



江门中微子实验 (JUNO) 探测器设计与建造

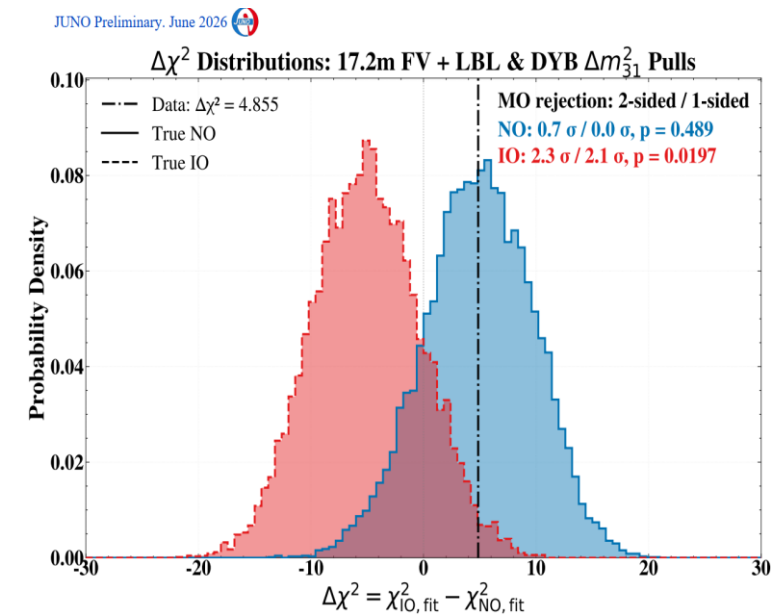
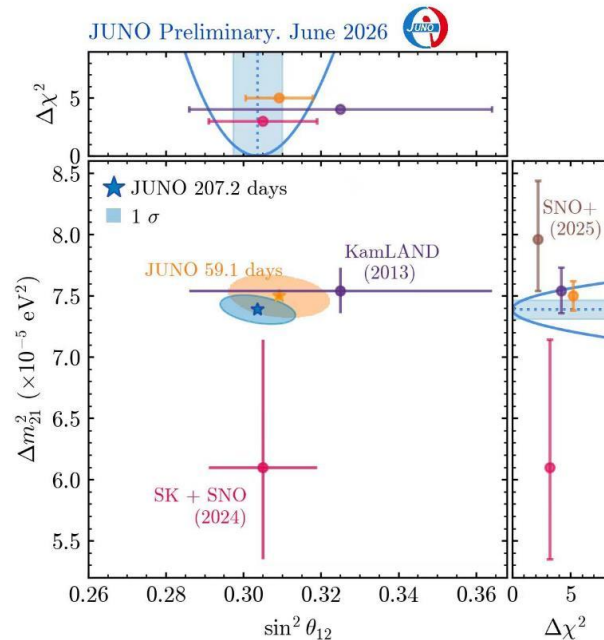
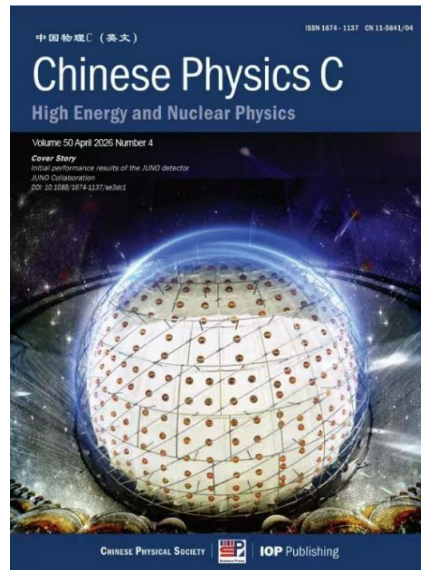
秦中华(qinzh@ihep.ac.cn), 高能所

代表JUNO合作组

第23届全国核电子学与核探测技术学术年会

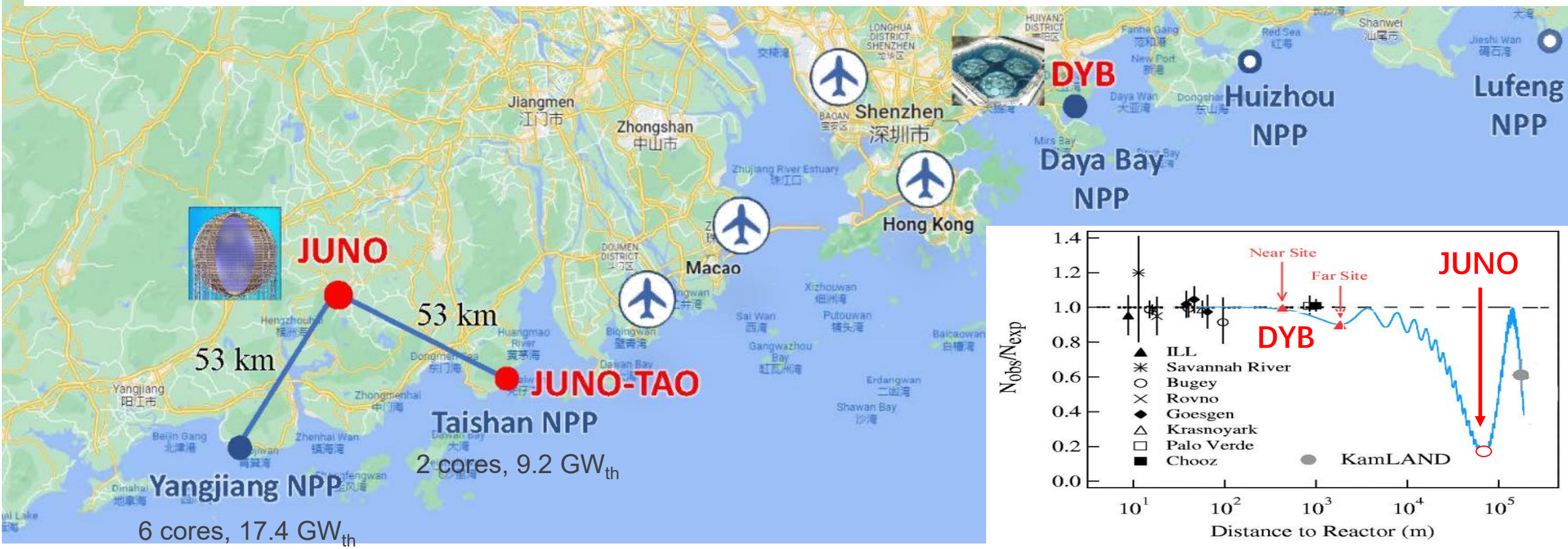
2026.8.10

- ◆ JUNO 于2025年8月26日开始正式运行
- ◆ 2025年11月19日，基于59天数据，JUNO取得中微子振荡参数 Δm_{21}^2 、 $\sin^2\theta_{12}$ 世界最高精度测量结果，超过国际上其它实验运行十多年的测量精度，以封面文章发表在Nature 上（探测器性能文章同时以封面文章发表在CPC上）
- ◆ 2026年6月22日在国际中微子大会(Neutrino 2026)上，JUNO以207天数据刷新 Δm_{21}^2 、 $\sin^2\theta_{12}$ 以及 Δm_{31}^2 测量结果；并报告在加速器中微子测量结果约束下，中微子质量顺序倾向于正序（ 2.3σ ，国际最高精度），文章正在准备中

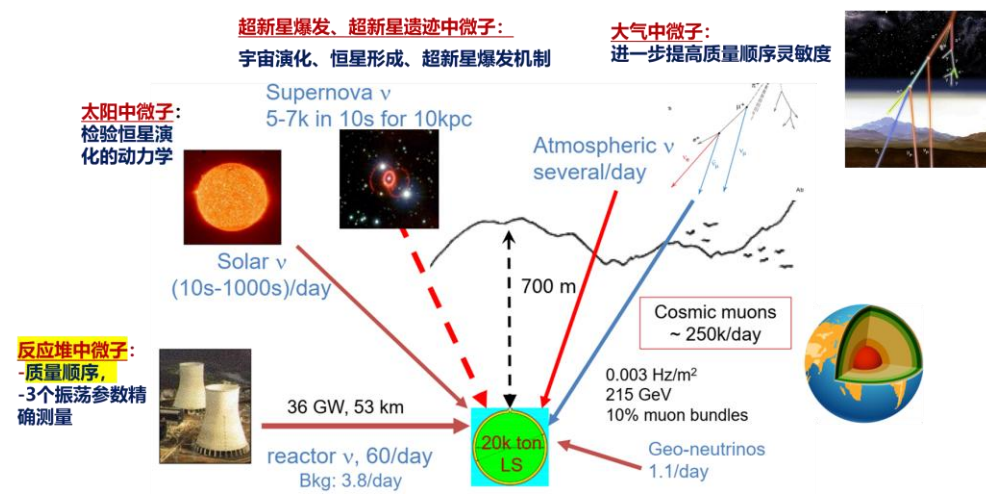
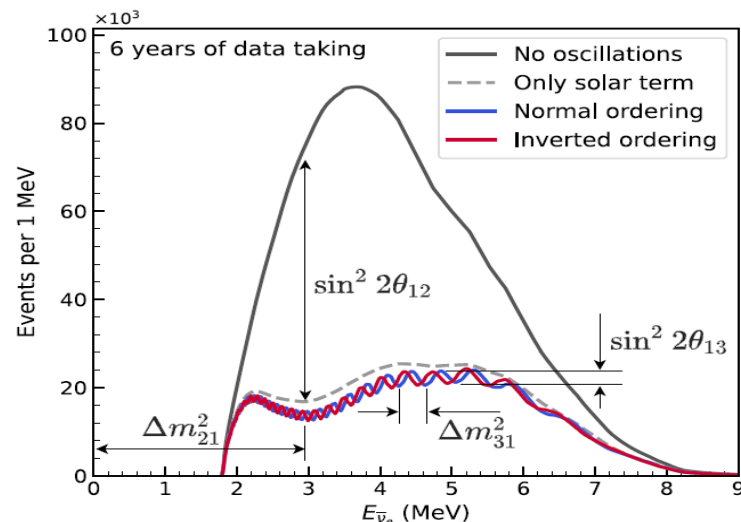
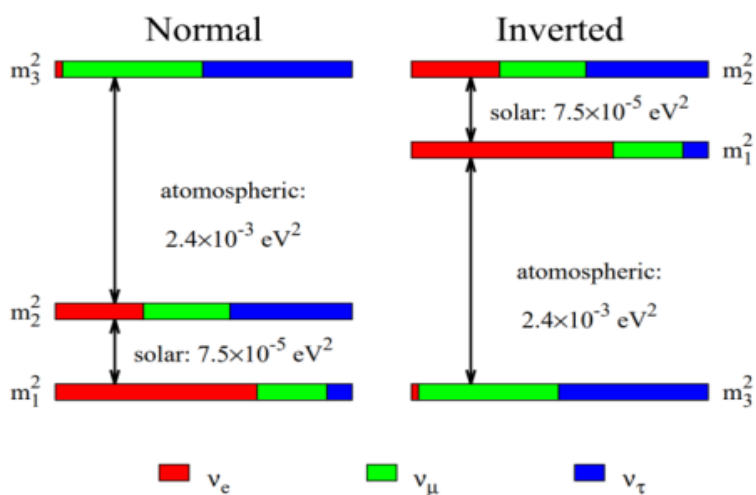


江门中微子实验（Jiangmen Underground Neutrino Observatory, JUNO）位于广东省江门市：

- ◆ 距阳江、台山核电站（总功率：26.6 GW）约 53 公里处；地下深度约 700 米
- ◆ 作为大亚湾实验（DYB）的后续，2013 年获批立项，2015 年开工建设，2025年建设完成
- ◆ 同时建设的JUNO-TAO(台山反中微子观测站)是JUNO的卫星实验



- ◆ 中微子质量顺序(Neutrino Mass Ordering) 测量: 6 年以 3σ 置信度确定中微子质量顺序
 - 正质量顺序: $m_1 < m_2 < m_3$
 - 反质量顺序: $m_3 < m_1 < m_2$
- ◆ 中微子振荡参数精确测量: 对 $\sin^2 2\theta_{12}$, Δm_{21}^2 , $|\Delta m_{31}^2|$, 100 天内达到国际领先测量精度, 运行 6 年后测量精度优于 0.5%
- ◆ 众多中微子物理研究: 太阳中微子, 地球中微子, 大气中微子, 超新星爆发、超新星遗迹中微子、核子衰变等





JUNO国际合作组

5

- 合作组成立于 2014 年, 目前包括超过700名合作组成员, 68 家研究单位, 17 个国家

Country	Institute	Country	Institute	Country	Institute
Belgium	ULB	China	SUSTech-Geo	Italy	INFN-CT
China	BISEE	China	SUSTech-Phy	Italy	INFN-FE
China	CDUT	China	SYSU	Italy	INFN-LNF
China	CNPRI	China	THU	Italy	INFN-MI
China	CUGB	China	UCAS	Italy	INFN-MIB
China	DGUT	China	WHU	Italy	INFN-PD
China	ECUT	China	WuYiU	Italy	INFN-PG
China	GXU	China	XJTU	Italy	INFN-Roma3
China	HIT	China	XMU	Pakistan	PINSTECH (PAEC)
China	HunanU	China	ZZU	Russia	JINR
China	IGGCAS	Czech	Charles U.	Slovakia	FMFI-UK
China	IHEG-CAGS	Finland	JyU	Taiwan-China	NCTU
China	IHEP	France	CPPM	Taiwan-China	NKNU
China	IMP	France	IJCLab	Taiwan-China	NTU
China	JNU	France	IPHC	Taiwan-China	NTUT
China	JXNU	France	LP2iB	Thailand	CHULA
China	KNRC	France	Subatech	Thailand	NARIT
China	Nankai U.	Germany	EKUT	Thailand	SUT
China	NCEPU	Germany	GSI	U.K.	U. Liverpool
China	NJU	Germany	U. Hamburg	U.K.	U. Warwick
China	RNCG	Germany	JGUMainz	USA	UCI
China	SDU	Germany	RWTH-AC	USA	UMD-G
China	SJTU	Germany	TUM		

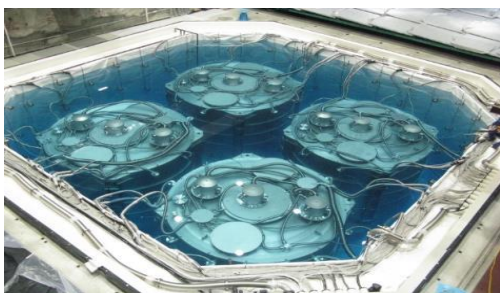


the 28th JUNO collaboration meeting,
IHEP, Beijing, July 20-24, 2026

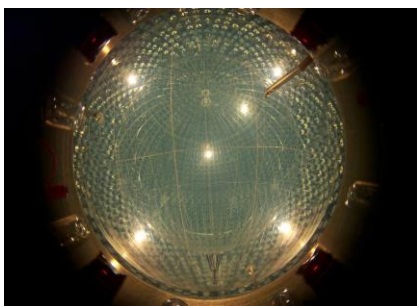
+Observers: USTC, Peking Uni., Jilin Uni., Beijing Normal Uni., CIAE (China), PUC, UEL (Brazil), Oxford Uni. (UK), CUHK (Hong Kong), UTFSM (Chile).

- ◆ 2万吨液体闪烁体靶质量，45000支光电倍增管光收集，1 MeV 处能量分辨率达到 3%
 - 世界上最大的液体闪烁体中微子探测器，比日本KamLand大20倍，比意大利Borexino大60倍

	中国Daya Bay	意大利Borexino	加拿大SNO+	日本KamLAND	JUNO
靶物质质量	8* 20 吨	300 吨	780 吨	1 千吨	2万吨
光电倍增管数量	8 *192支8-in. PMT	2212支8-in. PMT	~10000支8-in. PMT	1325支20-in. + 554支17-in. PMT	20360支20-in.+ 25600支3-in. PMT
光产额 (p.e./MeV)	160	450	520	250	>1300
光阴极覆盖率	12%	30%	50%	34%	78%
能量分辨率@1MeV	7.5%	5%	6%	6%	3%
能量非线性	<1%	1%	≤ 1%	2%	≤ 1%



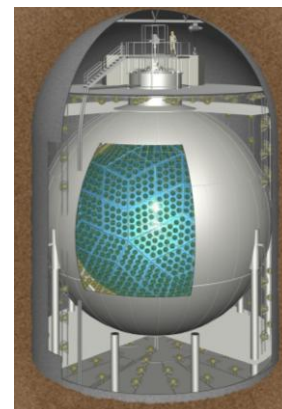
Daya Bay



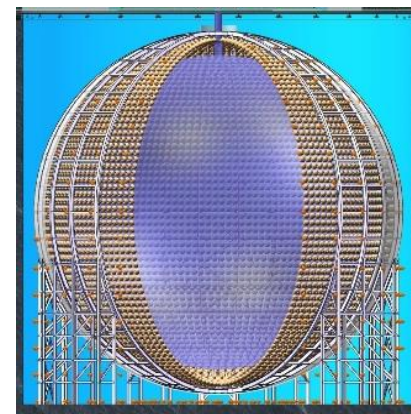
Borexino



SNO+

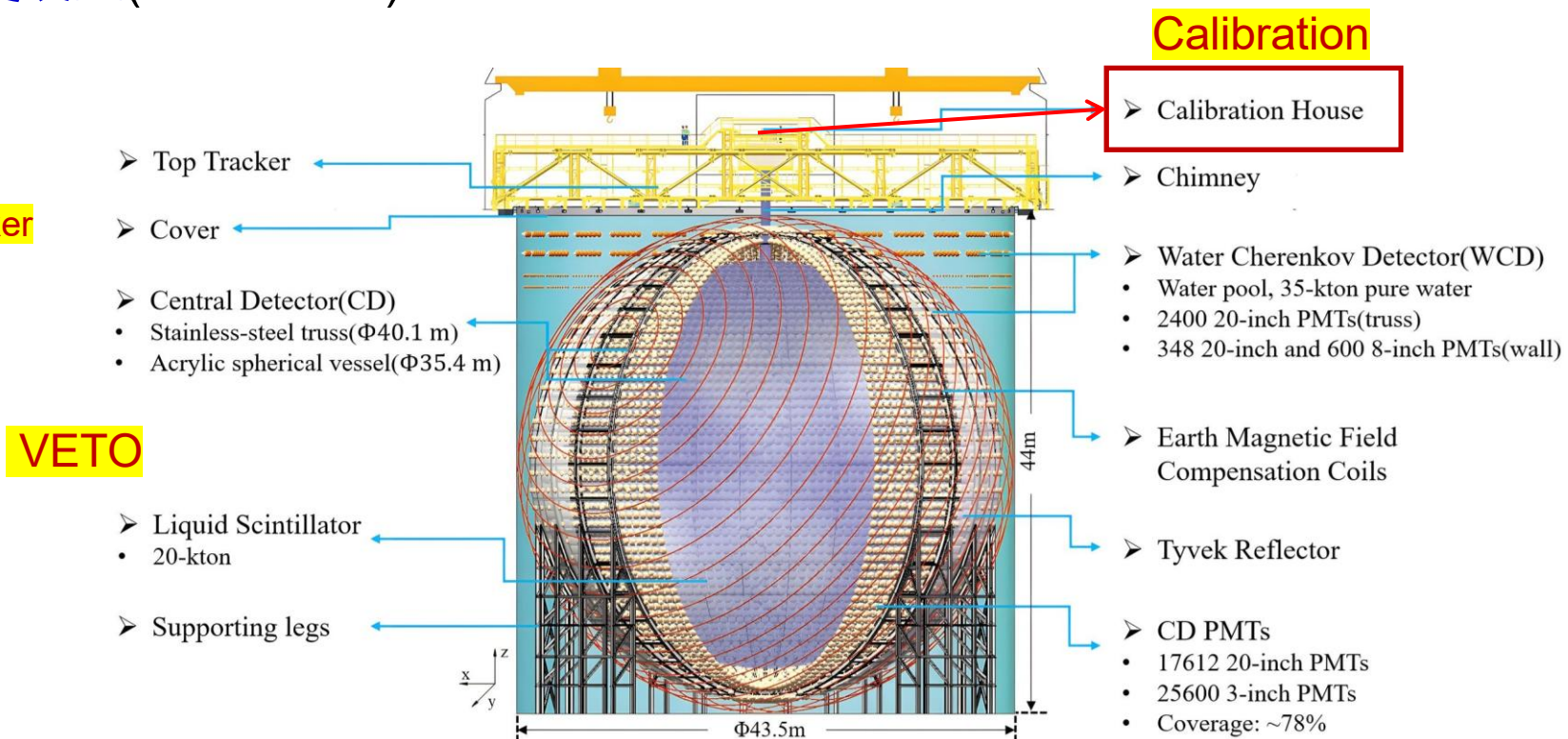
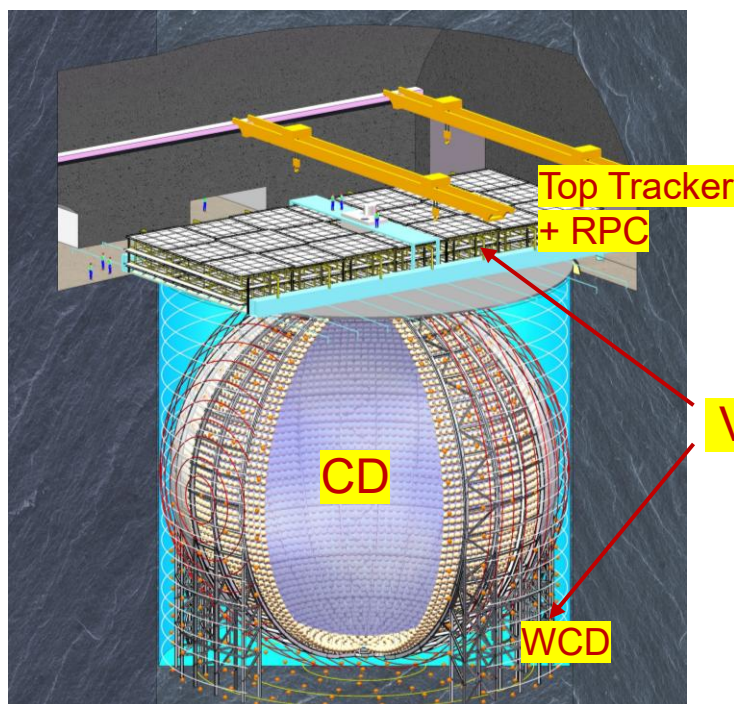


KamLand

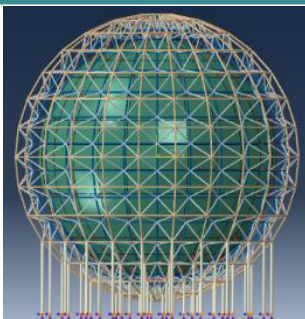


JUNO

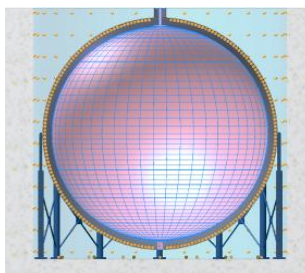
- ◆ 水池中间： **中心探测器** (Central Detector, CD), 包括有机玻璃球, 不锈钢网壳支撑结构, 液闪, 光电倍增管等部件
- ◆ 水池外围及顶部： **反符合探测器** (VETO detector)
 - **水切伦科夫探测器** (Water Cherenkov detector): 包括超纯水, 光电倍增管, 地磁屏蔽, 反射膜等部件
 - **顶部探测器** : 塑料闪烁体Top Tracker + 阻性板RPC阵列 (新增)
- ◆ 水池顶部中间： **探测器刻度装置**(Calibration)



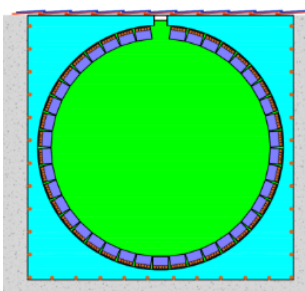
有机玻璃球
+ 单层不锈
钢网架



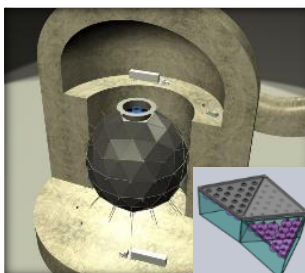
尼龙球
+不锈钢球罐



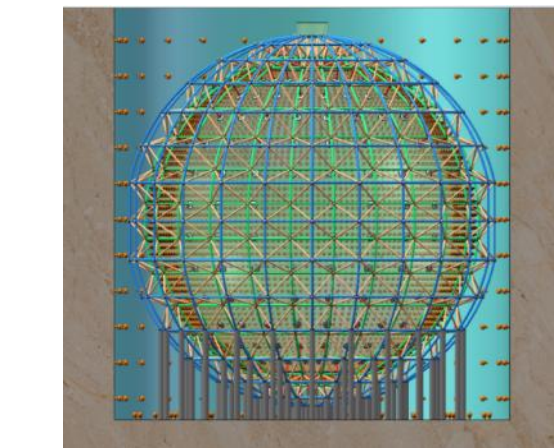
有机玻璃模块
+不锈钢球罐



有机玻璃球
+不锈钢网架



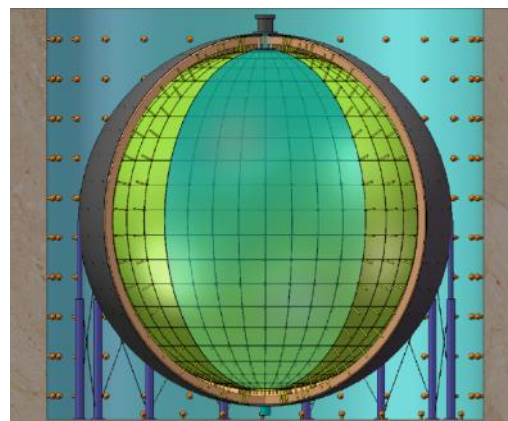
2012 - 2014



有机玻璃球+双层不锈钢网架



March,
2014



尼龙球 + 有机玻璃支撑+ 不锈钢球罐



July,
2015



有机玻璃球 + 单层
不锈钢网壳结构

◆ 直径35.4米有机玻璃球

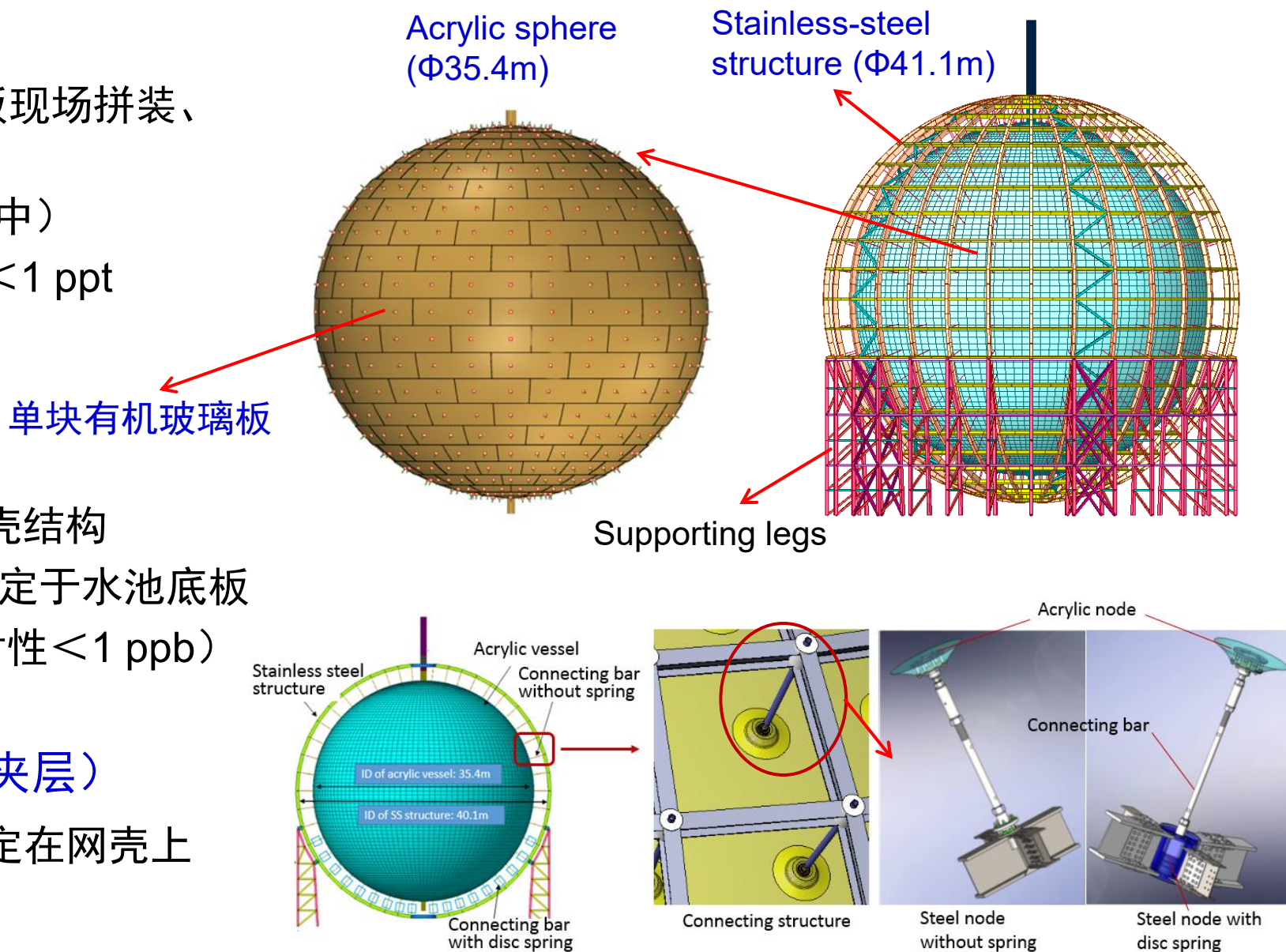
- 由 263 块12cm厚有机玻璃球面板现场拼装、本体聚合而成(max. size: 3m x 8m)
- 有机玻璃透光率要求 $>96\%$ (水中)
- 材料放射性本底 ($^{238}\text{U} / ^{232}\text{Th}$) <1 ppt
- 有机玻璃应力要求 <3.5 Mpa

◆ 直径41.1米不锈钢网壳

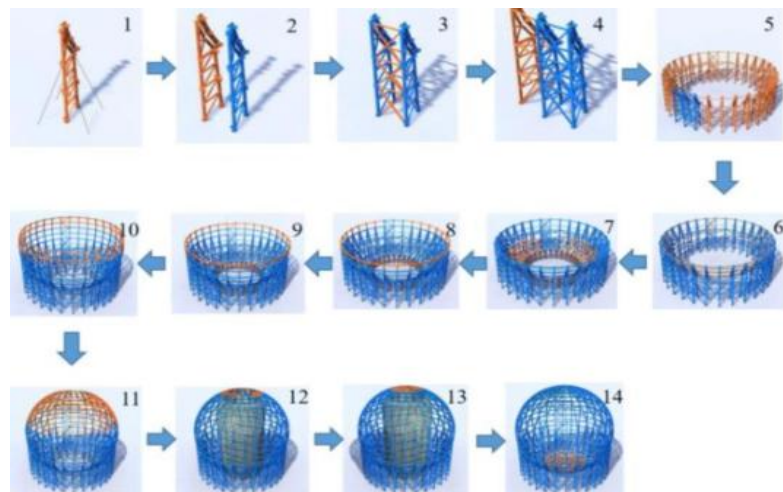
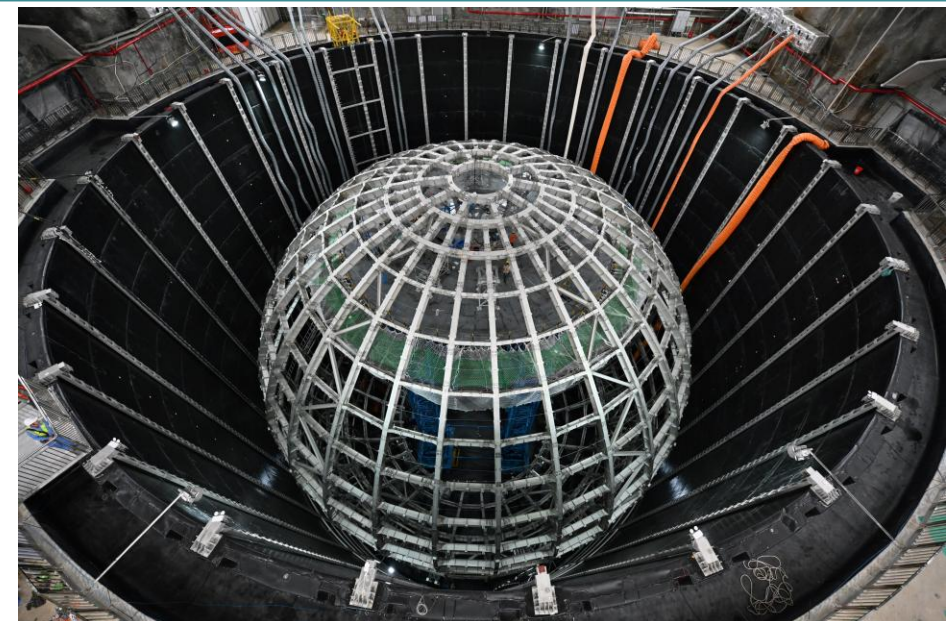
- 由经、纬向钢梁现场拼装构成网壳结构
- 网壳在赤道下方通过30 根立柱固定于水池底板
- 800 吨低放射性304不锈钢 (放射性 <1 ppb)

◆ 有机玻璃球与网壳之间 (~2米夹层)

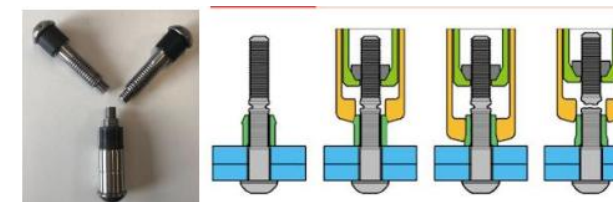
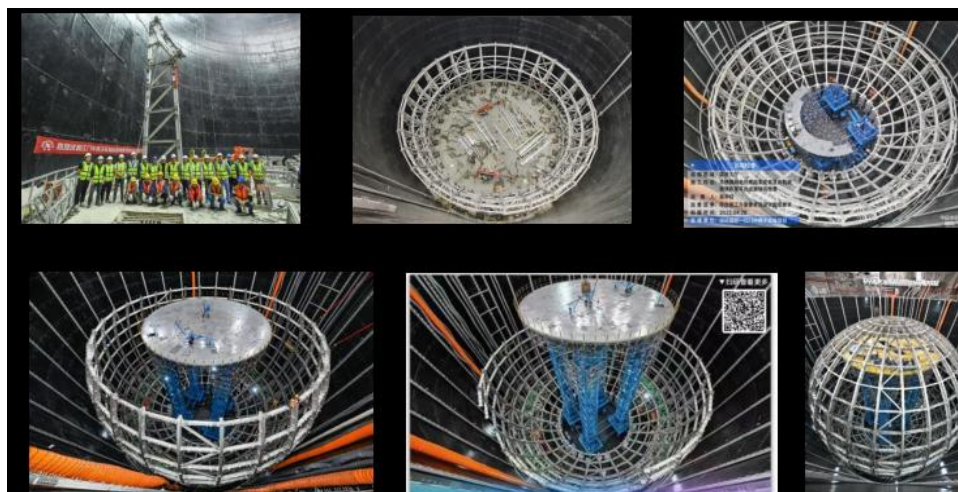
- 采用590根撑杆把有机玻璃球固定在网壳上
- 提供PMT安装空间



- ◆ 采用分步安装、整体从下到上的安装顺序
- ◆ 钢梁之间全部采用螺栓连接
 - 共计 12万套高强度、高摩擦系数螺栓
 - 通过不锈钢表面粗化处理，最终摩擦系数从0.2提高到0.5
 - 专用铆接装置实现快速安装
- ◆ 整个网壳施工耗时仅 5 个月，同时完成有机玻璃平台的安装；
- ◆ 测量得到半径偏差仅20mm，偏差约为半径的1‰
设计值：20550 mm；实测值：20530 mm

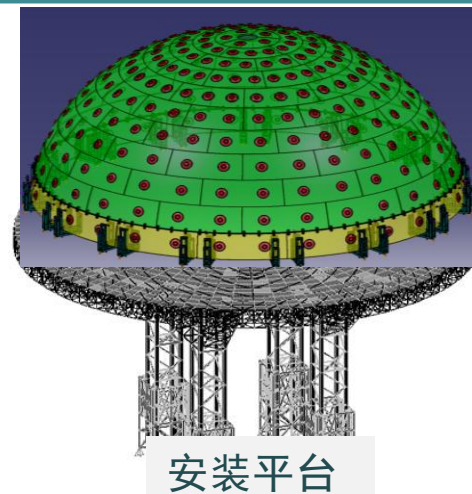
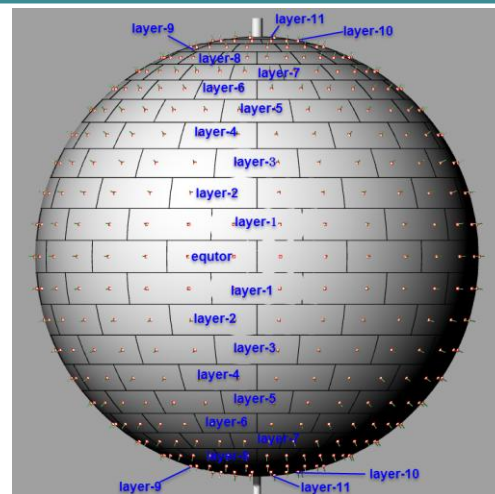


Installation sequence

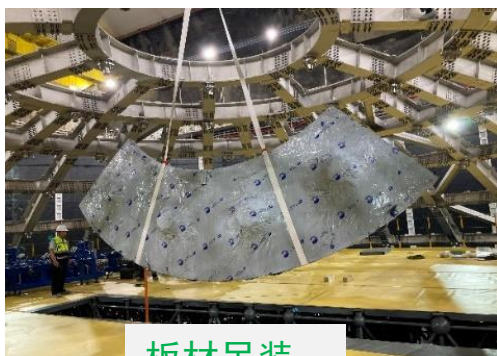


Bolts and riveting

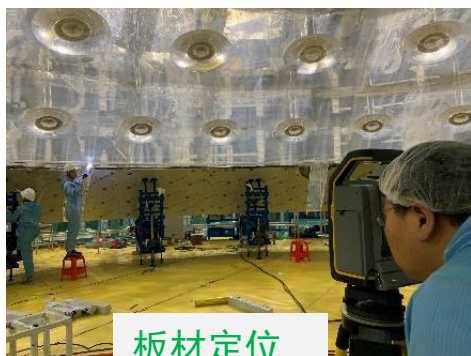
- ◆ 共23层, 由上至下逐层安装 (上半球、赤道及下半球)
- ◆ 采用可升降、可调直径的安装平台
- ◆ 有机玻璃板通过本体聚合工艺粘接为一体
- ◆ 环缝与竖缝同步粘接, 节省时间
- ◆ 施工过程中攻克多项难题: 爆聚、缺陷修复、应力测量等。整个建设历时27个月。



安装平台



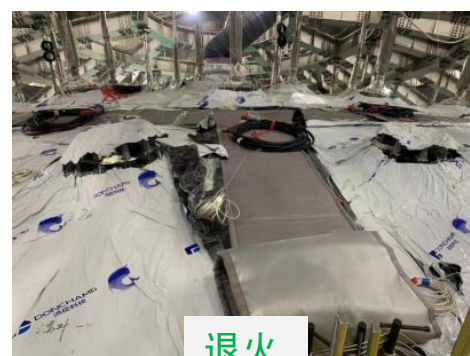
板材吊装



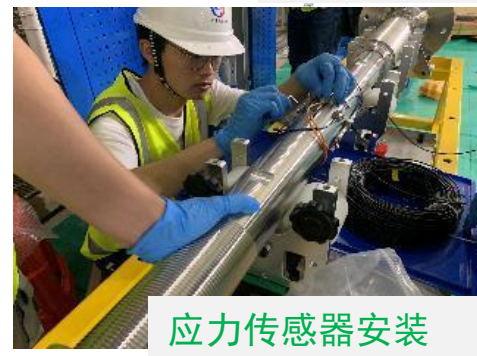
板材定位



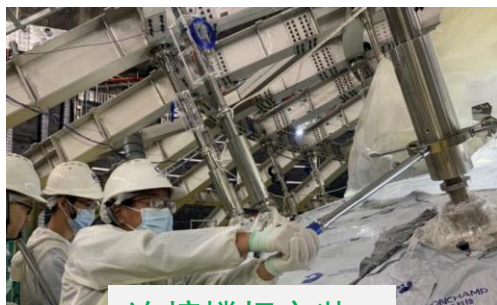
本体聚合



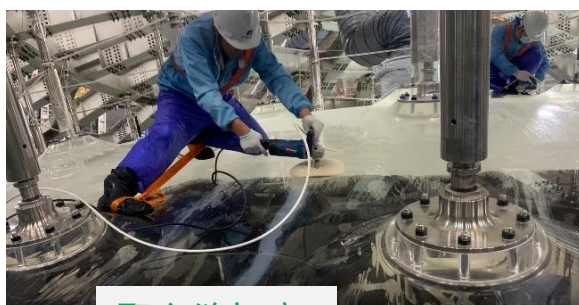
退火



应力传感器安装



连接撑杆安装



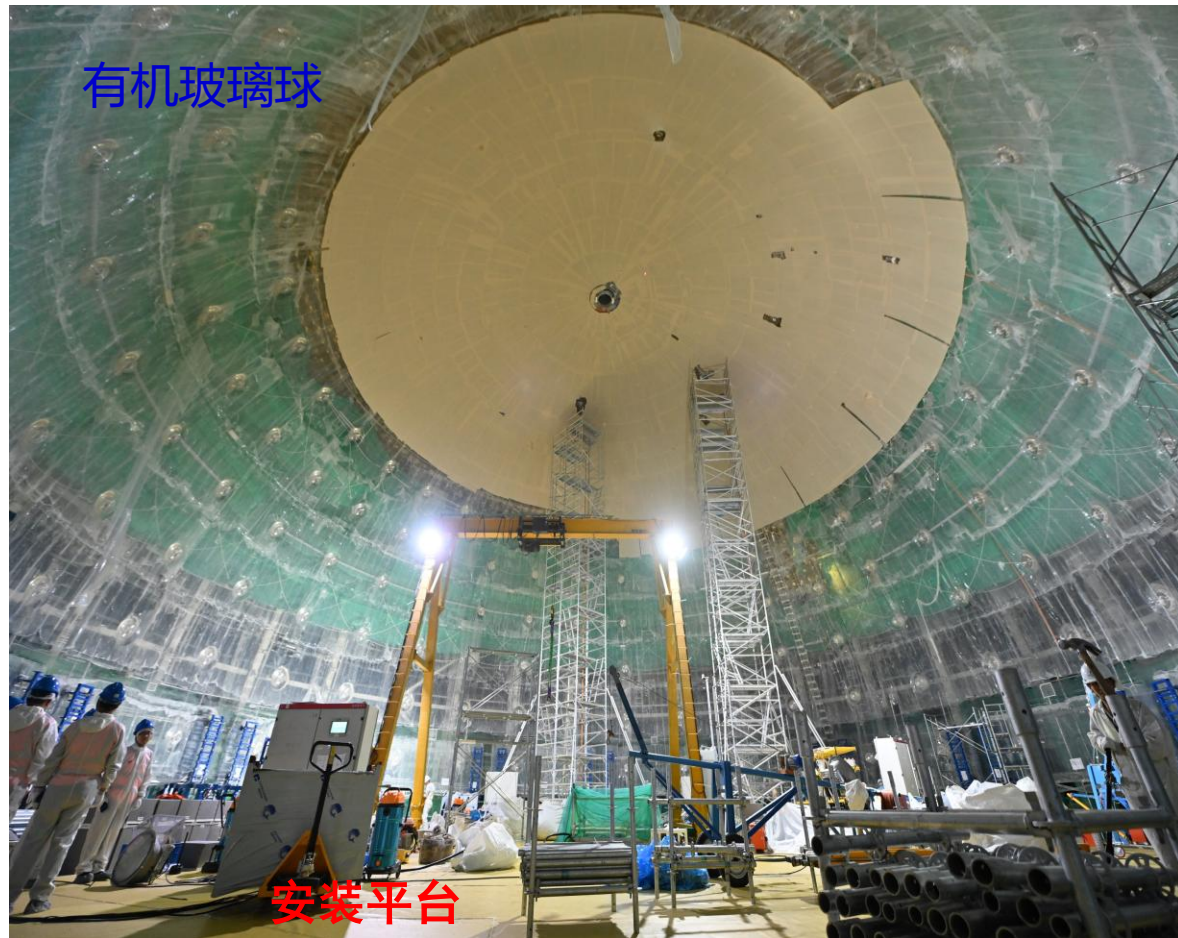
聚合缝打磨



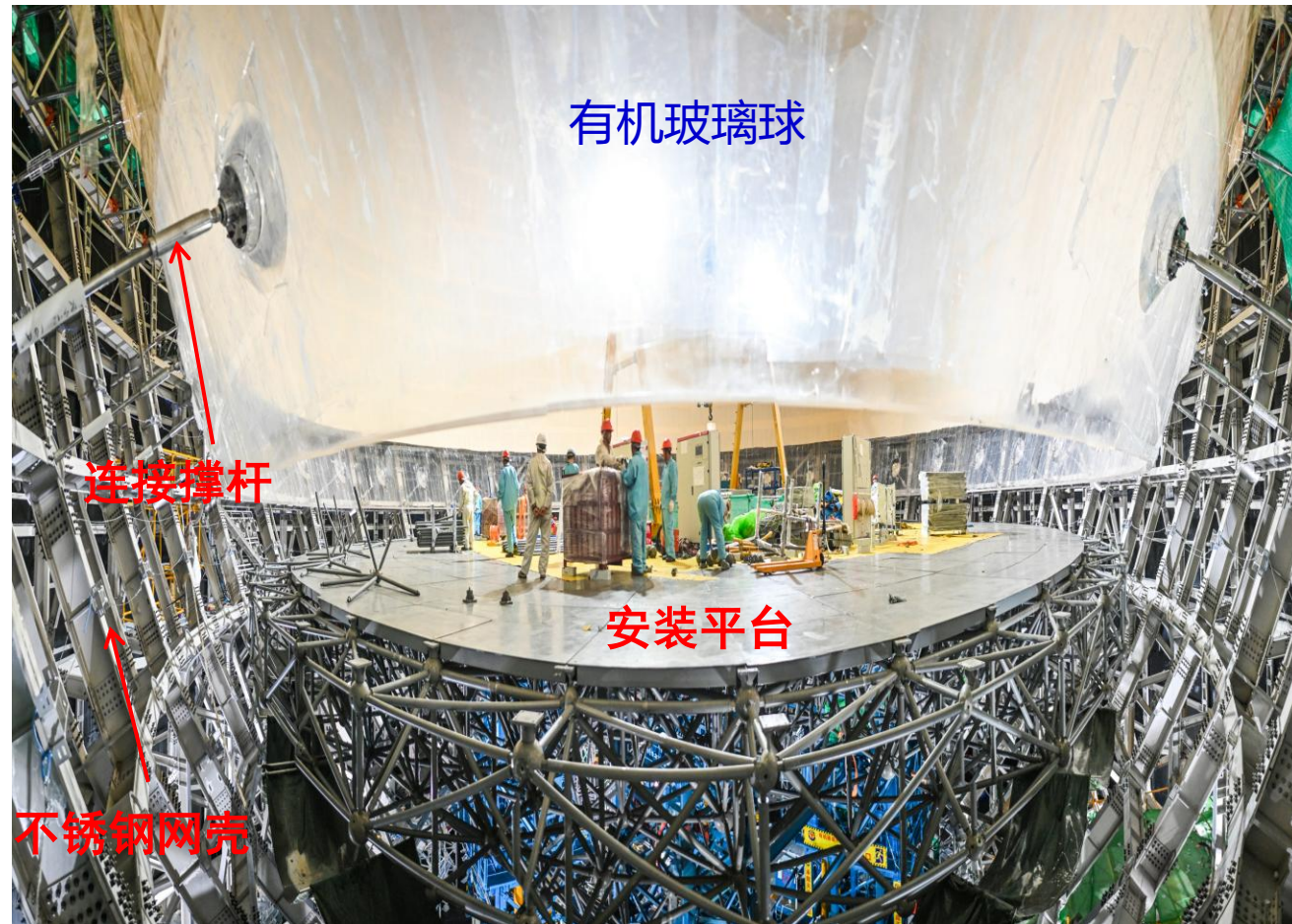
有机玻璃表面冲洗



有机玻璃表面贴膜

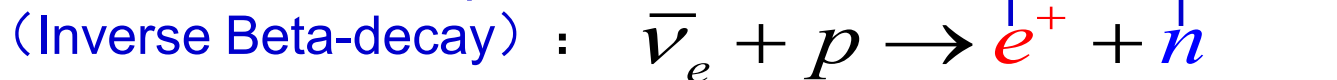


有机玻璃球内部

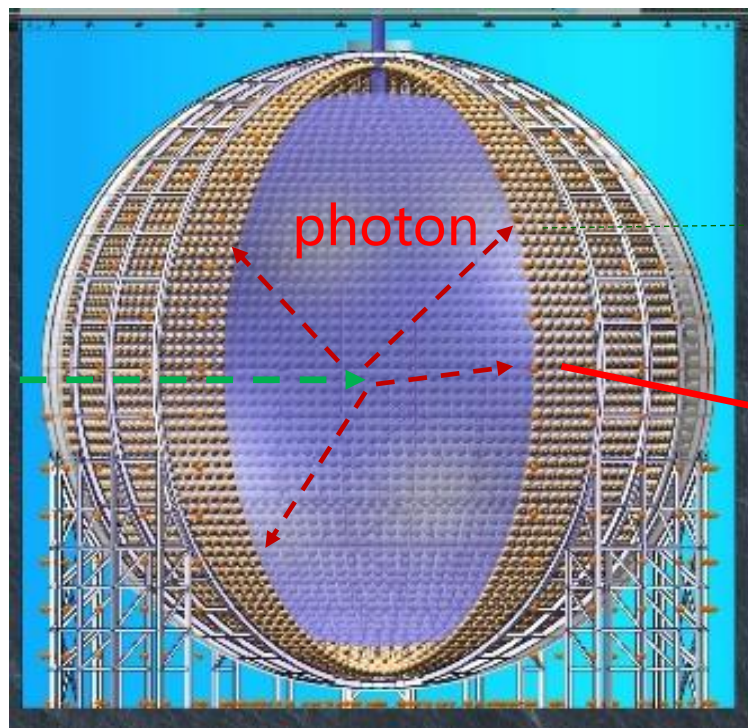


有机玻璃球外部

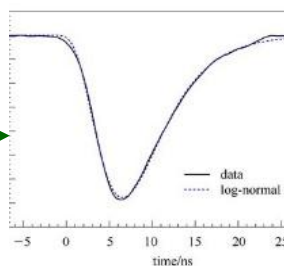
- ◆ 中微子与液闪发生反 β 衰变



e^+ 和 n 在LS中沉积能量发光



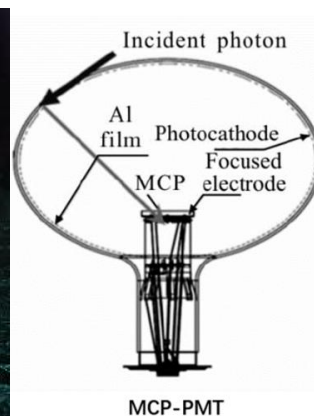
Single photon detection



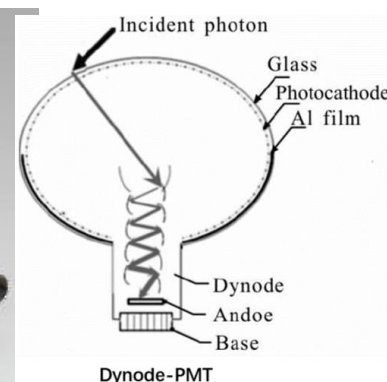
- ◆ JUNO 共采用 20360 支 20-inch PMT + 25600支 3-inch PMT, 光学覆盖率78%



- ◆ 15360 支自主研发的新型微通道板结构MCP-PMT
- ◆ 5000 支打拿极型光电倍增管 (dynode PMT, 日本滨松)
- ◆ 光电倍增管主要性能参数(JUNO验收测试结果)

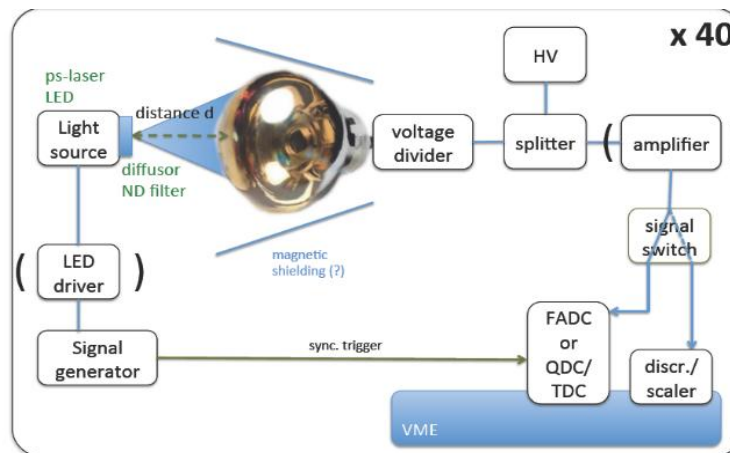


MCP PMT (15360支)



dynode PMT (5000支)

Parameters		LPMT (20-inch)	
		Dynode PMT	MCP PMT
工作高压 (Gain= 1.0×10^7)		1863	1748
单光电子信号幅度 (mV)		6.5	7.5
探测效率 (PDE)		28.5%	30.1%
暗噪声计数率 (DCR)[kHz]	Bare	15.3	49.3
	Potted	17.0	31.2
渡越时间涨落 (σ) [ns]		1.3	7.0
峰谷比 (P/V)		3.8	3.9
信号上升时间 (ns)		6.9	4.9
For more information		Eur.Phys.J.C 82 (2022) 12, 1168	



PMT测试示意图

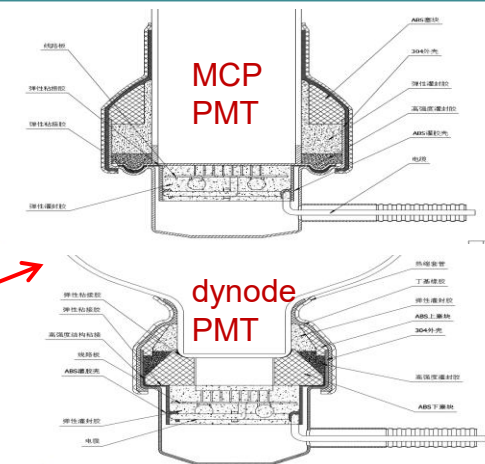


PMT测试装置

PMT水下工作20-30年，不可更换

• 防水封装 (Waterproof potting)

- 厂家仅提供“裸管”，需要对PMT接口和分压板进行灌封
- 可靠性要求：年失效率 $< 0.1\%$ （前6年）
- 研发多重密封设计，采用多种密封胶，增加可靠性
- 建立封装实验室和人员队伍，2年左右完成2万支PMT的封装和检漏；



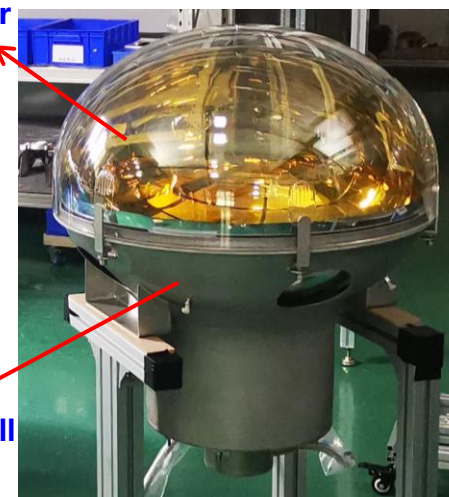
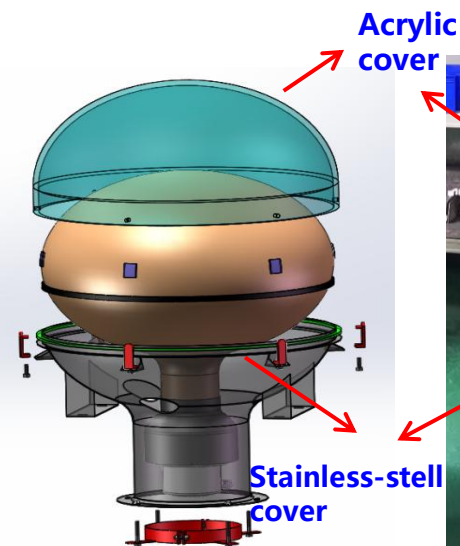
PMT potting design



PMT potting workstation

• 防水下殉爆 (Implosion protection)

- 防止发生类似日本Super-K的链式爆炸事故
- 顶部配置有机玻璃防护罩，实现高透光率($>98\%$, 水中)和高精度要求($\pm 0.4 \text{ mm}$)
- 底部配置不锈钢防护罩，实现支撑及PMT安装集成
- 进行几十次殉爆实验，验证防护可靠性



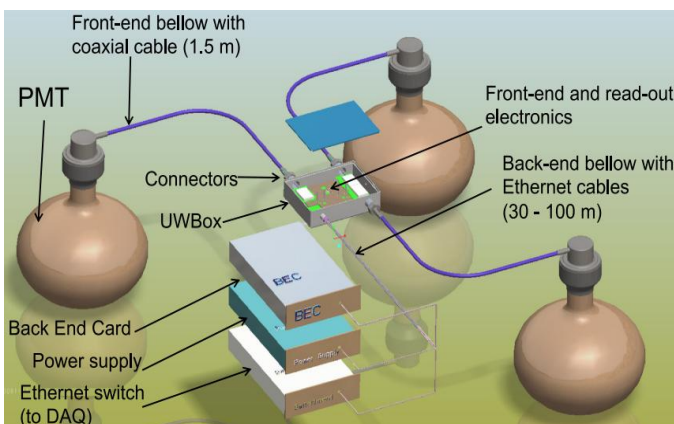
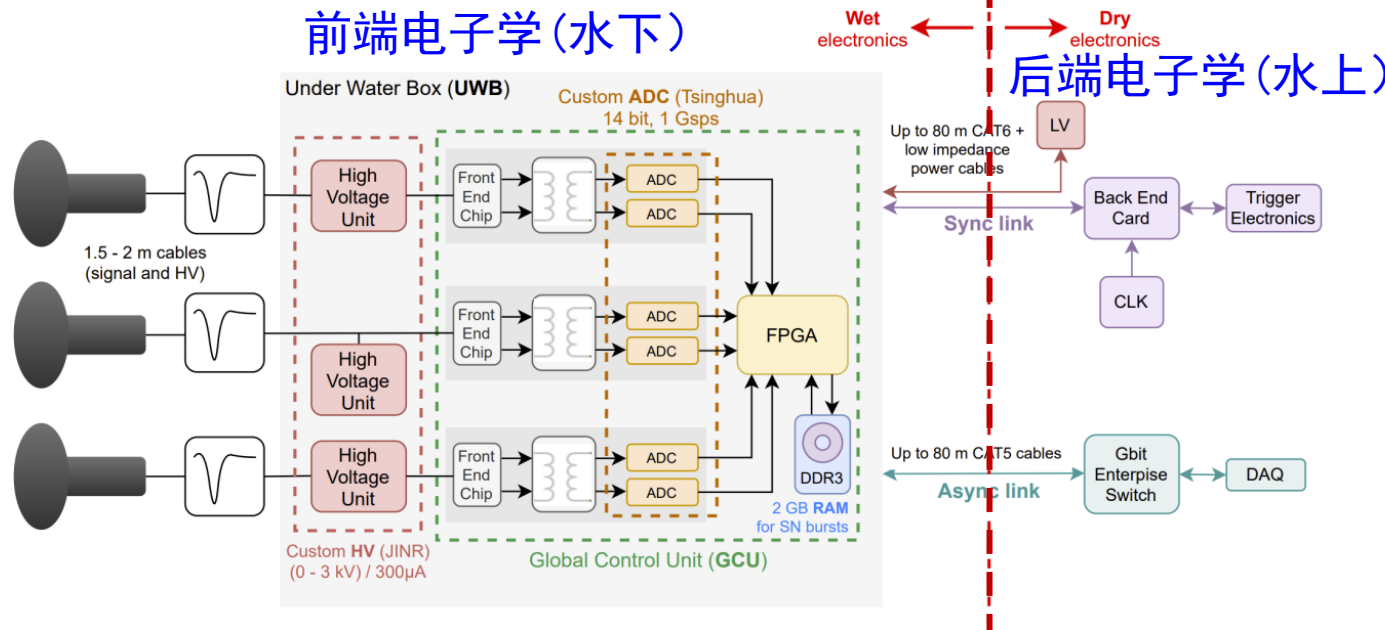
PMT protection design



Implosion test

JUNO 要求及设计:

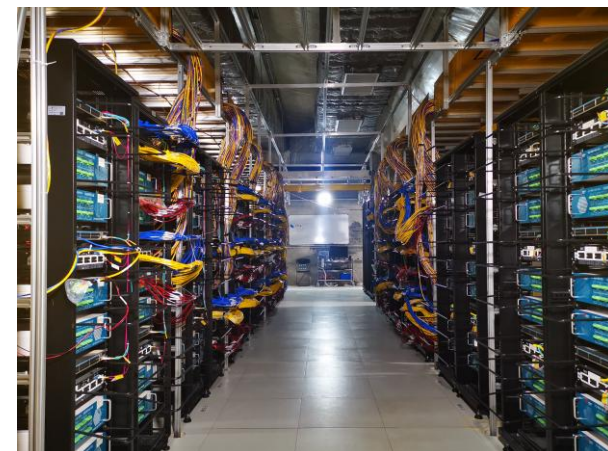
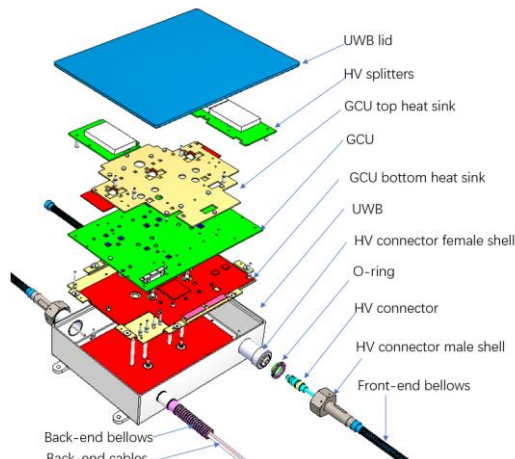
- 测量范围:1-4000 PE(7.5mV-7.5 V), 高低量程
- 测量精度: 10%@1-100PE, 1%@>100 PE
- 高速、高精度全波形采样: 1GHz、14bit ADC
- 前端电子学(ADC, GCU) 置于水下盒子中, 距 PMT 1.5m; 每个电子学盒连接3支PMT (1F3)
- 后端电子学置于大厅电子学间, 与前端采用70米电缆连接
- 前端可靠性要求: 前6年失效率< 0.1%@1year



前端电子学结构设计 (1F3)



前端电子学盒设计 (ADC, GCU...)



后端电子学 (BEC, LV...)

- ◆ 每3支20-inch PMT之间放置1支3-inch PMT
- ◆ 目标：1) 刻度20-inch PMT 在多个光子入射下的能量测量的非线性，提升能量测量精度（双量能器系统-Double calorimetry）
2) 提升 3% 的光收集量（75% -> 78%）

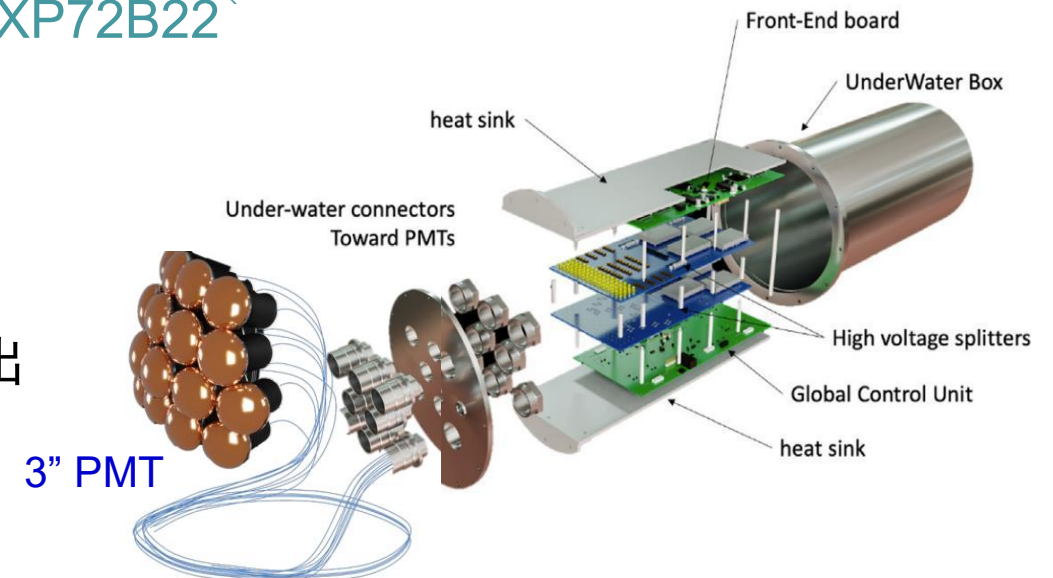
Parameters	Class	Requirement (limit)	(mean)	% of production tested HZC	JUNO	Tolerance of diff.	Result (mean)
Φ (glass bulb)	A	[78, 82] mm	-	100%	10%	-	OK
QE@420 nm	A	>22%	>24%	100%	10%	<5%	24.9%
High Voltage	A	[900,1300] V	-	100%	10%	<3%	1113 V
SPE resolution	A	<45%	<35%	100%	10%	<15%	33.2%
PV ratio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

PMT 参数测试结果

- ◆ 读出电子学
 - 200 台水下电子学盒，每台负责16x8=128 路PMTs 读出
 - 通过ASIC Battery Cards (ABC)读出，每块板包含 8个 CatiROC 芯片，仅读出总电荷及时间，不进行波形采样

3" PMT

(25600支
海南展创
XP72B22)





PMT防护罩组装



PMT模块组装



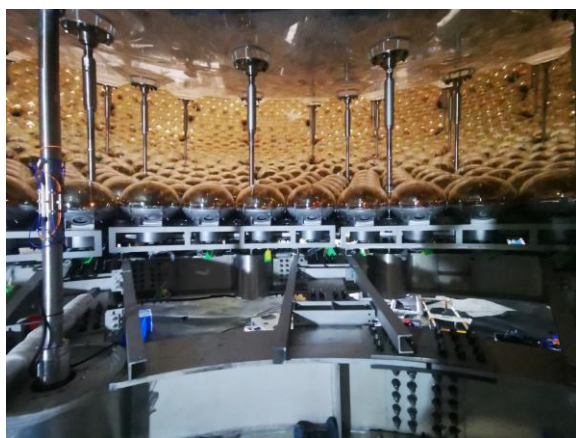
PMT模块运输下井



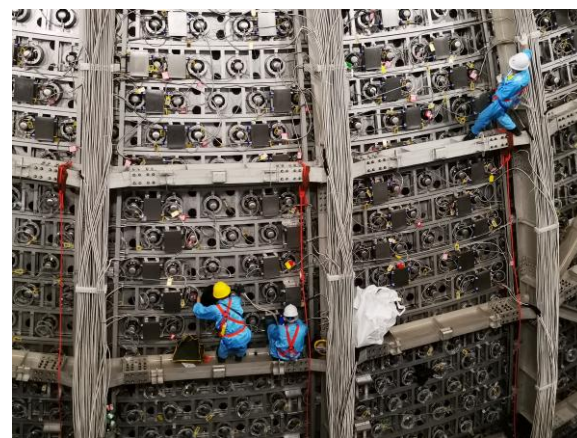
PMT模块安装（上半球）



PMT模块安装（赤道）



PMT模块安装（下半球）



20-inch PMT电子学安装



3-inch PMT电子学安装

• JUNO要求

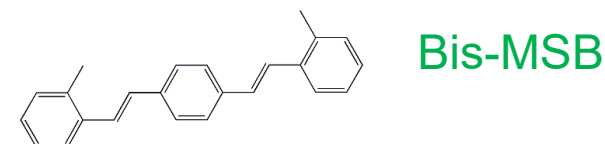
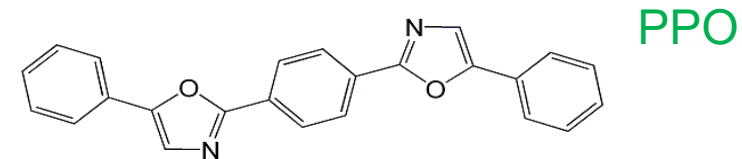
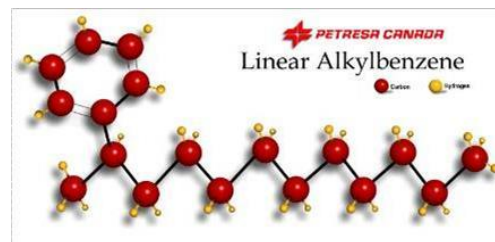
- 光产额: 12000 photons/MeV
- 衰减长度: $>20\text{m}@430\text{nm}$
- 低放射性本底:
 $^{238}\text{U} < 10^{-15}\text{g/g}$, $^{232}\text{Th} < 10^{-15}\text{g/g}$, $^{40}\text{K} < 10^{-17}\text{g/g}$ (测质量顺序要求)
- 生产速度: $7\text{ m}^3 / \text{hour}$ (6个月完成灌装)



• JUNO LS 配方

在LAB中加入2.5g/L PPO, 3 mg/L bis-MSB,以及50 mg/kg BHT

- 溶剂LAB: 线性烷基苯, 2万吨
- 发光物质PPO: 60吨
- 波长位移剂Bis-MSB: 72千克
- 抗氧化剂BHT: 1吨

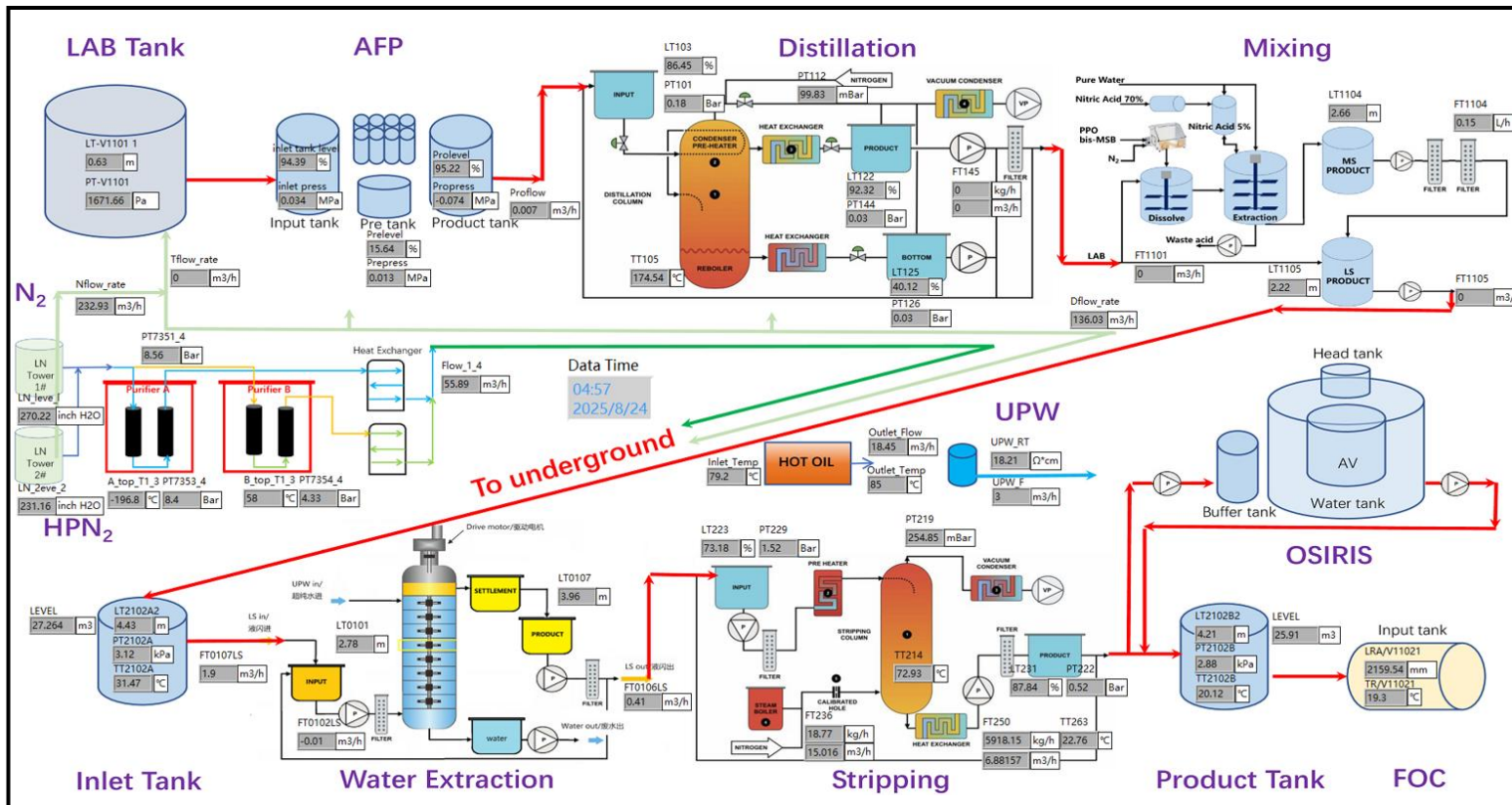


◆ 为满足JUNO要求:

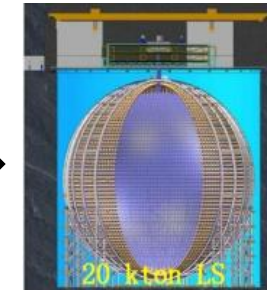
- 对液闪进行四次纯化: Al_2O_3 吸附、减压蒸馏、水萃取以及气体剥离
- 设计包括存储、纯化、混制、运输、在线监测等在内的多套系统

Flow chart of LS production and purification

LS subsystems



System	Function
1 5000 m ³ tank and pipeline	LAB storage and delivery
2 Alumina Filtration Plant	LAB optical purification
3 Distillation Plant	Remove U/Th
4 Mixing Plant	LS mixing and PPO purification
5 Water Extraction Plant	Remove K/Pb/Ra
6 Stripping Plant	Remove Rn
7 OSIRIS	LS online inspection
8 Filling Overflow Circulation Plant	LS Filling to detector and Circulation
9 High Pure Nitrogen Plant	For Stripping system
10 Ultra Pure Water Plant	For Water Extraction and Mixing



仅包含主线流程和设备：



5000 m³ LAB 存储罐



Al₂O₃纯化去除光学杂质



蒸馏去除放射性杂质
(²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K)

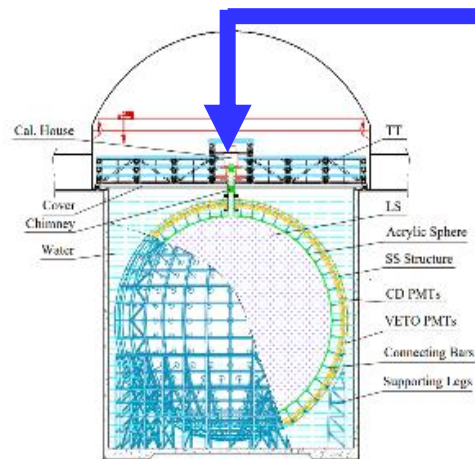
2.4%



液闪混制 (LAB + PPO + bis-MSB + BHT)

97.6%

混制



本底测量(OSIRIS)



氮气剥离除气体杂质
(²²²Rn, ⁸⁵Kr, ³⁹Ar, Q₂)



水萃取除放射性杂质
(²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K)



1800 m 不锈钢管道到地下

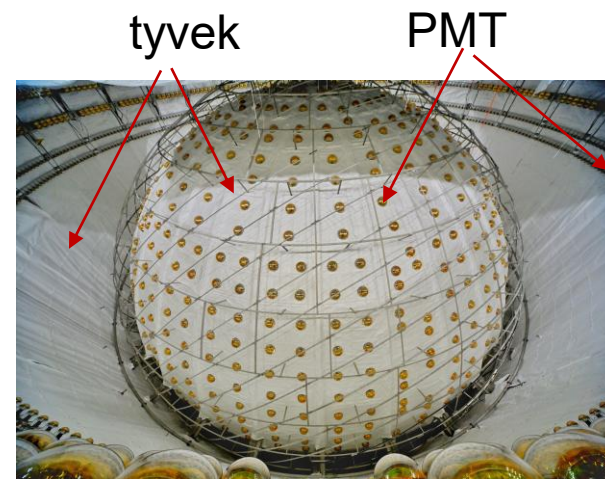
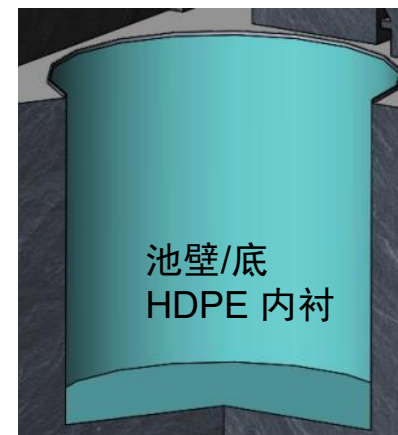
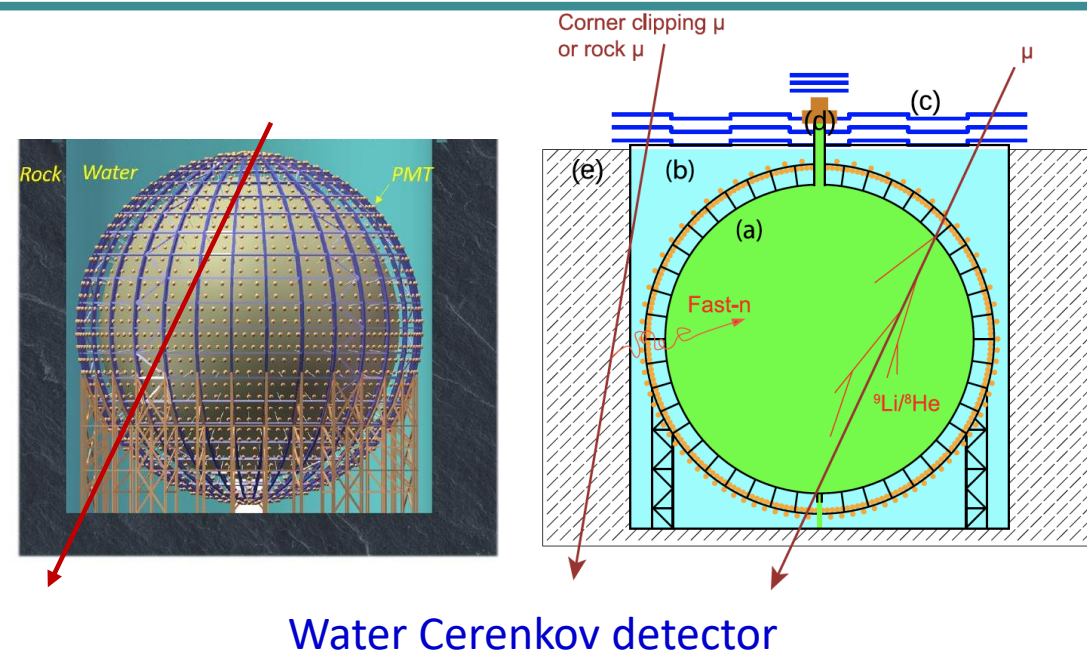
◆ JUNO 对VETO的要求:

- 700 m 岩石覆盖，LS中Muon rate 5 Hz，水里4Hz，平均能量 207 GeV
- Muon与周围岩石反应产生快中子；Muon 与LS ^{12}C 发生散裂反应诱发 $^9\text{Li}/^8\text{He}$ ，其产生 β -n 级联衰变是重要本底（~127个/day）（IBD event: ~47个/day）；
- 需要对Muon进行VETO以压低本底：
 - $^9\text{Li}/^8\text{He}$ 本底事例：0.8 个 / 天
 - 快中子本底事例：0.1 个 / 天

◆ 水切伦科夫探测器（Water Cherenkov detector)设计:

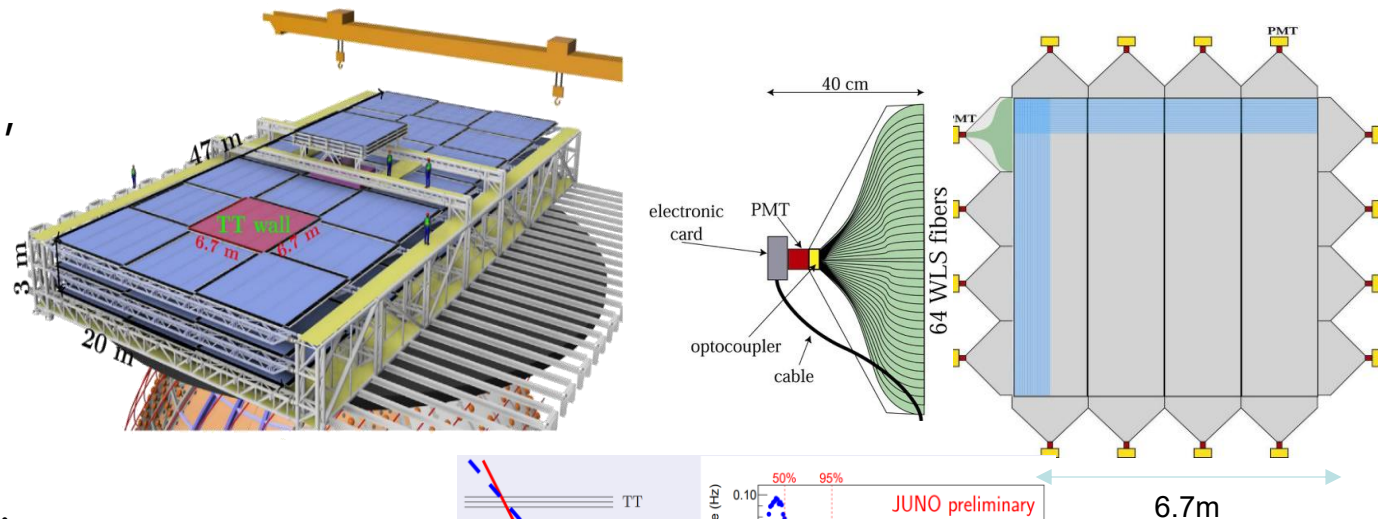
- Muon 事例标记效率 > 99.5%
- 4万吨超纯水，2400+348 支 20-inch PMTs
- 水池内衬：5 mm HDPE (维持水质洁净+阻挡岩石析氢)
- 探测器表面通过Tyvek反射膜增加光收集
- 超纯水系统（100吨/小时， $R \sim 18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$, $\text{U/Th} < 10^{-15}$

g/g, $\text{Rn} < 10 \text{ mBq/m}^3$)

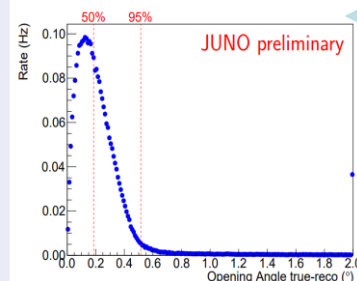
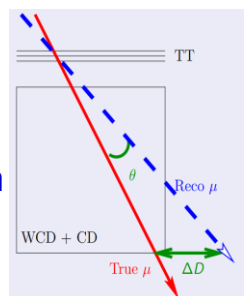


◆ 顶部径迹探测器 (Top Tracker)

- 重建Muon三维径迹, 确定Muon穿过CD的路径, 减少符合死区和时间
- 复用 OPERA 塑料闪烁体, 装配新的MaPMT及电子学
- 63 个探测模块; 覆盖顶部面积~ 60%
- 共 3 层, 3m高, 对Muon track 进行重建
- 角分辨: $\Delta\theta \sim 0.2^\circ$ (median value); 底部位置分辨: $\Delta D \sim 20$ cm



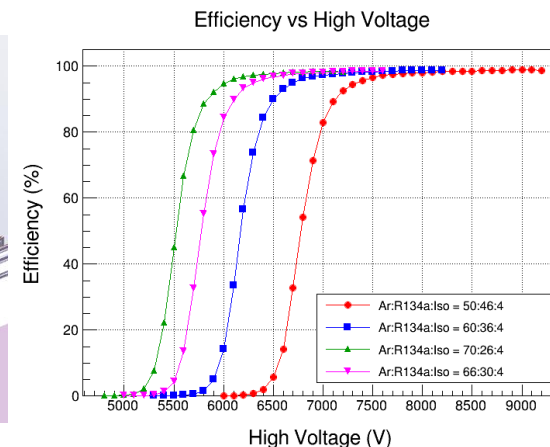
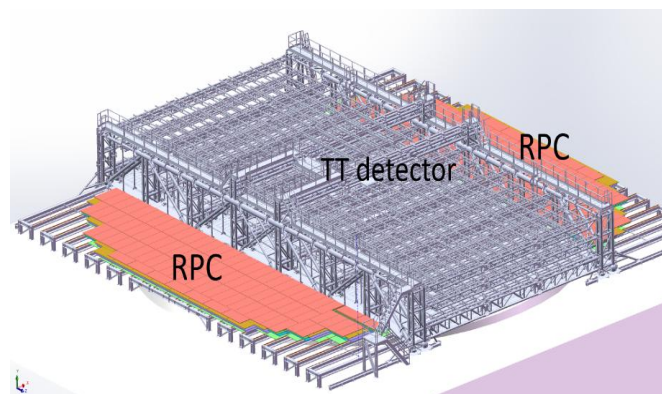
spatial
resolution

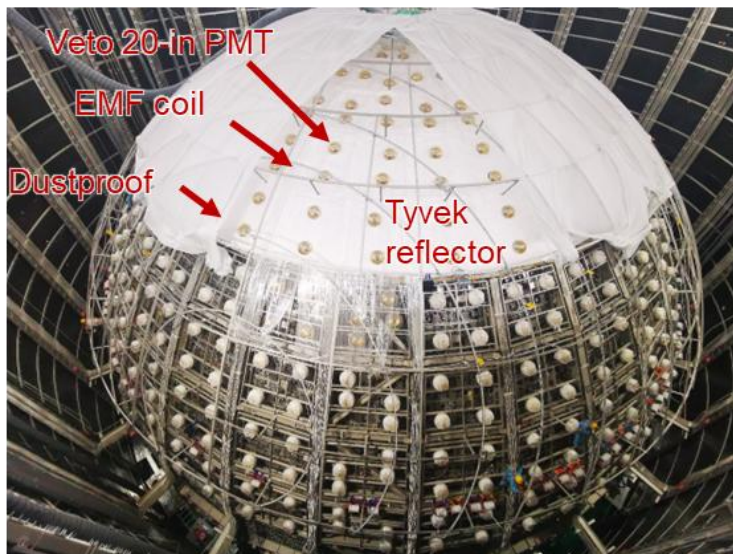


angular
resolution

◆ 顶部RPC阵列 (新增, 正在安装)

- 用于改善大气中微子测量, 排除宇宙线Muon本底
- 改造复用 ARGO-羊八井 RPC, 装配新的电子学
- 864个RPC模块, 覆盖水池上方剩余40%区域
- 5层连续堆叠, 3/5层符合; 测2D击中点, 效率>99%
- 工作高压, 工作气体比分正在优化 (HV= 6300V, Ar:R134a:isobutane (%)=70:26:4)





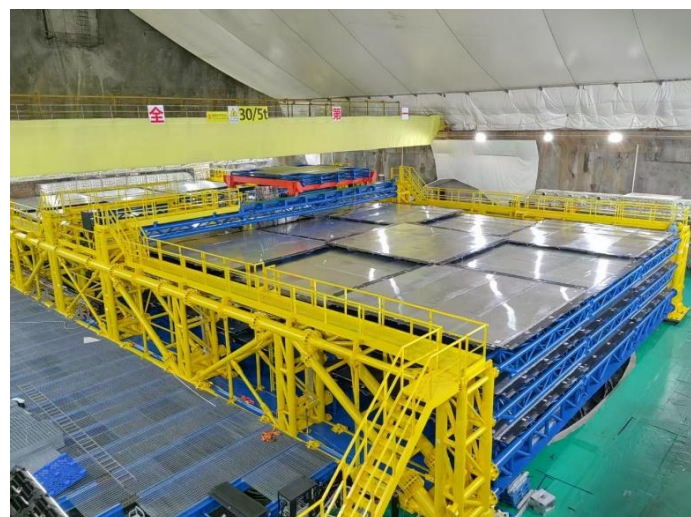
水切伦科夫探测器安装



水池壁PMT安装



纯水制造设备(100t/h)

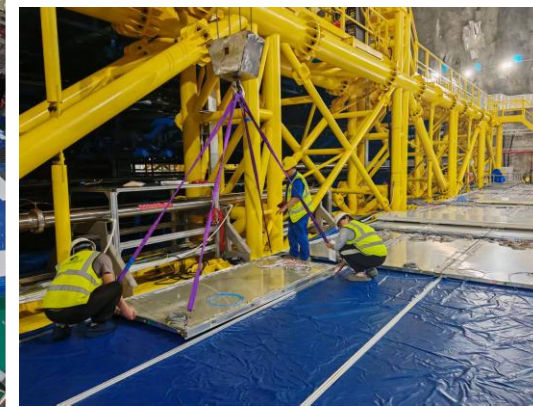


顶部径迹探测器安装



Region I (Front of E-Room #1)

Region II (Front of E-Room #2)



顶部RPC阵列安装

JUNO 设计要求:

- 能标不确定性和能量非线性： $<1\%$
- 四套系统：ACU, CLS, GTCS, ROV, 可对探测器开展 1D, 2D, 3D 扫描

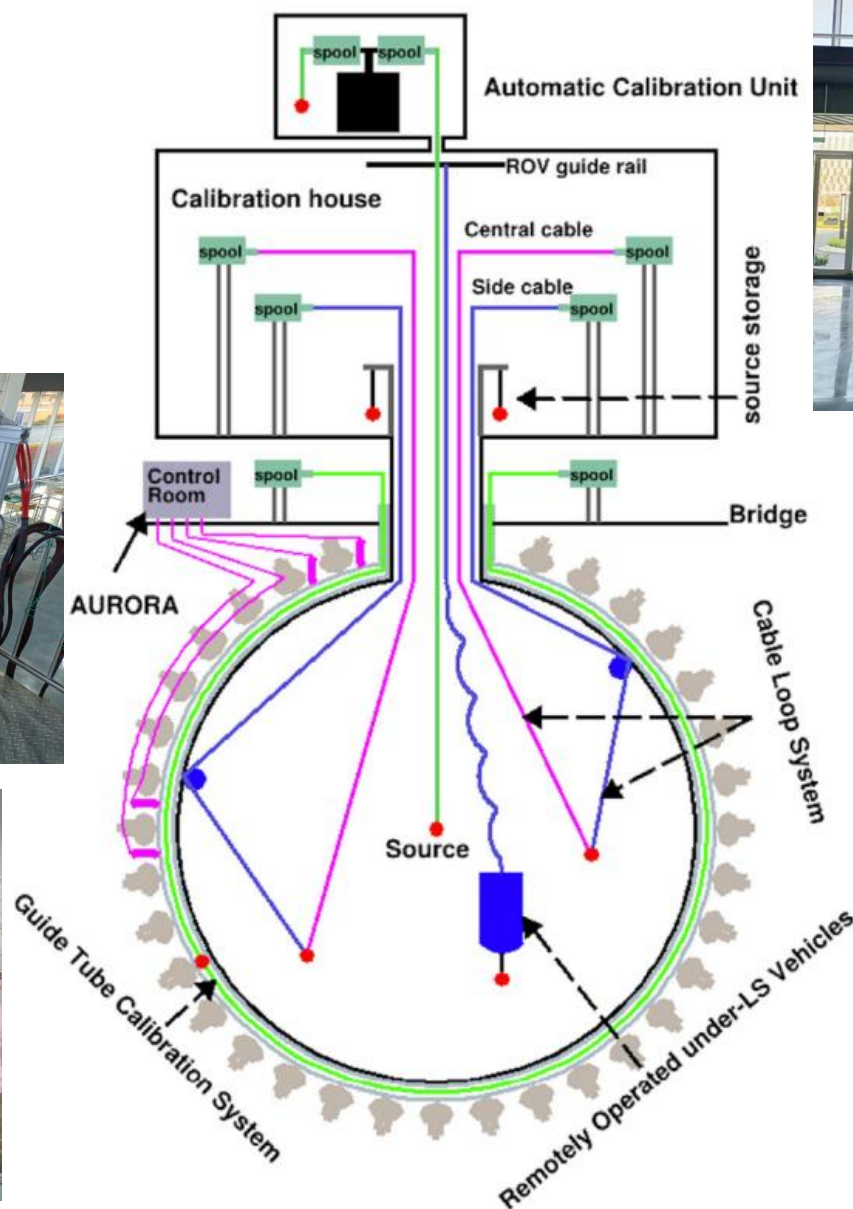
- Automatic Calibration Unit (ACU) :**
沿球中心轴线1D刻度;
(^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{40}K , ^{68}Ge , ^{60}Co , Am-C, Am-Be, sensors, laser)



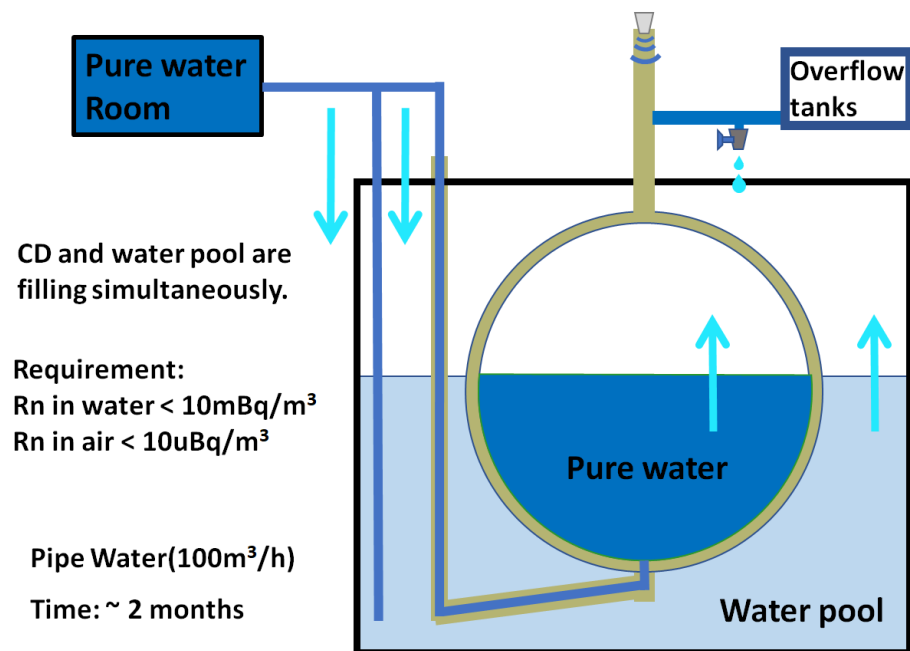
- Cable Loop System (CLS) :**
球内2D平面刻度;
(Am-C, ^{68}Ge , ^{137}Cs)



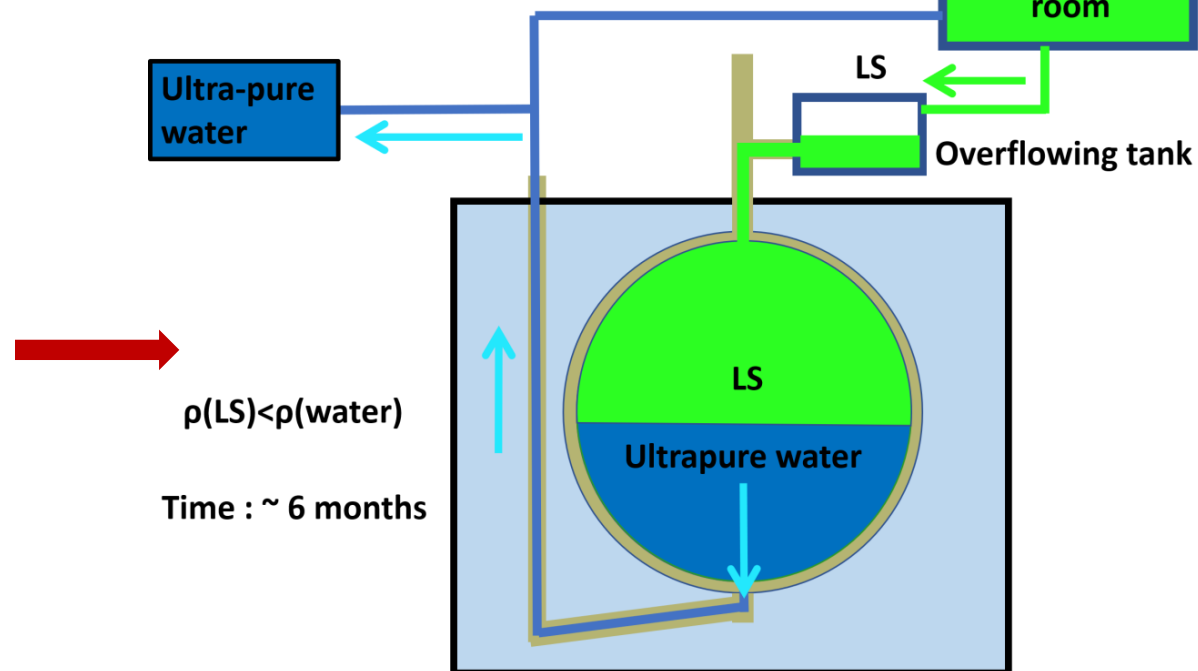
- Guide Tube Calibration System (GTCS) :**
沿球边界1D刻度
- Remotely Operated under-LS Vehicles (ROV) :**
球内3D空间刻度



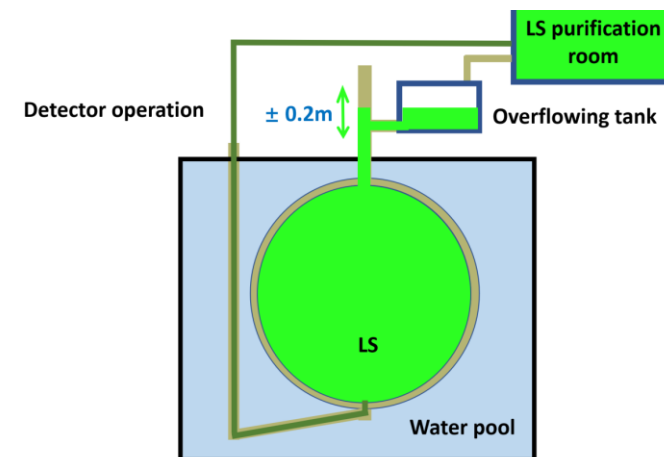
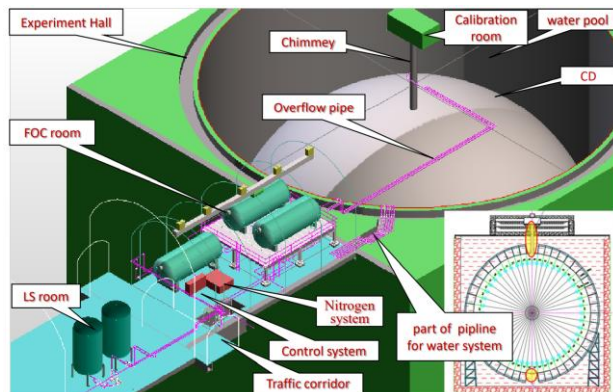
◆ 超纯水灌注:(100m³/h, 2024.12.18-2025.2.1)



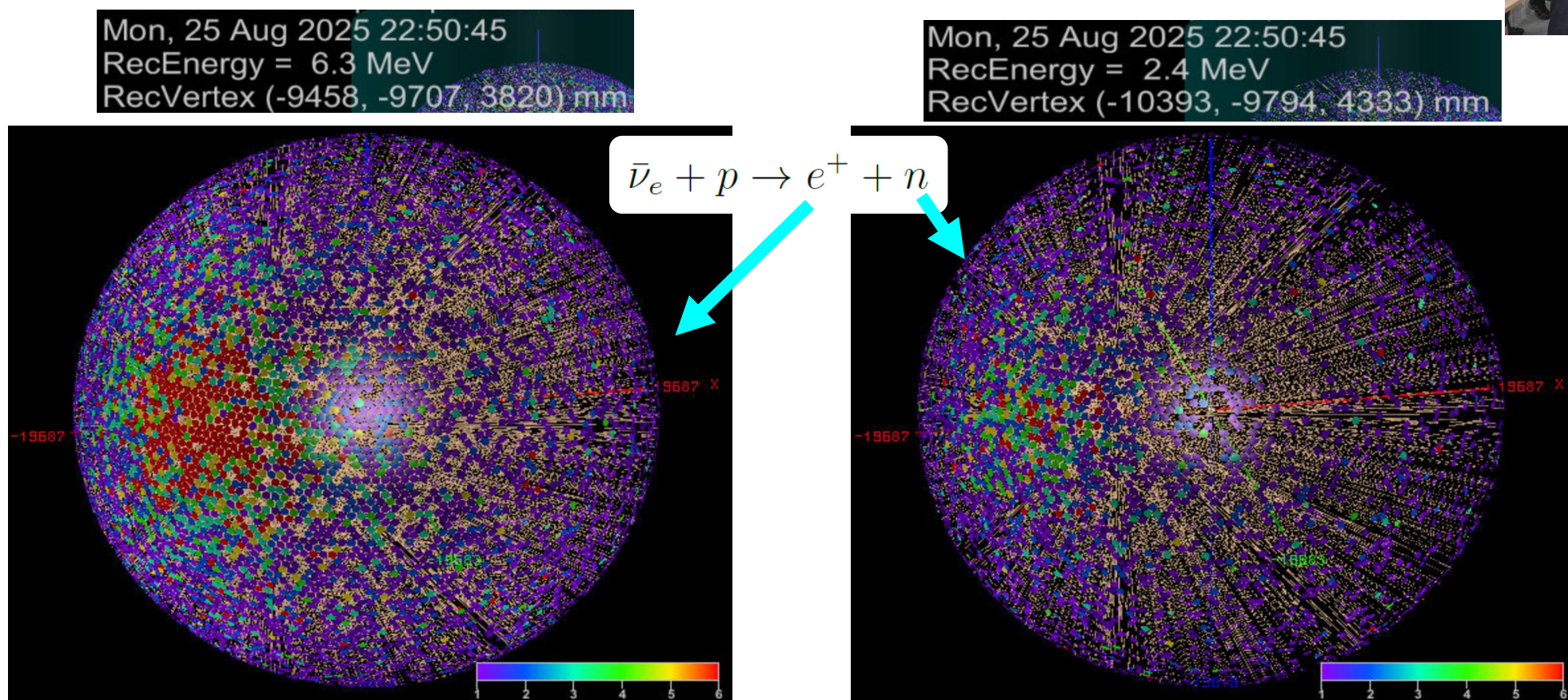
◆ 液闪灌注: (7m³/h, 2025.2.9-2025.8.22)



液闪及纯水灌注系统 (FOC)



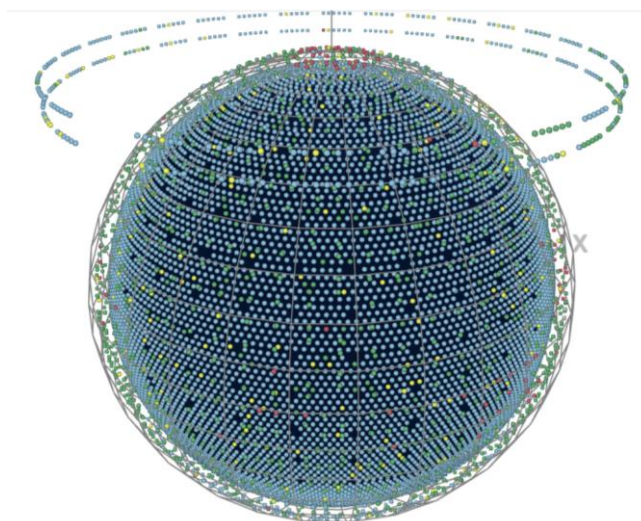
- ◆ 经历10年的建设，JUNO于2025年8月26日开始正式运行取数
- ◆ 国际上首个建成的下一代大型中微子实验装置



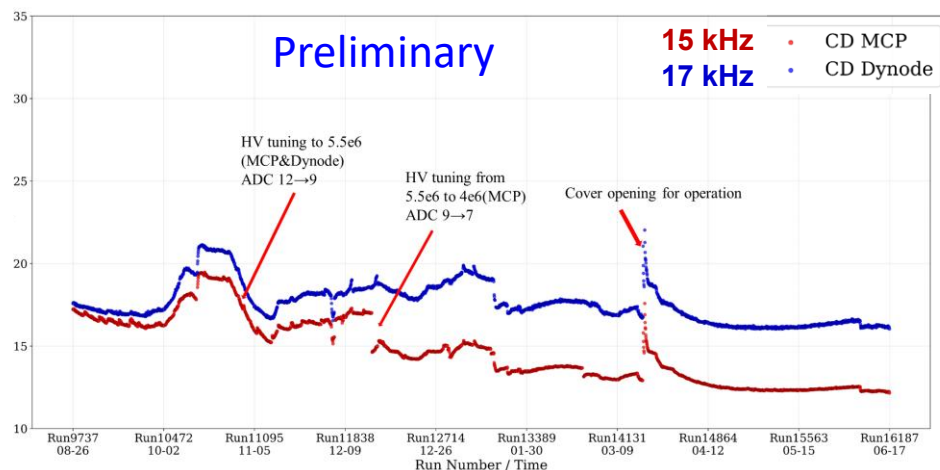
反应堆中微子IBD事例图像

20英寸PMT及其读出电子学:

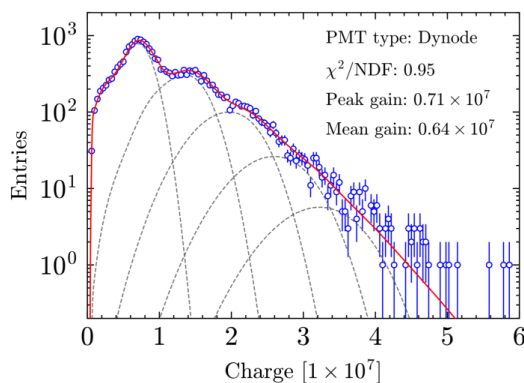
- PMT 总体工作正常, 20-inch PMT 暗噪声计数率 (DCR)逐步下降, MCP PMT由原来验收测试的30KHz $\rightarrow$ 15kHz
- 为提高PMT工作稳定性和寿命, 降低flashing的影响, 调整MCP(dynode) PMT增益 $1.0 \times 10^7 \rightarrow 7.4 \times 10^6 \rightarrow 4.0 \times 10^6$ ($1.0 \times 10^7 \rightarrow 6.5 \times 10^6 \rightarrow 5.5 \times 10^6$)
- PMT signal及charge spectrum正常, 能分辨SPE及多光电子信号
- 电子学噪声水平RMS ~ 2.8 ADCs, 对应0.055 PE, 好于JUNO设计值 (0.1PE)
- 目前PMT&电子学死道 ~ 40 通道, 占比 $\sim 0.2\%$, 满足JUNO设计要求



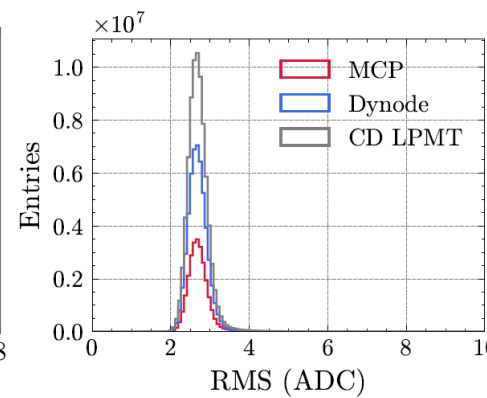
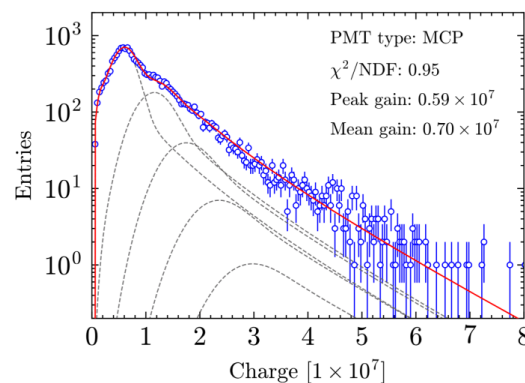
PMT 3D display 及运行状态监测



DCR变化: due to 高压调整, 水池温度变化及临时打开探测器



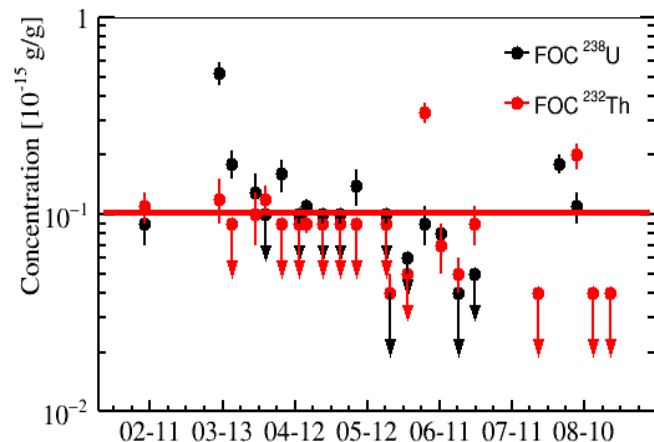
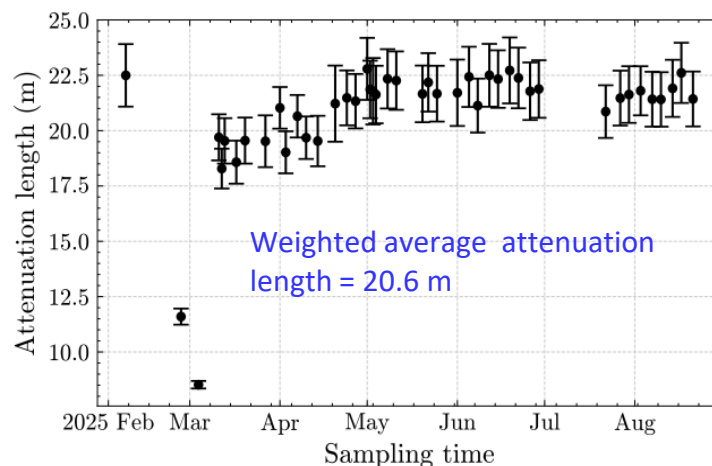
SPE pulse shape and calibration



Electronics noise

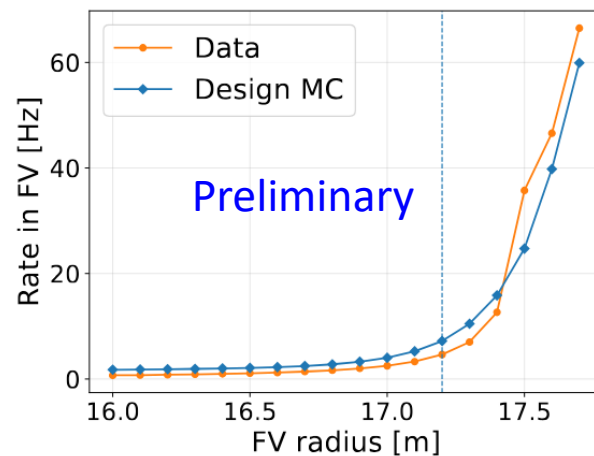
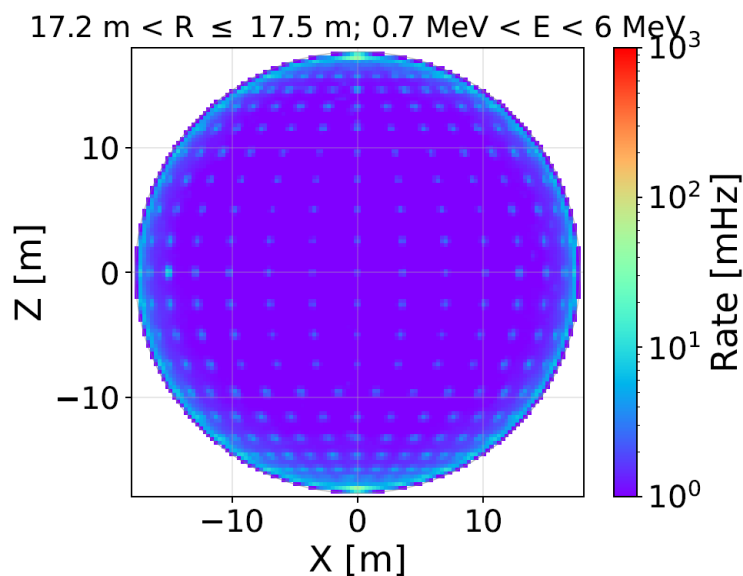
◆ 液闪(LS)性能好于设计水平

- LS加权平均衰减长度: 20.6 m
- 灌装过程中每周取样:
U/Th含量 $< 1 \times 10^{-16}$ g/g by ICP-MS
- ^{222}Rn 在新灌注的LS中:
 $< 1 \text{ mBq/m}^3$ by OSIRIS+CD:
- ^{14}C 测量结果: $\sim (4-5) \times 10^{-17} \text{ g/g}$



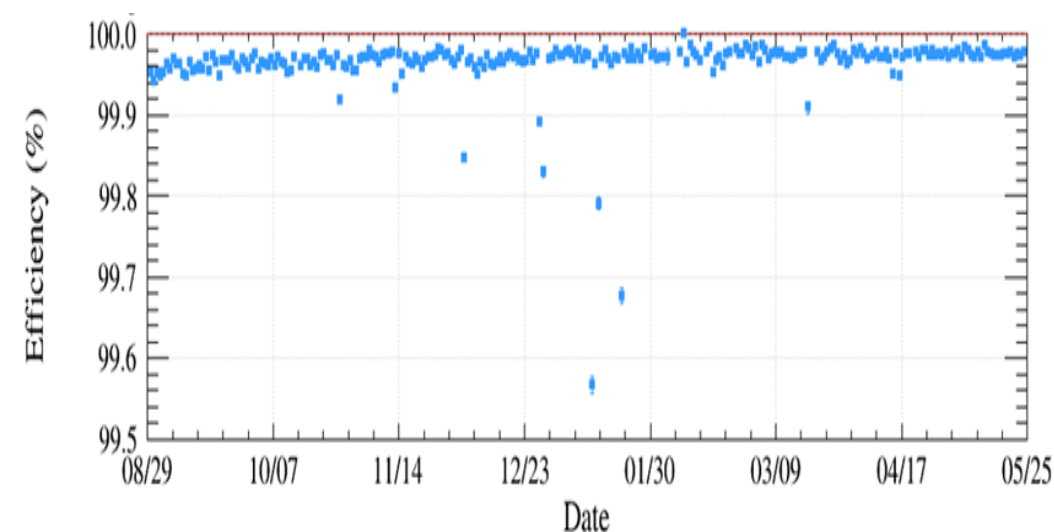
◆ 探测器总体本底水平满足JUNO 要求

- 能够清晰分辨探测器不同结构: acrylic surface background from dust is limited → washing is effective
- 单事例率 (Single event rate) : $< 6 \text{ Hz}$ (design 7.2 Hz)
- 本底模拟结果 (LS, PMTs, steel structure, acrylic, water, Rn) 与数据吻合

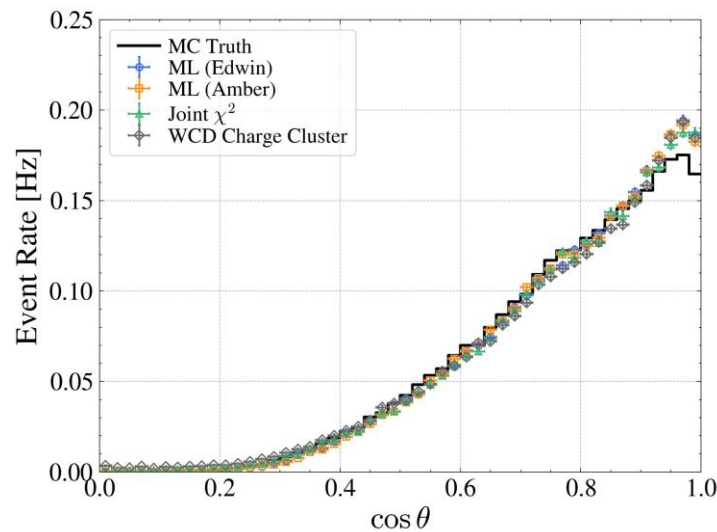


Muon事例与径迹重建:

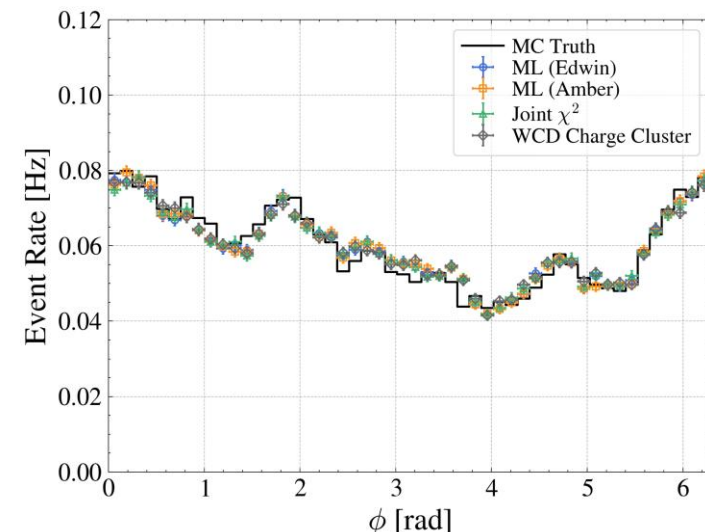
- Muon trigger rate: CD ~5 Hz, Water Pool ~4 Hz, 符合预期
- CD Muon detection efficiency: > 99.5%
- 重建Muon事例角分布 (θ - ϕ) 与模拟符合良好



Muon detection efficiency

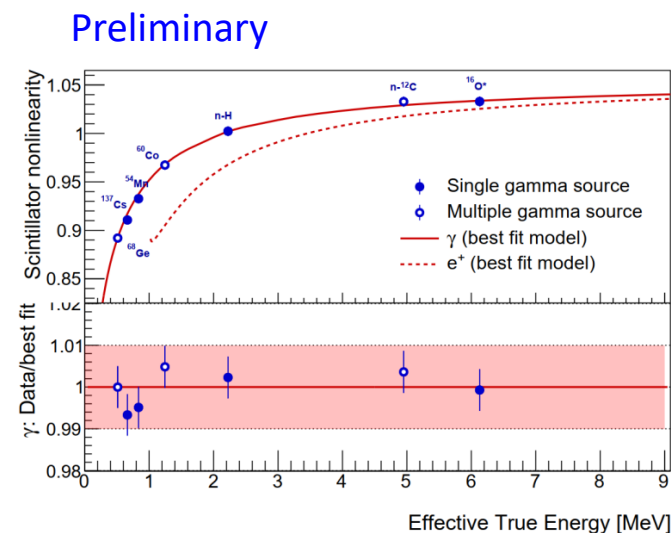
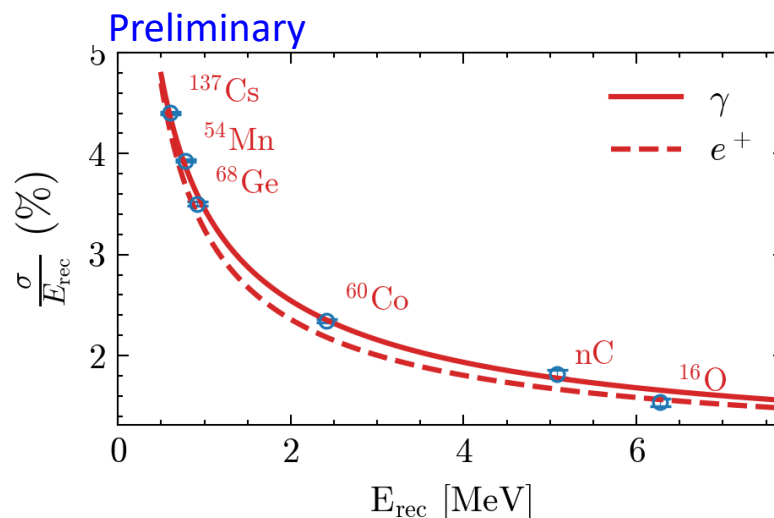
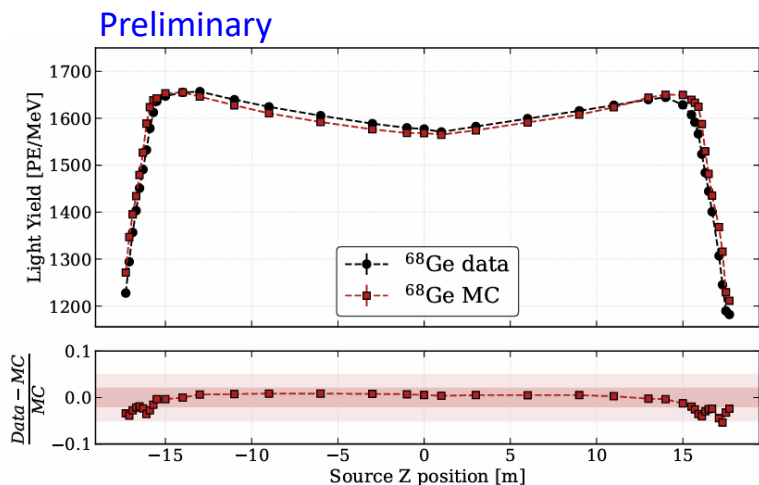
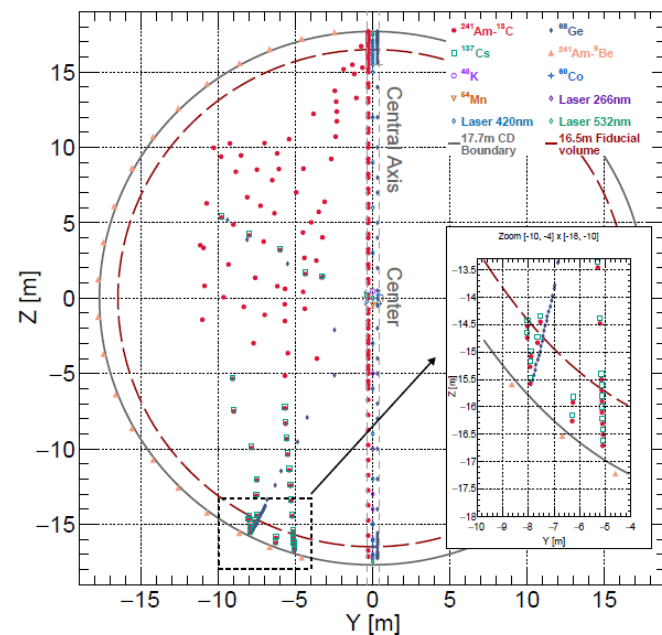


Reconstructed muon angular distribution agree well with MC



能量响应与能量分辨率: 总体满足JUNO设计要求

- 由 ^{68}Ge 测到的光产额 > 1600 p.e./MeV, 数据与模拟符合良好
- 探测器中心处 ^{68}Ge (2×0.511 MeV γ 峰) 测到的能量分辨率: $\sim 3.5\%$
- ^{214}Pb α 事例 (0.93MeV) 测到能量分辨率: $\sim 2.9\%$
- 能量分辨率需要进一步优化 (模拟, 刻度, 压低 ^{14}C 本底, 改进算法等)
- 刻度与事例重建
 - 空间非均匀性与时间不稳定性: $\text{RMS} \sim 0.3\%$
 - 能量非线性刻度精度: $< 1\%$, $\text{RMS} \sim 0.4\%$



- ◆ 介绍了JUNO 中心探测器（包括有机玻璃球，不锈钢网壳，光电倍增管，液闪等），反符合探测器（包括水切伦科夫探测器，顶部径迹探测器，顶部RPC阵列）以及探测器刻度系统的设计和建造
- ◆ 经历了10年的工程建设，JUNO探测器顺利建造完成并开始正式运行，不到一年的数据已取得重要物理结果
- ◆ JUNO探测器的总体性能满足设计要求，正在优化探测器的运行参数，以及深化对探测器能量响应的研究

Thank you!