

JUNO 20 英寸 PMT 及电子系统使用 PMT 暗计数的大脉冲在泛亚测试平台上的特性描述

Caimei Liu,^{a,b} Min Li,^{a,b} Narongkiat Rodphai,^{a,b} Zhimin Wang,^{a,b,1} Jun Hu,^a Nikolay Anfimov,^f Lei Fan,^a Alberto Garfagnini,^g Guanghua Gong,^h Shaojing Hou,^a Xiaolu Ji,^a Xiaoshan Jiang,^a Denis Korablev,^f Tobias Lachenmaier,^c Si Ma,^a Xiaoyan Ma,^a Zhe Ning,^a Alexander G. Olsheskiy,^f Zhaoyuan Peng,^{a,b} Zhonghua Qin,^a Tobias Sterr,^c Yunhua Sun,^a Alexander Felix Tietzsch,^c Jun Wang,^e Wei Wang,^e Yangfu Wang,^{a,b} Kaile Wen,^a Bjoern Soenke Wonsak,^d Wan Xie,^a Meihang Xu,^a Xiongbo Yan,^{a,b} Yifan Yang,ⁱ Rong Zhao,^e Tong Zhou,^{a,b} Kejun Zhu,^a Jianmeng Dong,^h Pierre-Alexandre PETITJEAN,ⁱ Barbara CLERBAUXⁱ

^aInstitute of High Energy Physics, Beijing 100049, China

^bUniversity of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

^cEberhard Karls Universität Tübingen, Physikalisches Institut, Tübingen, Germany

^dInstitute of Experimental Physics, University of Hamburg, Hamburg, Germany

^eSun Yat-Sen University, Guangzhou, China

^fJoint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

^gDipartimento di Fisica e Astronomia dell'Universita' di Padova and INFN Sezione di Padova, Padova, Italy

^hTsinghua University, Beijing, China

ⁱUniversité Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

E-mail: wangzhm@ihep.ac.cn

ABSTRACT: JUNO 实验的主要目标是利用 20 千吨的液闪探测器确定中微子质量顺序。20 英寸光电倍增管及其 1F3 (三选一) 电子设备对于实现至少在 1 MeV 时 3% 的优异能量分辨率至关重要。对光电倍增管和 1F3 电子设备响应的理解对于理解探测器性能至关重要。本文使用中国泛亚测试平台上的 PMT 暗计数大脉冲信号, 展示了对 JUNO 20 英寸 PMT 及 1F3 电子系统特征的研究。得益于其广泛的幅度范围和高频率, 这些大脉冲信号也被用于研究 PMT 的后脉冲响应。

KEYWORDS: 紫外线、可见光和红外线光子探测器 (真空) (光电倍增管、HPDs、其他), JUNO, PMT 大脉冲, 后脉冲, JUNO 1F3 电子学

¹Corresponding author.

目录

1 介绍	1
2 容器#D 带有 1F3 电子原型	2
3 大型脉冲的 20 英寸 PMT	4
3.1 振幅与电荷	5
3.2 定时	5
3.3 速率	7
3.4 相关脉冲	7
4 1F3 电子设备的特征，带有 20 英寸的大脉冲	8
4.1 噪声	8
4.2 幅度与电荷的动态范围	8
4.3 脉冲过冲与 1F3 电子器件	10
4.4 两个动态范围的组合	12
5 总结	13

1 介绍

中微子及其振荡的研究在我们理解粒子物理和探索这一领域的知识前沿方面起着特殊的作用。中微子振荡理论通过研究太阳、大气、加速器和反应堆中微子得到了验证和完善。事实上，唯一来自中微子振荡的实验证据是不为零的中微子质量，这是我们第一个关于超出标准模型物理 [1] 的积极迹象。江门地下中微子观测站 (JUNO) 计划通过精确测量反应堆反中微子能量谱来识别中微子质量顺序 (NMO)。如图 1 所示，JUNO 的中央探测器 (CD)，是一个放置在纯净水池中的球形探测器，含有 20 千吨液体闪烁体 (LS)，将使用 17612 个 20 英寸光电倍增管 (LPMTs) [2] 和 25600 个 3 英寸光电倍增管 (SPMTs) [3, 4] 来实现超过 78% 的光阴极覆盖率和出色的能量分辨率 $3\%/\sqrt{E(\text{MeV})}$ 。此外，还将有 2400 个 LPMT 安装在 CD 的不锈钢网格外部。这些光电倍增管与外部水池形成一个水切伦科夫探测器，可以屏蔽内部环境中的自然放射性，并与顶点跟踪器 (TT) 一起标记宇宙缪子作为反符合探测器。除了 NMO 之外，巨大的有效体积和前所未有的能量分辨率提供了许多其他粒子物理和天体粒子物理学 [5] 领域问题的令人兴奋的机会。

PMTs 在所有典型中微子实验中都被使用和研究，包括 Super-Kamioka[6], SNO[7], KamLAND[8], Daya Bay[9], RENO[10] 和 Double Chooz[11]。JUNO 的 20012 个 LPMTs 包括来自滨松光子学株式会社的 5000 个倍增 PMTs。(HPK R12860)[12] 和来自北方夜视技术有限公司 (NNVT GDB6201) 的 15012 微通道板光电倍增管 (MCP PMTs)[13]。然而，一些较大的脉冲仍需通过更大的统计数据进行进一步研究，因为现有的研究 [14, 15] 仅限于个别 LPMTs。

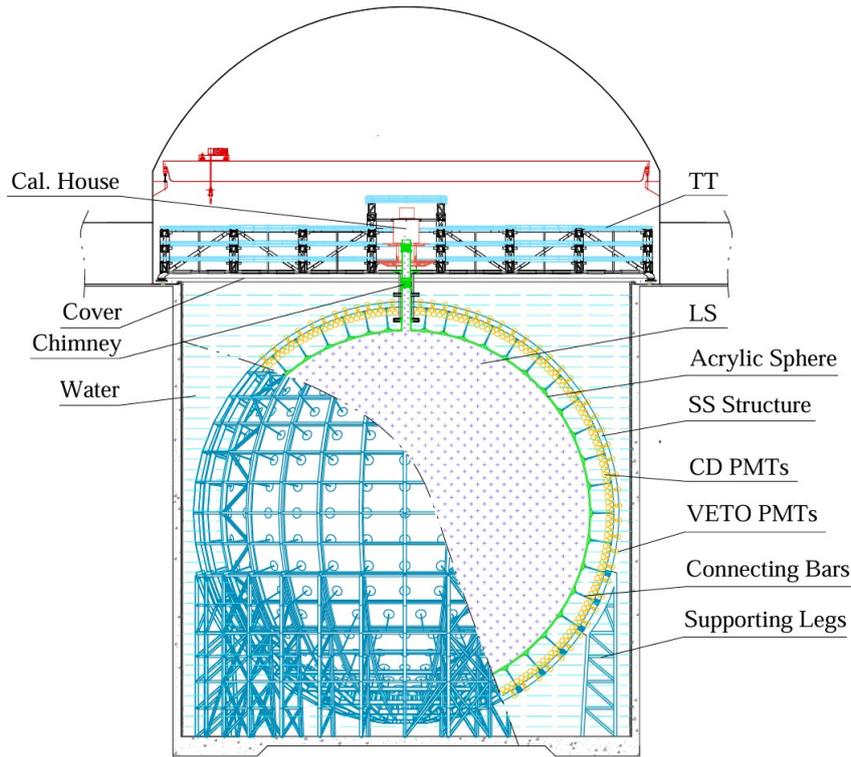


图 1: JUNO 探测器的示意图 [16]。

为了实现 JUNO 设计的能谱分辨率，所有 LPMT 都通过了验收测试，并已封装（高压分压器牢固焊接在 PMT 上）[2, 17]。为达到 JUNO 的物理目标和实验要求，开发了 1F3 电子设备 [18–21]。其关键组件是全局控制单元 (GCU)，每个 GCU 有 3 个通道。每个通道配备两个 ADC，允许同时读取 3 个 PMT。GCU 提供宽广的动力范围从 1PE 到 1000PE，并展现出出色的线性响应。总共将使用 6681 个 1F3 电子 UWBoxes（水下盒）用于 JUNO 中的所有 LPMT。为了评估封装的 LPMT 性能并尽早了解其在 JUNO 探测器中的反应，使用了机载脉冲发生器来验证硬件性能 [19, 21]。一些已封装的 LPMT 使用 LED 光源和暗噪声触发与 1F3 电子 UWBox 在中国广东省江门市的 JUNO 泛亚 PMT 测试和封装站的 #D 容器中进行性能测试。在单光电子模式下，通过 LED 光源触发研究了 LPMT 的基本性能参数 [22]。然而，PMT 自产生的大脉冲是验证 1F3 电子设备的良好信号，因其具有宽幅值范围和高频率。

本文重点研究了 LPMT 大脉冲与 1F3 电子学的综合响应特性，使用 PMT 自发产生的大暗计数脉冲。第 2 节简要介绍了容器 #D 测试系统和 1F3 电子学。LPMT 在暗室中的大信号显示在第 3 节中。第 4 节讨论了两个范围的 1F3 电子学特性和一致性。最后，总结内容在第 5 节给出。

2 容器 #D 带有 1F3 电子原型

如图 2 [22] 所示，容器 #D 测试系统的主要部分是一个暗室，该暗室通过多层硅铁屏蔽被动防止电磁场干扰。它总共有 32 个抽屉，这些抽屉是独立的。系统配备了 11 个 UWBoxes，

允许同时测试 32 个 LPMT (留有一个 1F3 通道未连接)。每个抽屉都配备有 LED 光源, 可以实现 LED 触发和 PMT 自触发两种模式。由于电子设备长期运行可能产生的热量, 安装了一个 HVAC (供暖、通风和空调系统)。它设置为保持温度在 23°C 以确保容器内的稳定工作条件。

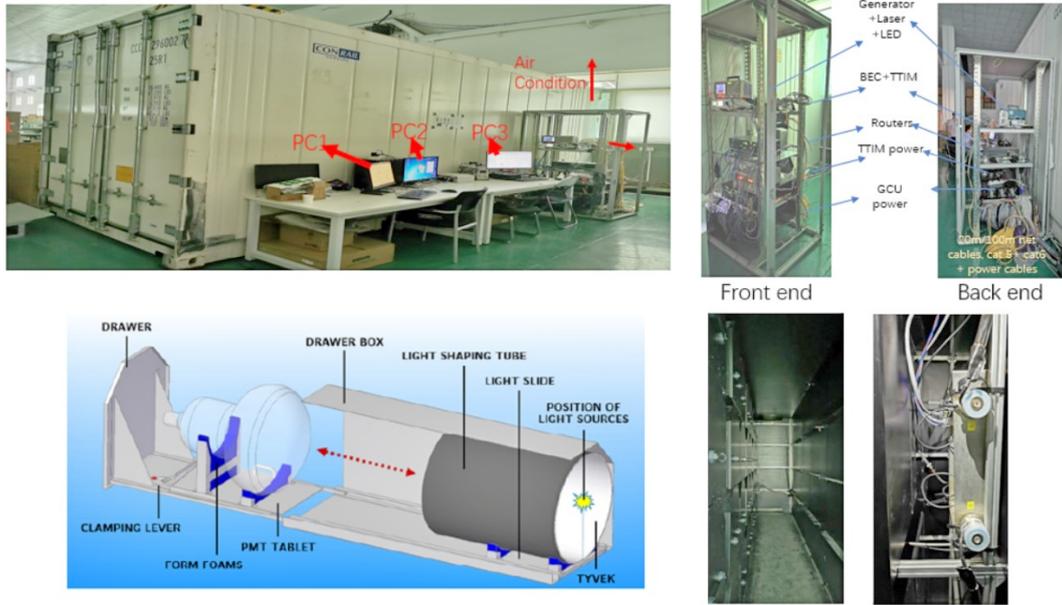


图 2: 左上: 带有控制 PC 的 20 英尺集装箱#D 的外部视图。右上: 安装电源的机架。左下: 抽屉箱的示意图。右下: 集装箱的内部视图以及抽屉之间安装的 JUNO 1F3 电子设备盒。

如图 3 所示, 每个 1F3 电子 UWBox 包含三个高电压单元 (HVU) 和一个全局控制单元 (GCU)。每个 HVU 独立为一个 LPMT 提供电源, 并将 PMT 信号与高压解耦。LPMT 的模拟信号到达 GCU 后, 通过一个定制的前端芯片分为两个并行流。这两个并行流随后被输入到两个前置放大器中, 其中一个具有高增益 (精细范围), 另一个具有低增益 (粗略范围)。之后, 它们使用单独的 14 位、1 GS/s 定制 Flash 模拟-数字转换器 (FADC) 转换为数字信号, 并根据不同的范围进行标记。校准后, 高增益精细范围的动态范围从零 P.E. 到 100 P.E, 分辨率为 0.1 P.E 或更高。该范围的转换因子约为 0.12 mV/ADC¹。另一方面, 低增益粗略范围的动态范围为 100 P.E 到 1000 P.E, 分辨率同样为 1 P.E 或更高。该范围的转换因子约为 0.83 mV/ADC。这些值基于 LPMT 的名义增益为 10^7 。FADC 输出的数字信号进一步由 Xilinx Kintex-7 FPGA (XC7K325T) 处理, 该 FPGA 担任 GCU 的核心部分。FPGA 实现了诸如本地触发生成、电荷重建、时间戳标记和临时存储等功能。此外, GCU 配备了 2 GB 的 DDR3 内存, 可以在输入速率突然增加时提供更大的内存缓冲区。为了了解探测器中封装 LPMTs 的响应, 在容器 #D 中使用 1F3 电子设备测试了一部分 (约 10%, 此处分析了其中的 5%) 封装好的 LPMTs。

¹ADC 作为一个单位表示最低有效位 (LSB)。

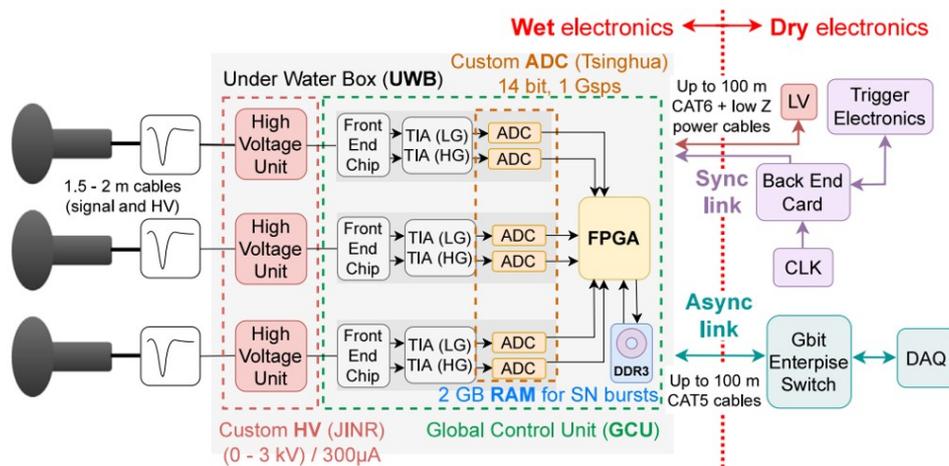


图 3: JUNO 1F3 电子系统示意图 [19]。

3 大型脉冲的 20 英寸 PMT

PMT 的大信号测试采用自触发模式进行，电子阈值设置为 1000 ADCs (约 120 mV) 或 4000 ADCs (约 480 mV)，用于细范围。同一 GCU 的三个电子通道使用相同的触发器，这意味着当其中一个被触发时，另外两个通道也会同步获取数据。每个触发的时间窗口设定为十微秒。每次运行包括 1 万个触发事件。由于高触发阈值，只有由自然放射性和宇宙射线引起 PMT 自身产生的大脉冲会被记录 [14, 15]。图 4 显示了大脉冲率与阈值的关系。

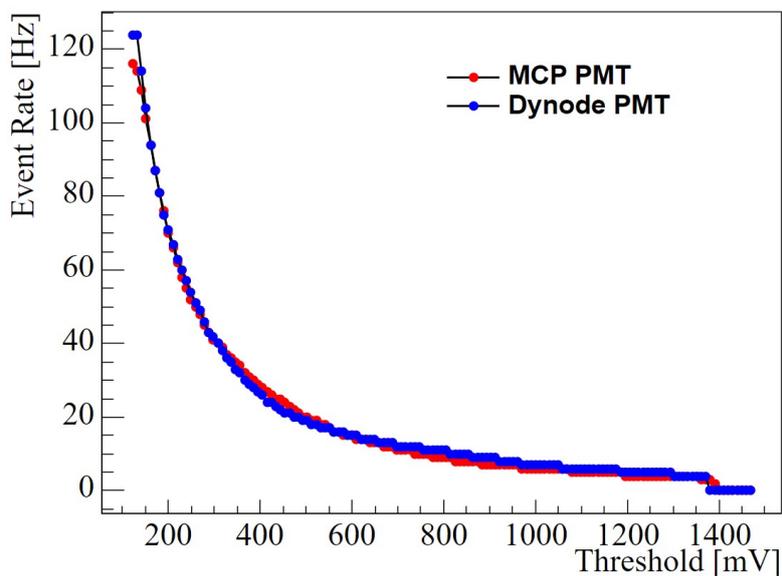


图 4: 阈值扫描的事件率，其中一个为单通道倍增板 PMT (蓝色)，另一个为 MCP PMT (红色)。

3.1 振幅与电荷

总共测试了 280 个 dynode 和 621 个 MCP 封装的 20 英寸 PMT。图 5 显示了一个记录的波形，在细范围和粗范围内进行比较。触发脉冲位于读出窗口 $[0,10]\mu$ 秒的约 600 纳秒处。通过测试，共测量了 681 个 PMT，阈值为 1000 ADCs，其余的则使用 4000 ADCs 进行了测试。

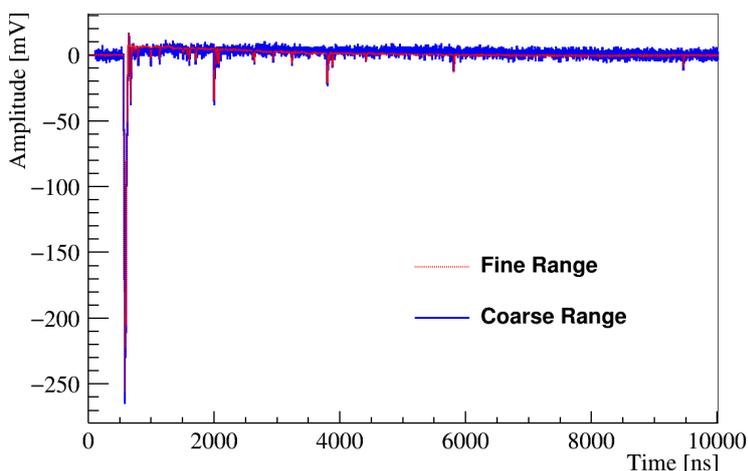


图 5: 示例基线校正波形的一个记录脉冲在精细范围（红色直方图）和粗略范围（蓝色直方图）。

有许多方法可以用于波形重建 [23, 24]。这里采用了直接积分法进行电荷提取，因为它具有快速处理速度和低资源消耗的特点。图 6a 展示了 MCP PMT 的幅度和电荷分布情况。鉴于设定阈值为 1000 ADCs，幅度从 120 mV 开始。可以看出细量程测量的上限约为 1400 mV。如果超出细量程的动态范围，则需要使用粗量程进行测试。通过在幅度上应用电子阈值，可以分别从每个 GCU 通道获得每支 PMT 的大脉冲率。从图 6b 可以观察到大脉冲的电荷分布也很广泛，大多数信号集中在 100 P.E. 附近。直到 400 P.E. 值时，两个量程的电荷分布大多是一致的。

3.2 定时

上升时间、下降时间和全宽半最大值（FWHM）的大脉冲在图 7 中以 1000 个 ADC 门限的 DAQ 显示。上升时间是从波形的最大幅度的 10% 上升到 90% 所需的时间，而下降时间是从 90% 下降到 10% 所需的时间。典型上升时间为 MCP PMTs 为 16.2 纳秒，dynode PMTs 为 6.5 纳秒。典型的下降时间为 MCP PMTs 为 20.2 纳秒，dynode PMTs 为 9.4 纳秒。典型的 FWHM 值为 MCP PMTs 为 22.8 纳秒，dynode PMTs 为 11.6 纳秒。与使用 LED 光源进行单光电子水平测量的参考 [22] 中的数据相比，结果显示 dynode PMT 的时间参数变化最小，而 MCP PMT 显示出显著差异。图 7d 显示了信号幅度和 FWHM 之间的相关性，上部和下部分别对应于 MCP PMT 和 dynode PMT。分布表明，随着信号幅度的增加，dynode PMT 的 FWHM 保持稳定且狭窄，而 MCP PMT 的 FWHM 初始时分布较宽，但随着信号幅度的增加逐渐变窄。

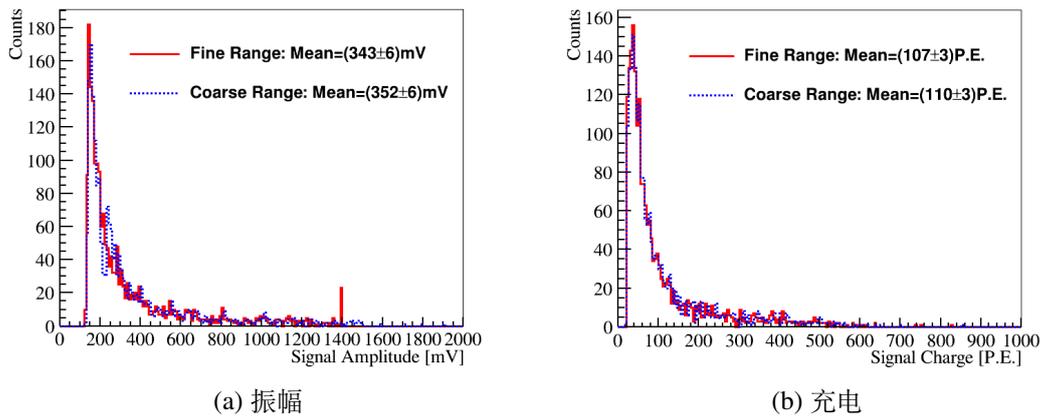


图 6: 幅度 (a) 和电荷 (b) 分布的 NNVT MCP PMT 对于精细范围 (红色直方图) 和粗略范围 (蓝色直方图)。

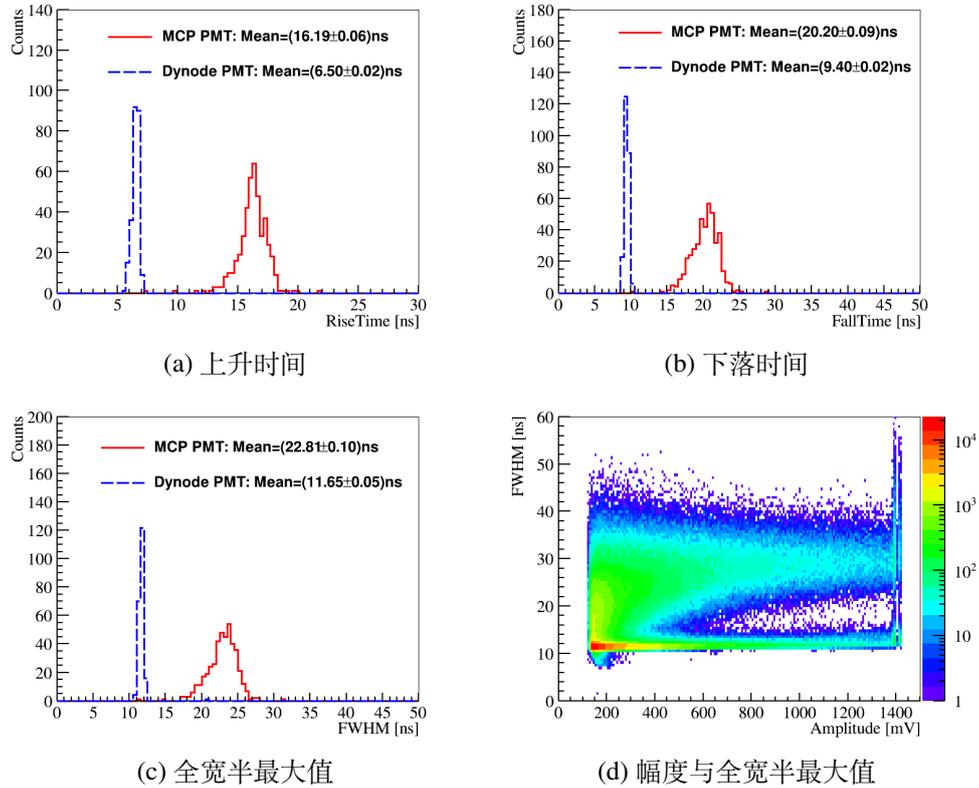


图 7: 上升时间 (a)、下降时间 (b) 和全宽半最大值 (c) 分布的 MCP 光电倍增管 (红色柱状图) 与 dynode 光电倍增管 (蓝色柱状图), 具有精细范围。此外, 给出了幅度与全宽半最大值 (d) 的关系。

3.3 速率

PMT 自生成大脉冲的速率定义为事件数除以测试时间，阈值为 1000 ADCs。对于每个 PMT，测试时间是从第一次触发到最后一次触发的时间段，事件数量是在测试时间内超过设定阈值的信号样本的数量。根据计算，两种类型的 PMT 检测到的大信号事件率基本上是等效的。如图 8 所示，在 1000 ADCs 阈值下，大信号的平均速率仅为 127 Hz。在参考文献 [14] 中，单独测量的 LPMT 事件率约为 100 Hz（包含在图 8 中），并解释说事件的主要来源是宇宙射线、自然放射性等。

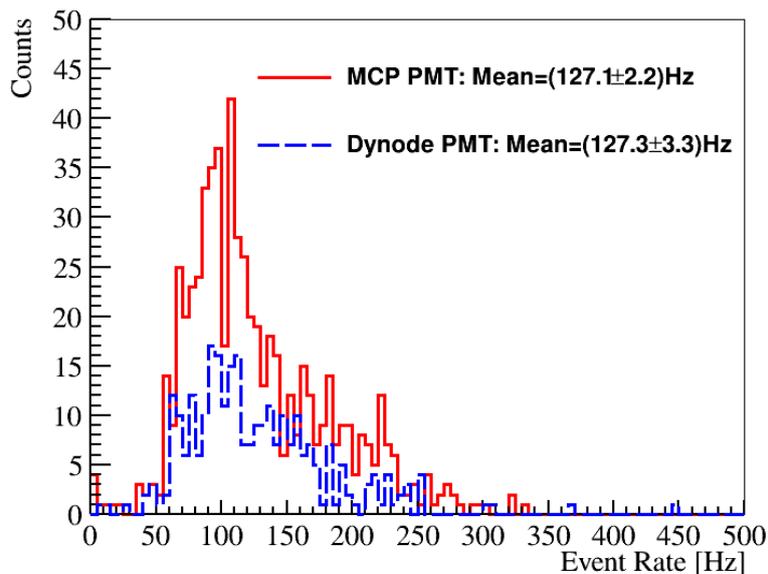


图 8: 大脉冲事件率的 MCP 光电倍增管 (红色直方图) 和 dynode 光电倍增管 (蓝色直方图)。

3.4 相关脉冲

由于 PMT 自生成大脉冲在幅度上的扩散分布，我们可以利用它们来研究 PMT 的相关脉冲。在记录的数据中可以观察到信号脉冲（PMT 自生成大脉冲）后面常常跟随有后脉冲（APs），这些后脉冲可以分为纳秒尺度的快速 AP 和微秒尺度的慢速 AP。快速 AP 主要由从第一倍增极反向散射的光电子触发。这些光电子在电场的作用下减速并向光电阴极移动，然后加速回到倍增极，从而生成靠近信号脉冲的后脉冲。慢速 AP 可以由离子化的残留气体触发。当光电子从光电阴极到倍增极加速时，残留气体分子可能会被离子化。正离子向光电阴极加速并产生二次电子，最终引发远离信号脉冲的慢速 AP。图 9 显示了后脉冲到达时间（与信号脉冲的时间间隔）与其电荷之间的二维分布，其中主脉冲（PMT 自生成大脉冲）位于窗口内的约 545 纳秒处，光电子 (P.E.) 的电荷根据峰值电荷 [25] 计算。它显示出如图 [26, 27] 所示的 20 英寸 PMT 定时上的典型 AP 特征，在此电荷中的所有典型峰都位于 MCP PMT 和倍增极 PMT 中仅有几个 P.E. 的平台上方。第一个纳秒尺度区域应为快速 AP 成分，随后几个聚类区域应由不同气体离子引起的慢速 AP 成分造成，其余则归因于其他原因和背景。本研究针对所有 500 纳秒后的慢速 AP 成分。

图 10a 和 10b 进一步调查了总 AP 电荷与初级脉冲电荷的行为。在由两条红线划分的 MCP PMT 的二维分布 (图 10a) 上很容易识别出三个区域 (左上方, 中间, 右下方)。左上

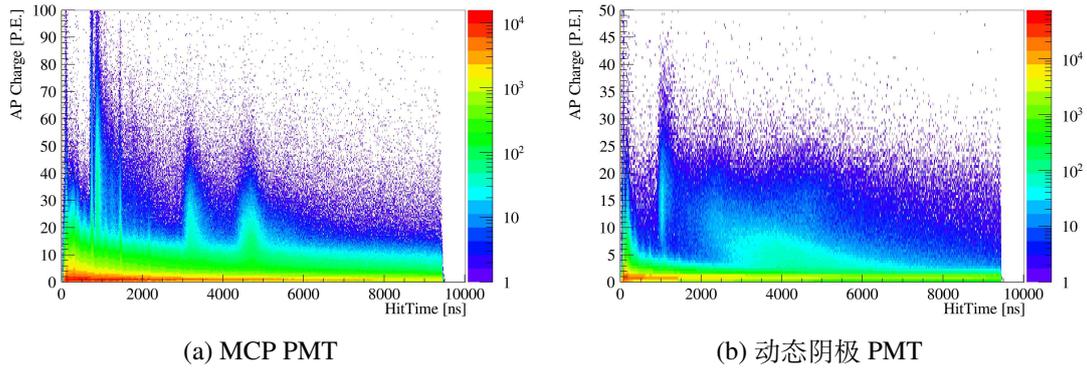


图 9: 相关脉冲 (AP) 在 MCP PMT (a) 和 dynode PMT (b) 自生大脉冲后的时间和电荷。

方的区域显示出更大的 AP 电荷 (与初级脉冲后大约 500 ns 处的 AP 相关), 而其初级脉冲电荷较小 (大多数小于 50 个 P.E.)。右下方的区域更像是一个独立的峰值, 从初级脉冲中出现, 大约有 500 P.E. 中间区域的特点是 AP 和初级脉冲的总电荷之间存在比例关系, 这已在之前的 [26, 27] 研究中描述过。相反, dynode PMT (图 10b) 仅显示两个区域, 因为右下方的一个消失了。图 10c 和 10d 展示了每个初级脉冲的总 AP 计数相对于初级脉冲电荷的情况。它们显示出与 MCP PMT 的三个电荷分布区域相似分布特征, 而对于 dynode PMT 则只有两个区域。

关于 AP 与其初级脉冲的电荷比, 图 11 显示了图 10 上所有初级脉冲的计算结果。可以推断: 当初级脉冲的电荷较小时, AP 的电荷比远高于较大的初级脉冲, 这应该与图 10 上的左上方区域事件有关。对于较大的初级脉冲, AP 的电荷比也大于文献中之前的测量值 [26, 27], 这是由图 9 上较强的平台所贡献的。

图 12 显示了当初始脉冲大于 100 个 P.E. 时, 两种类型的光电倍增管的 AP 电荷比的一维分布。无论是否考虑时间上的少量光电子平台。以 2 个 P.E. 为阈值, 栅格光电倍增管的平均 AP 电荷比从 25.9% 下降到 12.9%, 而 MCP 光电倍增管则从 28.9% 下降到 22.6%。与本文中扫描站系统的结果 [27] 相比, 栅格光电倍增管的结果一致, 但 MCP 光电倍增管的结果仍然较大, 因为在我们的测试中我们考虑了所有慢 AP 贡献, 而不仅仅是气体电离的一种。

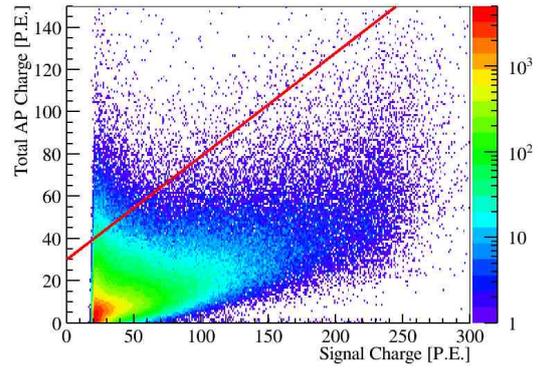
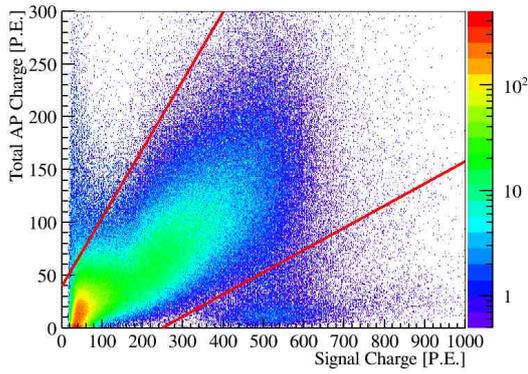
4 1F3 电子设备的特征, 带有 20 英寸的大脉冲

4.1 噪声

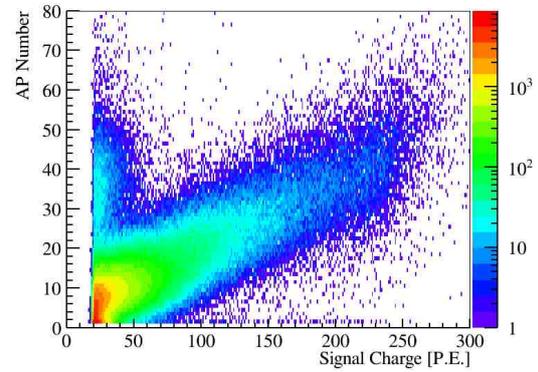
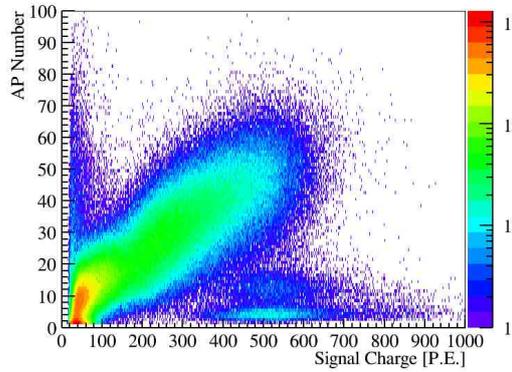
如图 13 所示, 通过信号窗口前 100 纳秒的标准偏差来评估容器#D 中的 32 个电子通道的平均噪声水平。如果这一部分中有脉冲, 则在计算均值之前移除该脉冲。通过这种方法, 我们可以估计精细范围内的噪声水平平均约为 3.2 ADC (约 0.4 毫伏, 约 0.05 PE@1e7 增益), 粗略范围内的噪声水平平均约为 2.5 ADC (约 2.1 毫伏, 约 0.5 PE@1e7 增益)。

4.2 幅度与电荷的动态范围

众所周知, PMT 脉冲的电荷与其幅度成正比。因此, 使用线性函数来建模两种范围内 PMT 脉冲的电荷与幅度之间的关系。MCP PMT 的一个例子显示在图 14a 和图 14b 中。所有测试过的 PMT 拟合斜率显示在图 15 中。典型的 dynode PMT (HPK) 细范围和粗范围的

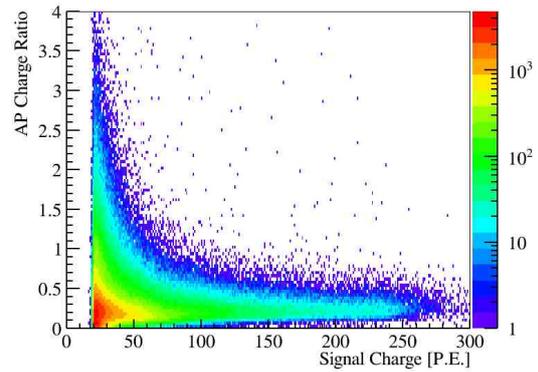
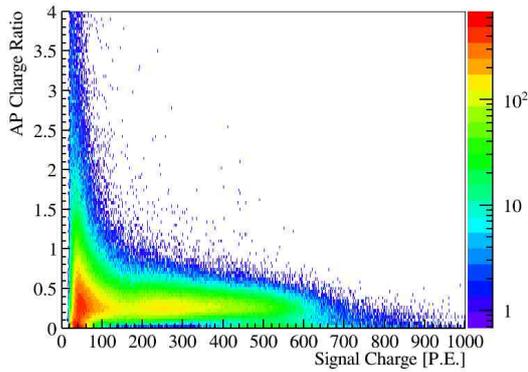


(a) 主脉冲与 AP 脉冲之间的电荷相关性对于动态 MCP 光电倍增管 (b) 初级和 AP 脉冲之间的电荷相关性对于动态 PMT



(c) AP 计数与 MCP PMT 的初级电荷对比 (d) 阳极计数与初级电荷对比动态光电倍增管

图 10: MCP PMT 和 dynode PMT 的初级脉冲下的二维分布图, 包括 AP 数量和电荷。



(a) MCP PMT

(b) 倍增 dynode PMT

图 11: AP 与初级脉冲电荷比的二维分布图对于 MCP 光电倍增管 (a) 和 dynode 光电倍增管 (b)。

斜率约为 0.16, 而 MCP PMT 的斜率则约为 0.40。这两种 PMT 之间的差异主要来自于它们

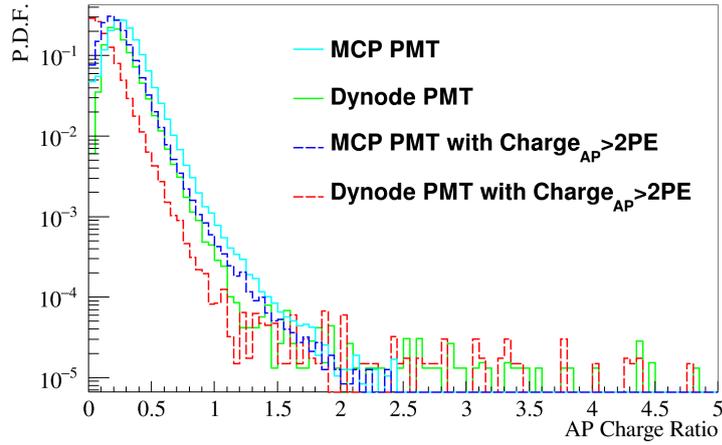


图 12: 初级脉冲的 AP 电荷比。

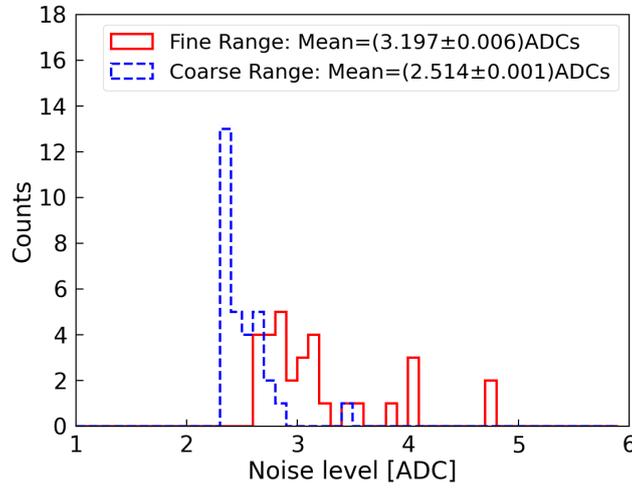


图 13: 1F3 电子原型在精细范围（红柱状图）和粗略范围（蓝柱状图）的噪声。

之前的脉冲形状讨论。

此外，拟合的相对误差计算为测量值与拟合值之差与拟合值的比例。两种 PMT 在粗量程范围内的相对拟合误差分别显示在图 16a 和图 16b 中。这意味着同一幅度下 MCP PMT 的电荷变化约为 40%，远大于 dynode PMT 的变化。这个因素也可以反映电荷测量的分辨率，这种差异可能归因于 MCP PMT 电荷分布的特殊长尾结构 [25]。还可以看出，在细量程范围的测量范围内，两种 PMT 都显示出幅度与电荷之间的良好线性关系。然而，随着幅度继续增加，MCP PMT 的线性关系保持不变，而 dynode PMT 开始表现出幅度和电荷之间的非线性关系。

4.3 脉冲过冲与 1F3 电子器件

图 5 是从 PMT 自触发中获得的典型波形，其中可以在脉冲结束时观察到过冲。

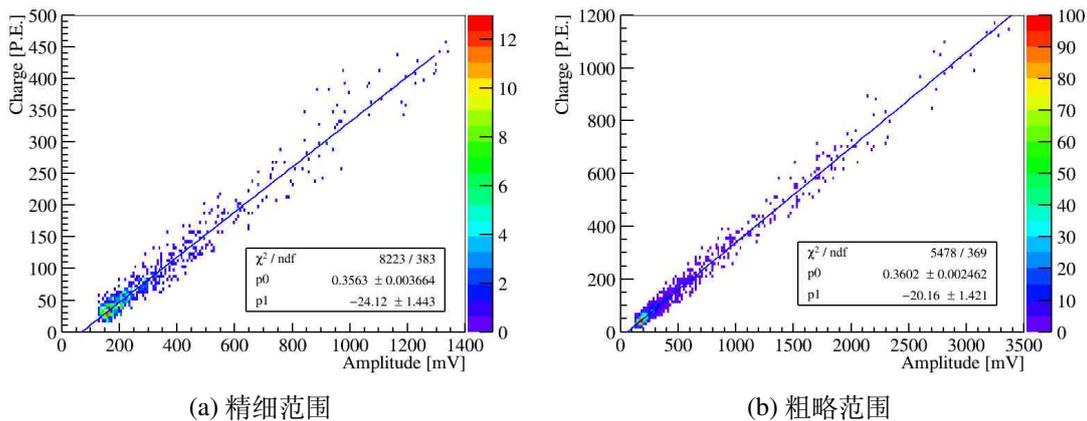


图 14: 电荷与精细范围 (a) 和粗略范围 (b) 振幅之间的关系。

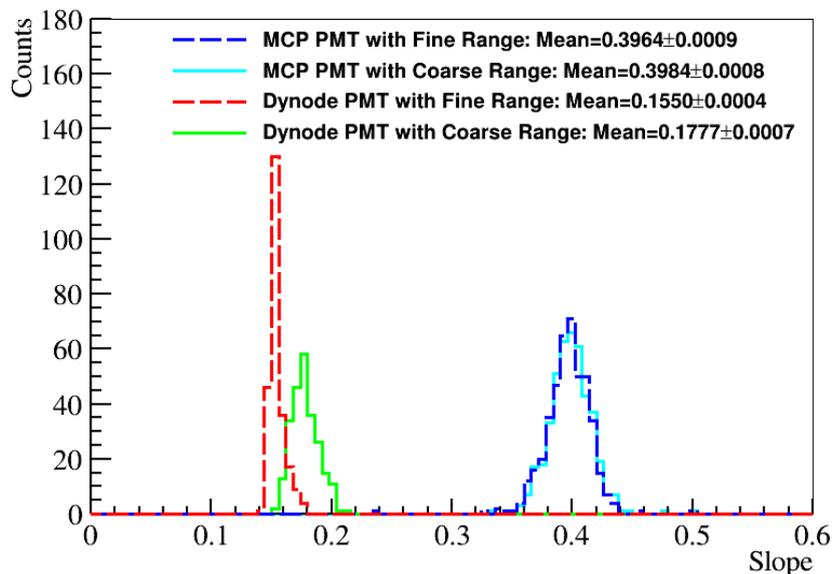


图 15: MCP PMT 和 dynode PMT 在两个范围内的幅度-电荷拟合斜率。

过冲是由 HV 分压器中分裂电容放电引起的，该电容用于高压和 PMT 脉冲，具有正 HV[17]。

过冲直接影响了 PMT 电荷测量的线性度、系统触发以及能量重建。

通过优化电压分压器，已将过冲幅度限制在大约 1% 左右。

然而，在实验工程中，由于存在延伸电缆、连接器和电子设备内部的阻抗匹配，最终的过冲幅度预计将超过这一限制。

之前的研究所表明波形中的过冲幅度与噪声和信号幅度 [22] 相关联。

小信号的过冲幅度容易受到暗噪声的影响。

在这项研究中，我们使用了具有高阈值的数据。

在这里，过冲幅度与信号幅度成正比。

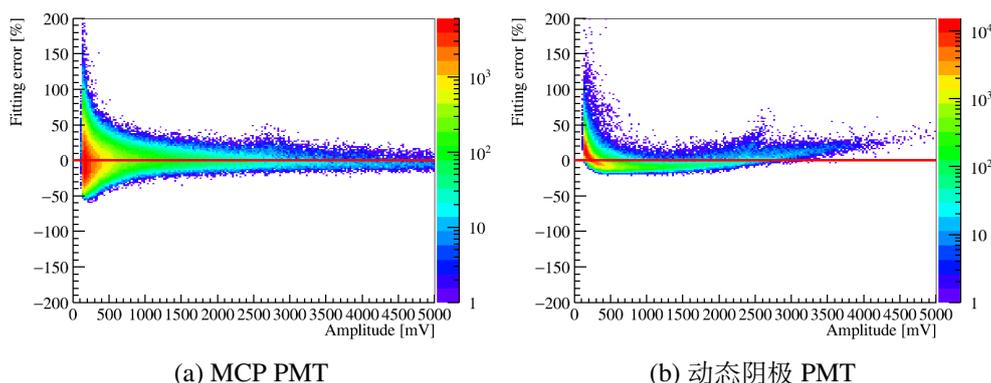


图 16: 电荷和幅度的相对拟合误差随幅度的变化, 对于 MCP PMT (a) 和 dynode PMT (b)。

图 17 展示了对于一个 MCP PMT 和一个粗范围的 dynode PMT, 过冲幅度比随信号幅度变化的关系, 分析时未应用电子阈值。

随着信号幅度的增长, 过冲幅度比保持相对稳定。

因此, 为每个 PMT 获取平均过冲幅度比就足够了。

如图 18 所示, 在细和粗范围内, 平均过冲幅度比均为 6%。

9.5%处的小突起是通过波形检查发现的, 原因是过冲峰值显著受到反射的影响。

此外, 对于 dynode PMT 和 MCP PMT 的过冲幅度比结果相当。

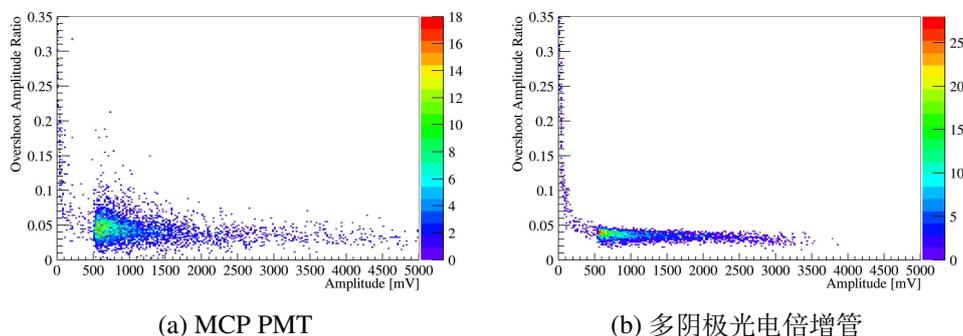


图 17: 振幅比的二维分布图 (超冲与主脉冲), 对于一个 MCP 光电倍增管 (a) 和一个 dynode 光电倍增管 (b), 采用粗略范围。

4.4 两个动态范围的组合

由于从两个范围输出的波形实际上是同一个脉冲但在不同增益系数下放大后的结果, 理论上两者在相同单位下的幅度和电荷应该保持一致。在分析过程中观察到, 精细范围和粗略范围的上限测量值分别约为 1380 毫伏和 5000 毫伏。超过这些上限的波形将表现出饱和现象, 这会导致对电荷值的低估。因此, 在精细范围内使用一阶线性函数进行拟合, 并用获得的斜率作为一致性参数, 如图 20 所示。在精细范围内, 幅度和电荷都表现出良好的一致性, 其值分别约为 99%和 97%。换句话说, 两个范围的放大因子大约为 98%。使用相同的方法, 对于电荷的拟合误差大于对幅度的拟合误差, 如图 19 所示。

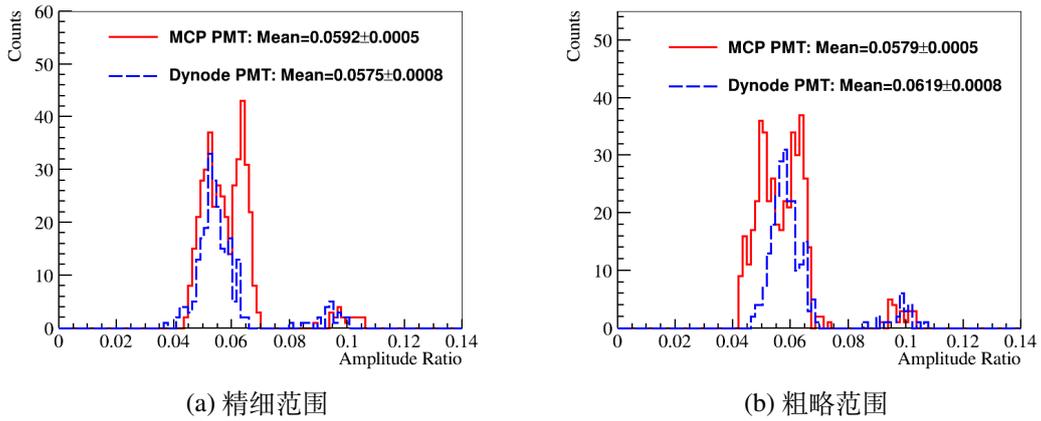


图 18: MCP PMT (红色柱状图) 和 dynode PMT (蓝色柱状图) 在精细范围 (a) 和粗略范围 (b) 的幅度超调比。

建议在精细范围内脉冲的幅度高于 1200 毫伏或 1000 个 ADC 时, 从精细范围切换到粗略范围。

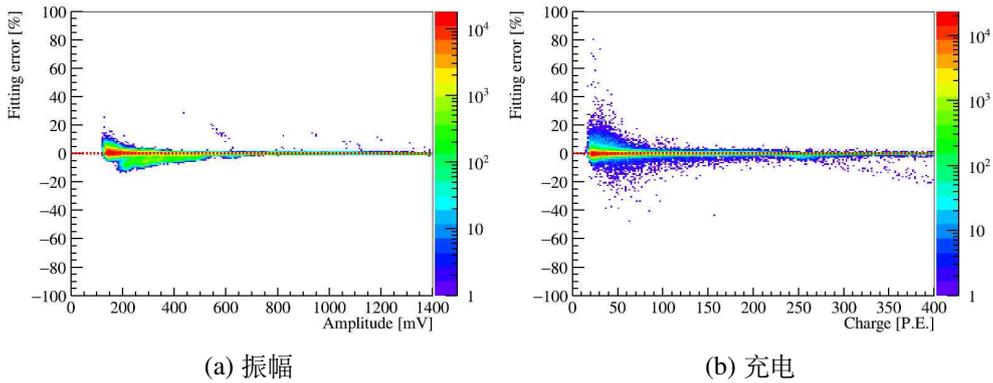


图 19: 幅值 (a) 和电荷 (b) 在精细范围与粗略范围之间的相对拟合误差。

同一通道的两个范围由同一个时钟脉冲触发。理论上, 两个输出脉冲的击中时间应该是相同的。然而, 由于时钟脉冲的 8 纳秒周期, 这两个范围并不是严格在同一时点被触发。因此, 如图 21 所示, 两个范围内脉冲的击中时间存在一个不可预测且小于一个时钟脉冲周期的时间差。这与 PMT 的类型无关, 而是由电子设备本身引起的。

5 总结

随着 JUNO 20 英寸盆栽 PMT 与 1F3 电子原型在泛亚测试平台的大规模测试, 我们获得了一批关于 PMT 自生脉冲的样本。每只 PMT 的速率约为 100 赫兹, 无论是 MCP 还是 dynode PMTs, 在地面上的阈值都大约为 100 毫伏 (或 10 个光电子)。此外, 还评估了 PMT 自生脉冲的时间和电荷特性。由于信号幅度分布广泛, 我们进一步研究了后脉冲的时间分布, 以及它们的数量和电荷相对于主脉冲电荷的变化。基于精细范围和粗略范围的数

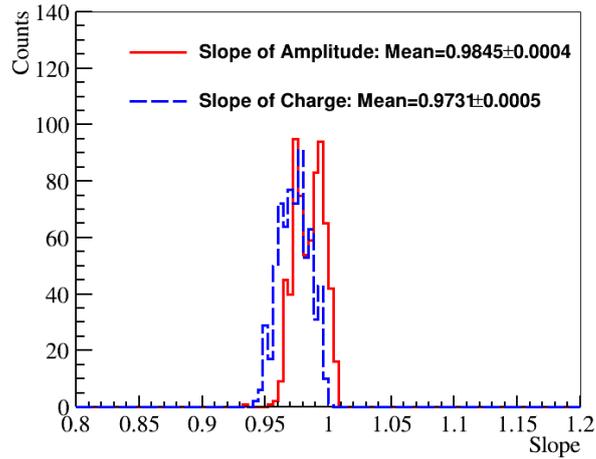


图 20: 两个范围内的幅度（红色直方图）和电荷（蓝色直方图）的一致性。

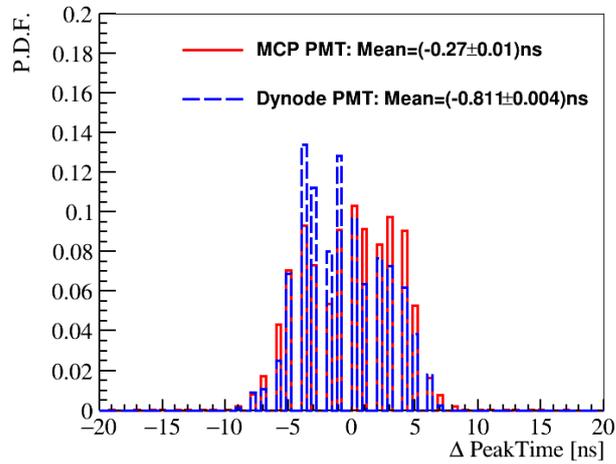


图 21: 两个范围内 MCP 光电倍增管（红色直方图）和 dynode 光电倍增管（蓝色直方图）峰值时间的差异。

据，我们检查了幅度与电荷之间的线性关系、两个动态范围的定时，以及两个范围内在幅度和电荷上的一致性。

致谢

本工作得到中国国家自然科学基金（项目编号：11875282）、中国科学院战略重点研究计划（资助号：XDA10011100）以及中科院粒子物理卓越创新中心的支持。

参考文献

- [1] C. Giganti, S. Lavignac, and M. Zito. Neutrino oscillations: The rise of the PMNS paradigm. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 98:1–54, 2018. ISSN 0146-6410. doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2017.10.001>. URL
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014664101730087X>.
- [2] Angel Abusleme et al. Mass testing and characterization of 20-inch PMTs for JUNO. *European Physical Journal C*, 82(12):1168, 2022. doi: 10.1140/epjc/s10052-022-11002-8.
- [3] Chuanya Cao et al. Mass production and characterization of 3-inch PMTs for the JUNO experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1005:165347, 2021. doi: 10.1016/j.nima.2021.165347.
- [4] Si-Yuan Zhang, Yong-Bo Huang, Miao He, Cheng-Feng Yang, and Guo-Ming Chen. Sub-GeV events energy reconstruction with 3-inch PMTs in JUNO. *Nuclear Science and Techniques*, 36(5):84, 2025. doi: 10.1007/s41365-025-01678-4.
- [5] Fengpeng An et al. Neutrino Physics with JUNO. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 43(3):030401, 2016. doi: 10.1088/0954-3899/43/3/030401.
- [6] S. Fukuda and et.al. The Super-Kamiokande detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 501(2): 418–462, 2003. ISSN 0168-9002. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)00425-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)00425-X). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890020300425X>.
- [7] V. Albanese and et.al. The SNO+ experiment. *Journal of Instrumentation*, 2021. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:118353430>.
- [8] M.P. Decowski. Kamland’s precision neutrino oscillation measurements. *Nuclear Physics B*, 908: 52–61, 2016. ISSN 0550-3213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2016.04.014>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0550321316300529>. Neutrino Oscillations: Celebrating the Nobel Prize in Physics 2015.
- [9] Feng Peng An et al. Measurement of electron antineutrino oscillation based on 1230 days of operation of the Daya Bay experiment. *Physical Review D*, 95(7):072006, 2017. doi: 10.1103/PhysRevD.95.072006.
- [10] Soo-Bong Kim. Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance at RENO. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 235-236:24–29, 2013. ISSN 0920-5632. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2013.03.006>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563213001096>. The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics.
- [11] A. Cabrera. The Double Chooz Experiment. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 229-232: 87–91, 2012. ISSN 0920-5632. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2012.09.014>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563212002319>. Neutrino 2010.
- [12] Hamamatsu Photonics K.K. R12860 datasheet, 2019. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/type/R12860/index.html>.
- [13] Northern Night Vision Technology Ltd. Specification for GDB-6201 microchannel plate type photomultiplier PMT (in Chinese), 2019. <https://max.book118.com/html/2020/0214/7002125152002115.shtm>.
- [14] Yu Zhang, Zhimin Wang, Min Li, Yongpeng Zhang, Yaoguang Wang, Zhaoyuan Peng, Changgen Yang, and Yuekun Heng. Study of 20-inch PMTs dark count generated large pulses. *Journal of Instrumentation*, 17(10):P10048, oct 2022. doi: 10.1088/1748-0221/17/10/P10048. URL <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/10/P10048>.

- [15] Yu Zhang, Zhimin Wang, Min Li, Caimei Liu, Narongkiat Rodphai, Yongpeng Zhang, Jilei Xu, Changgen Yang, and Yuekun Heng. Dark count of 20-inch PMTs generated by natural radioactivity. *Journal of Instrumentation*, 19(02):P02026, feb 2024. doi: 10.1088/1748-0221/19/02/P02026. URL <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/19/02/P02026>.
- [16] JUNO Collaboration. JUNO physics and detector. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 123: 103927, March 2022. doi: 10.1016/j.pnpnp.2021.103927.
- [17] Fengjiao Luo, Zhimin Wang, Zhonghua Qin, and Yuekun Heng. Signal Optimization with HV divider of MCP-PMT for JUNO. *arXiv e-prints*, art. arXiv:1803.03746, March 2018. doi: 10.48550/arXiv.1803.03746.
- [18] M. Bellato and et.al. Embedded readout electronics R&D for the large PMTs in the JUNO experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 985:164600, 2021. ISSN 0168-9002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164600>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220309979>.
- [19] Alberto Coppi et al. Mass testing of the JUNO experiment 20-inch PMT readout electronics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1052:168255, 2023. ISSN 0168-9002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168255>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900223002450>.
- [20] P.-A. Petitjean, B. Clerbaux, M. Collomer Molla, Y. Yang, and on behalf of JUNO collaboration. The JUNO experiment and its electronics readout system. *Journal of Instrumentation*, 17(05):C05014, may 2022. doi: 10.1088/1748-0221/17/05/C05014. URL <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/17/05/C05014>.
- [21] Vanessa Cerrone et al. Validation and integration tests of the JUNO 20-inch PMT readout electronics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1053:168322, 2023. ISSN 0168-9002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168322>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900223003121>.
- [22] Caimei Liu, Min Li, Zhimin Wang, et al. Check on the features of potted 20-inch PMTs with 1F3 electronics prototype at Pan-Asia. *Journal of Instrumentation*, 18(02):P02003, feb 2023. doi: 10.1088/1748-0221/18/02/P02003. URL <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/18/02/P02003>.
- [23] Yongbo Huang, Jinfan Chang, Yaping Cheng, Zhang Chen, Jun Hu, Xiaolu Ji, Fei Li, Jin Li, Qiuju Li, Xin Qian, Soeren Jetter, Wei Wang, Zheng Wang, Yu Xu, and Zeyuan Yu. The flash adc system and pmt waveform reconstruction for the daya bay experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 895: 48–55, 2018. ISSN 0168-9002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.03.061>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218304133>.
- [24] J. Tang, T. Xiao, X. Tang, and Y. Huang. Investigation and optimization of the deconvolution method for pmt waveform reconstruction. *Journal of Instrumentation*, 20(03):P03019, mar 2025. doi: 10.1088/1748-0221/20/03/P03019. URL <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/20/03/P03019>.
- [25] H.Q. Zhang, Z.M. Wang, F.J. Luo, A.B. Yang, D.R. Wu, Y.C. Li, Z.H. Qin, C.G. Yang, Y.K. Heng, Y.F. Wang, and H.S. Chen. Gain and charge response of 20” MCP and dynode PMTs. *Journal of Instrumentation*, 16(08):T08009, aug 2021. doi: 10.1088/1748-0221/16/08/T08009. URL <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/16/08/T08009>.

- [26] Qi Wu et al. Study of after-pulses in the 20-inch HQE-MCP-PMT for the JUNO experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1003:165351, 2021. ISSN 0168-9002. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165351>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900221003351>.
- [27] Rong Zhao et al. Afterpulse measurement of JUNO 20-inch PMTs. *Nuclear Science and Techniques*, 34, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s41365-022-01162-3>.