

JUNO探测器刻度与重建



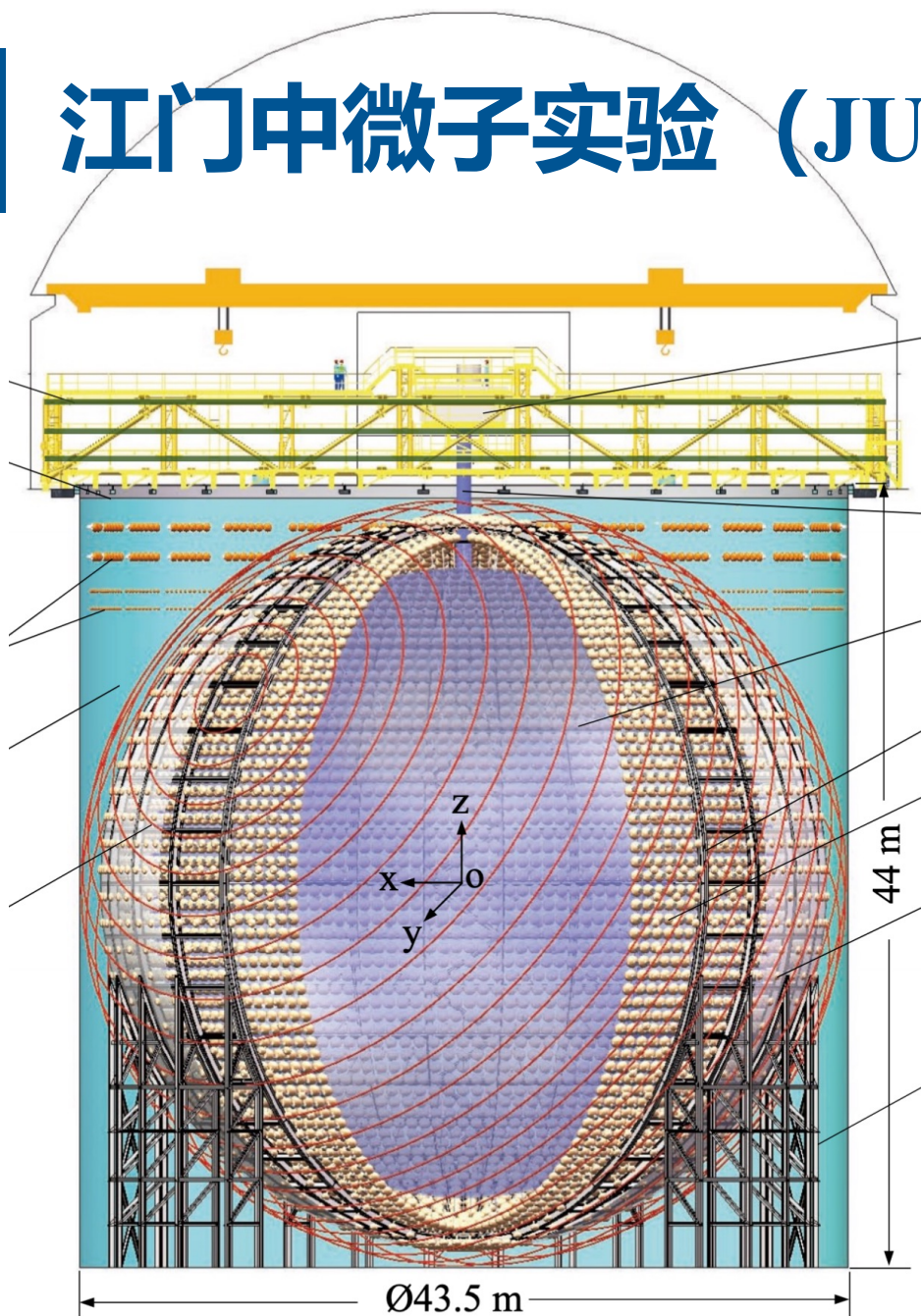
吴文杰

中国科学院近代物理研究所



中国物理学会高能物理分会学术年会, 广州, 2026年7月15日

江门中微子实验 (JUNO)



7/15/2026

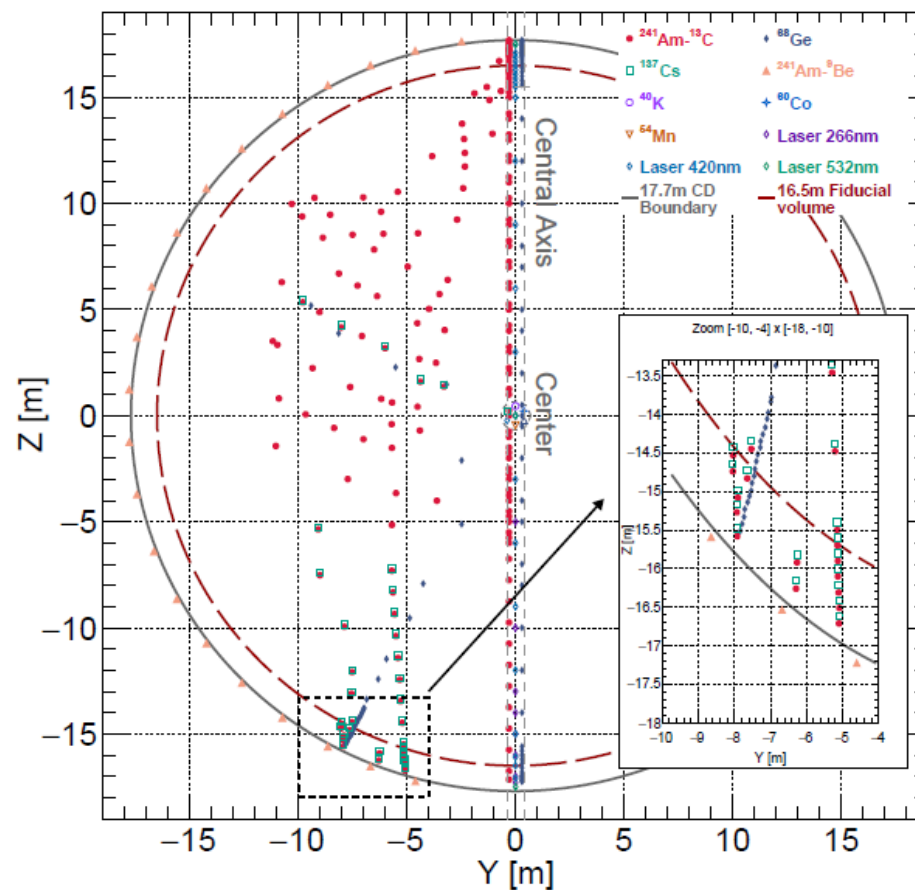
- JUNO是首先建成的新一代国际中微子实验
 - **国际上最大、能量精度最高**的液闪探测器
 - 有望在**中微子质量问题**上取得重大突破
- 世界领先的液闪探测器
 - 20 kton液闪, 半径17.7 m有机玻璃球
 - 3%@1 MeV能量分辨率
- 物理需求推动探测器的高要求
 - 高PMT覆盖率: 75%, PMT间距 ~ 3 mm
 - 高透明度液闪: 衰减长度 > 20 m
 - 高探测效率PMT: $\sim 30\%$

高质量物理数据 ← 探测器响应 ← 刻度与重建

刻度系统

- 1D (ACU, 中心轴) : ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{40}K , ^{68}Ge , ^{60}Co , Am-C, Am-Be, laser
- 2D (CLS, z-y平面) : Am-C, ^{68}Ge , ^{137}Cs
- 2D (GT, boundary) : Am-Be

Source	Energy	System
Gamma Sources		
^{68}Ge	$0.511 \times 2 \text{ MeV}$	ACU
^{137}Cs	0.662 MeV	ACU
^{54}Mn	0.835 MeV	ACU
^{40}K	1.460 MeV	ACU
^{60}Co	1.173+1.333 MeV	ACU
Neutron Sources		
$^{241}\text{Am}-^{13}\text{C}$	neutron + 6.13 MeV ($^{16}\text{O}^*$)	ACU CLS
	(n, γ)p 2.223 MeV	
	(n, γ) ^{12}C 4.94 MeV	
	(n, γ) ^{56}Fe 7.63 MeV, etc.	
$^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$	neutron + 4.43 MeV ($^{12}\text{C}^*$)	GT
	(n, γ)p 2.22 MeV	
Optical Calibration		
Laser	Optical pulses (420 nm and 266 nm)	ACU

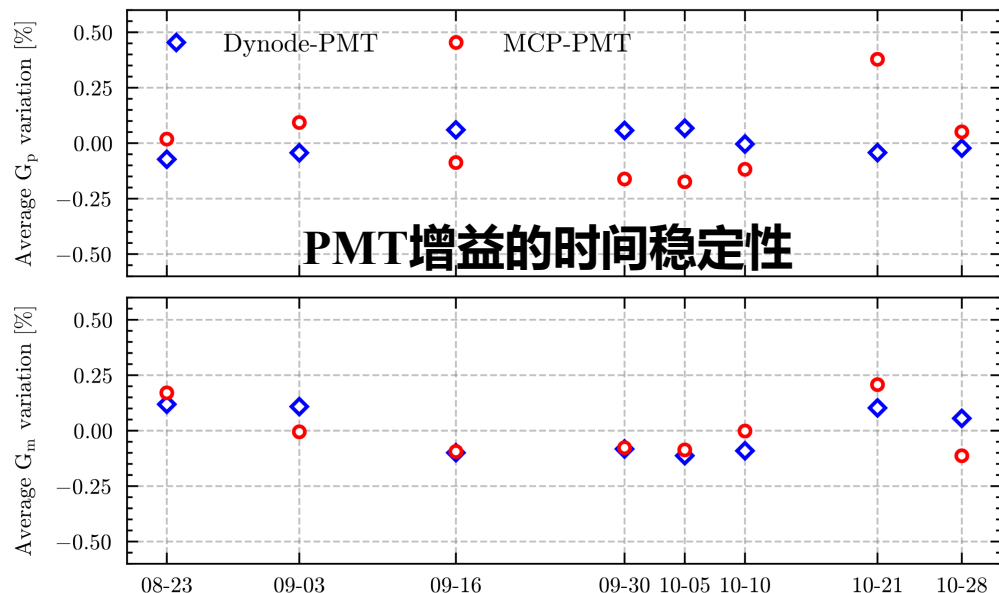
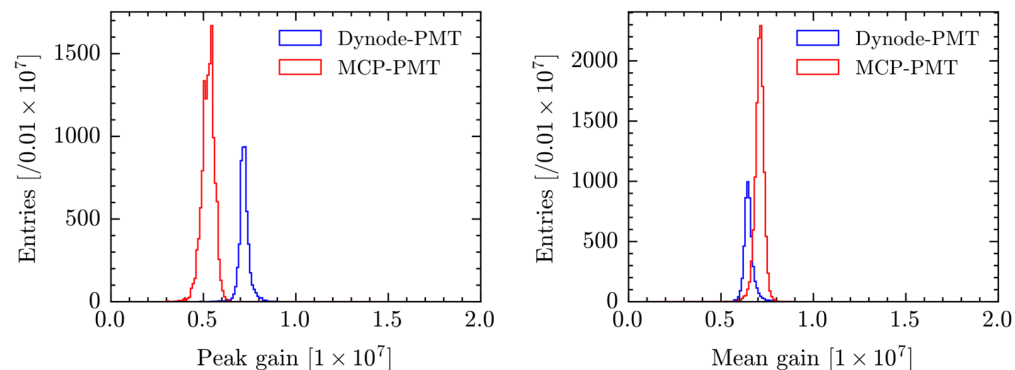


不同种类、不同能量、不同位置的刻度源：理解和监控PMT和液闪的响应

PMT通道级刻度

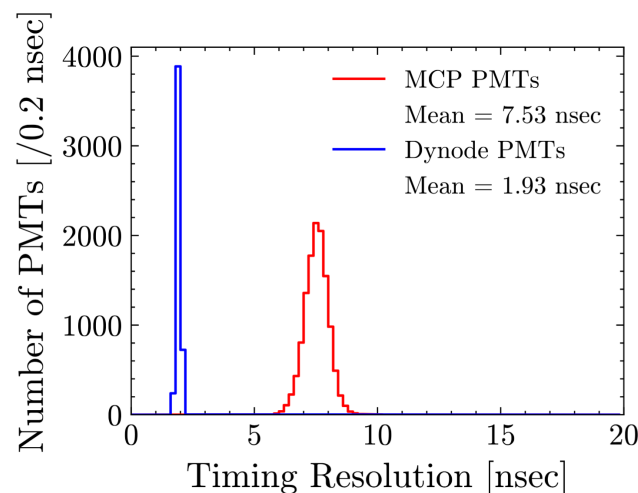
增益刻度: 电荷 $\rightarrow$ 光子数
时间对齐: PMT信号传输时间的对齐

所有PMT的增益分布

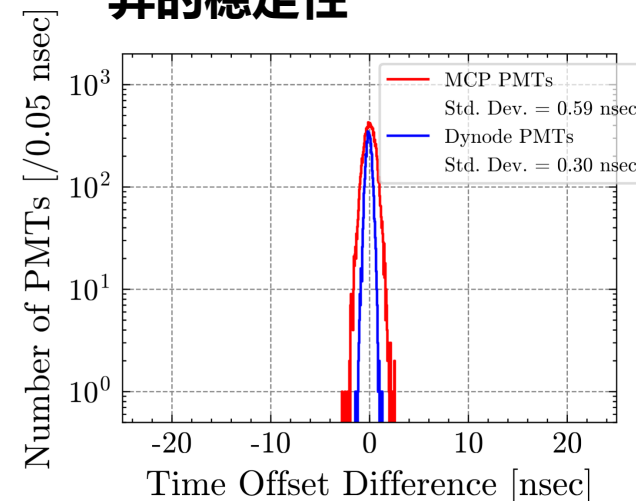


PMT增益的时间稳定性

PMT的时间分辨



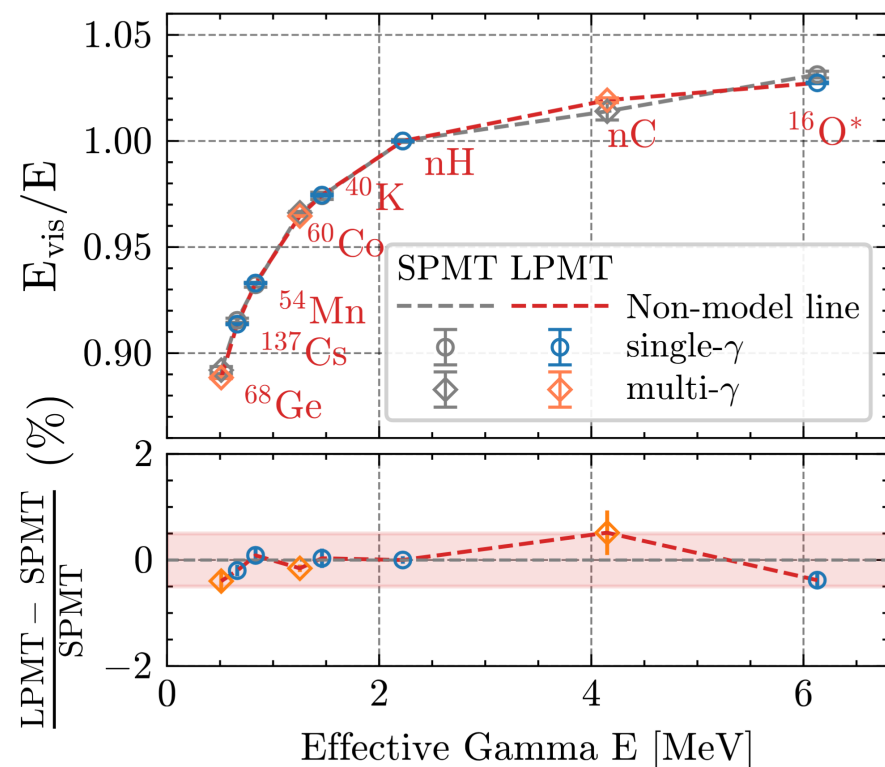
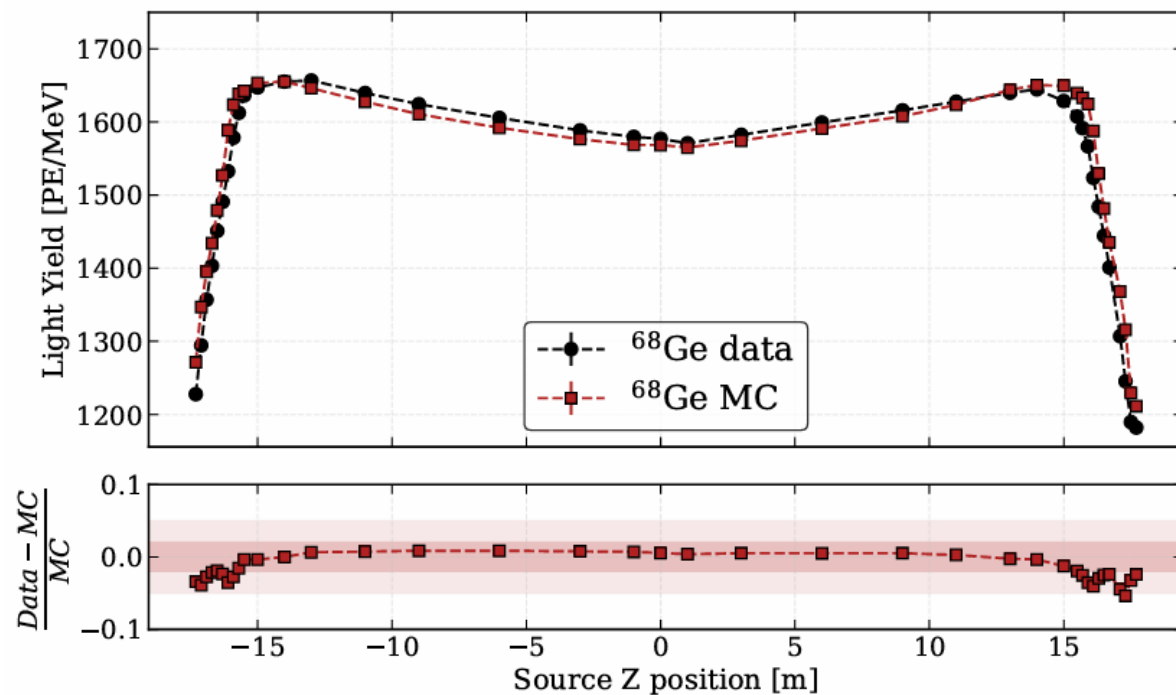
不同PMT之间时间差异的稳定性



- 探测器处于**稳定取数**状态
- 增益和时间刻度对事例**顶点和能量的重建**至关重要

液闪响应的刻度

- 经过增益刻度后，探测器中心的光产额约为1600 PE/MeV (^{68}Ge) 和1785 PE/MeV (AmC中子)，与模拟结果一致
- 液闪和电子学带来的**能量非线性**可以由探测器中心的不同刻度源确定: **< 1%**



顶点和能量重建

- 利用 PMT 的时间和电荷信息，重建事例的顶点和能量

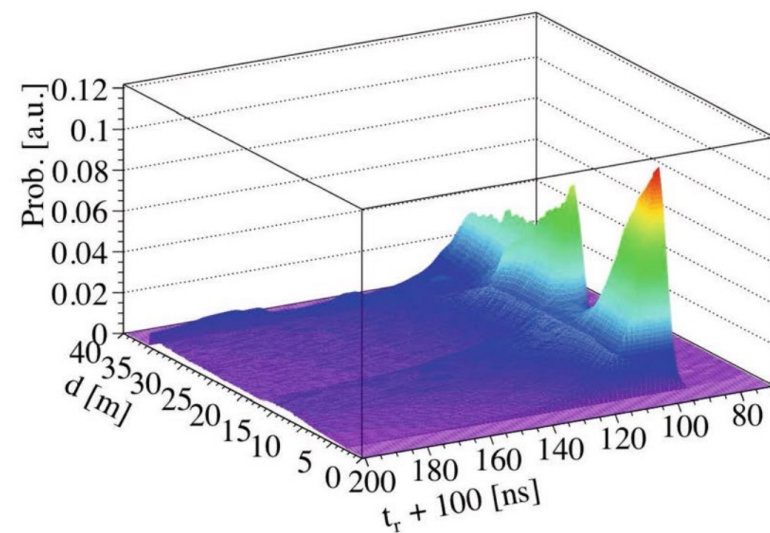
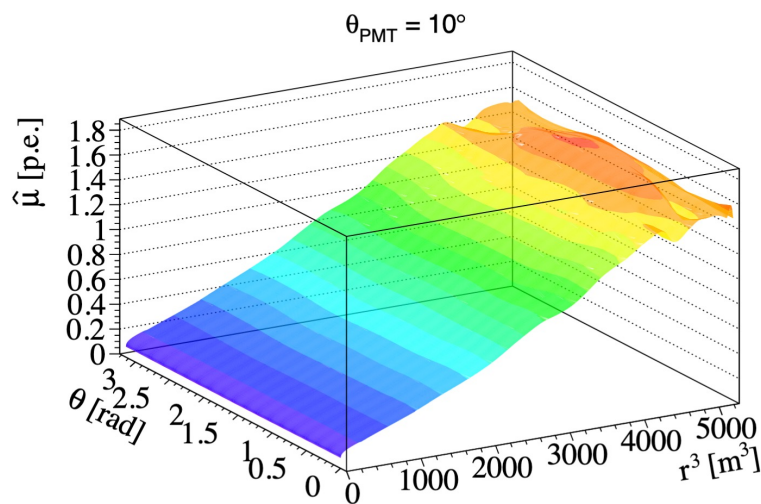
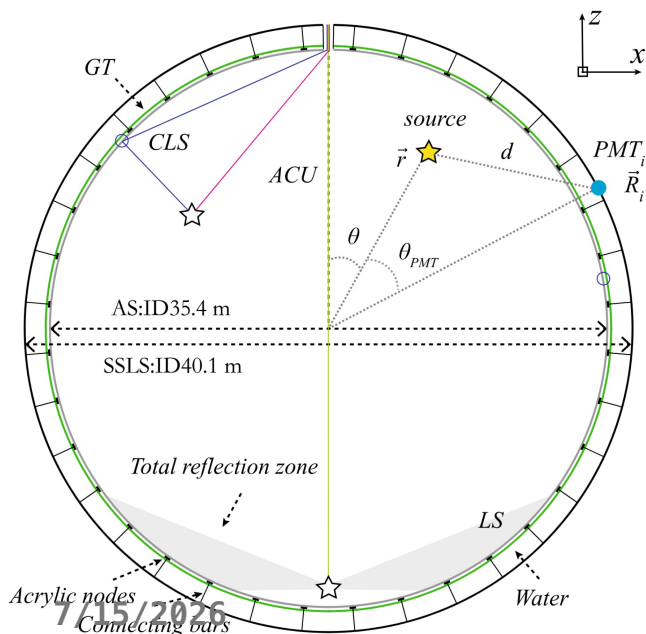
$$\mathcal{L} = \prod_{j \in \mathcal{U}} e^{-\mu_j} \prod_{i \in \mathcal{F}} \left(\sum_{k=1}^{+\infty} P_Q(q_i|k) P(k|\mu_i) \right) \prod_{i \in \mathcal{T}} P_T(t_{i,r}|\mathbf{r}, d_i, \mu_i)$$

- 数据驱动：利用刻度数据得到预期的电荷和时间响应

- PMT增益、暗噪声、相对探测效率、单光电子电荷谱

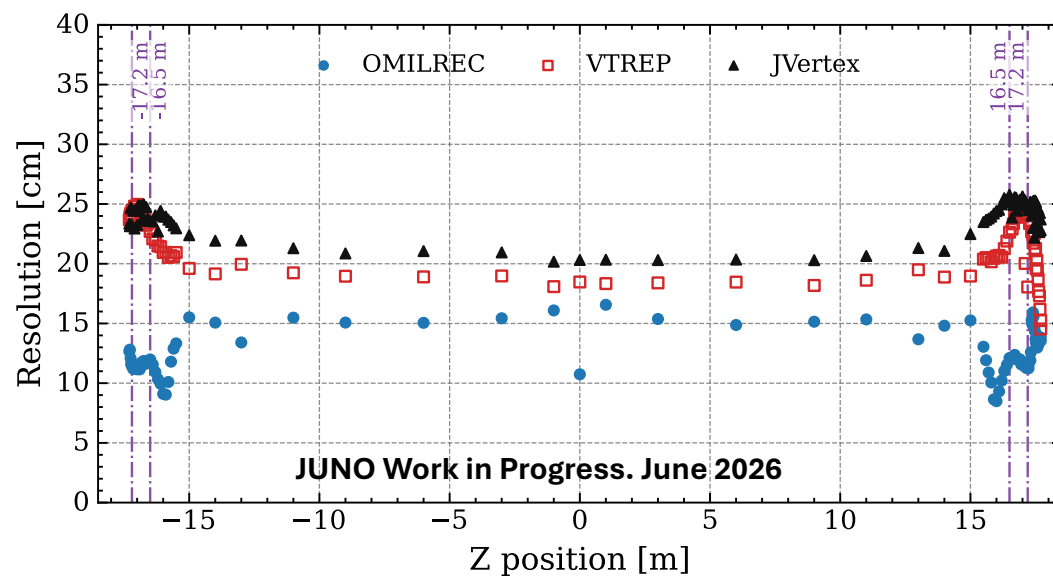
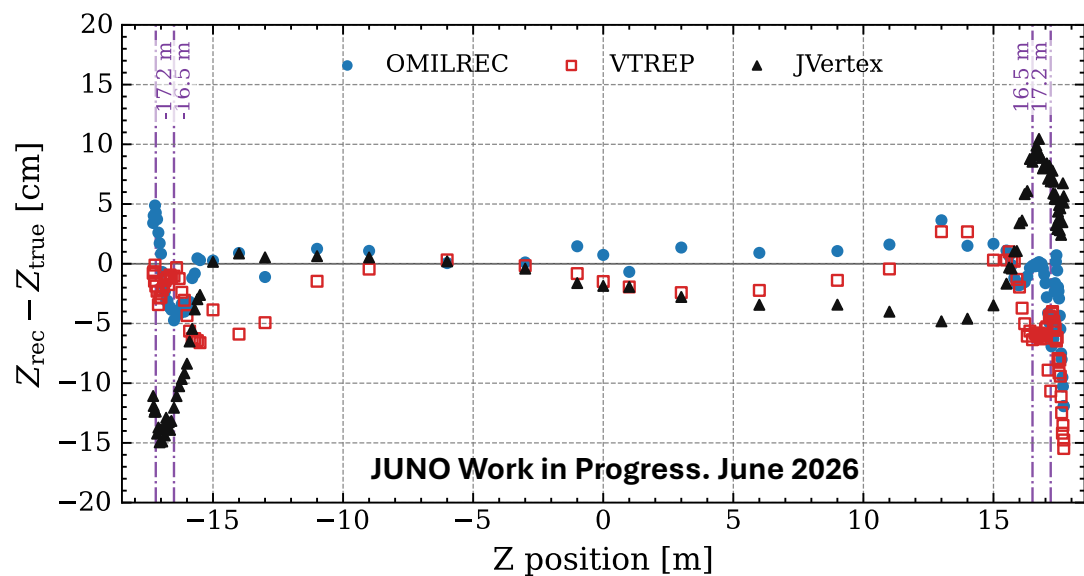
$$\hat{\mu}^L(r, \theta, \theta_{\text{PMT}}) = \frac{1}{E_{\text{vis}}} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\bar{q}_i - \mu_i^D}{DE_i}, \mu_i^D = DNR_i \times L$$

- 结合**人工源** (^{68}Ge) 和全探测器的**天然放射源** (^{214}Po) 数据，构建探测器的响应函数



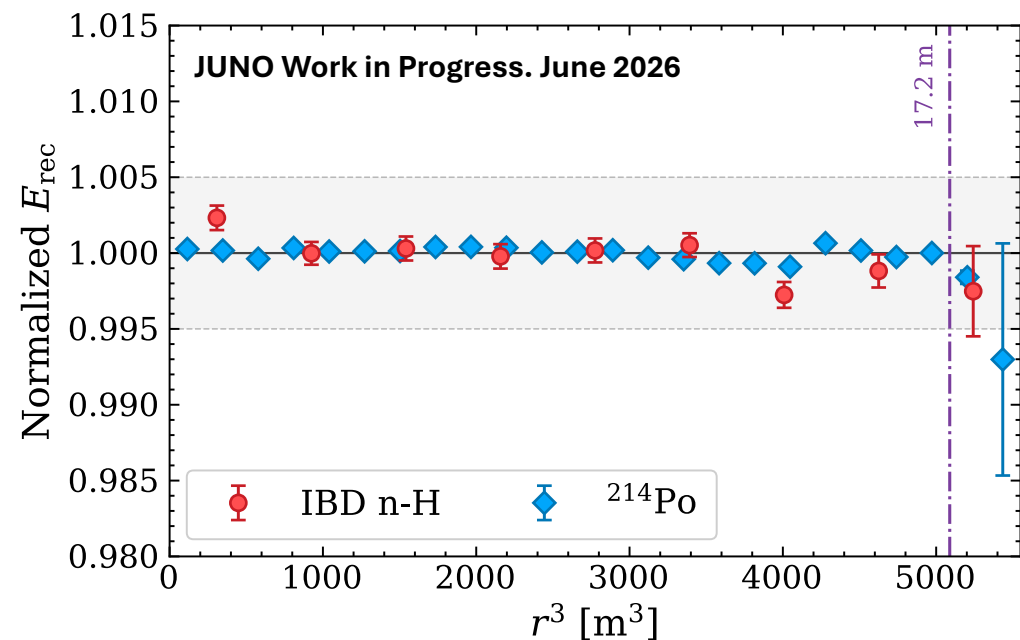
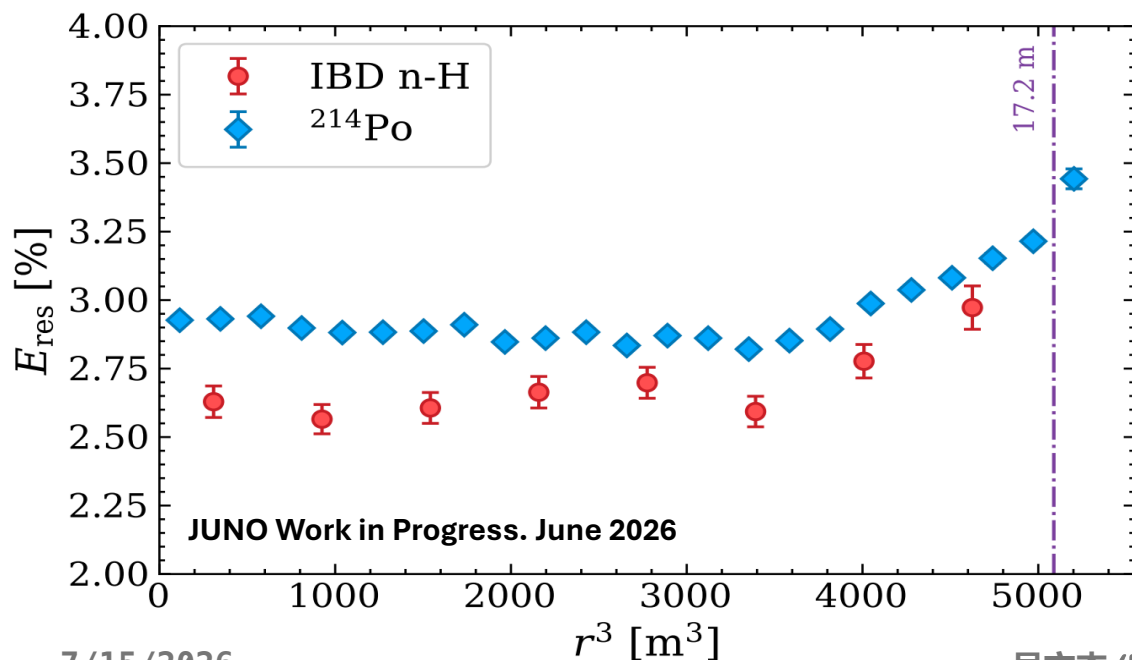
顶点重建

- 事例顶点的精度主要由PMT的时间信息决定
 - 光子在探测器中的传播过程包括吸收重发射、散射、折射和反射等
 - 预期的时间响应中应该包含所有过程的贡献
- 对于探测器边缘的事例，PMT的电荷可以额外提供顶点重建的灵敏度
 - 中心轴的 ^{68}Ge 源： $|z| < 17.2\text{ m}$ 内偏差约-15到+10 cm，分辨率约为10–25 cm

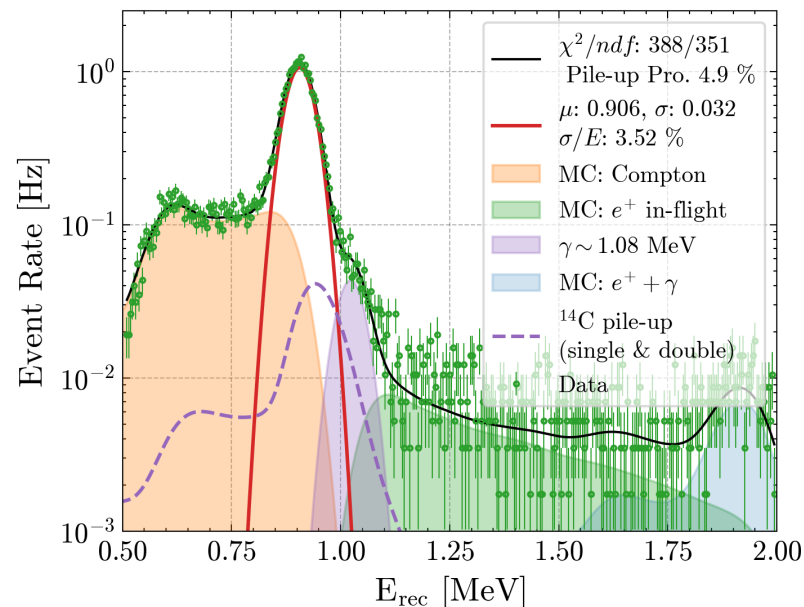


能量重建

- 探测器中心的 ^{68}Ge 刻度源给出的能量分辨率为 **$3.5\% @ 2 \times 0.511 \text{ MeV } \gamma$** , 比预期略差 (3.1%)
- ^{214}Po 给出的能量分辨率 $\sim$ **$2.9\% @ 0.93 \text{ MeV } \alpha$**
- 全探测器的 ^{214}Po 和IBD n-H给出能标的残余空间非均匀性 $\sim 0.2\%$



JUNO Work in Progress. June 2026



总结

- 刻度和重建是理解探测器响应的基础
- 通过进一步理解探测器的响应，提升能量分辨率
 - 更多的刻度数据
 - 更先进的重建方法和能谱模型
 - 利用机器学习方法排除 ^{14}C 本底
 -
- 本报告主要聚焦JUNO的刻度系统和MeV能标的事例重建
 - 高能缪子的重建给事例挑选提供了宇生同位素本底的重要排除手段，在物理分析中具有重要作用