



台山中微子实验进展

Taishan Antineutrino Observatory (TAO or JUNO-TAO)

谢宇广
代表JUNO-TAO



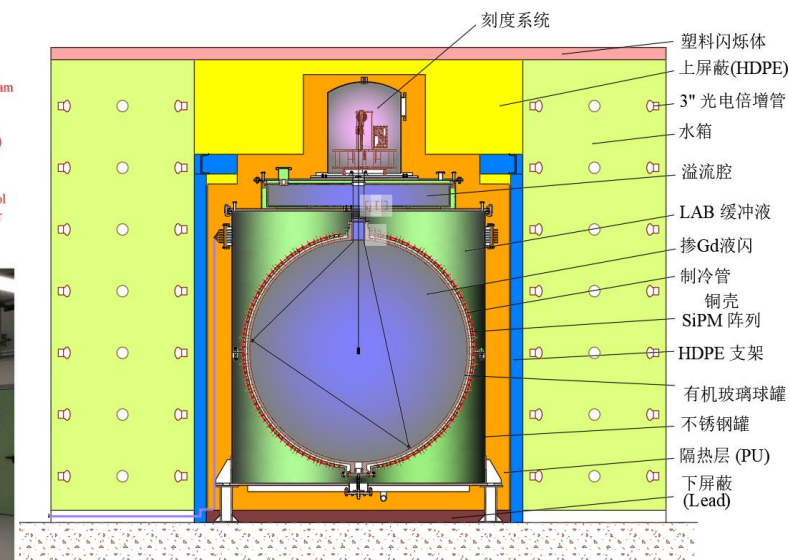
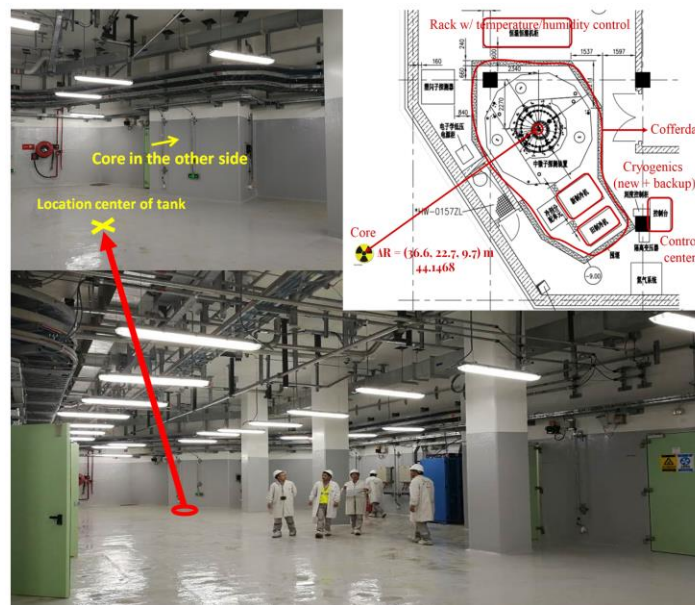
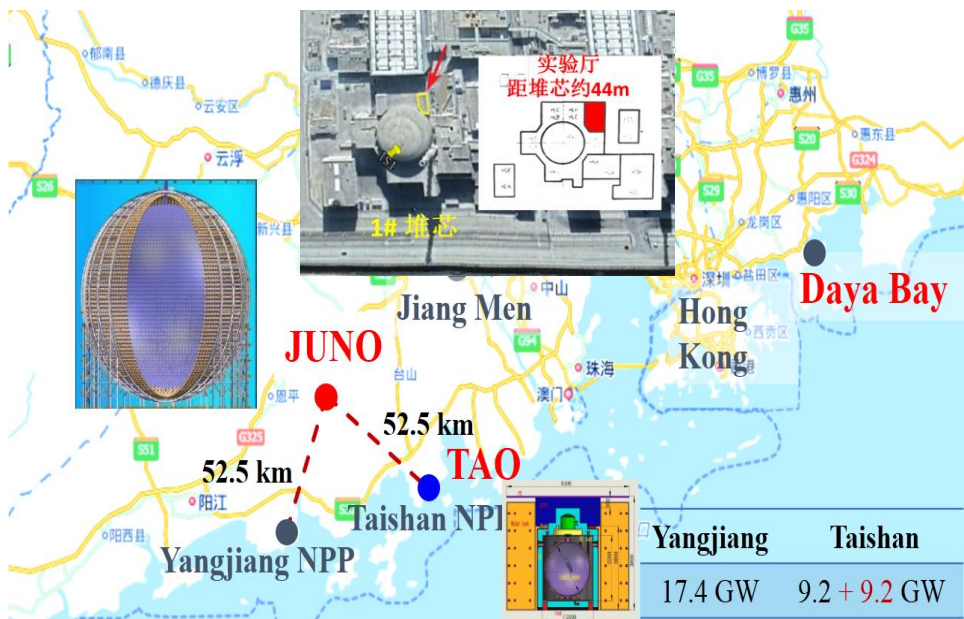
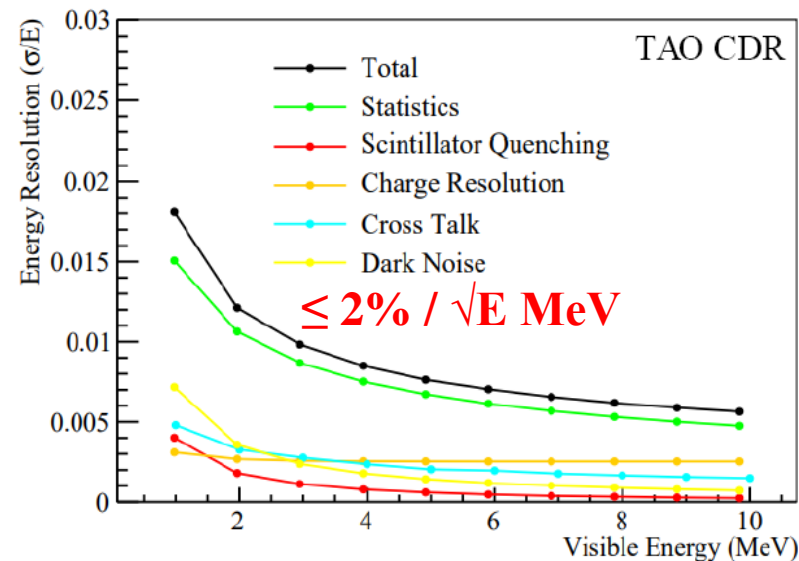
主要内容

- TAO及物理目标
- TAO探测器
- SiPM和电子学
- 低温液闪研制
- 1:1 模型实验
- 离线软件
- 台山实验室改造
- 总结

一、TAO及物理目标

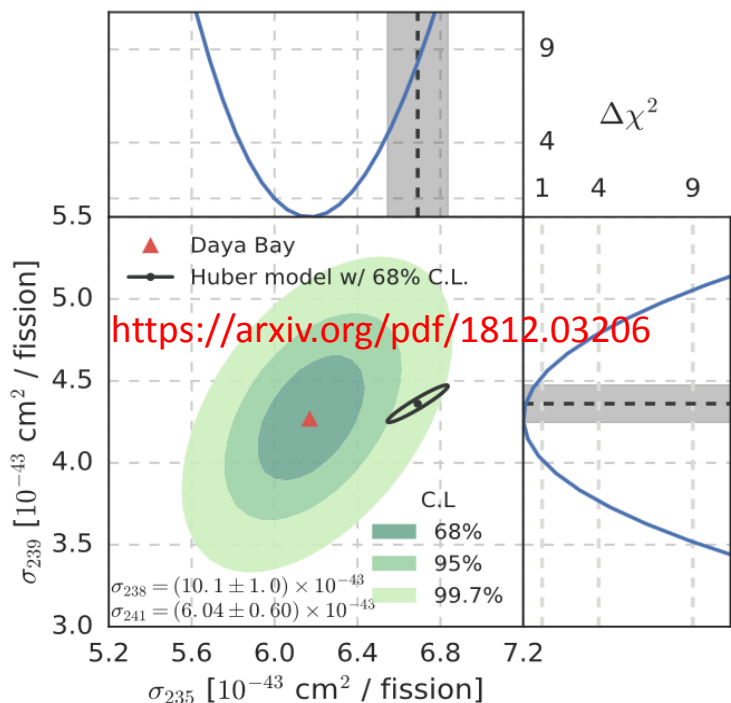
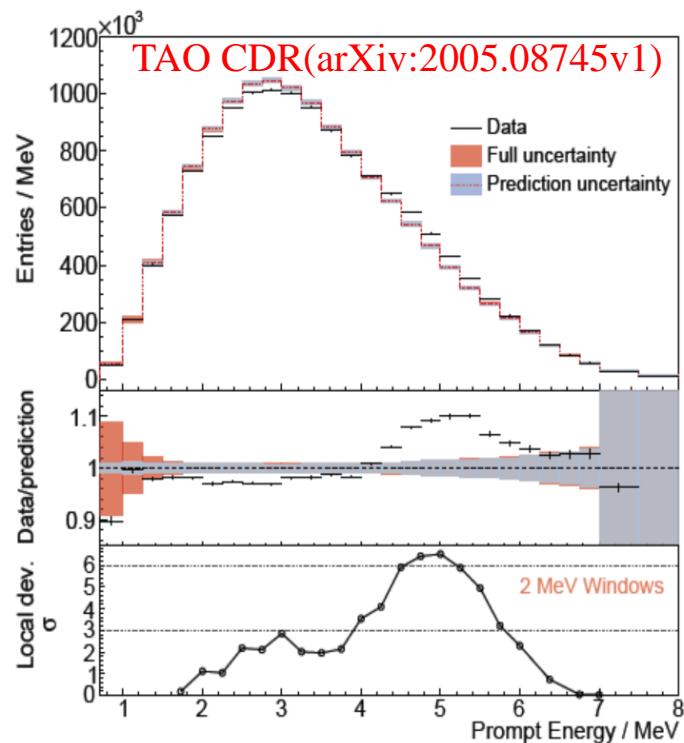
1. 台山中微子实验 (TAO)

- JUNO的卫星实验（近点探测器），2018年1月正式启动，2020年1月完成初设评审，3月完成CDR(ArXiv: 2005.08745)。
- 2023年最终确定建在台山1#堆1HW厅，地下10m，基线44m。
- 造价约3000万，意大利INFI贡献1M欧元，俄罗斯JINR贡献1M美元，国内单位包括高能所、中山大学等。
- 采用很有挑战的创新方案：**全覆盖大面积SiPM阵列+吨级低温液闪**
- 核心指标，能量分辨达到 $\leq 2\% / \sqrt{E} \text{ MeV}$

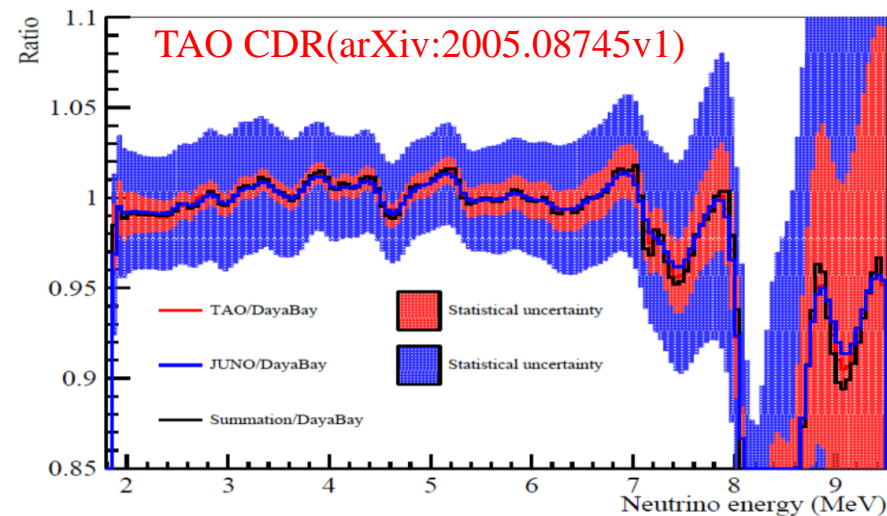
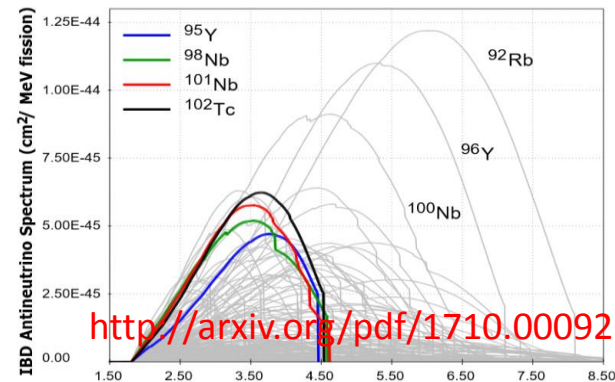
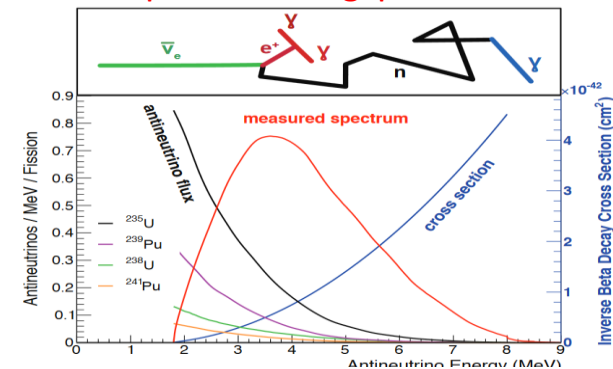


2. 物理目标1-反应堆中微子能谱精确测量

- 大亚湾发现实验与理论(Huber-Mueller)能谱存在反常 ($\sim 6\sigma$ @ 5 MeV)
- ^{235}U 裂变截面与理论偏差大 (^{239}Pu 较符合)
- TAO 将对谱形精细结构进行测量, 研究能谱反常, 为核数据提供新基准。要求 $2\%/\sqrt{E}$ 能量分辨 (DayaBay: $8\%/\sqrt{E}$, JUNO: $3\%/\sqrt{E}$)
- DayaBay卷积谱与求和谱差异 2% ; TAO和JUNO卷积谱与求和谱差异 $<1\%$ 。



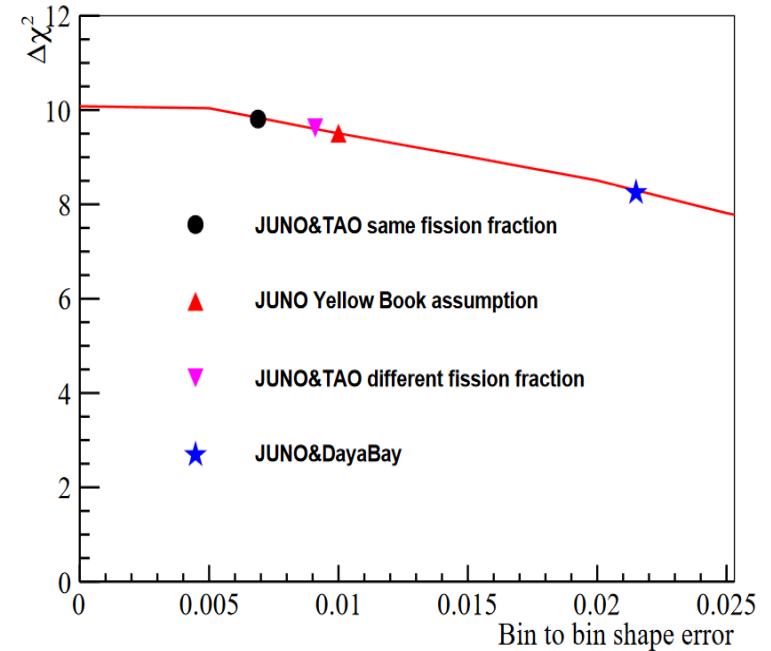
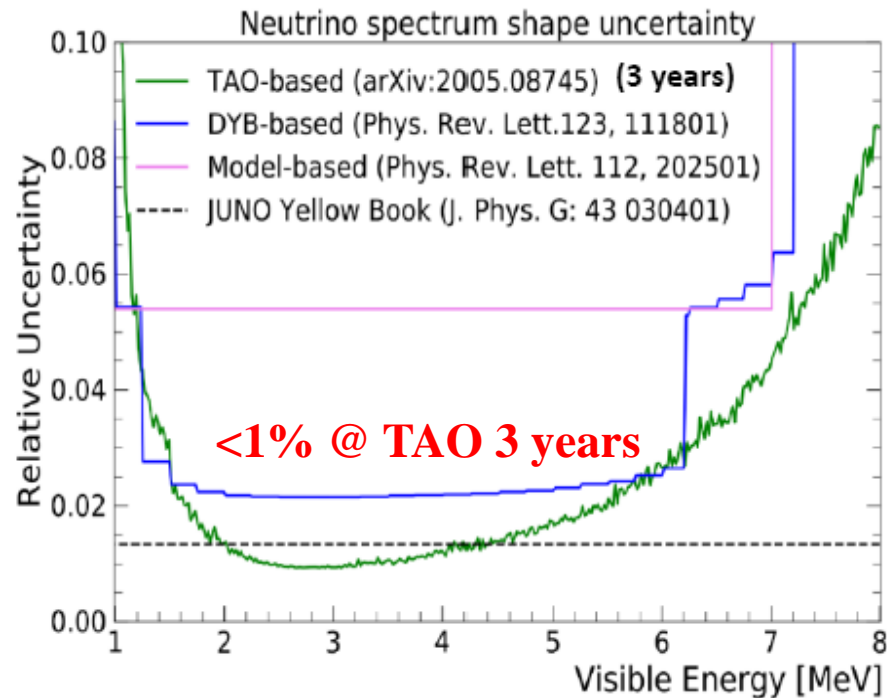
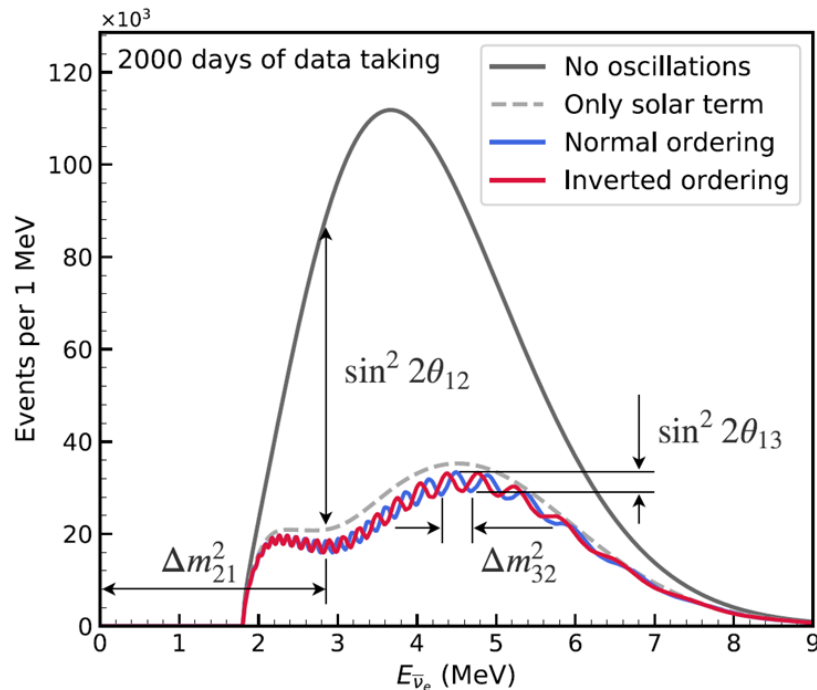
<https://arxiv.org/pdf/1507.05613>



3. 物理目标2-江门中微子实验 (JUNO) 能谱输入

- 基线: JUNO: 52.5km; TAO: 44.15m, TAO统计量高20倍, 能谱误差<1% @3年取数
- JUNO预期无振荡能谱可由TAO测量能谱结合同位素能谱修正得到, 消除谱形不确定性和模型依赖, 相比DayaBay灵敏度 $\Delta\chi^2 \uparrow \sim 1.9$ 。

$$S_{\text{JUNO}}(E_\nu) = S_{\text{TAO}}(E_\nu) + \sum_i \Delta f_i S_i(E_\nu), \quad \Delta f_i \text{四种主要同位素裂变分数差, } S_i(E_\nu) \text{为对应同位素能谱}$$



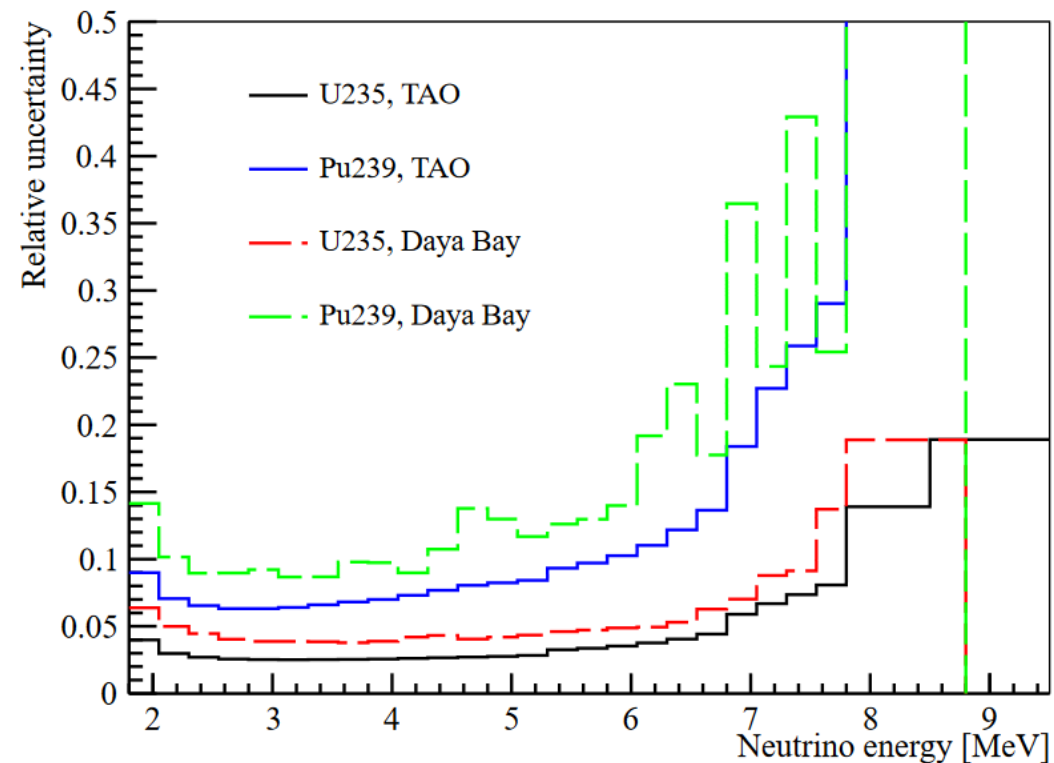
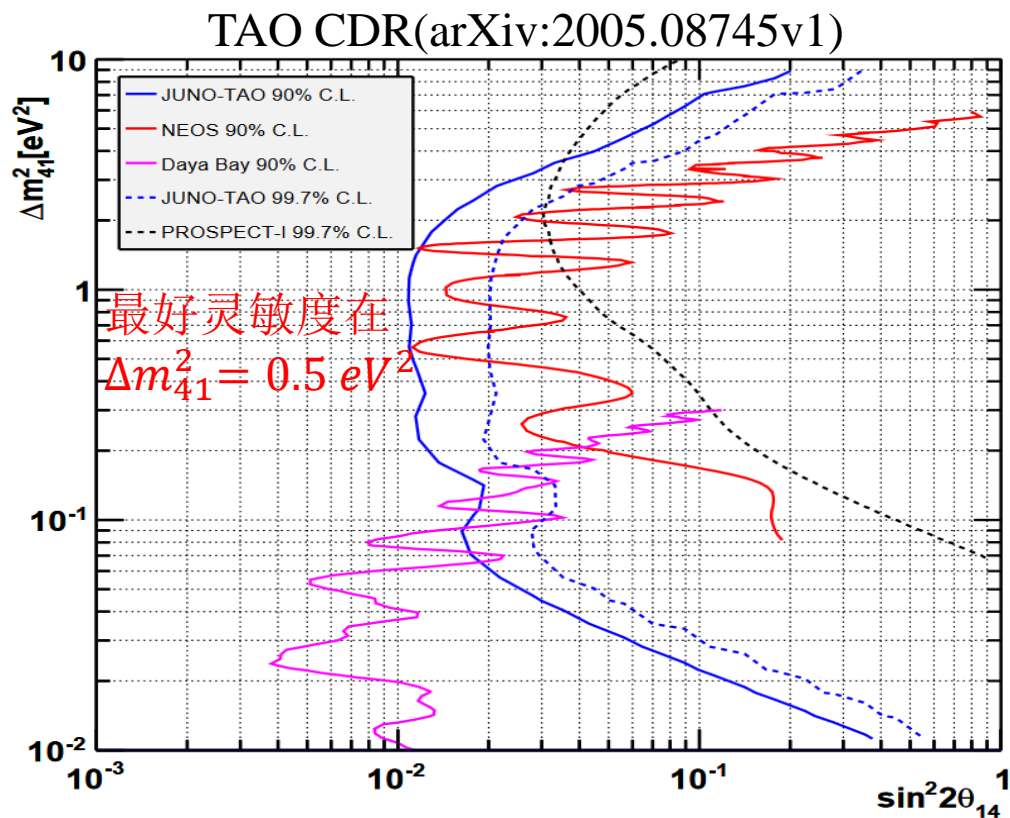
4. 物理目标3-惰性中微子寻找

- 基于活性中微子(active)+惰性中微子(sterile)振荡模型 (3+1) 寻找惰性中微子
- TAO 短基线(<45m), $\bar{\nu}_e$ 振荡几率可近似为:

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(L, E) = 1 - 4 \sum_{i=1}^3 |U_{ei}|^2 |U_{e4}|^2 \sin^2 \frac{\Delta m_{4i}^2 L}{4E}, \quad U_{ei} = \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}$$

5. 物理目标4-反应堆监测

- ^{235}U 和 ^{239}Pu 核素中微子谱形测量误差达到 4% 和8%,为反应堆燃料演化提供更准确输入(DayaBay 5%和10%)



二、TAO 探测器

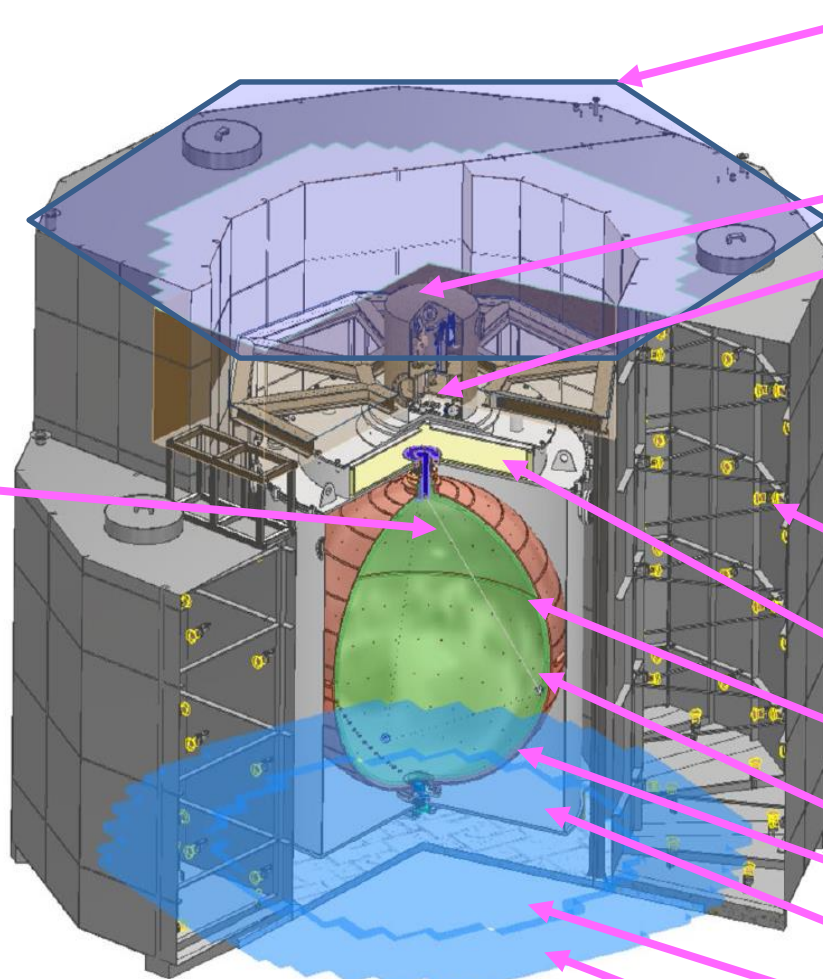
全覆盖高PDE SiPM, 低温新配方液闪

亮点参数:

- 能量分辨 $<2\%$ @ \sqrt{E} MeV
- SiPM 覆盖率: 94% of $\sim 4\pi$, $\sim 10\text{m}^2$
- SiPM PDE $>50\%$ (~ 4000 p.e./MeV)
- SiPM DCR: <100 Hz/ mm^2 @ -50°C
- 除水低温液闪 <10 ppm
- 温度均匀性: $\pm 0.5^\circ\text{C}$

◆ 中心探测器

- 有机玻璃球 1.8m (ID), 20mm厚
2.8 t 低温掺钐Gd-LS
- 铜球壳 1.886m (ID), 12mm厚
4024 片 of $50*50\text{mm}^2$ SiPM 单元
- 不锈钢罐 2.09m(ID), 10mm厚
3.2 t LAB/Gd-LAB
- 低温系统 4.5kW 制冷功率
150mm厚全覆盖密胺脂保温层
 $-50 \pm 0.5^\circ\text{C}$



◆ 顶反符径迹(TVT)

4层 PS, 160 条
2 m \times 20 cm \times 2 cm/条

顶屏蔽(HDPE)

◆ 刻度(ACU & CLS)

6 种豁免源

◆ 水箱

3 个不规则水箱
 ~ 300 只3" PMT

溢流罐

铜球壳

SiPM 阵列

有机玻璃球

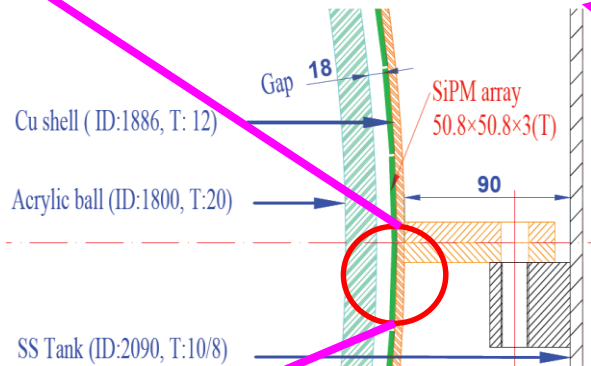
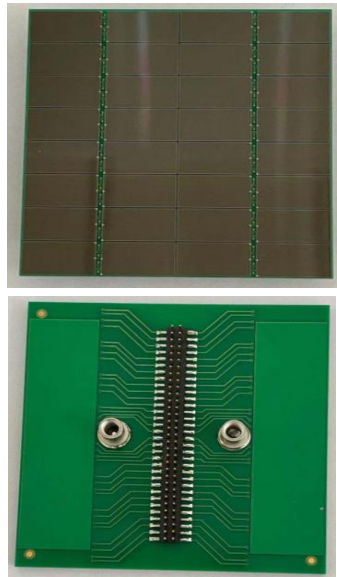
不锈钢罐

密胺脂保温层

底部铅屏蔽

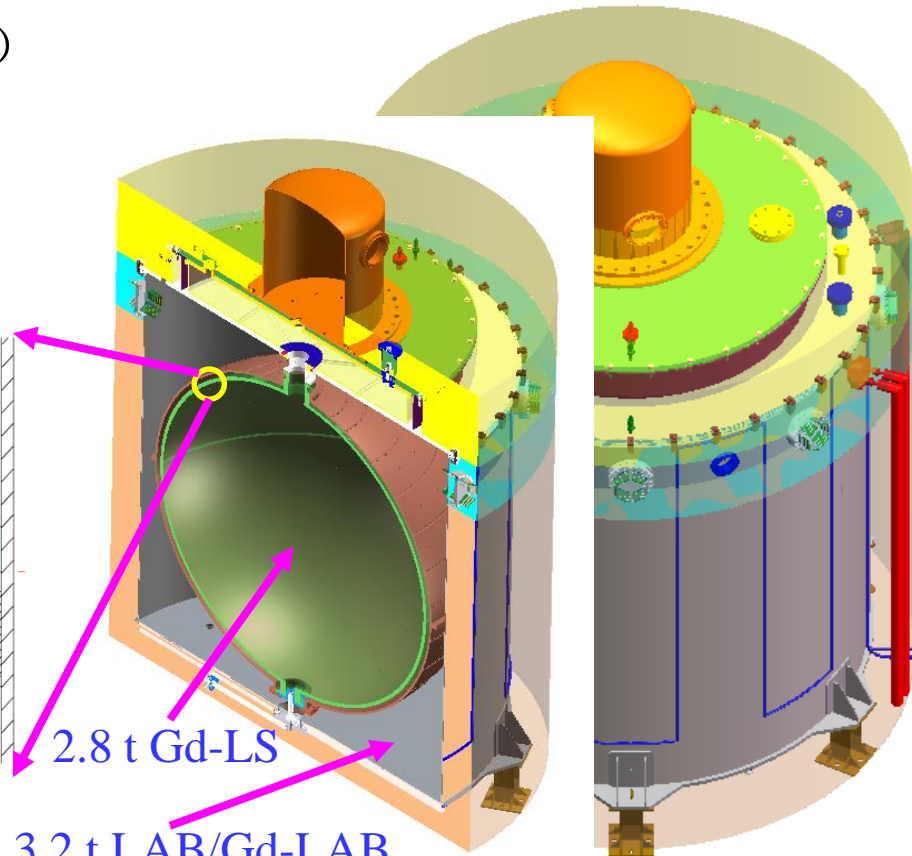
1. 中心探测器(CD)

- ◆ **有机玻璃球:** 1.8m (ID), 20mm厚, 93% 透光率(同JUNO有机玻璃球)
- ◆ **铜球壳:** 1.886m (ID), 12mm厚, 全新无氧铜料(洛铜), U&Th:<0.04, K-40<0.1Bq/kg
极低放射本底及最好导热性, 导热及支撑SiPMs 和有机玻璃球
- ◆ **不锈钢罐:** 2.09m(ID), 10mm厚, U:<0.11, Ra:1.89, Th: <0.07, K-40:0.25 Bq/kg
- ◆ **低温系统:** 制冷功率4.5kW, SiPM & FEB 热功率: ~ 2kW,
漏热: 0.5kW, 铜壳和钢罐均布设制冷管;
150mm厚密胺泡沫保温层 (0.036w/m ·k)



总 4024 SiPM 单元
间隙 : 0.4~1.0 mm

2.8 t Gd-LS
3.2 t LAB/Gd-LAB

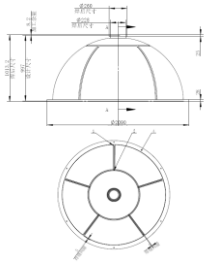


◆ 铜球壳制造(难点: 焊接和钻孔)

- 铜球壳是TAO探测器结构和制造最复杂的部件。8000多 $\Phi 5.3\text{mm}$ 的孔, 4000多 $11*35\text{mm}$ 的槽。精度: 球内径(1886) $<0.5\text{mm}$, 厚度(12) $<0.2\text{mm}$, 平面度(1910) $<0.08\text{mm}$; 微孔直径(5.3) $<0.05\text{mm}$, 角度(4π) $<0.01^\circ$, 位置(4π) $<0.04\text{mm}$ 。保证SiPM单元间隙 0.4mm 。
- 焊接在 600°C 高温下进行, 最长焊缝 6m , 厚度 28mm 。通过创新焊接工艺方法完成焊接和变形控制。共5大工序, 30多小工序, 整体制造历时2年(全在疫情期间)。
- 所有表面镀PTFE($25\sim 50\mu\text{m}$)保证Gd-LAB/LS 兼容性要求。



Cutting → Molding → Welding → Machining

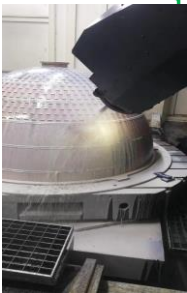


Dividing(8 parts)

Molding

Assembly & welding

Welding done



Turning and milling

Machining done

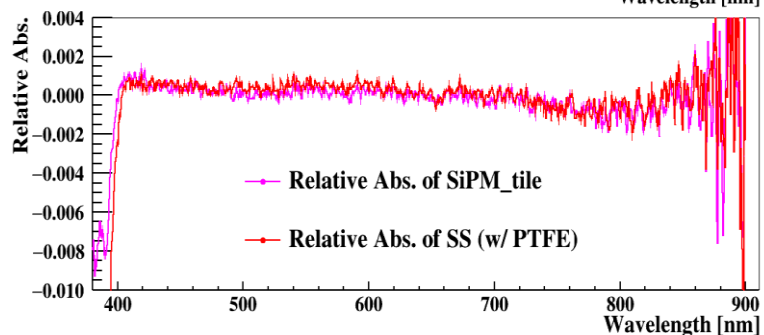
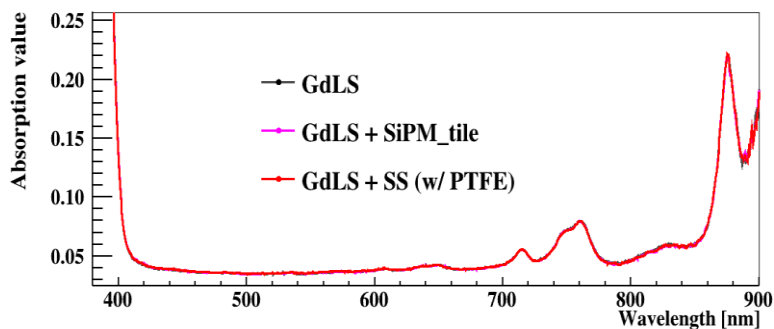
Degreasing

Sandblasting

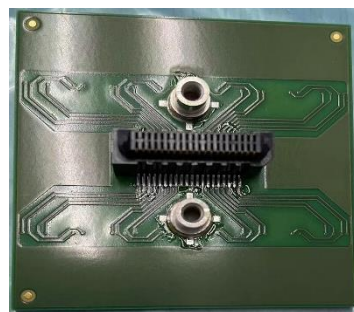
PTFE coating done

◆ 材料放射性及液闪兼容性

- TAO将可能用到LAB、GdLAB、GdLS，要求所有材料跟相应接触的液体具有良好兼容。
- 最主要的是铜壳、SiPM及FEB、钢罐跟GdLS的兼容。通过大量测试，铜和钢表面镀PTFE，PCB涂环氧树脂满足兼容性要求（运行6年）。
- 对所有材料都进行了放射性测量，确定所有的材料均满足放射性要求。研发了低放射本底PCB材料（比普通FR4低60倍）。
- 发现FEB上的电容和连接器放射性本底很高，通过大量选型和测量，已找到满足本底要求的替换产品，6月底完成全部更换。



材料总放射性本底控制在100Hz事例率



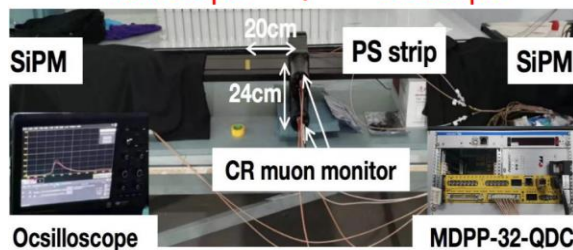
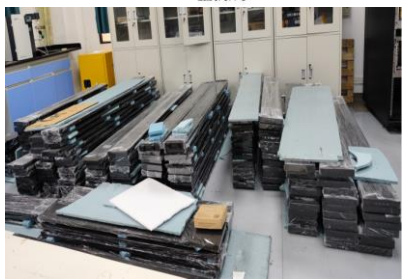
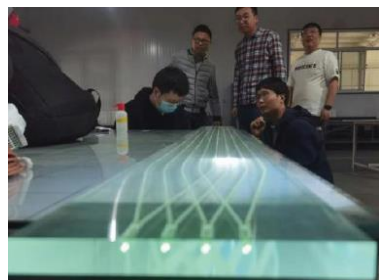
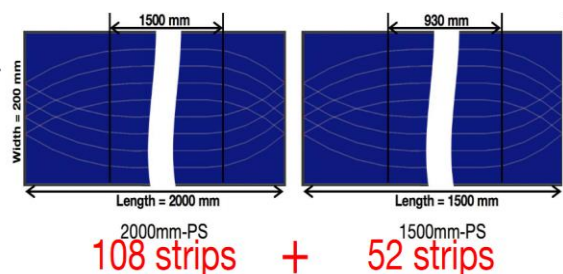
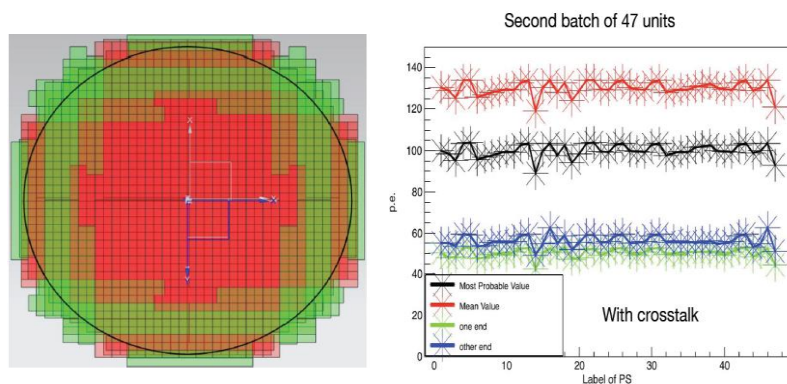
NO.	Name	Material	Results Bq/kg			Remark
			U	Th	K	
1	SS tank	SS	<0.06	<0.04	<0.17	Passed
2	SS cooling pipe	SS	<0.27	<0.34	<0.98	Passed
3	SS tank paint	Oil&Resin	<0.33	<0.42	1.43±1.19	Passed
4	Ti support leg	Ti alloy	<0.0977	<0.0688	<0.318	Passed
5	Copper shell	O-free Cu	<0.0380	<0.023	<0.105	Passed
6	Copper cooling pipe Φ14	Red copper	<0.45	<0.28	<0.99	Passed
7	Copper cooling pipe Φ16	Red copper	<0.29	<0.33	<0.82	Passed
8	PTFE Coating	PTFE	<0.44	<0.31	<1.53	Passed
9	Acrylic sphere	Acrylic	Refer to JUNO			Passed
10	Overflow tank	Acrylic	Refer to JUNO			Passed
11	Insulation layer	Melamine foam	<2.22	<1.55	<7.94	Passed
12	Cooling silicone oil	Silicone oil	<0.33	<0.42	<1.09	Passed
13	Green oil (FEB)	Epoxy&resin	5.05±0.19	<0.87	<2.63	
14	Aramid PCB (no component)	Aramid	1.01±0.07	<0.45	<1.24	Passed
15	Bolt and nut for CS connecti	SS	<0.46	<0.51	<1.53	Passed
16	CLS SS thread	SS	<0.25	<0.32	<0.95	Passed
17	Bellow on acrylic sphere	SS	<0.14	<0.16	<0.35	Passed
18	O ring	Fluororubber	<0.91	<1.23	<3.14	Passed
19	Cooling pipe clamp	SS	<0.13	<0.16	<0.38	Passed
20	SS cooling pipe	SS	<0.91	<1.23	<3.14	Passed
21	Feedthrough(all)	SS	<0.27	<0.34	<0.98	Passed
	Ref: SS	SS	<0.06	<0.04	<0.2	

NO.	Name	Material	Results Bq/kg			Remark
			U	Th	K	
1	Water tank (Veto)	SS	<0.21	<0.21	<0.60	Passed
2	Concrete near lab	Concrete	38.6±2.4	26.5±2.5	362.1±36.3	Normal
3	Concrete in lab	Concrete	134.4±3.6	135.4±3.6	1030±55	High
4	SiPM	Silicon	0.9±0.07	1.28±0.10	<1.58	Passed
5	Connector-Samtec	hybrid	8.75±0.28	14.2±0.43	16.4±1.44	High
6	Connector-A	hybrid	5.23±0.45	6.39±0.59	<10.53	High
7	Connector-B	hybrid	<0.72	<0.92	<2.58	Passed
8	Capacitor-A	hybrid	42.43±1.13	1.7±0.2	<3.55	High
9	Capacitor-B	hybrid	3.32±0.13	<0.65	<1.78	Passed
10	Resistor	hybrid	<0.43	<0.50	<1.50	Passed
	Ref: SS	SS	<0.06	<0.04	<0.2	

2. 缪反符合系统

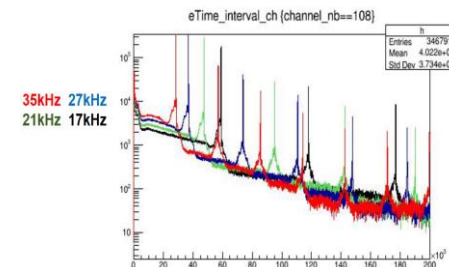
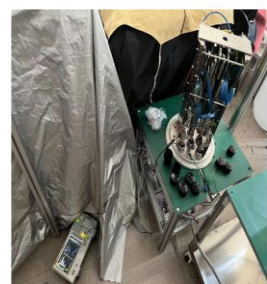
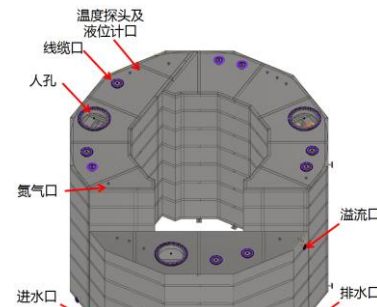
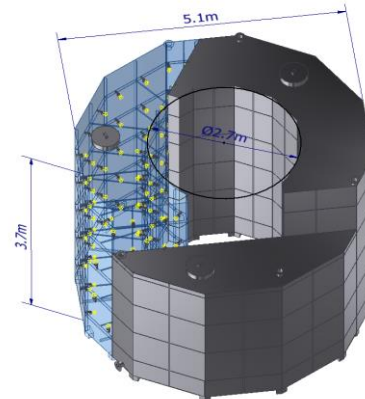
◆ 顶部反符合塑闪 (TVT) by 中山大学

- 塑闪+ SiPM + 波移光纤
- >99% μ 标记效率 @ 64 p.e.
- 4-层塑闪, 160条, 2 m \times 20 cm \times 2 cm/条
2.4m 衰减长度, 9000 ph/MeV, 光产额40~52p.e.
- 单端子4只 Sensl J-40035 SiPM, 共1320只
光学硅油耦合(5 p.e.)
- 所有160条塑闪生产完成通过验收。
- 电子学和离线软件按计划推进, 取得初步成效。



◆ 水箱 (WT)

- 3个不规则水箱内外径2.7m/5.1m, 总48立方, ~300只3" PMT(DYB)。测试~5月密封水质, 确定不做水循环;
- 水箱模型完成LED测试在进行加水测试
- 水箱设计完成, 制造合同签订, 开始生产



◆ 反符合电子学

- 水箱: 同JUNO SPMT 电子学 (Catiroc)+GCU+TDAQ
- TVT: SiPM+FEB+GU+TDAQ

3. 刻度系统(Eur. Phys. J. C 82 (2022) 12, 1112)

◆ 自动刻度系统(大亚湾ACU改造), **沿Z轴**, 刻度液闪中能量非线性

◆ ^{68}Ge (e^+), $^{137}\text{Cs} + ^{54}\text{Mn} + ^{40}\text{K} + ^{60}\text{Co} + \text{AmC}$ (γ), 豁免源

◆ UV-LED (265nm, 波长可调, 模型实验测试, **by MSU & JINR**)

◆ 线缆回路刻度系统(CLS, 参考JUNO CLS), **偏Z轴**

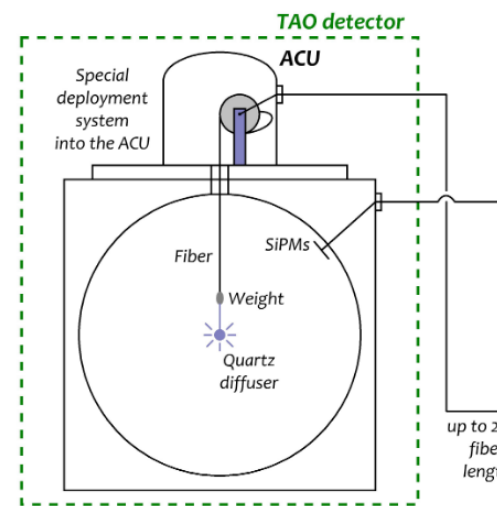
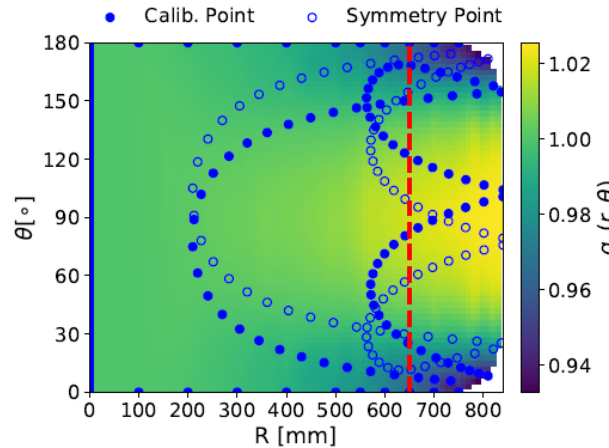
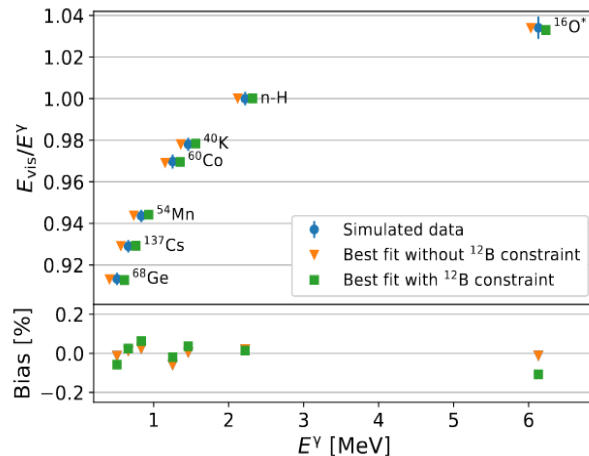
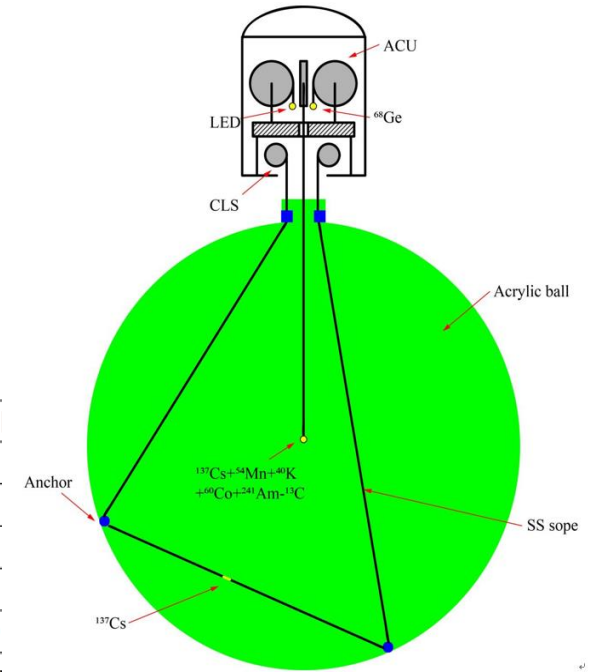
刻度不同位置液闪发光不均匀性

◆ ^{137}Cs (γ)

◆ 能量非线性 < 0.6%, 不均匀性 < 0.2%.

◆ 大部分源就绪, 刻度系统在模型实验中已完成测试并优化。

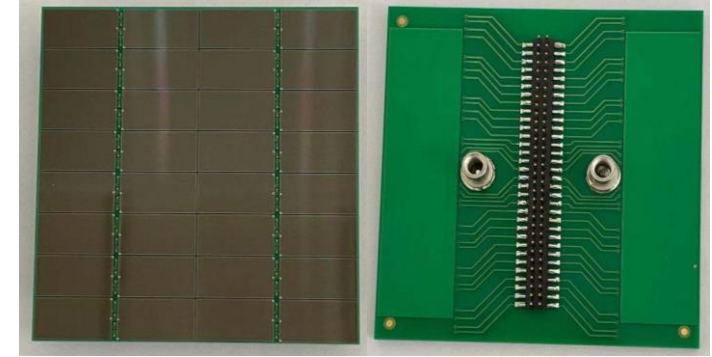
Source	Type	Radiation	Activity
^{137}Cs	γ	0.662 MeV	50
^{54}Mn	γ	0.835 MeV	50
^{60}Co	γ	1.173 MeV + 1.333 MeV	10
^{40}K	γ	1.461 MeV	10
^{68}Ge	e^+	annihilation 0.511 MeV + 0.511 MeV	500
$^{241}\text{Am-}^{13}\text{C}$	n, γ	neutron + 6.13 MeV ($^{16}\text{O}^*$)	2 (neutron)
$n(p, \gamma)d$	γ	2.22 MeV	2 (neutron)



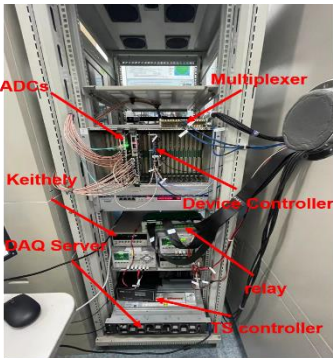
三、SiPM和电子学

1. SiPMs 批量测试

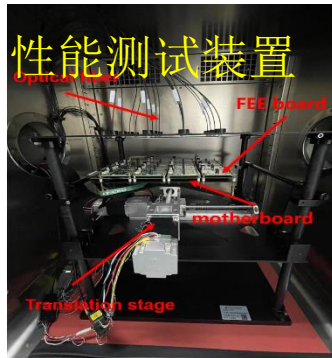
- SiPM 单元(16ch): 滨淞s16080, 4051片测试完成, 约180片DCR高已返厂
- 测试包括: 目测, 老化测试, 低温性能测试 (-50°C)
- PDEavg: $\sim 52.5\%$ ($>47\%$), OK; DCRmax: ~ 63 ($<100\text{Hz}/\text{mm}^2$), OK.
- $\sim 0.3\%$ 表面缺陷/单元; $\sim 0.6\%$ 老化测试电流异常;
- $\sim 0.7\%$ 性能测试不合格.



➤ SiPM 电源(by DUBNA JINR)

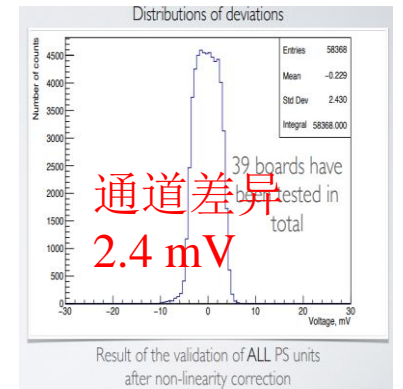
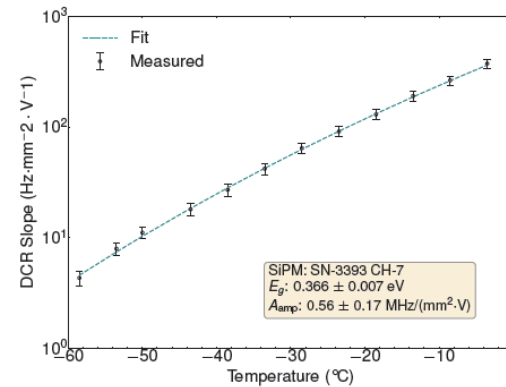
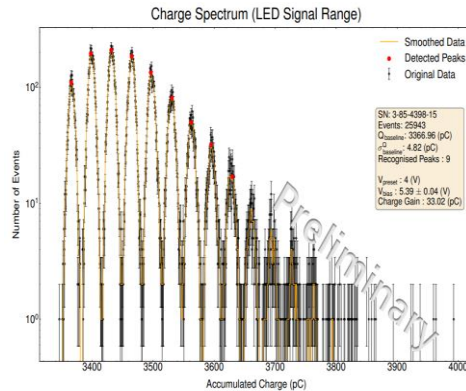


Outside of cryogenic chamber



Inside of cryogenic chamber

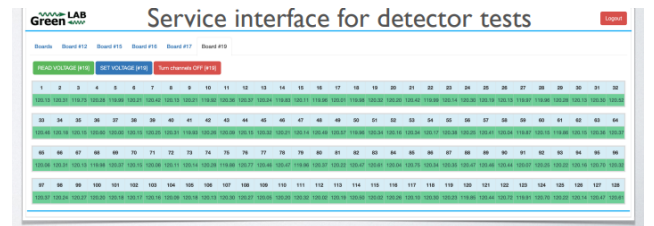
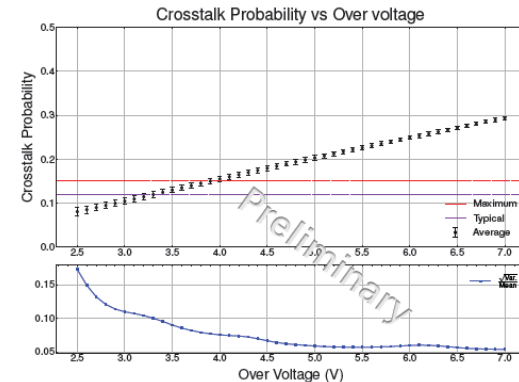
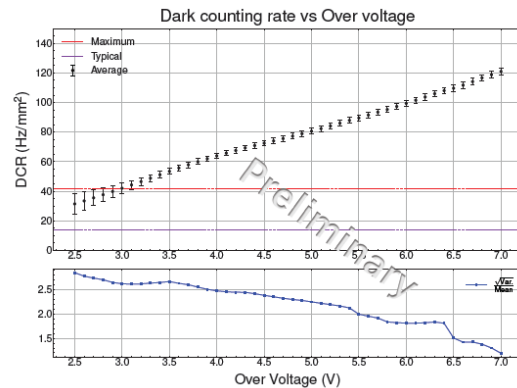
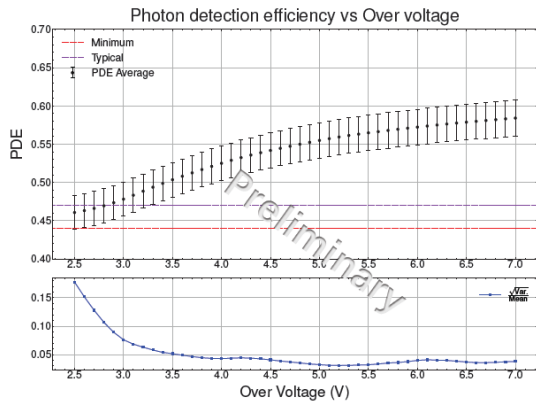
性能测试装置



通道差异 2.4 mV

39 boards have been tested in total

Result of the validation of ALL PS units after non-linearity correction

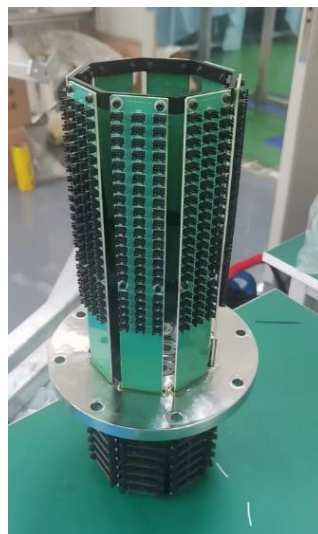


128 ch/module, 32 module, 4096ch
2 VME+control, 2 feedthroughs
系统就绪, 全功率负载测试进行中

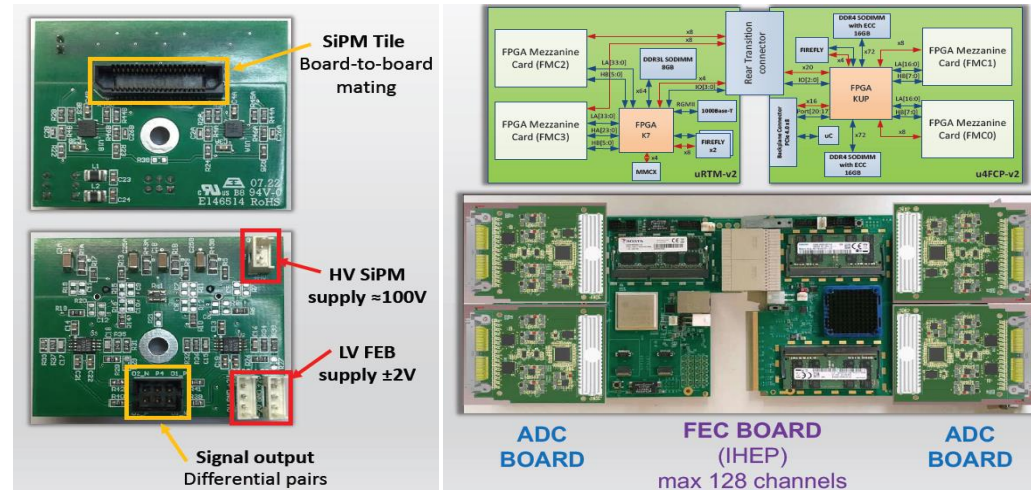
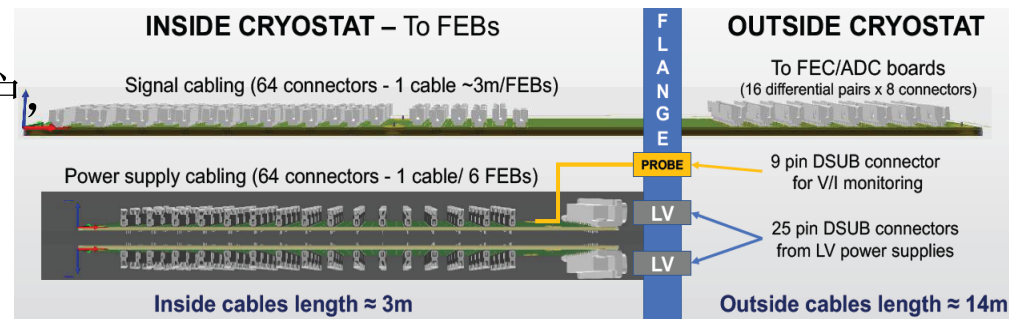
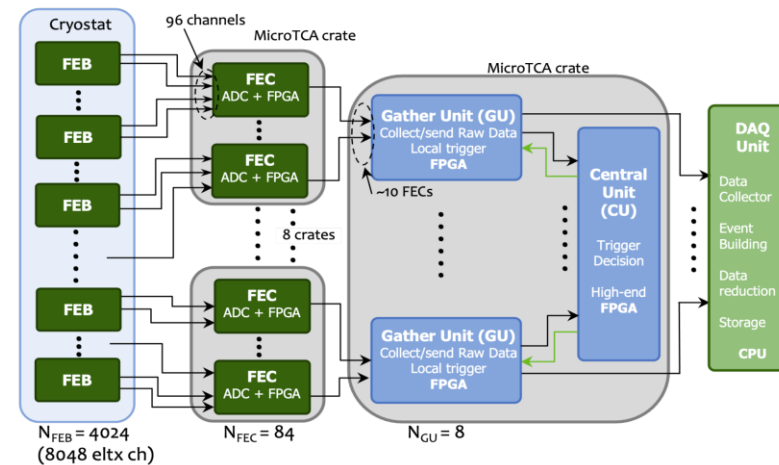
2. SiPM 电子学(by INFN, ROMA-TRE-U)

- 最终方案: SiPM+FEB+FEC+(GU+CU)+TDAQ (CD)
- 2chs/单元, 共8048chs, 噪声<0.1 p.e.; 时间分辨<1ns.
- ADC: 250MHz/12bit, 2Vpp, 动态范围:1 - 180 p.e./ch
- 数据率: FEC→TDAQ: ~70 Gbps, TDAQ→Disk: ~100 Mbps
- 约100套FEB完成模型实验。全部FEB和ADC板7月前完成(更换低放射性器件和连接器)。FEB表面涂环氧胶保护。
- 线缆:罐内差分模拟读出, 1.5 ~ 3.5 m三种长度, PTFE保护, 外部线缆长度~14m.
- 除了部分芯片和器件, 大部分均为国产。

低放射性PCB(<0.25Bq/kg) 制作FEB



后端电子学架构详见9日电子学分会张杰报告。



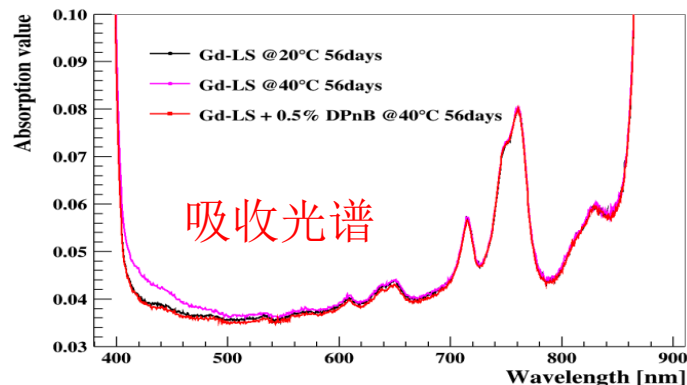
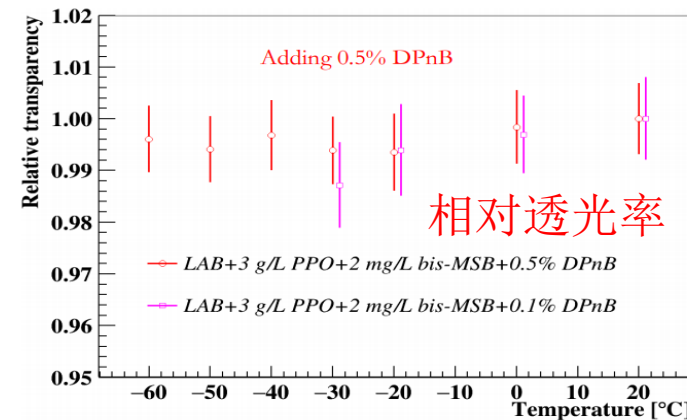
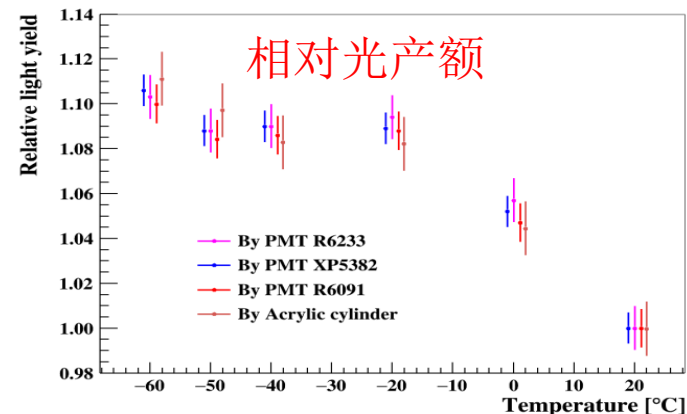
四、低温液闪研制

1. 低温液闪配方(DOI: 10.1016/j.nima.2021.165459)

- 常规要求: 高光产额($>4000\text{p.e/MeV}$)、高闪点($>100^\circ\text{C}$)、高透过率($\sim 93\%$)
- 低温要求: 低水含量 ($<10\text{ppm}$)、无析出、性能稳定@ -50°C ,
- 最终配方: $\text{LAB} + 3\text{ g/L PPO} + 2\text{ mg/L bis-MSB} + 0.1\% \text{Gd} + 0.5\% \text{DPnB}$
- DPnB(二丙二醇丁醚) 有助溶质低温溶解, 减少析出
- 氮气鼓泡除水可从 $\sim 100\text{ppm}$ 降到 $5\sim 8\text{ ppm}$ 。

2. 批量生产及灌装

- 3.5t LAB和3.3t LS配制完成, 模型实验灌装及测试。
- N_2 鼓泡除水($\sim 15\text{L/min}$) + 密封, 达到 8ppm 水平。
- 采用蠕动泵、压力液位计、PTFE管实现洁净、密封、安全灌装



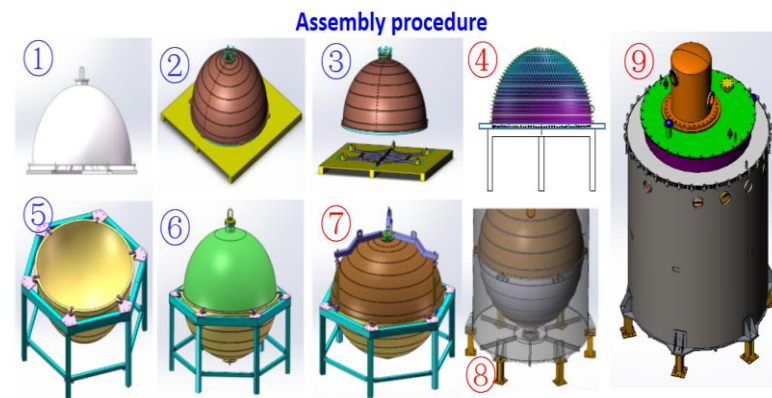
五、1:1 模型实验

1. 目的

- 模拟部分台山现场限制条件，测试验证安装组装方案和关键步骤可行性（保证现场顺利完成安装）
- 测试验证低温系统, SiPM单元(~100), LS性能及灌装, 刻度系统, 电子学和DAQ等。

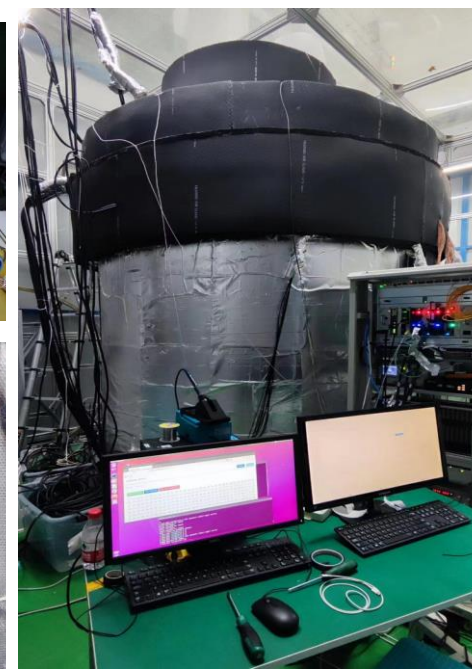
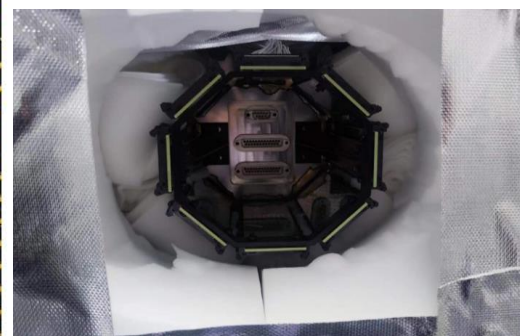
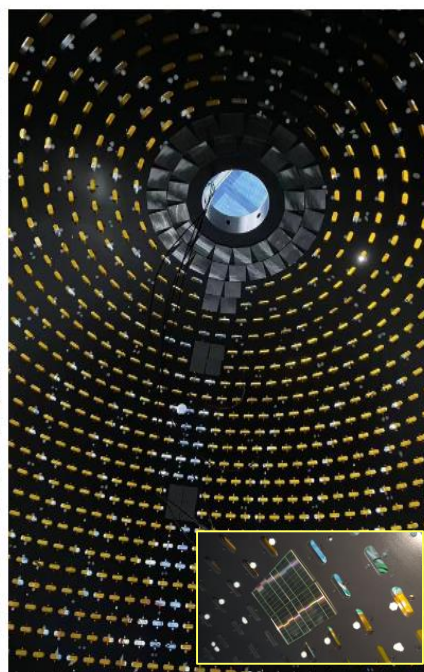
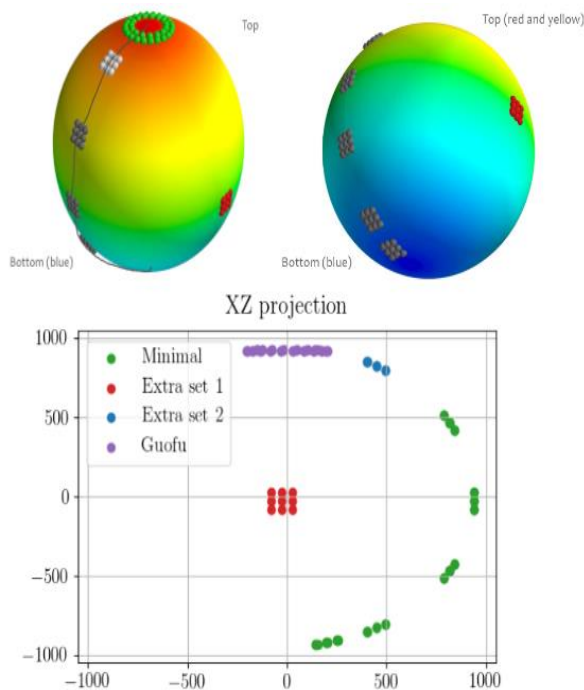
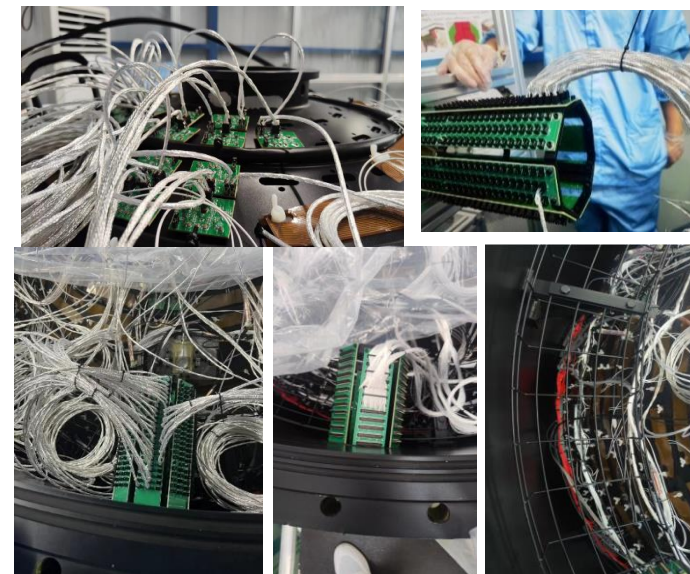
2. CD安装测试

- 验证并改进了所有关键步骤，如工装、铜壳翻转吊装, SiPM组装, 穿墙法兰设计安装、布线, ACU安装、保温制作等)。
- 在万级洁净间完成清洗和组装，所有接口漏率 $<5.0 \times 10^{-5}$ Pam³/s。



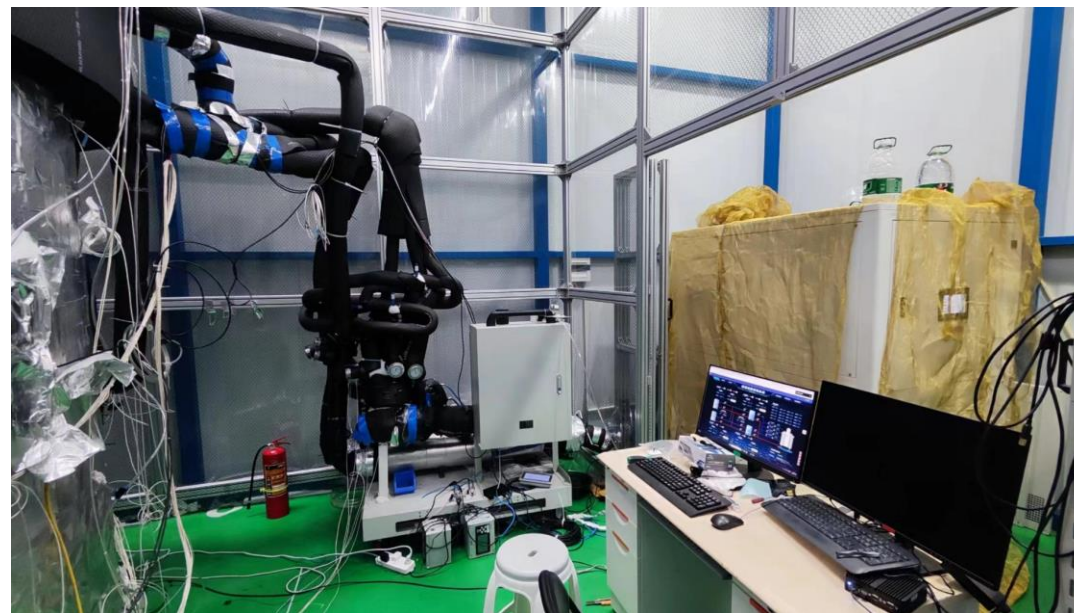
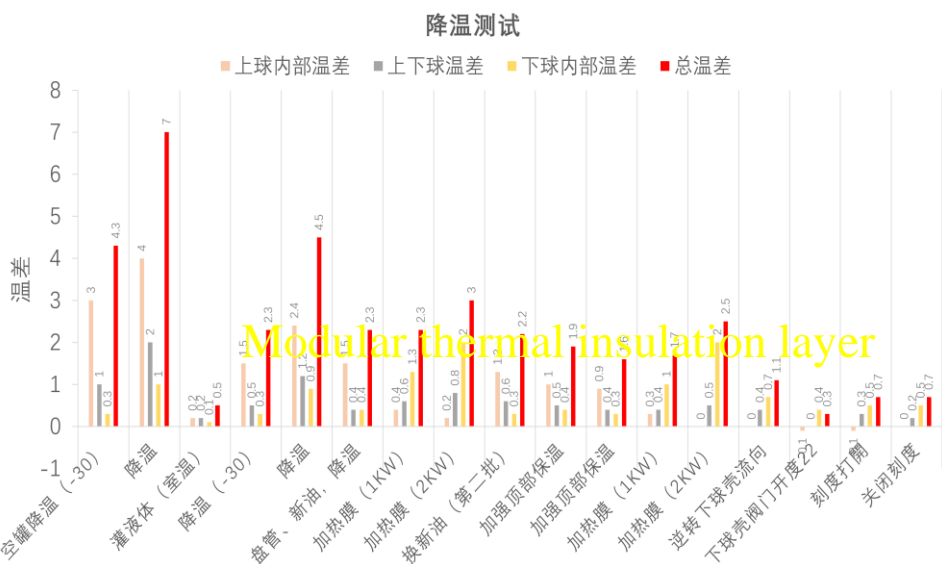
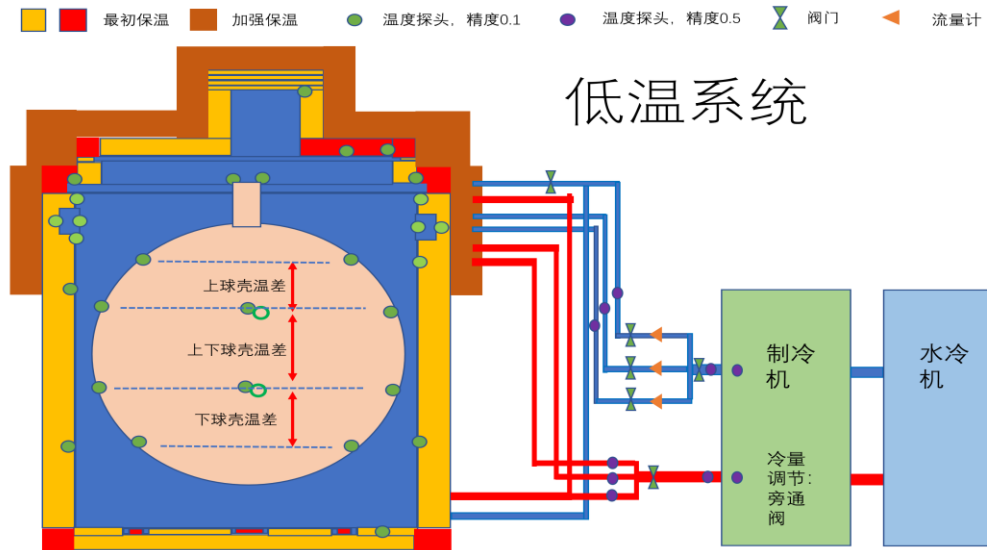
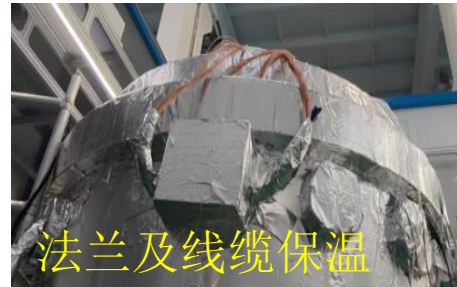
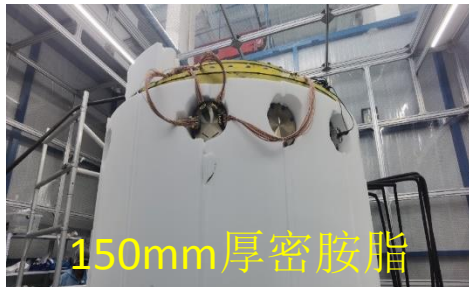
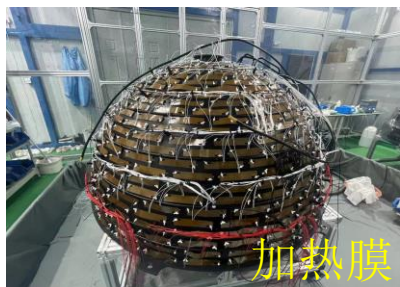
3. SiPM组装、布线、电子学测试

- 试组装~ 100 真实SiPM单元和FEB，确定正式组装方案
- 组装约1900片加热膜，和一套CCD相机和光源。
- 优化了线缆选型、长度、布线支撑方案
- 电子学调试噪声（制冷机是主要影响），完成宇宙线、Co源、LED光源等测试。



4. 低温系统测试

- 测试验证保温结构及制作、低温系统控制及运行
- 经过多轮升降温测试及不断改进制冷设备及保温，最终达到在2kW热负载下（模拟全部SiPM工作发热，0.5W/单元），空间温差 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 指标(温差 $< 0.7^{\circ}\text{C}$)。系统稳定性达到 0.1°C 。
- 在制冷管管径、排布、硅油，以及法兰线缆保温避免结霜等方面将做改善。

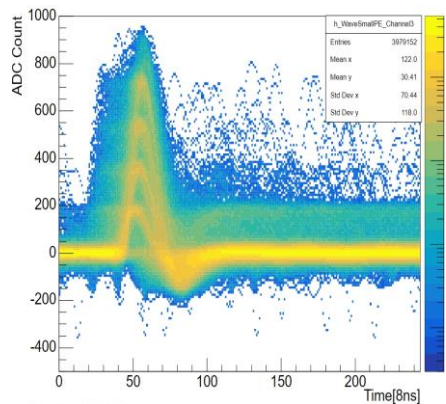


5. SiPM初步测试结果

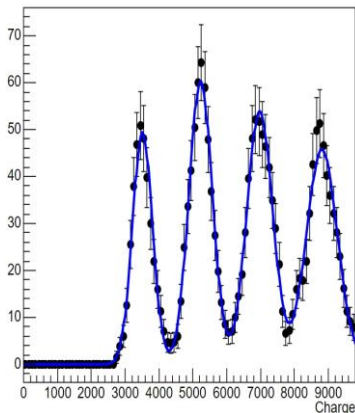
➤ Co60测试结果 SiPM工作正常，得到PE Yield: 4026 ± 63

➤ LED测试结果 基于LED时间谱对 SiPM参数进行刻度

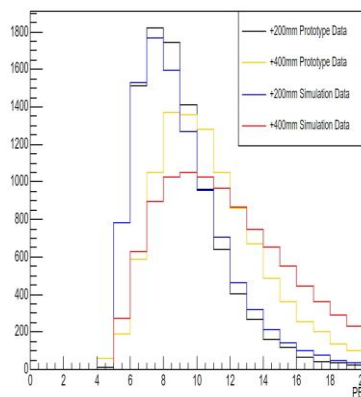
单道波形



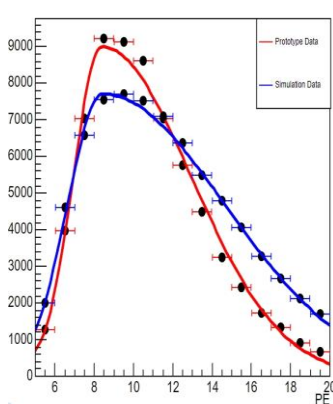
电荷谱



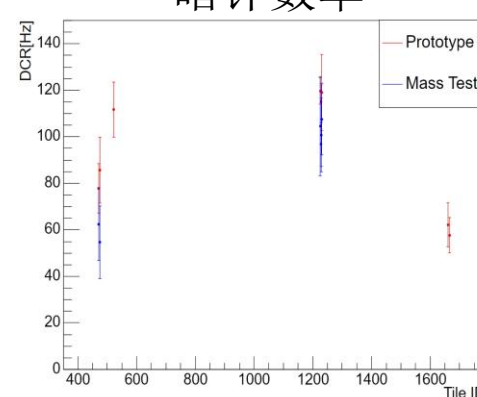
Co60光电子谱



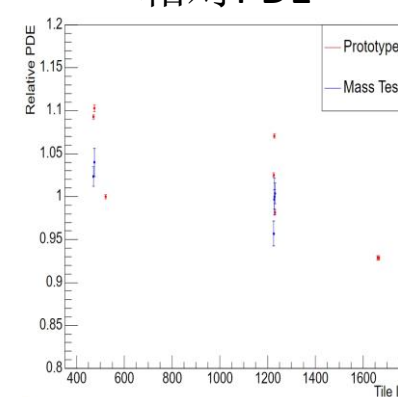
峰值光电子数



暗计数率

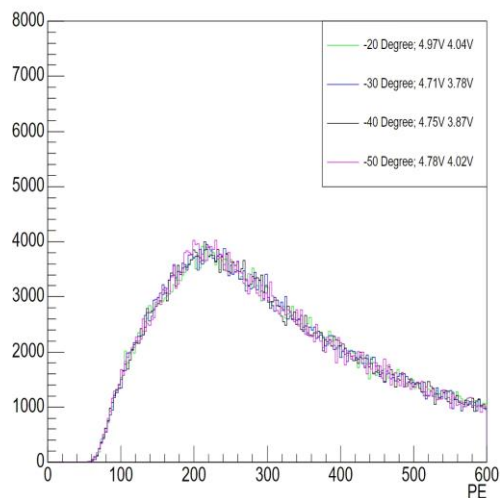


相对PDE

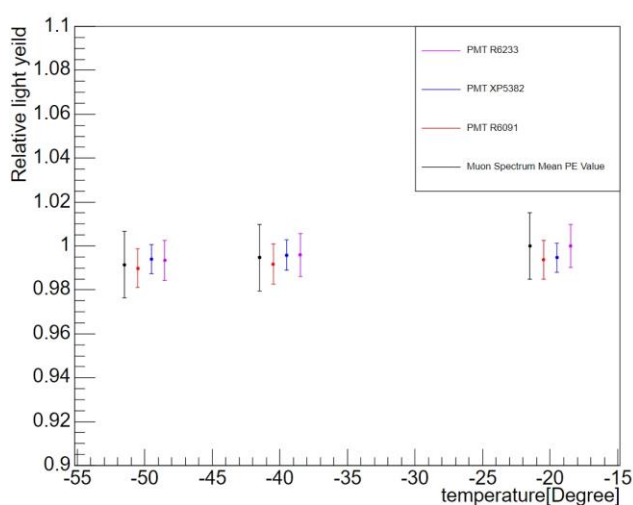


➤ 宇宙线测试结果 验证了批量低温液闪性能!

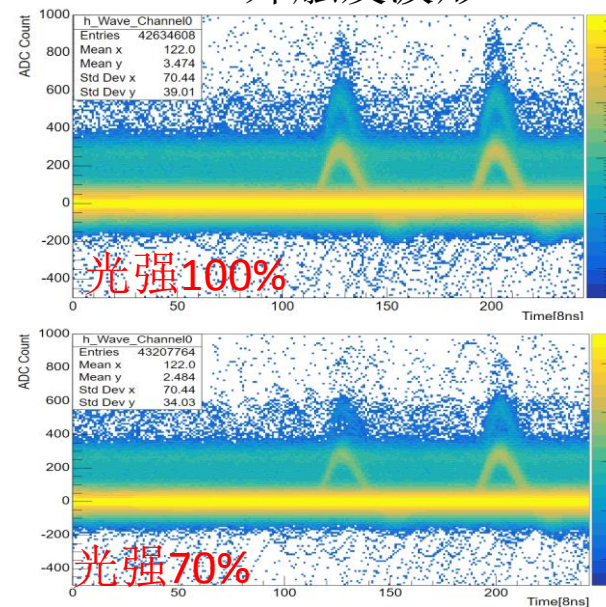
Moun自触发(350Hz)



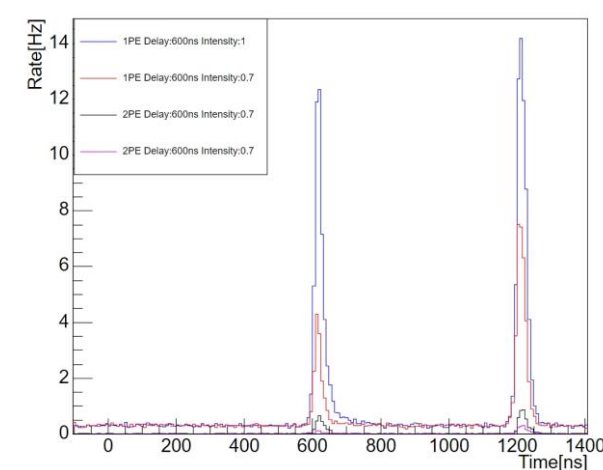
低温液闪光产额随温度的变化



LED外触发波形

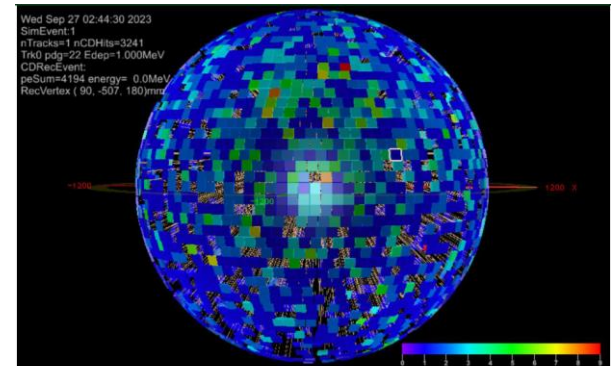
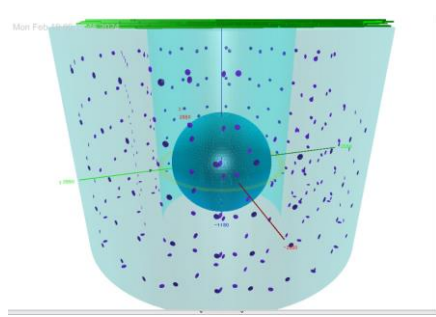
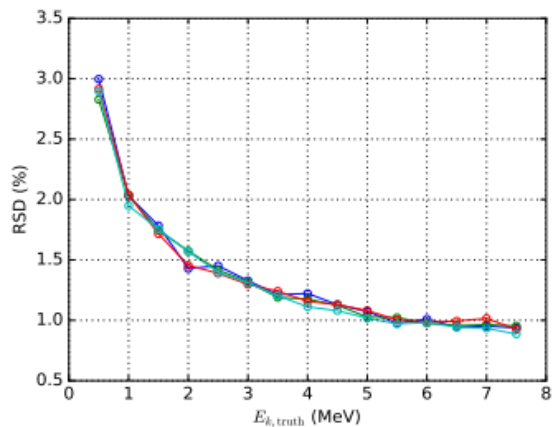
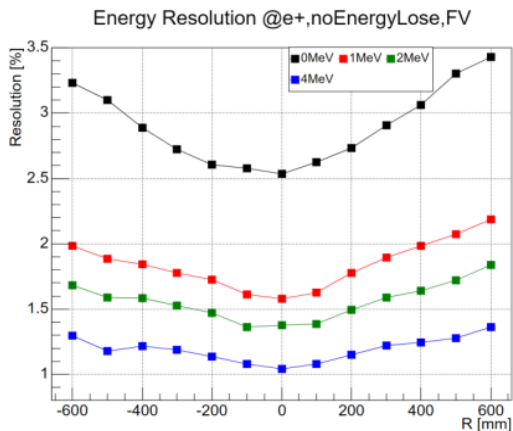
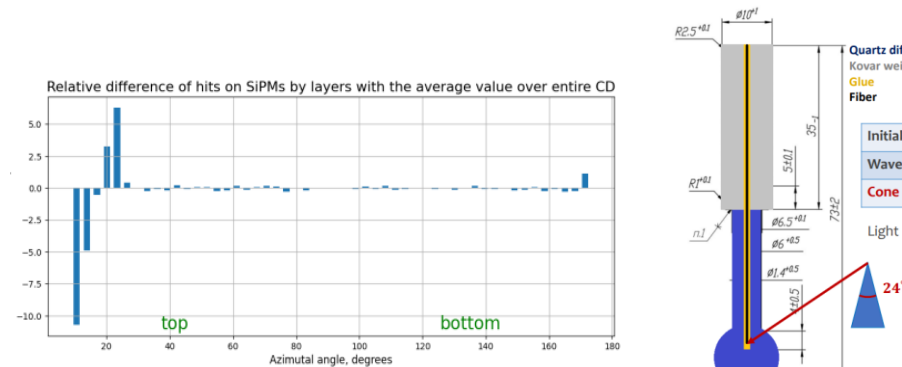


LED不同PE波形的数目分布

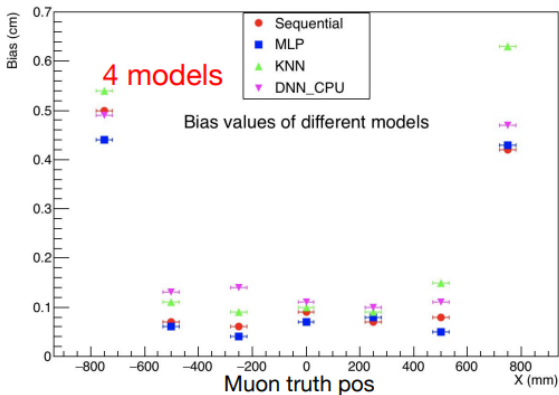


六、离线软件

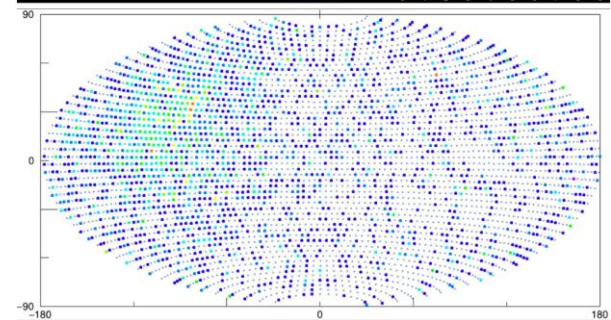
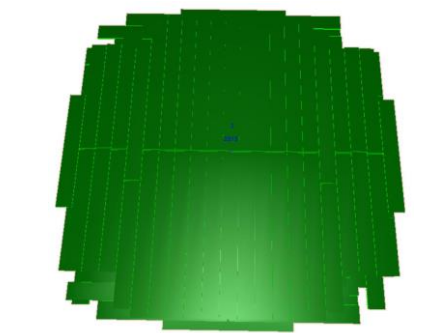
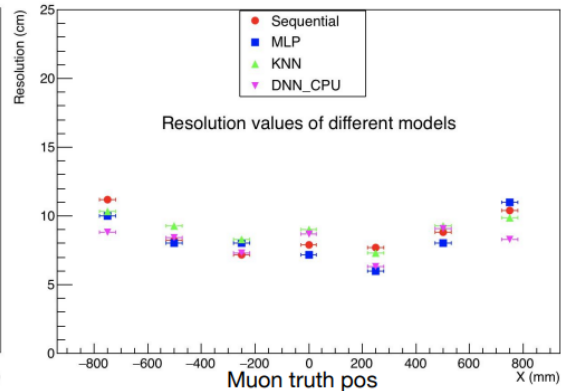
- CD重建: 似然法 (需改进), 第一原则电荷模型 (较好)
- TVT重建: 4模型, 尝试利用机器学习, 达到5~10cm分辨
- LED产生子: 模拟LED光源, 进行各向同性研究
- 事例显示: 基于ROOT, 全探测器结构及击中(中山大学)



Machine learning method



The smallest sigma is also greater than 5 cm.

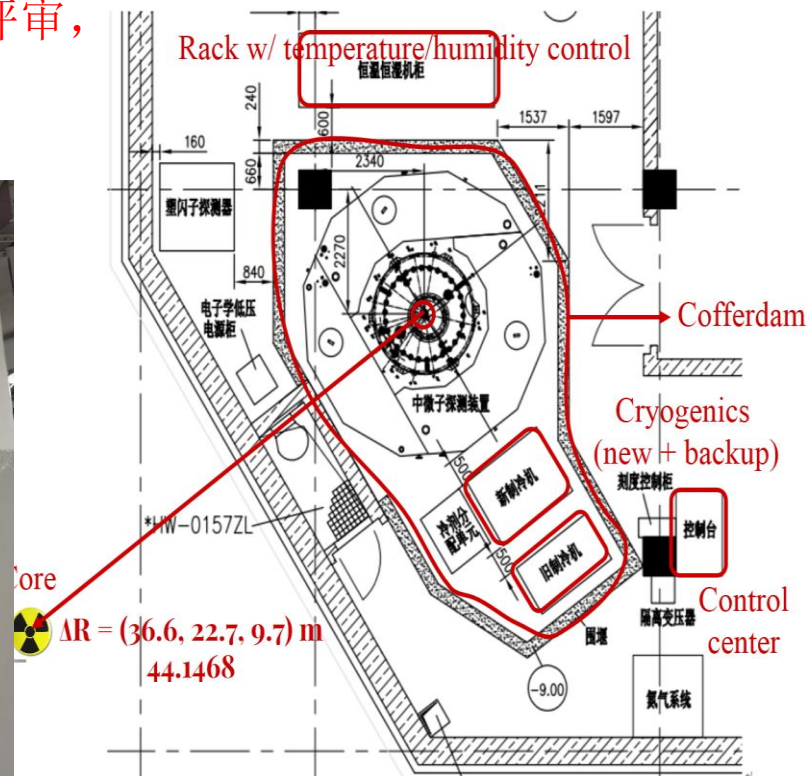


七、台山实验室改造

- 地址：1#堆的1HW厅，地下9.6m，基线44m；现有实验厅需经水、电、气、网等改造才能投入使用
- 难点1：运输通道尺寸、吊装条件受到极大限制
- 难点2：核电安全问题（增加消防系统和围堰，核级电缆，废液处理，用氮量限制等）
- 难点3：施工效率低（进入1小时，每天额外必要监管流程2小时，有效时间为平常的50%左右）
- 难点4：项目申请及审批周期长，推进难，2022年1月~2024年7月（台山核电→中广核→国家核安局）

经过两年多的努力，我们通过方案设计优化、模型实验验证、现场多次堪察、反复多次多方讨论，基本解决了以上困难，现场运输和安装方案今年3月通过评审，预计2024年7月进场安装。

实验室布局



电梯通道



吊装通道

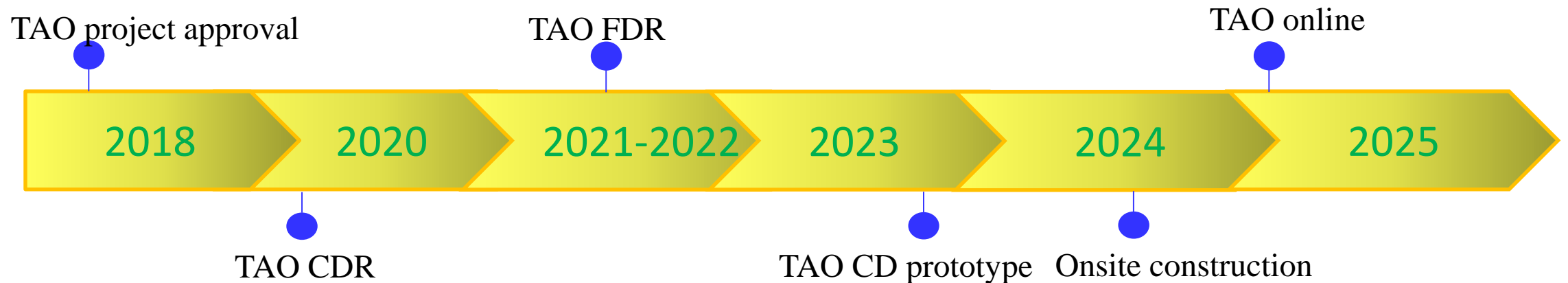


实验厅



八、总结

- 台中微子实验将以2% @ 1MeV最好能量分辨精确测量反应堆中微子能谱。
- 通过1:1模型实验，全面验证了TAO的关键结构、安装组装方案、低温系统及温度均匀性，电子学DAQ， SiPM和液闪性能等。
- 计划今年7月初现场安装，年底运行调试，2025年正式运行取数。



谢谢!