

江门中微子实验探测器

何苗

中国科学院 高能物理研究所

2024年7月8日 开平 中微子夏令营

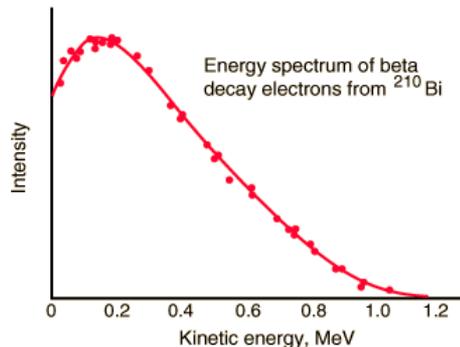
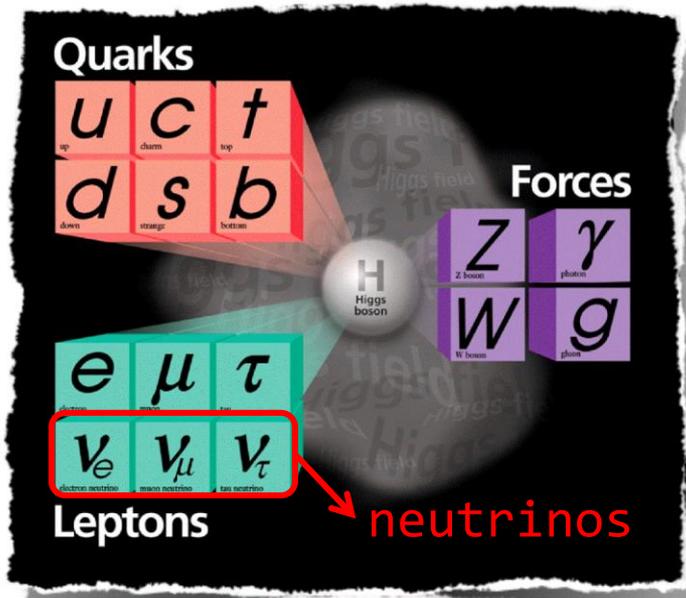


报告内容

- 中微子的探测
- 江门实验探测器
- 光电倍增管水下防爆

什么是中微子

标准模型中的基本粒子

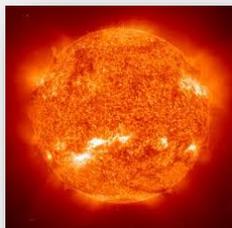


中性，
无质量，
相互作用弱

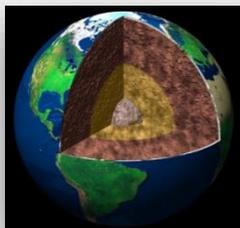
β衰变产生连续谱
玻尔：能动能量不守恒？

1930年泡利
提出中微子
存在的假定

天然中微子源



太阳



地球



大爆炸



超新星



大气

人工中微子源



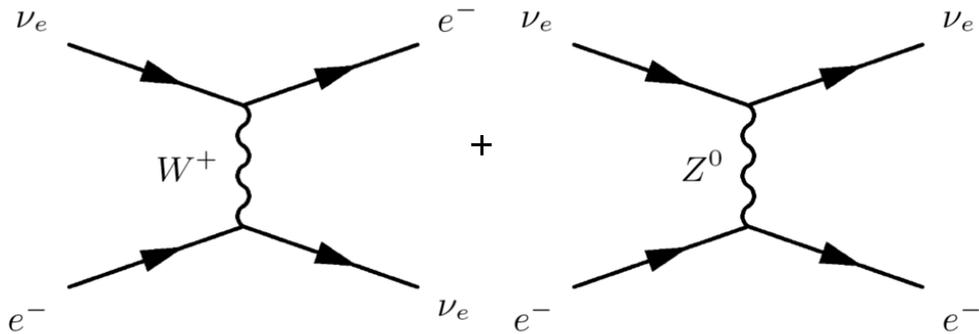
反应堆



加速器



中微子的相互作用和探测



Charge Current
(CC, 带电流)

Neutral Current
(NC, 中性流)

CC: 中微子味道鉴别

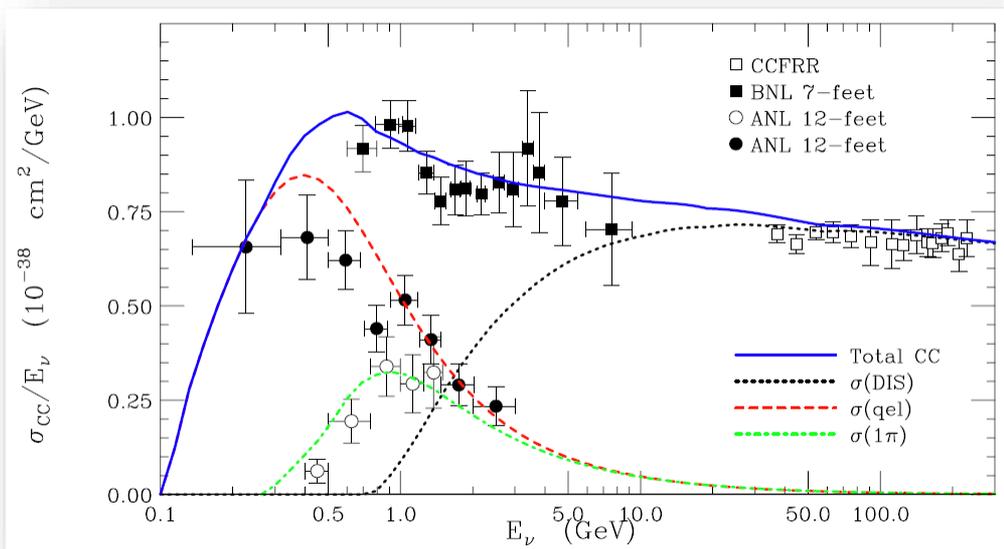
$$\nu_e (\bar{\nu}_e) + X \rightarrow e^- (e^+) + Y$$

$$\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) + X \rightarrow \mu^- (\mu^+) + Y$$

$$\nu_\tau (\bar{\nu}_\tau) + X \rightarrow \tau^- (\tau^+) + Y$$

NC: 中微子味道不敏感

$$\nu_x + X \rightarrow \nu_x + X$$



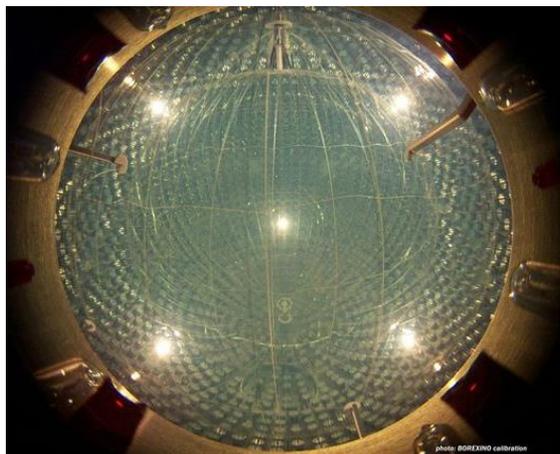
• 中微子相互作用很弱，
中微子探测需要

- 强中微子源：太阳、反应堆、加速器……
- 巨大的探测器：目前最大可到 km^3

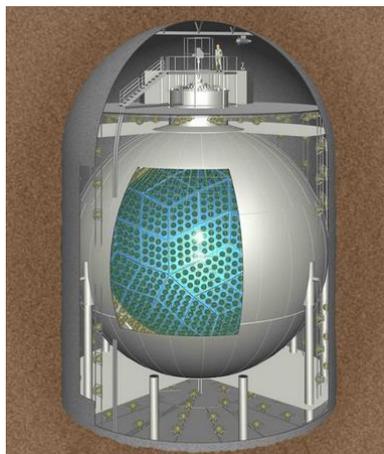


液体闪烁体探测器

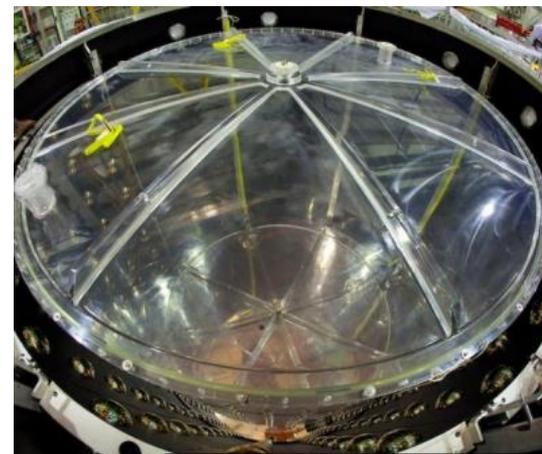
- 液体闪烁体的组成：溶剂、发光物质、波长位移剂
- 探测原理：带电粒子电离激发分子产生各向同性闪烁光，能量分辨率一般好于**10% @ 1MeV**
- 主要性能要求：高光产额、高透明度、低放射性本底
- 主要应用：反应堆中微子、地球中微子、太阳中微子和超新星中微子
- 代表实验：KamLAND、Borexino、大亚湾



Borexino
278吨



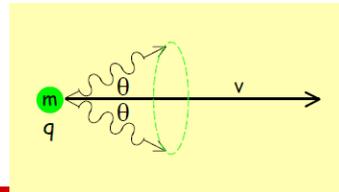
KamLAND
1000吨



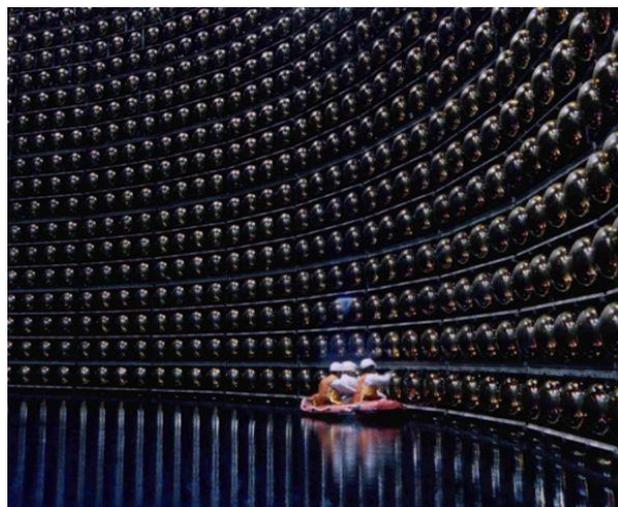
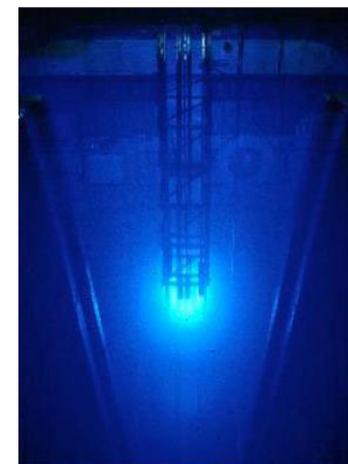
大亚湾
20吨×8



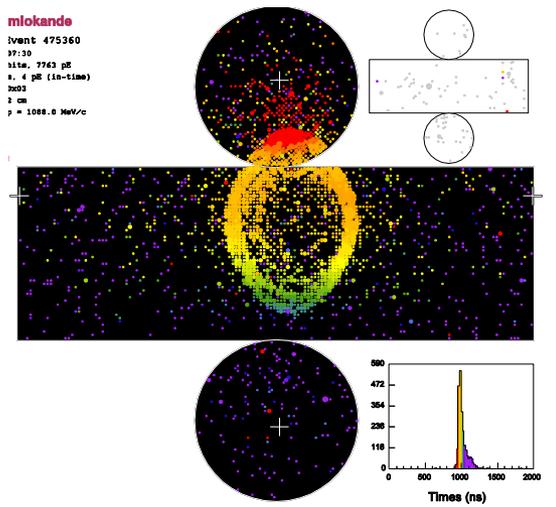
水切伦科夫探测器



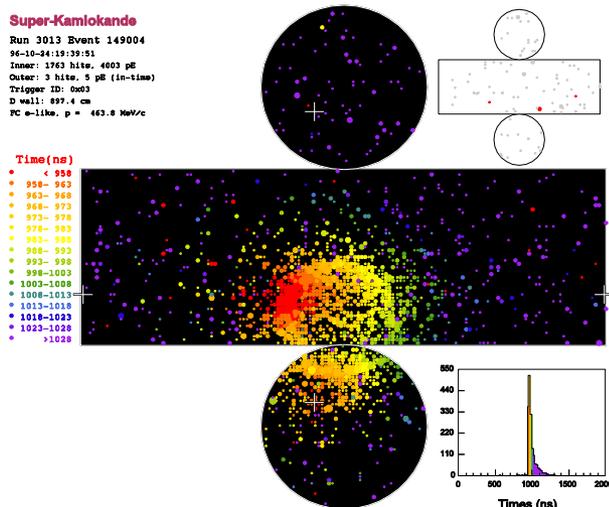
- 探测原理：带电粒子超过光在介质中的速度发出特定方向的切伦科夫光
- 具有很好的径迹重建和e/ μ 鉴别能力（电子鉴别效率**62%**， μ 子误判率**0.1%**， π^0 误判率**1%**）
- 主要应用：加速器中微子、大气中微子、高能部分的太阳中微子和超新星中微子
- 代表实验：SuperK、IceCube、KM3NeT



SuperK
5万吨



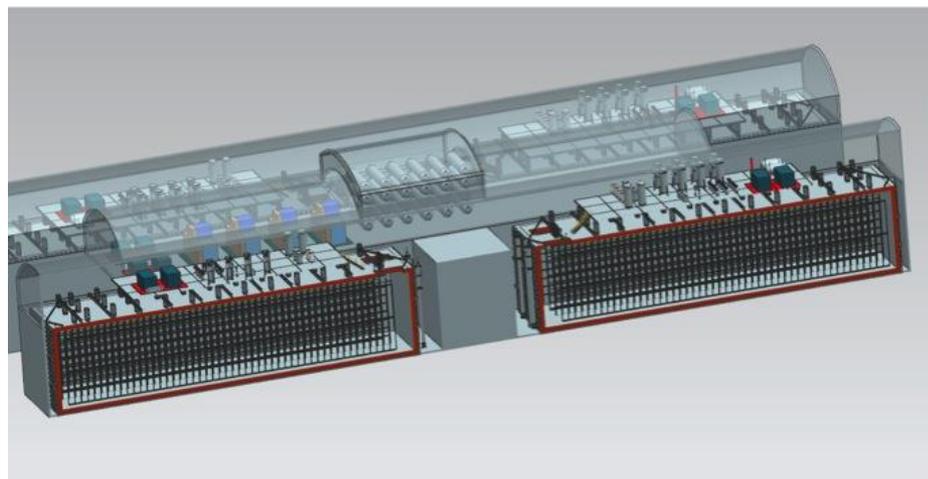
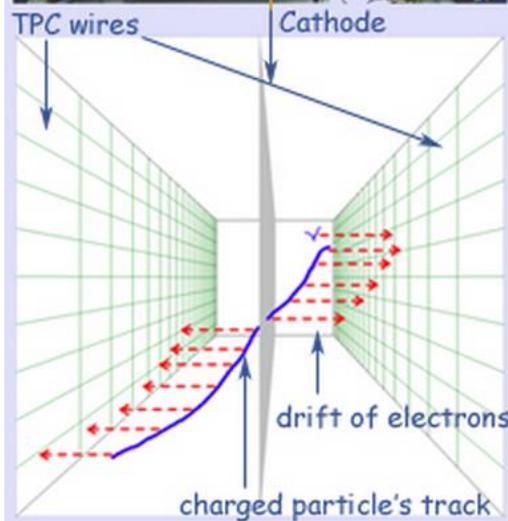
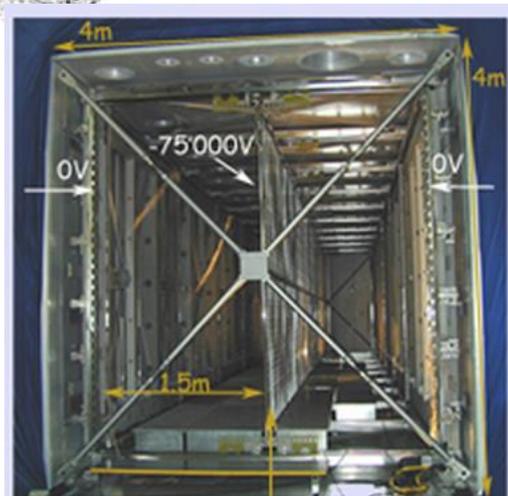
Single Cherenkov ring
muon-like event



Single Cherenkov ring
electron-like event

液氩探测器

- 探测原理：测量带电粒子电离产生的电子-离子对的漂移时间
- 电子鉴别效率70%-95%， μ 子误判率0.5%-2%， π^0 误判率0.4%-2%
- 主要应用：加速器中微子
- 代表实验：ICARUS、DUNE



ICARUS
600吨

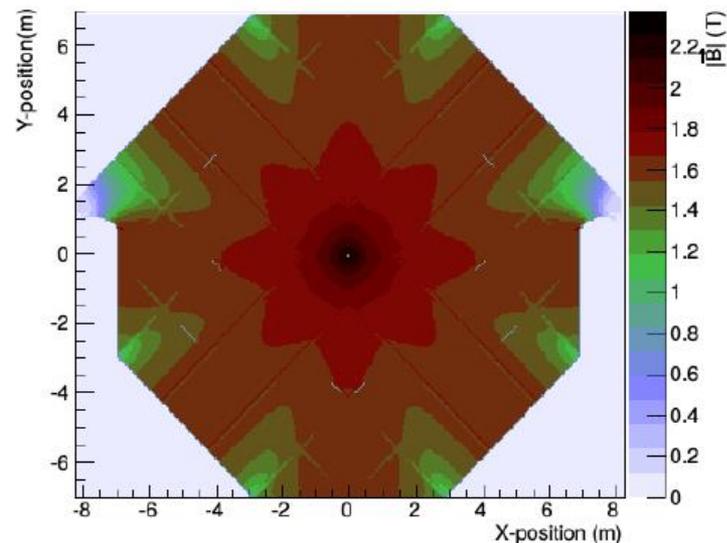
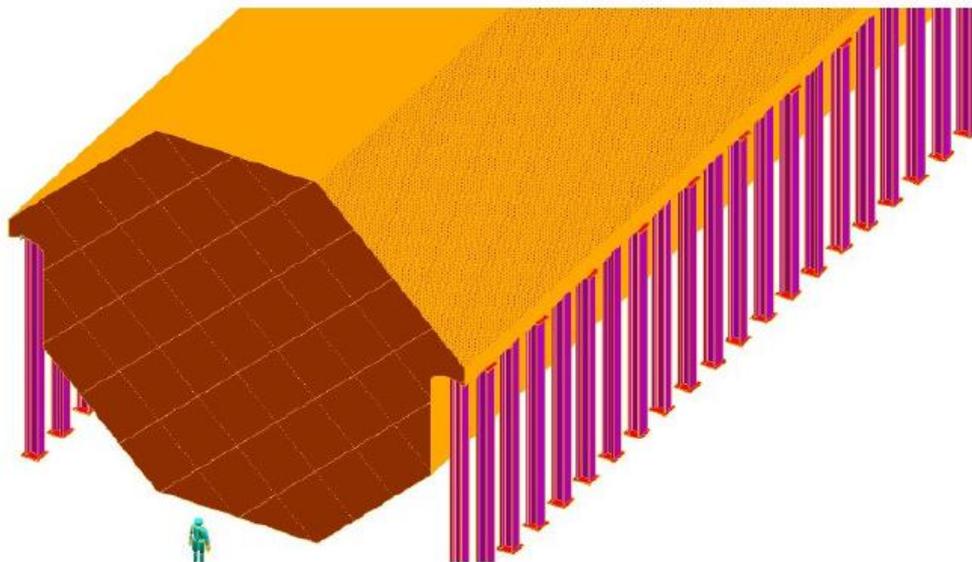
卡洛·鲁比亚
液氩探测器发明者

DUNE
1万吨×4



取样型探测器

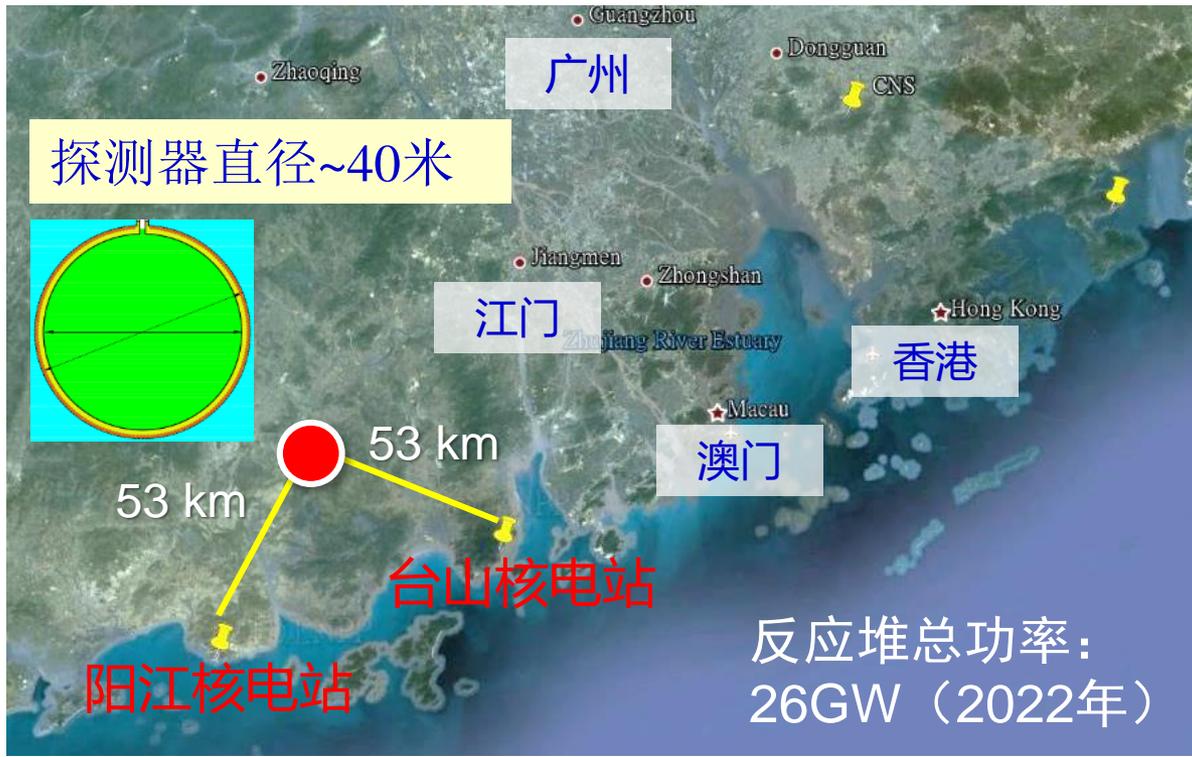
- 铁跟闪烁体（或RPC）交错排列，适用于高能中微子的探测，对 μ 中微子有极佳的探测能力
- 加磁场后可以区分正反电荷 \rightarrow 区分正反中微子
- 主要应用：高能 μ 衰变加速器中微子、大气中微子
- 代表实验：“中微子工厂”、INO



用于未来“中微子工厂”的取样型探测器及所加磁场

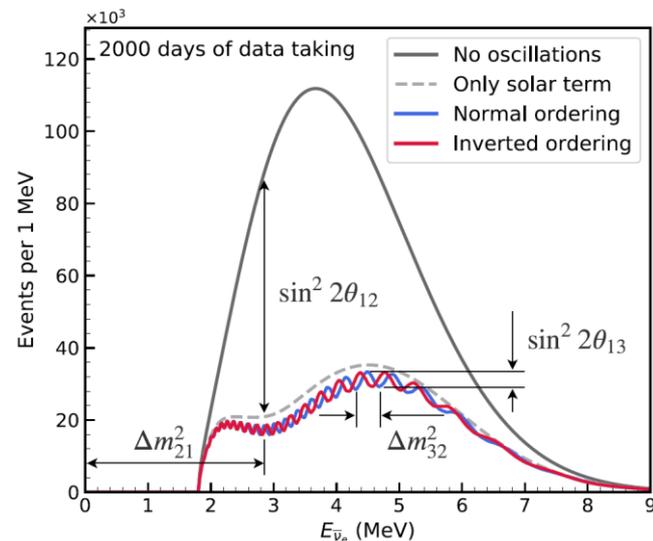
江门中微子实验 (JUNO)

- 中科院先导专项，2015年开始建设，预计2025年运行。
- 地下700米，2万吨液体闪烁体探测器（**国际同类最大，比KamLAND大20倍**），3%能量分辨率（**国际同类最好，比Borexino好近一倍**）



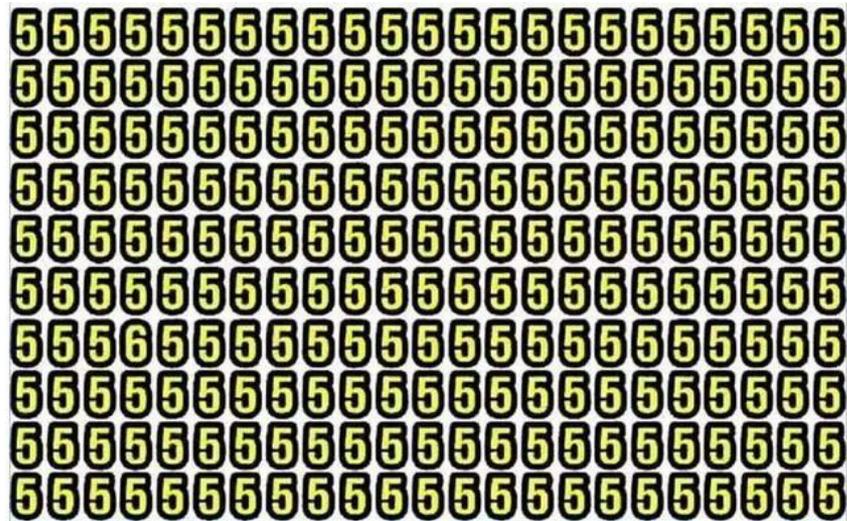
科学目标

- **质量顺序**
- 混合参数精确测量
- 超新星中微子
- 地球中微子
- 太阳中微子
-

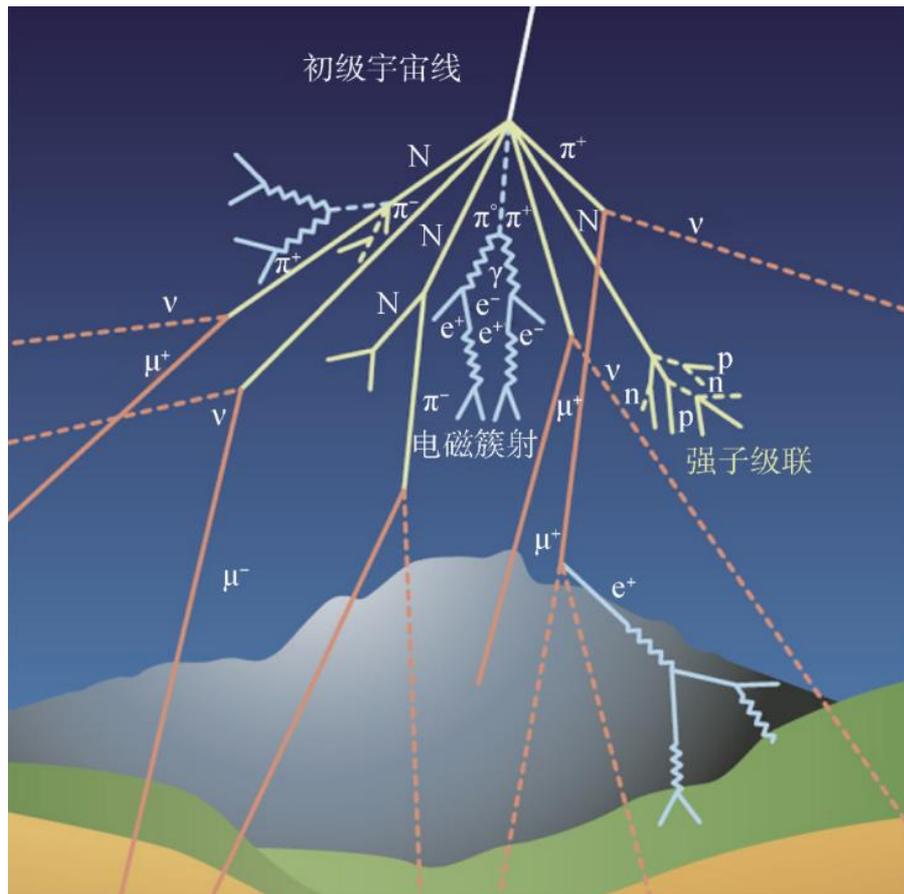


为什么放在地下（山下）700米

- 宇宙射线产生大量类中微子信号（本底）
- 700米岩石可以将宇宙射线流强压低几万倍



从数字5（本底）寻找6（信号）





实验整体布局

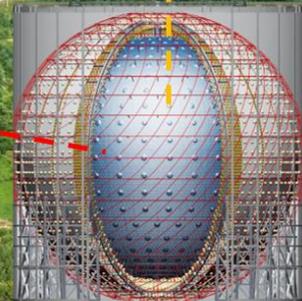
- ◆ 探测器中心位于山下694米，约700米
- ◆ 探测器上方岩石厚度650米，相当于1800米水当量



山高：
241米
探测器
中心：
-453米

竖井：
563米

斜井：1265米
斜度42%





隧道挖掘

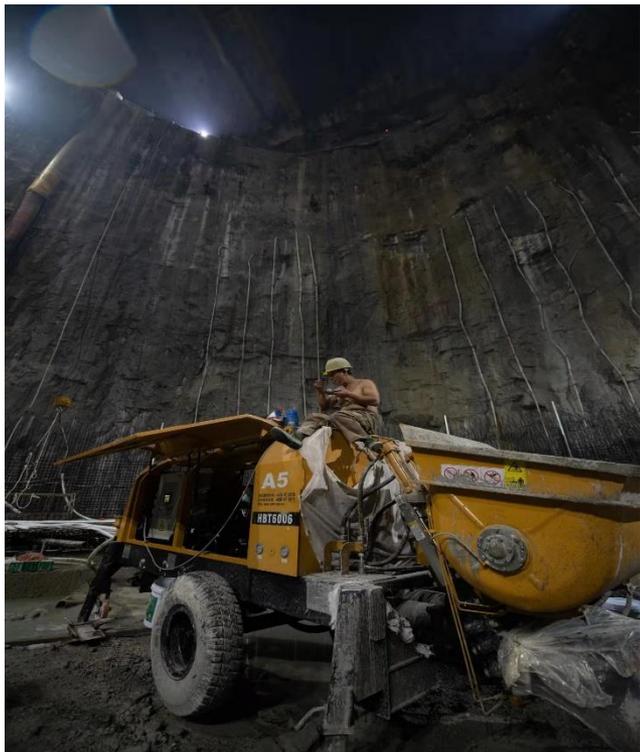
- 历时5年完成
- 最大困难：地下水400立方米/小时





地下实验大厅挖掘

- 2021年底交付使用
- 主实验厅跨度50多米，国际最大
- 44米高、宽巨型水池





地下很凉快吗? No!

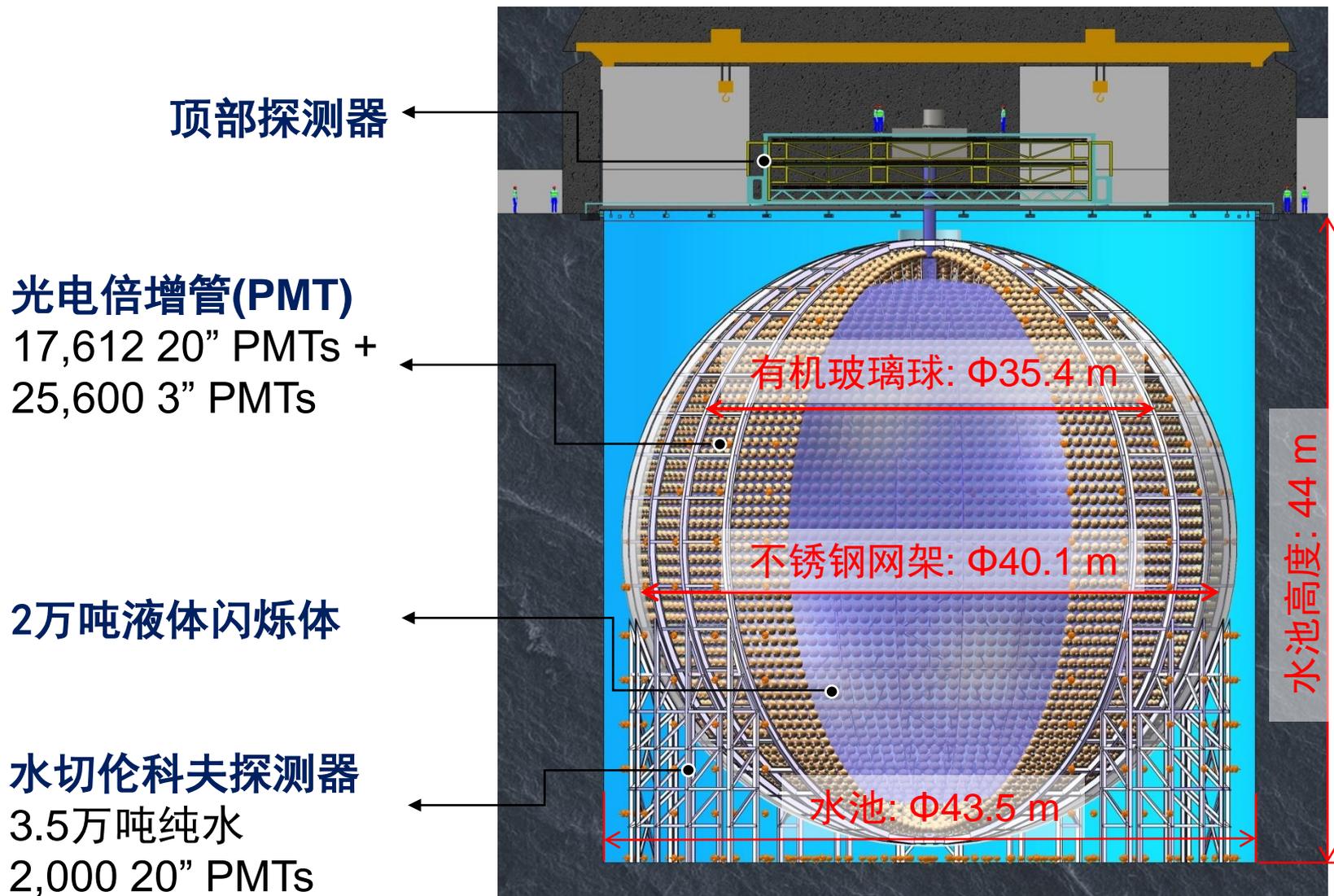
- 土壤和岩石相当于一个巨大的热容，夏天被加热，冬天被降温，因此地下一定深处，大概从几米到10米左右的深度开始，温度就是恒定的，等于当地的年平均气温。因此南方的洞跟北方的洞，温度相差很多。
- 大约从300米（与地质有关）开始，温度开始受地热的影响，每100米升高2-3度。



以上内容摘自曹俊博客：
<https://blog.sciencenet.cn/blog-296183-504592.html>

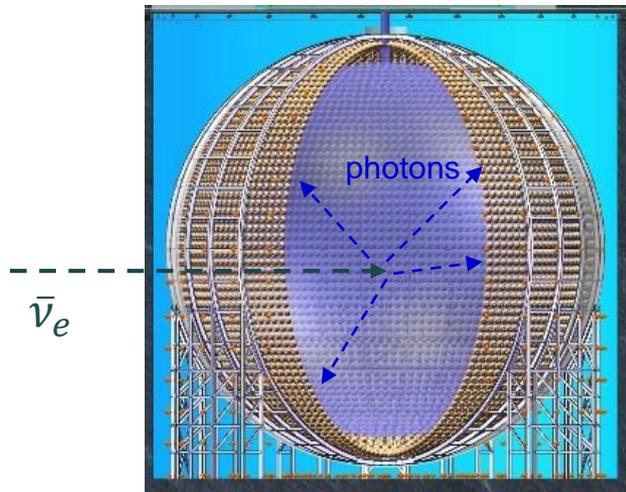


JUNO探测器设计

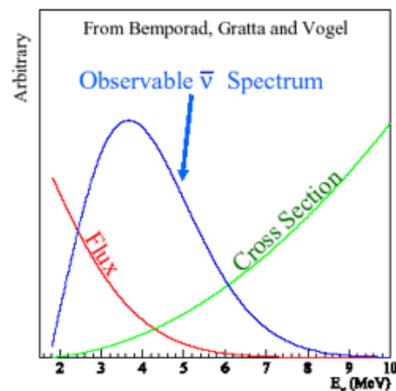
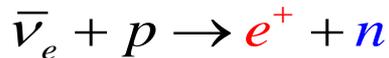
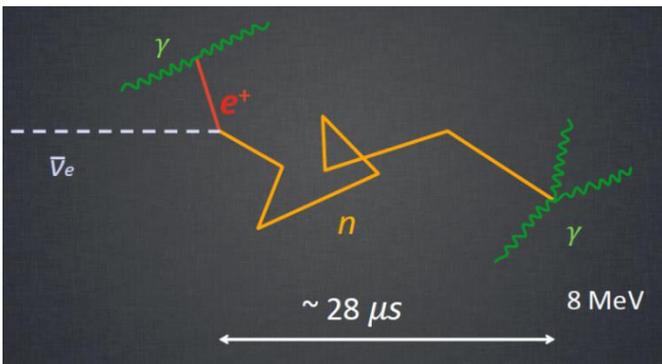




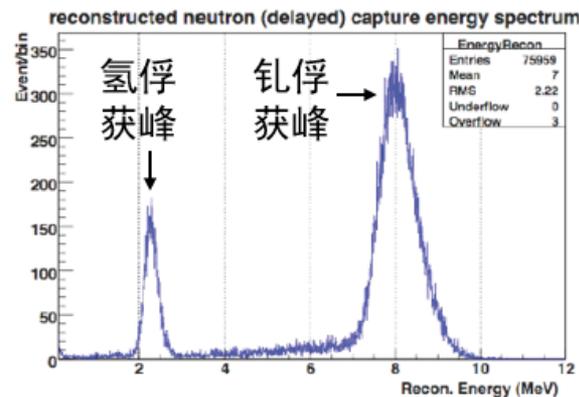
液闪：捕捉中微子的“靶”



- 反应堆中微子与液体闪烁体中的氢核发生“反β衰变反应”，生成正电子和中子。



正电子迅速沉积能量形成“快信号”，信号幅度与入射中微子能量相关



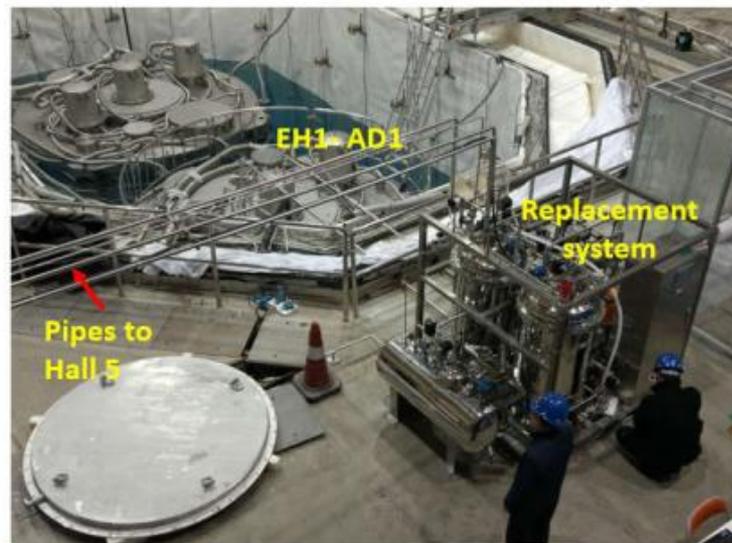
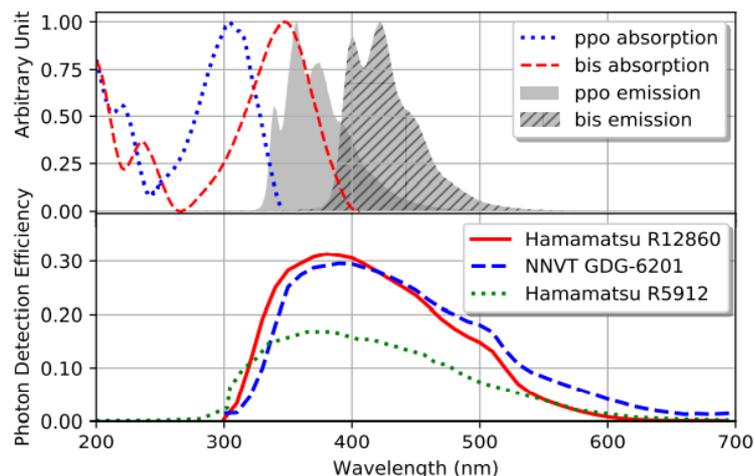
中子漂移一段时间后，被氢核或钆核俘获形成“延迟信号”

快慢信号通过时间、空间、能量进行符合测量有效排除本底



液闪：将中微子转为可见光

- 带电粒子电离激发液闪发光
- JUNO液闪组成
 - 溶剂：线性烷基苯（LAB）
 - 溶质（发光物质）：2,5-二苯基恶唑（PPO）
 - 波长位移剂：对-双-(σ -甲基苯乙炔基)苯（bis-MSB）
- 利用大亚湾的一个探测器为JUNO液闪优化配方
 - 2.5 g/L PPO
 - 3 mg/L bis-MSB





液闪：闪烁光传输的介质

液闪纯化：

- 提高透明度，要求光衰减长度大于20米
- 降低天然放射性含量，铀、钍小于 10^{-15} g/g（反应堆中微子）或 10^{-17} g/g（太阳中微子）。等效于**2万吨液闪中小于0.01 g灰尘**。



5000 m³ LAB storage tank



1) Al₂O₃ for optical transparency



2) Distillation for radiopurity

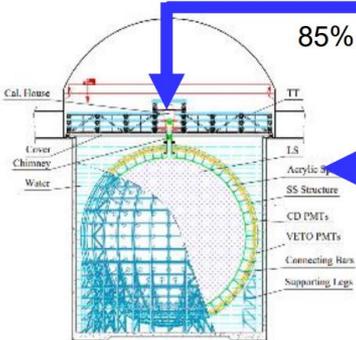
2.4%



Mixing LAB with PPO and bis-MSB

97.6%

Mixing



85%

Commissioning



Monitoring pre-detector (OSIRIS)

15%



4) Gas stripping to remove Rn and O₂

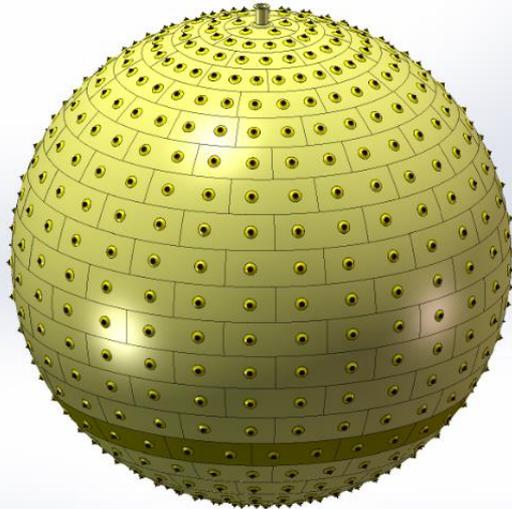
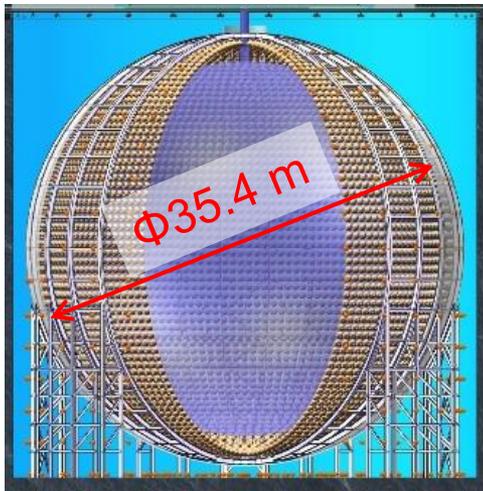


3) Water extraction to remove radioactive impurities

1800 m SS pipes to underground

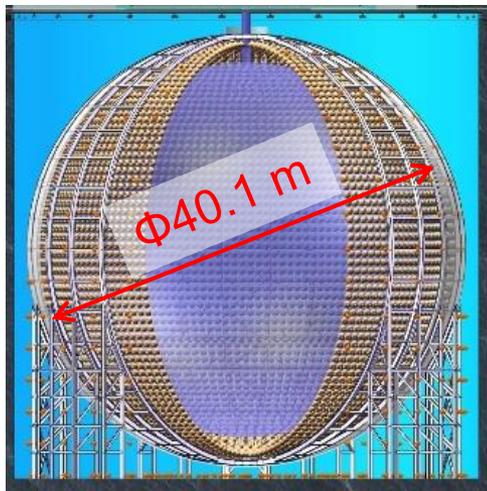


有机玻璃球：液闪的容器

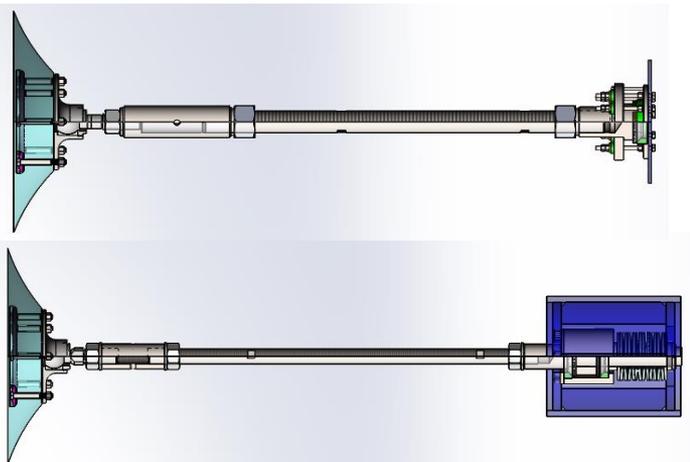


- 直径35.4米，重600吨，**世界上最大的有机玻璃单体结构**
- 由263个最大3米×8米的有机玻璃模块拼接而成，厚12厘米
- 590个支撑节点
- 安装过程中承受自身重力，灌液体后承受3000吨浮力
- 水中透光率>96%，铀、钍小于 10^{-12} g/g

不锈钢网架：探测器支撑结构



部件生产→预拼装→现场组装，
共12万套螺栓，安装间隙2 mm



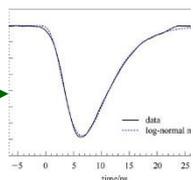
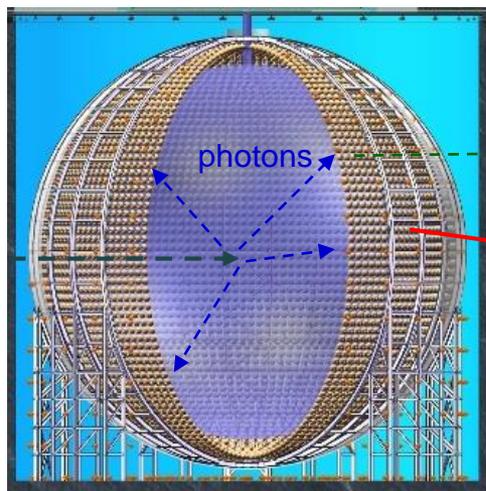
带锁紧或带碟簧的支撑杆设计



放射性本底控制从炼钢开始



光电倍增管：探测微弱光子



- 光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT)
 - 17,612 20英寸PMT
 - 25,600 3英寸PMT
- 光电效应→电子漂移→二次电子发射→电子多级倍增



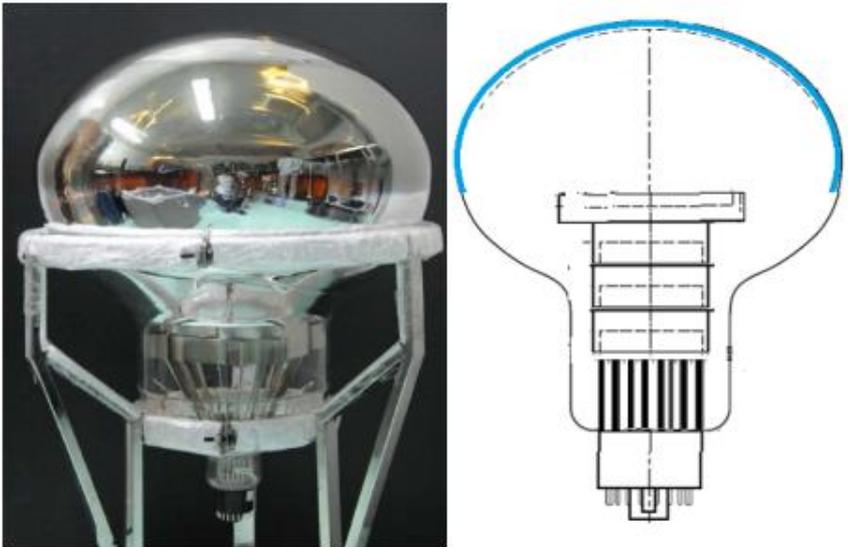
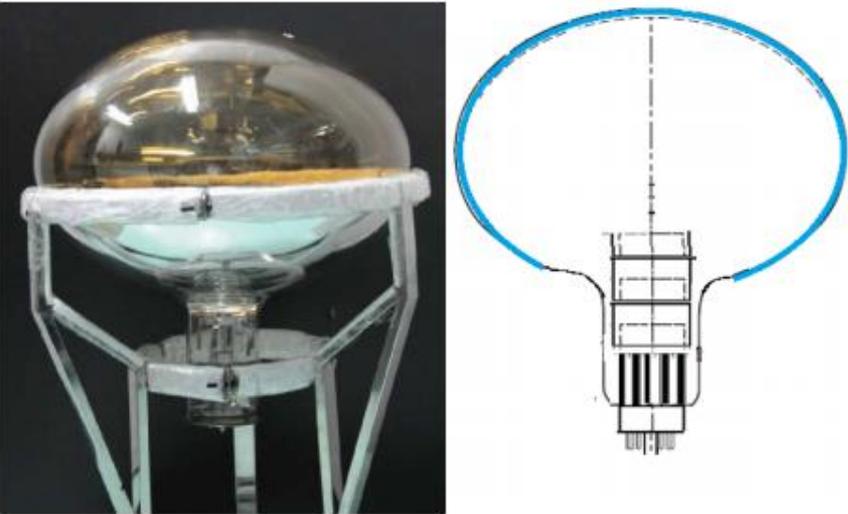
PMT排布：安装间隙**3毫米**



光学覆盖率：大PMT **75.2%** + 小PMT **2.7%**



20英寸PMT

<p>20-inch Hamamatus PMT Dynode Ellipsoidal Glass</p>	<p>20-inch IHEP MCP-PMT Horizontal MCPs Ellipsoidal Glass</p>
	
<p>HQE 1#, 2#, 3#</p>	<p>76#, 77#, 78#, 79#</p>

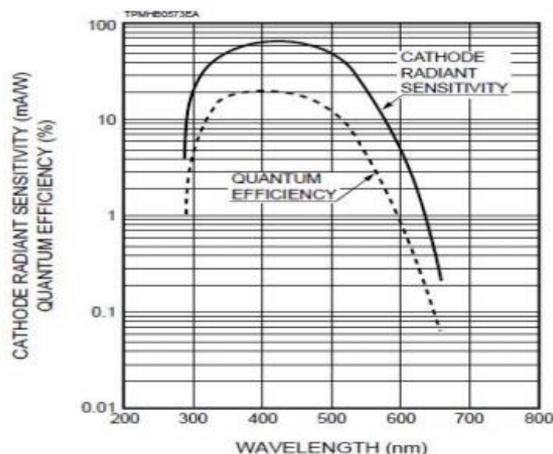
日本滨松光电倍增管
传统打拿极收集光电子

中国北方夜视光电倍增管
微通道板 (MCP) 收集光电子

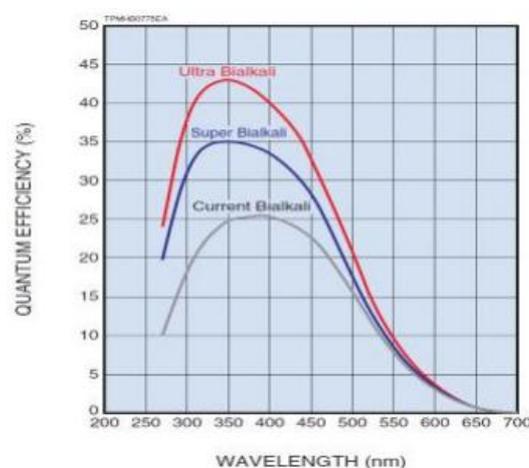
新型PMT关键技术：光子探测效率

- 提高量子效率 (QE) : 采用双碱光阴极, 提高镀膜工艺
- 提高收集效率 (CE) : 反射式光阴极, MCP 表面二次电子发射 (牺牲时间性能)

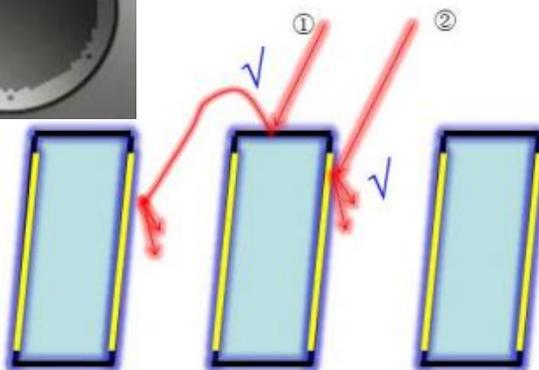
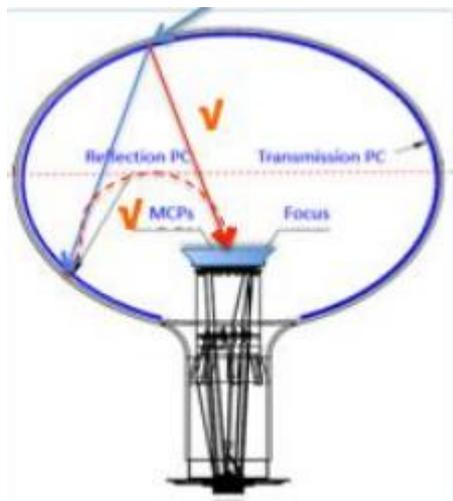
The QE of 20" PMT-R3600



The QE of SBA/UBA



> High QE PMTs: SBA (35%) and UBA (43%)



CE = 100%

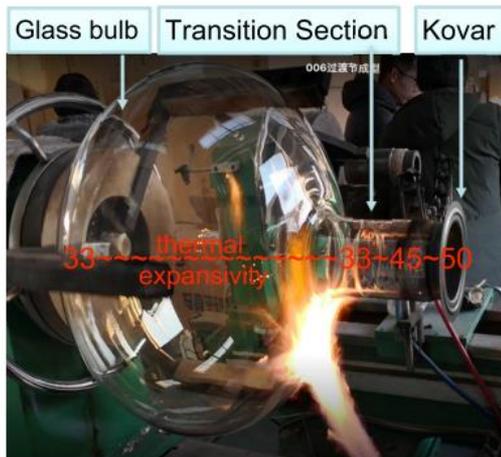
The p.e. into the channel directly ~70%
The p.e. from the electrode indirectly ~30%



PMT主要性能指标

- 中国R&D小组首次设计出世界上最大的MCP-PMT模型
 - 微通道板读出，探测效率30%，玻壳本底低于滨松
- 2015年底完成招标，
 - 北方夜视MCP-PMT 1.5万支 + 日本滨松PMT 5千支

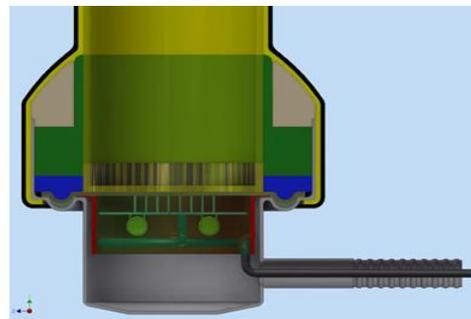
	LPMT (20-in)		SPMT (3-in)
	Hamamatsu	NNVT	HZC
Quantity	5,000	15,012	25,600
Charge Collection	Dynode	MCP	Dynode
Photon Det. Eff.	28.5%	30.1%	25%
Dynamic range for [0-10] MeV	[0, 100] PEs		[0, 2] PEs
Coverage	75%		3%
Reference	Eur.Phys.J.C 82 (2022) 12, 1168		NIM.A 1005 (2021) 165347



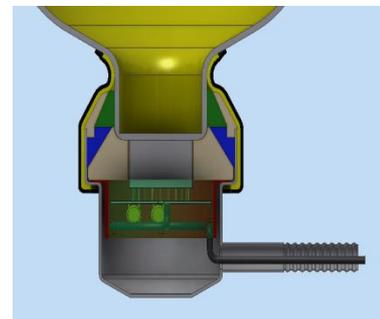


PMT防水封装

- 保护PMT尾部插针及分压器
- 不锈钢外壳
- 玻壳密封：丁基胶+环氧
- 电路板灌封：聚氨酯
- 电缆出口密封：不锈钢波纹管



MCP-PMT

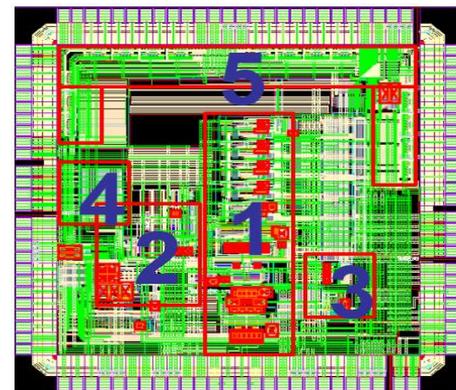


Dynode-PMT

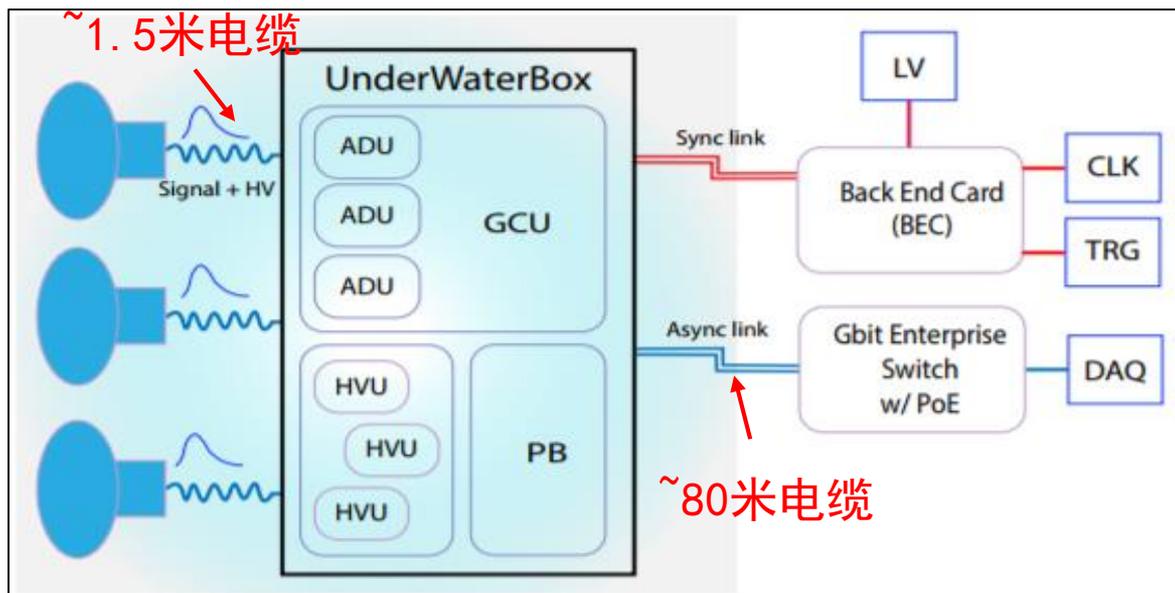


光电倍增管读出电子学

- 电子学通道数巨大：2万路
- 电子学测量范围、能量分辨精度要求高
- 数据传输及实时处理要求高：40GBps
- 前端电子学全部位于水下，可靠性要求高：失效率 $< 0.5\% @ 6\text{years}$



高能所与清华大学联合研发了模数变换芯片（ADC）



一个水下电子学盒对应三个光电倍增管

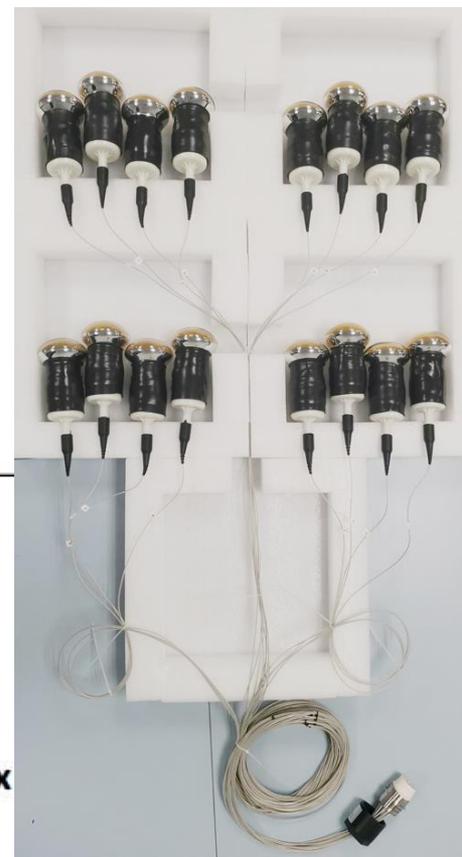
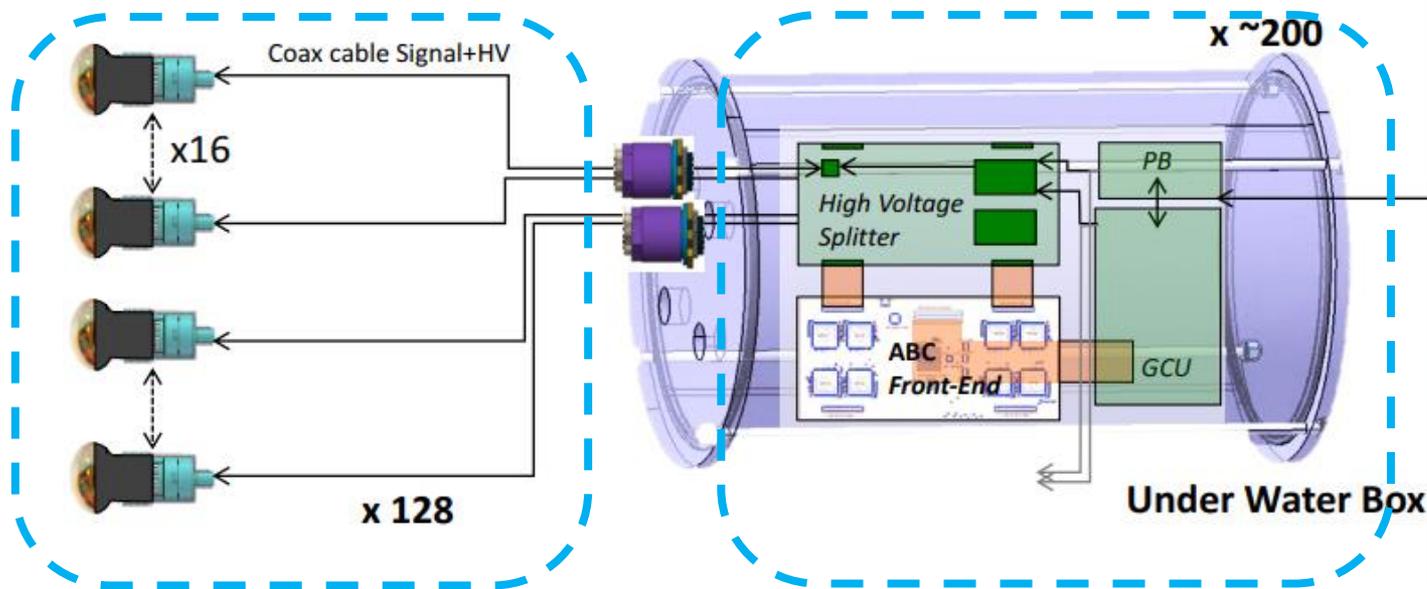


水下40米电子学实验



小PMT及其读出电子学

- 200个水下电子学盒 × 128通道 = 25,600 PMT
- PMT与电子学盒之间采用防水电缆和水下插头连接
- 16个PMT一组，共同插头和高压



PMTs: 

PMT production, testing, base, potting, cable, connector

Electronics:       

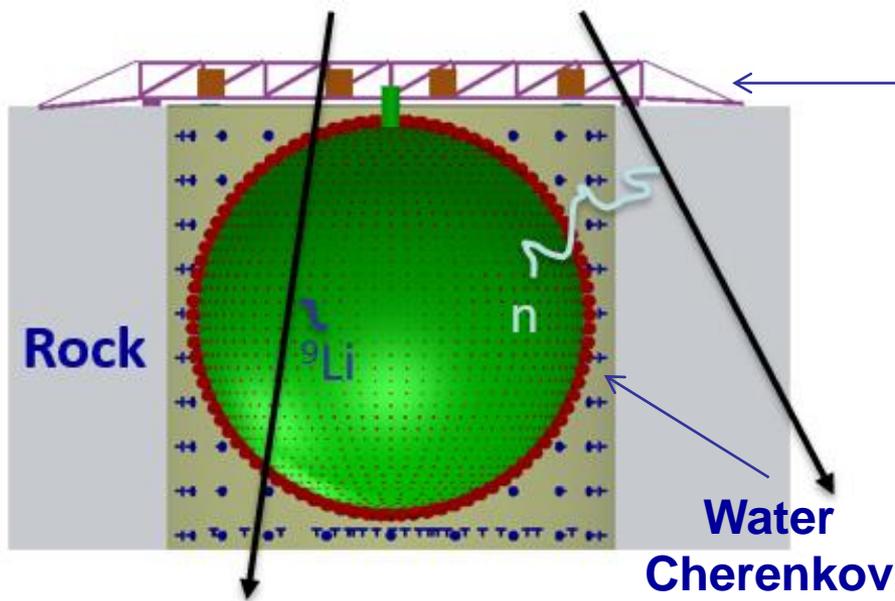
ASIC board, HV module, HV splitter, GCU, heat sink, underwater box



反符合系统

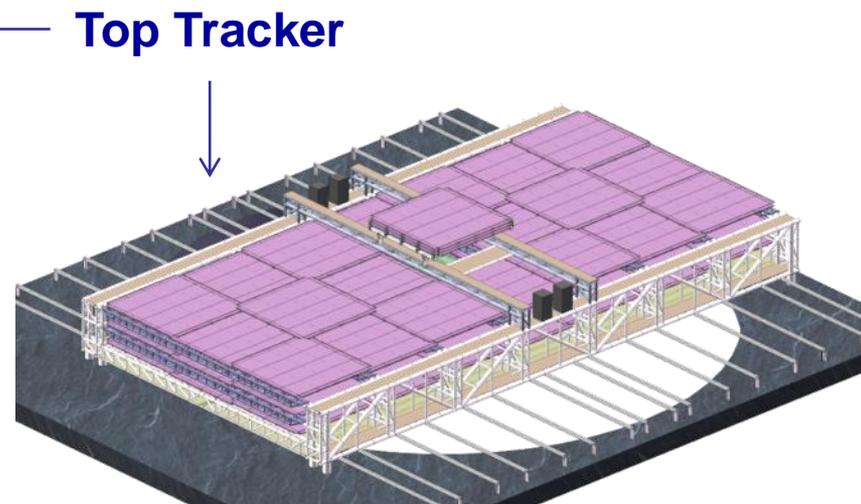
水切伦科夫探测器

- 2400 20" MCP-PMTs
- ~35 kton $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 超纯水（循环）
- >3.9 m水屏蔽，水中氡含量 $<0.2 \text{ Bq/m}^3$
- Muon探测效率>95%



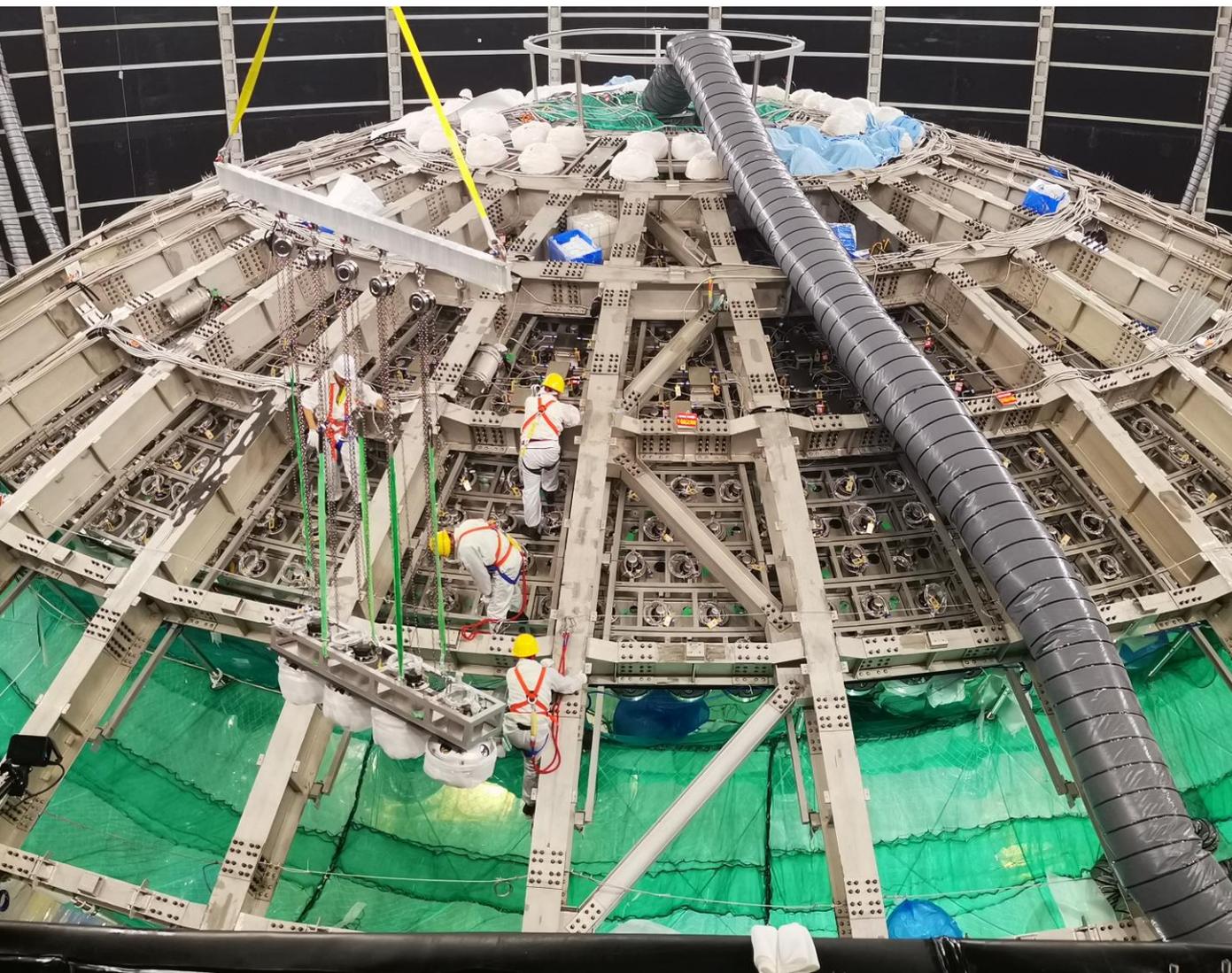
顶部探测器

- 重用意大利OPERA实验的塑料闪烁体





探测器安装



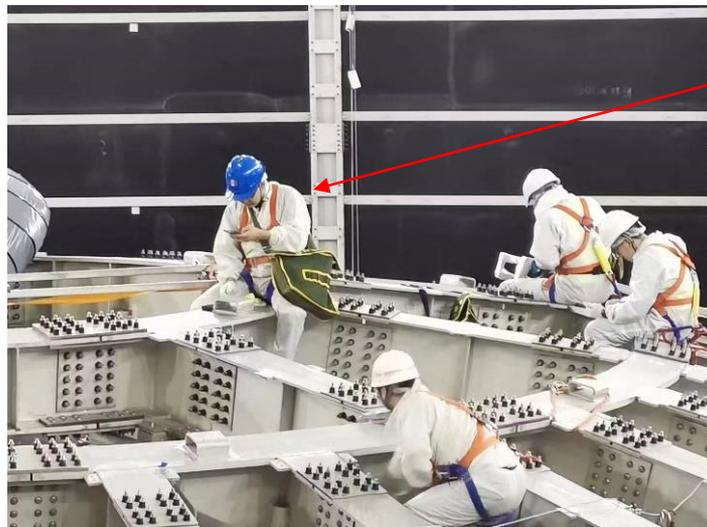


JUNO人员在网架上工作

总工程师



光电倍增管
安装负责人

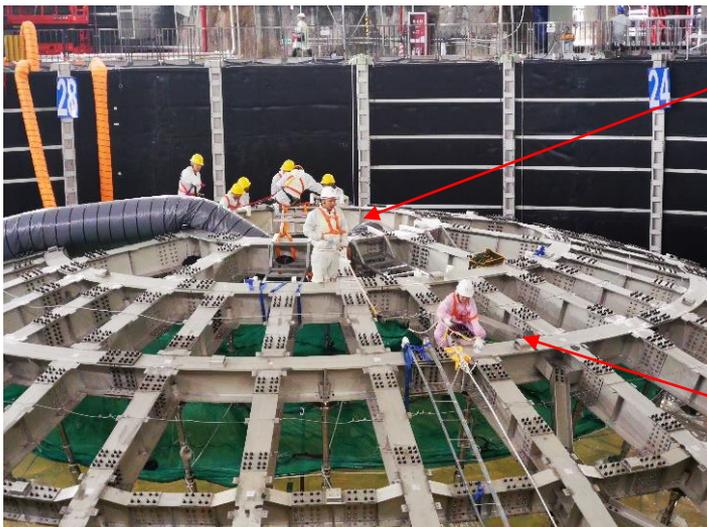


电子学安装
负责人

小光电倍增管
安装负责人



放射性本底
负责人





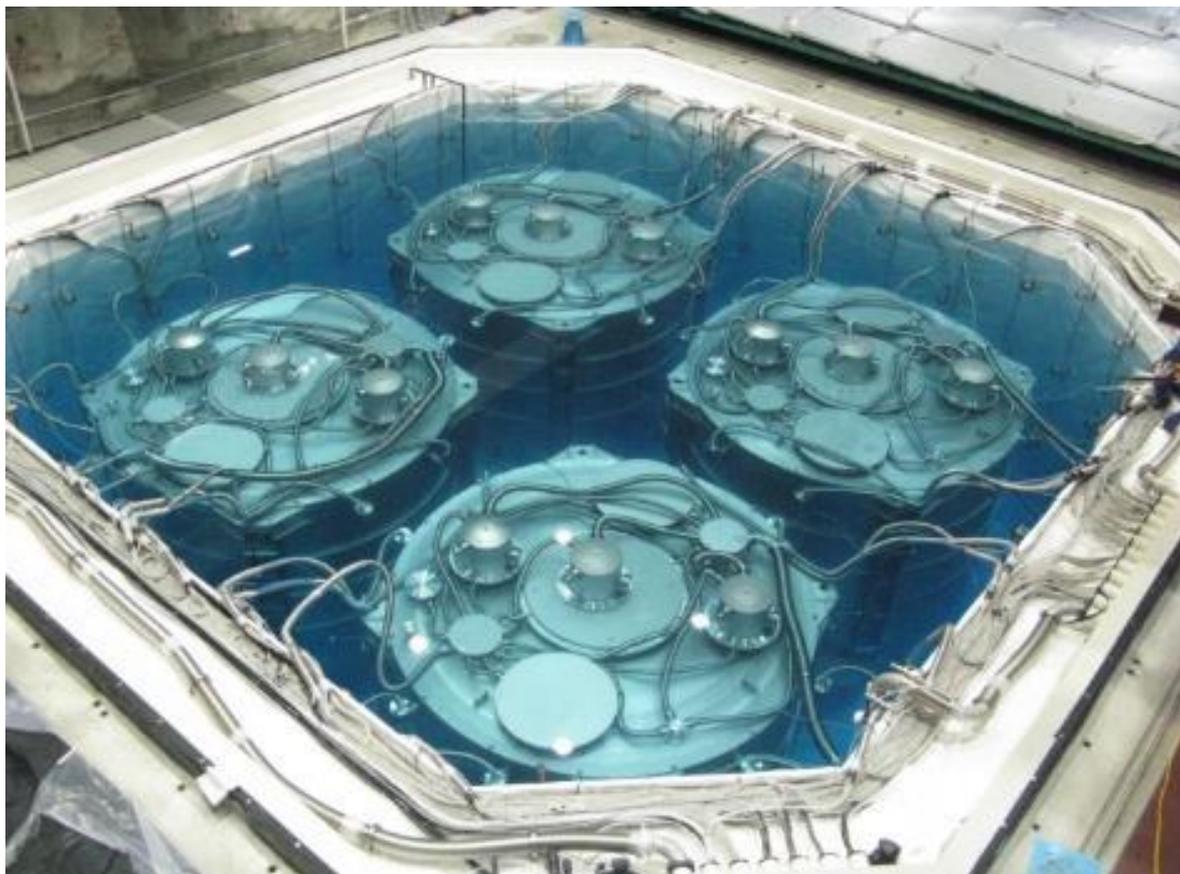
探测器全貌（2023年5月）



江门中微子实验探测器

为什么中微子探测器泡在水里？

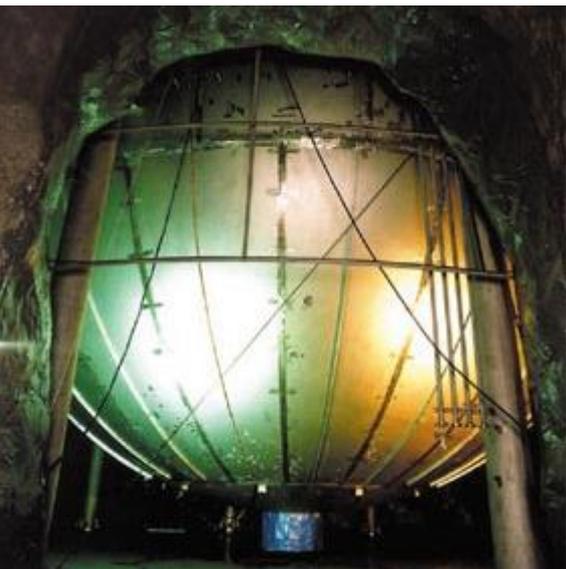
- 阻挡周围岩石和探测器自身材料产生的放射性本底。
- 加装光电倍增管，探测宇宙线缪子。



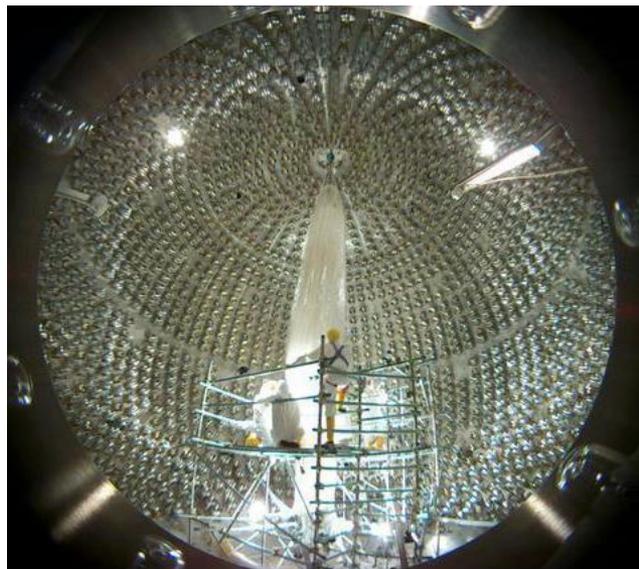


JUNO探测器为什么做成球形？

- 物理原因：探测器对称，物理性能更均匀，事例重建相对容易，系统误差小
- 经济原因：相同体积前提下球体表面积最小，PMT和电子学数量少
- 工程原因：有机玻璃受力均匀。



KamLAND



Borexino

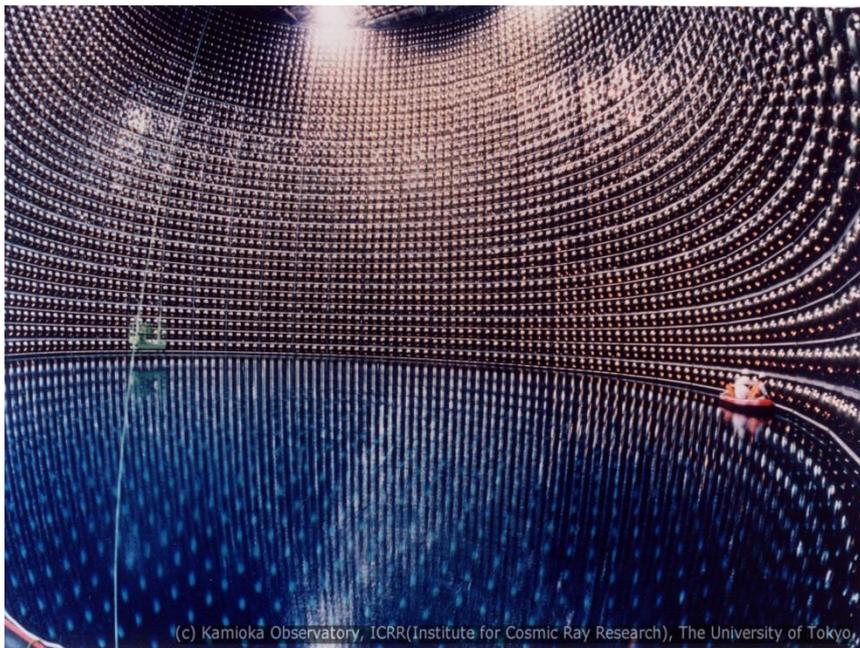


JUNO



光电倍增管（PMT）殉爆

2001年11月日本超级神冈（SuperK）实验**6665个**20英寸PMT和**881个**8英寸PMT发生连环爆炸（殉爆），2002-2005年部分PMT取数，2006年才完全完成重建。



爆炸前

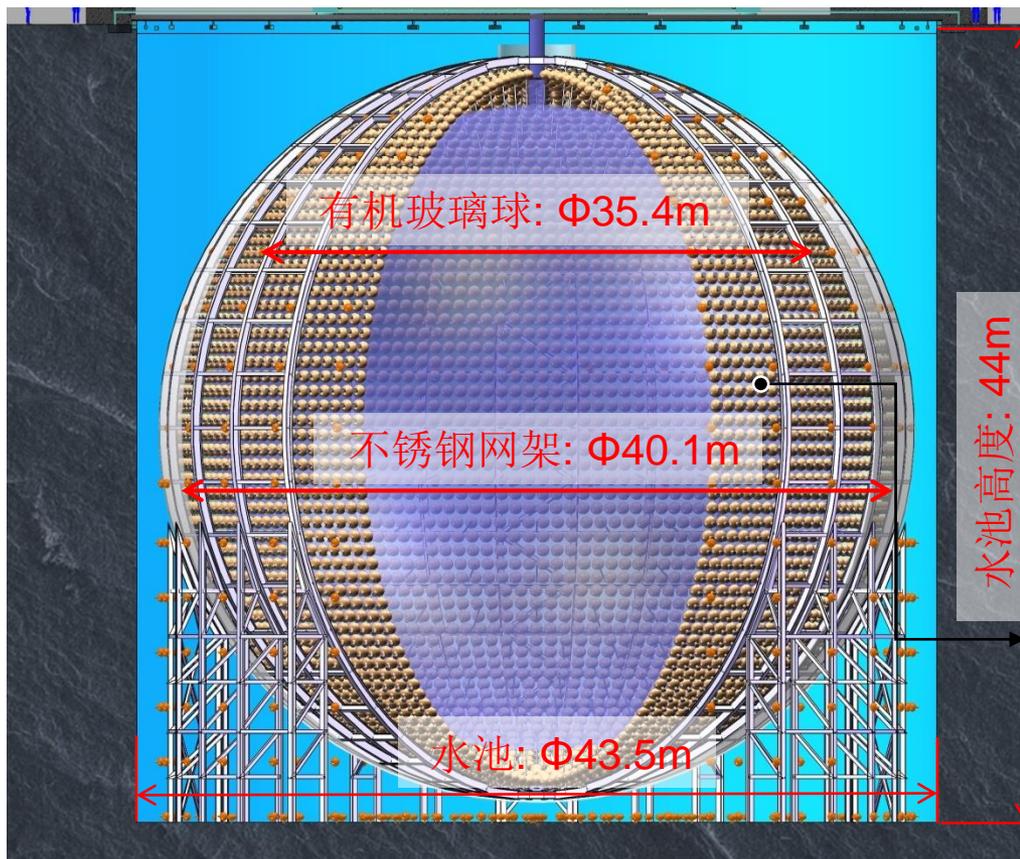


爆炸后

江门中微子实验(JUNO)探测器

JUNO水深和SuperK接近, PMT间隙25mm, 比SuperK小**8倍**

- PMT防爆系统**设计、加工难度**大大增加。
- PMT内爆冲击波作用在相邻PMT的强度是SuperK的**2倍**



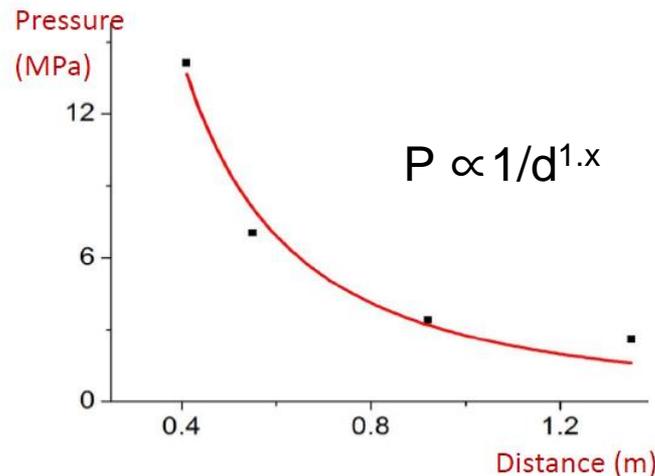
光电倍增管(PMT)

17,612 20" PMTs
+ 25,600 3" PMTs:
光学覆盖率 77.9%

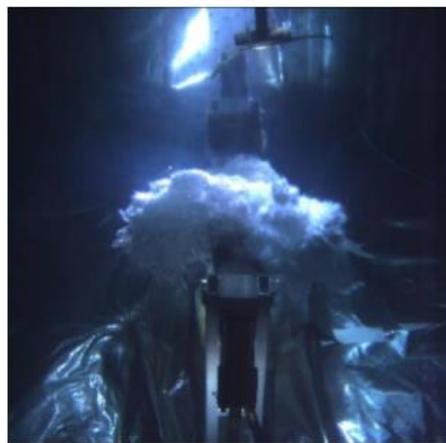
2,400 20" PMTs

水下内爆冲击波的产生与传播

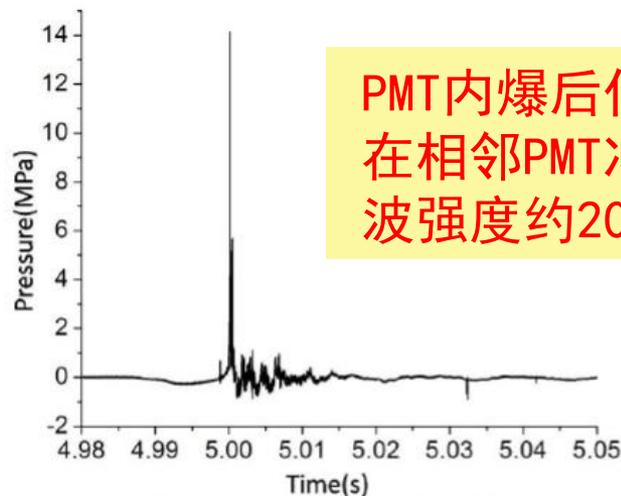
- PMT玻壳厚度3 mm，最大直径508 mm，内部抽真空 (10^{-5} Pa)
- 玻壳在水压下破碎，形成局部真空
- 玻壳周围的水涌入，互相撞击，产生冲击波
- 冲击波向外传播，速度为1481 m/s (声波)
- 冲击波强度随传播距离下降



PMT start break



shockwave initiated

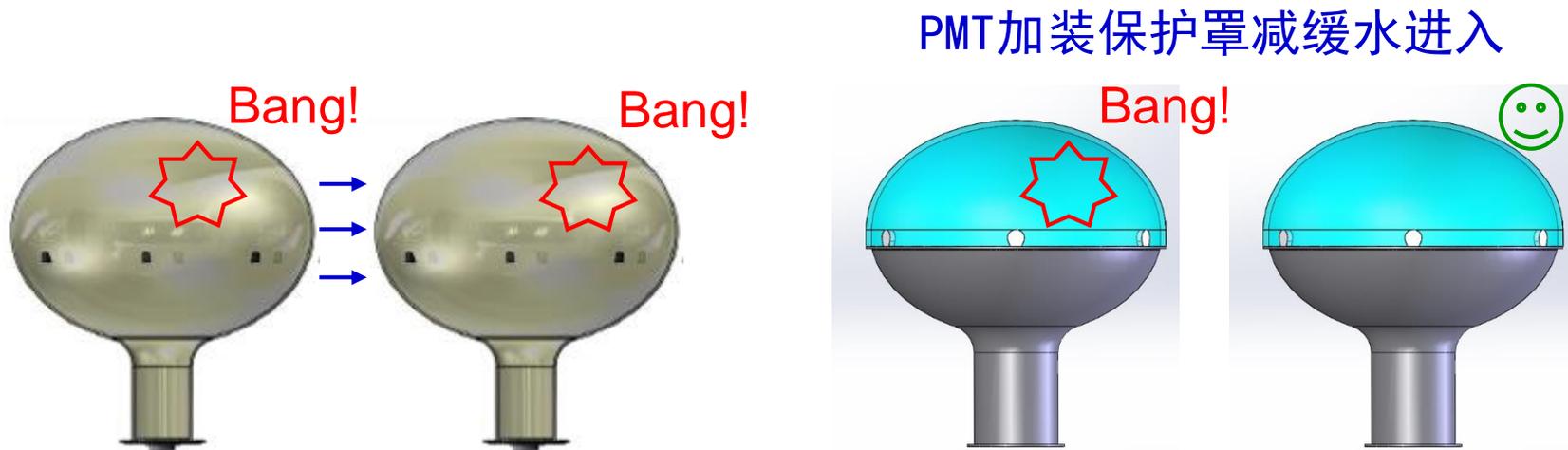


PMT内爆后作用在相邻PMT冲击波强度约20MPa

PMT水下内爆实验及冲击波的测量

JUNO PMT防爆的目标与挑战

- 目标：不是防止PMT内爆，而是防止冲击波产生或显著降低冲击波强度从而避免链式反应。



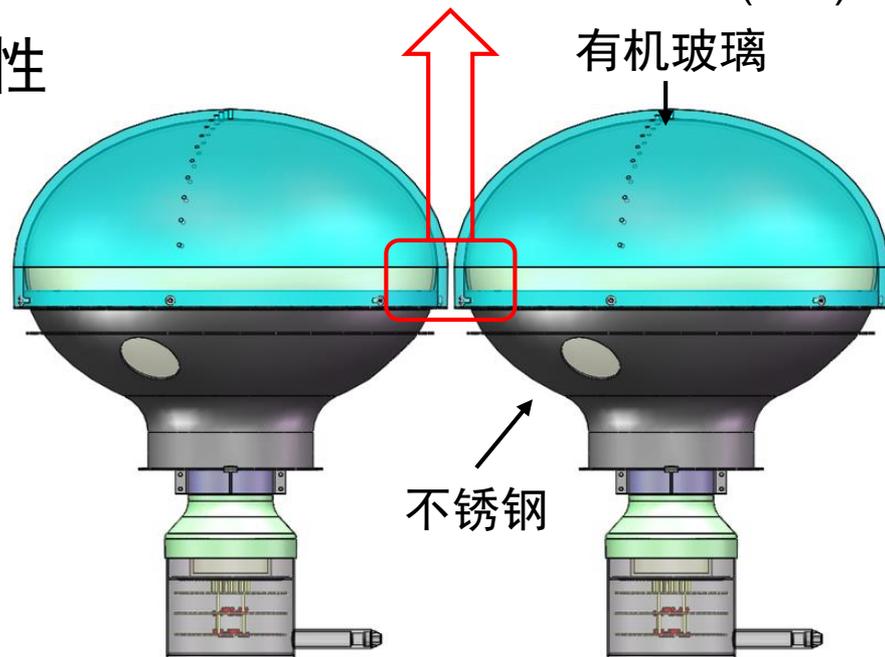
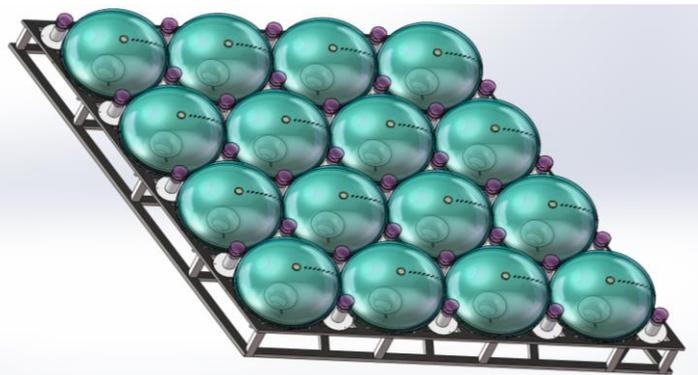
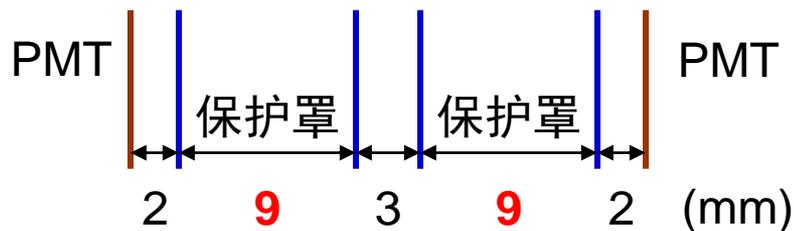
- 风险高：一旦产生链式反应，探测器可能全面损坏
- 难度大：PMT覆盖率要求大于75%，相邻PMT最小间距仅有25mm。



PMT保护罩需求及方案

- 保护罩能够同时承受30MPa以上内爆冲击载荷和0.5MPa水压阶跃载荷
- 保护罩强度要有足够的安全系数
- 上保护罩透明度高，水中透光率大于98%@420nm
- 保护罩材料与纯水兼容，低放射性
- 保护罩数量：2万套

PMT间隙1mm对应光学覆盖率0.25%。





上保护罩材料选择

材料	Polymethylmethacrylate (PMMA)	Polystyrene (PS)	Polycarbonate (PC)	Polyethylene terephthalate (PET)
断裂伸长率 (%)	2.5-4	1.6	100-150	60-165
拉伸强度 (MPa)	80	30-100	55-75	80
冲击强度 (J m ⁻¹)	16-32	19-24	600-850	13-35
折射率	1.49	1.59-1.60	1.584-6	1.58-1.64
光吸收 (%/mm)	negligible	N/A	1.0	1.9
允许最大厚度 (75% 等效覆盖率)	8-10mm	N/A	3mm	1.5mm

1
2
3

有机玻璃 (PMMA) 为上保护罩的首选材料。透光率好、水兼容性好，力学性能能够满足要求。

1. <http://www.goodfellow.com>
2. Measured at IHEP
3. Calculated by myself

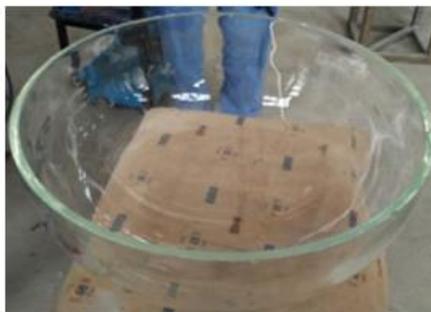
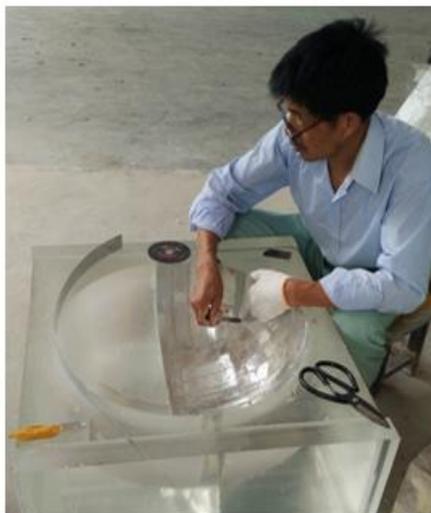


上保护罩模型制作

有机玻璃保护罩首选工艺：注塑
精度高：0.4mm；速度快：150/天



注塑



浇注



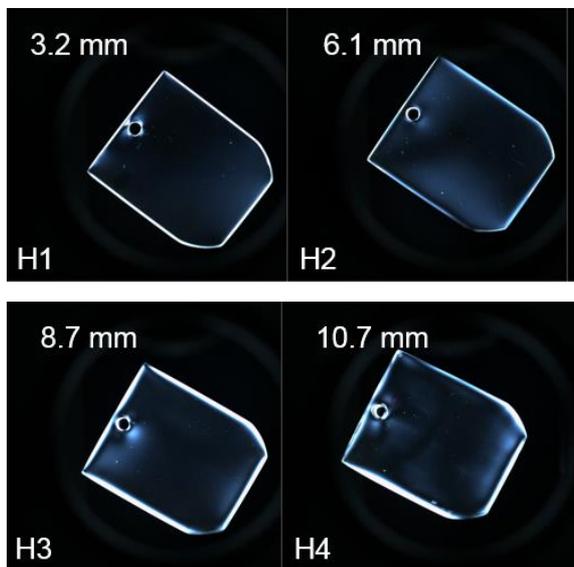
热弯

注塑有机玻璃平板试验

• 试验目的

- 验证注塑工艺同时满足力学性能要求和光学性能要求
- 挑选满足工程需求且性价比高的有机玻璃颗粒料
- 比较厂家实力，确定招标候选厂家

注塑平板样品



Transparency@420nm in the air

Thickn ess	IM20		CM211		TF8 Average	MG5 Average
	Average	Max	Average	Max		
3mm	91.9%	92.0%				91.6%
9mm	90.8%	91.0%	90.7%	91.0%		
12mm	90.8%	91.0%			90.7%	88.9%

注塑标准试件测试力学性能

	材料性能	参数要求	CM205	CM211	LG IH830
2	抗拉强度	$\geq 65\text{MPa}$	75.2	57.1	71.9
3	拉伸弹性模量	$\geq 2.7\text{GPa}$	3.5	3.5	3.1
4	断裂伸长率	$\geq 4\%$	2.0%	1.2%	1.5%
5	断裂韧性 K_{IC}	≥ 1.3	5.8	5.7	5.9



下保护罩模型制作

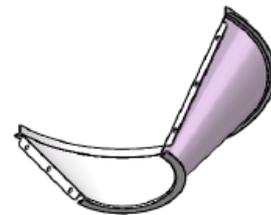
- 半椭球形下保护罩，不锈钢冲压成形，焊接直边
- 圆锥形下保护罩，不锈钢分两半制作然后拼接或整体卷焊



半椭球形保护罩样品



圆锥形保护罩样品



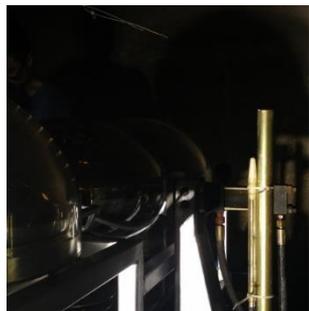


水下防爆实验

与海军合作共进行了
25次50米水压下的防
爆实验



高速摄像



压力传感器

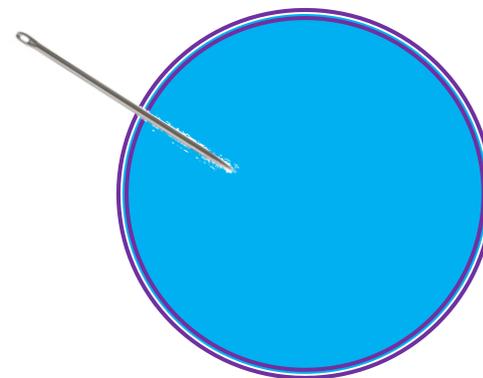


应变传感器

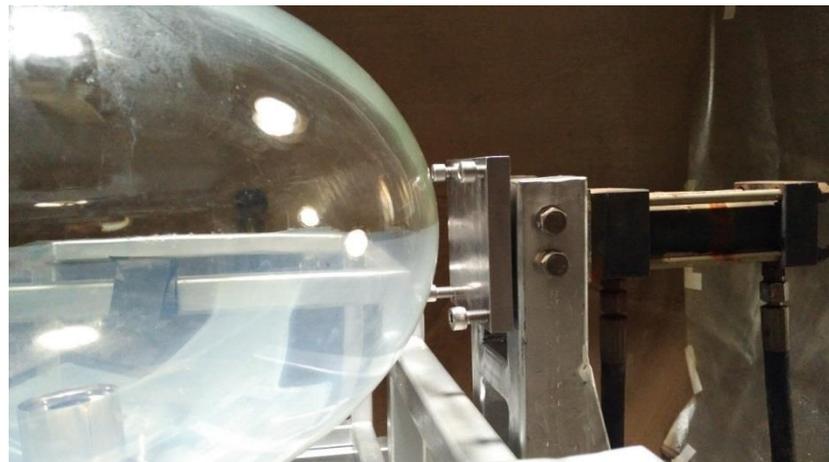
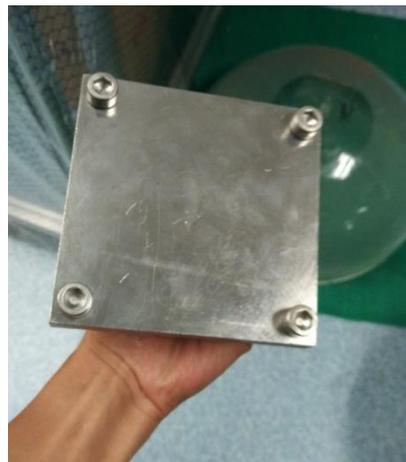


实验方案

- 实验目的：引爆PMT，观察保护罩是否破碎以及是否产生冲击波
- 难点：如何引爆PMT？



压力传感器



液压装置挤爆：需要在保护罩上开两个大于 $14\text{cm} \times 14\text{cm}$ 的洞

第一次防爆实验 (2016.5.25)

- 实验方案：“反其道而行之”，利用冲击波引爆保护罩内部的PMT
- 在50米水压下用液压装置挤爆中间裸PMT，冲击波穿透两边保护罩（声阻抗匹配）引爆两边PMT，观察两边PMT保护罩是否破碎

上保护罩：
12mm有机玻璃
下保护罩：
3mm不锈钢





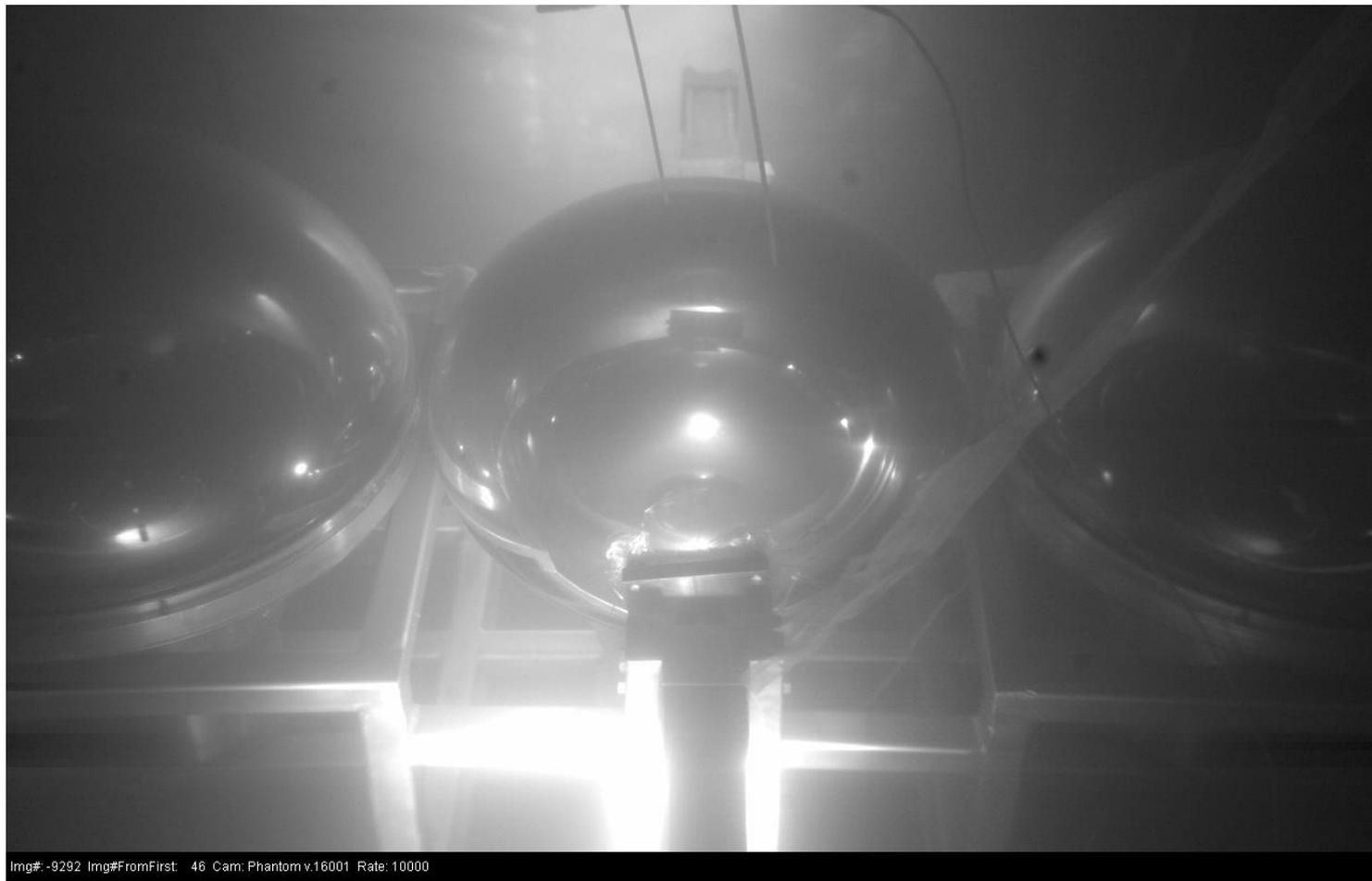
Mission starts (2016.5.25)



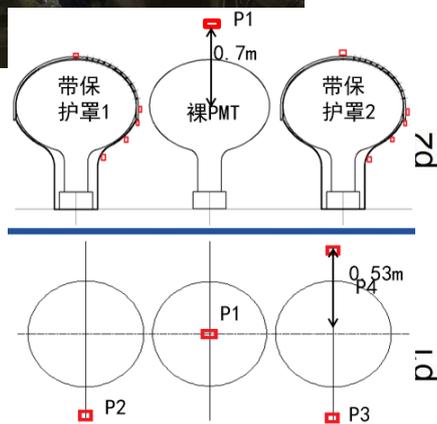


High-speed camera data

- Three PMTs were imploded as expected, while the two covers survived.



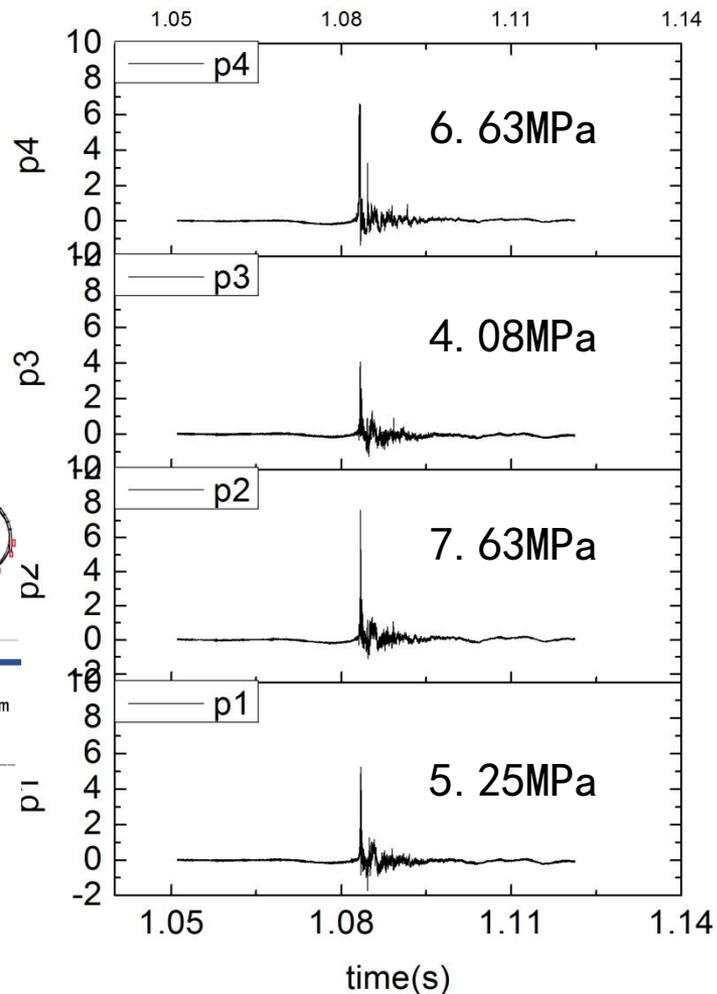
第一次防爆实验结果



压力传感器布局

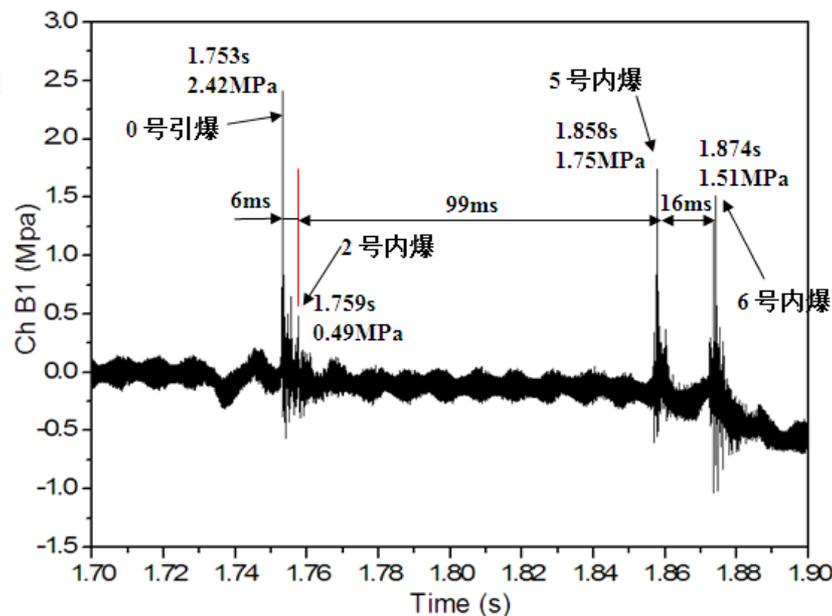
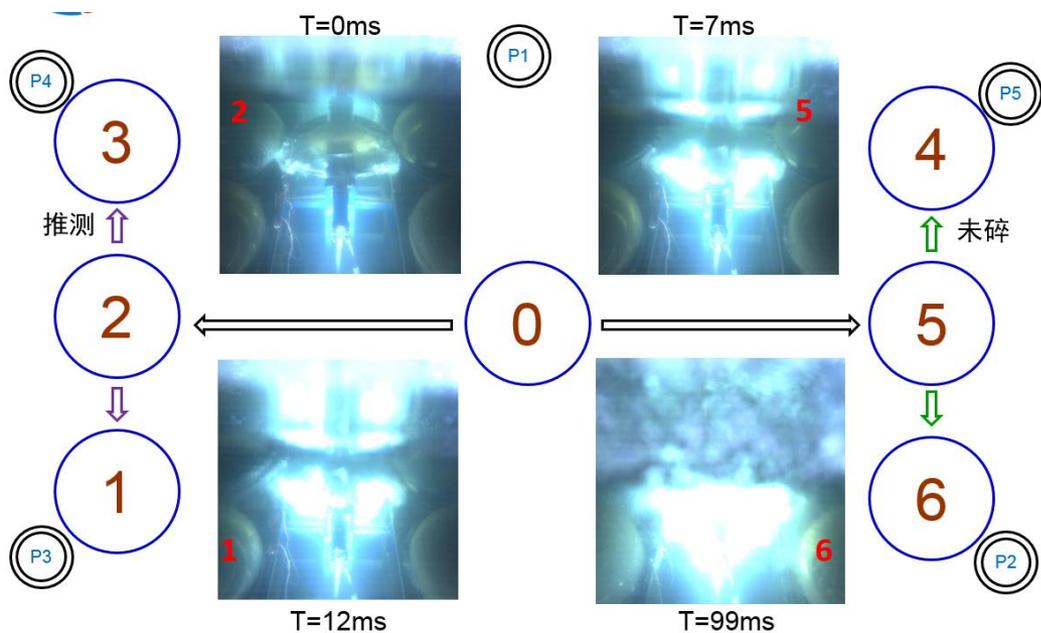
保护罩没有发生碎裂，
压力传感器的数据表明
没有产生二次冲击波，
说明保护罩方案可行。
需要优化保护罩厚度。

压力传感器数据



第三次防爆实验结果 (2016.9)

- 同时检验6个保护罩的抗压能力，优化保护罩厚度
- 首次观察到了PMT内爆链式反应： $0 \rightarrow 5 \rightarrow 6$
 - 高速摄像机观察PMT内爆时刻
 - 压力传感器测到保护罩内爆时刻
- 5号保护罩在内爆前进水98ms，进水量为30升，使得冲击波强度显著降低，最终4号PMT未爆





第九次防爆实验 (2018.5)

- 经过退火的保护罩样品实验失败





方案设计阶段防爆实验结果汇总

实验目的：优化保护罩厚度，并确定安全系数。

工艺	退火	低温	最小厚度(mm)	保护罩个数	保护罩损坏个数	实验编号
注塑	N	N	11.5	5	0	1, 2, 3
热弯	N	Y	9.9	1	0	6
热弯	Y	Y	8.6	1	1	5
浇注	N	N	8.5	1	0	2
热弯	N	N	8.5	1	0	3
热弯	Y	Y	8.2	1	1	6
热弯	Y	Y	8.2	1	1	6
热弯	Y	Y	8.1	2	2	5
热弯	N	N	7.5	1	0	4
热弯	N	N	6.8	2	1	3
热弯	N	Y	6.7	1	1	6
浇注	N	N	6.5	1	1	2

保护罩破坏阈值



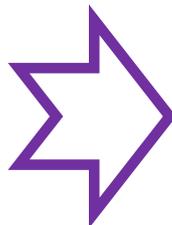
模拟计算与保护罩优化

载荷

PMT内爆流体动力学

内爆冲击波传播

保护罩与流体的耦合



保护罩破碎

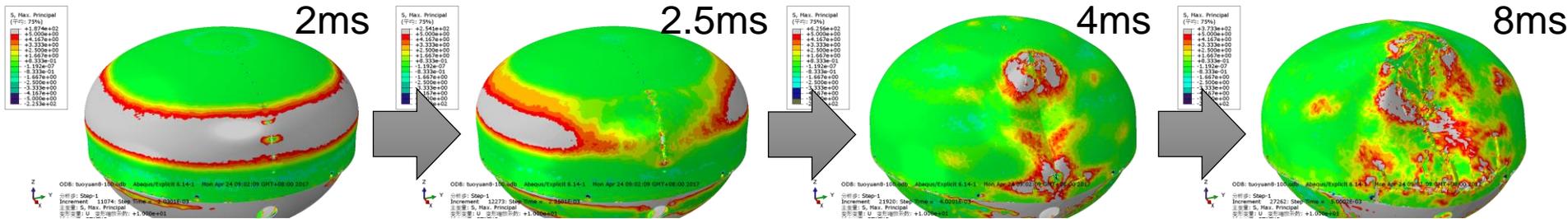
保护罩冲击动力学

保护罩稳定性

有机玻璃材料断裂

通过模拟计算及与数据对比，理解物理过程，优化保护罩设计。
合作单位：海军装备研究院，海军工程大学，浙江大学。

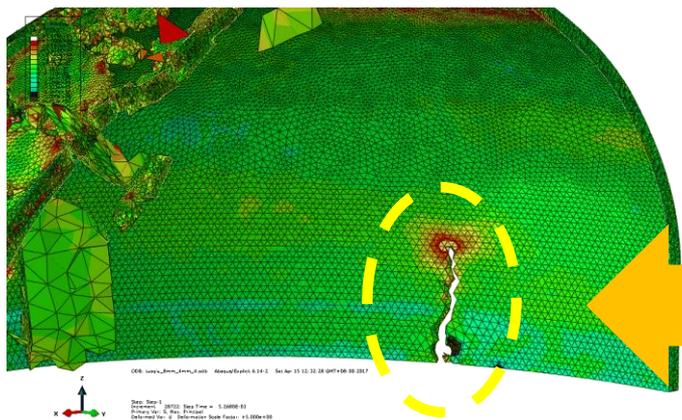
8mm保护罩在0.5MPa阶跃载荷下的屈曲失稳过程



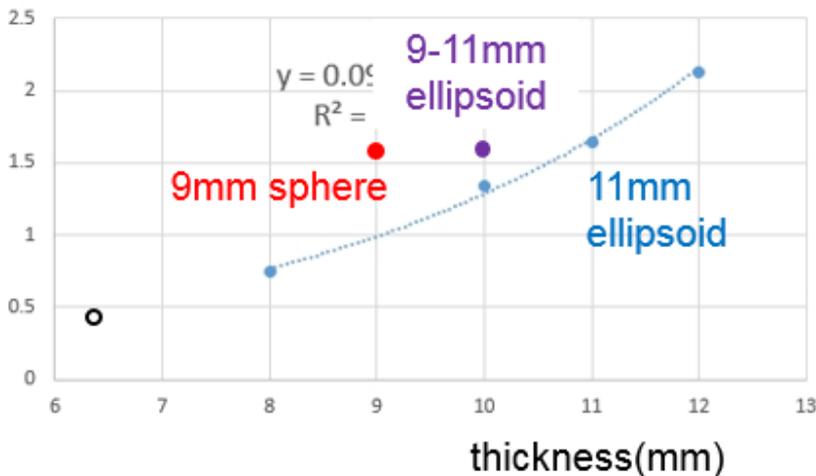


模拟结果举例

螺纹孔附近产生裂纹



Pedestal pressure threshold of buckling (MPa)

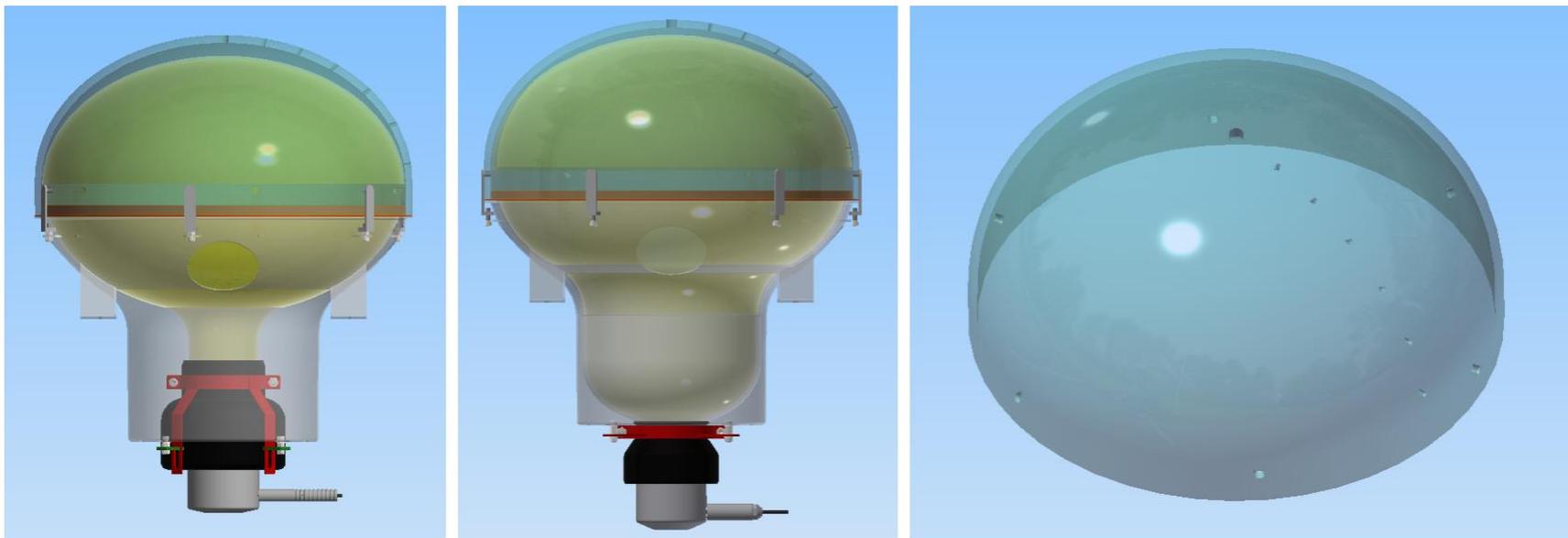


保护罩厚度优化，赤道9mm-顶部11mm渐变厚度与11mm均匀厚度最小失稳压力相当。



保护罩最终设计

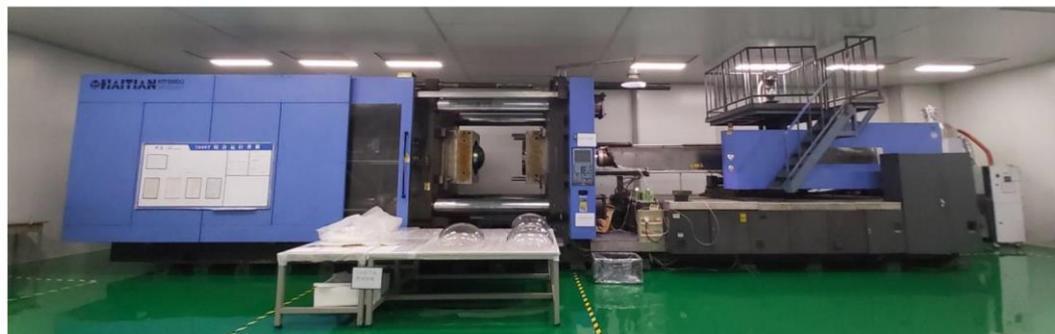
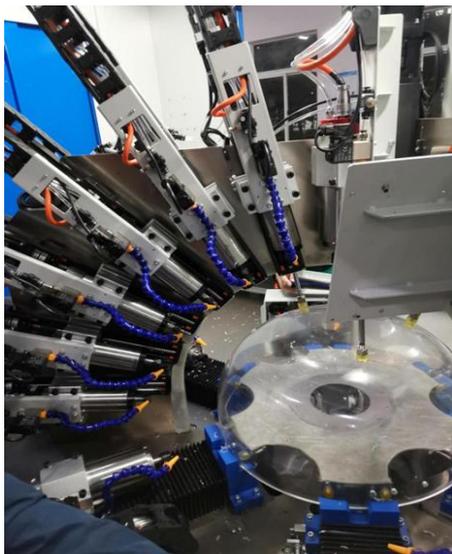
- 有机玻璃保护罩：赤道9mm、顶部11mm**渐变厚度**，失稳压力与11mm均匀厚度相当
- 不锈钢保护罩：2mm半椭球形
- 上下保护罩用6颗挂钩连接，不占横向空间
- 同时适配夜视和滨松PMT





工程深化设计和批量生产

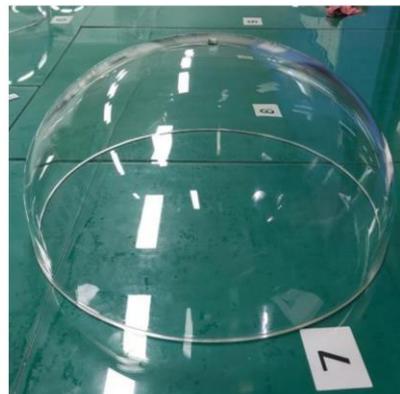
- 模具制作：高强度模具钢，表面粗糙度 $0.006\mu\text{m}$ ，SPI最高标准
- 万级洁净间，换新和清洁机器及管道
- 控制产品收缩非均匀性
- 打孔



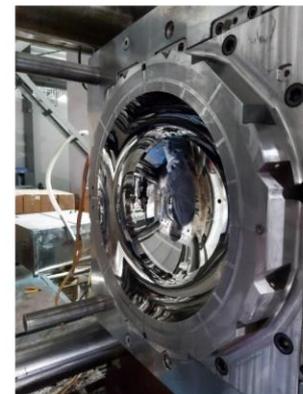
(a)



(b)



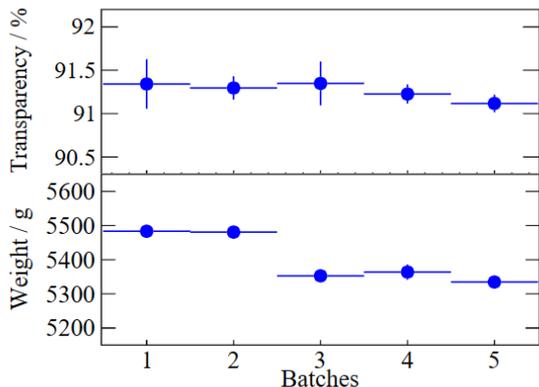
(c)



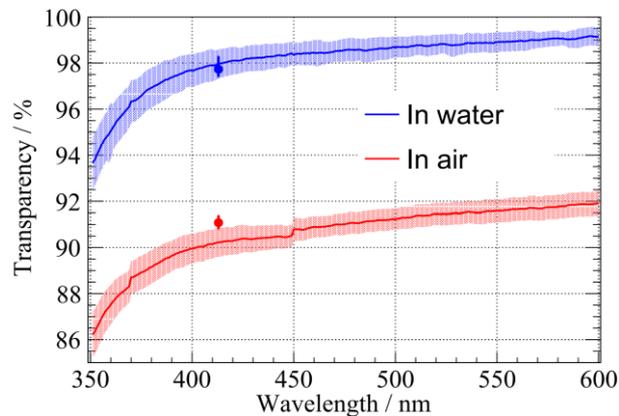
(d)



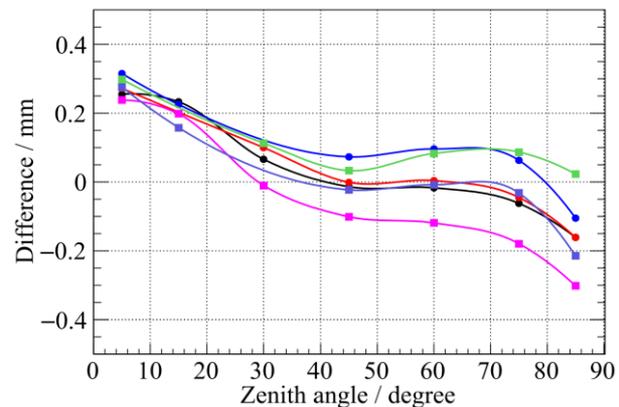
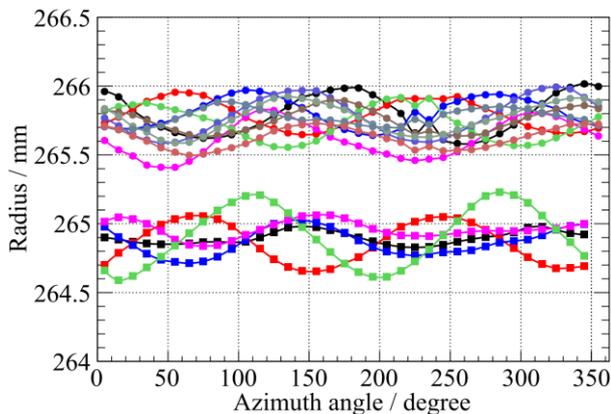
批量生产性能



2万件产品抽检透光率（空气中 >91%@420 nm）和重量。



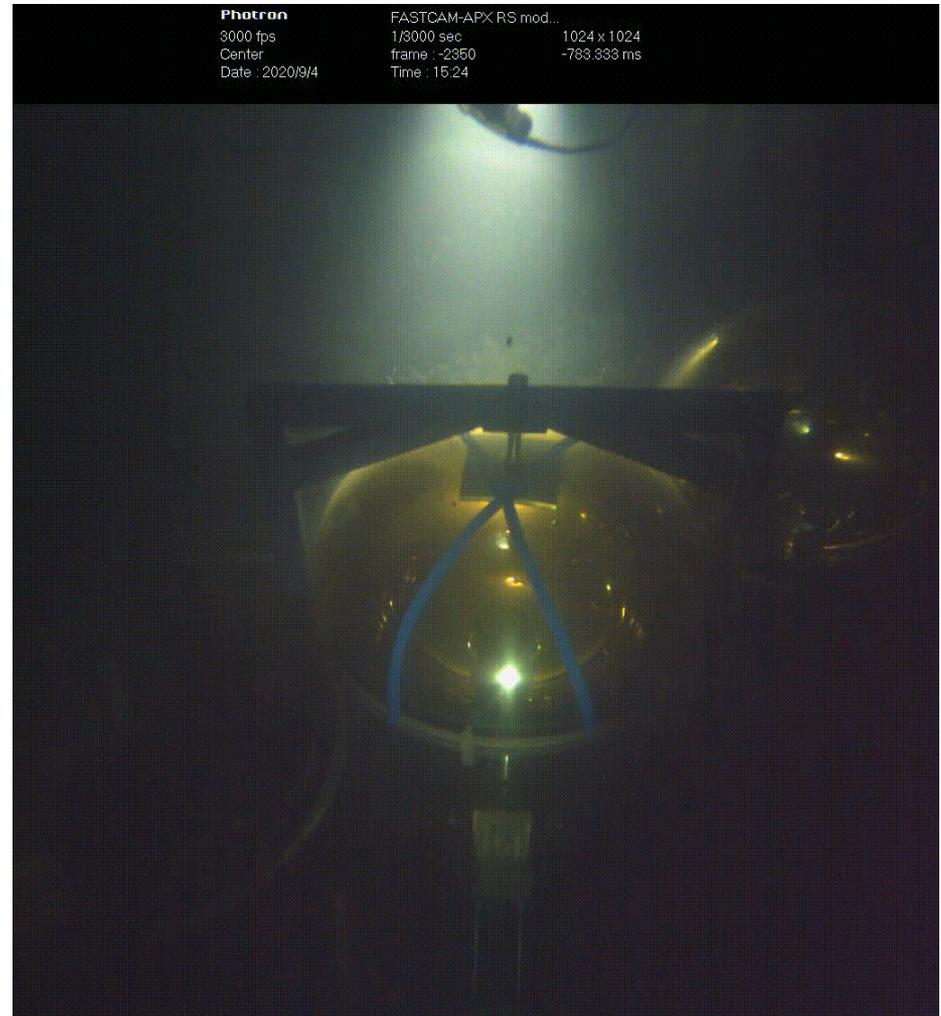
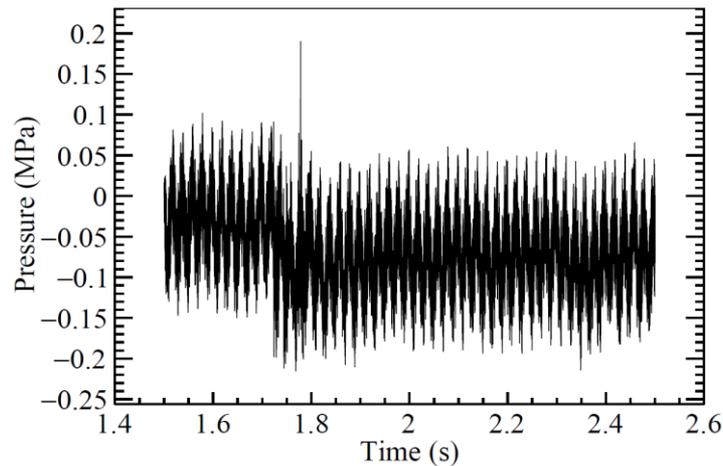
水中透光率 >98% @420 nm



三坐标仪扫描，半径公差好于 ± 0.4 mm (0.2%)

批量生产验证实验 (2020.9.4)

- 引爆带保护罩PMT，旁边PMT完好，冲击波峰值强度约0.15 MPa，对应到相邻PMT强度0.4 MPa，比裸管引爆降低**50倍**。





总结

- PMT水下防爆，一个关键但“**隐形**”的探测器系统
 - 眼睛几乎看不到：上保护罩透明，下保护罩及连接结构藏在后面
 - 中微子信号几乎无损：水中透光率 $>98\%$
 - 风险大，一旦失效，探测器可能整体散架

- 有机玻璃保护罩
 - **高强度**：承受**50米**突加水压
 - **高精度**：尺寸公差**0.2%**
 - **高透明度**：水中 **$>98\%$**

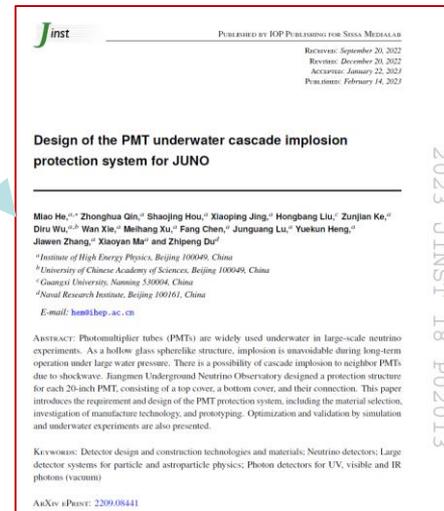


体会



方案设计
2016-2018

- 需求分析
- 模拟计算
- 调研、实验



2023 JINST 18 P02013



工程深化设计
2018-2020

- 工艺研究
- 设计变更
- 试制、验证

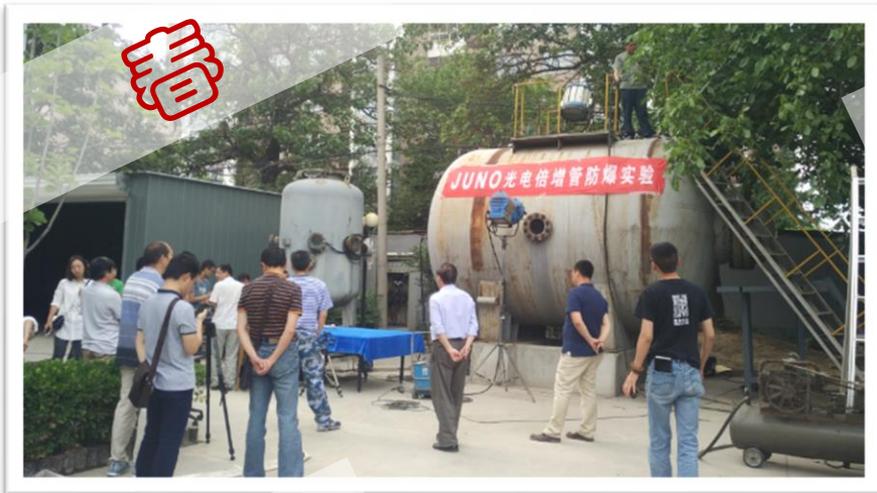


2024 JINST 19 T05003



批量生产
2020-2024

- 质量控制
- 性能测试
- 实际应用



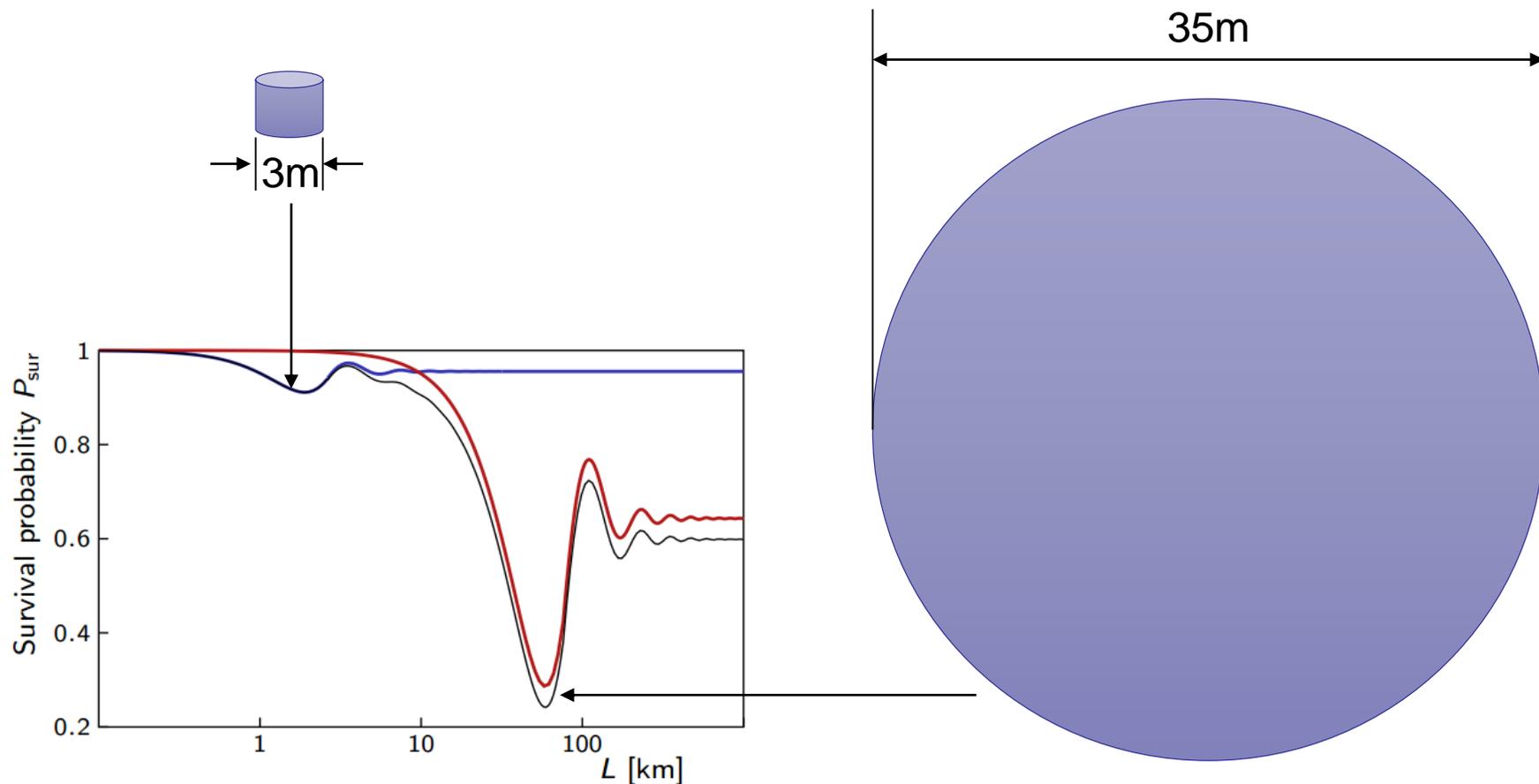


Backup

大亚湾与江门对比：探测器体积

大亚湾：20吨，
距反应堆2公里，
每天70个事例

江门：20千吨，
距反应堆53公里，
每天60个事例

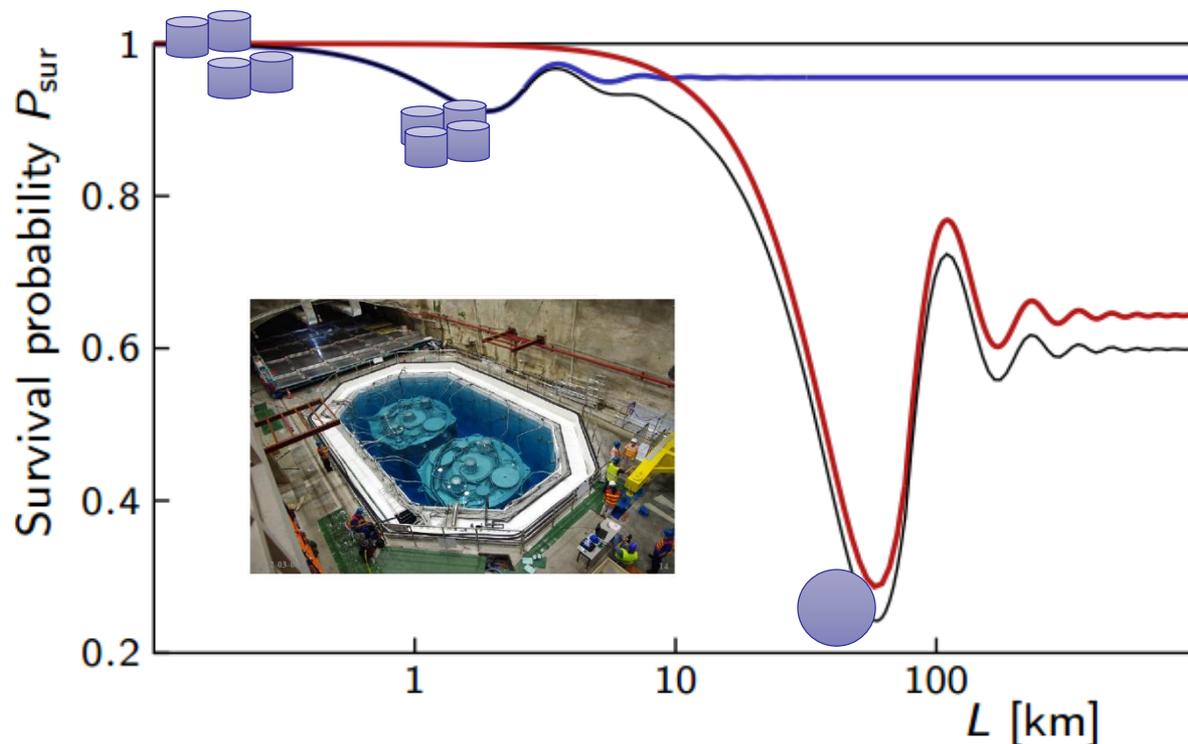




探测器数量

- 大亚湾：3个站点，每个站点2-4个探测器
- 远近点相对测量，抵消中微子事例率的绝对误差
 - 同一站点多模块设计，降低探测器间的相对误差

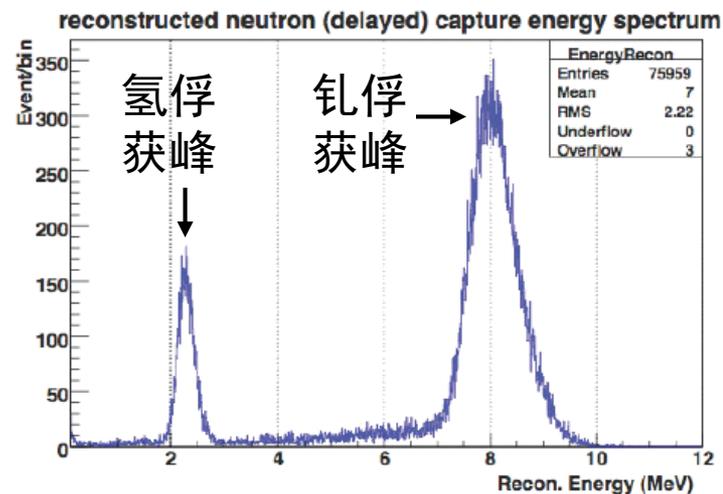
- 江门：1个站点，1个探测器
- 绝对测量，主要依靠能谱分析
 - 多个探测器成本增加





液闪

- 大亚湾的靶：掺钷液闪
- JUNO的靶：普通液闪。掺钷过程中不可避免的引入铀、钍等杂质，增大放射性，减小透明度。

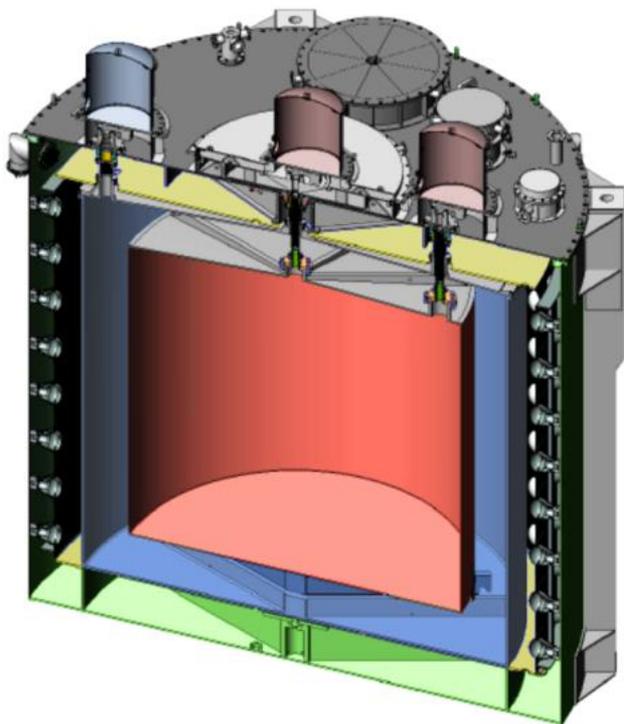




探测器结构

- 大亚湾探测器：三层结构

- 靶区：20吨掺钷液闪
- 集能层：20吨普通液闪
- 屏蔽层：40吨白油



- 江门探测器

- 靶区：20千吨普通液闪
- 屏蔽层：水（与水池连通）

- 江门液闪不掺钷→靶区和集能层合并，重建事例顶点排除边缘事例
- 同时建造钢罐和有机玻璃罐难度太大→钢网架代替钢罐
- 水跟液闪折射率不一样，给事例重建带来困难



光学覆盖率

- 大亚湾：192个光电倍增管，上下反射板，光学覆盖率20%，1 MeV~165 PE，能量分辨率8%@1 MeV
- 江门：17,612+25,600个光电倍增管，光学覆盖率~78%，1 MeV~1200 PE，能量分辨率3%@1 MeV

