

JUNO 20-inch PMT

Response and characterization

1. 应用场景

江门中微子实验 (JUNO) 的目标是中微子振荡参数和质量顺序. 它探测的主要信号是轻水反应堆反中微子.

中微子与液闪中的氢原子核发生反应 $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$ 称为 IBD (inverse beta decay), 这是 JUNO 探测器要甄别的信号: 正电子会迅速释放能量并湮灭为 0.511 MeV 的光子, 该即时信号包含了正电子动能和湮灭能. 中子主要和质子结合, 并在约 200 微秒后放出 2.2 MeV 的光子, 产生延迟信号 [1].

JUNO 使用了大量 20-inch PMT (photomultiplier tube)[2] 和 3-inch PMT, 前者也称 Large PMT, 后者 Small PMT.

对于 Large PMT, 其中有 5,000 只滨松 (Hamamatsu Photonics K.K) 的 dynode-PMT, 剩下 12,612 只为北方夜视 (North Night Vision Technology) 的 MCP-PMT. 此外, 还有若干被安装在符合探测器中[3].

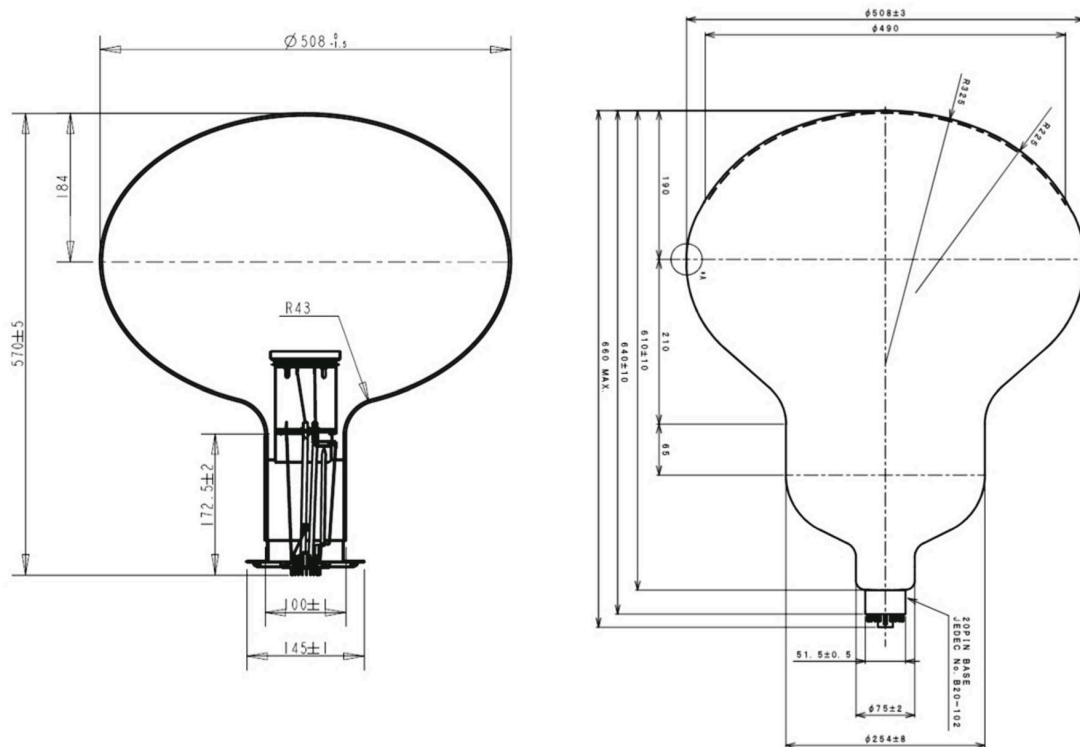


图 1 20-inch PMT 图例, 左起: 北方夜视, 滨松[2]

2. 工作原理

PMT 的基本过程可概括为: 入射光子在光阴极发生光电效应产生光电子, 光电子在电场作用下被聚焦并加速, 随后在电子倍增结构中发生多次次级电子发射形成电子雪崩, 最终由阳极收集并输出电荷脉冲. 因此, PMT 的输出可以用积分电荷 Q 或等效光电子数表征, 并依赖于光阴极量子效率, 电子收集效率以及倍增链的增益与统计涨落.

dynode-PMT 采用多级打拿级 (dynode) 串联倍增. 光电子从光阴极出发, 在聚焦电极和分压器提供的阶梯电位差作用下依次撞击各级打拿级, 每次撞击都会发射若干次级电子并被下一级继续加速, 经过多级后形成指数增长的电子数. 阳极收集末级电子并形成电流脉冲. dynode-PMT 的优势在于工艺成熟, 增益与线性较好, 时间响应较快, 其时间分辨主要受电子光学聚焦与首级倍增统计控制. 同时, 多级倍增带来的增益涨落会体现在单光电子 (SPE) 电荷谱的宽度与低电荷尾部中.

MCP-PMT (microchannel plate PMT) 以微通道板作为倍增结构, 由大量毛细玻璃管构成二维阵列, 每个通道内壁覆有次级电子发射材料, 可视为许多并行的独立电子倍增通道. 在通道两端施加电位差后, 入射电子进入通道并在斜入射几何下多次碰撞管壁, 每次碰撞产生次级电子并继续被加速, 最终在通道末端形成电子云并被阳极收集. MCP 的并行通道结构带来更高的电子收集效率与更大的有效探测面积, 但由于通道内漂移路径分布更宽, 以及工艺与读出结构差异, 其 Transit Time Spread (TTS) 往往显著大于典型 dynode-PMT. JUNO 采用 MCP-PMT 与 dynode-PMT 并行部署, 在覆盖率, 效率, 寿命与成本等工程约束之间取得平衡.

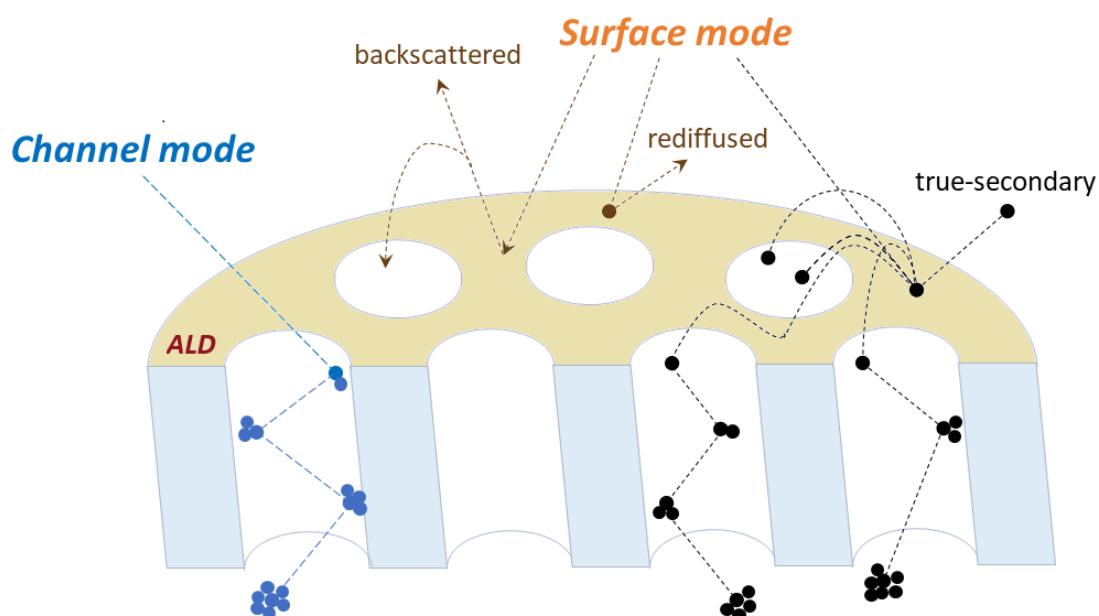


图 2 MCP-PMT 工作原理

3. 典型指标

JUNO 实验对 PMT 的性能要求是:

参数	滨松	北方夜视
QE	30.3% (> 27%)	28.5% (> 26.5%)
CE	95.6	98% (> 96%)
Gain	10^7	10^7
TTS	2.7 ns (< 3.5 ns)	12 ns (< 15ns)
HV(for a 10^7 gain)	2000 V (< 2500 V)	2500 V (< 2800 V)
Lifetime	> 20 yrs	> 25 yrs

表 1 JUNO PMT 性能判据[2]

其中, 量子效率 (QE) 描述光阴极将入射光子转换为光电子的概率, 直接影响单位能量的光电子产额与能量分辨. 收集效率 (CE) 描述产生的光电子被有效引导进入倍增结构并被阳极收集的比例, 在大口径 PMT 中与电子光学聚焦结构密切相关, 其与 QE 的乘积常决定有效光电转换效率. 增益 (Gain) 表示每个光电子最终在阳极形成的电子数, JUNO 选择 10^7 作为工作点, 使得单光电子信号高于电子学噪声并便于稳定触发与电荷测量; 同时过高增益会加速老化并带来非线性风险, 因此需要在噪声裕度与寿命之间折中.

Transit Time Spread (TTS) 则刻画同样的光电子从光阴极到阳极的渡越时间涨落, 它决定了击中时间的本征分辨, 进而影响顶点重建, 时间窗口符合以及背景抑制能力. dynode-PMT 通常具有更小的 TTS, 而 MCP-PMT 的 TTS 较大但可通过统计上大量通道的冗余命中进行补偿.

4. 标定

在 JUNO 中, 每个 PMT 的波形最终都会被积分得到一个电荷量 Q (或 ADC channel), 用于估计该 PMT 在一次事件中记录到的光电子数. 由于 PMT 的倍增链是随机变量的加和, 同样的 1 个光电子并不会产生完全固定的电荷, 而是形成一个单光电子 (SPE) 电荷量概率分布. 同时, 真实数据中还会混入基线噪声 (pedestal), 暗噪声触发, 以及少量多光电子叠加等成分. 因此, 实验必须对 PMT 的电荷谱进行标定, 以建立从电子学读出量到物理量的映射.

JUNO 实验中用到的 PMT 在中山泛亚电业进行测试与封装. 测试上述所有指标, 并且加装分压器以及做防水处理.

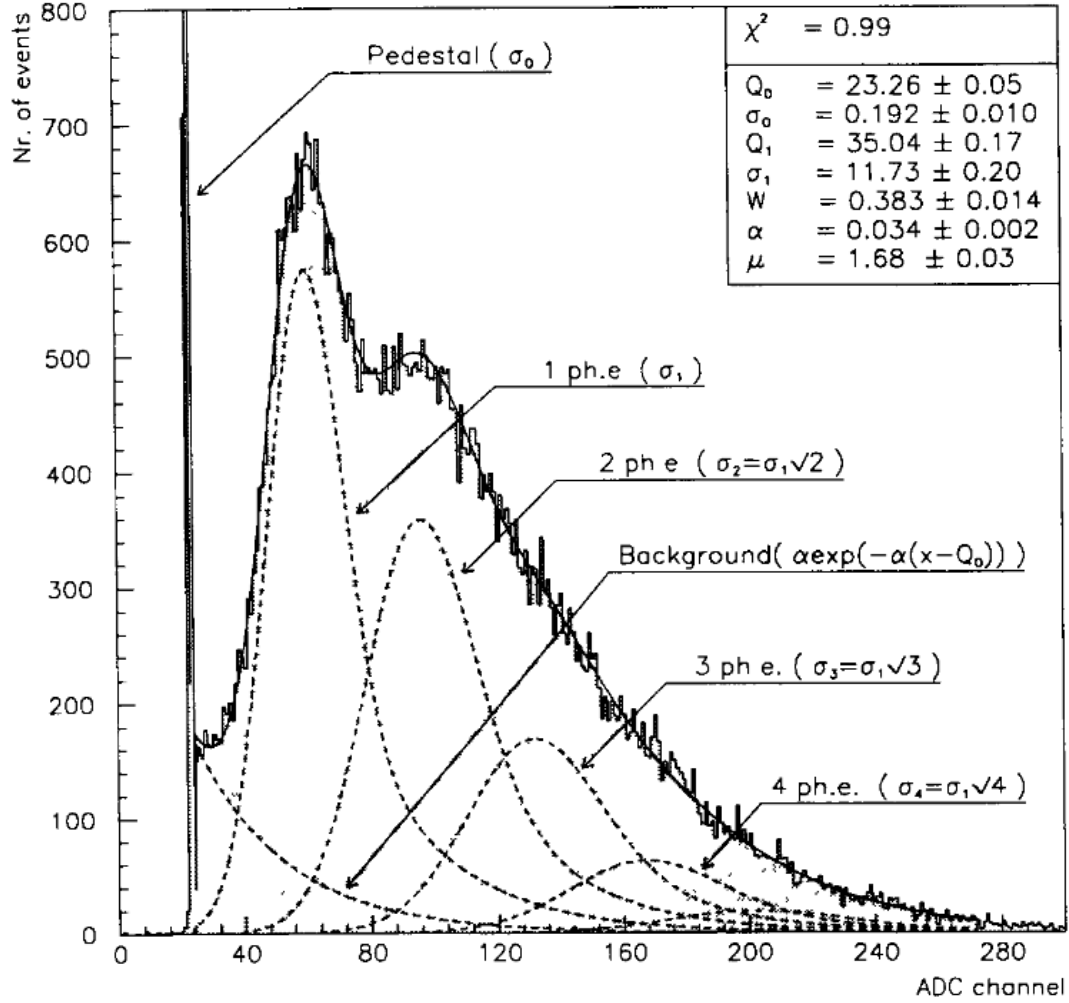


图 3 典型电荷积分直方图[4]

图 3 展示了一个典型的电荷谱拟合例子: 数据直方图由 pedestal, 1 PE 以及 2-4 PE 等分量叠加构成, 并通过拟合得到 Q_1 (SPE 标尺), σ_1 (分辨率) 与 μ (占空比) 等参数。

Bibliography

- [1] “JUNO physics and detector,” *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 123, p. 103927, Mar. 2022, doi: [10.1016/j.ppnp.2021.103927](https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2021.103927).
- [2] A. Abusleme, T. Adam, S. Ahmad, R. Ahmed, S. Aiello, and others, “Mass testing and characterization of 20-inch PMTs for JUNO,” *The European Physical Journal C*, vol. 82, no. 12, p. 1168, Dec. 2022, doi: [10.1140/epjc/s10052-022-11002-8](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-11002-8).
- [3] A. Abusleme, T. Adam, K. Adamowicz, D. Adey, S. Ahmad, and others, “Initial performance results of the JUNO detector.” [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2511.14590>
- [4] E. H. Bellamy, G. Bellettini, J. Budagov, F. Cervelli, I. Chirikov-Zorin, and others, “Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier,” *Nuclear*

Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 339, no. 3, pp. 468–476, Feb. 1994, doi: [10.1016/0168-9002\(94\)90183-x](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90183-x).