

β 与 γ 事例的重建方法

Methods and Neutrino-Physics Applications

王亚朋 wangyp24@mails.tsinghua.edu.cn

2026 年 10 月 8 日

- ① 问题背景与物理基础
- ② 方法一：电荷重心法 (COG)
- ③ 方法二：飞行时间法 (首光子时间)
- ④ 方法三：电荷 + 时间联合最大似然
- ⑤ 方法四：机器学习
- ⑥ β/γ 粒子鉴别
- ⑦ 适用范围与性能对比
- ⑧ 总结

Motivation: Why Distinguish β and γ Events

中微子研究为何需要重建 β/γ 能量、位置与拓扑重建关系到信号识别、能谱测量和本底抑制。

- ▶ 反应堆中微子 (IBD): 快信号正电子呈 β 型, 延迟中子俘获 γ 提供符合标记; 两者重建共同决定能量与顶点。
- ▶ 太阳中微子: 弹性散射电子是信号; 散裂产生的 β 衰变可形成相似本底。
- ▶ 质子衰变: $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 信号含 $\gamma\gamma$, 需重建其拓扑以抑制本底。

- ▶ 电子 CSDA 射程

$$R(T) \approx 0.412 T^{1.265-0.0954 \ln T} \text{ g cm}^{-2}$$

液闪中 $1 \text{ MeV} \approx 0.5 \text{ cm}$, $5 \text{ MeV} \approx 2.9 \text{ cm}$ 。

- ▶ 远小于顶点分辨 ($\mathcal{O}(10 \text{ cm})$) $\Rightarrow$ 可近似为点源。
- ▶ 多重库仑散射使径迹曲折、切伦科夫锥被抹宽 $\Rightarrow$ 液闪方向分辨受限。

重建含义 点源假设对 β 成立, 对 γ 只是近似。

阈值 SK 切伦科夫重建阈值 $\approx 4 \text{ MeV}$ ($2.2 \text{ MeV } \gamma$ 仅约 7 个 hit)。

Physics II: A γ Event Deposits Energy at Multiple Sites

- MeV 量级的 γ 首次康普顿散射就把大部分能量交给一个电子 $\Rightarrow$ 能量上 “几乎就是一个 β ”。

能量	主导机制	沉积几何	重建含义
$\lesssim 100$ keV	光电吸收	近乎单点	“像 β ”，拓扑不可分
0.1–2 MeV	康普顿主导	1–2 个康普顿电子	主战场：拓扑区分困难
2–10 MeV	康普顿 + 多次散射	多点， ~ 10 –30 cm	延展性开始显著
$\gtrsim 10$ MeV	康普顿 + 对产生	级联， $\gtrsim 0.5$ m	明显的“非点状”

最重要的特例： 2.223 MeV 中子俘获 γ 康普顿边缘 ≈ 2.0 MeV，主要产生一个康普顿电子，拓扑上很像 β 。

Physics III: Observable Differences Between Detector Media

性质	液闪 (LS)	水切伦科夫 (WC)
光产额	高 (JUNO 实测 1785 p.e./MeV)	低 (≈ 6 Cherenkov p.e./MeV)
能量分辨	好 (JUNO 3.4% @ 1.022 MeV)	差 (SK 14.2% @ 10 MeV)
阈值	低 (~ 0.2 MeV)	高 (≈ 4 MeV)
方向信息	MeV 能区基本丢失	切伦科夫环 $\Rightarrow$ 方向与环拓扑
β/γ 鉴别	依赖延展性建模、PSD	依赖环数、 π^0 不变质量

一句话 液闪以**能量分辨与低阈值**取胜，水切伦科夫以**方向与拓扑**取胜——两者都受同一套光子统计限制。

Unified Framework: Modeling $\mu_i(\Theta)$ in Maximum-Likelihood Reconstruction

- ▶ 观测量：每支 PMT 的电荷 q_i 与首光子时间 t_i ；参数 $\Theta = \{\vec{r}_0, t_0, E, \hat{n}, \text{粒子种类}\}$ 。
- ▶ 期望光电子数与单光子时间核：

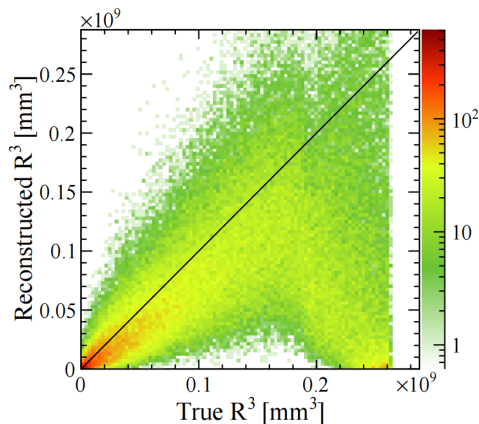
$$\mu_i(\Theta) = E \epsilon_{\text{geo}} \epsilon_{\text{abs}} \epsilon_{\text{ang}} \epsilon_{\text{PMT},i}, \quad f_i(t^{\text{res}}) = [\phi_{\text{emit}} \otimes g_{\text{scat}} \otimes h_{\text{TTS},i}](t^{\text{res}})$$

- ▶ 电荷期望是时间核的归一化，时间是它的形状——两者共用同一套光学参数。

Method I: Charge-Weighted Centroid (COG)

- ▶ $\vec{r}_{\text{COG}} = \sum_i w_i q_i \vec{r}_i / \sum_i w_i q_i$; $\mathcal{O}(N_{\text{hit}})$ 、 μs 级。
- ▶ 系统性偏向中心：理想情况下 $\langle z \rangle = \frac{2}{3}z_0$ ，JUNO 实际用修正因子 1.2。
- ▶ 直接作似然初值时约 18% 落入局部极小，且给不出 t_0 。

仅重建位置信息，计算最简单，精度较差，且在边界处有较大误差，常用于为进一步算法提供初值



来源：JNE 1t COG 重建结果

Method II: Time-of-Flight (First-Photon Timing)

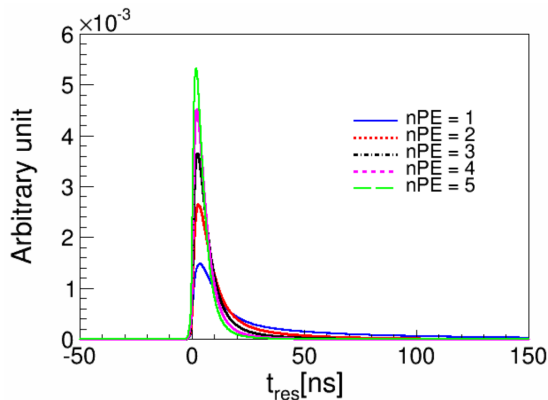
► $t_i^{\text{exp}} = t_0 + |\vec{r}_i - \vec{r}_0|/v_{\text{eff}}, \quad v_{\text{eff}} = c/n_{\text{eff}}.$

$$\vec{r}_0^* = \arg \min_{\vec{r}_0, t_0} \sum_{i \in \text{hit}} \rho \left(t_i - t_0 - \frac{|\vec{r}_i - \vec{r}_0|}{v_{\text{eff}}} \right). \quad (1)$$

- 液闪中受发光时间影响，且需要结合光子数进行卷积，给出首光子 pdf

对 PMT TTS 和时间刻度敏感，在水切伦科夫探测器中应用更广。

Super-K APFit 初始顶点步骤使用飞行时间法；完整流程还用电荷信息重建切伦科夫环。



来源：首光子时间残差 PDF（光子数越多越锐），JINST 13 (2018) T09005

Method III: Joint Charge-and-Time Maximum Likelihood

- ▶ 电荷项与时间项联合，构建似然函数：

$$\mathcal{L} = \prod_{j \in \text{unhit}} P_j(\text{unhit} \mid \mu_j) \prod_{i \in \text{hit}} [1 - P_i(\text{unhit} \mid \mu_i)] f_q(q_i \mid \mu_i) f_t(t_i \mid \mu_i)$$

- ▶ 可扩展为多顶点/延展源/多粒子；计算成本较高。JUNO OMILREC 优化后 $\approx 190 \text{ ms/事例}$ 。

逐光电子：FSMP 解卷积后拟合

- ▶ FSMP 为每支 PMT 提取 PE 数 N_i ，及各 PE 的电荷 q_{ij} 、时刻 t_{ij} 。
- ▶ 光电子级联合似然：

$$\mathcal{L}_{\text{PE}}(\Theta) = \prod_i P(N_i | \mu_i(\Theta)) \prod_{j=1}^{N_i} f_t(t_{ij} | \Theta) f_q(q_{ij} | 1 \text{ PE})$$

- ▶ 保留 PE 时间与电荷。MCP-PMT 实验室测试：PE 间隔 $< 10 \text{ ns}$ 时，时间标准差 $< 1 \text{ ns}$ 。

完整波形：直接对采样点拟合

$$W_i(t_k) = b_i + \sum_j q_{ij} h_i(t_k - t_{ij}) + \epsilon_{ik}$$

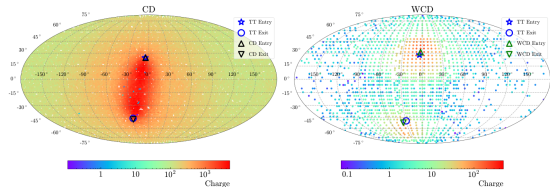
$$\mathcal{L}_{\text{WF}}(\Theta) = \prod_i p(W_i | \Theta; h_i, \text{noise})$$

- ▶ h_i ：标定的单 PE 波形响应；噪声项包含基线与电子学噪声。
- ▶ 直接拟合波形样本，不固定 PE 分解；共享光学模型，但更依赖波形标定且计算量更高。

Method III: Building the Optical Response Model

- 1 **解析参数化**: 立体角 + 指数衰减 + 角响应; 高斯 (TTS) $\otimes$ 双指数 (闪烁)。代表: Daya Bay ML、JUNO JVertex。
- 2 **全 MC $\rightarrow$ 列表法**: 逐光子追踪建 μ_i 表。代表: JUNO OMILREC、fiTQun (直接光 + 散射函数卷积)。

二者都需要刻度: 激光/LED、 ^{16}N 、 ^{68}Ge 、 ^{214}Bi - ^{214}Po 、 ^{168}Ge 、 μ 子。



来源: JUNO: PMT 球面上的电荷图样 (穿行 μ 子事例),
arXiv:2511.14590

Applications of the Three Methods Across Experiments

方法	介质/尺寸	代表实验	典型性能	主要系统误差
COG	LS、全尺寸	Daya Bay、 $\mathcal{O}(10\text{ cm})$ JUNO/KamLAND (初值)、JNE1ton		向中心系统偏移；边界偏置大
飞行时间	低散射 WC 优先；数百吨 LS	Super-K、Borexino、 JUNO JVertex	WC: ns 级时间精度	n_{eff} 标定；散射；全反射区
电荷 + 时间联合	1–20 kt LS; 50 kt WC	JUNO OMILREC、SK fiTQun、Borexino、 KamLAND、Daya Bay、 JNE QiscinT	渐近最优	强模型依赖；初值与收敛

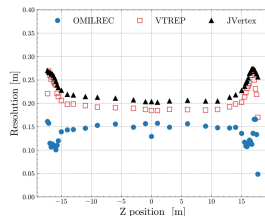
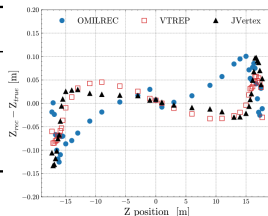
共同点 COG 提供初值、首光子时间提供时间项；联合似然是当前的主流算法。

Method Performance: JUNO, Borexino, and Super-K

	顶点分辨	能量分辨
JUNO (LS)	$\approx 10 \text{ cm @ } 1 \text{ MeV}$	$3.4\% \text{ @ } 1.022 \text{ MeV}$
Borexino (LS)	$9 \text{ cm @ } 1 \text{ MeV}$	$\approx 5\%/\sqrt{E}$

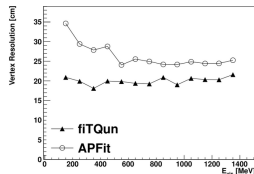
- Super-K 太阳方向 (10 MeV): SK-I 25° ; SK-III/IV $\sim 22.5^\circ$ 。

* SK-III 角分辨较 SK-I 改善约 10%, SK-IV 相近; 22.5° 为推算值 (Hosaka 2006; Abe 2016)。

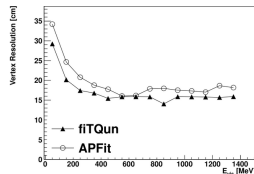


来源: JUNO (^{168}Ge): OMILREC/VTREP/JVertex,

arXiv:2511.14590



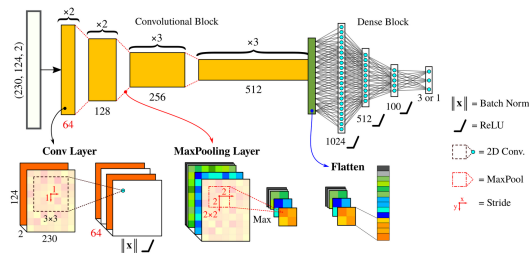
(a) True electron event with single ring



(b) True muon event with single ring

来源: fiTQun vs APFit 顶点分辨, PTEP 2019, 053F01

- ▶ 直接学 $\mathcal{D} \mapsto \Theta$, 不显式建模 μ_i : **MLP** (手工特征)、**CNN** (PMT 图像)、**GNN/点云** (球对称几何)、**生成/代理模型**。
- ▶ 仅用于 PID, 未取代传统重建方法——JUNO 与 Borexino 都没有把 ML 用于实测重建; Super-K 的 ML 只做分类标记, 顶点仍来自 **BONSAI**。
- ▶ 机器学习过度依赖准确的 MC, 响应建模偏差被吸收为不可见的系统误差。



来源: JUNO 深度学习重建的 VGG-J 网络结构,
arXiv:2101.04839

Particle Identification: Methods and Applicability

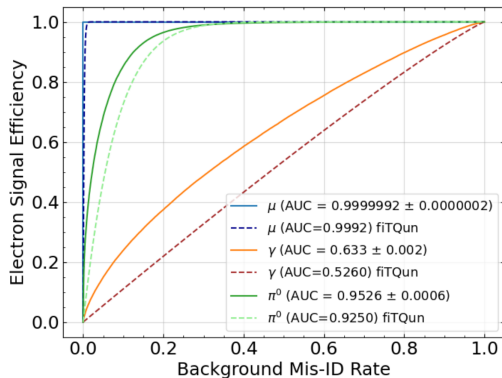
方法	适用范围	代表结果与局限
多站点/发射拓扑	高光产额液闪、MeV 中心区	用 $\Gamma_{\text{em}}(\vec{r})$ 反投影检验 γ 延展性; JUNO 模拟在 2.0–2.5 MeV、 $R = 10$ m 时, 50% 效率下杂质 10%–20%, 不足以显著扩大太阳分析基准体积 (Dunger & Biller 2019; Rebber et al. 2020)
PSD (脉冲形状)	全能区; α/β	Borexino MLP 可分离 α/β ; JUNO 的 Gatti 方法对 e^-/γ 几乎无效 (arXiv:2310.11826)
切伦科夫/闪烁比	慢闪烁体或专用硬件	SNO+ 慢闪烁体实现逐事例方向性(37 个 ^8B 事例, 5.7σ); Borexino CID 仅给统计方向性 (arXiv:2309.06341)
中子符合	依赖反应道	SK-Gd 中子标记效率 35.6%; Daya Bay Gd 俘获份额 83.8%; 提供反应道/本底约束, 不是单事例拓扑鉴别
环数 + π^0 不变质量	$\gtrsim 100$ MeV	利用双 γ 环与不变质量识别 π^0 ; 不适用于 MeV 单 γ 与电子的区分

要点 MeV 单事例 β/γ 拓扑鉴别受物理与光子统计限制; 实际分析常借助反应道、中子符合与几何切割。

The Physics Challenge of β/γ Discrimination

- ① γ 的能量集中在一个最亮的沉积点上：首次康普顿散射就交出大部分能量，其射程只有亚厘米级 $\Rightarrow$ 能量分布上“几乎就是一个 β ”。
- ② β 的径迹也在增长：
 $1 \text{ MeV} \approx 0.5 \text{ cm} \rightarrow 10 \text{ MeV} > 5 \text{ cm}$ ，而 γ 的沉积尺度增长更慢 $\Rightarrow$ 可分性**不随能量单调改善**，最优区间约 1–3 MeV。

结论 两类介质中 MeV 能区 β/γ 的事件级鉴别都极其困难，根源在物理。



来源：Hyper-K ResNet 的 ROC 曲线，
arXiv:2604.13503 (预印本)

Scope and Applicability of Reconstruction Methods

方法	适用场景（尺寸 / 介质）	代表实验	不适用
电荷重心 COG	全介质、全尺寸；光学模型未标定的调试期	Daya JUNO/KamLAND（初值）、JNE	Bay、不能作为最终重建
飞行时间拟合	低散射、发光即时：50 kt 纯水优先；数百吨液闪	Super-K、Borexino、JUNO JVertex	20 kt 液闪边界区（全反射）
电荷 + 时间联合 ML	中一大型液闪与水切伦科夫的生产链	JUNO fiTQun、Borexino、KamLAND、Daya Bay	OMILREC、SK 需要准确的光学响应模型

Performance Comparison: Typical MeV-Scale Reconstruction Resolution

实验 (规模)	顶点分辨	能量分辨	方向	数据源
液闪 (LS): 光产额数百 p.e./MeV, 阈值 ~ 0.2 MeV				
JUNO (20 kt)	≈ 10 cm @ 1 MeV	3.4% @ 1.022 MeV	无	实测 + 模拟
Borexino (278 t)	9 cm @ 1 MeV	$\approx 5\%/\sqrt{E}$	无	源刻度
KamLAND (1 kt)	≈ 13 cm/ $\sqrt{E}$	$(6.9 \pm 0.1)\%/\sqrt{E}$	无	实测
Daya Bay (8×20 t)	12/13 cm @ 2.2 MeV γ	$\approx 9\%/\sqrt{E}$	无	实测
RENO (2×16 t)	< 17 cm @ 1 MeV	$(5.9/\sqrt{E} + 1.1)\%$	无	实测
Double Chooz (2×10 t)	源扫描 22–32 cm	$\approx 8\%$ @ 1 MeV	无	实测
SNO+ (780 t)	24–26 cm	$\approx 6\%$ @ 1 MeV	逐事例 (5.7σ)	实测
水切伦科夫 (WC): 光产额 ≈ 6 p.e./MeV, 阈值 ≈ 4 MeV				
Super-K (50 kt)	40–50 cm (低能)	14.2% @ 10 MeV	25° @ 10 MeV	实测

- ① 三类经典方法结合使用：COG 提供初值、首光子时间提供时间项，电荷 + 时间联合似然进行完整拟合。
- ② MeV 能区 β/γ 难以鉴别，根源在物理： γ 的能量集中在单个最亮的康普顿电子上；
- ③ 机器学习依赖准确模拟，未能直接应用于 MeV 事例重建。

展望 JNE500t 水相重建可参考 SuperK APfit, FiTQun

Thank You

完整调研报告与参考文献列表同步上传 Docdb