



锦屏中微子实验建设 研发进展

王喆
清华大学

2026年7月15日

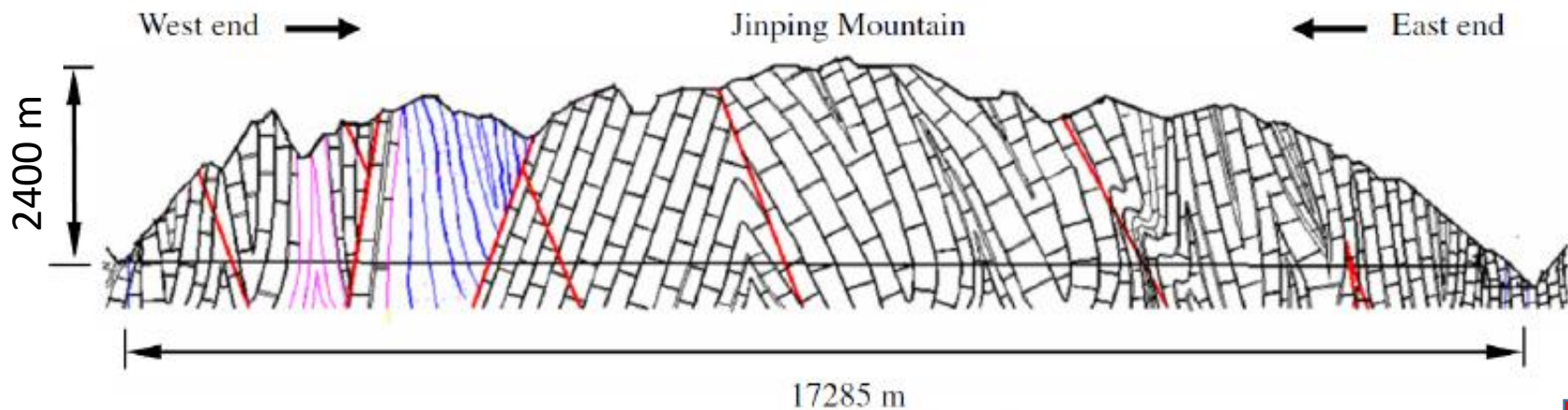
wangzhe-hep@mail.tsinghua.edu.cn

于高能物理分会学术年会

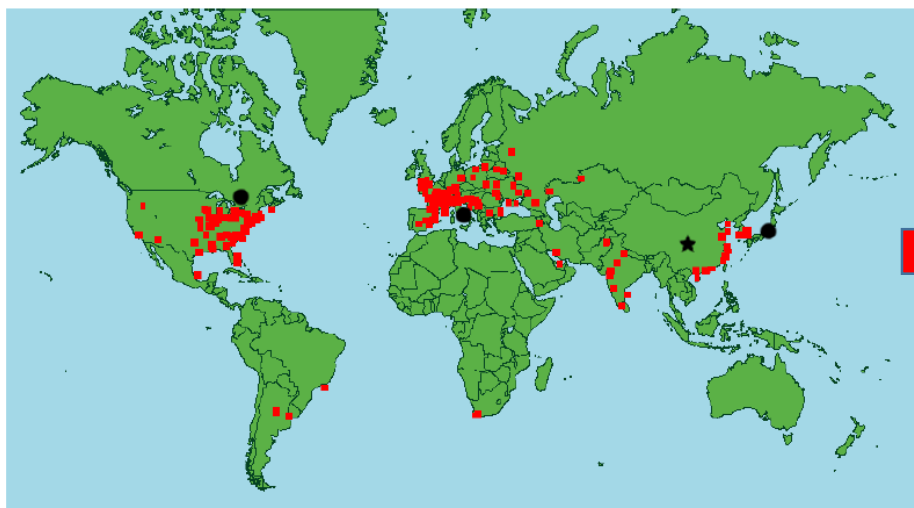
报告提纲

1. 实验室的地理优势
2. 探测器整体结构
3. 地球中微子与新型切伦科夫液体闪烁体
4. 太阳中微子与LiCl水溶液闪烁体
5. 探测器设计建设进展

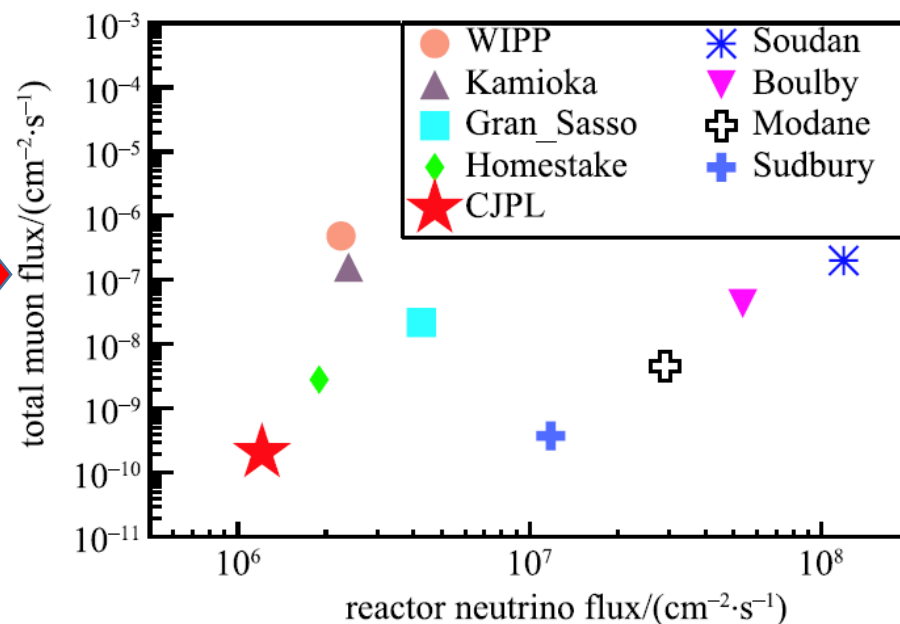
深地和远离反应堆的优势



2400 m overburden, C10, C11 background suppressed



950 km to closest reactor

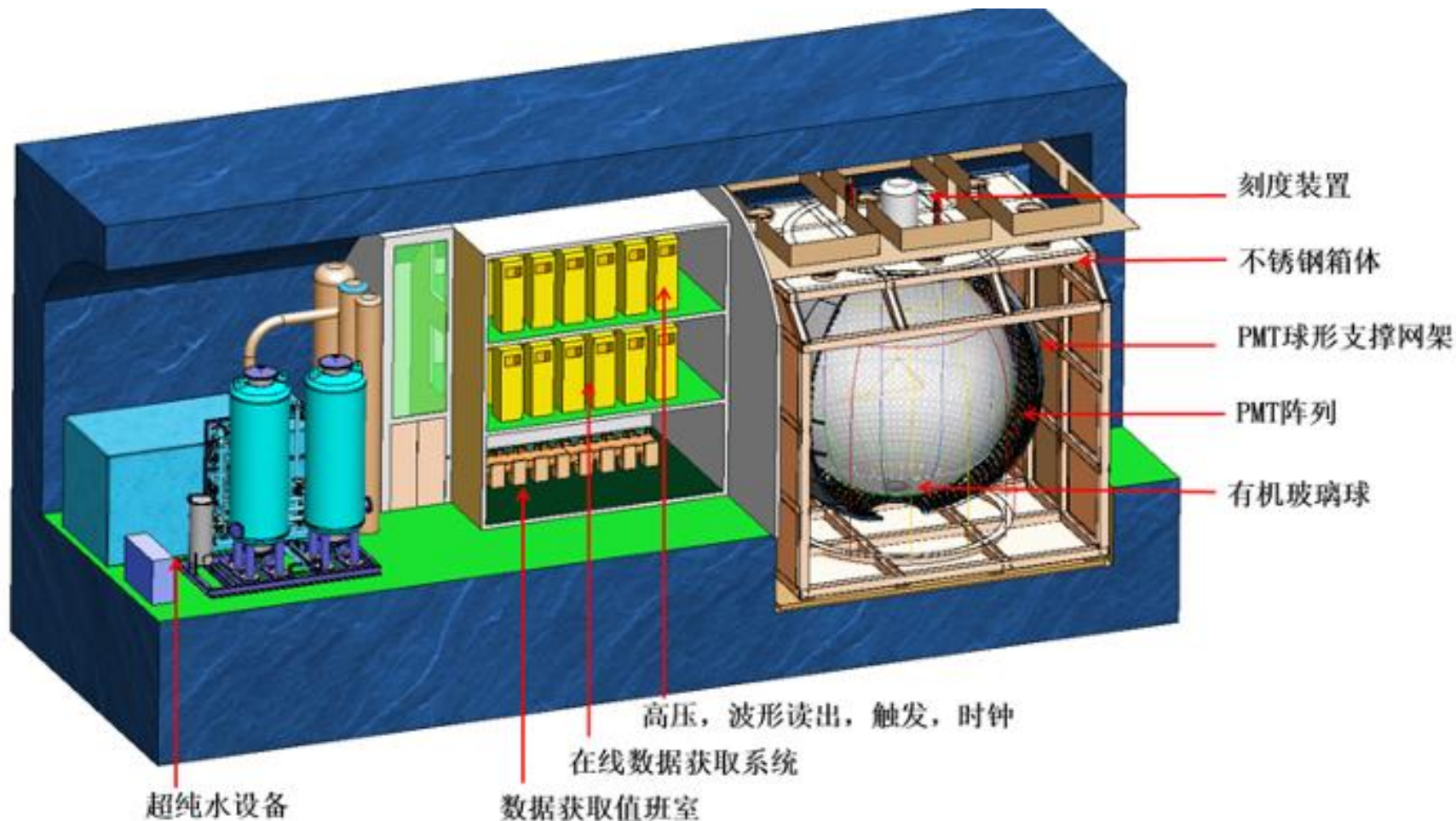


实验厅状态



2024/03/20 09:14

实验厅布置计划



探测器主体性质

不锈钢水箱:

14.5 m (L)*12.9 m (W)*13.2 m (H)

PMT不锈钢网架:

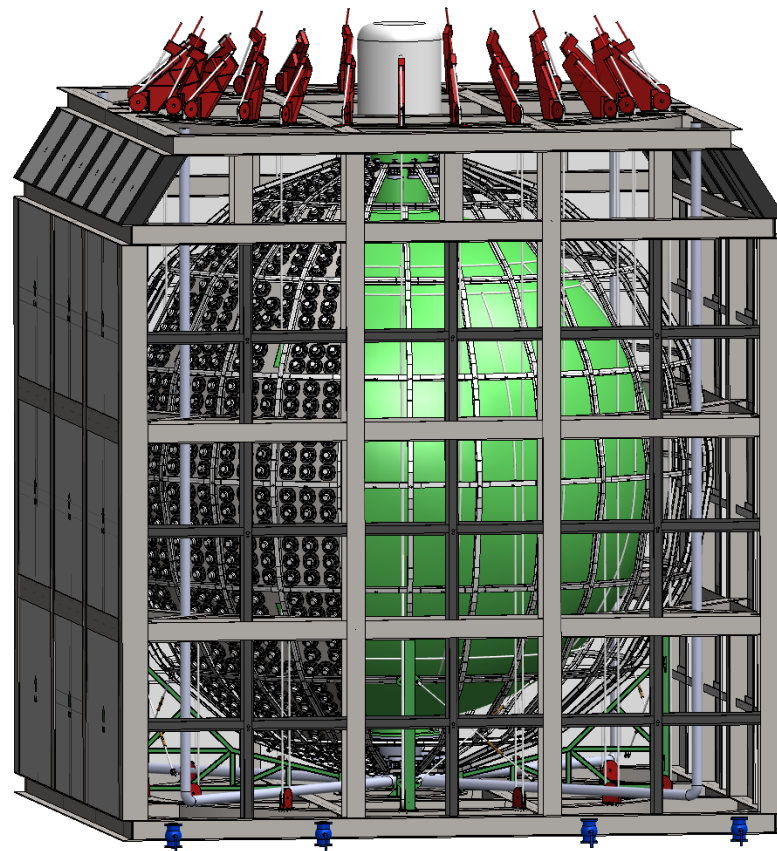
12.16 m (diameter)

亚克力球壳:

9.96 m (diameter), 0.05 m (thickness)

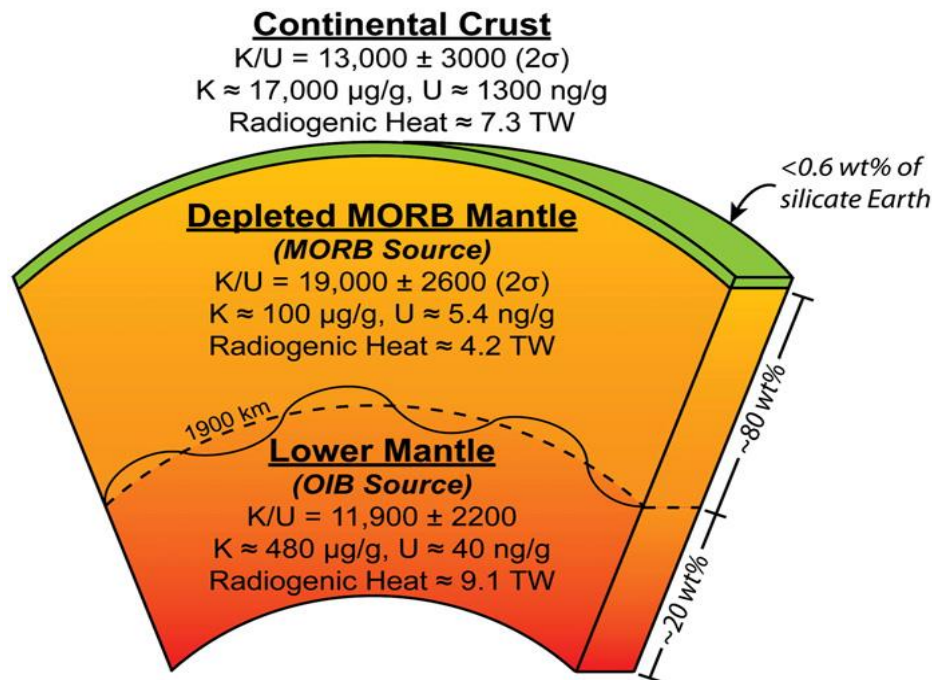
液体闪烁体体积:

500 cubic meters



探测器建设开展中

放射性热与地球热演化历史

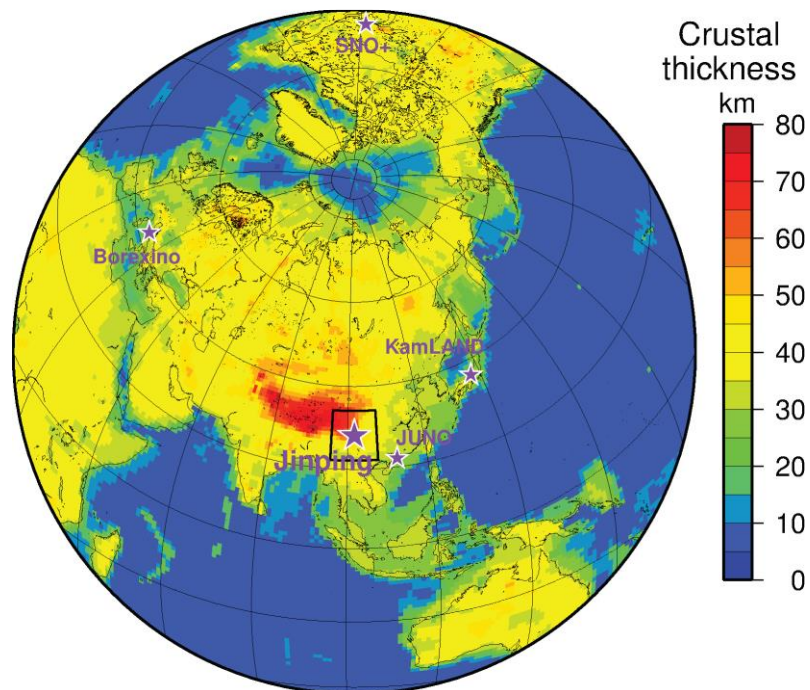


$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_m(t) + Q_c(t) + Q_s(t)}{C_m}$$

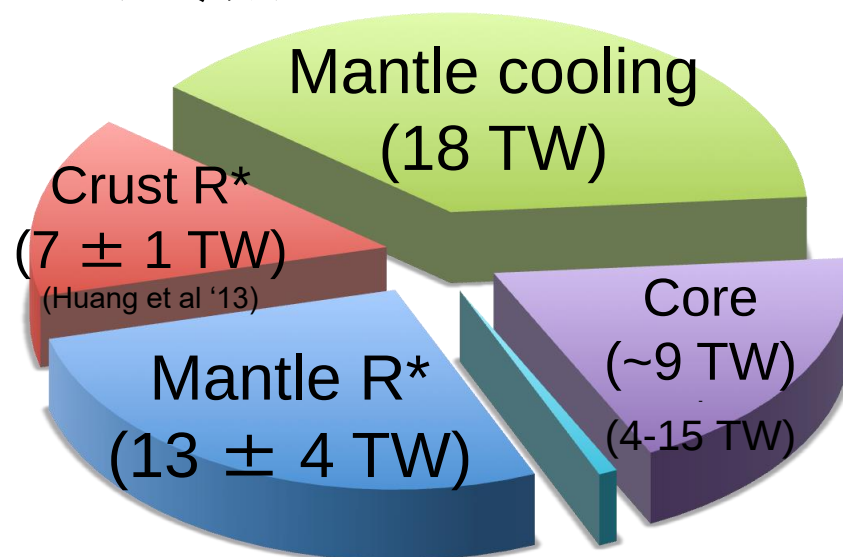
地幔热演化历史：
地幔温度变化率=>放射性热，核幔边界热交换，
地幔表面热散失

地球的热能是维持地球磁场的核心因素，是维持地球宜居环境关键，理解放射性热是一个重要任务

放射性热与地球热演化历史



地表热流 46 ± 3 TW

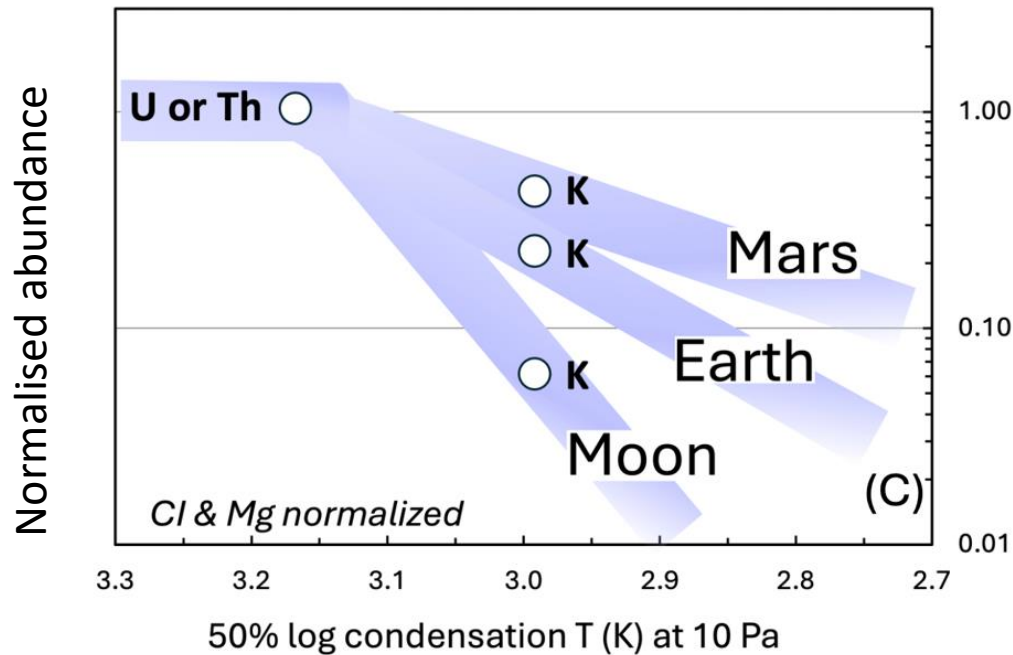


总放射性热 $R^* 20 \pm 4$ TW ?

锦屏地处川藏高原位置，对地壳最厚的世界屋脊的地球中微子最灵敏，对地壳结构的重要证明

- 最近江门实验报道一个偏全放射性的地球，

放射性热与地球挥发性元素曲线



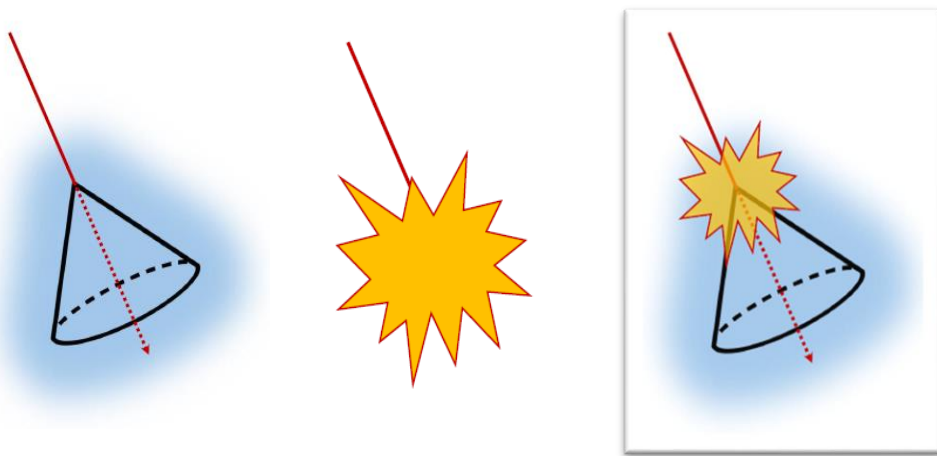
难熔元素：U，Th
(可以归一化到CI陨石
以及太阳的元素丰度)

挥发性元素：K
丰度小于CI陨石，并且
各个太阳系内的行星丰
度不同

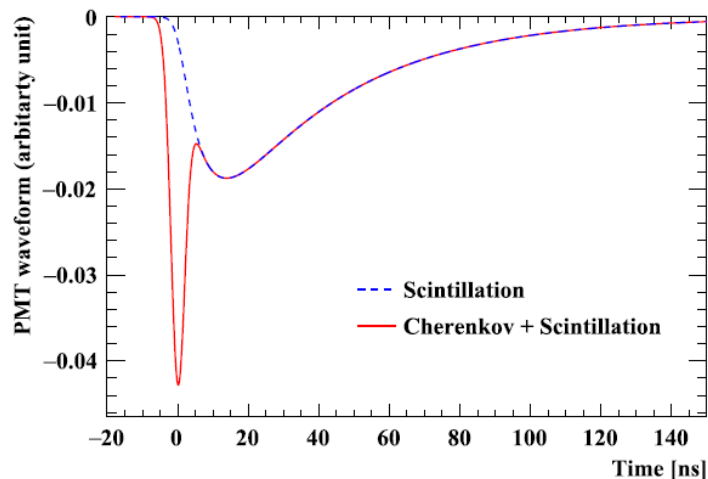
U，Th和K中微子为产热元素的主体
K中微子低于IBD探测过程阈值

在锦屏有可能首个完成地球K中微子的探测

切伦科夫液体闪烁体

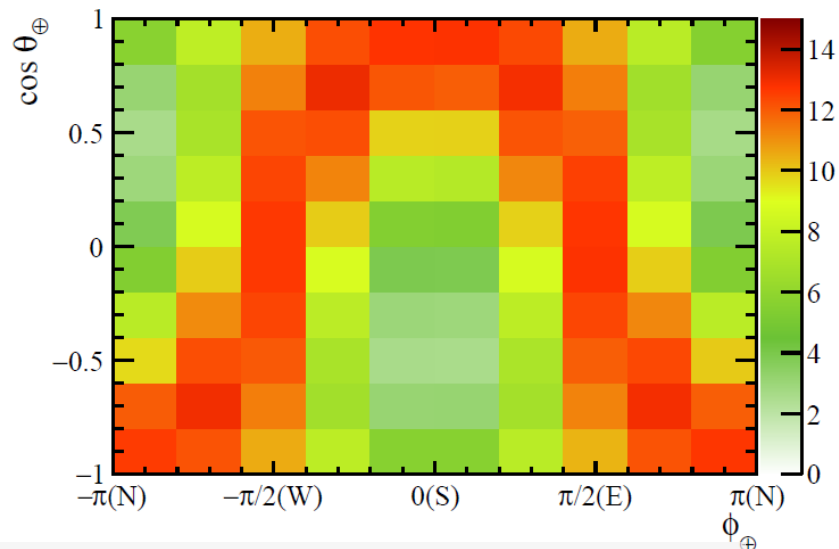
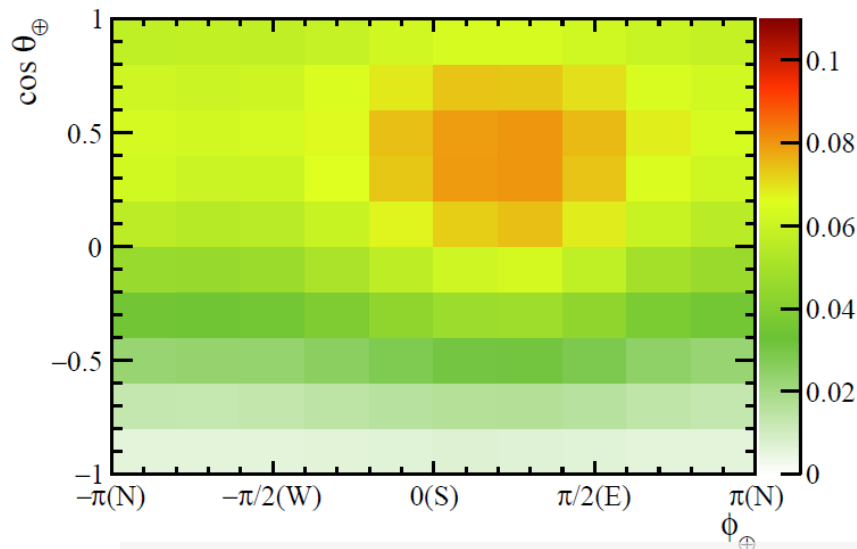


1. 区分切伦科夫光
2. 同时实现能量和方向重建
3. 粒子鉴别



我们的早期工作已被同行实验引用：
Borexino (PRL)
and SNO+ (PRD)

切伦科夫液体闪烁体

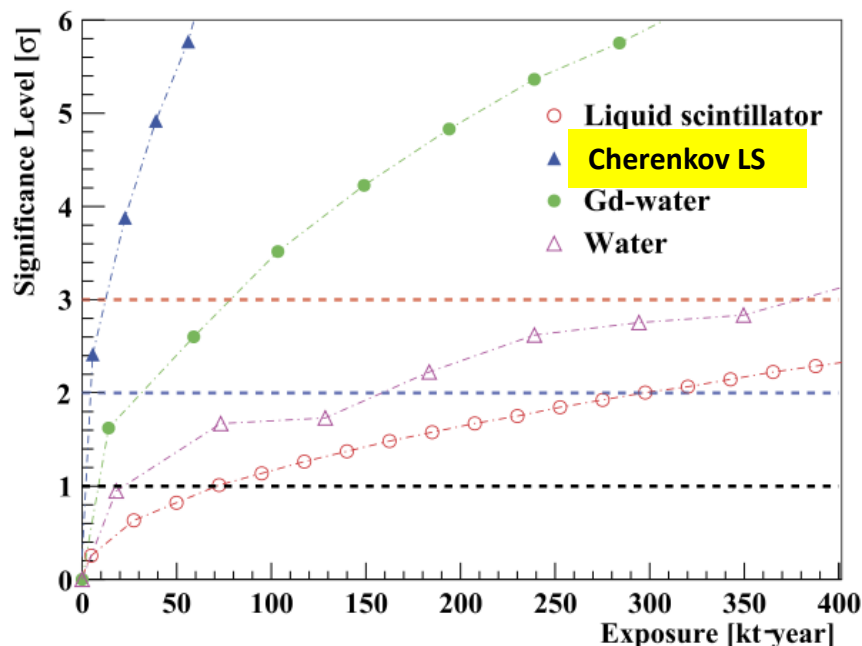
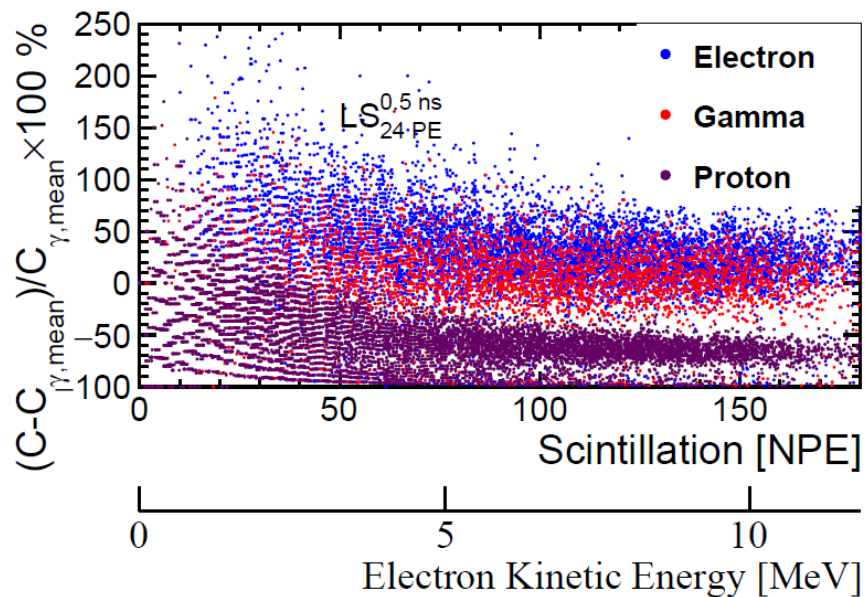


切伦科夫闪烁体：

- 可以测量川藏地区的U，Th中微子，验证地壳模型
- 同时利用方向性信息，可以鉴别太阳中微子本底
- 由此可以利用 (ν_e, e) 弹性散射探测K40地球中微子

未来可能是一项变革性成果

新型液闪对超新星遗迹中微子

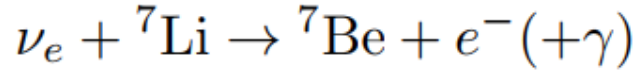


利用切伦科夫液体闪烁体

1. 粒子鉴别，出射电子鉴别，抑制核反冲等本底
2. 期待500吨探测器，10年内，可以有几个黄金事例

LiCl水溶液与太阳中微子探测

1. CC过程, ν_e : 测量中微子能量

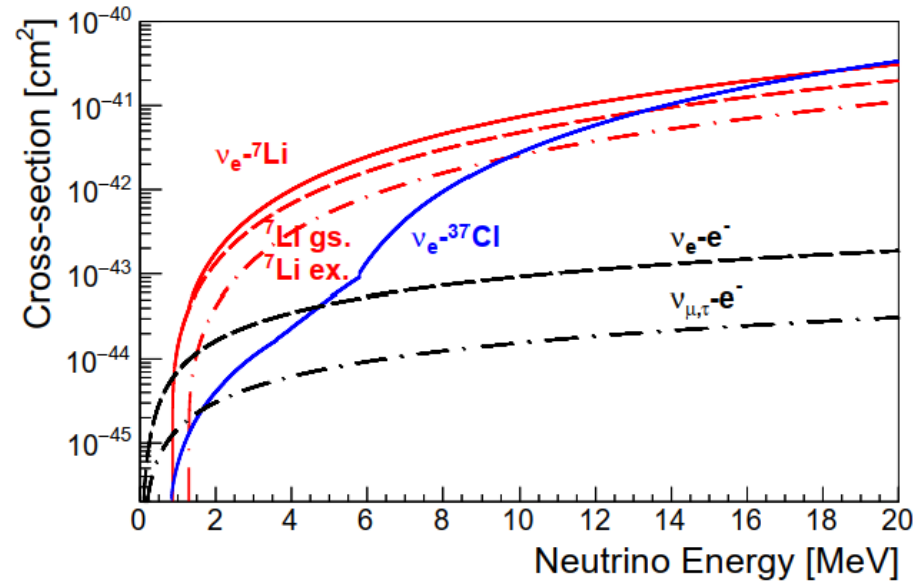


2. 高截面:

ν_e -Li7: 60 times of ν_e -e elastic
for solar B8 neutrinos

3. Li7天然丰度: 92%

4. 高水溶性: 80 g LiCl in 100 g
water

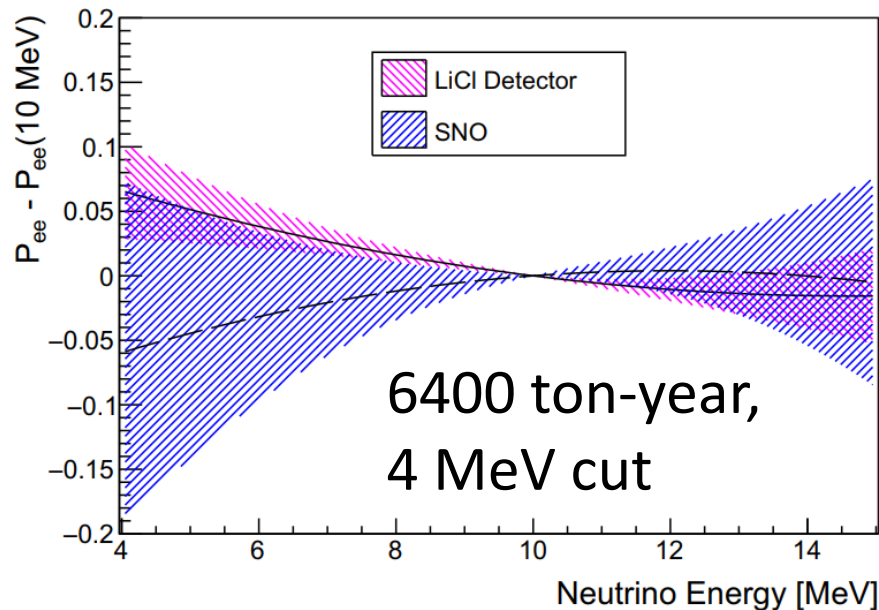


B8 Event rate/100 ton-year solution

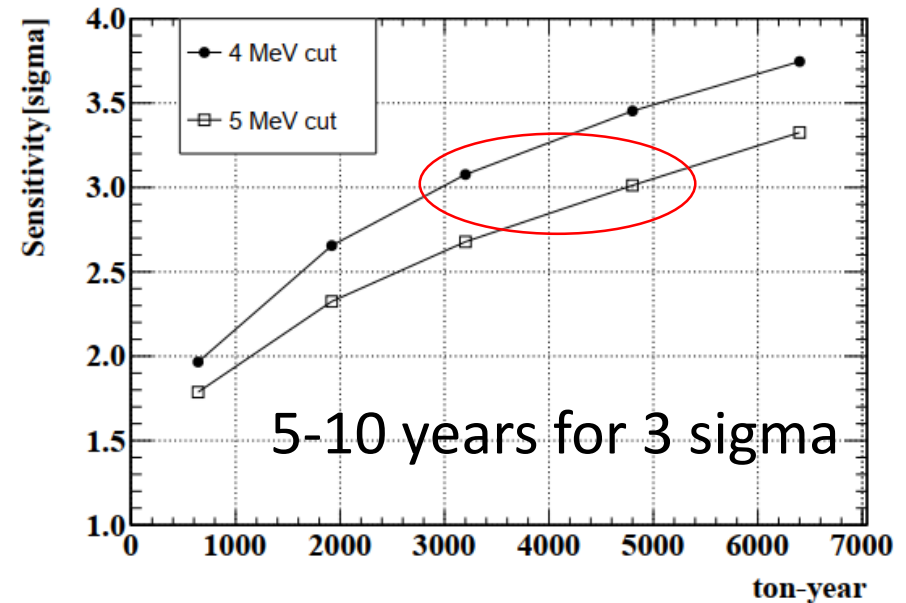
	⁷ Li	³⁷ Cl	All CC	e ⁻
Molarity (mol/L)	11	2.9	NA	610
Event rate (No Osci)	305	22.7	328	271
Event rate (Osci)	101	7.28	108	124
Event rate (Osci & >4 MeV)	94.5	7.24	102	48.0
Event rate (Osci & >5 MeV)	87.3	7.17	94.4	34.5

LiCl水溶液与太阳中微子探测

Solar neutrino survival
probability-average vs energy

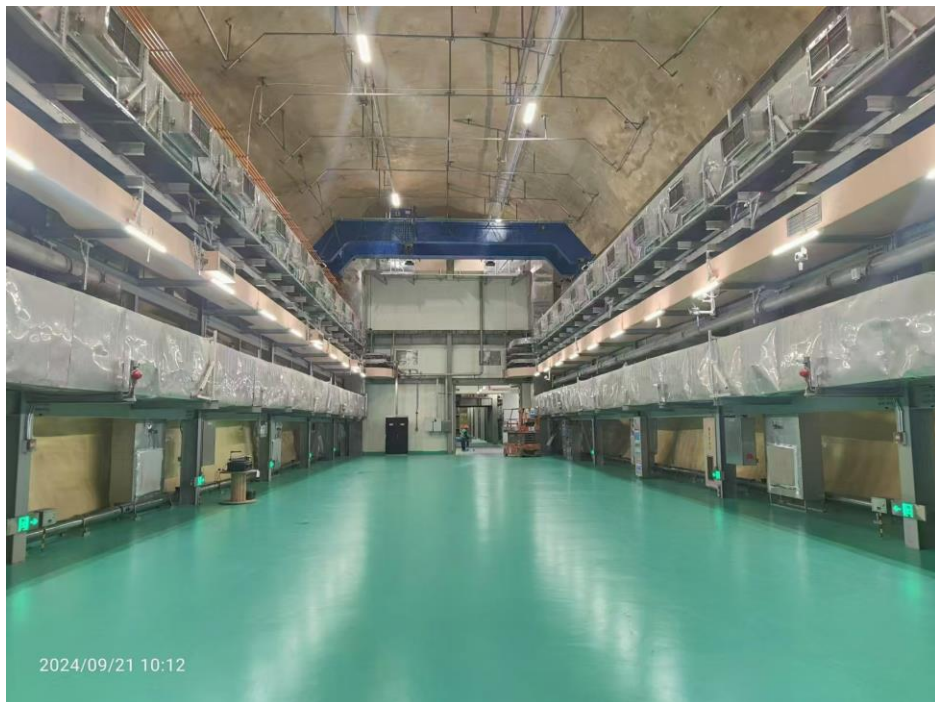


Upturn discovery sensitivity
versus exposure



Li7上的 ν_e CC过程对测量中微子的能量相关的物理过程
有出色的灵敏度，远超以往的超级神冈和SNO实验。

实验大厅，实验基坑



D2厅实验室情况

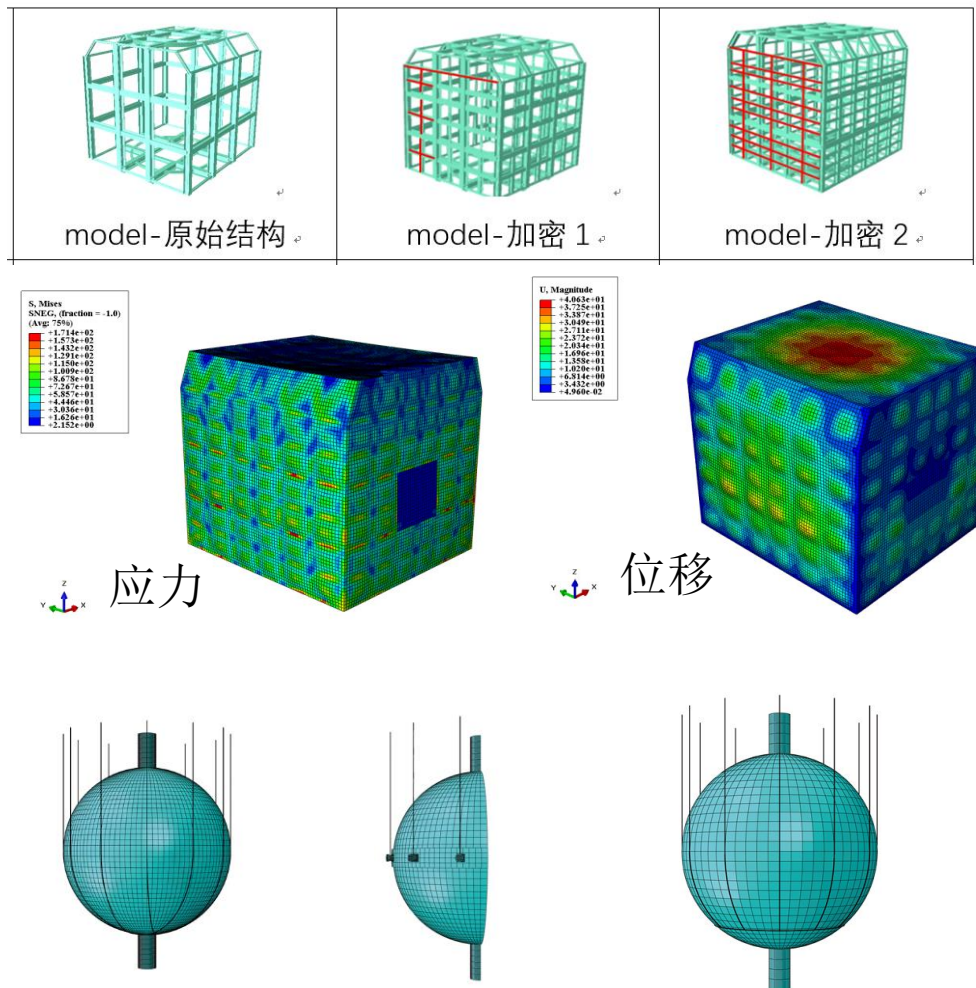


D2厅实验基坑完成

探测器结构设计

结构设计完毕

1. 多方案优化选择
2. 初步零件设计完毕
3. 初步安装流程设计完毕
4. 合作组结构评审完毕
5. 清华设计院的设计报告完成



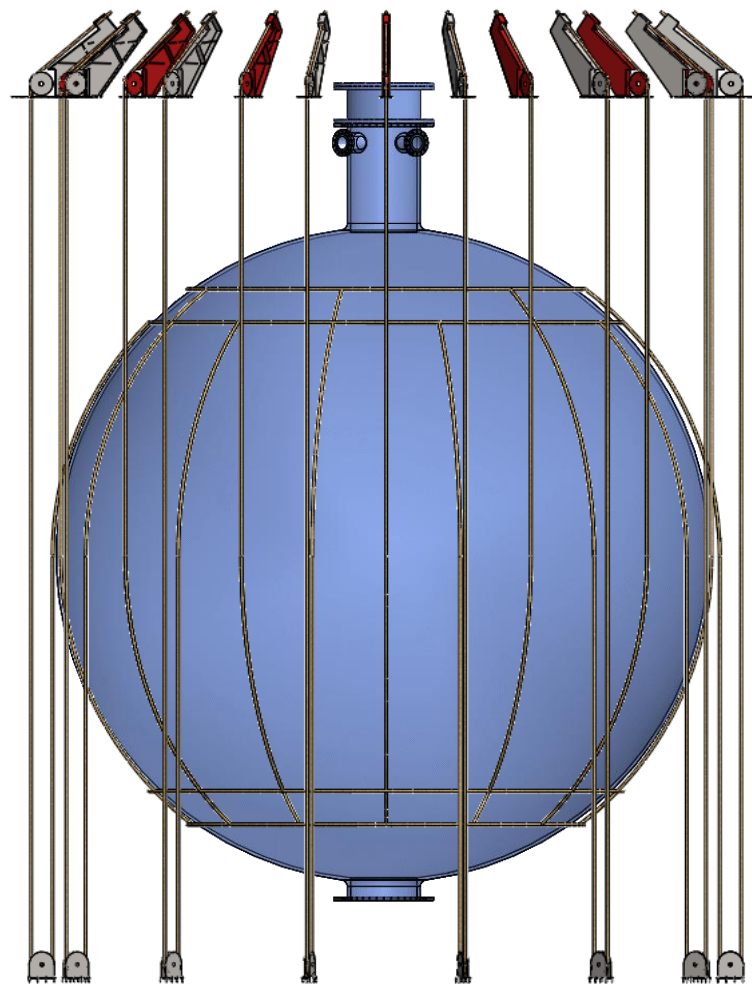
双相探测器容器

适合各种中微子探测
介质，一机多用

- 水相
- 油相
- 掺杂的液体闪烁体

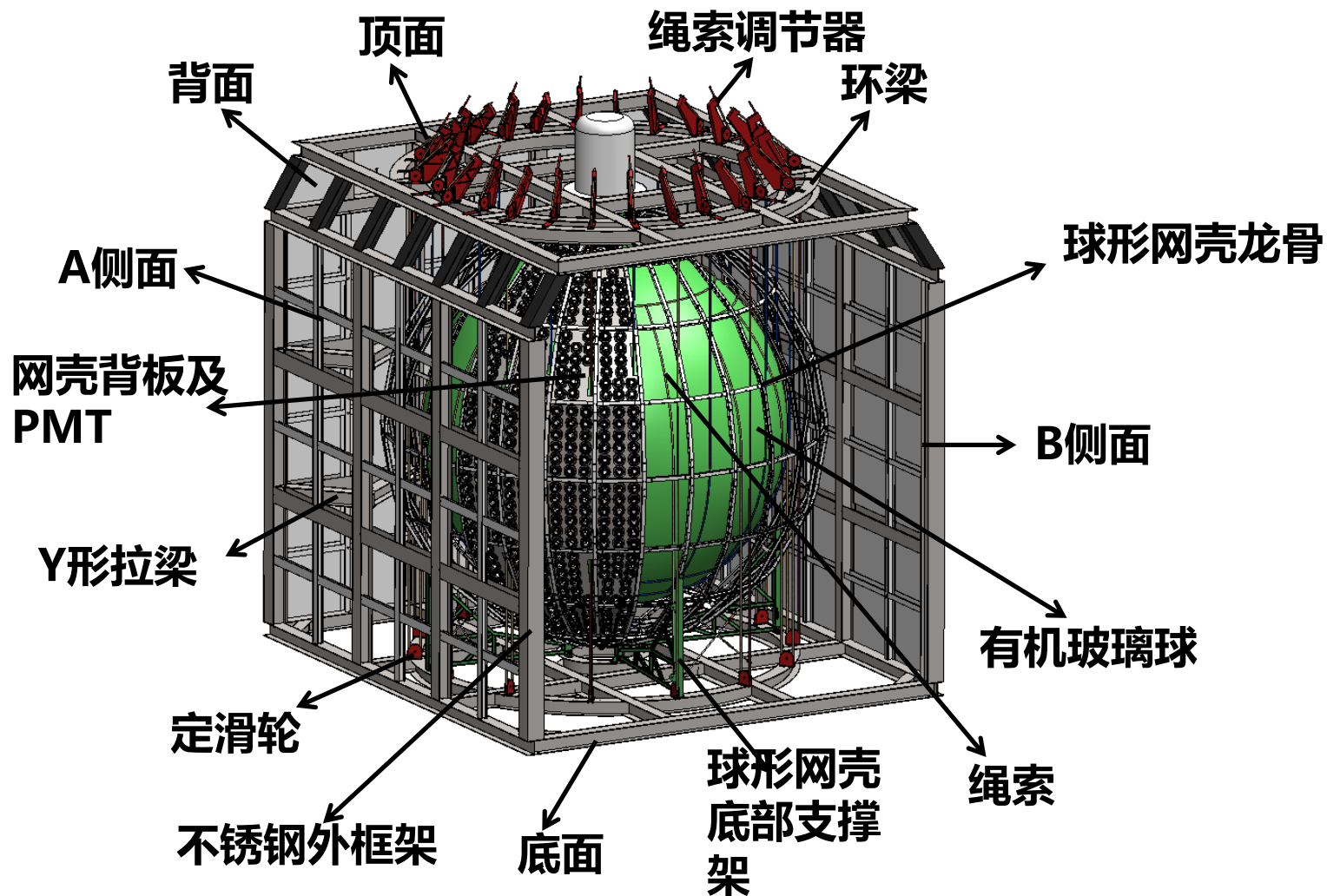
超高分子量聚乙烯 32mm

- 低本底、化学兼容
 - 抗拉 50 kN/8 mm
 - 低蠕变 0.5%/200天
 - 拉力监控，长度可调
- 申请多项专利技术

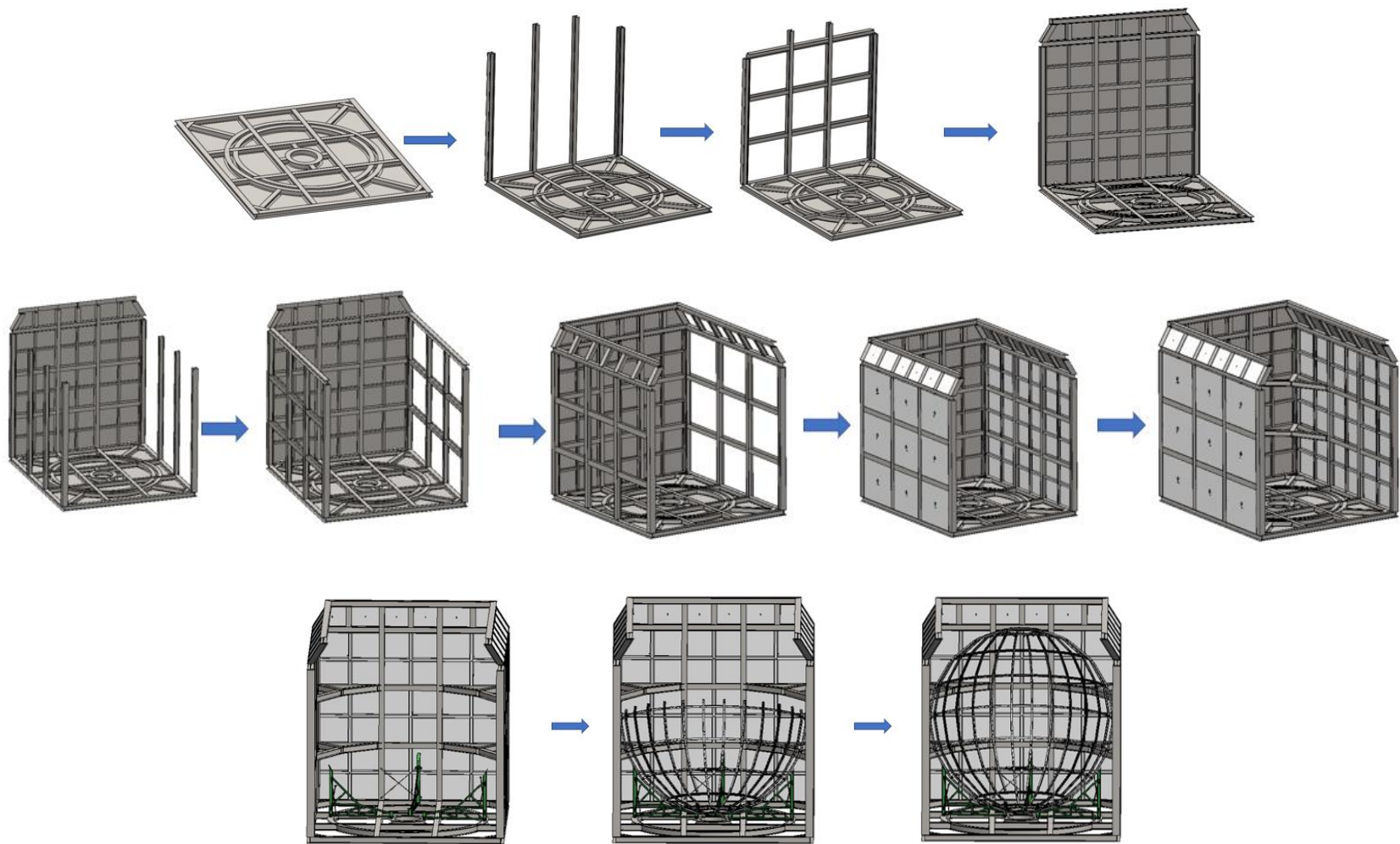


土木系，王元清老师团队

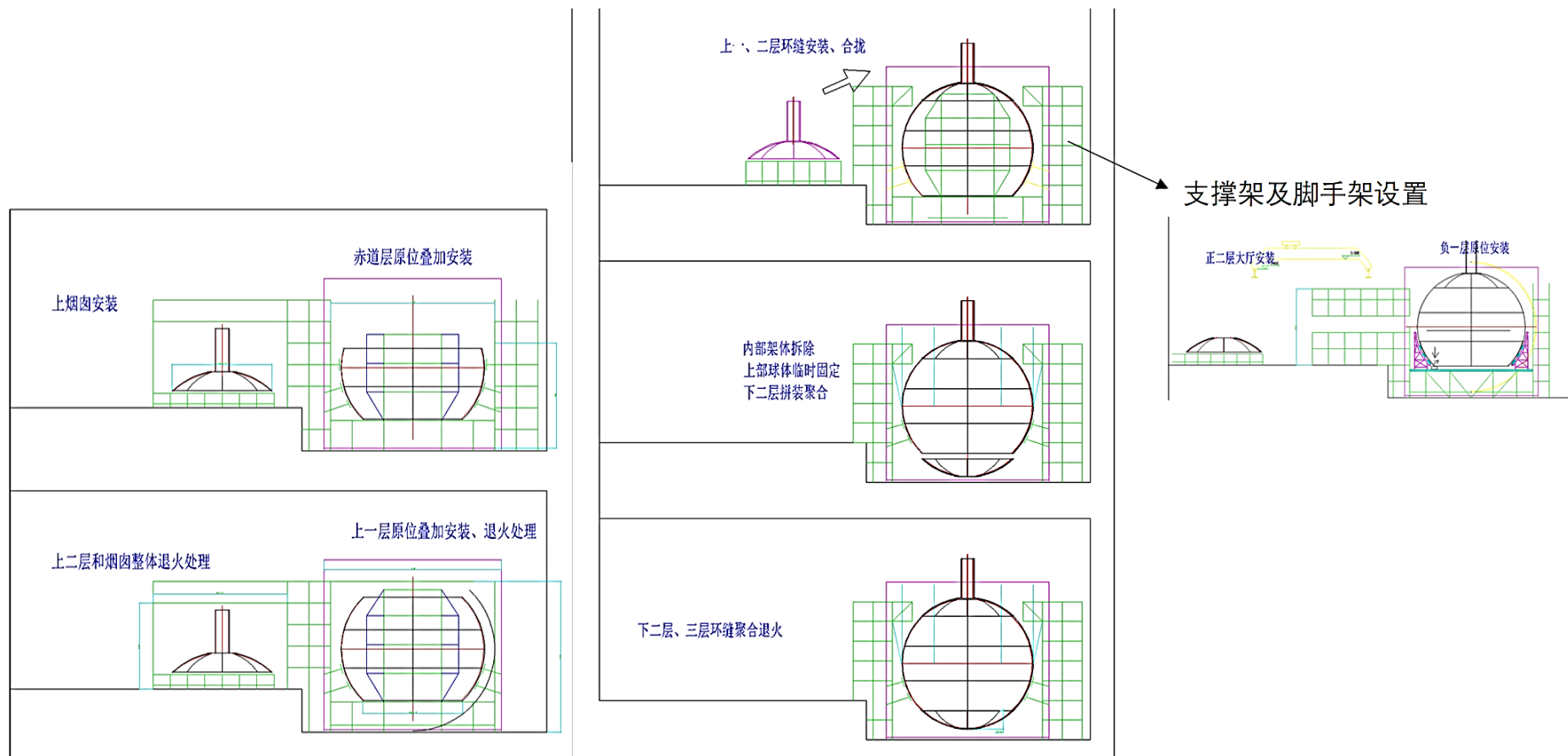
安装方案



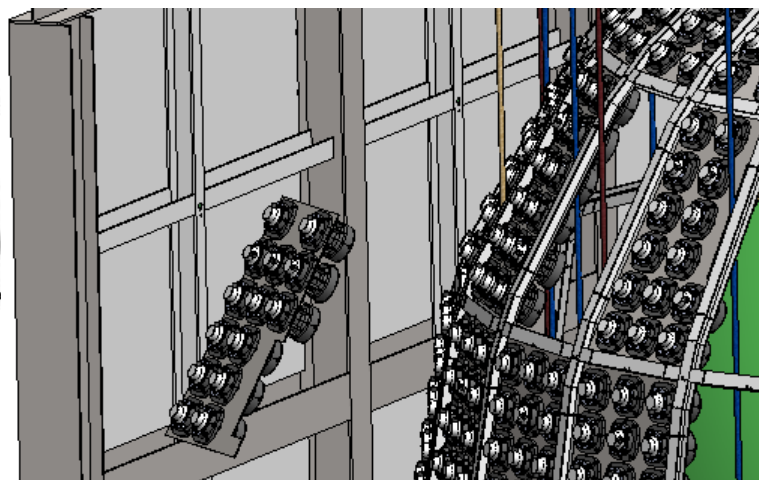
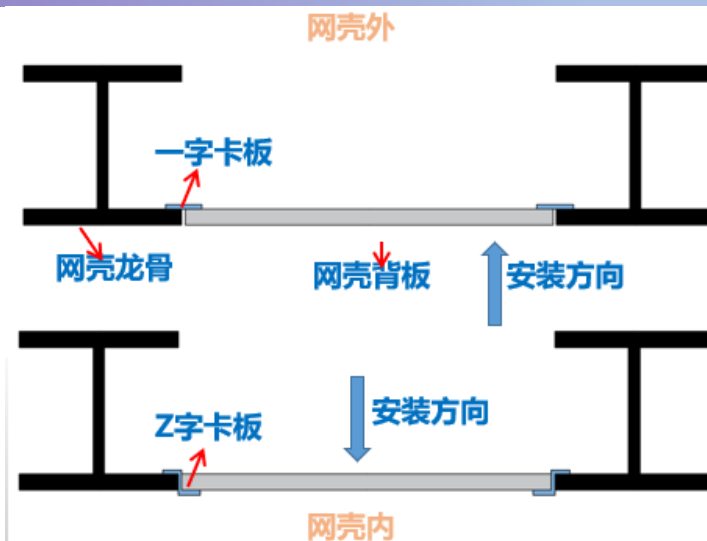
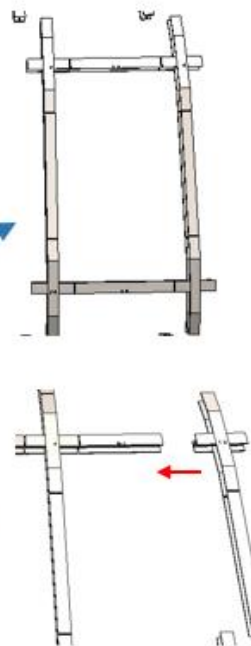
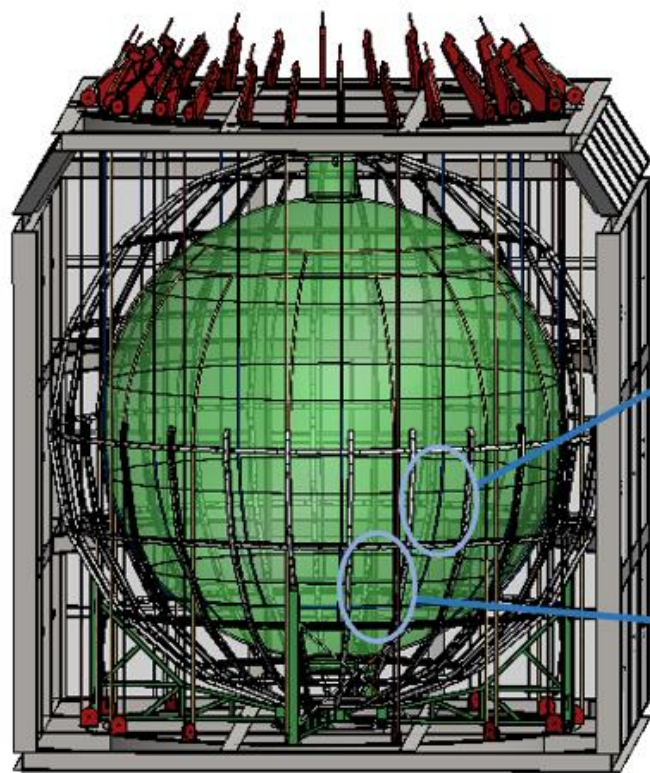
安装方案



安装方案



具体PMT的安装方案



绳索测试（超高分子量聚乙烯，1600D）

Kevlar纤维具有高强度、高模量、耐高温、耐酸碱性，但耐光性较差，易发生老化。日本帝人公司在Kevlar纤维基础上进行共聚改性得到了**Technora纤维**，具有优异的耐磨、耐疲劳和抗蠕变性能

Vectran纤维不仅具有与Kevlar纤维相当的力学性能，还具有较高的耐光、耐腐蚀和耐湿热性等，尤其抗蠕变性能优于其他三种纤维，但存在高应力易断裂的风险

HMPE纤维在密度、强度、模量、伸长率、冲击性和耐磨性等方面具有明显优势，但抗蠕变性差，熔点低、耐热耐高温性差



Kevlar纤维



Technora纤维



Vectran纤维

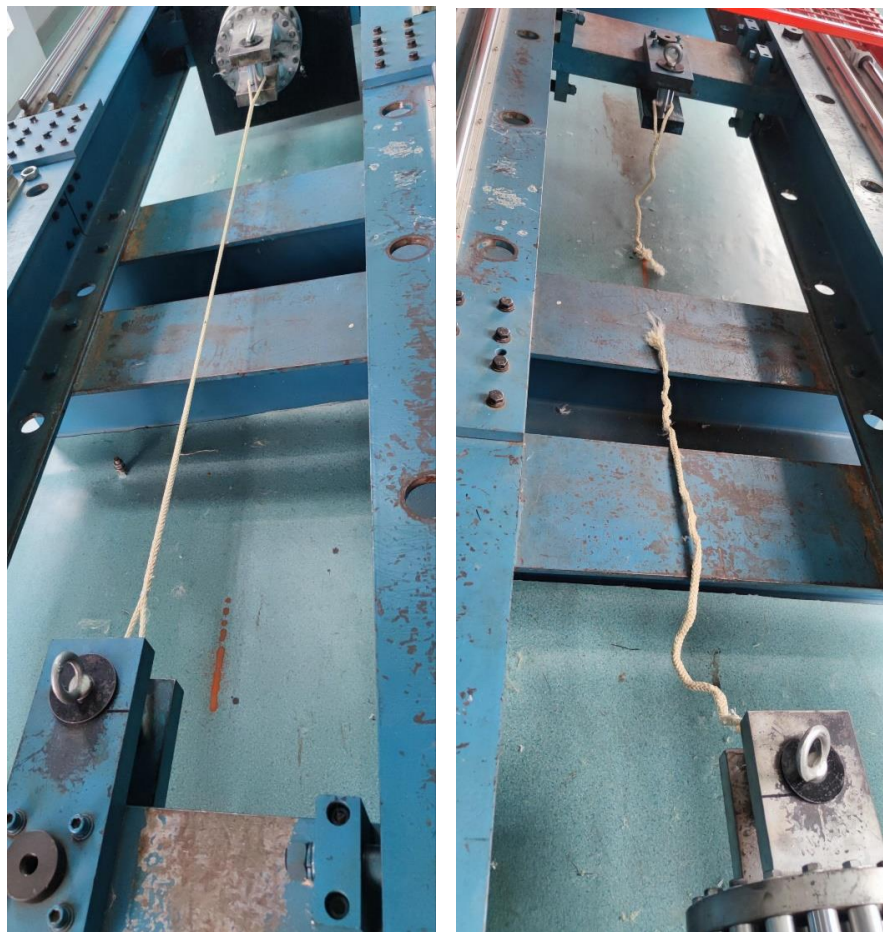


HMPE纤维

品种	密度g/cm3	抗拉强度GPa	拉伸模量GPa	断后伸长率%
Kevlar纤维	1.44	2.9	60	3.6
Technora纤维	1.39	3.4	72	4.6
Vectran纤维	1.41	3.3	73	4
HMPE纤维	0.97	3.0	95	3-4.5

绳索测试

破断试验



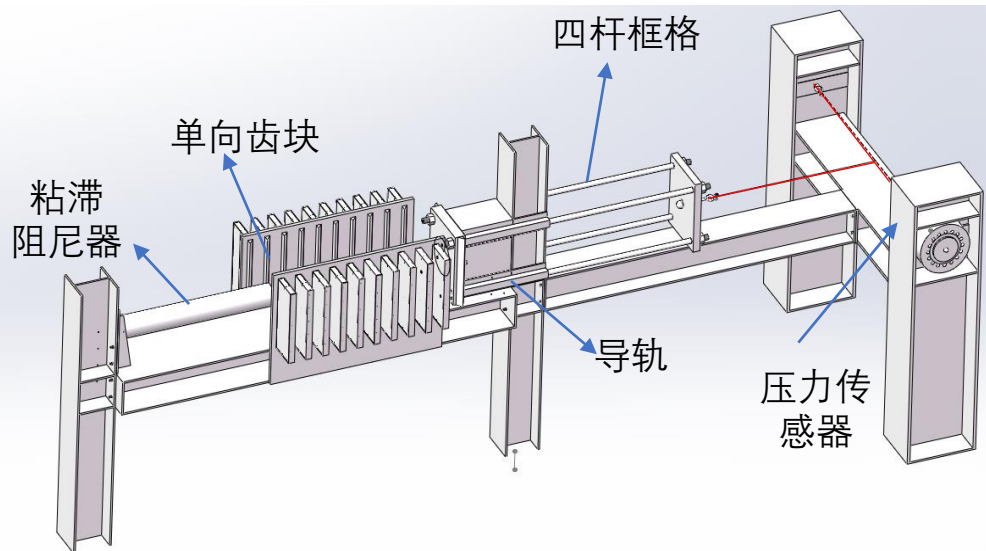
蠕变试验



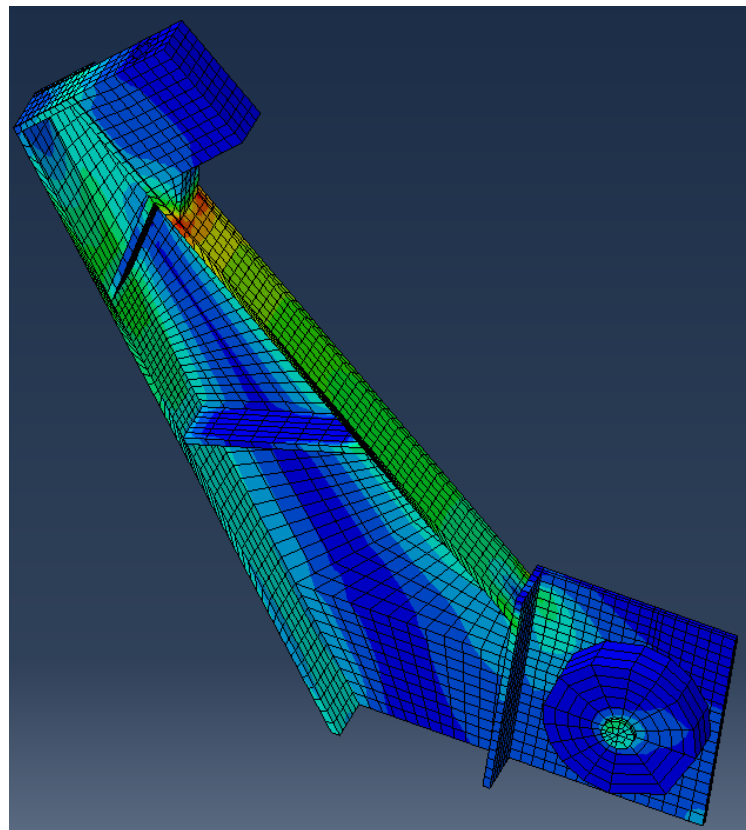
持续多年.....

绳索测试

纤维绳接头试验

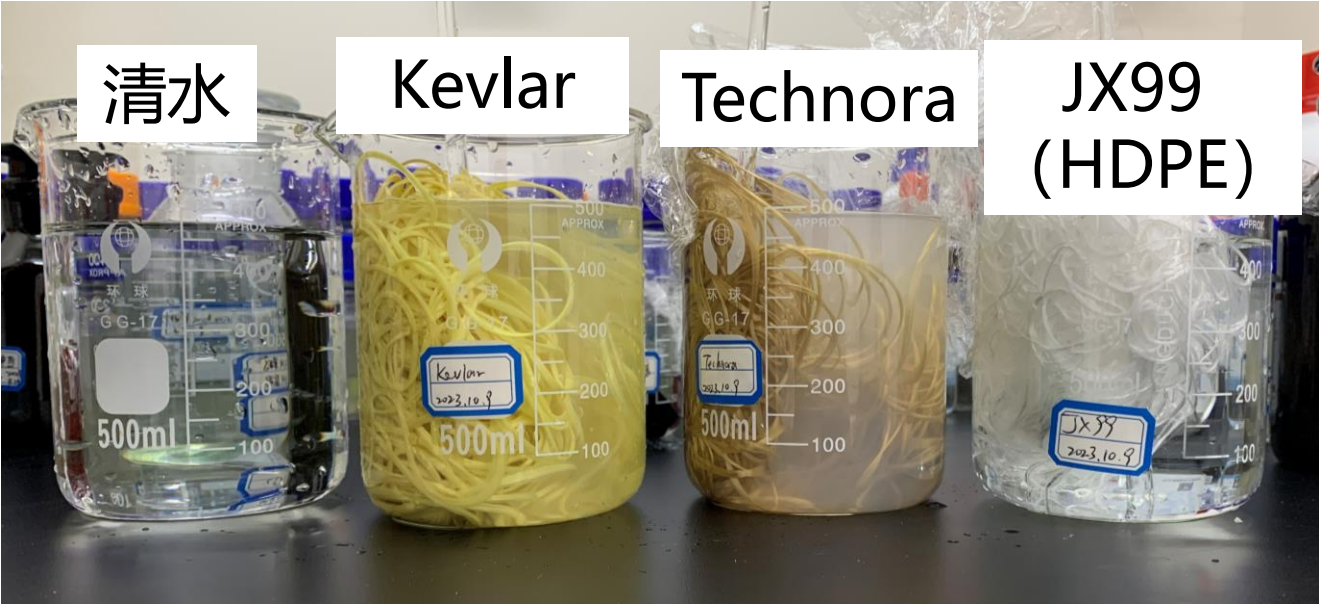


绳索张紧和调节装置



绳索测试

纤维绳
化学兼容性

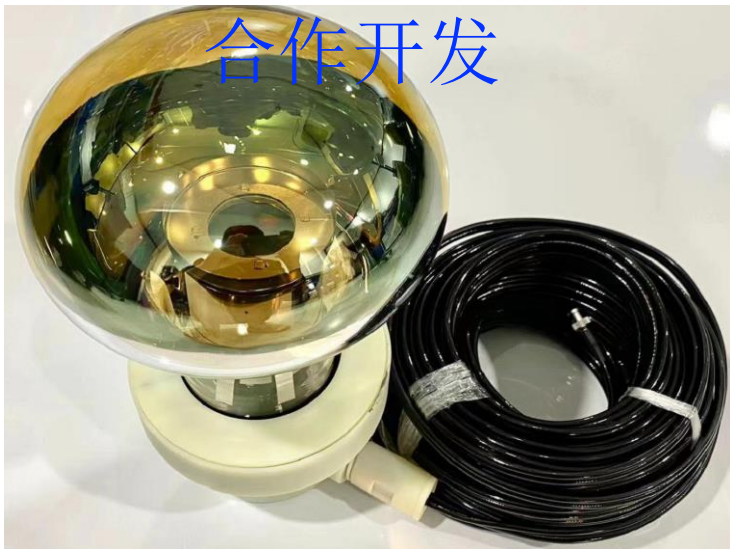


纤维绳HPGe低本底测量

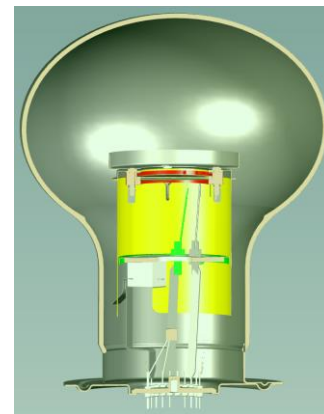
汇报时间	样品名称	210Pb (238U)	226Ra (238U)	214Pb (238U)	214Bi (238U)	228Ac-911keV (232Th)	228Ac-969keV (232Th)	208TI (232Th)	40K (nat K)	137Cs	60Co
2023. 6. 8	Vectran (白色绳索)	18. 47 ppb	3. 17 ppb	4. 41 ppb	2. 87 ppb	7. 82 ppb	19. 66 ppb	4. 3 ppb	154. 81 ppm	7. 27 mBq/kg	11. 10 mBq/kg
2023. 6. 16	Technora (黄色绳索)	46. 19 ppb	55. 55 ppb	35. 06 ppb	28. 31 ppb	71. 34 ppb	66. 65 ppb	20. 05 ppb	17. 83 ppm	8. 61 mBq/kg	14. 24 mBq/kg
2023. 10. 17	Vectran (白色绳索)	13. 03 ppb	7. 12 ppb	3. 78 ppb	4. 85 ppb	12. 72 ppb	17. 14 ppb	3. 41 ppb	44. 84 ppm	6. 47 mBq/kg	8. 74 mBq/kg
2023. 10. 22	Technora (黄色绳索)	37. 82 ppb	46. 43 ppb	11. 70 ppb	8. 19 ppb	48. 82 ppb	37. 19 ppb	24. 56 ppb	10. 78 ppm	16. 42 mBq/kg	15. 68 mBq/kg
2023. 10. 27	含硼聚乙烯	90. 23 ppb	77. 34 ppb	28. 26 ppb	21. 88 ppb	75. 66 ppb	52. 27 ppb	74. 70 ppb	32. 62 ppm	8. 02 mBq/kg	10. 95 mBq/kg
2023. 11. 05	亚克力	7. 28 ppb	4. 88 ppb	1. 35 ppb	1. 51 ppb	5. 2 ppb	6. 94 ppb	2. 03 ppb	1. 08 ppm	3. 32 mBq/kg	2. 66 mBq/kg
2023. 12. 10	JX99纤维	15. 57 ppb	11. 34 ppb	/	/	9. 1 ppb	7. 75 ppb	3. 78 ppb	8. 08 ppm	5. 04 mBq/kg	9. 60 mBq/kg
2023. 12. 10	TM32纤维	39. 84 ppb	19. 67 ppb	/	/	11. 1 ppb	8. 89 ppb	3. 18 ppb	14. 80 ppm	6. 97 mBq/kg	9. 48 mBq/kg
2024. 5. 30	C90聚乙烯	14. 19 ppb	23. 71 ppb	/	/	4. 63 ppb	/	3. 66 ppb	7. 64 ppm	4. 51 mBq/kg	7. 99 mBq/kg

最高性价比PMT

与北方夜视、高能所
合作开发



材料控制



结构设计

新型8寸MCP PMTs

1. 低本底 U、Th: $<1 \text{ Bq/kg}$,
K-40: $<2.4 \text{ Bq/kg}$
2. 高量子效率: 30%
3. 快速时间响应: $\text{TTS} < 1.8 \text{ ns}$

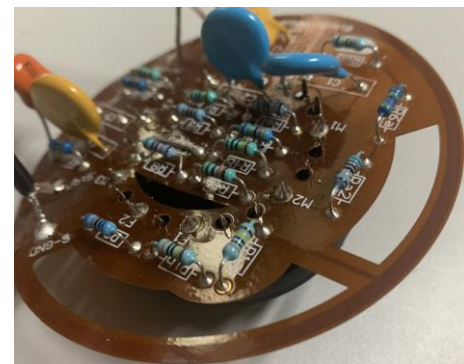
国防科技工业电离辐射一级计量站
核工业辐射计量测试中心
检测报告

证书编号: JC-A21-220916A204 第 3 页 共 3 页

检测结果

名称	编号	核素	比活度 Bq/kg	相对扩展不 确定度($k=2$)	参考日期
玻璃柱样品	H50-220916	^{226}Ra	$<0.33^*$	/	2022-09-16
		^{232}Th	$<0.18^*$	/	
		^{40}K	0.49	43%	

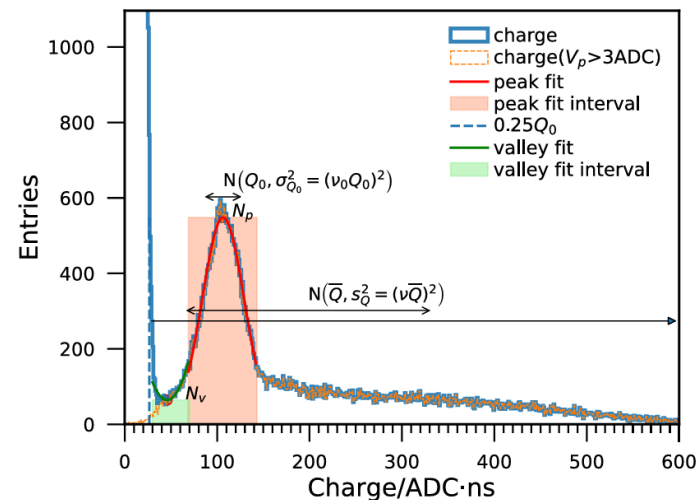
*注: 表中的比活度值为测量装置置信度为 95% 时的探测下限。
以下空白



分压器设计
线缆挑选

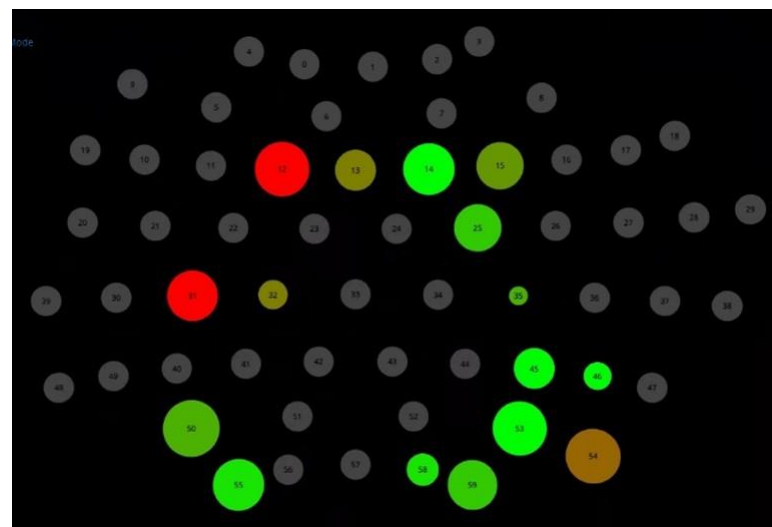
PMT性能测试（测试合格）

Parameters	Value	Criteria	Notes
$\bar{Q}/Q_0$	1.8 ± 0.1		Entire-sample to main-peak gain ratio
$\nu_0 = \sigma_{Q_0}/Q_0$	0.25 ± 0.02		Peak resolution
$\nu = \sqrt{s_Q^2}/\bar{Q}$	0.69 ± 0.03		Sample resolution
N^{1e}/N^{hit}	0.59 ± 0.02		Main-peak fraction
P/V	5.9 ± 1.4	>5	Peak-to-valley ratio
t_r/ns	3.71 ± 0.15	<4	Rise time
t_f/ns	15.6 ± 1.8	<20	Fall time
$\sigma_{\text{SER}}/\text{ns}$	1.63 ± 0.06		Shape parameters of SER
$\tau_{\text{SER}}/\text{ns}$	7.2 ± 1.1		
TTS/ns	1.73 ± 0.08	<1.8	Transit time spread
DCR/kHz	5.8 ± 1.6	~5	Dark count rate
P_{pre}	$1\text{E}-6 \pm 6\text{E}-6$	<0.001	Pre-pulse probability
P_{after}	0.009 ± 0.005	<0.048	After-pulse probability
ϵ^0	1.71 ± 0.06	>1.6	Relative PDE



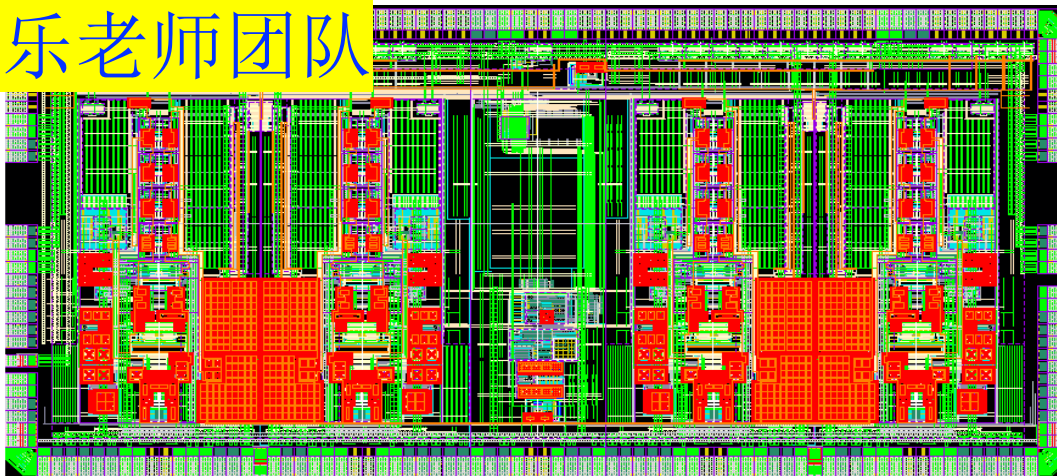
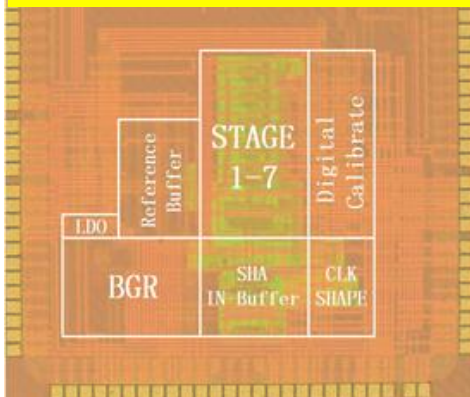
1. 量子效率
2. 单光电子分辨率
3. 跃迁时间分辨率
4. 暗噪声计数率
5. 单光电子响应
(长尾特性)

60只PMT，一吨原型机测试



研究创新性：先进芯片 国产

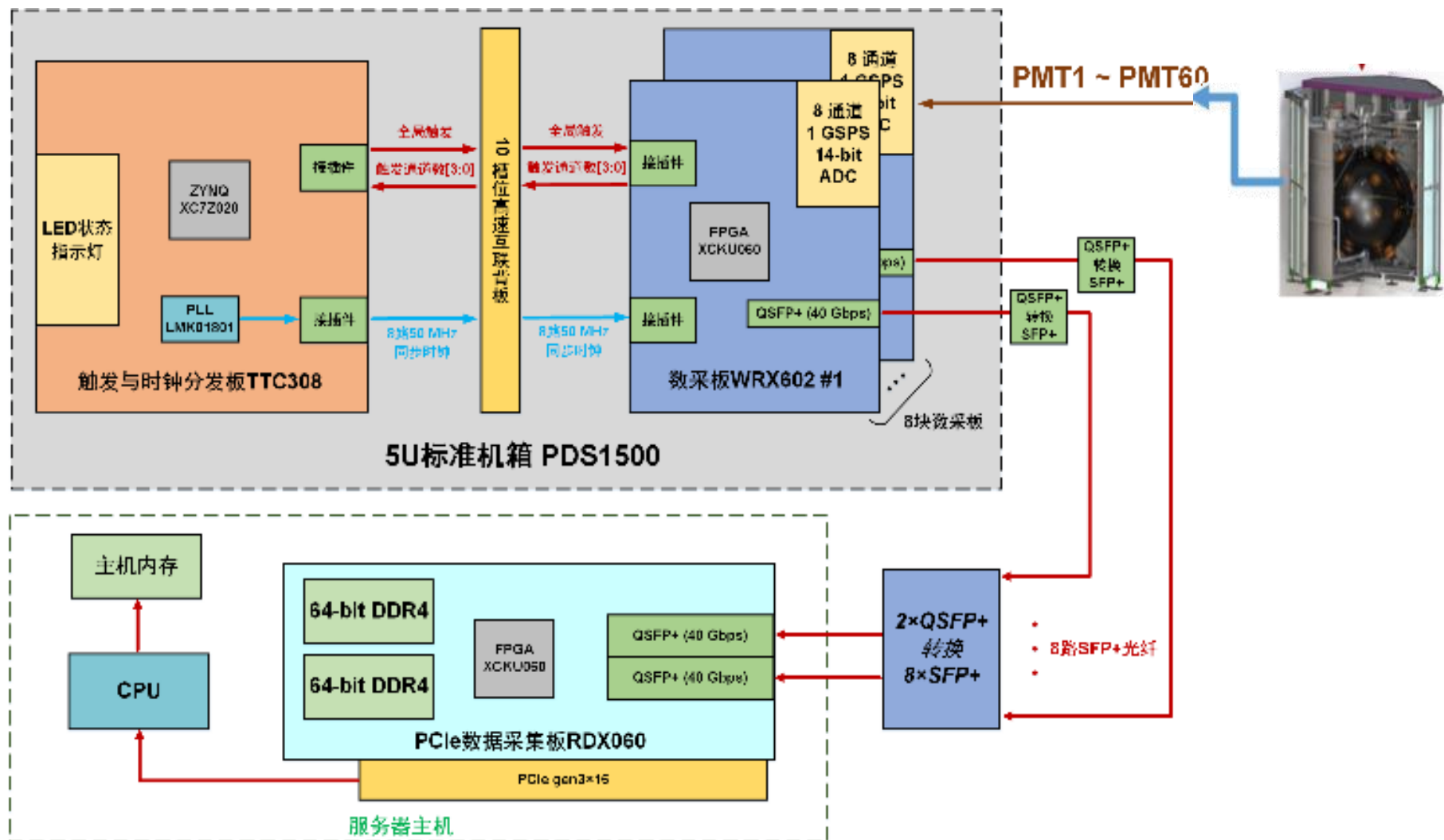
微电子所，李福乐老师团队



高速PMT波形读出芯片： 350 mW, 12 bit, 1 GSps
(低功耗、高精度、高采样率)

指标项	课题目标	实测值
分辨率	12bit	12bit
采样率	1Gsps	1Gsps
功耗	350mW/ch	<300mW/ch
ENOB		10bit
无杂散动态范围		71dBc

60路电子学在1吨原型机测试



60路测试

数据采集卡

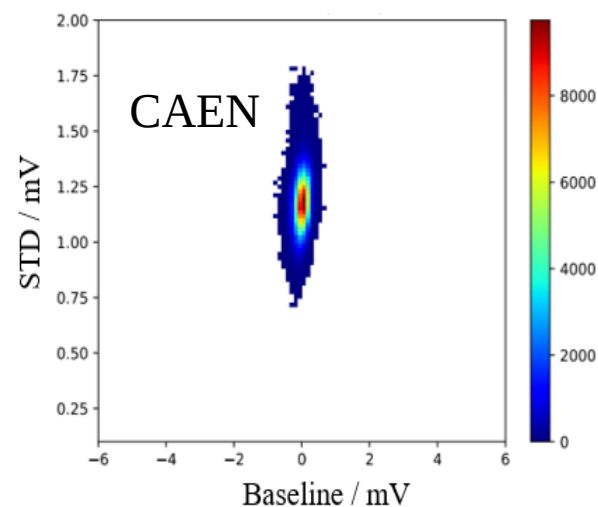
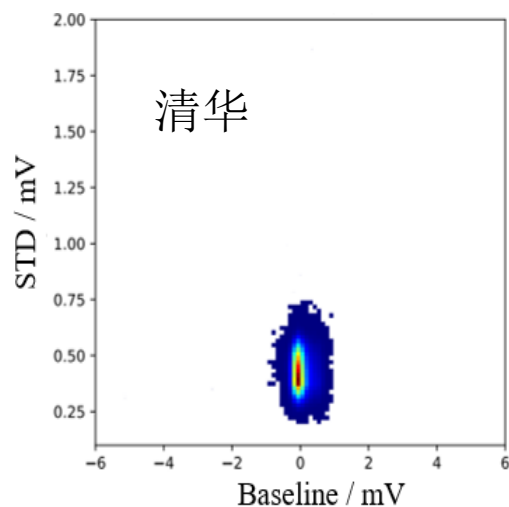


数据读出卡

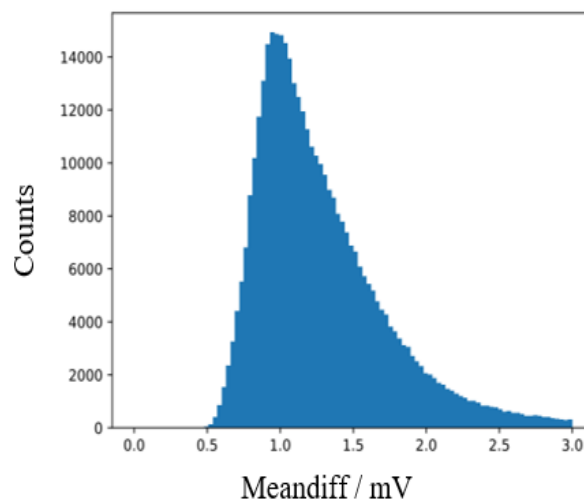
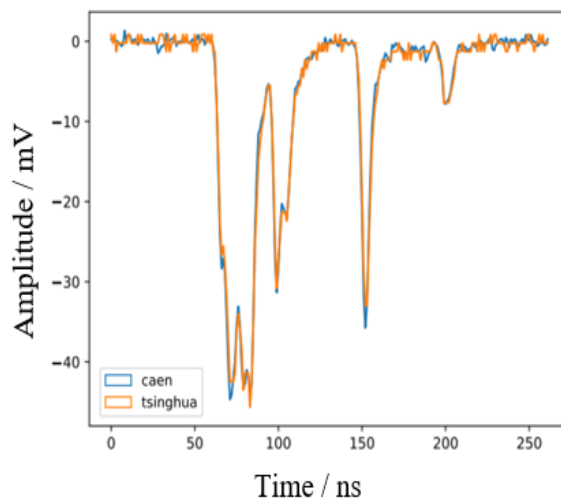


60路测试1吨原型机测试

基线抖动情况
更小

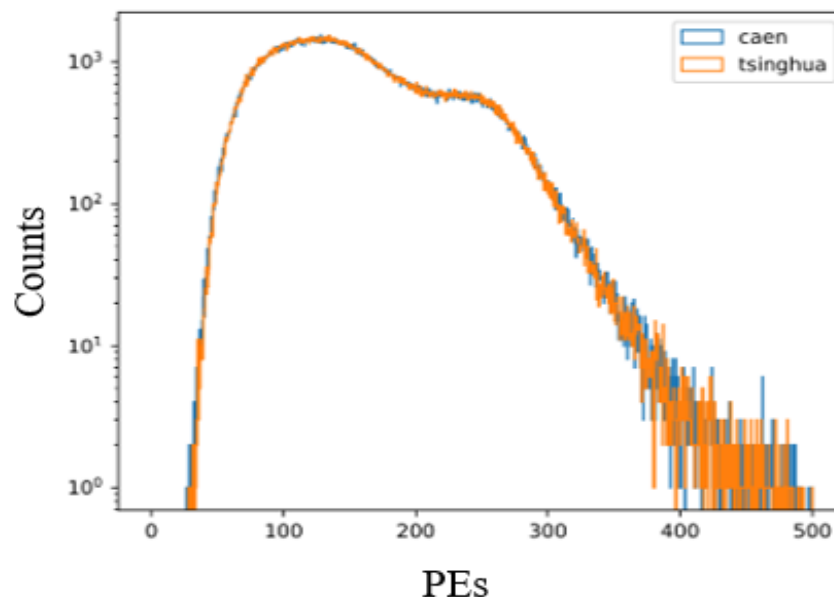


清华和
CAEN波形
对比, 一致



重建精度

光电子谱对比结果：
一致

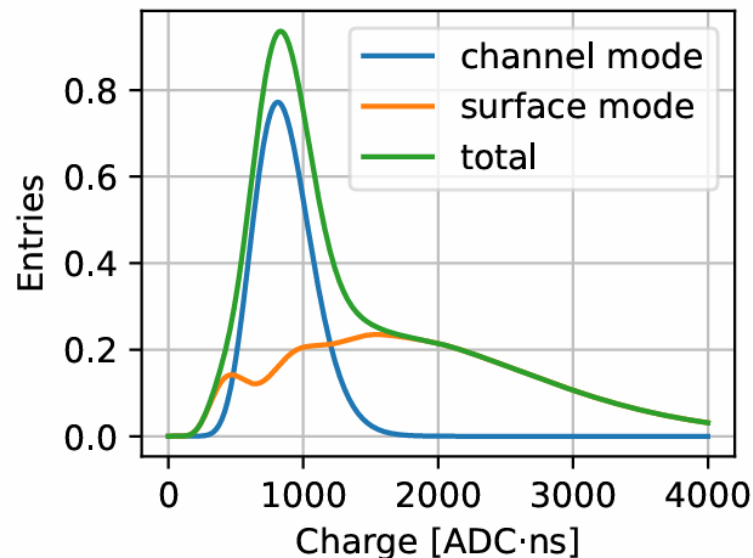
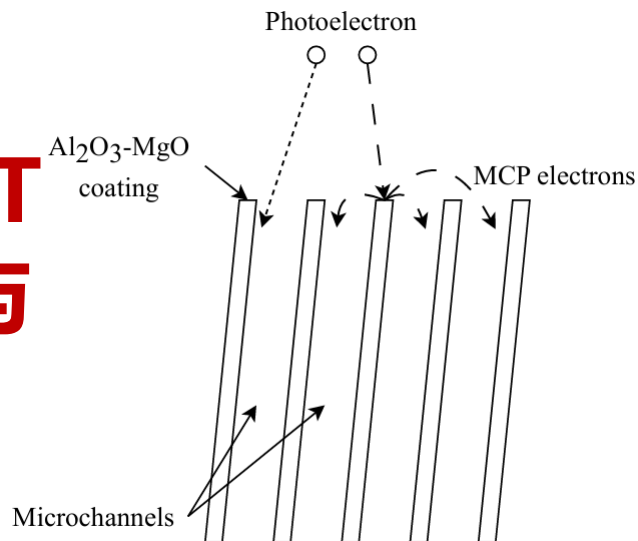


极限读写能力测试：
远超指标

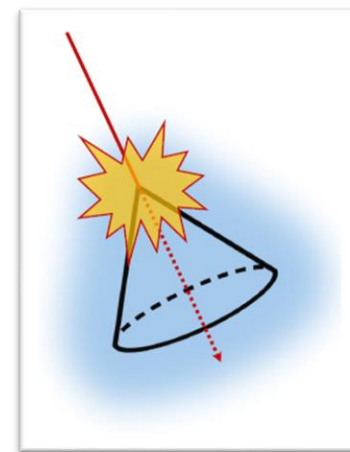
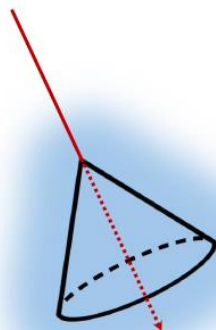
10分钟内共收集到9472个数据文件，每个文件大小为4 Gb。自研系统的极限触发率为193.5 kHz，相比于CAEN系统提升了三个数量级。

重建精度

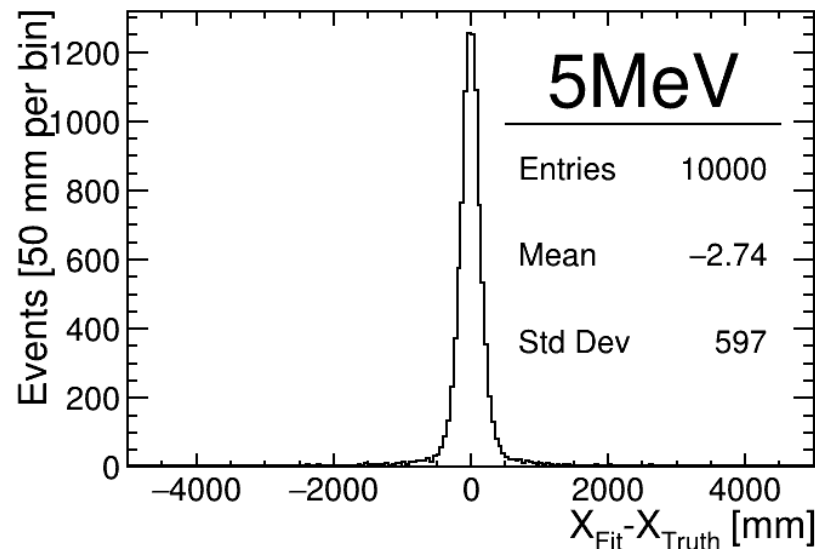
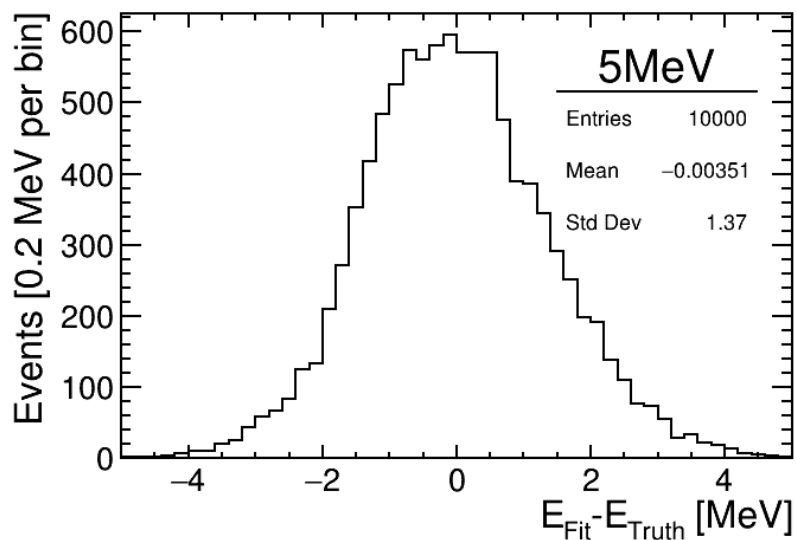
MCP-PMT 波形建模与 识别



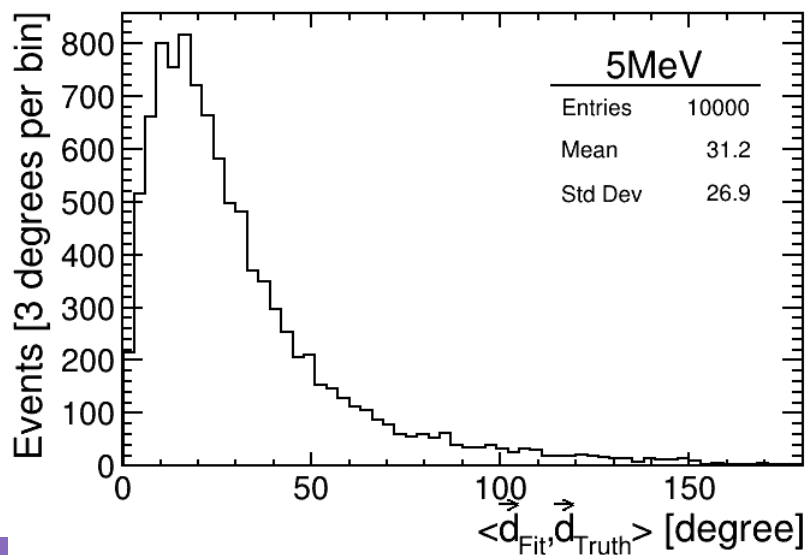
锦屏百吨探 测器建模与 重建算法



重建精度



锦屏百吨角
度分辨为
27度



总结

1. 实验室的地理优势
2. 探测器整体结构
3. 地球中微子（超新星遗迹中微子）与新型切伦科夫液体闪烁体
4. 太阳中微子与LiCl水溶液闪烁体
5. 探测器设计建设进展

欢迎您的问题和意见