

台山反应堆中微子实验

(Taishan Antineutrino Observation, TAO)

曹国富

中科院高能物理研究所

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理
前沿问题研讨会

2023.05.08

❄ 反应堆中微子在中微子物理研究中发挥不可替代的作用

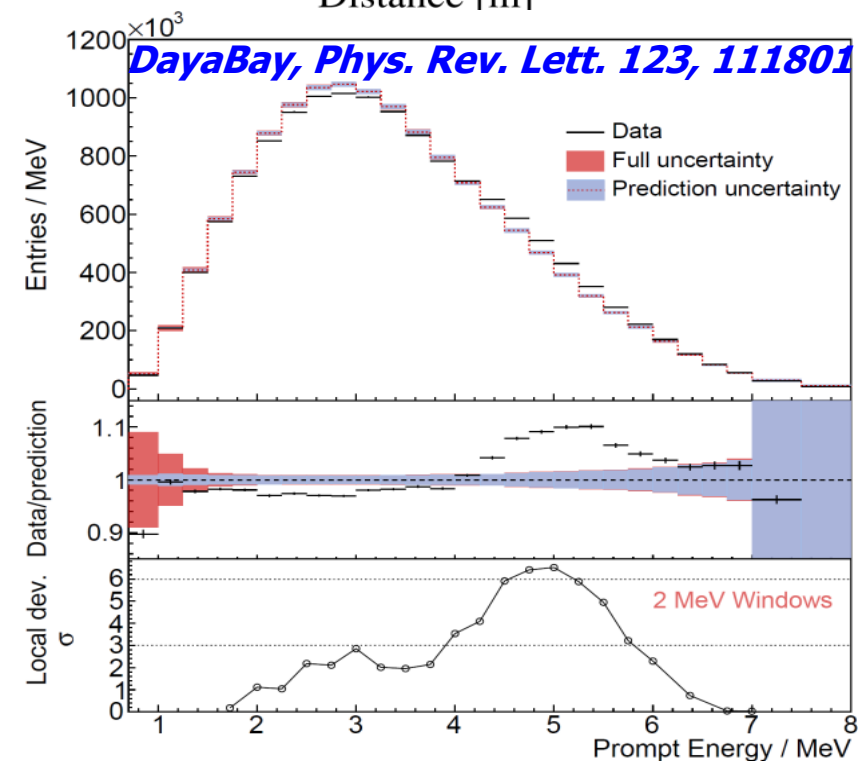
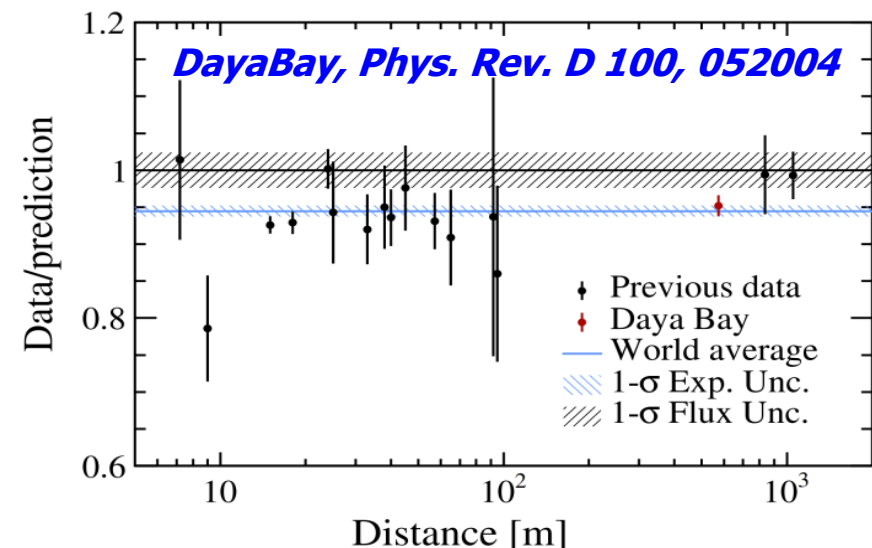
- 1956年Cowan-Reines实验证实中微子存在 [1995年诺贝尔奖]
- 中微子振荡参数精确测量 [JUNO, Daya Bay, KamLAND, Double Chooz, RENO, etc]
- 惰性中微子寻找 [NEOS, PROSPECT, DANSS, STEREO, etc]

❄ 反应堆中微子能谱预期

- 基于核数据库求和：误差确定困难
- Conversion模型：误差5%
- 大亚湾实验数据：误差2%，能量分辨率~8%@1MeV

❄ 实验观测与理论预期不符

- 理论模型不准确
- 核数据库不准确



❄️ **TAO用来精确测量反应堆中微子能谱，是JUNO的卫星实验**

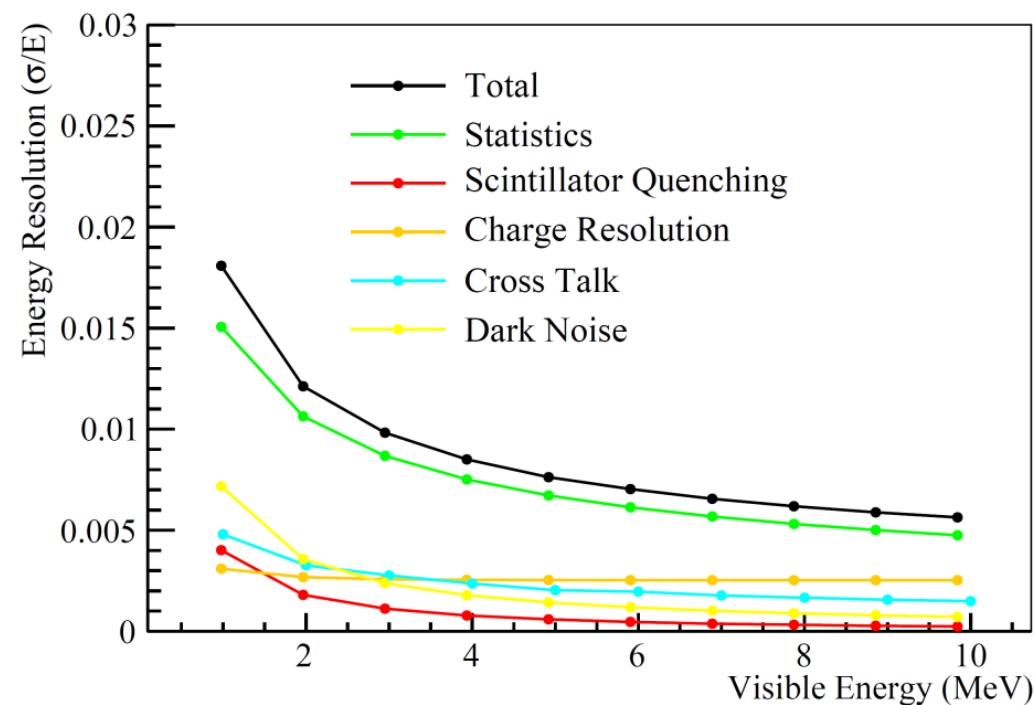
- 为JUNO提供参考能谱
- 为核数据库提供检验基准
- 有望率先测量能谱精细结构
- 研究能谱反常、惰性中微子、反应堆监测等

❄️ **距离一个台山反应堆堆芯约30米，地下三层 (-10米)**

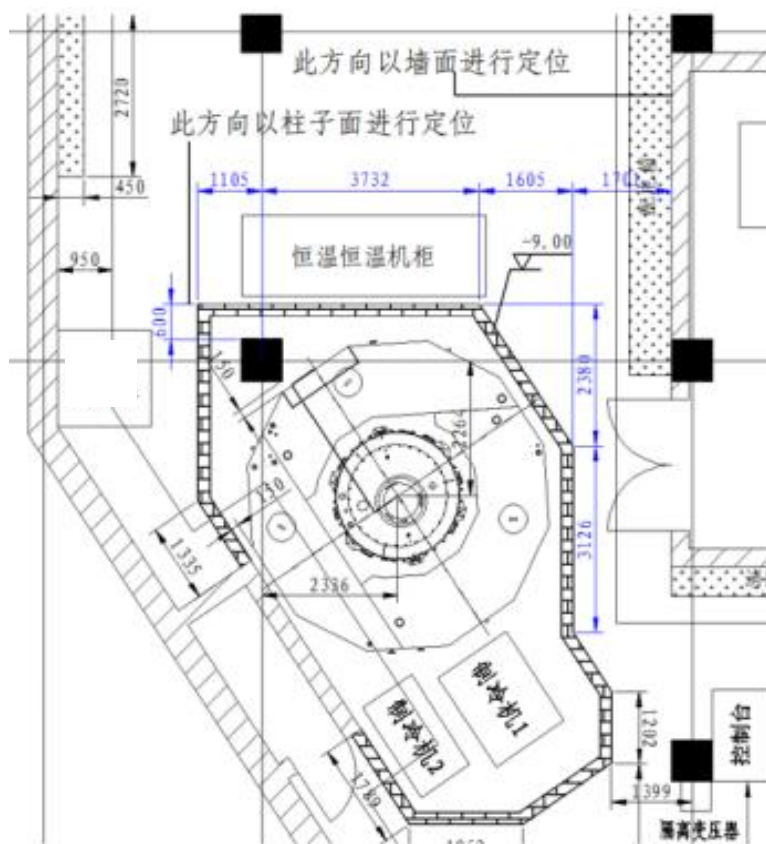
❄️ **吨级液闪探测器，预期能量分辨率好于 $2\%/\sqrt{E}$ (~ 4000 p.e./MeV)，远好于国际同类探测器的最好水平**

- JUNO: $3\%/\sqrt{E}$; BOREXINO: $5\%/\sqrt{E}$; KamLAND: $6\%/\sqrt{E}$
- PROSPECT: $4.5\%/\sqrt{E}$; NEOS: $5\%/\sqrt{E}$

❄️ **预期2024年初开始数据获取**



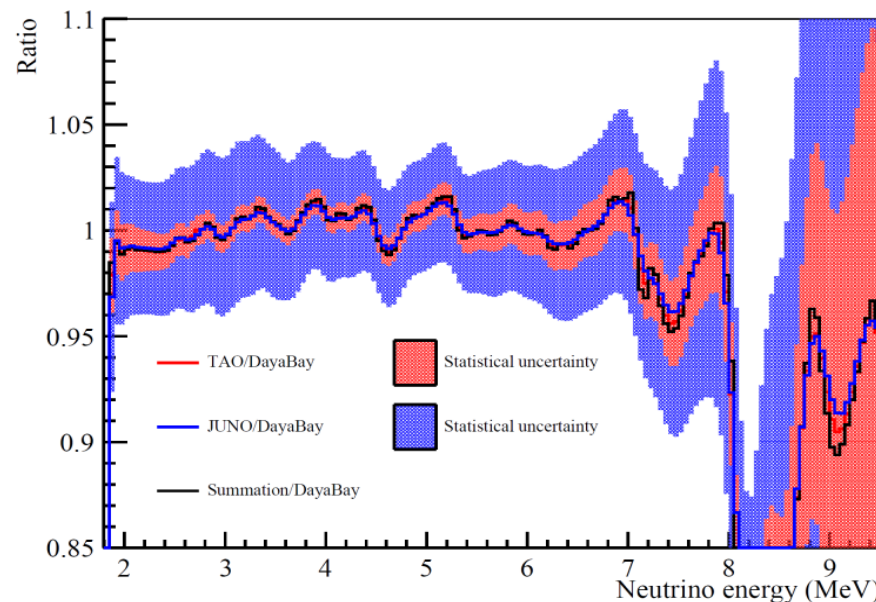
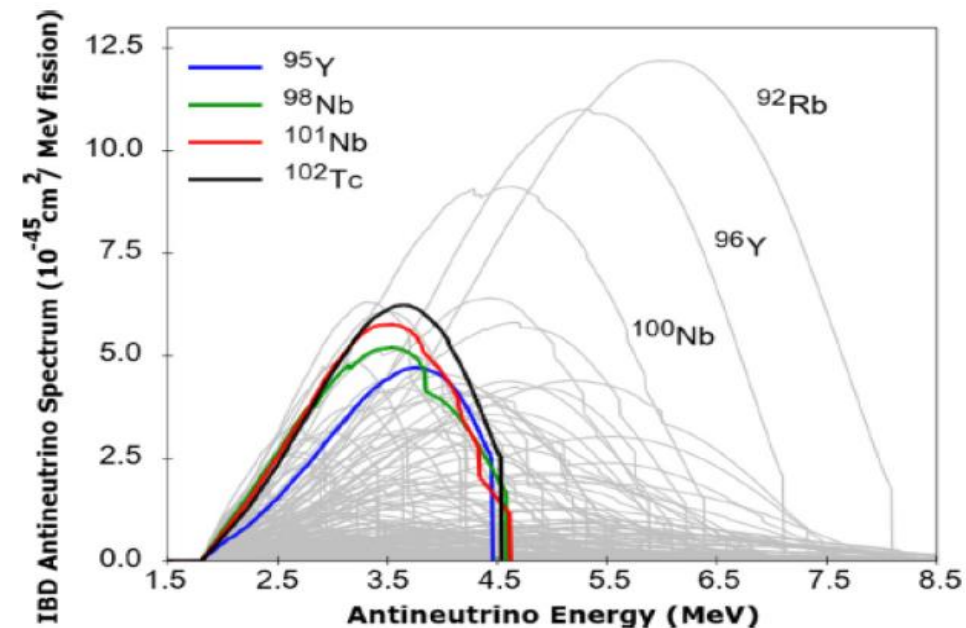
- ❄ 2018年1月，JUNO合作组决定做近点探测器，10月命名为台山反应堆中微子实验
- ❄ 2020年1月完成初步设计评审，3月完成概念设计报告([arXiv:2005.08745](https://arxiv.org/abs/2005.08745))
- ❄ 总造价约3000万
 - 意大利INFN贡献1M欧元，俄罗斯JINR贡献1M美元
 - 国内单位 (高能所、中大等)



率先实现反应堆中微子能谱精细结构测量

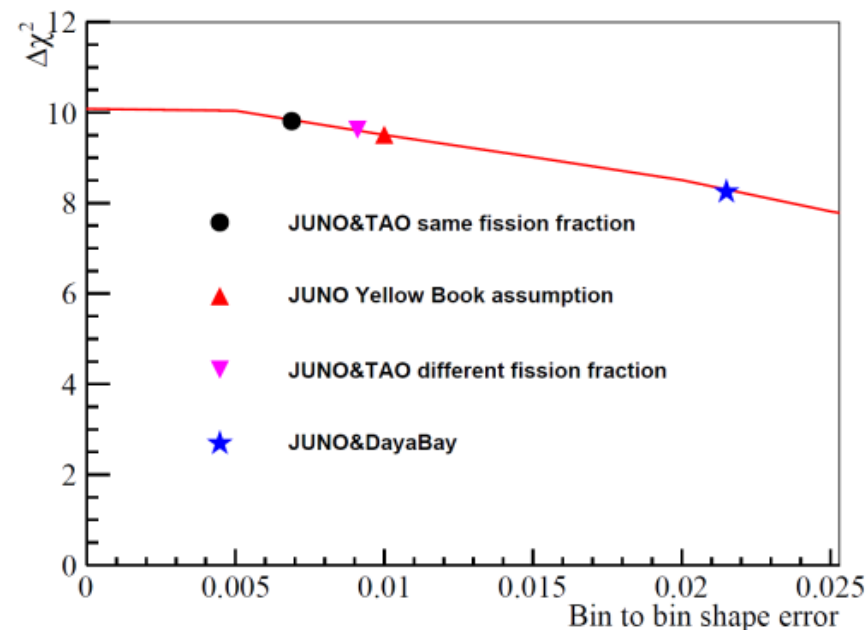
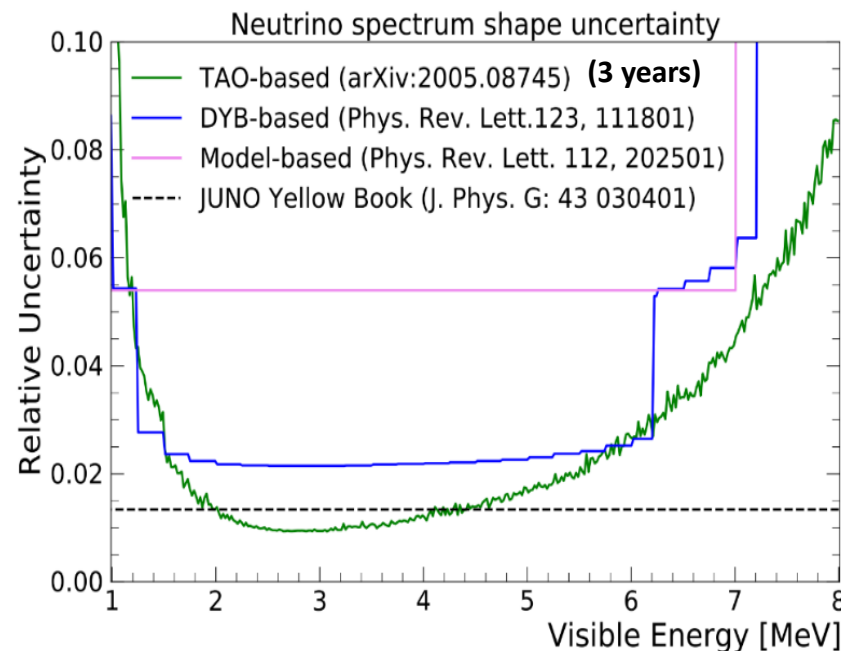
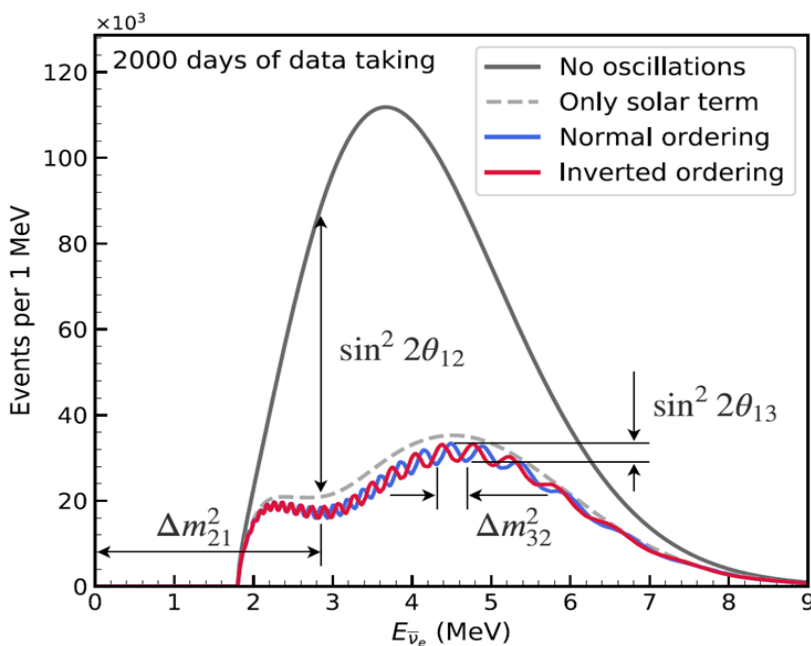
- ❄ 为JUNO提供参考能谱 (谱形误差 $<1\%$)
- ❄ 为检验核数据库提供基准
- ❄ 提供更加可靠的裂变核素中微子产额和能谱
- ❄ 推动丰中子同位素核物理理论发展
- ❄ 研究反应堆中微子反常问题
- ❄ 得到国际原子能机构的强烈推荐 (IAEA-INDC(NDS)-0786)

探测器能量分辨率越高越好!

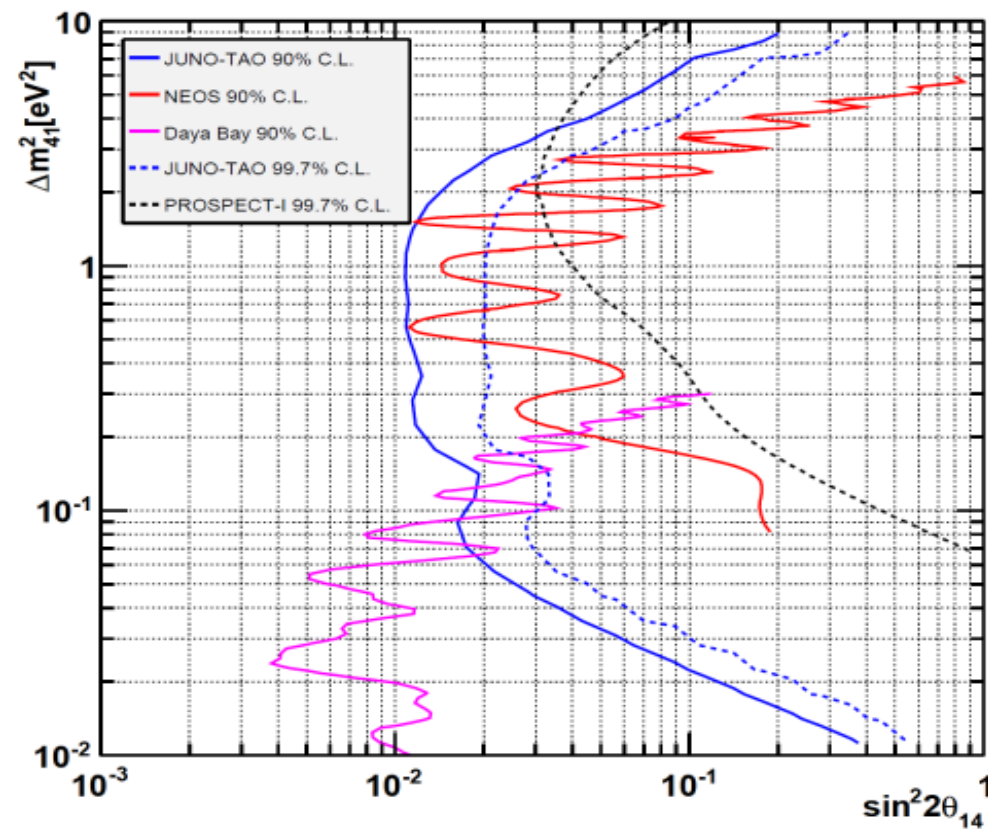
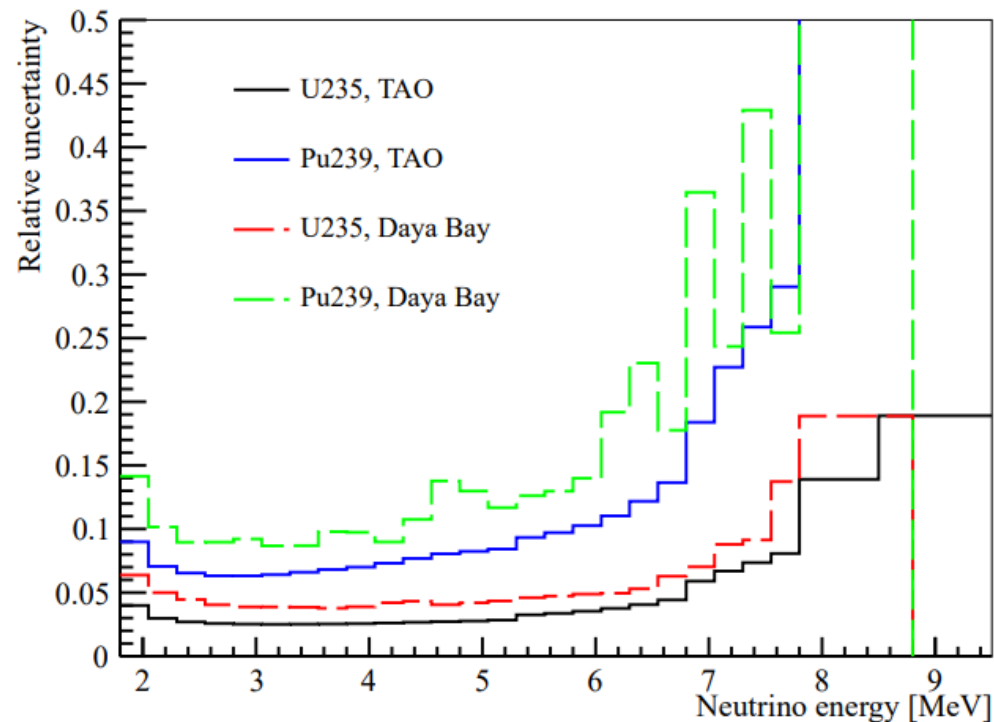


消除反应堆中微子能谱的模型依赖，提高中微子质量顺序测量灵敏度

- ❄ 3年统计量，能谱误差 $< 1\%$
- ❄ 能量分辨率好于JUNO
- ❄ 相比大亚湾能谱输入，灵敏度 $\Delta\chi^2$: $\sim 1.9\uparrow$



- ❄ 惰性中微子寻找
- 与大亚湾中微子实验和超短基线反应堆实验互补。



- ❄ 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%
 - 为反应堆燃料演化反解提供更准确输入

❄ 中心探测器

- 2.8吨低温掺钆液闪，有机玻璃球直径1.8米
- 超大面积 (10 m²) SiPM光探测器阵列
- 铜球壳和制冷系统
- 不锈钢罐，罐内为-50°C环境
 - 3.4吨LAB缓冲液
 - 外包裹密胺脂材料用于隔热

❄ 刻度系统

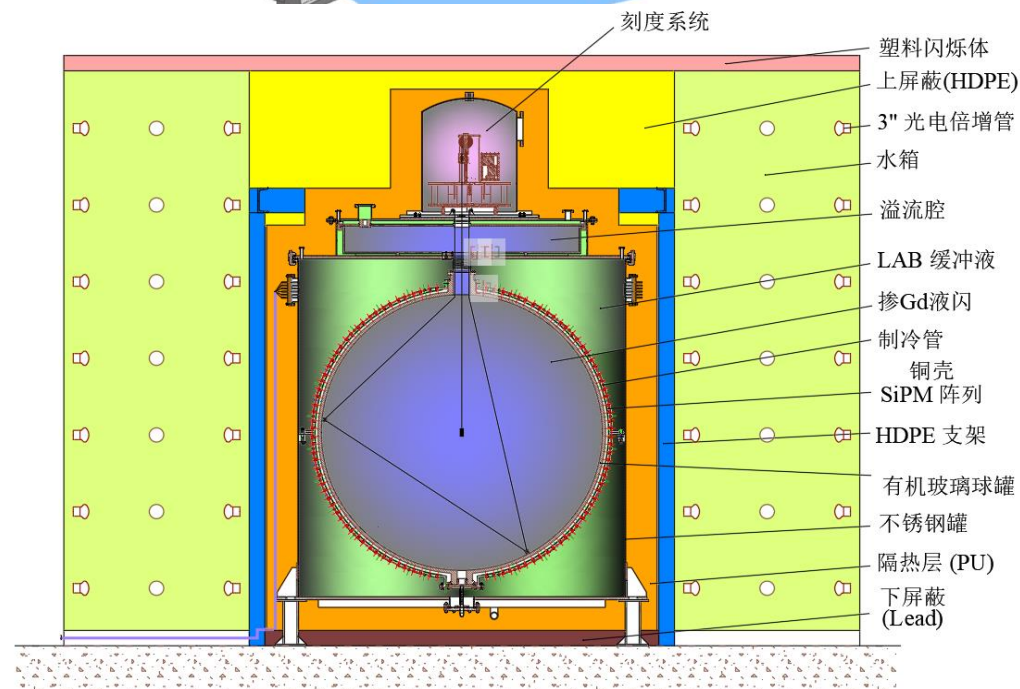
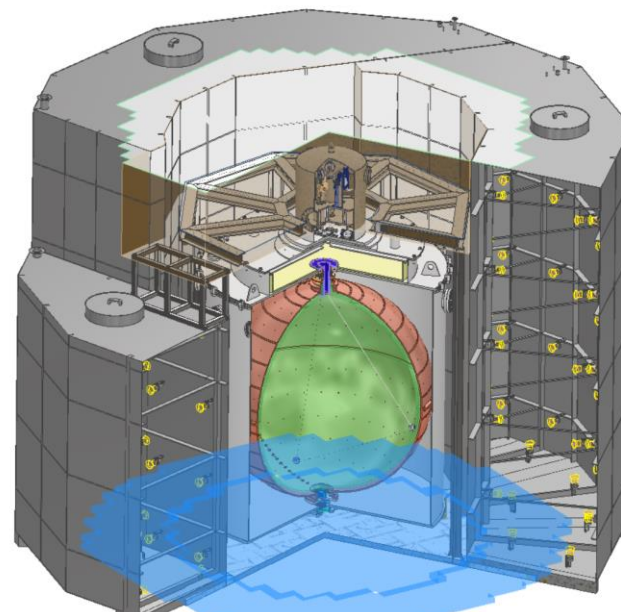
- ACU刻度装置
- 绕线装置

❄ 水切伦科夫探测器

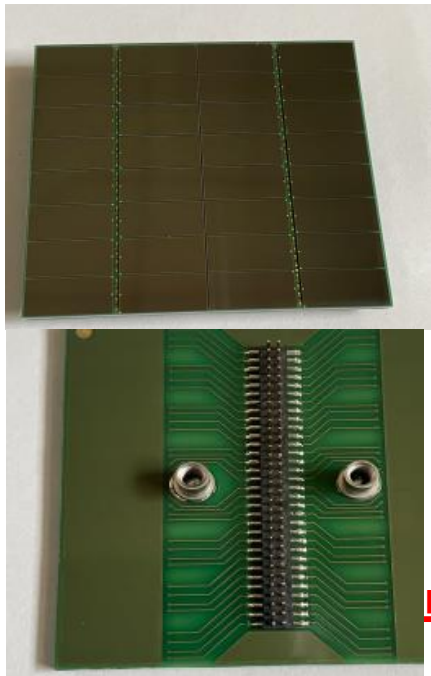
- 中心探测器四周
- 3个水箱，构成八角形，1.2米厚水屏蔽层

❄ 塑料闪烁体探测器

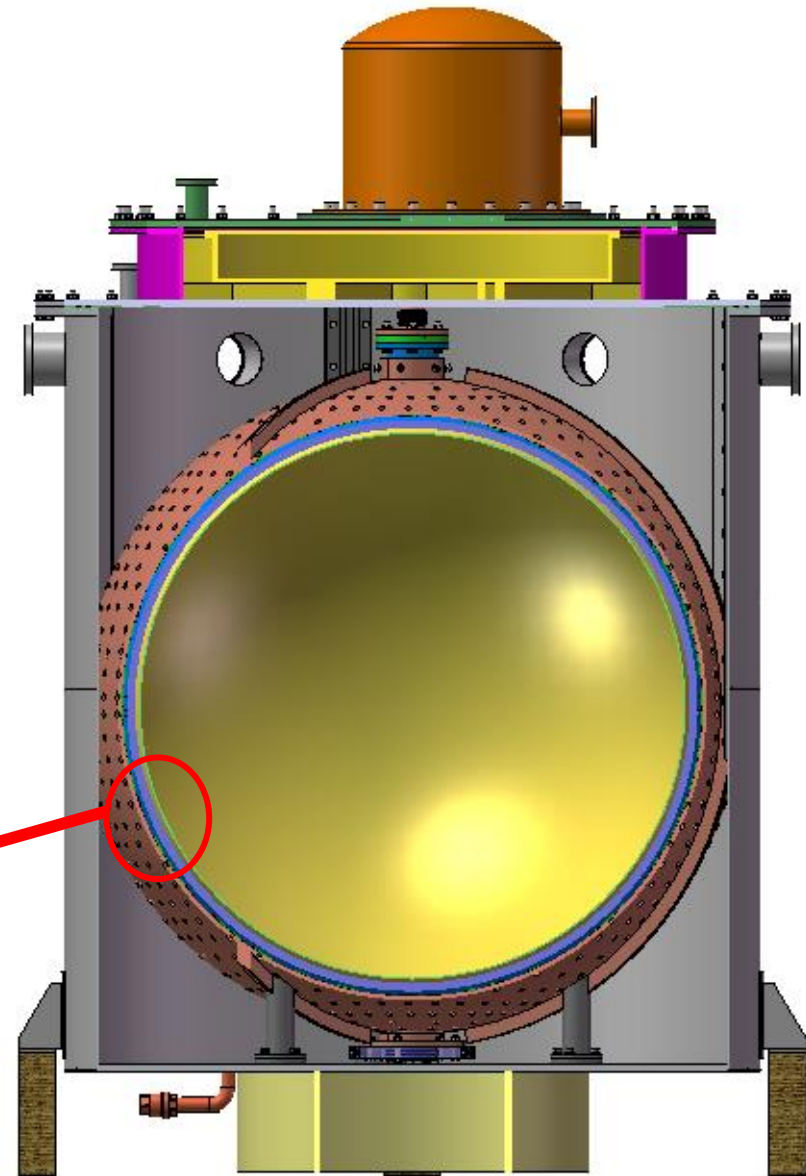
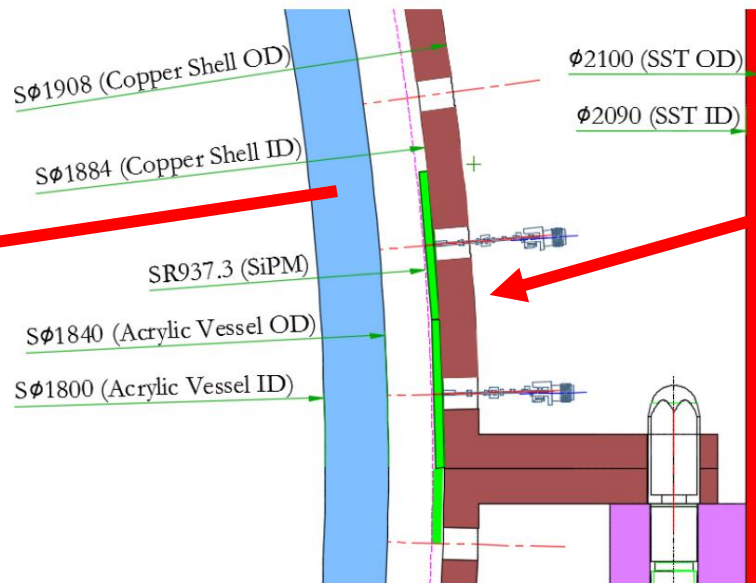
- 位于顶部
- 4层塑料闪烁体



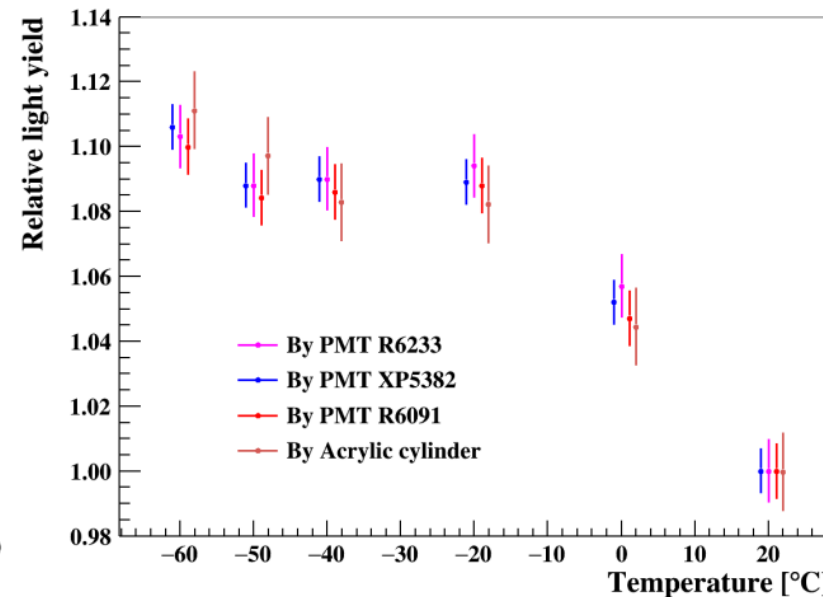
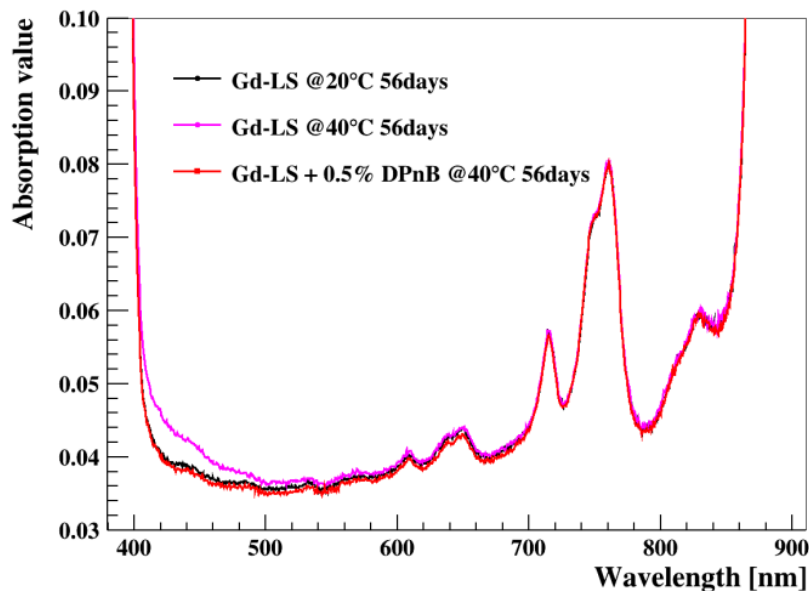
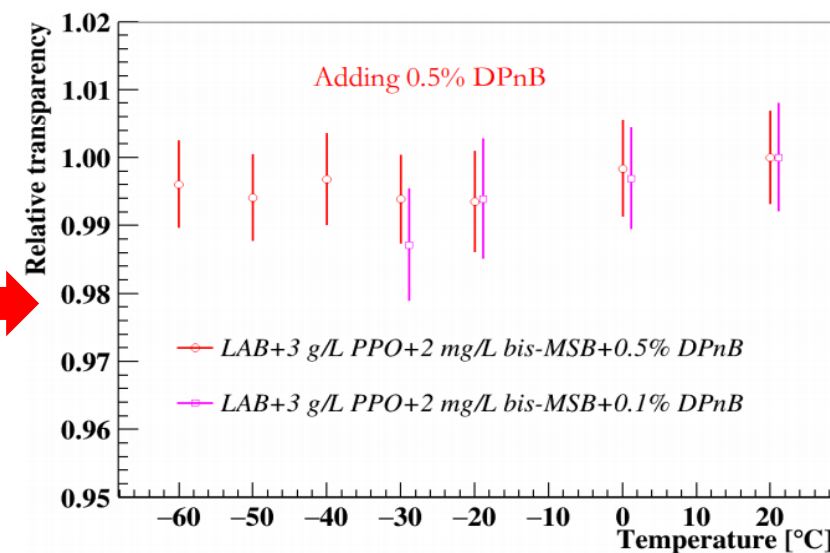
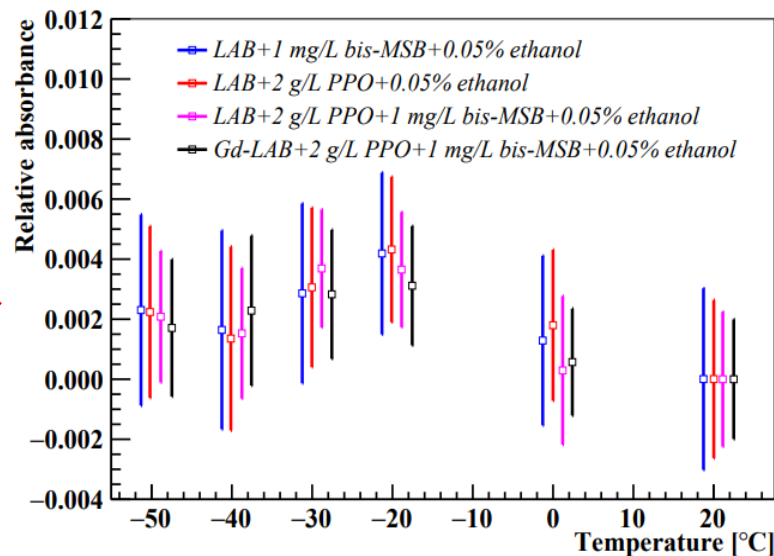
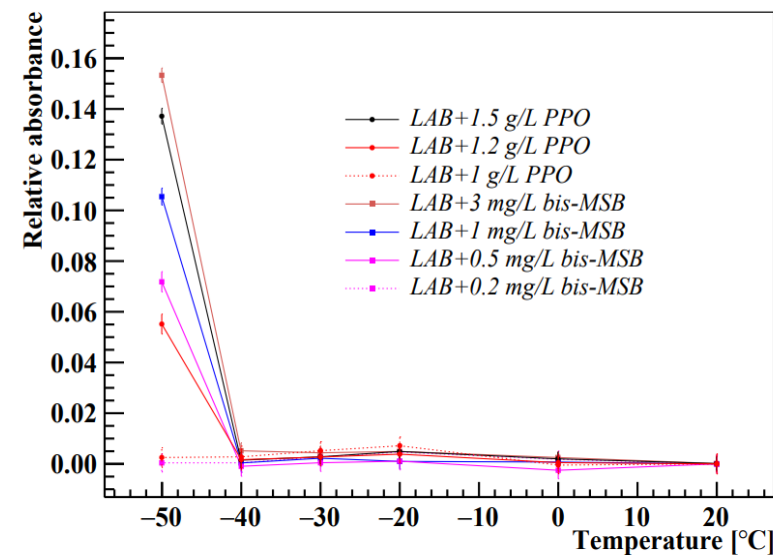
- ❄ 低温掺钎液闪 → **首个低温液闪配方 (下页)**
- ❄ 10平方米SiPM光探测器阵列
 - 4024个 $5\times 5\text{ cm}^2$ 阵列, 8048个读出通道
 - 覆盖率: 94%, 探测效率: $>50\%$
 - 工作温度: -50°C , 浸泡在LAB中
- ❄ 直径~2米铜球壳, 厚12mm



单个SiPM阵列



Nucl. Instrum. Meth. A 1009 (2021) 165459



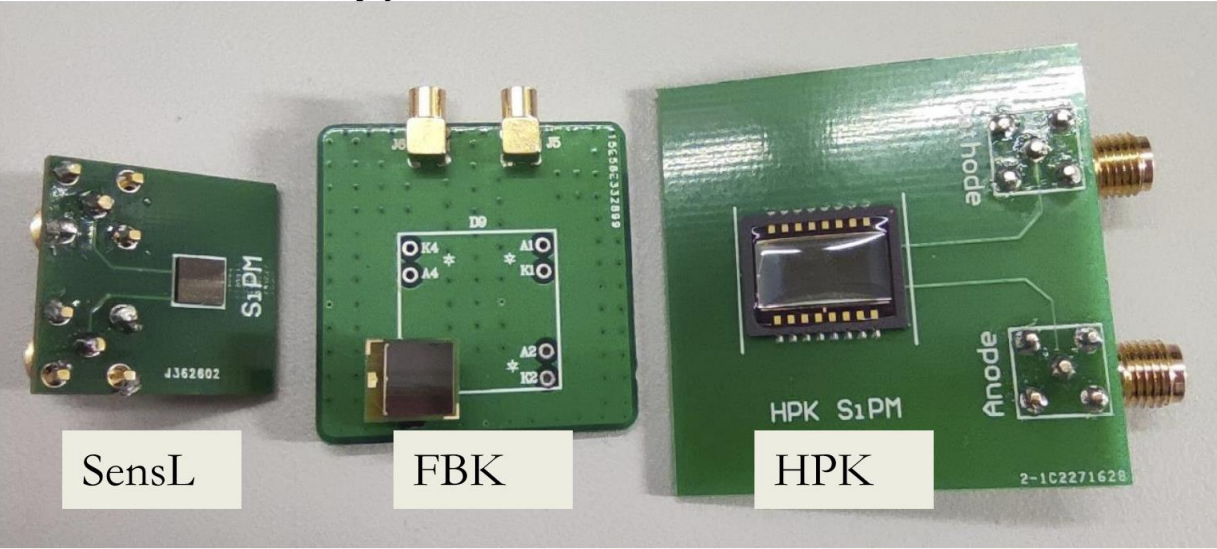
❄ 低温液闪配方:

Gd-LAB + 3 g/L PPO + 2 mg/L bis-MSB + 0.5% DPnB

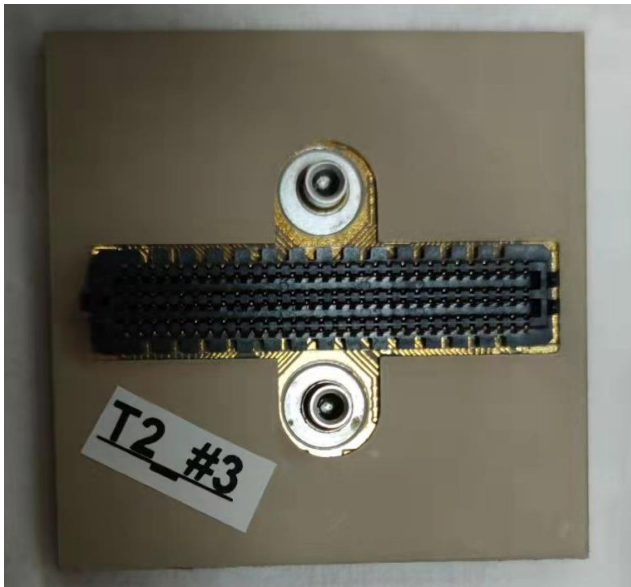
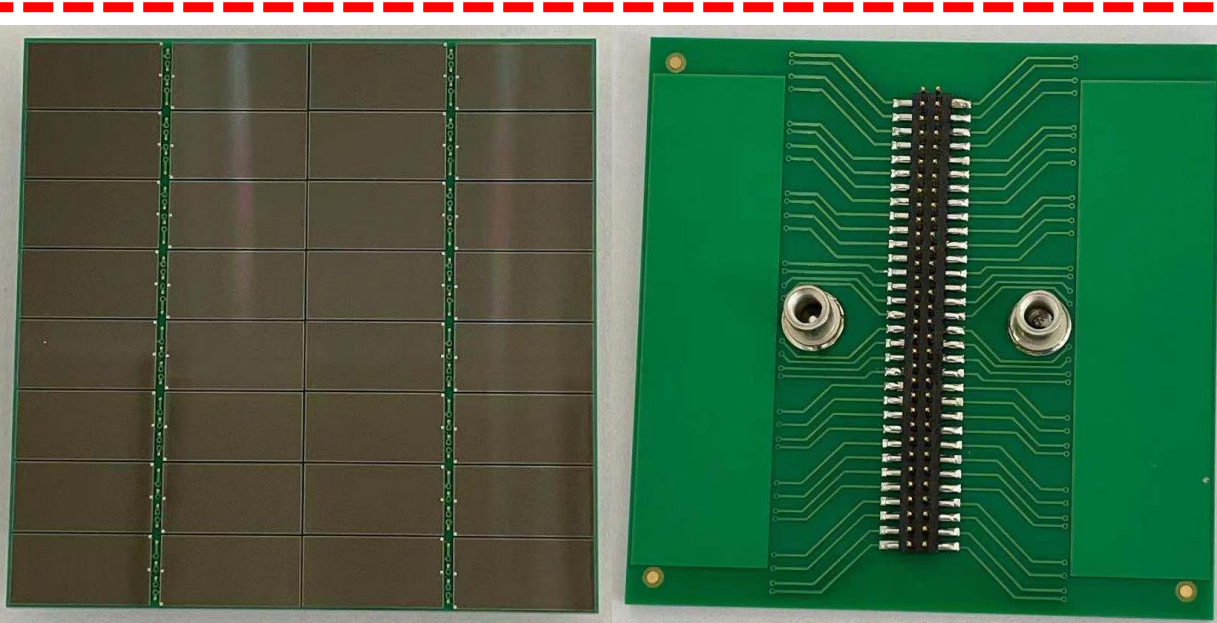
❄ 高光产额、高闪点、高透过率、高稳定性、低挥发

❄ 非常多的材料兼容性测量

SiPMs: three types from different vendors



Vendor	Type	Pixel size ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	Total size (mm*mm)
SensL	MicroK-40035-E715	35*35	4*4
FBK	NUV-HD LowCT_v2 (Double/Triple trenches)	50*50 (75*75)	6*6
HPK	S16080	75*75	6*12

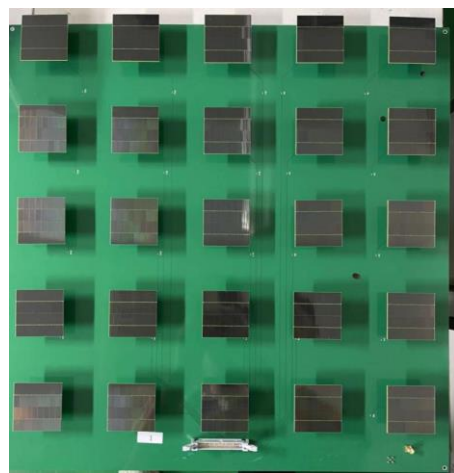


第1步：光学检测

- 4100个SiPM阵列
- 后续算法判断缺陷

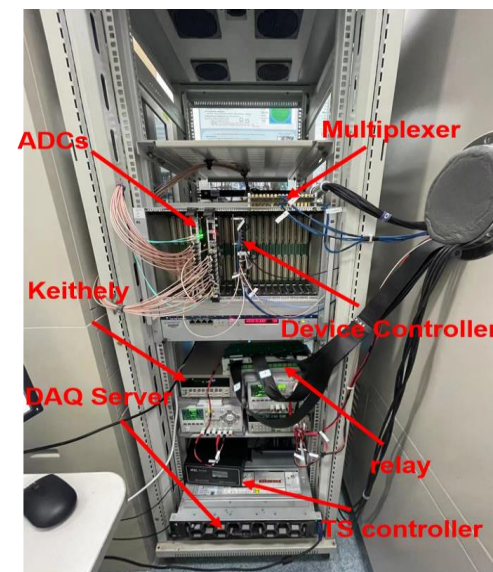
第2步：老化测试

- 常温运行2周
- 抽测每个阵列暗电流

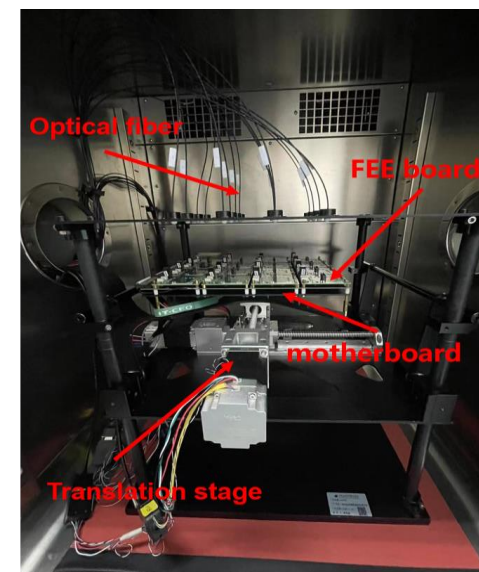


第3步：批量测试

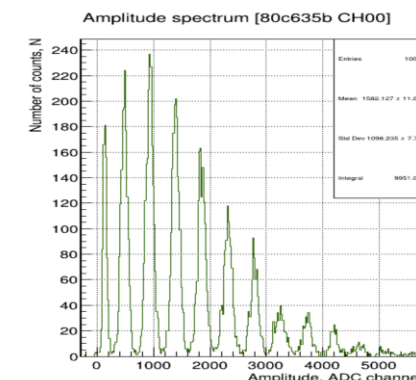
- -50 °C 测量环境
- $4100 \text{ tile} \times 16 \text{ ch/tile} = 65,600$, 48 tile/day
- PDE, DCR, CT, AP, gain, etc



Outside of cryogenic chamber



Inside of cryogenic chamber



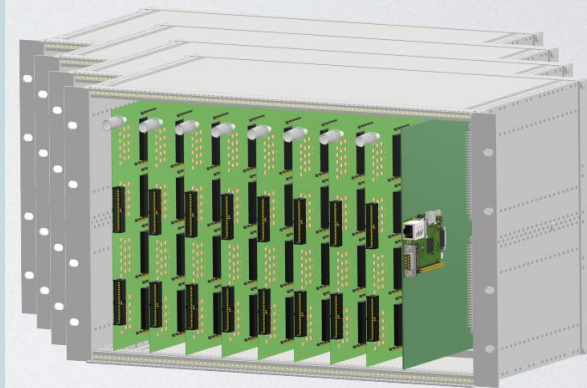
Copper shell
with tiles

Inner side of SS tank

Outer side of SS tank

SiPM Power Supply

4 VME crates
16 modules each
4 control units
>4000 channels



+



Power Unit

2048 channels

Ribbon cables
(~4m long)
which splitted onto
pairs at their ends

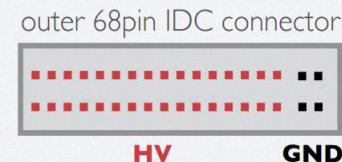
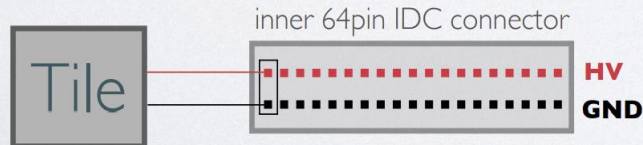
2048 channels

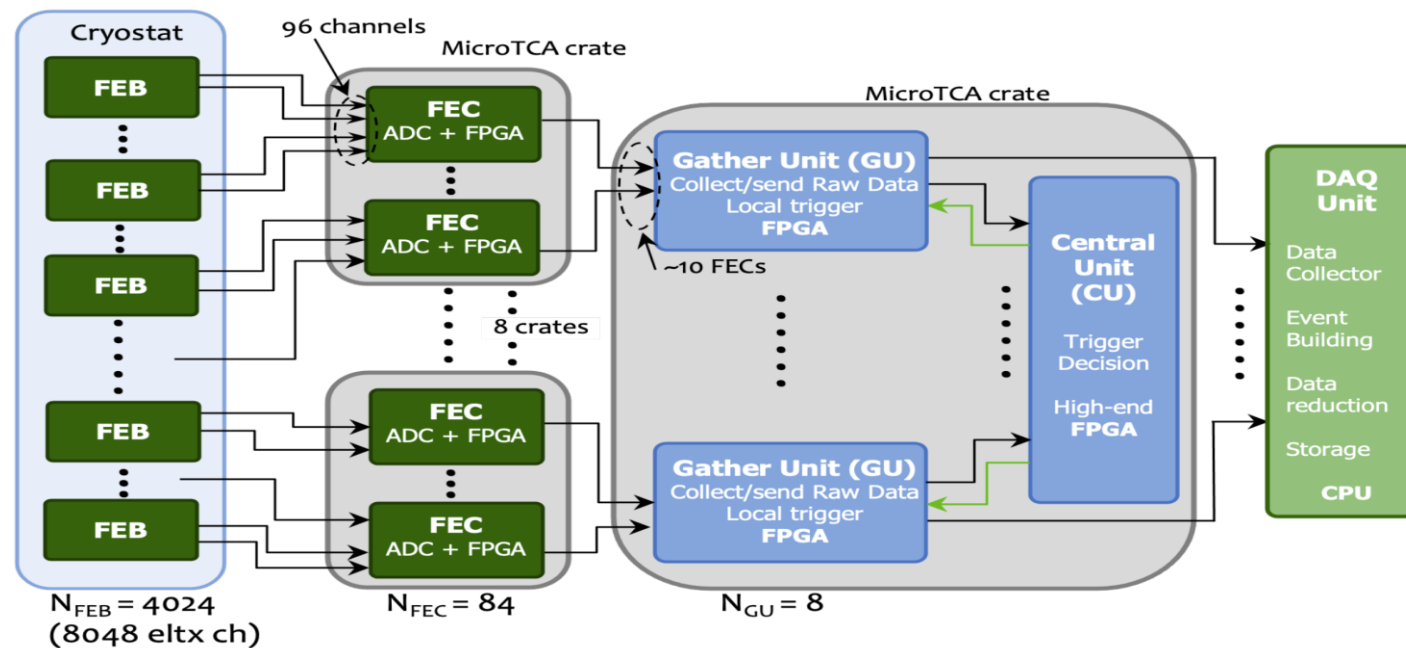
2048 channels

Ribbon cables
(~10m long)

2048 channels

2 × FEED THROUGH



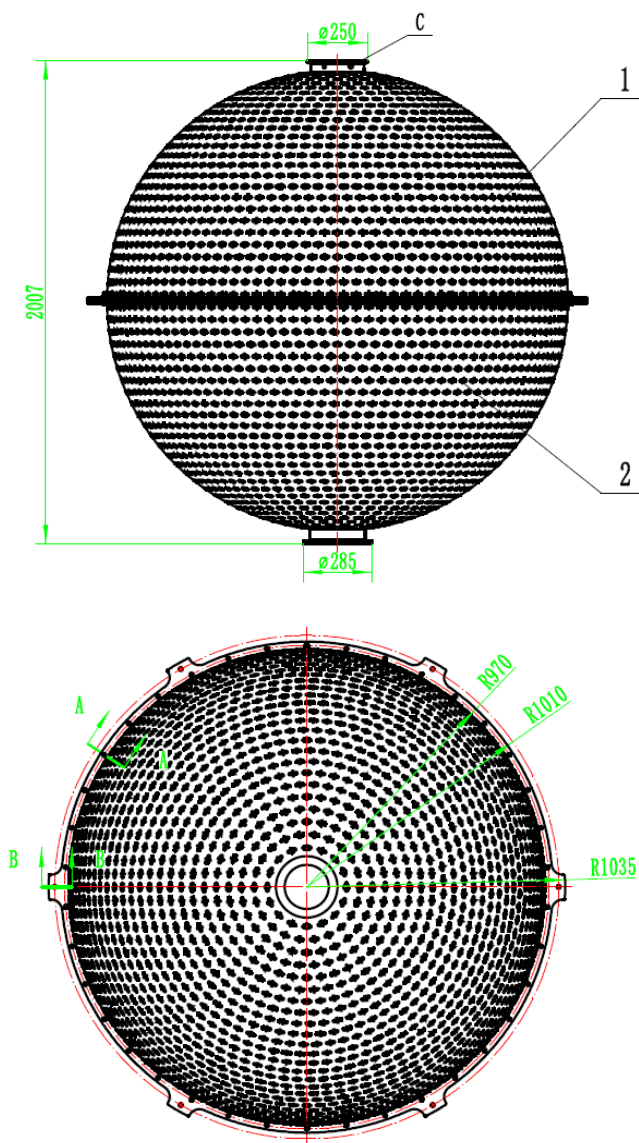
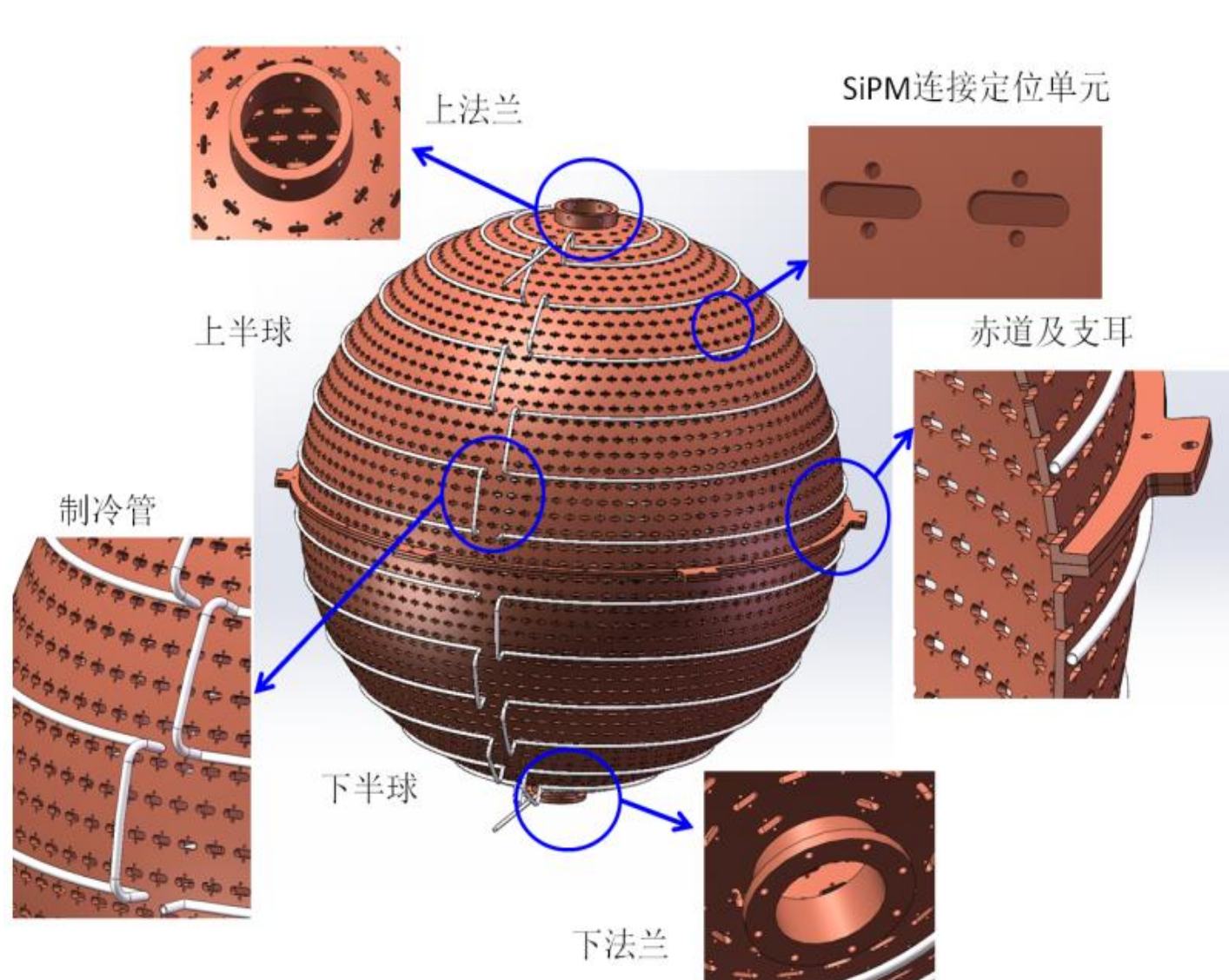


基本参数和指标要求:

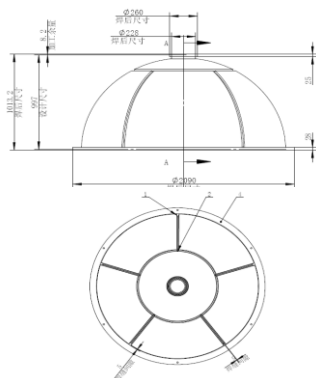
- 8048个读出通道, $12.5 \text{ cm}^2/\text{ch}$
 - 等效电荷噪声: $< 0.1 \text{ p.e.}$; 时间分辨: $< 1 \text{ ns}$
 - ADC: 125MHz/16bit 或 250MHz/12bit
 - 动态范围: $1 - 180 \text{ p.e./ch}$
 - 低放射性FEB材料
 - FEC $\rightarrow$ TDAQ: $\sim 70 \text{ Gbps}$
 - TDAQ $\rightarrow$ Disk: $\sim 100 \text{ Mbps}$
- 即将开始电子学联调测试



直径约2米，厚度28mm铜球壳加工制作极具挑战！ 2021年夏 – 2023年5月



直径约2米，厚度28mm铜球壳加工制作极具挑战！ 2021年夏 – 2023年5月



分成8瓣



完成铸造



焊接成形



完成焊接



PTFE镀膜



喷砂



除油



完成机械加工



车削和铣削

Eur. Phys. J. C 82 (2022) 12, 1112

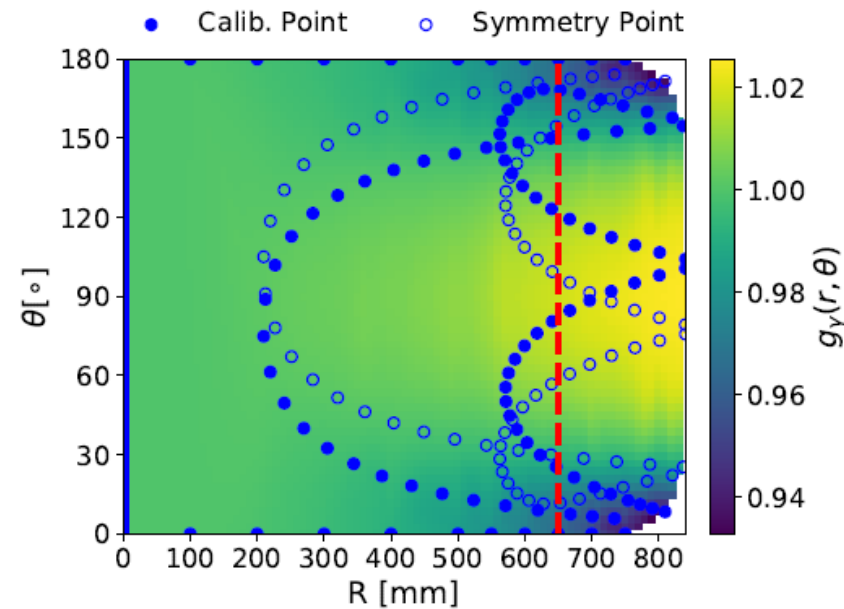
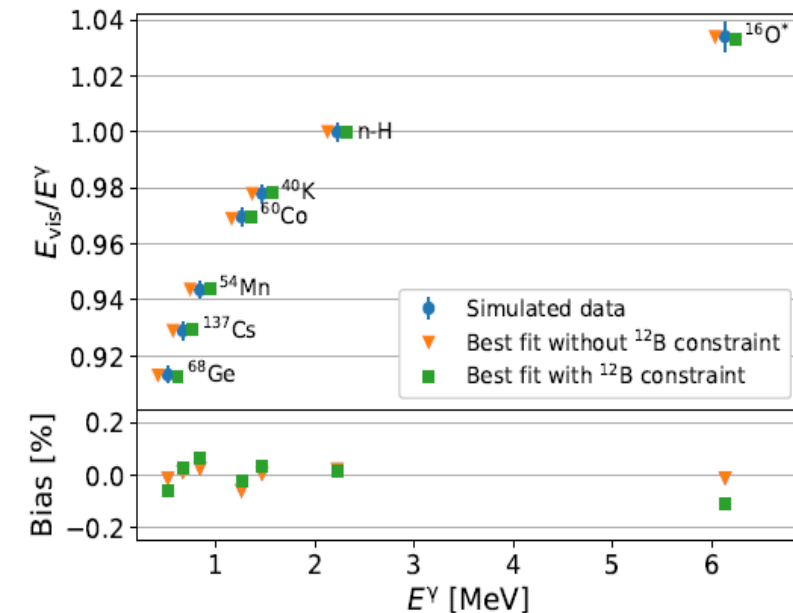
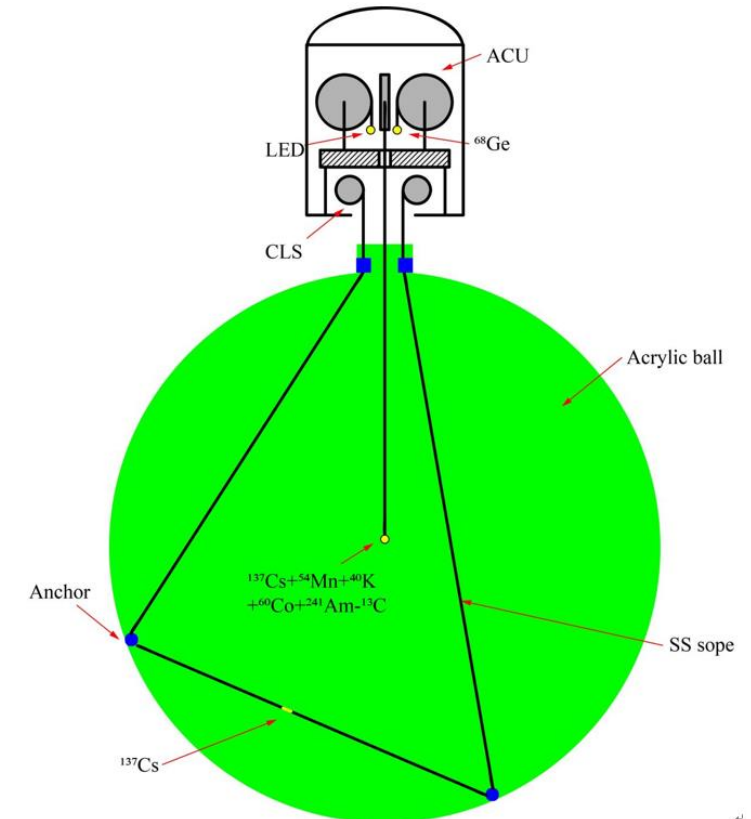
❄️ ACU装置 (改自大亚湾)

- ^{68}Ge
- $^{137}\text{Cs} + ^{54}\text{Mn} + ^{40}\text{K} + ^{60}\text{Co} + \text{AmC}$
- LED (频段可配置)

❄️ 绕线刻度装置

- ^{137}Cs

❄️ 能量非线性 < 0.6%, 残余非均匀性 < 0.2%

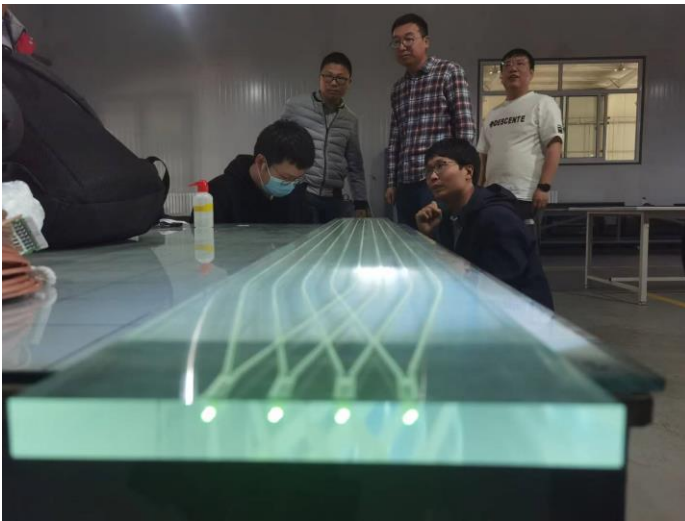
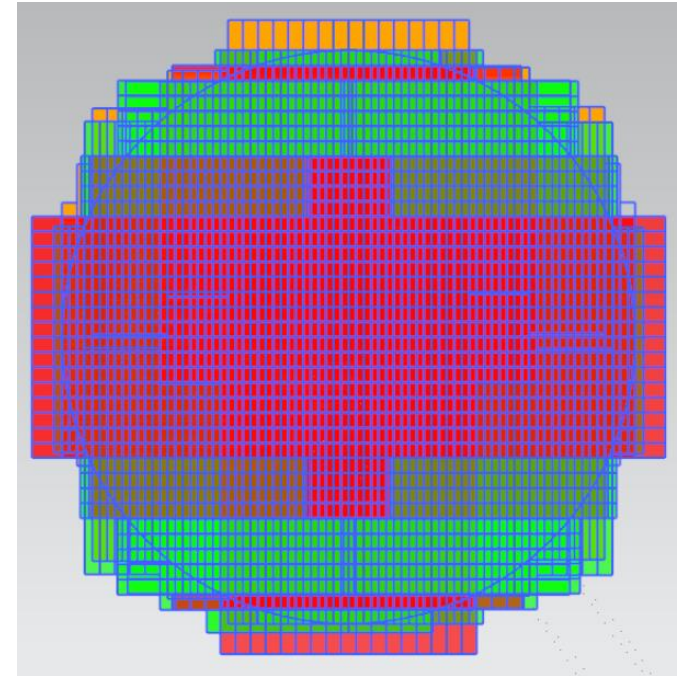
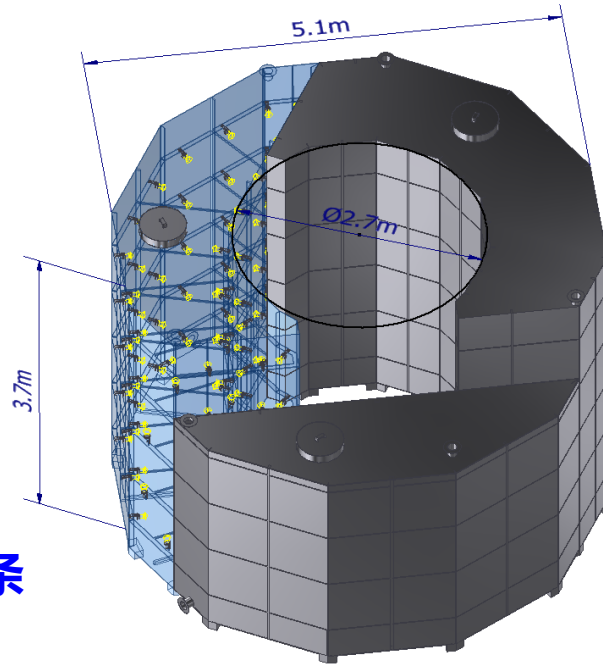


❄ 水切伦科夫探测器

- 成熟的PMT + 水箱方案
- 复用JUNO 3" PMT和电子学
- 3个异形水箱，方便安装和维护

❄ 塑料闪烁体 (TVT, 中山大学)

- 4层闪烁体条, 160条, $2\text{ m} \times 20\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ /条
- 双端SiPM读出, 电子学与中心探测器类似
- 完成模型测试, 完成采购合同



- ❄ **台中微子实验用来精确测量反应堆中微子能谱**
 - 为JUNO提供精确的参考能谱 (谱形测量误差 $< 1\%$), 显著提高质量顺序测量灵敏度
 - 反应堆中微子能谱精细结构, 为核数据库提供基准
 - 惰性中微子、反应堆监测与防护等

- ❄ **采用新探测方案和探测技术, 先进性与挑战性并存**
 - 能量分辨率好于 2% @1 MeV, 远好于国际同类探测器
 - 完成首个低温液闪配方
 - 超大面积SiPM阵列
 - 大尺寸铜球壳制作

- ❄ **正处于安装准备阶段, 2024年开始实验数据获取**

- ❄️ 欢迎各位同仁交流、讨论、合作，深入挖掘精确反应堆中微子能谱背后的科学问题和应用潜力
- ❄️ 欢迎感兴趣的有志青年加入我们团队 (JUNO + TAO)
 - 良好的发展平台和资源
- ❄️ 联系方式: caogf@ihep.ac.cn

谢谢