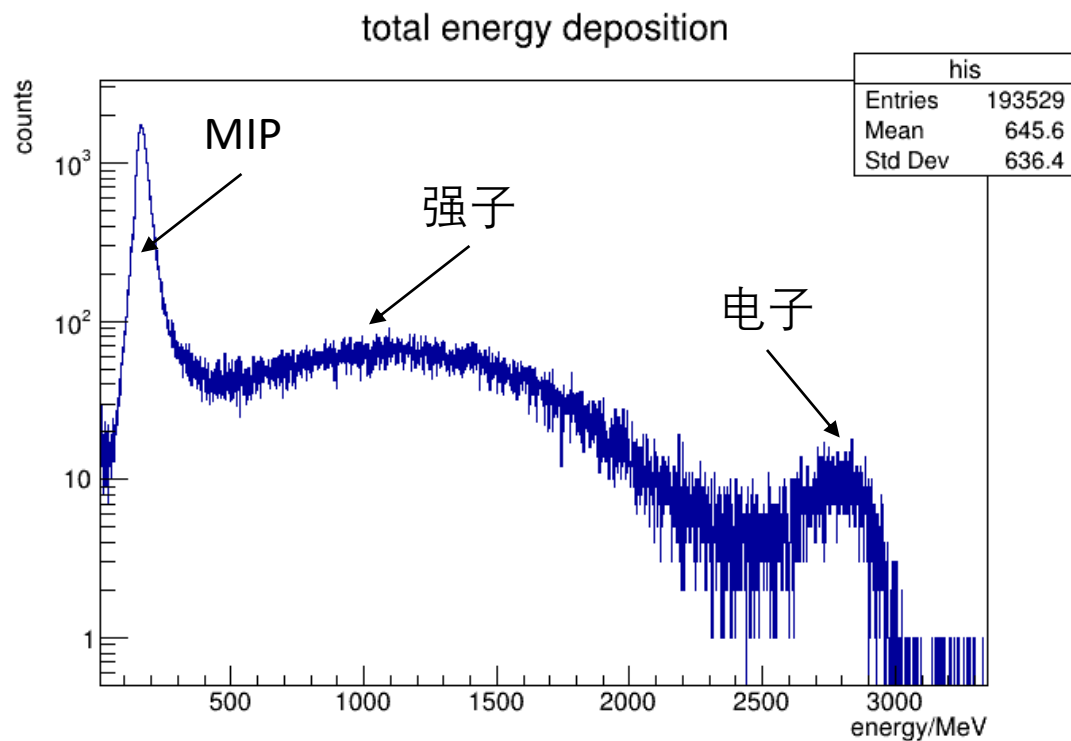


Time reconstruction results of 1 GeV e^+

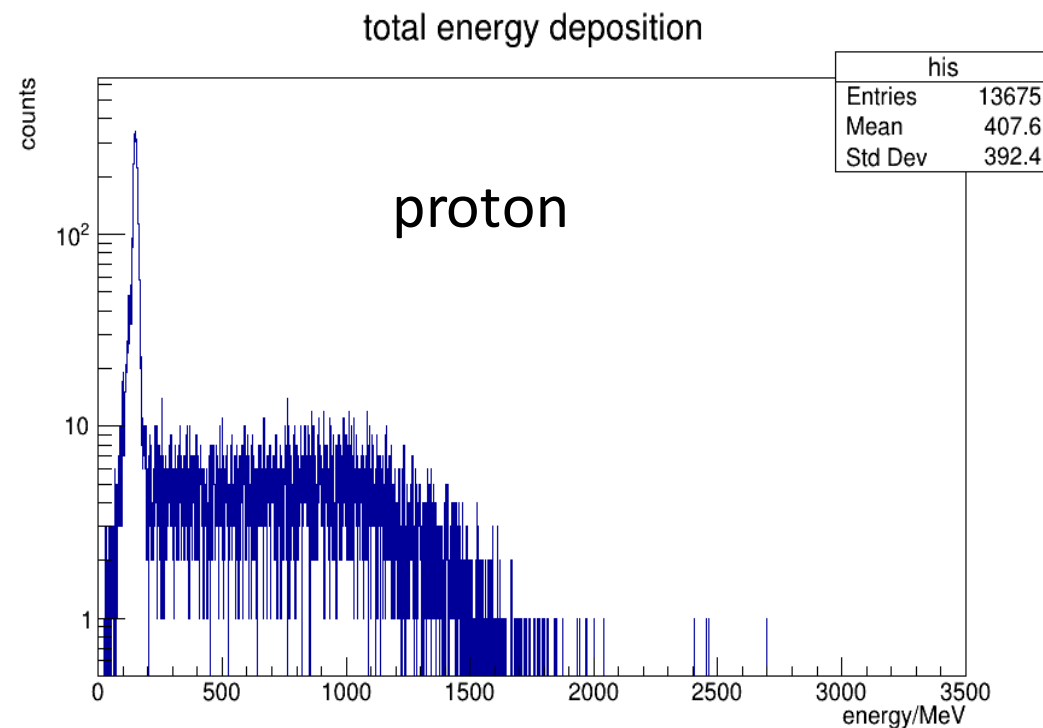


研究进展I—对强子的响应

- 3 GeV/c 强子束
 - PID探测器筛选质子



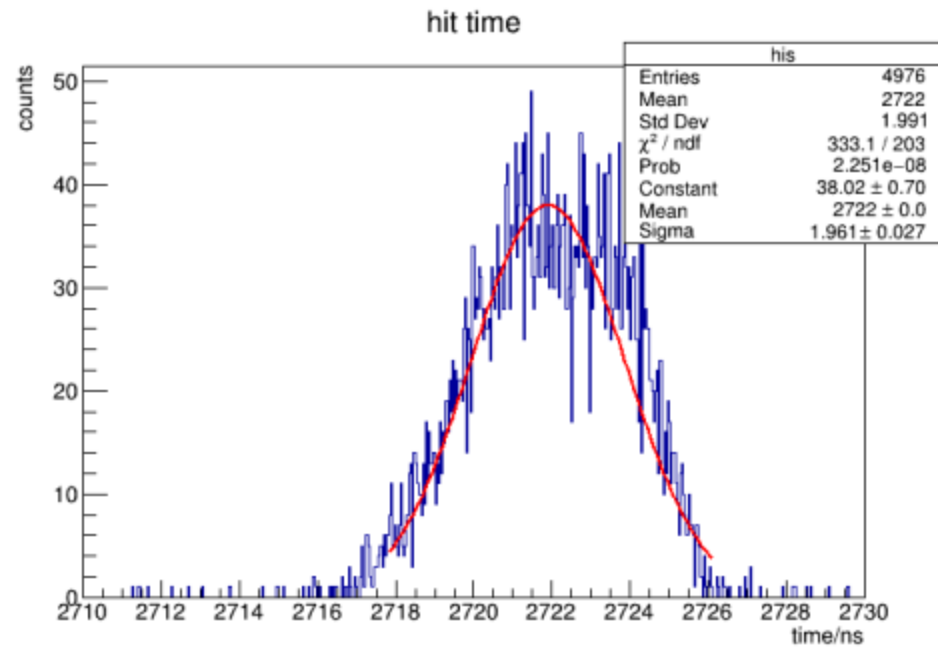
3 GeV hadron⁺能量沉积谱



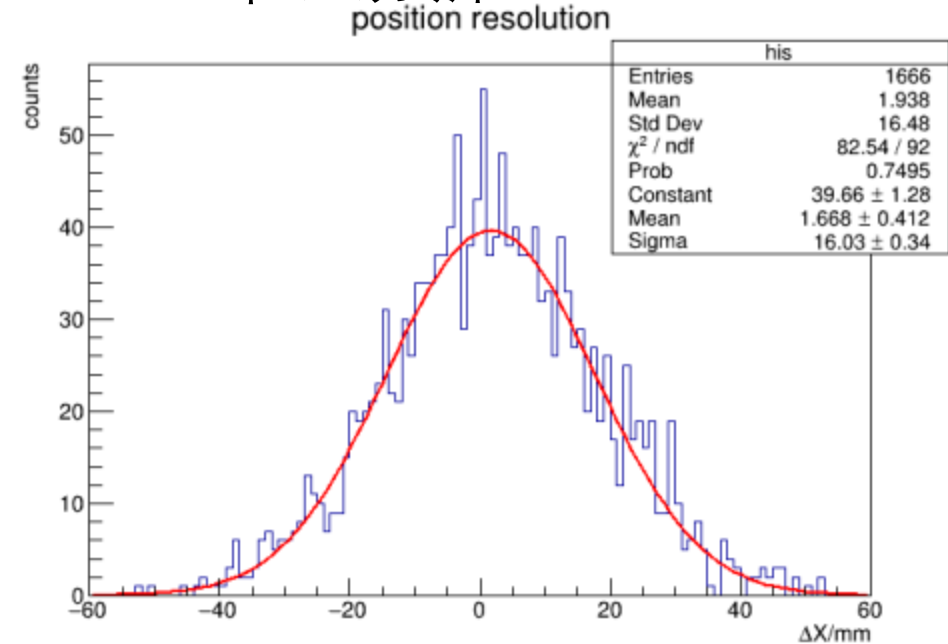
飞行时间筛选出质子能谱

研究进展I—对强子的响应

时间分辨: 1.96 ns



位置分辨: 16 mm

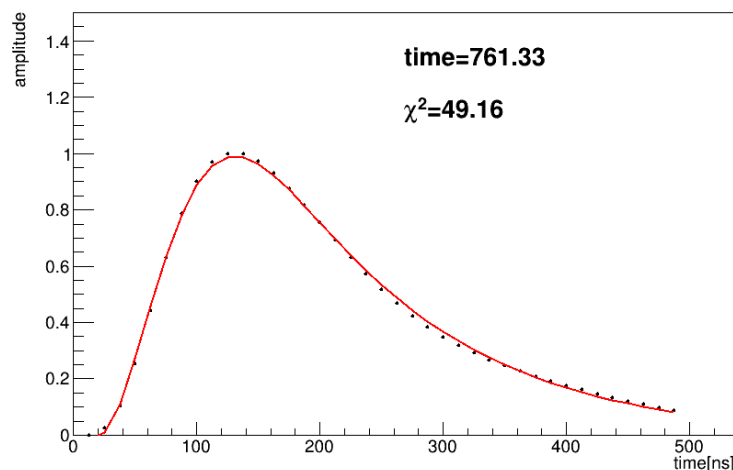


研究进展II—时间性能分析

- 通过对波形进行拟合，得到波形的起始时刻
- 发现不同种类粒子的波形存在一定偏差
- 采用同一个模版进行波形拟合，会造成结果偏差

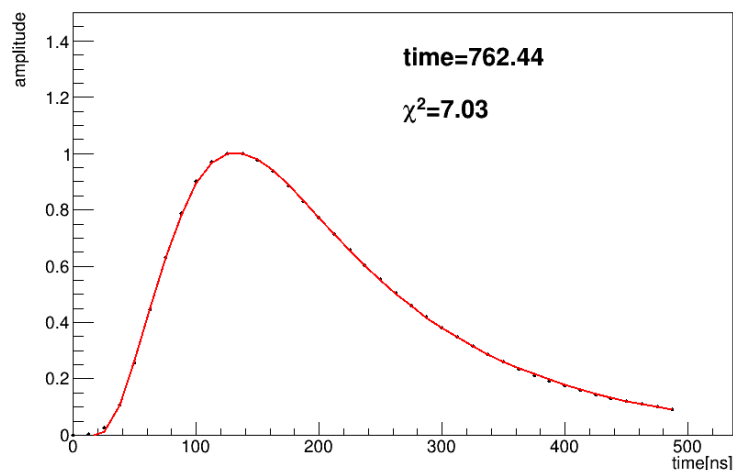
$$f(t) = \begin{cases} \left\{ \sum_{i=0}^5 A_i e^{-\frac{t-T_0}{\tau_i}} \right\} \cdot (t-T_0)^k + ped & t \geq T_0 \\ ped & t < T_0 \end{cases}$$

averaged waveforms



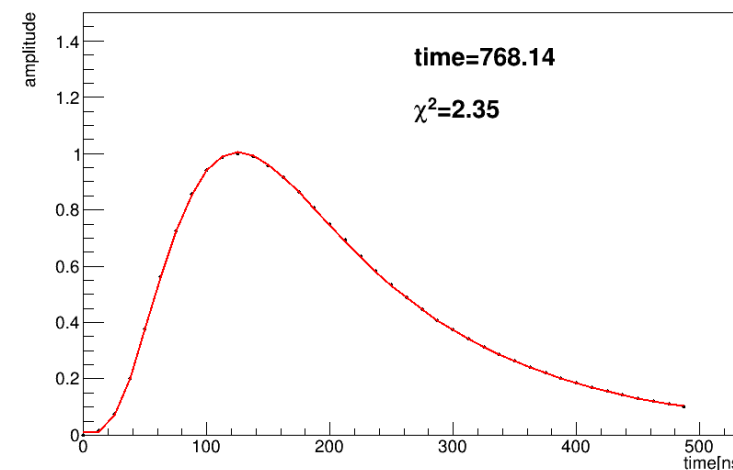
MIP平均波形拟合

averaged waveforms



电磁簇射平均波形拟合

averaged waveforms

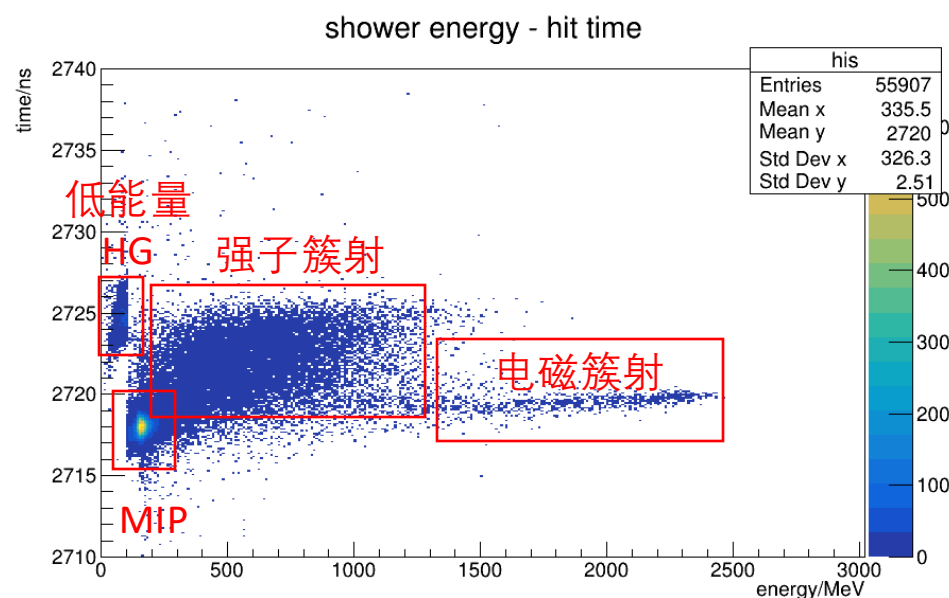


强子簇射平均波形拟合

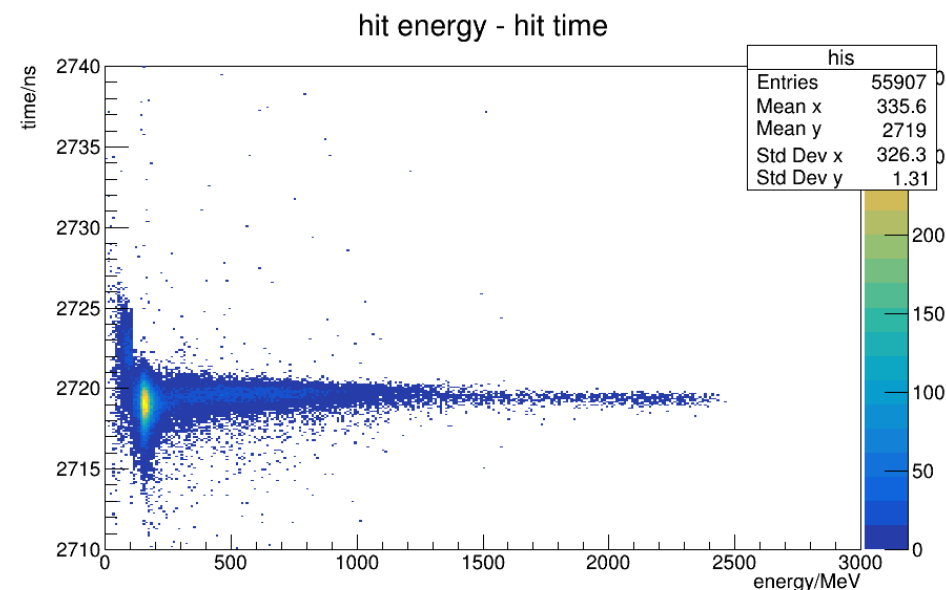


研究进展II—时间性能分析

- “放开”拟合模版的参数，使其可以适应不同波形的差异
- 强子的时间离散度显著降低



固定模板



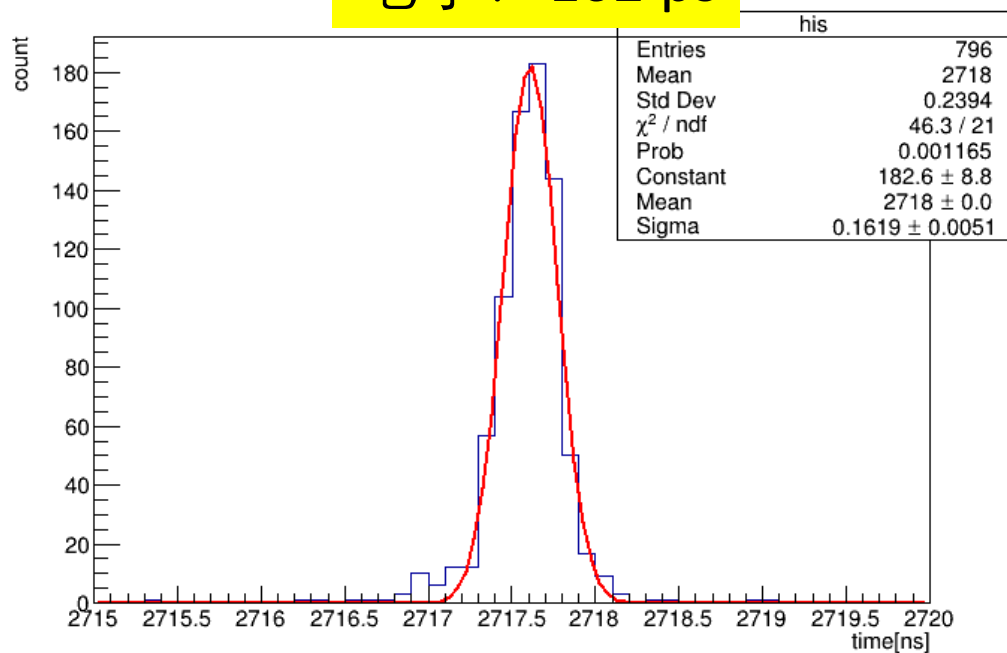
不固定模板



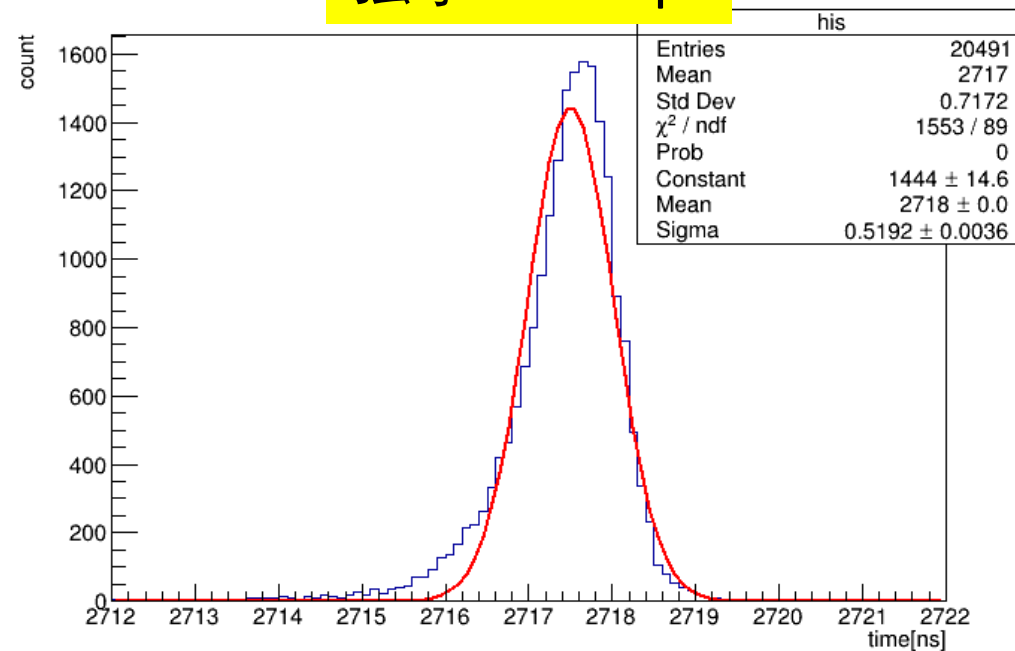
研究进展II—时间性能分析

- 电子的时间分辨从260 ps改善为162 ps
- 强子从1960 ps 改善为519 ps

电子: 162 ps

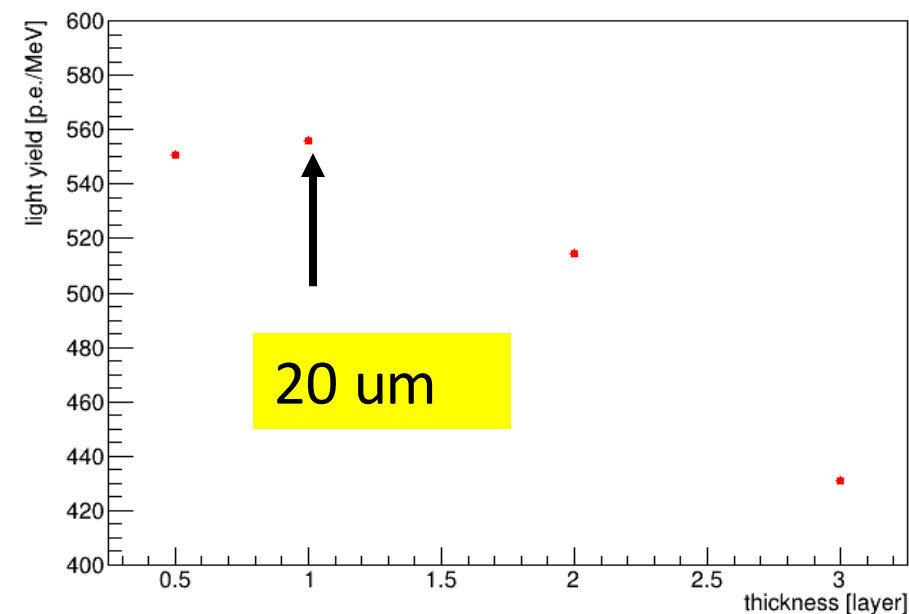
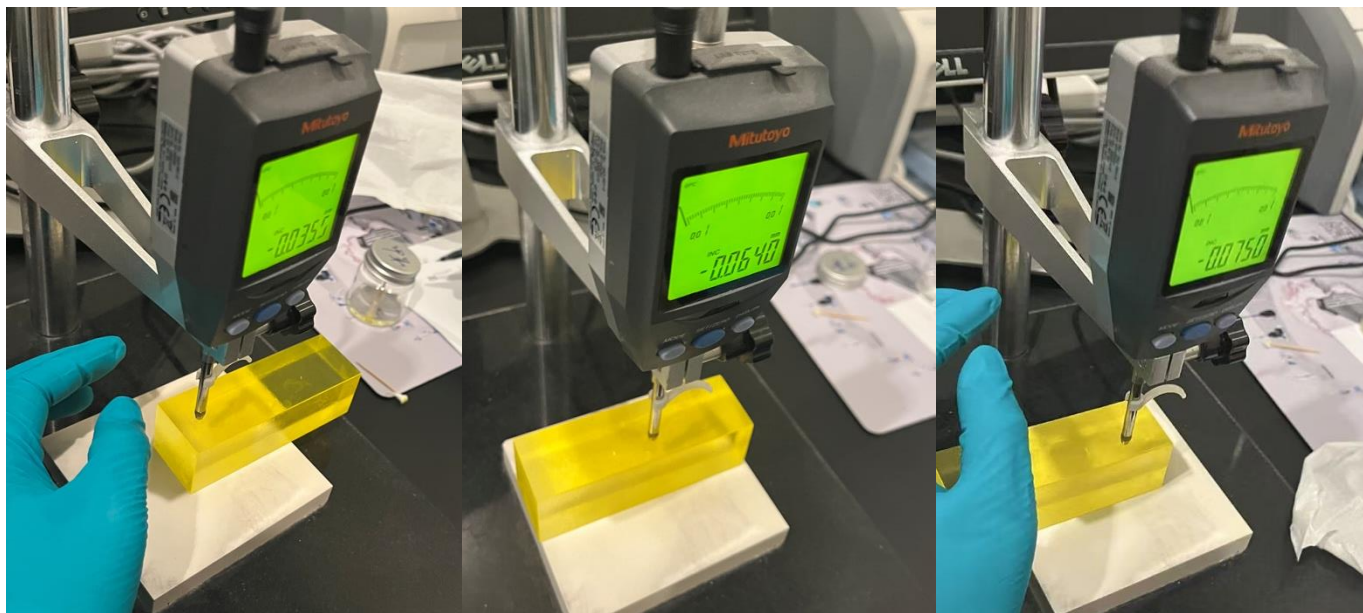
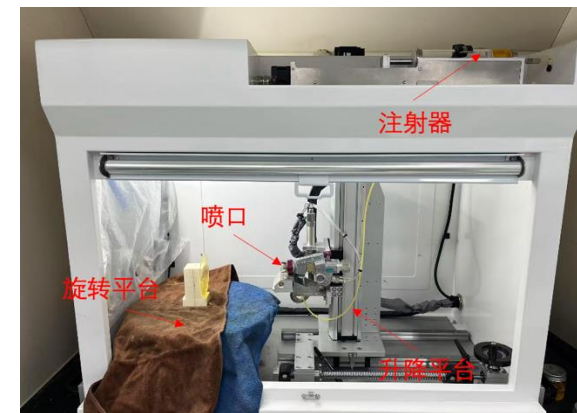


强子: 519 ps



研究进展III—pCsI晶体喷涂

- 比较了不同厚度的WLS材料对光输出的影响
- 认为20 μm 厚度比较合适

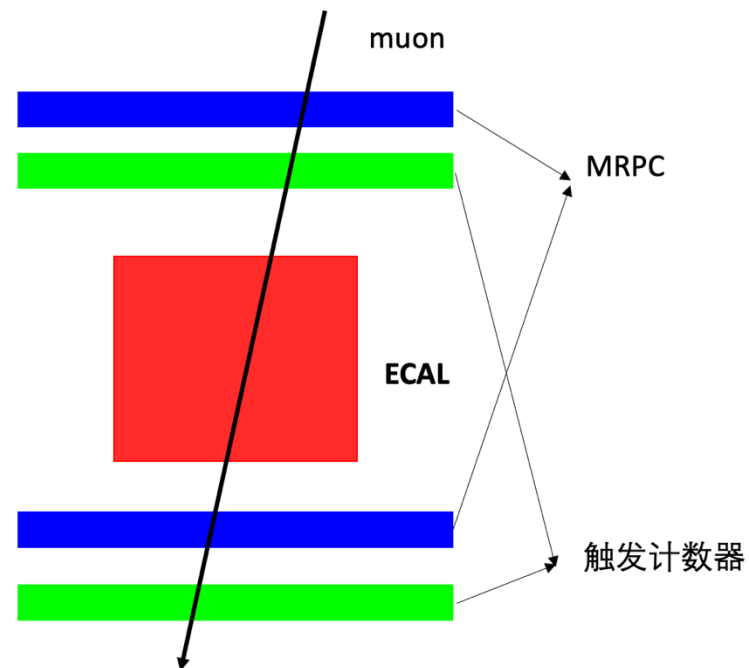


测量不同位置的膜厚度



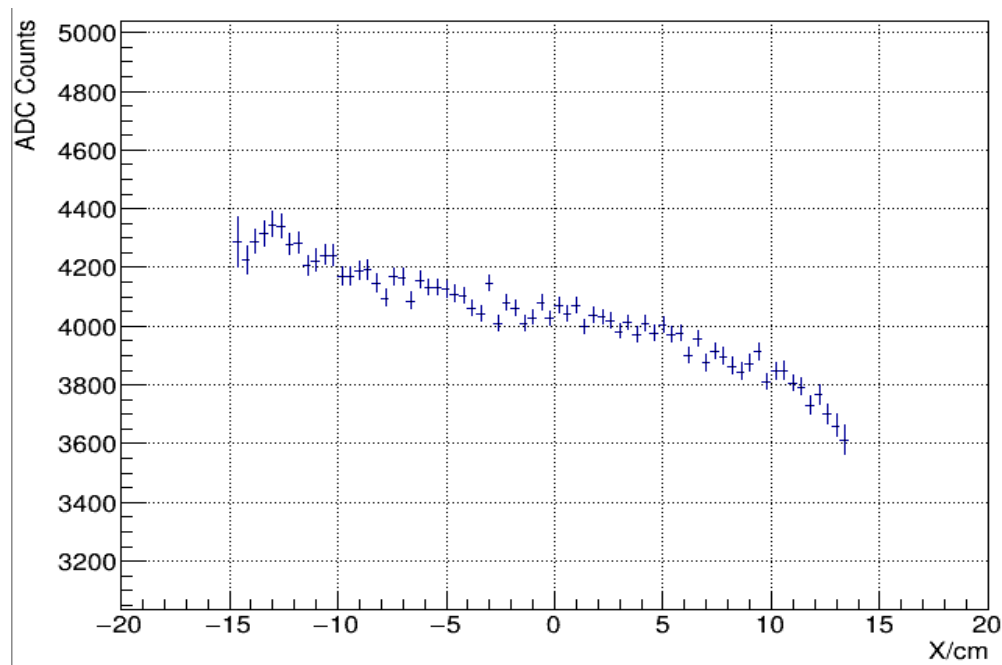
研究进展IV—宇宙线测试

- 搭建了一套宇宙线测试系统
- 采用MRPC探测器提供位置和时间信息
 - 位置分辨: $\sim 3\text{ mm}$
 - 时间分辨: 100 ps

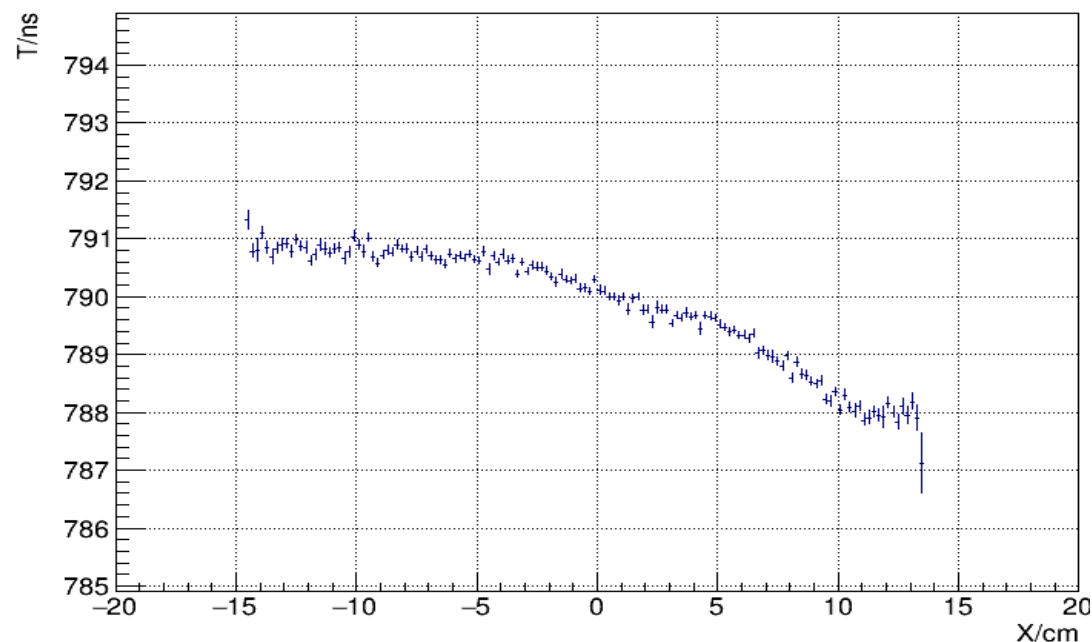


研究进展IV—宇宙线测试

- 不同晶体的非均匀性在8%~18%之间
- 基本表现为击中位置越靠近APD，测得的时间越早



光收集均匀性 (~15%)

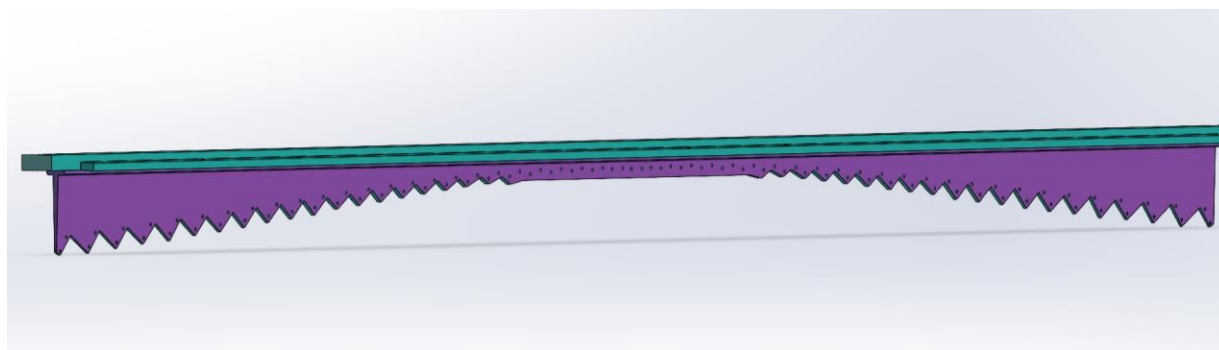
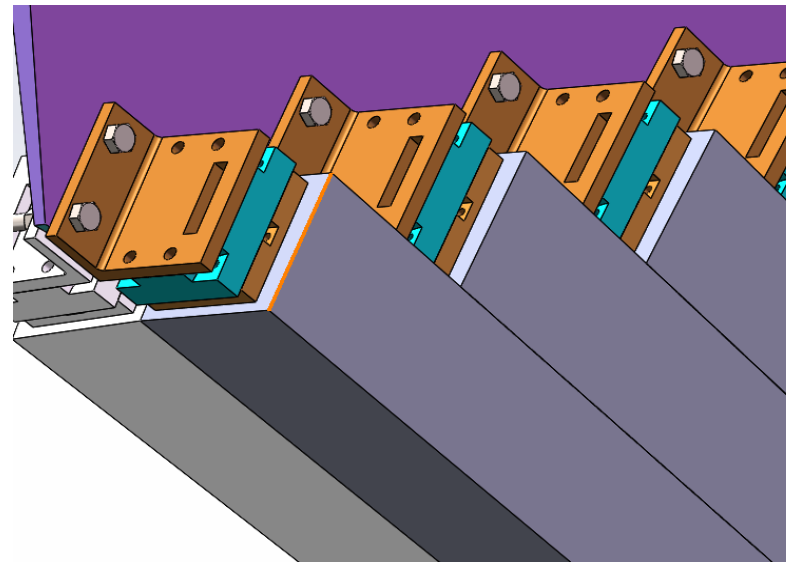
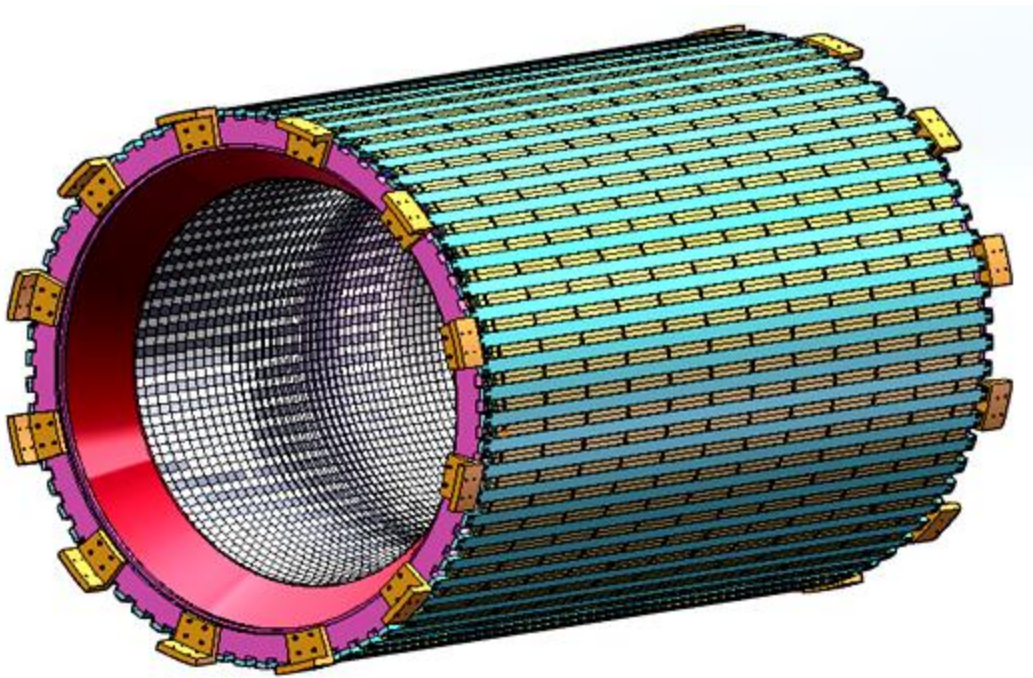


击中位置和测量时间的关系

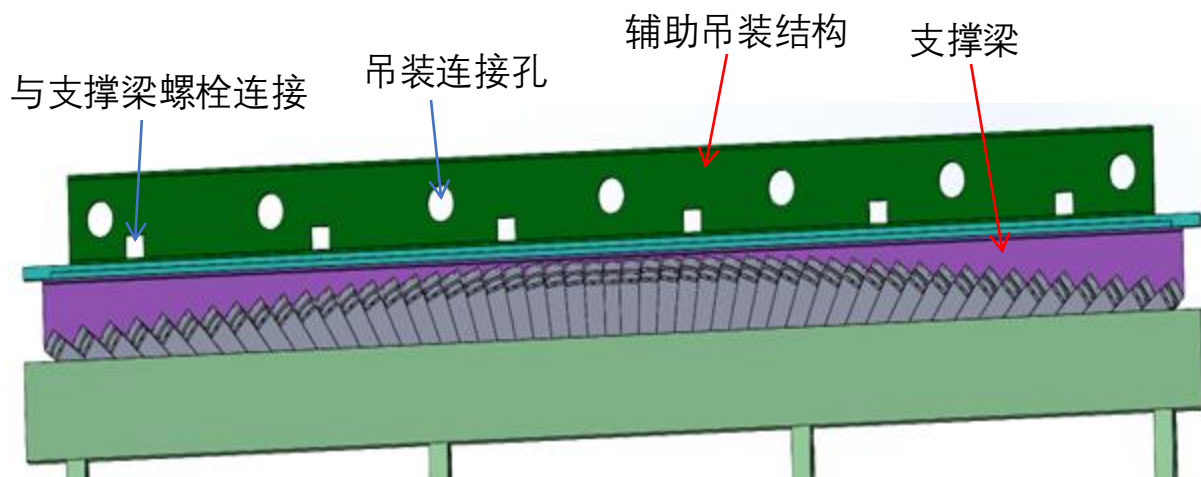
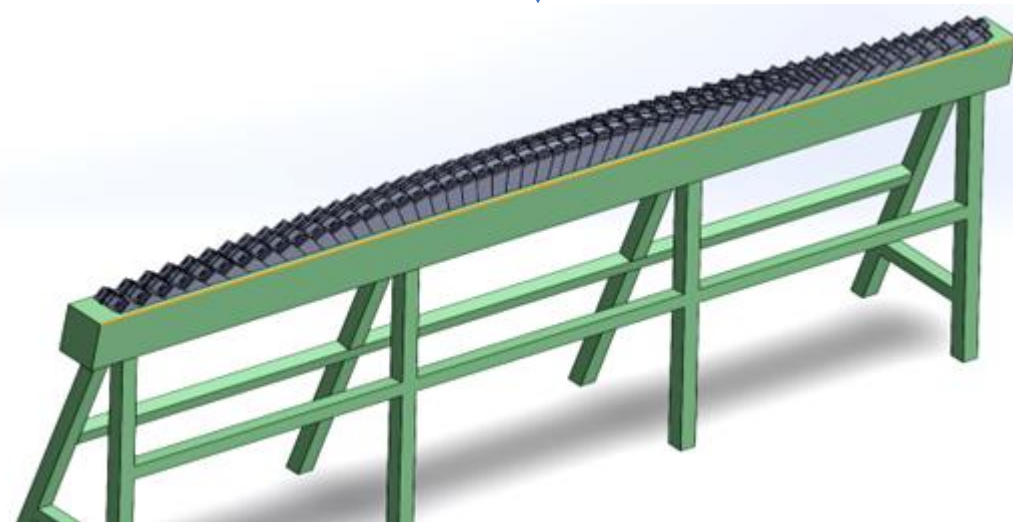
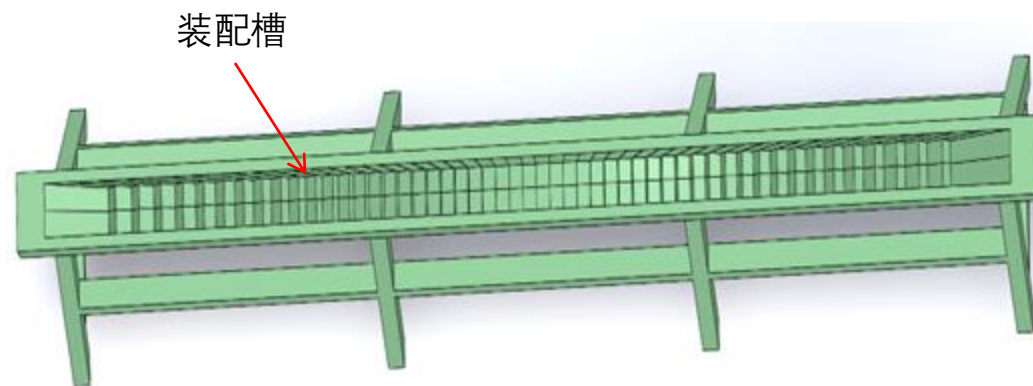


研究进展V—机械设计

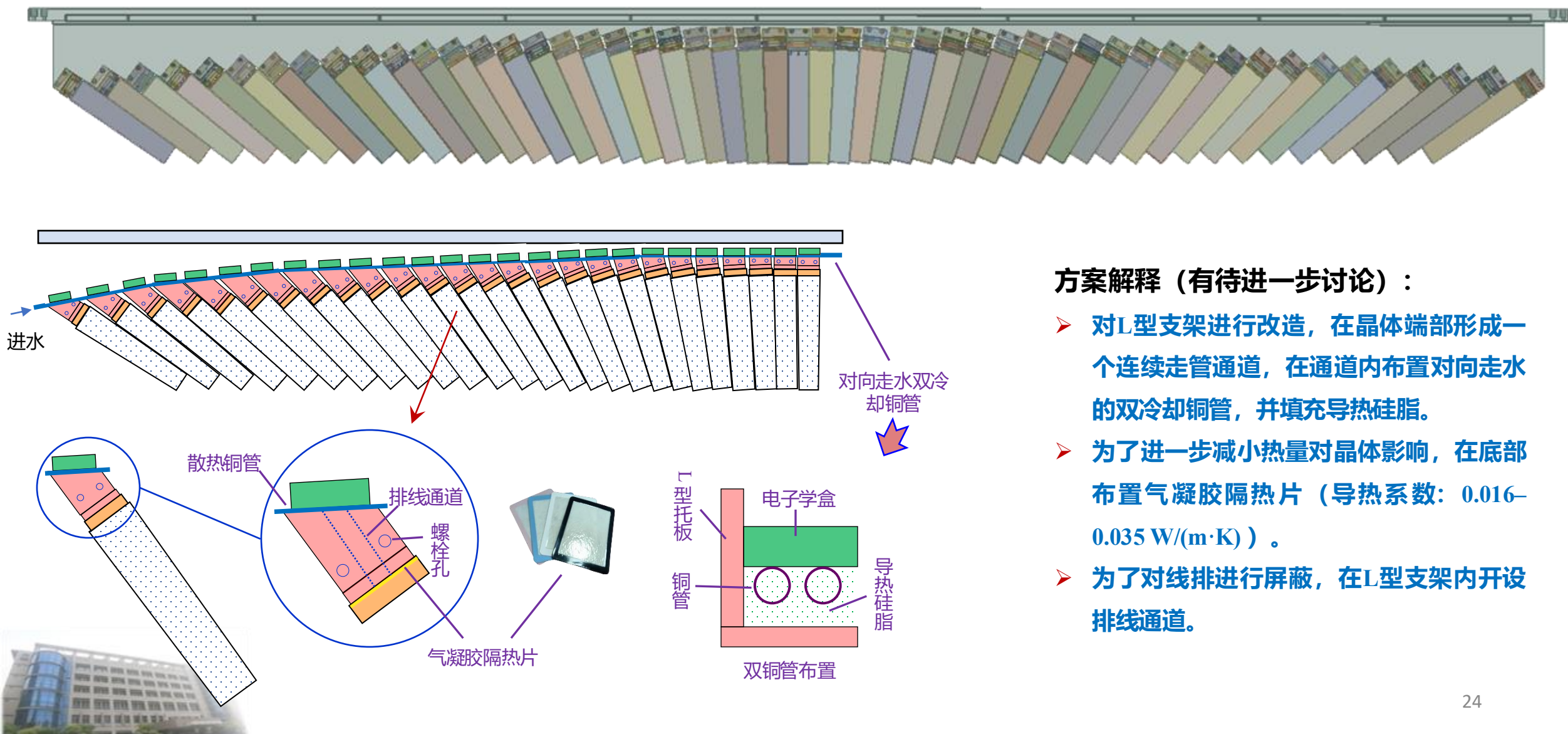
- 初步完成了量能器结构设计，以及力学性能分析



- 考虑了量能器的安装
- 设计了装配槽
- 并计划加工实物用于验证



研究进展VI—散热设计



方案解释（有待进一步讨论）：

- 对L型支架进行改造，在晶体端部形成一个连续走管通道，在通道内布置对向走水的双冷却铜管，并填充导热硅脂。
- 为了进一步减小热量对晶体影响，在底部布置气凝胶隔热片（导热系数：0.016–0.035 W/(m·K)）。
- 为了对线排进行屏蔽，在L型支架内开设排线通道。

- STCF量能器，面临着高本底计数率下的高精度测量的挑战
 - 基于pCsl+APD+电荷灵敏读出方案
 - 采用波形采样读出方式
- 主要进展
 - 基于束流数据，针对量能器的定时功能开展了研究
 - 开展宇宙线测试，逐单元研究晶体的均匀性和定时功能
 - 开展了机械和散热设计
- 下一步计划：
 - 开展pCsl+WLS老化性能的研究
 - 准备下一次束流测试



总结

- STCF量能器，面临着高本底计数率下的高精度测量的挑战
 - 基于pCsl+APD+电荷灵敏读出方案
 - 采用波形采样读出方式
- 主要进展
 - 基于束流数据，针对量能器的定时功能开展了研究
 - 开展宇宙线测试，逐单元研究晶体的均匀性和定时功能
 - 开展了机械和散热设计
- 下一步计划：
 - 开展pCsl+WLS老化性能的研究
 - 准备下一次束流测试

谢谢!



backup



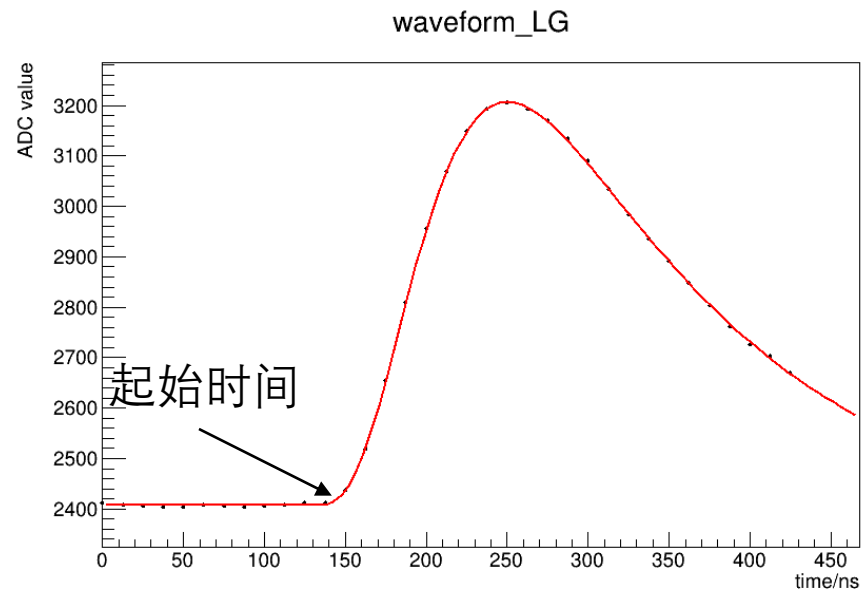
性能研究——pCsl光产额



模板拟合

$$f(t) = \begin{cases} \left\{ \sum_{i=0}^5 A_i e^{-\frac{t-T_0}{\tau_i}} \right\} \cdot (t-T_0)^k + ped & t \geq T_0 \\ ped & t < T_0 \end{cases}$$

拟合函数形式

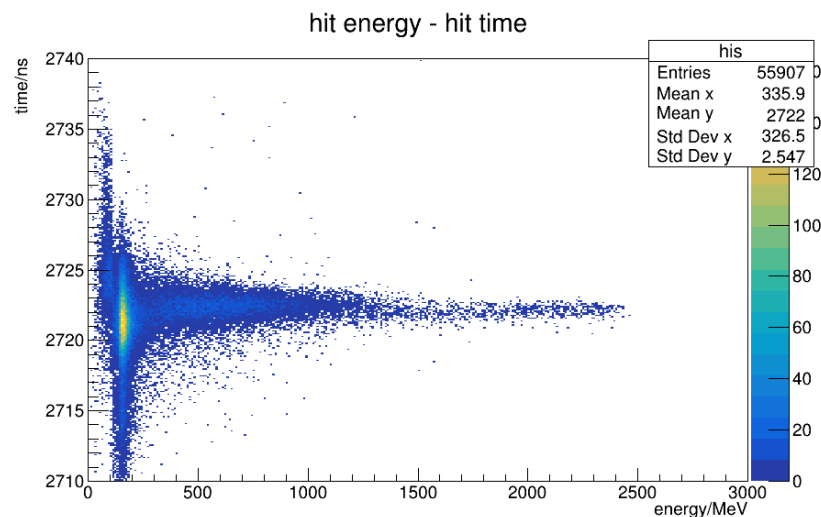


对波形拟合效果

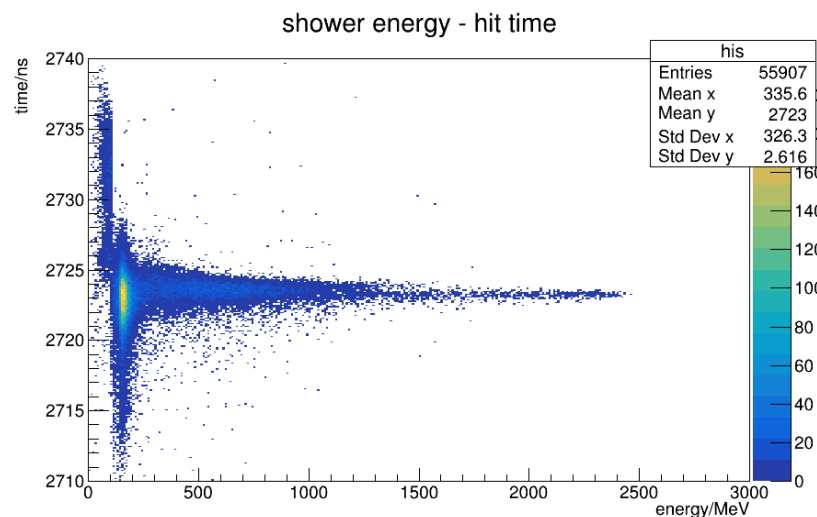
- 不固定形状模板更好的反映波形起始时间，减少整体形状的影响。



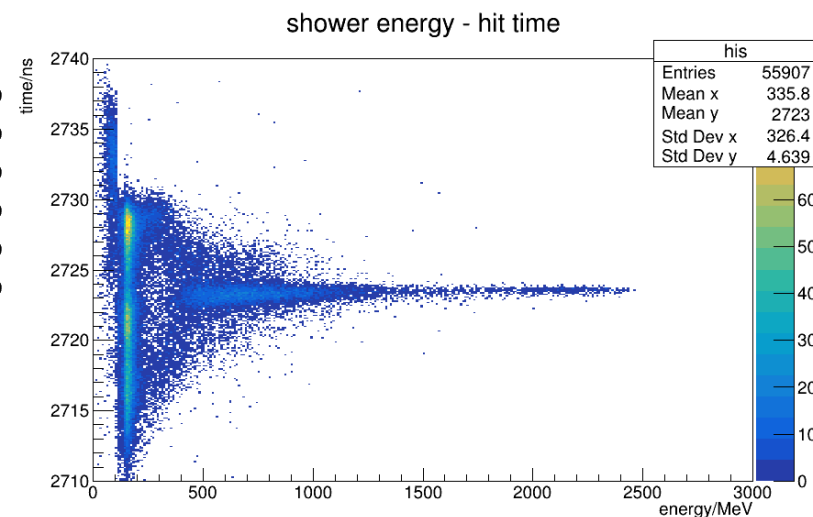
性能研究——pCsI光产额



baseline (40) + signal (10)



baseline (40) + signal (20)

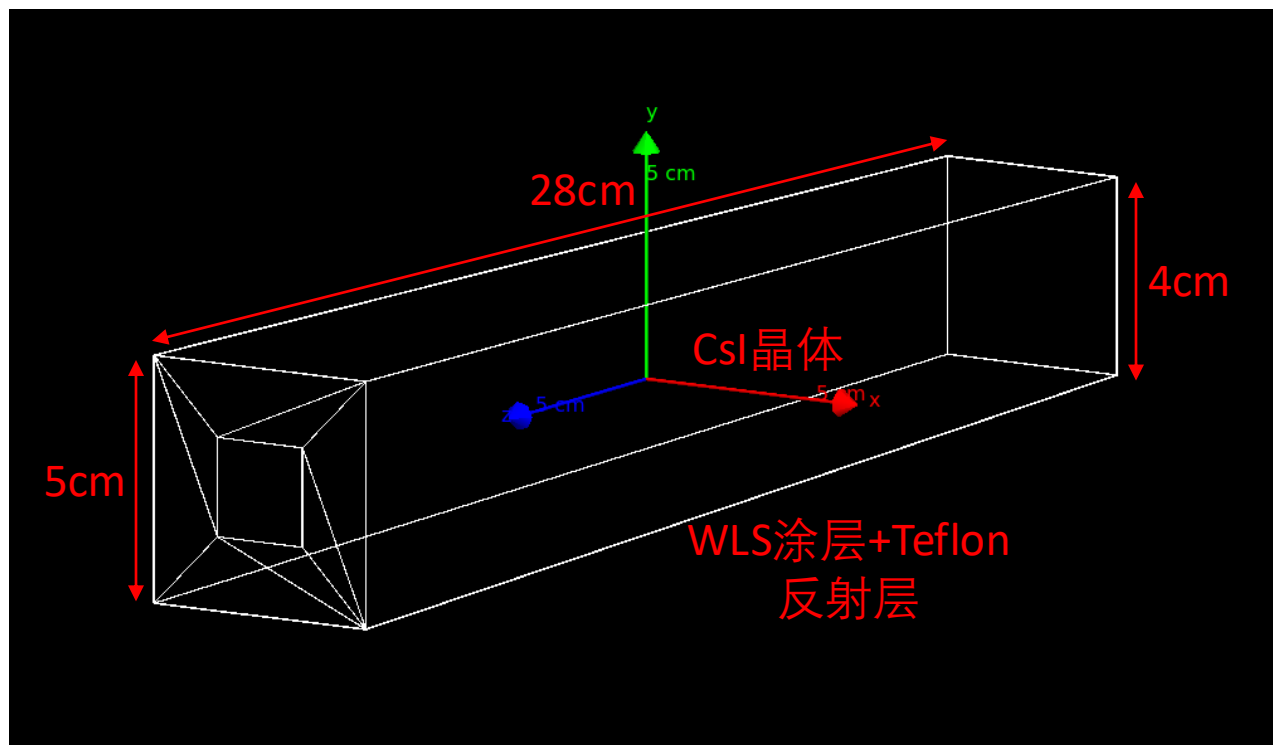


baseline (40) + signal (30)

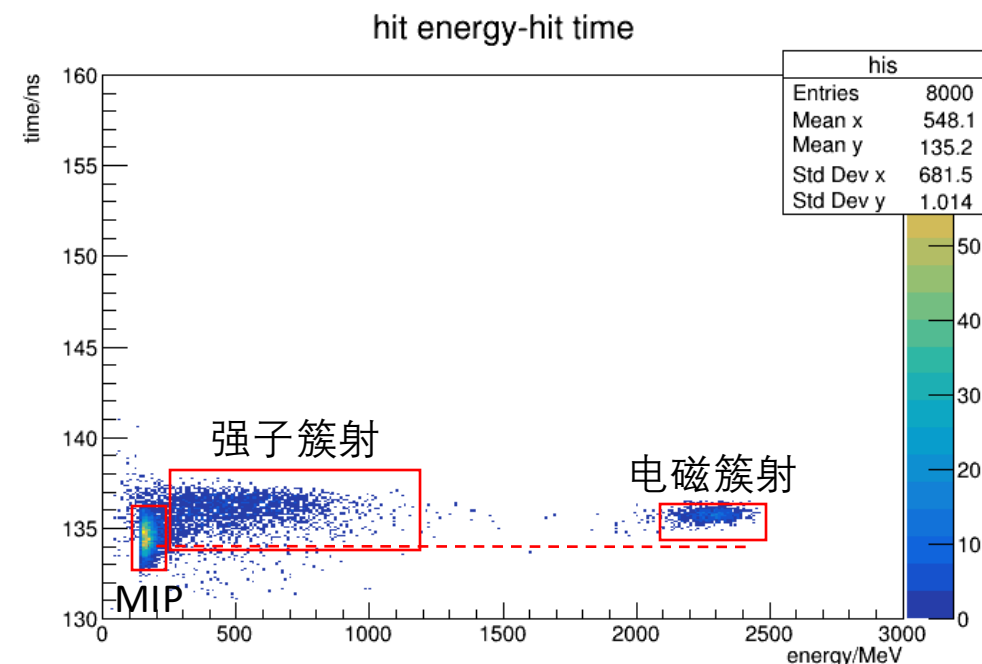
- 拟合区间的选取影响拟合效果：信号点少容易过拟合，信号点多波形下降沿贡献大。



性能研究——pCsl光产额



Geant4模拟的几何示意图



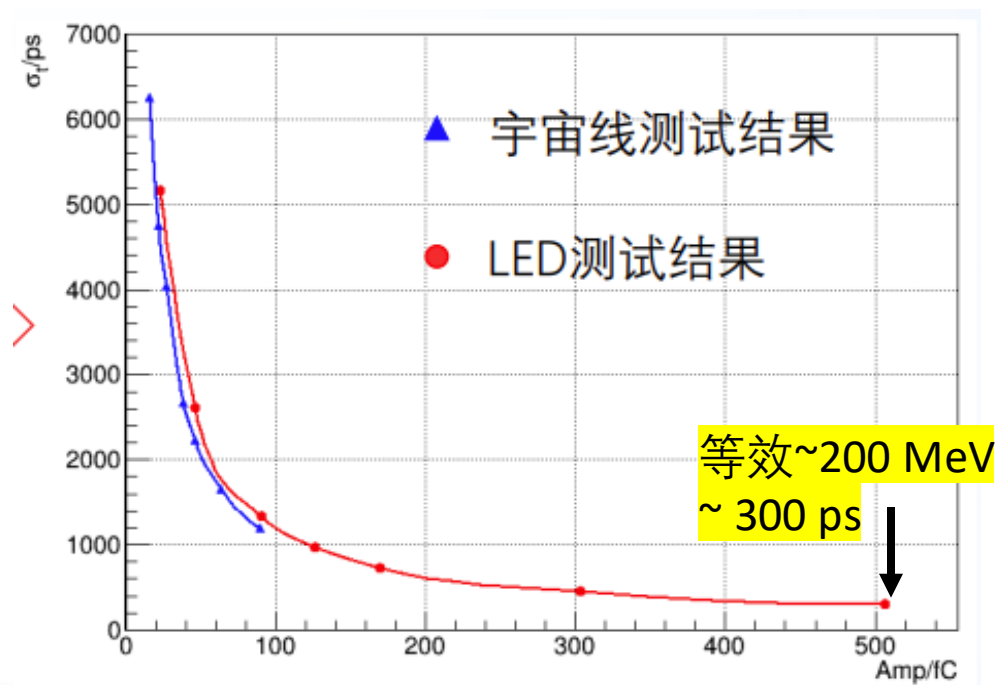
模拟得到的时间响应-能量沉积关系

- 光学模拟验证Eshower比MIP时间响应慢，但不能解释强子的差异。
- 可能的因素有：簇射发展差异、能量损失空间分布、新的发光成分。



性能研究——时间性能

宇宙线及LED测试



束流测试

