江门中微子实验中的小PMT系统

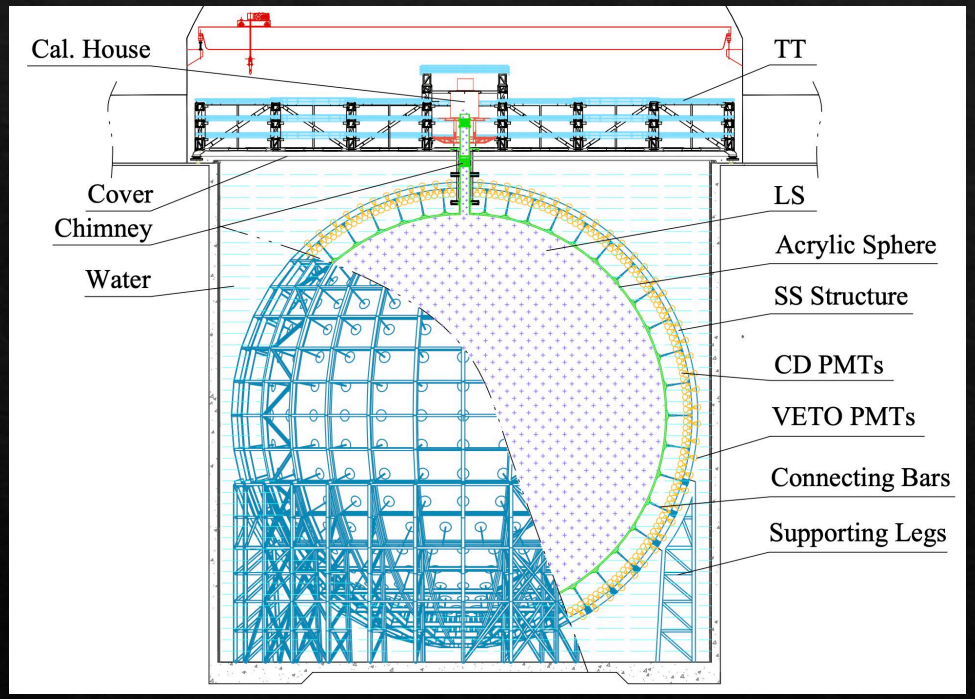
吴帝儒（小PMT组）

代表江门中微子实验合作组

中国科学院高能物理研究所

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会

江门中微子实验（JUNO）

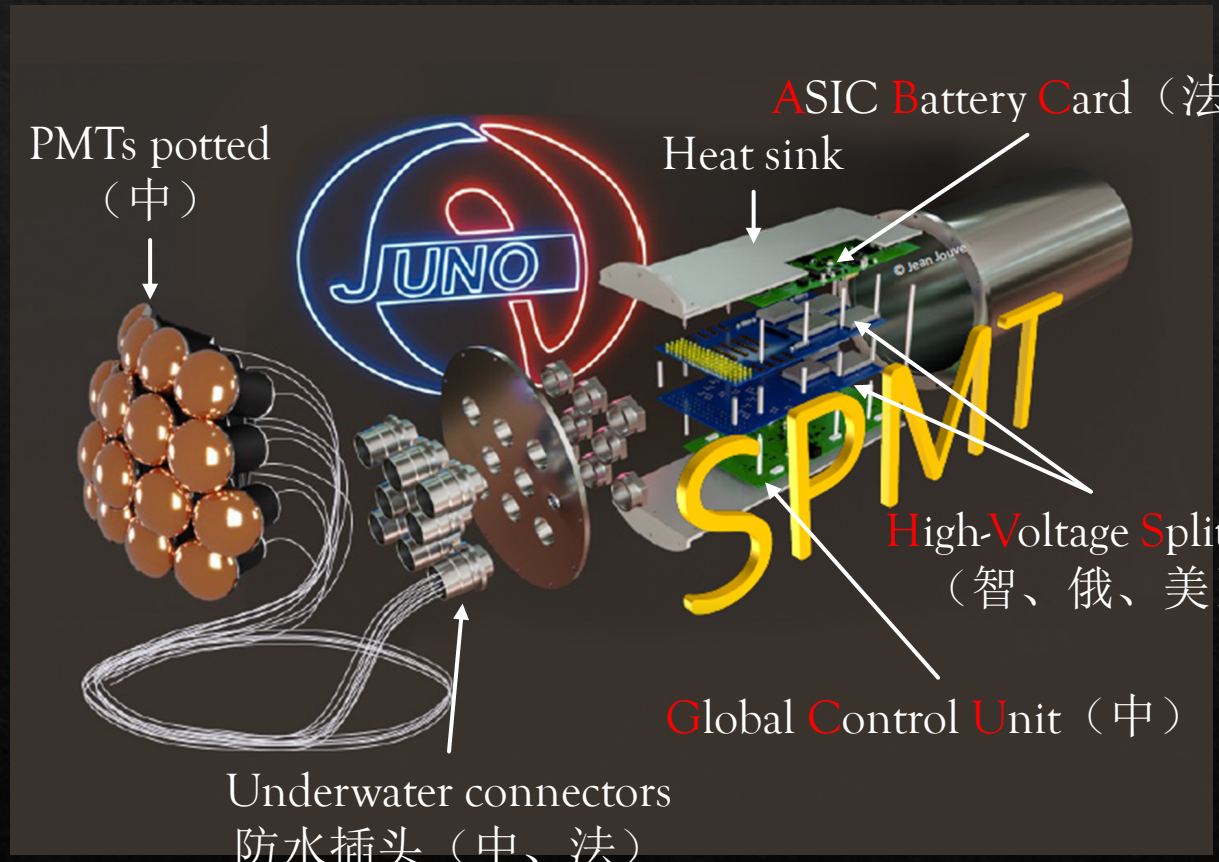


- 世界最大的液体闪烁体探测器（20 kt）
- 低放射性本底
- 高水平的能量分辨率（3%@1MeV）
- 国际中微子研究的核心问题：质量顺序
- 精确测量中微子混合参数
- 丰富的物理目标：大气、太阳、超新星和地球中微子等

$$CD\ PMTs \begin{cases} 17,612\ 20''PMTs \\ 25,600\ 3''PMTs \\ Coverage = 77.9\% \end{cases}$$

小PMT（SPMT）系统

- 200 套水下读出电子学：1 电子学→8 防水插头→128 PMT
- 独立的光子探测系统，辅助能量刻度，减小系统误差
- 扩展动态范围
- 数字量能器（1-10MeV）
- 振荡参数测量（$\theta_{12}, \Delta m^2_{21}$）



整个系统都在最深>40m的水中

小PMT从生产到安装

批量生产及出厂测试

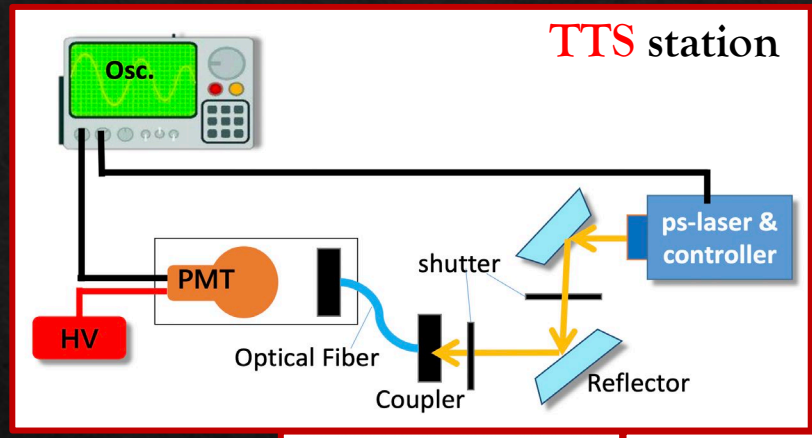
防水封装

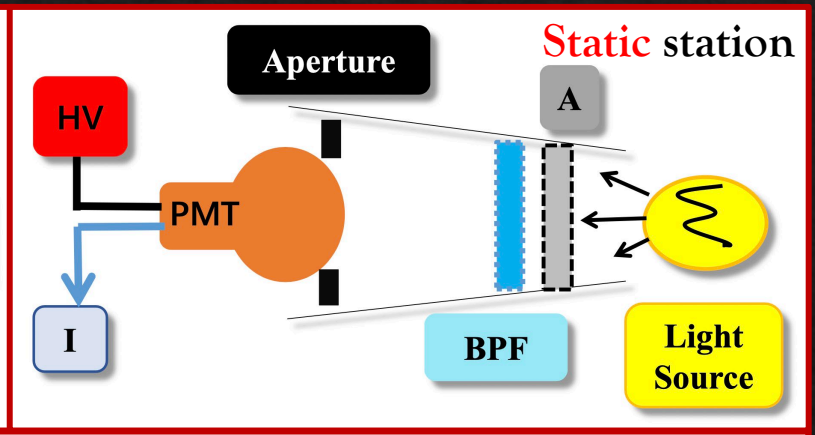
验收测试

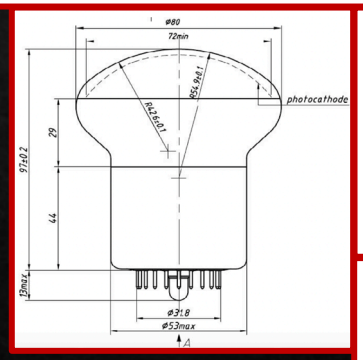
JUNO现场安装

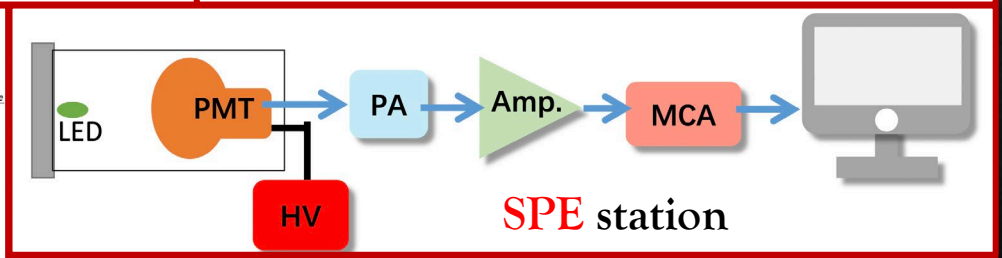
批量生产

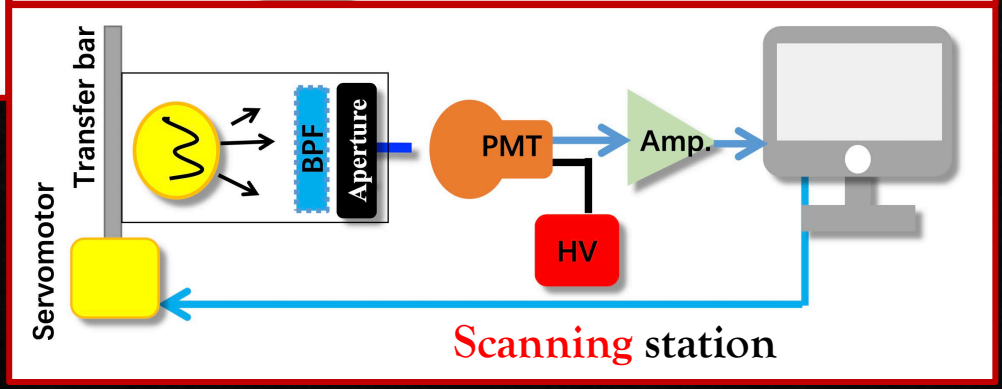
- 裸管出厂测试
- 开始：2018年1月
- 结束：2019年12月
- 约1000/月
- 26000 XP72B22 PMTs
- 4套测试系统，15个指标，4种抽样比例











海南展创光电技术有限公司
HZC PHOTONICS

批量生产

Summary of the 3-inch PMTs acceptance criteria and test results for different parameters. Results for class A parameters were from 26,000 PMT mean value of vendor data after acceptance measurement introduced in Section 4.2, and other results were from acceptance measurement only. Unless specified, all of the parameters were measured at 3×10^6 gain.

Parameters	Class	Requirement (limit)	Requirement (mean)	Test fraction HZC	Test fraction JUNO	Tolerance of diff.	Results (mean)	Rejection number
Φ (glass bulb)	A	(78, 82) mm	–	100%	10%	–	OK	0
QE@420 nm	A	>22%	>24%	100%	10%	<5%	24.9%	1
High Voltage	A	(900,1300) V	–	100%	10%	<3%	1113 V	1
SPE resolution	A	<45%	<35%	100%	10%	<15%	33.2%	0
PV ratio	A	> 2	> 3	100%	10%	–	3.2	0
DCR@0.25 PE	A	<1.8 kHz	<1.0 kHz	100%	10%	–	512 Hz	1
DCR@3.0 PE	A	<30 Hz	–	100%	10%	–	7.2 Hz	1
TTS (σ)	B	<2.1 ns	–	–	3%	–	1.6 ns	0
Pre-pulse	B	<5%	<4.5%	–	3%	–	0.5%	0
After-pulse	B	<15%	<10%	–	3%	–	3.9%	11
QE non-uniformity	B	<11%	–	–	3%	–	5%	0
Φ (eff. cathode)	B	>74 mm	–	–	3%	–	77.2 mm	0
QE@320 nm	C	>5%	–	–	1%	–	10.2%	0
QE@550 nm	C	>5%	–	–	1%	–	8.6%	0
Aging	D	>200 nA years	–	–	3 PMTs	–	OK	0

Static station

SPE station

TTS station

Scanning station

不同的抽样比例

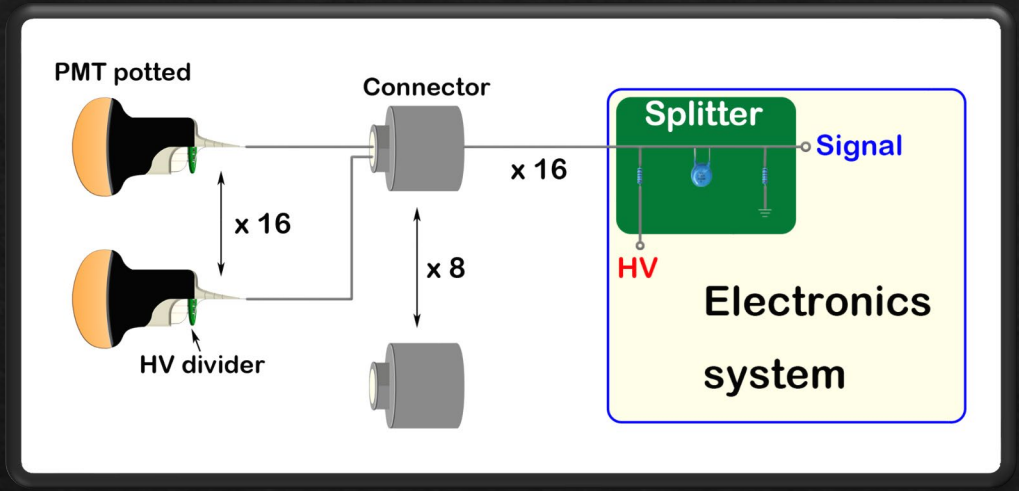
通过率大于99.9%

世界上同一管型数量最多的测试样本

NIMA 1005 (2021) 165347

前端集成

- 16芯防水插头、插座及防水电缆生产
- 分压器焊接 → 与电缆连接 → 防水封装

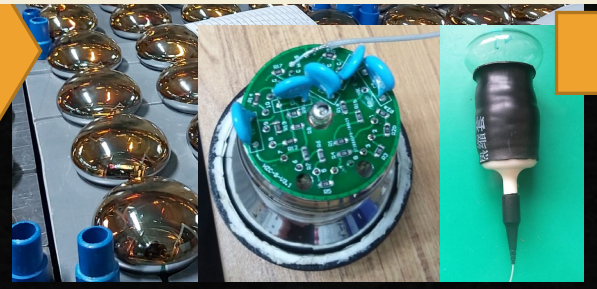


电缆、防水插头、插座生产 @AXON

电缆与potting外壳连接 @泛亚

防水封装和防水测试 @HZC

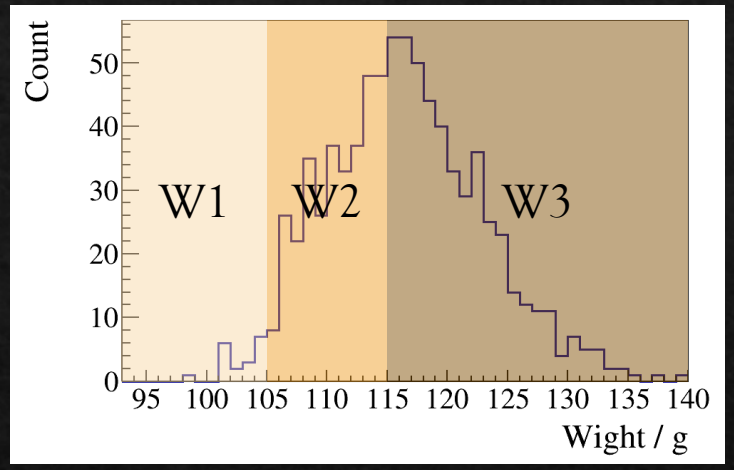
HV divider 采用3:2:1的分压比直插电容与贴片电阻混合设计，兼顾空间与可靠性



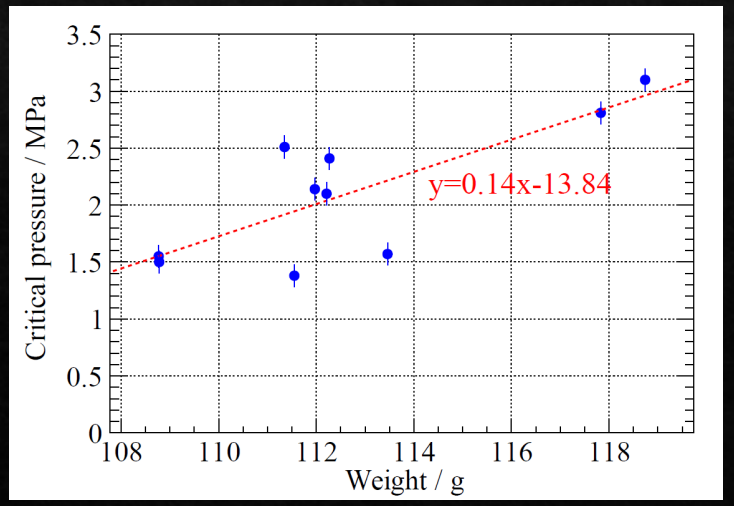
验收测试 @广西大学

前端集成：PMT分组

- 高压 900V~1300V，25V 一组
- 重量与耐水压能力相关，分为3级，安装时重量轻的装在上面

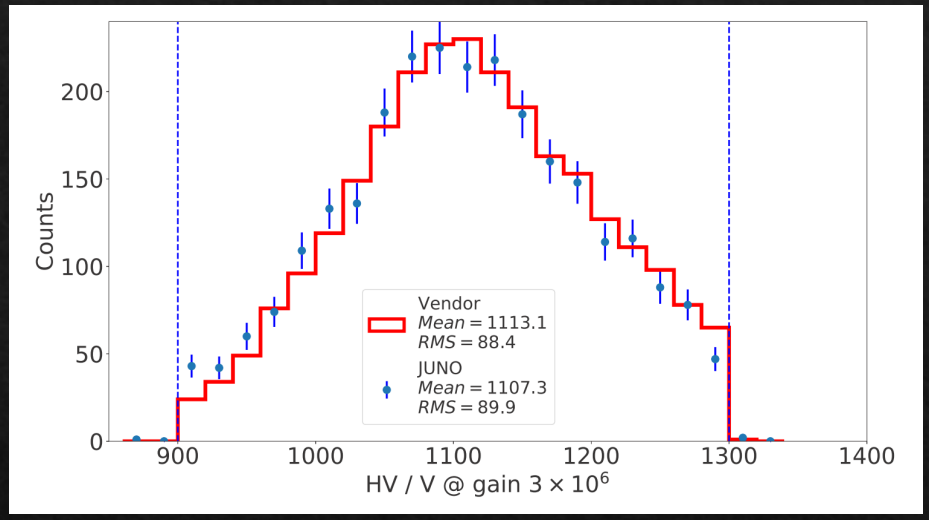


重量分布



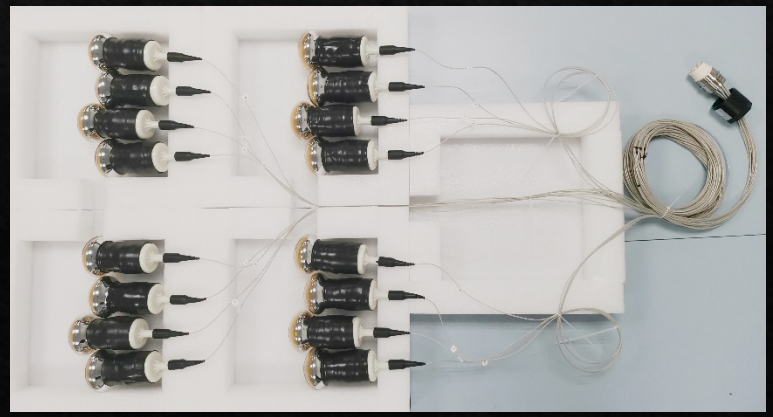
耐压vs重量

HV@3E6分布



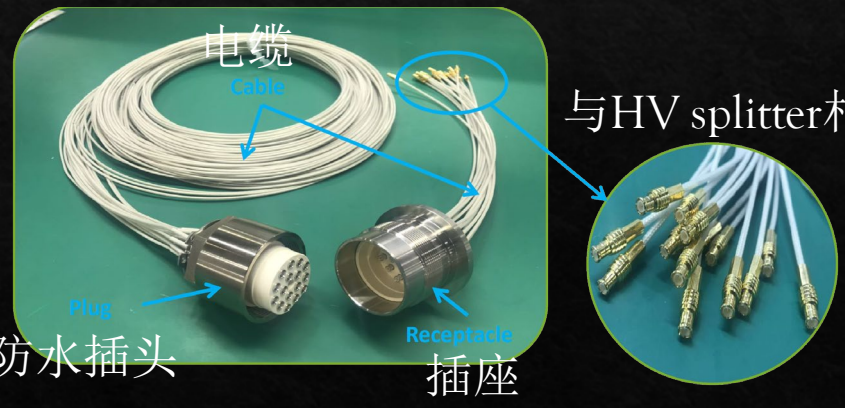
PMT分配时，将HV@3E6接近的放在一组

- 1 个连接器（同一个HV）→16 PMTs
- 增益存在一定分布，无法刻度到完全一致



前端集成：防水连接器和电缆

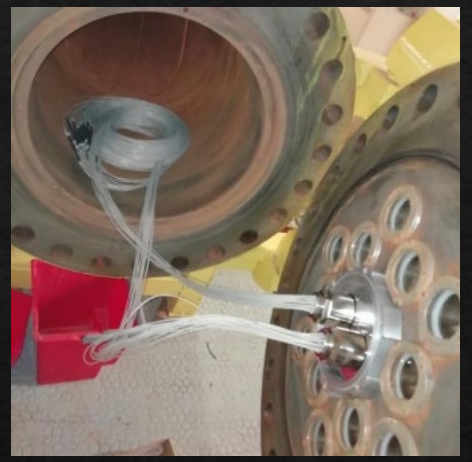
- 与Axon合作开发了防水高压连接器套件
  - 16芯多层防水高压插头
  - 基于RG178定制防水HDPE外皮同轴电缆
  - JUNO中使用5m、10m两种长度电缆



防水插头

插座

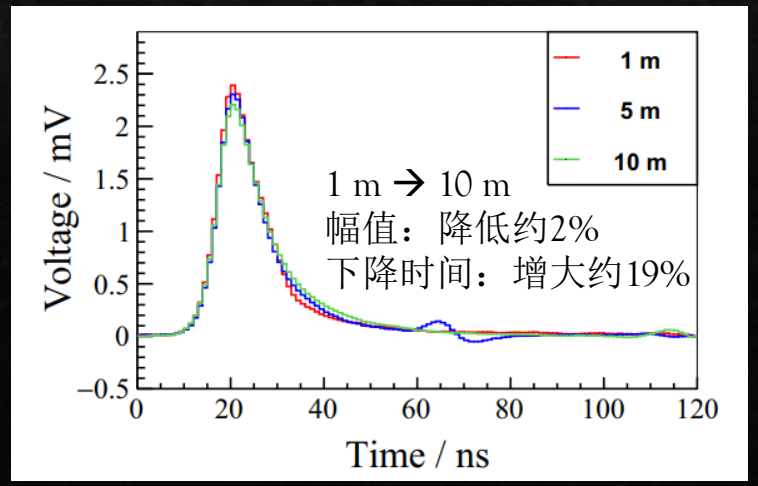
与HV splitter相连



在法国进行老化测试（等效20年）

- 2对防水插头和插座
- 共320 m电缆
- 0.8 Mpa水压，高温老化

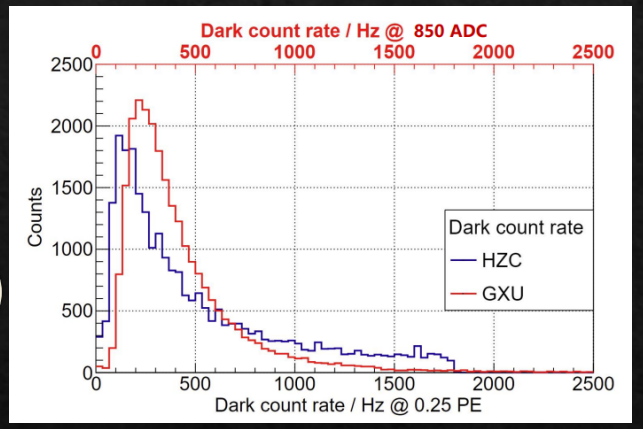
RDTM 6, 349-360 (2022)

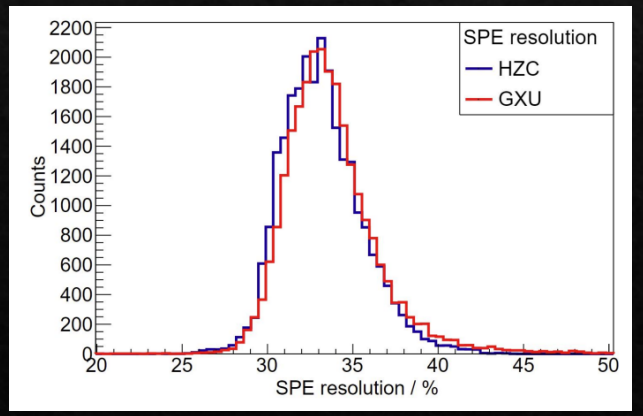


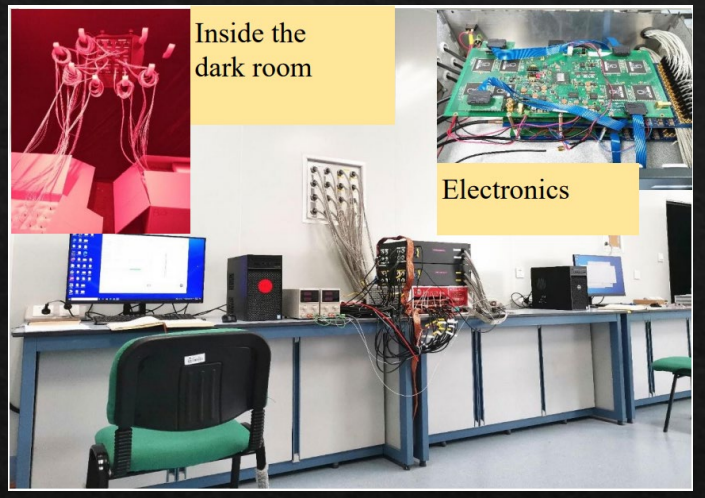
不同电缆长度，相同增益的平均波形

前端集成：防水封装后的测试

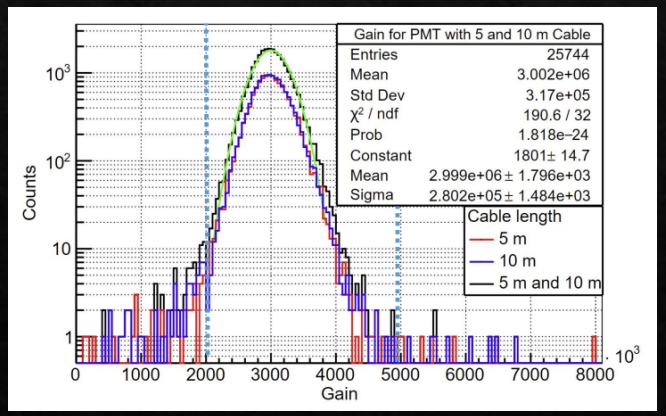
- **防水封装**并安装**连接器**之后
- 增益（2E6<Gain<5E6）
- 分辨率（20%<Resolution<50%）
- 暗噪声计数率（Dark Current Rate<3kHz）
- 共收到并测试25936 PMTs
- 通过测试比率>99.3%







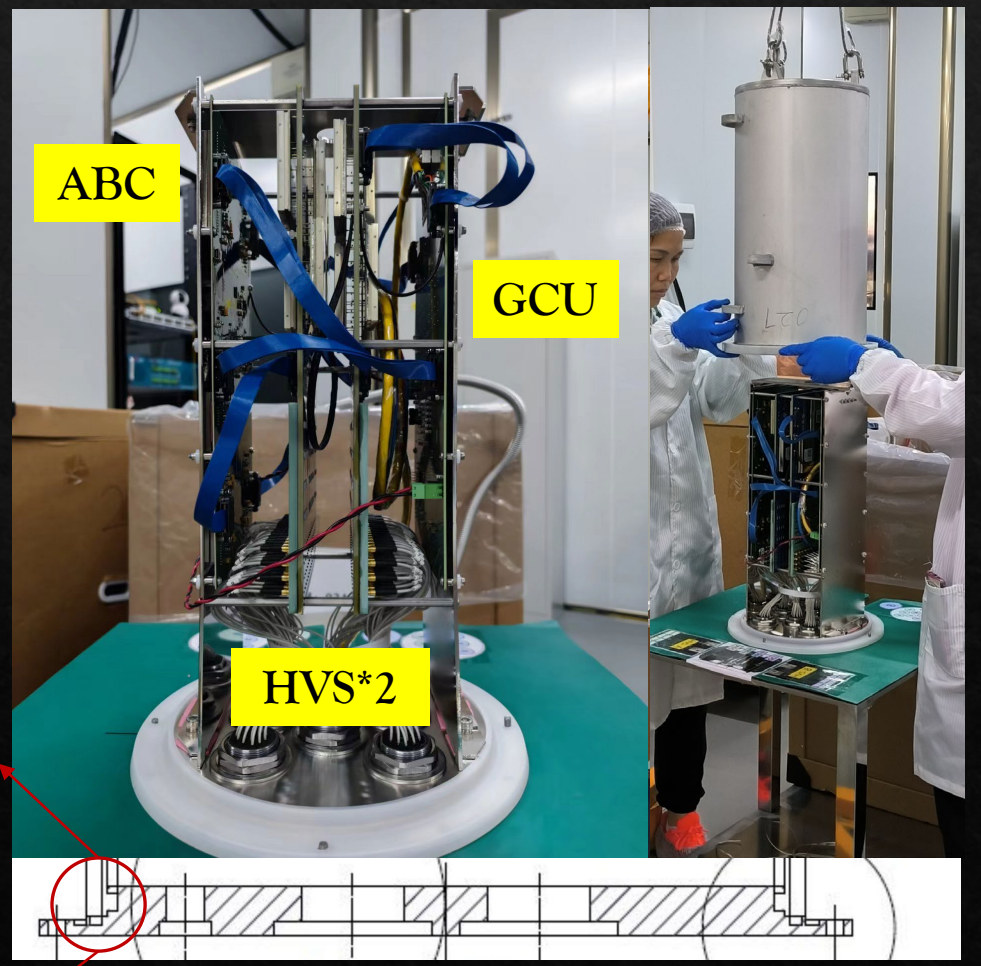
广西大学验收测试工作站

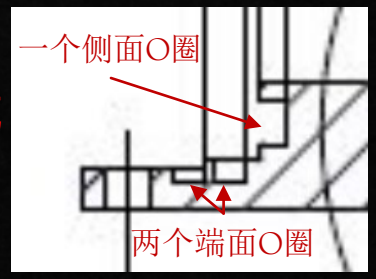


Sigma/Mean 约 10%

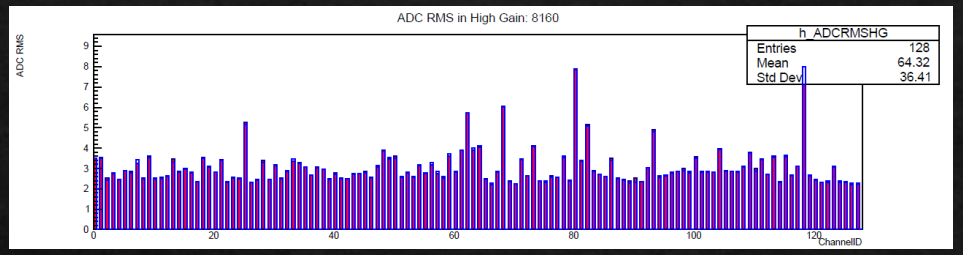
电子学

- SPMT前端电子学
  - 2 块HVS（High Voltage Splitter）板
  - 1 块ABC（ASIC Battery Card）板，无触发读出T、Q
  - 1 块GCU（Global Control Unit）板
  - 铜散热结构（铜柱，散热板），散热硅胶
  - 不锈钢密封桶（Under Water Box），后端电缆通过50-100米不锈钢波纹管引出
  - 8 个防水插座，连接128支PMT
- 200套电子学集成和测试全部完成
  - 使用SF_6系统进行检漏
- 在智利进行了电子学桶的防水老化测试



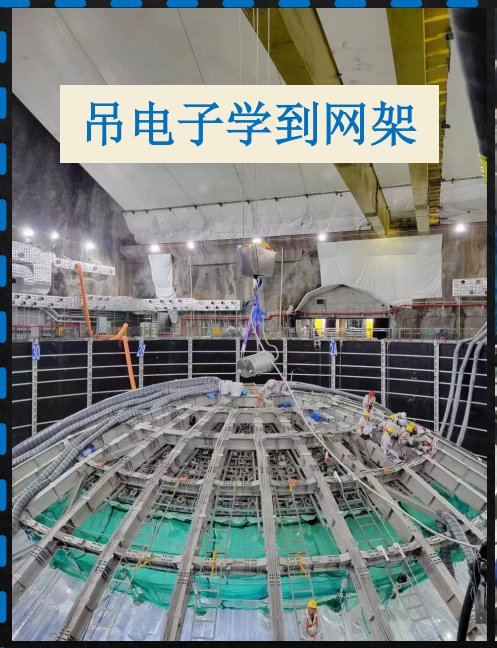


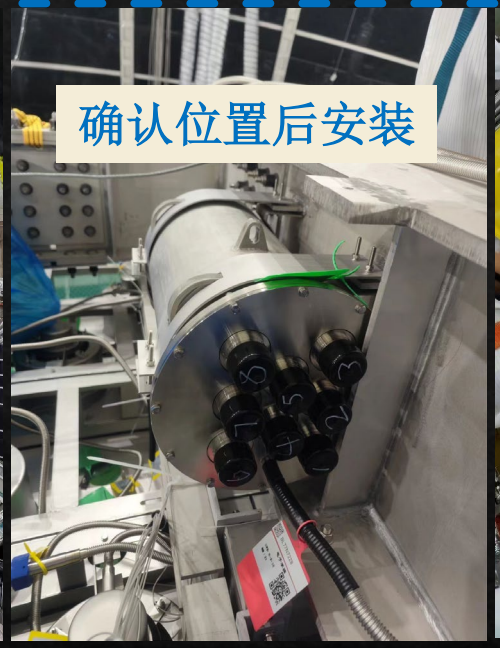
电子学安装



电子学安装后电测
128个通道的基线标准差

地下真空检漏桶
电子学安装后进行真空检漏



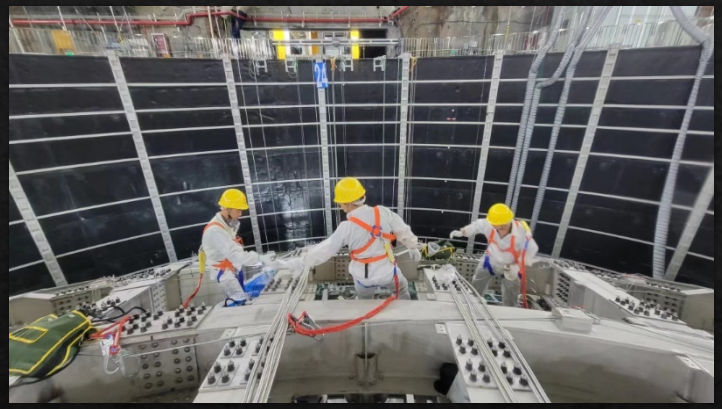


电子学安装

PMT安装

PMT标签　　安装位置标签

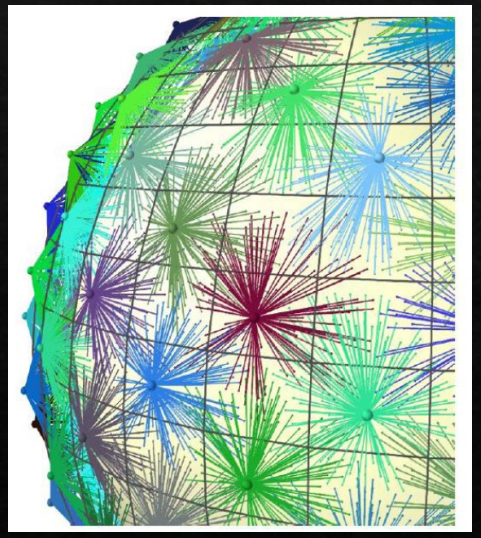
- 3英寸PMT在网架上安装
  - 已经正确安装1278支小PMT
  - 通过扫码确认安装位置



安装支座

将PMT装入
指定位置

安装挡光板

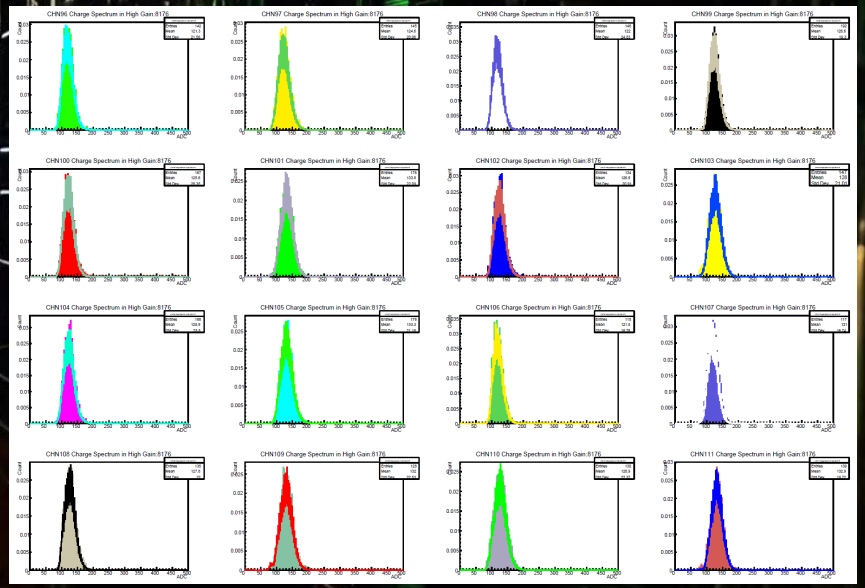


一套电子学连接的128支
PMT在网架上的分布

在网架上走线
三人合作完成

关灯测试

- 网架上42串，672支
- 测试内容
  - 基线数据（Pedestal）：强制触发
  - 物理数据（Physics，主要是DCR）：每个通道自触发
- 数据分析还在进行中……



一串PMT在关灯测试时的电荷谱

总结

- 小PMT系统：25600支3英寸PMT→1600个防水连接器→200套水下电子学
- PMT和电子学生产和集成全部完成
- 探测器安装进行中，首次关灯实验结果正常