

探秘中微子



徐吉磊

高能所

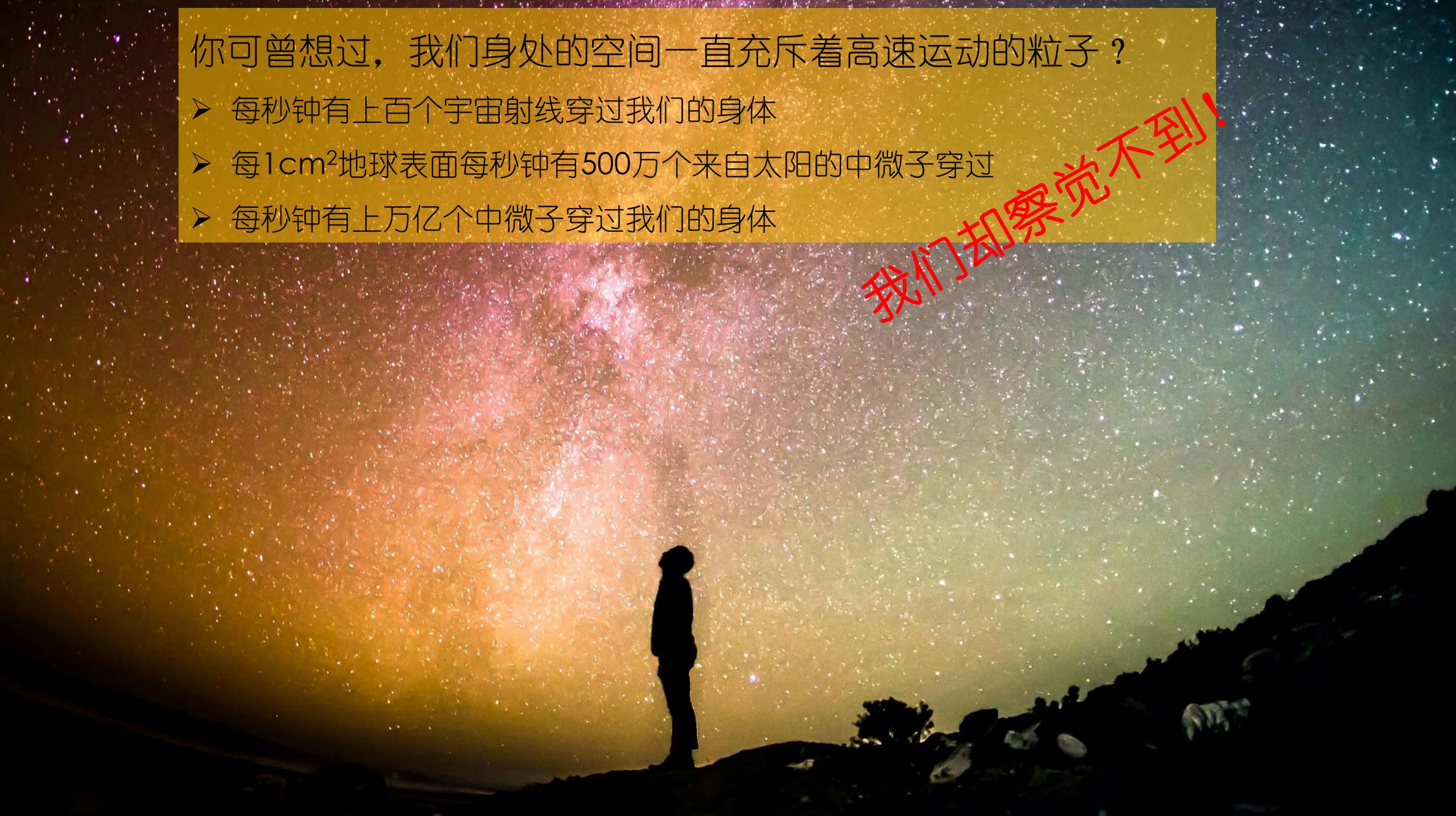
2023/8/26 @ 成都

- ▶ 中微子介绍
- ▶ 大亚湾中微子实验
- ▶ 江门中微子实验及进展
- ▶ 中微子有什么用？
- ▶ 总结

你可曾想过，我们身处的空间一直充斥着高速运动的粒子？

- 每秒钟有上百个宇宙射线穿过我们的身体
- 每 1cm^2 地球表面每秒钟有500万个来自太阳的中微子穿过
- 每秒钟有上万亿个中微子穿过我们的身体

我们却察觉不到！

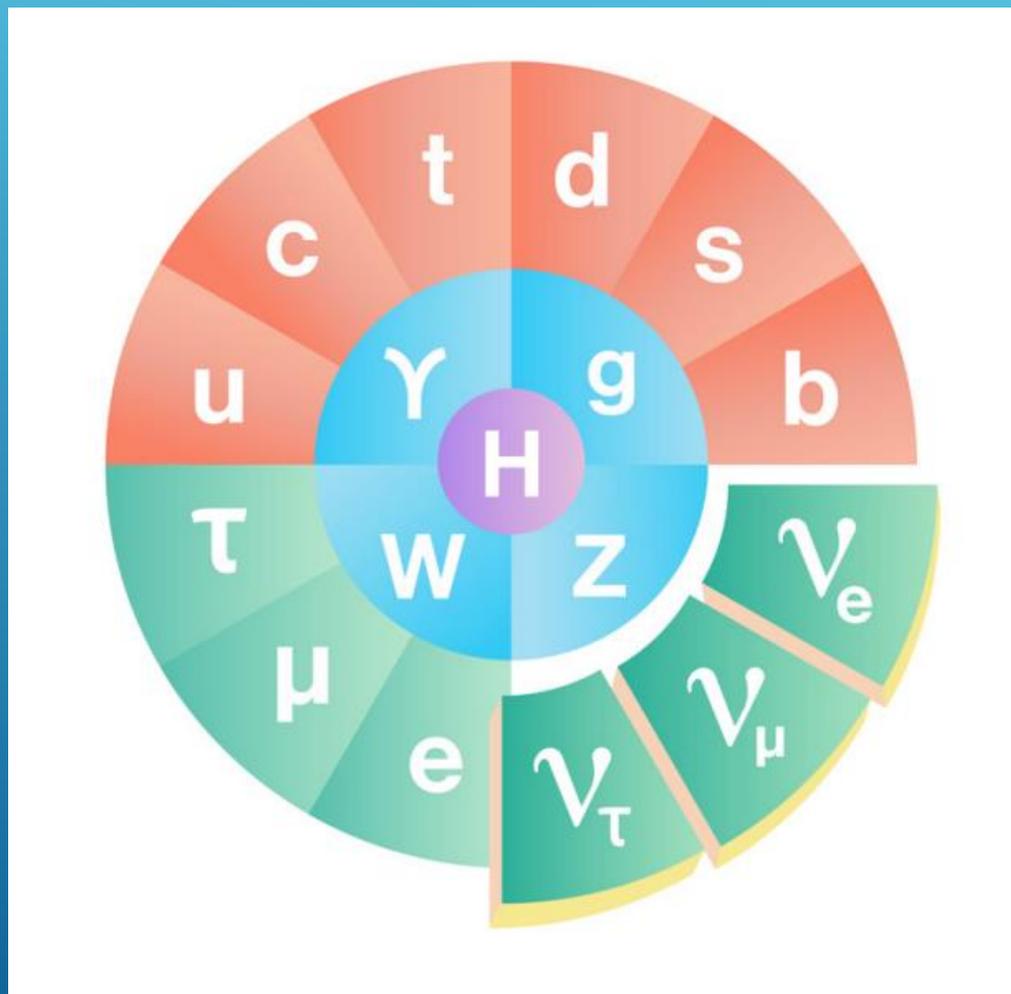


概述

▶ 一种无处不在的，但几乎不与物质相互作用的微观粒子

外
↑
里

组成物质的粒子
传递相互作用的粒子
希格斯粒子

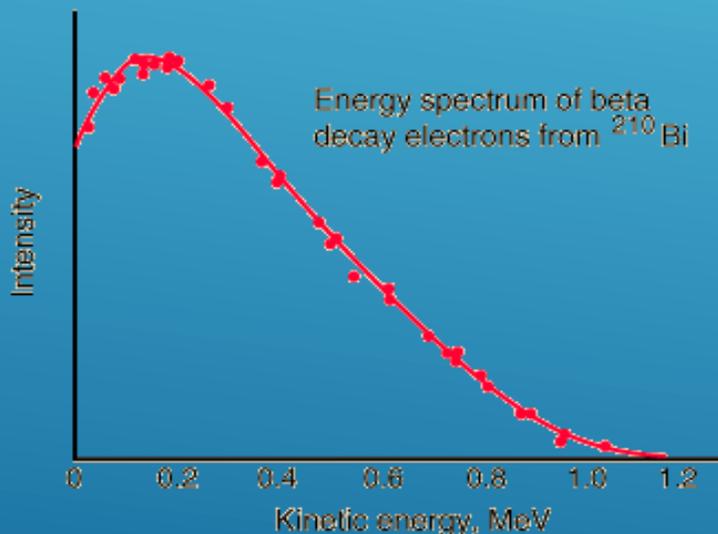


中微子存在的假设

► 1930年

曾经以为的Beta衰变： $n \rightarrow p^+ + e^-$

电子能谱连续且能量不守恒



β 衰变产生连续谱
玻尔：能量不守恒？



中性，
无质量，
相互作用弱

1930年泡利提出中微子存在的假定

现在的Beta衰变： $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$



中微子无处不在

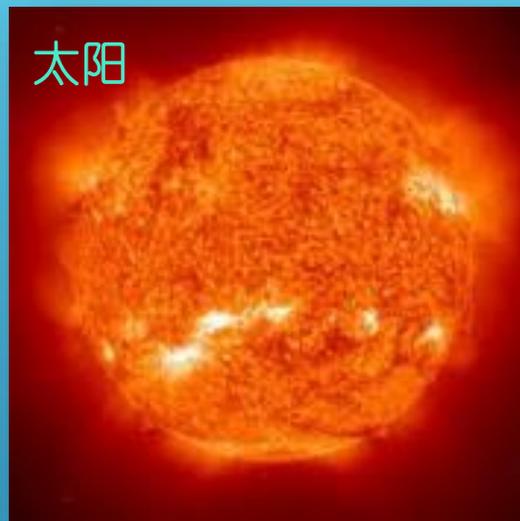
大爆炸



超新星



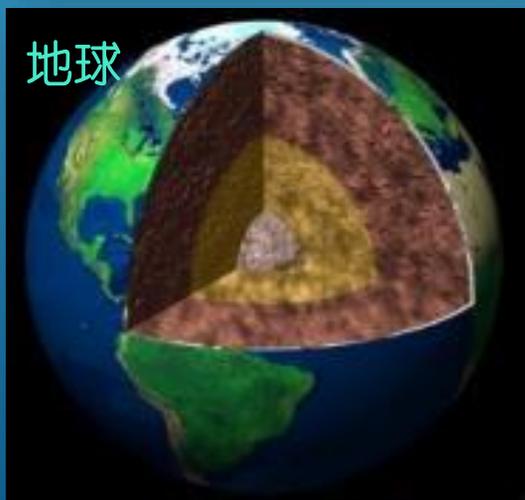
太阳



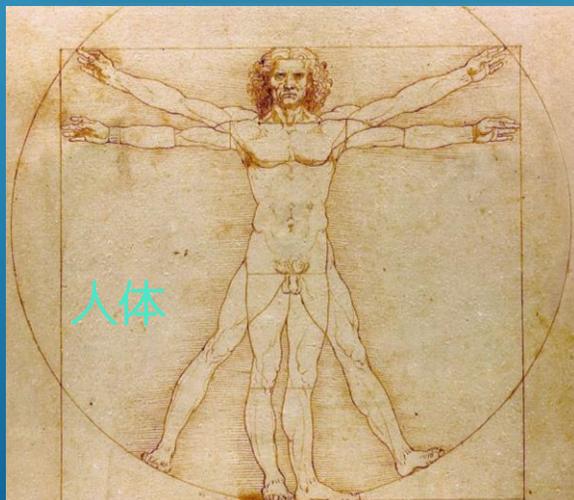
大气层



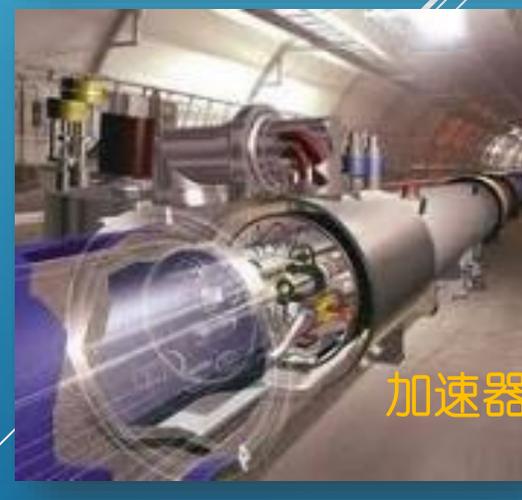
地球



人体



反应堆

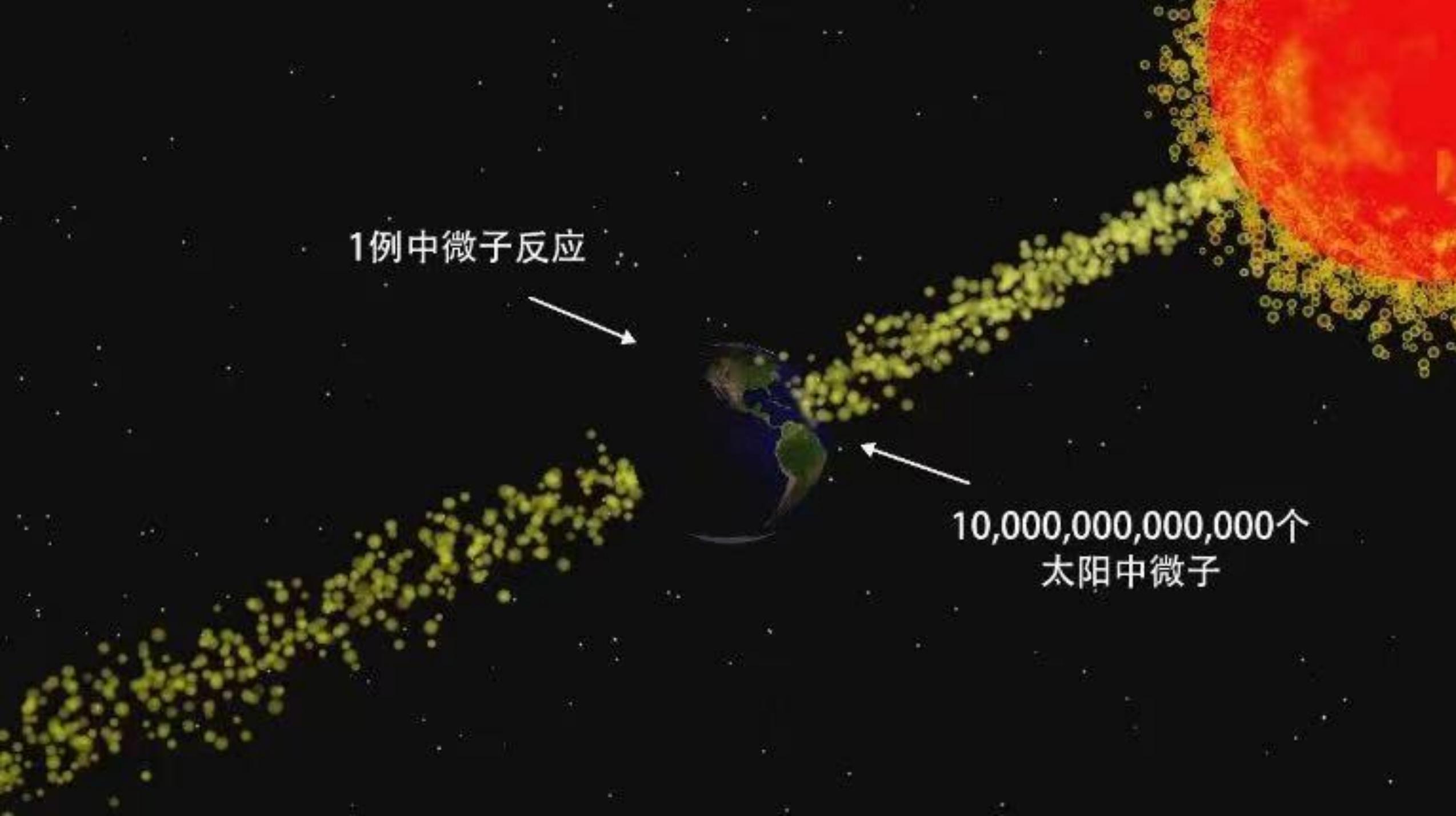


加速器

1例中微子反应



10,000,000,000,000个
太阳中微子

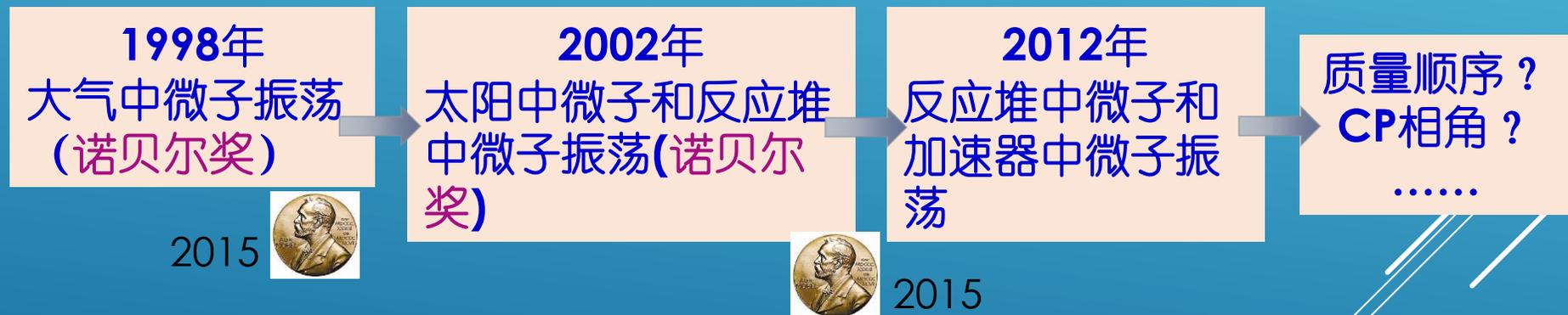


中微子研究历史

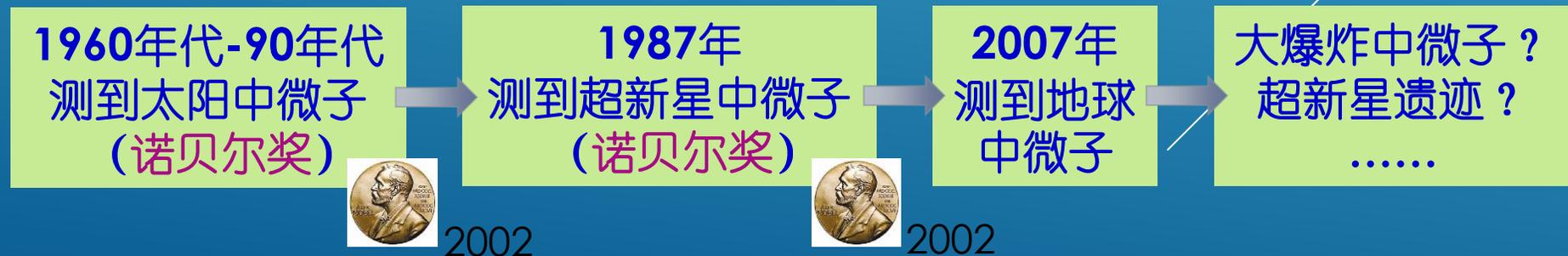
▶ 中微子的发现



▶ 中微子振荡

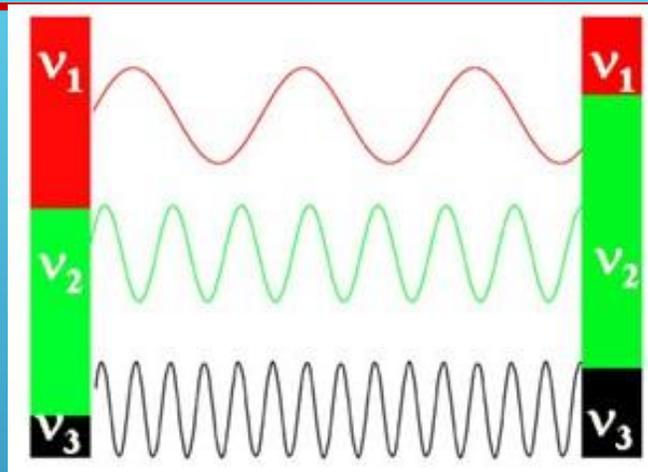


▶ 中微子: 探索自然界的工具



中微子振荡

中微子在传播中将发生振荡，即从一种中微子变成另外一种中微子，
 ⇒ **中微子有非零质量**



▶ 三代中微子振荡由6个振荡参数描述

▶ 已知: $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}, \Delta m_{21}^2, |\Delta m_{32}^2|$

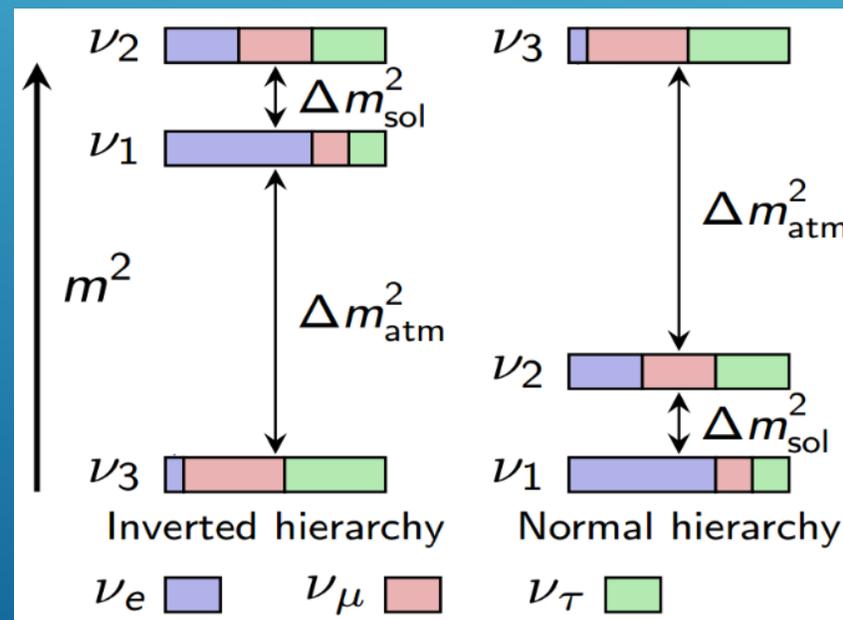
▶ 未知: Δm_{32}^2 的符号

▶ 正质量顺序: “一大两小”

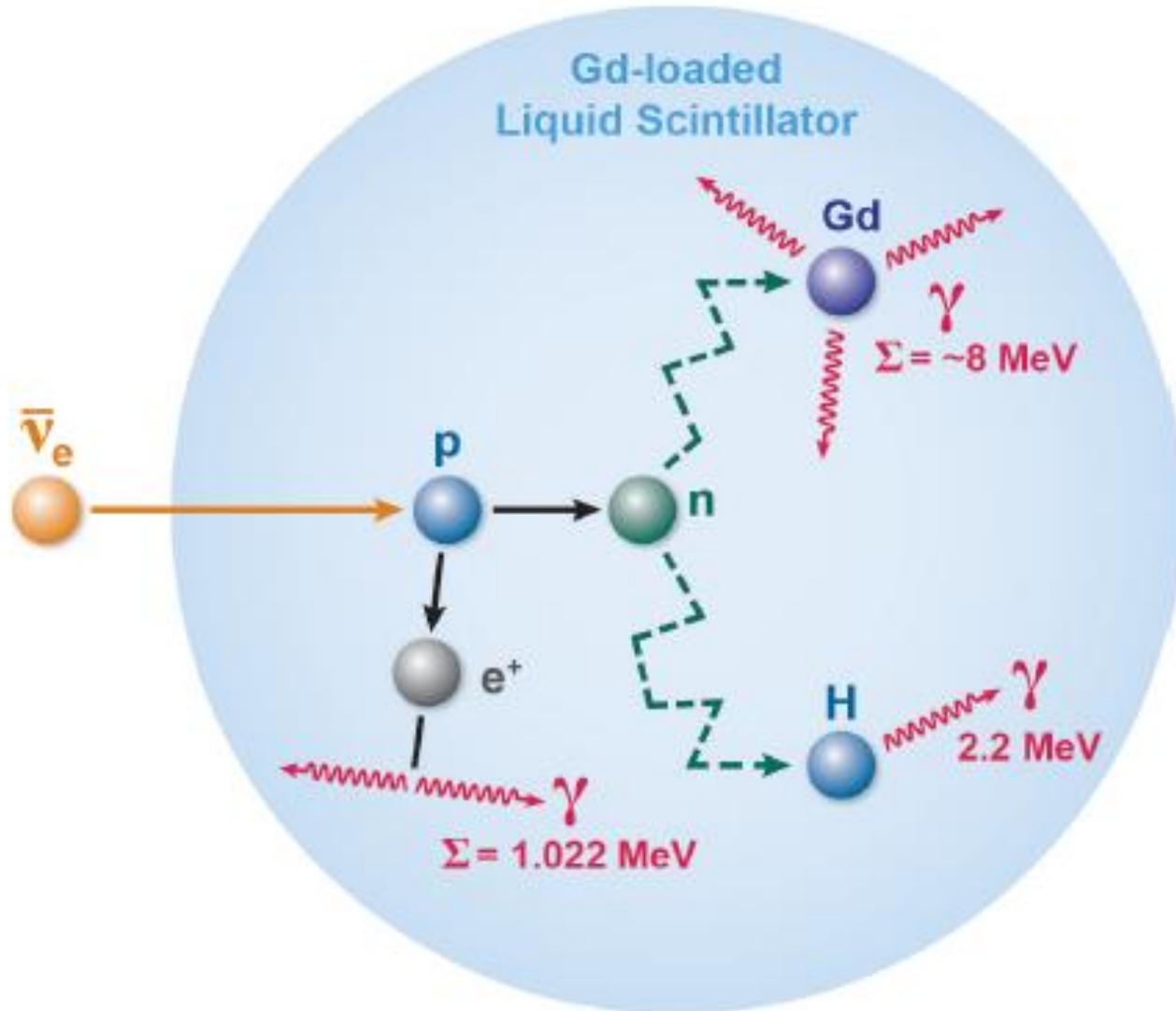
▶ 反质量顺序: “两大一小”

▶ 未知: CP相角

▶ 可能破解“反物质消失之谜”

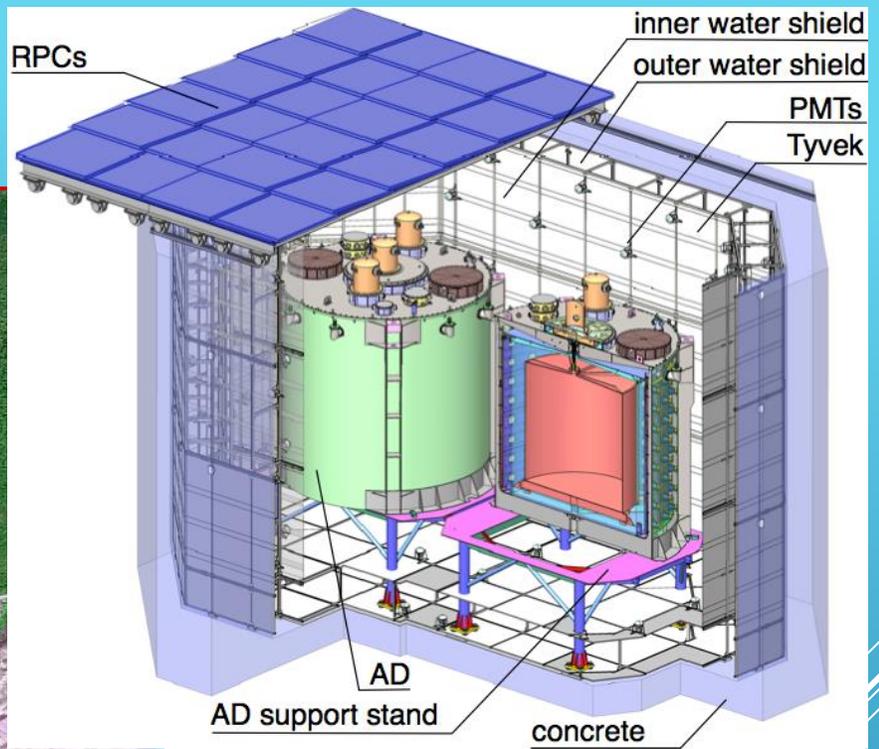


逆β衰变探测原理



- 用富含氢的液体闪烁体捕获反应堆中微子
- 快慢信号符合的方式压低宇宙线同位素本底和放射性本底

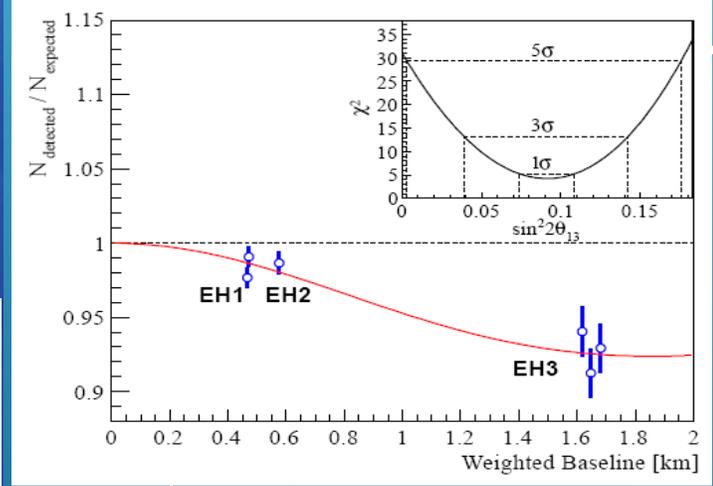
大亚湾中微子实验



大亚湾实验2012.3.8新闻
发布会宣称发现了中微子
的第三种振荡模式

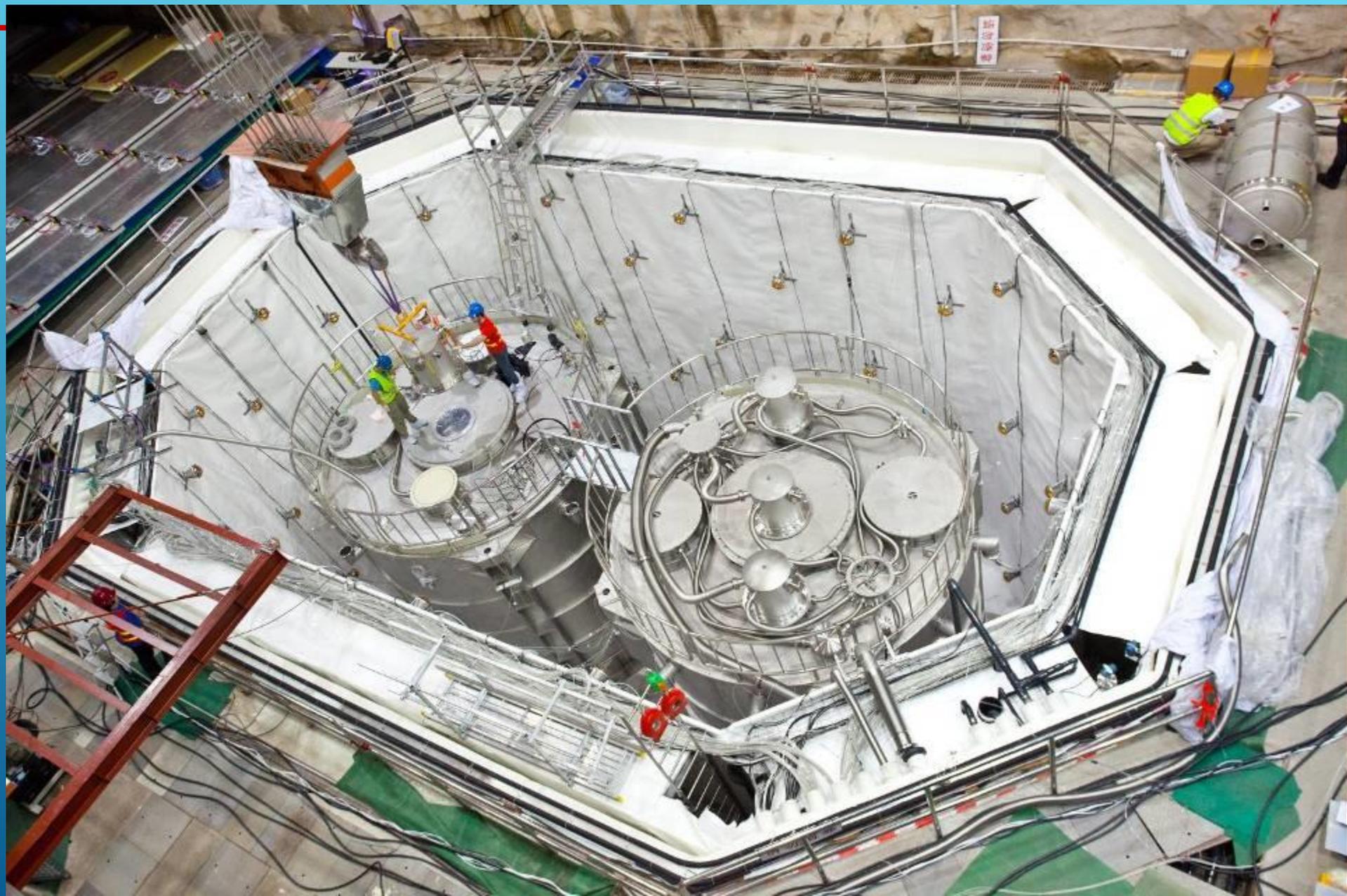
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.005(\text{syst})$$

该发现被美国science杂志评为2012年全球十大科学突破。



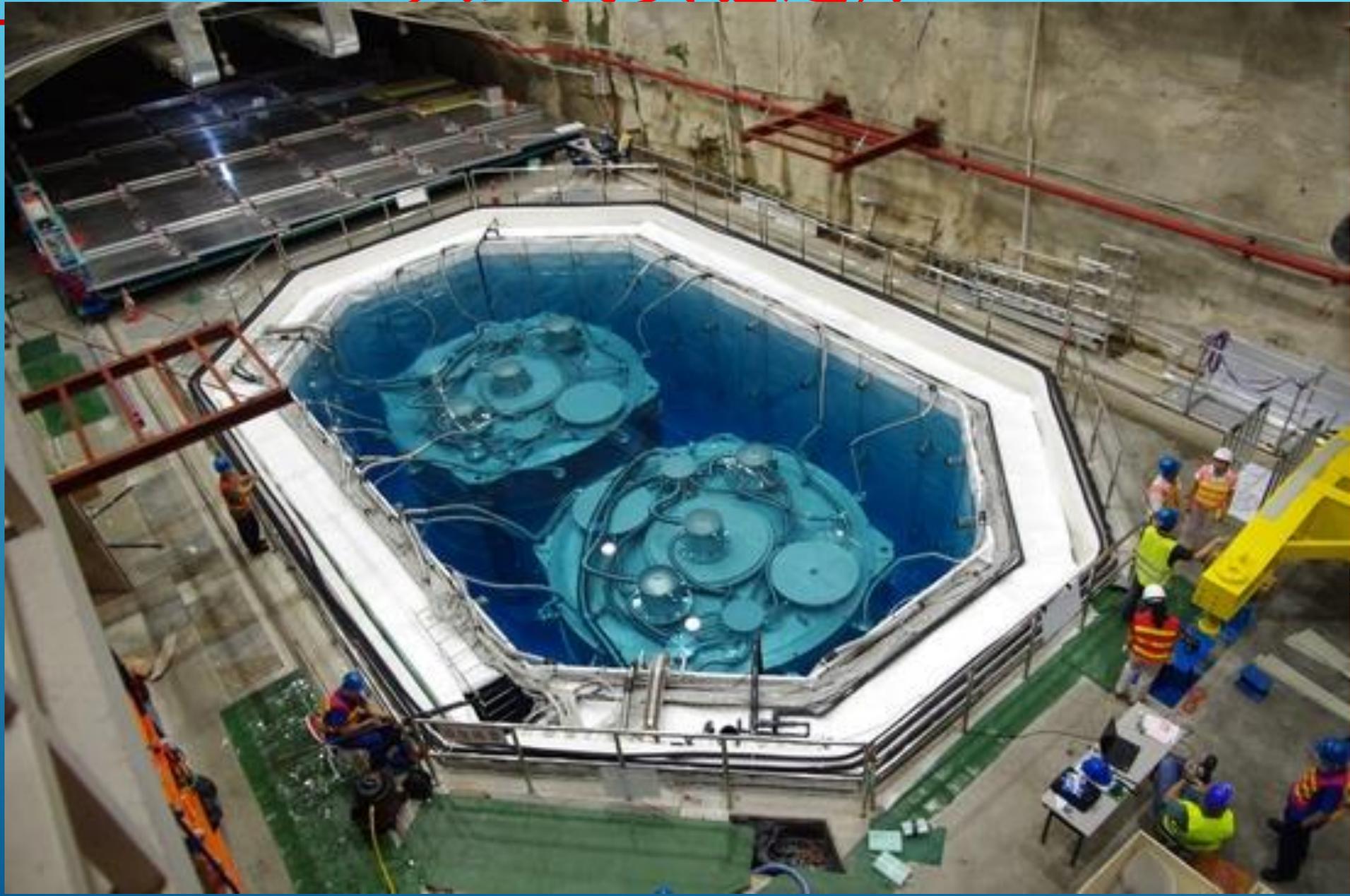


大亚湾实验近厅安装





大亚湾实验近厅

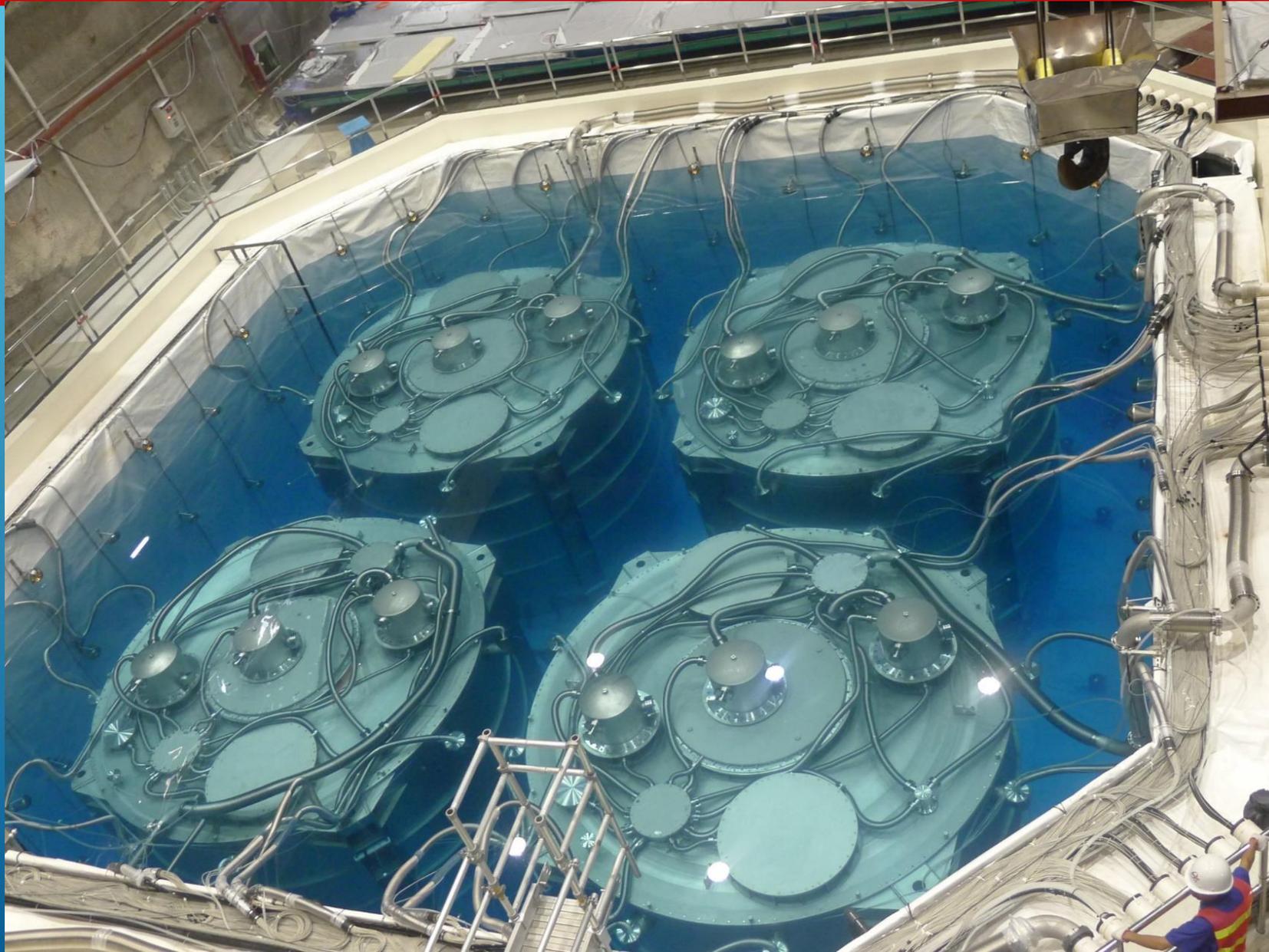




RPC望远镜



大亚湾实验远厅



获奖

2016年基础物理学突破奖

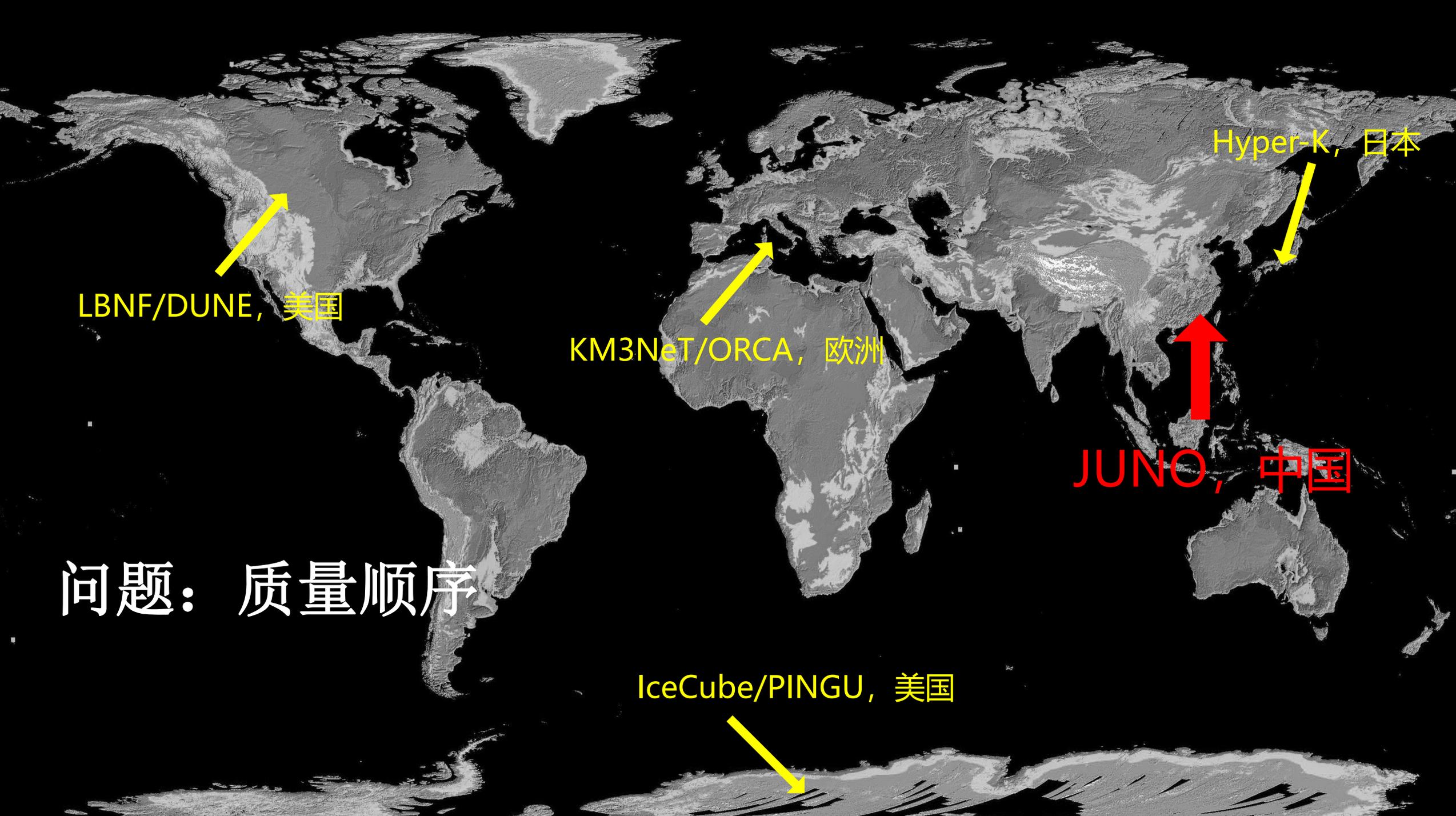


- ▶ 获奖者：5个中微子实验团队，7位领导人，超过1300名研究人员。总奖金300万美元。

国家自然科学一等奖



- ▶ 2017年1月9日，“大亚湾反应堆中微子实验发现的中微子振荡新模式”获得国家自然科学一等奖



Hyper-K, 日本

LBNF/DUNE, 美国

KM3NeT/ORCA, 欧洲

JUNO, 中国

IceCube/PINGU, 美国

问题：质量顺序



反应堆中微子实验

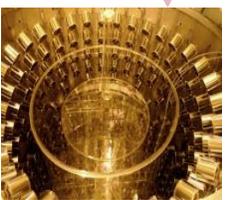
Survival probability P_{sur}

2 km 振荡极大

55 km 振荡极大



中国大亚湾近点



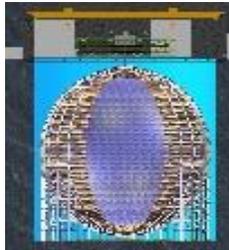
法国Double Chooz
远点
~1.05km



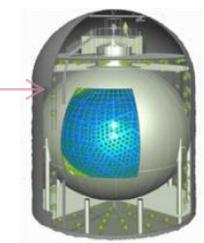
韩国RENO远点
~1.44km



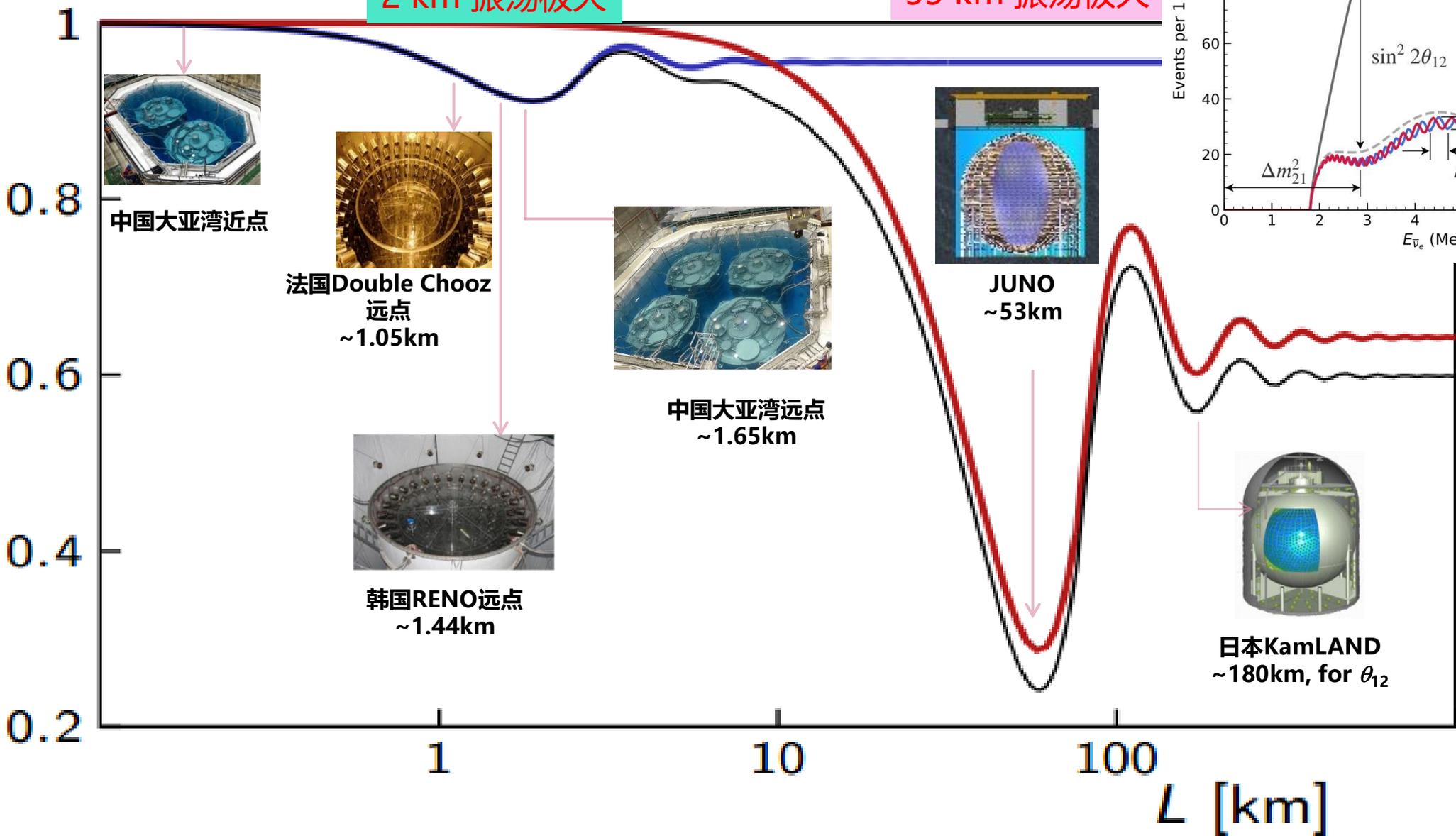
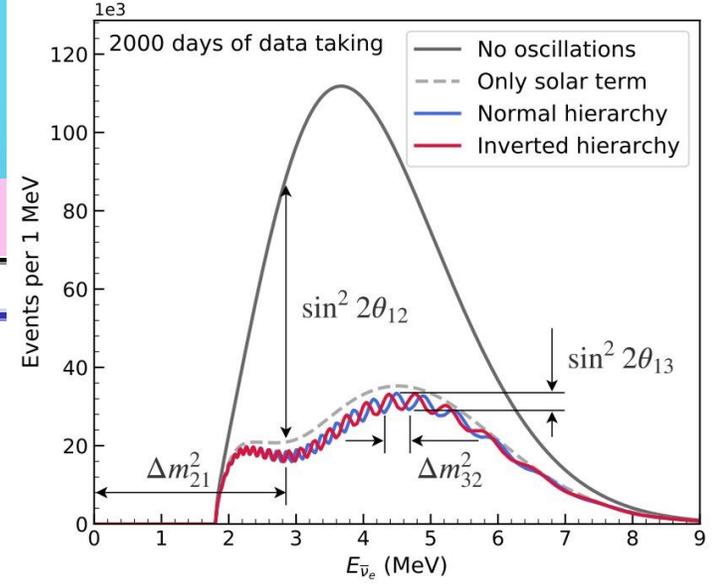
中国大亚湾远点
~1.65km



JUNO
~53km



日本KamLAND
~180km, for θ_{12}

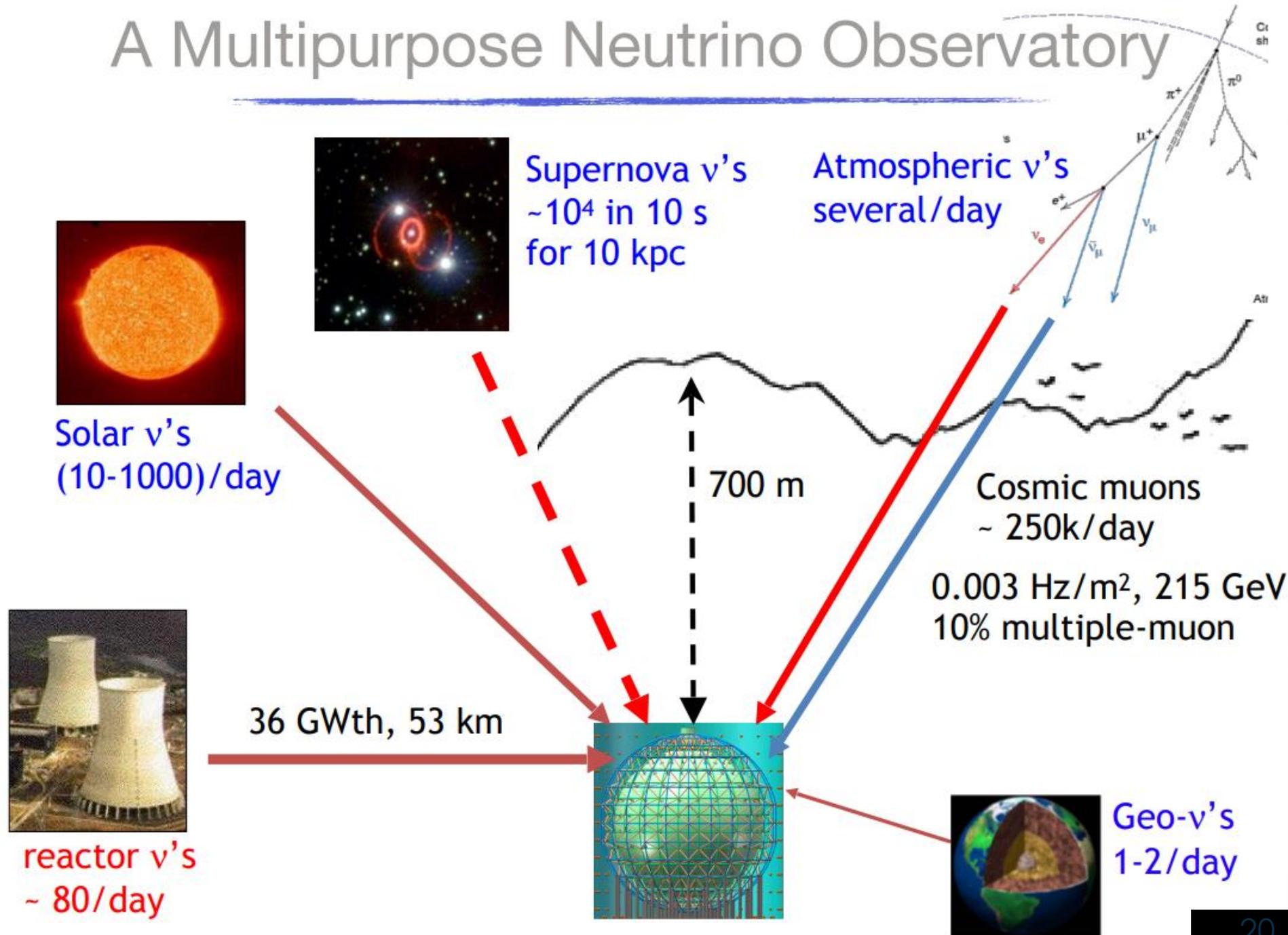


实验点选取





A Multipurpose Neutrino Observatory



江门国际合作组

75个合作单位, 715 名科学家
合作组发言人及首席科学家:
王贻芳, Marcos Dracos



欧洲 (29)

法国 (5)

APC Paris
CPPM-Marseille
IPHC Strasbourg
LLR Paris
Subatech Nantes

俄罗斯 (3)

JINR
INR Moscow
MSU

芬兰 (1)

U Oulu

英国 (1)

U. Warwick

意大利 (8)

INFN-Frascati
INFN-Ferrara
INFN-Milano
INFN-Milano
Bicocca
INFN-Padova
INFN-Perugia
INFN-Roma 3
INFN
Catania

捷克 (1)

Charles U

德国 (6)

RWTH Aachen
TUM
U Hamburg
U Mainz
U Tuebingen
FZJ- IKP Jülich

比利时 (1)

ULB

亚美尼亚 (1)

YPI

拉脱维亚 (1)

IECS

斯洛伐克 (1)

FMPICU

泰国 (3)

SUT

NARIT

PPRLCU

巴基斯坦 (1)

PINSTECH

亚洲 (39)

中国 (35)

北师大
重庆大学
原子能院
东莞理工
广西大学
哈工大
高能物理所
吉林大学
空间环境工程
成都理工
郑州大学
南华大学

南京大学
南开大学
交通大学(台)
台湾大学(台)
联合大学(台)
华北电力
北京大学
山东大学
上海交大
四川大学
地球物理所

中山大学
清华大学
国科大
中科大
武汉大学
五邑大学
厦门大学
西安交大
暨南大学
国防科大
地质大学
东华理工

美洲 (6)

美国 (2)

UMD-G
UC Irvine
巴西 (2)
PUC
UEL

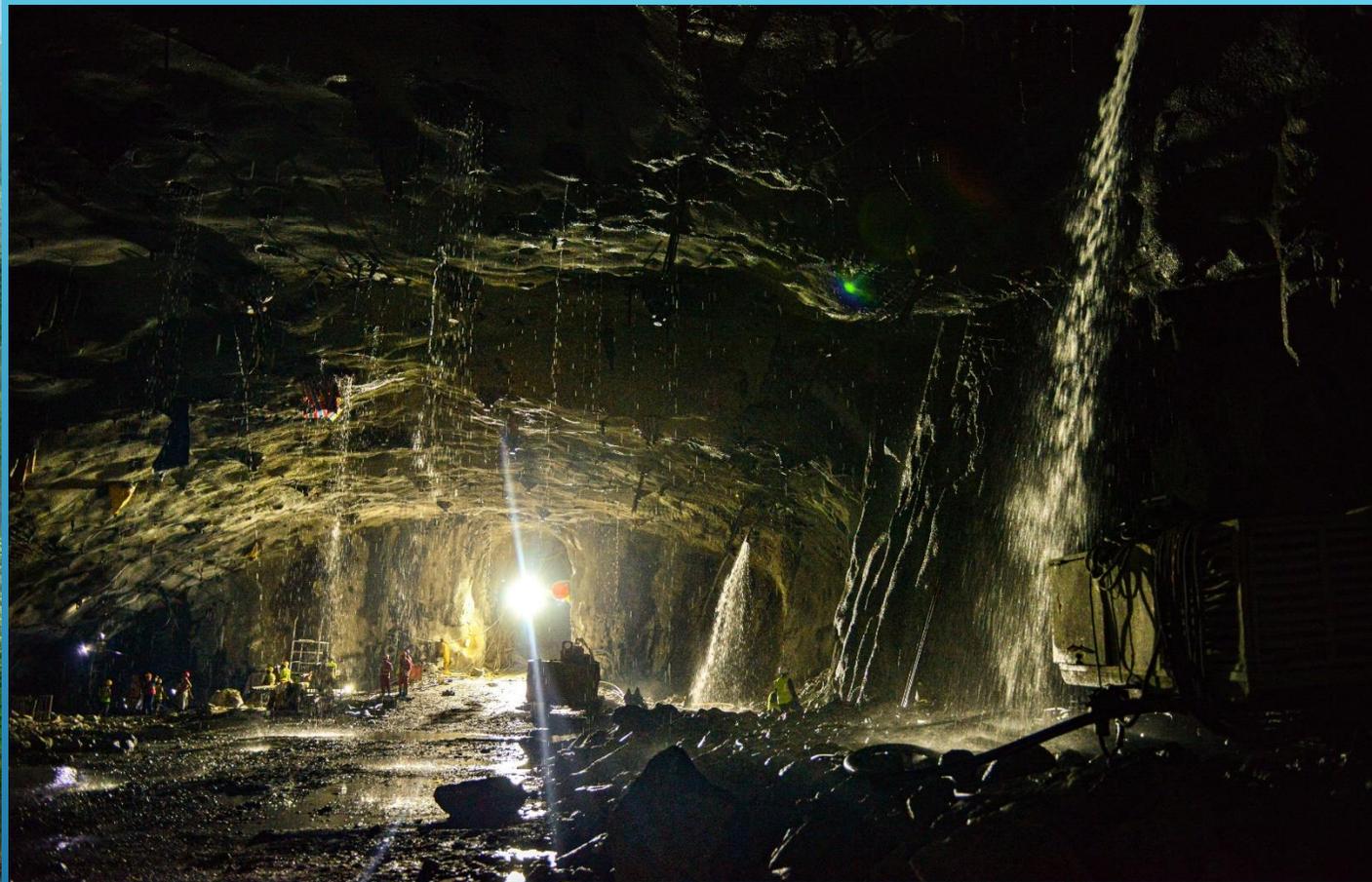
智利 (2)

PCUC
SAPHIR
UNAB

困难重重



理想



到处都是水

2014

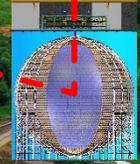


2020



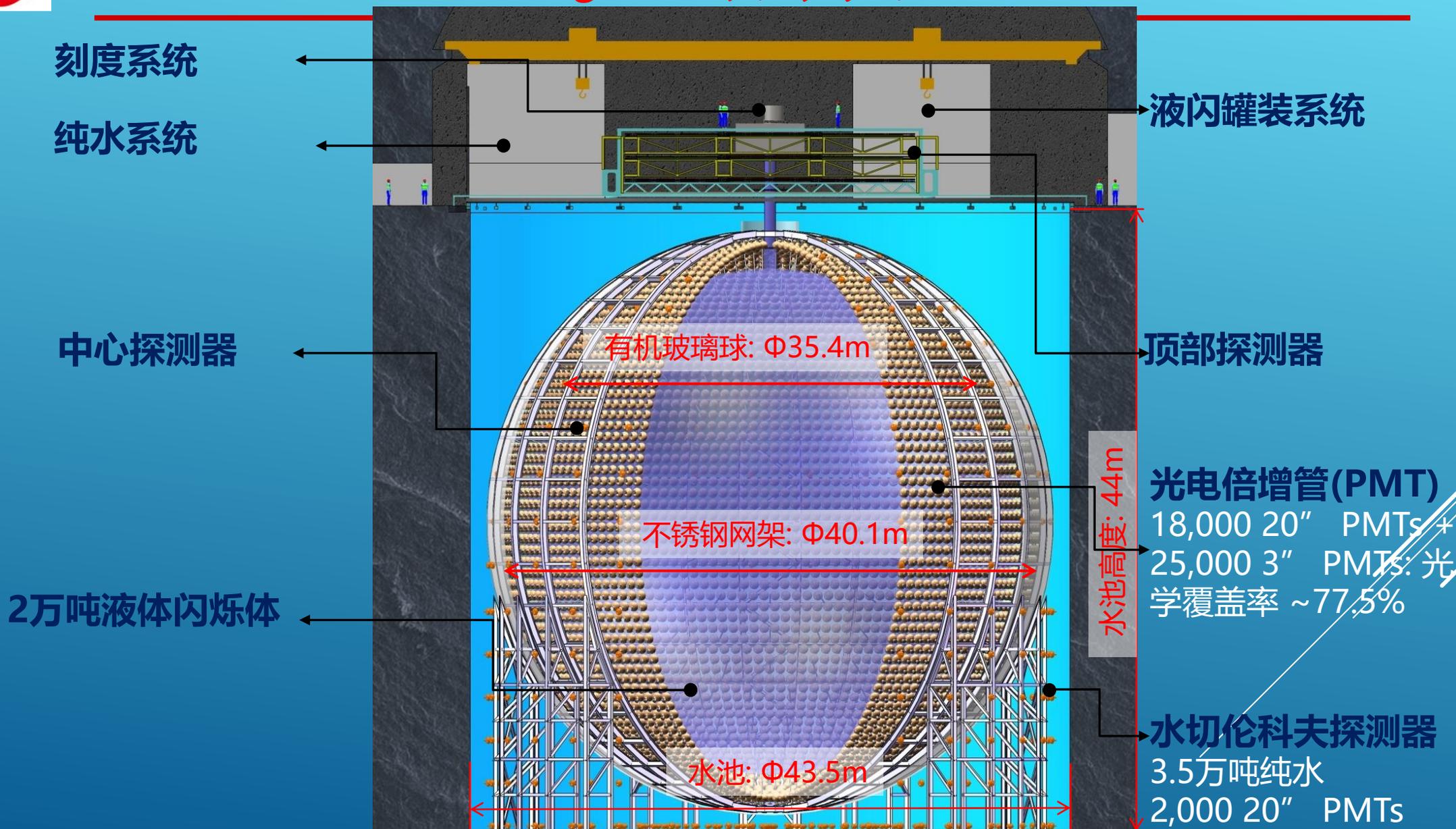


山下700米处





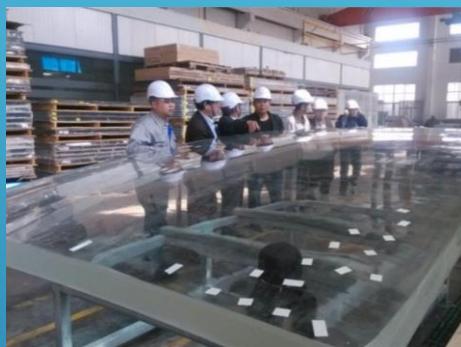
JUNO探测器



JUNO探测器技术挑战

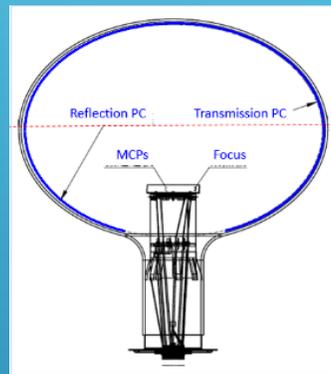
◆ 技术挑战一：超大型有机玻璃球

- ⇒ 直径35.4m
- ⇒ 承受3000吨内外压力差



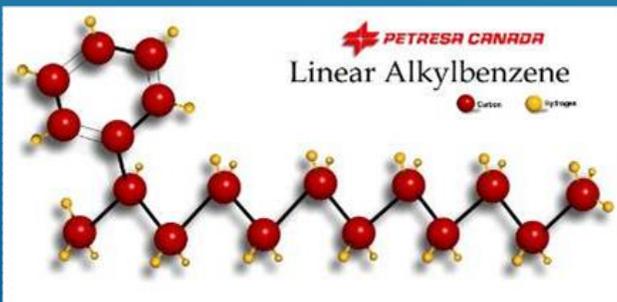
◆ 技术挑战二：新型光电倍增管

- ⇒ 直径508mm
- ⇒ 高量子效率，低本底



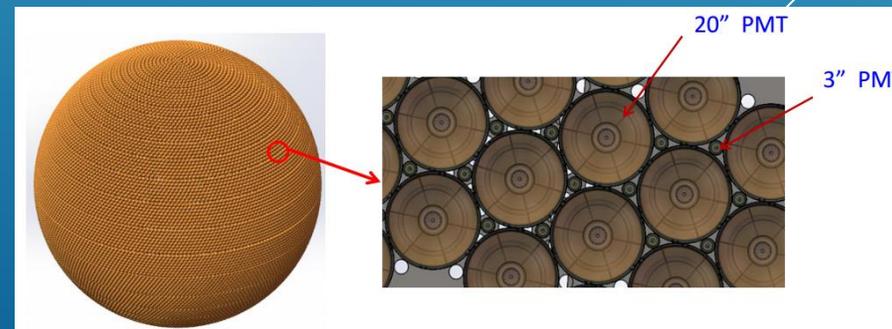
◆ 技术挑战三：高透明度液体闪烁体

- ⇒ 衰减长度 > 20m @ 430nm
- ⇒ 严格控制天然放射性本底

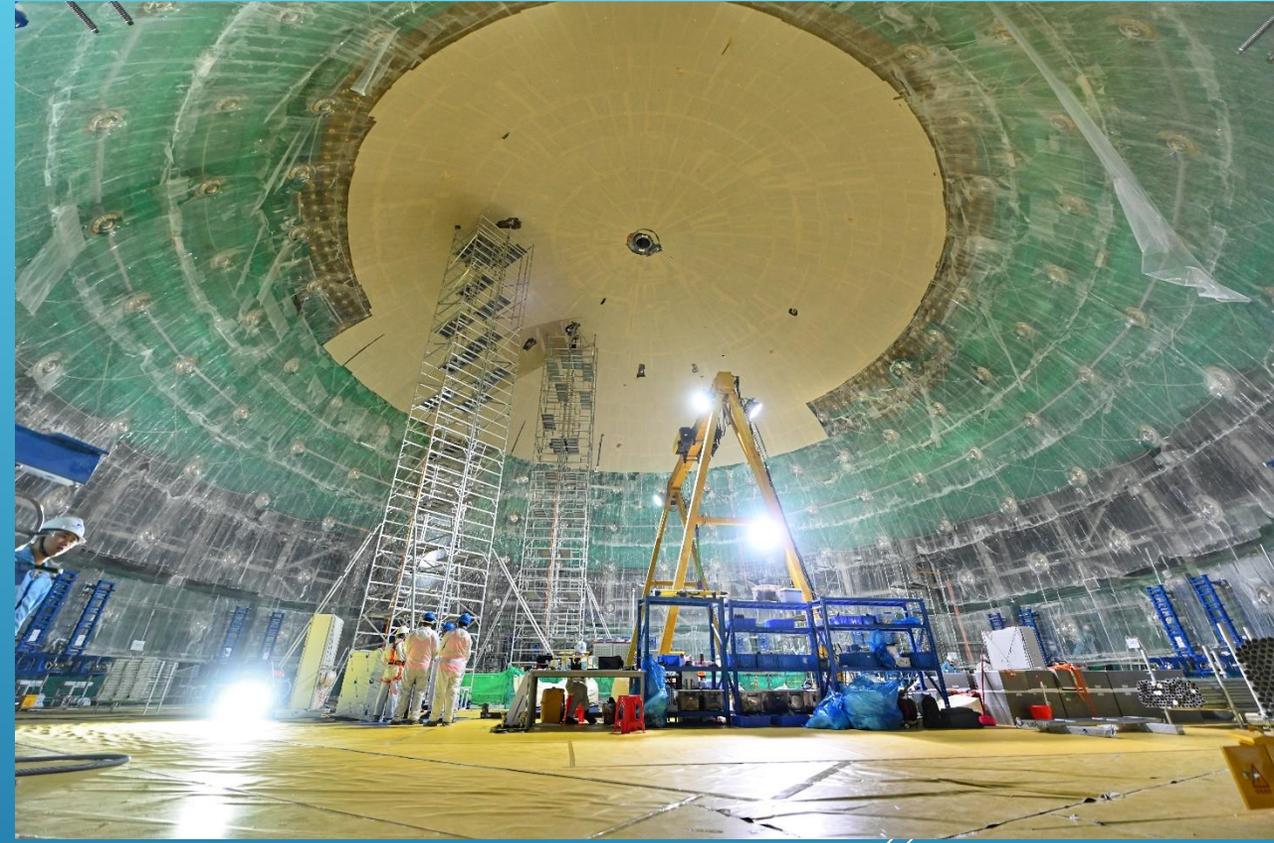
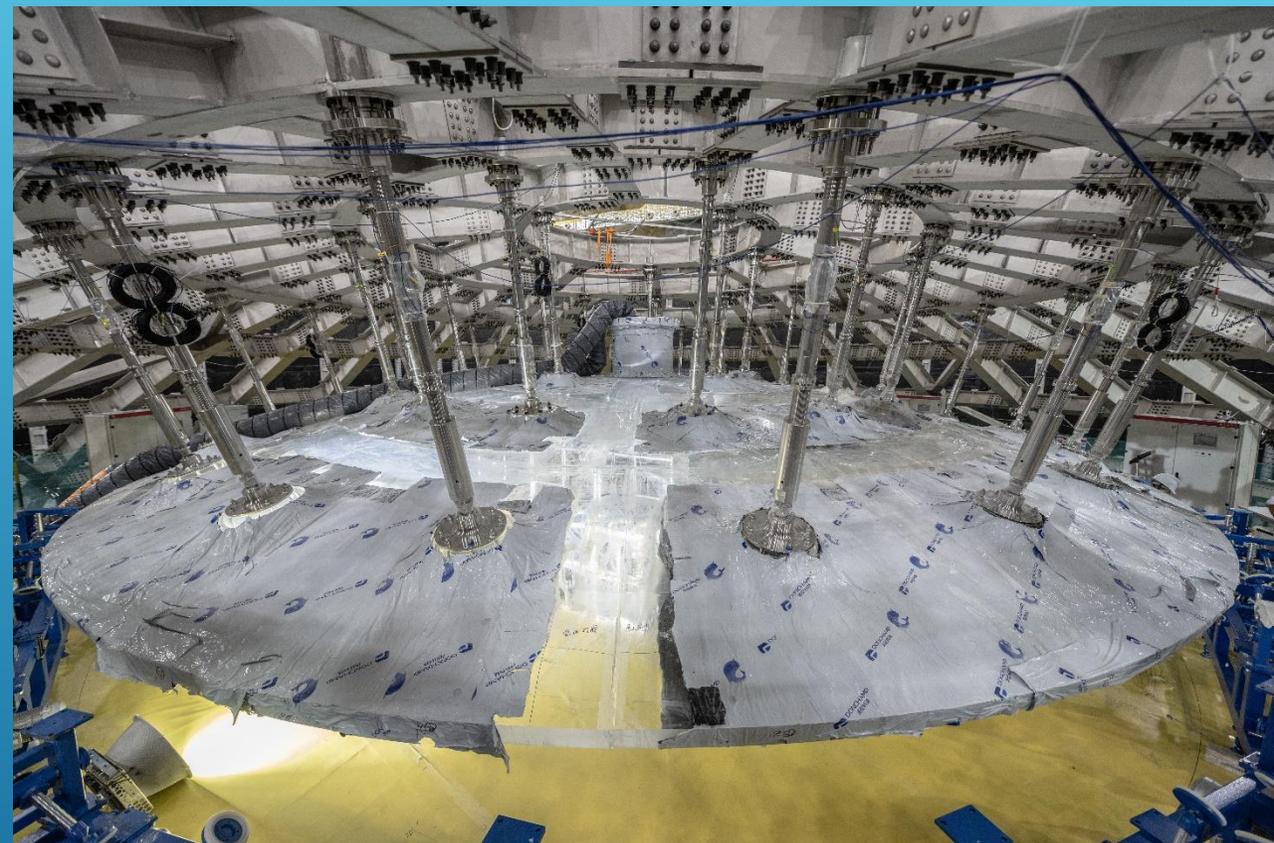


◆ 技术挑战四：>75%光学覆盖率

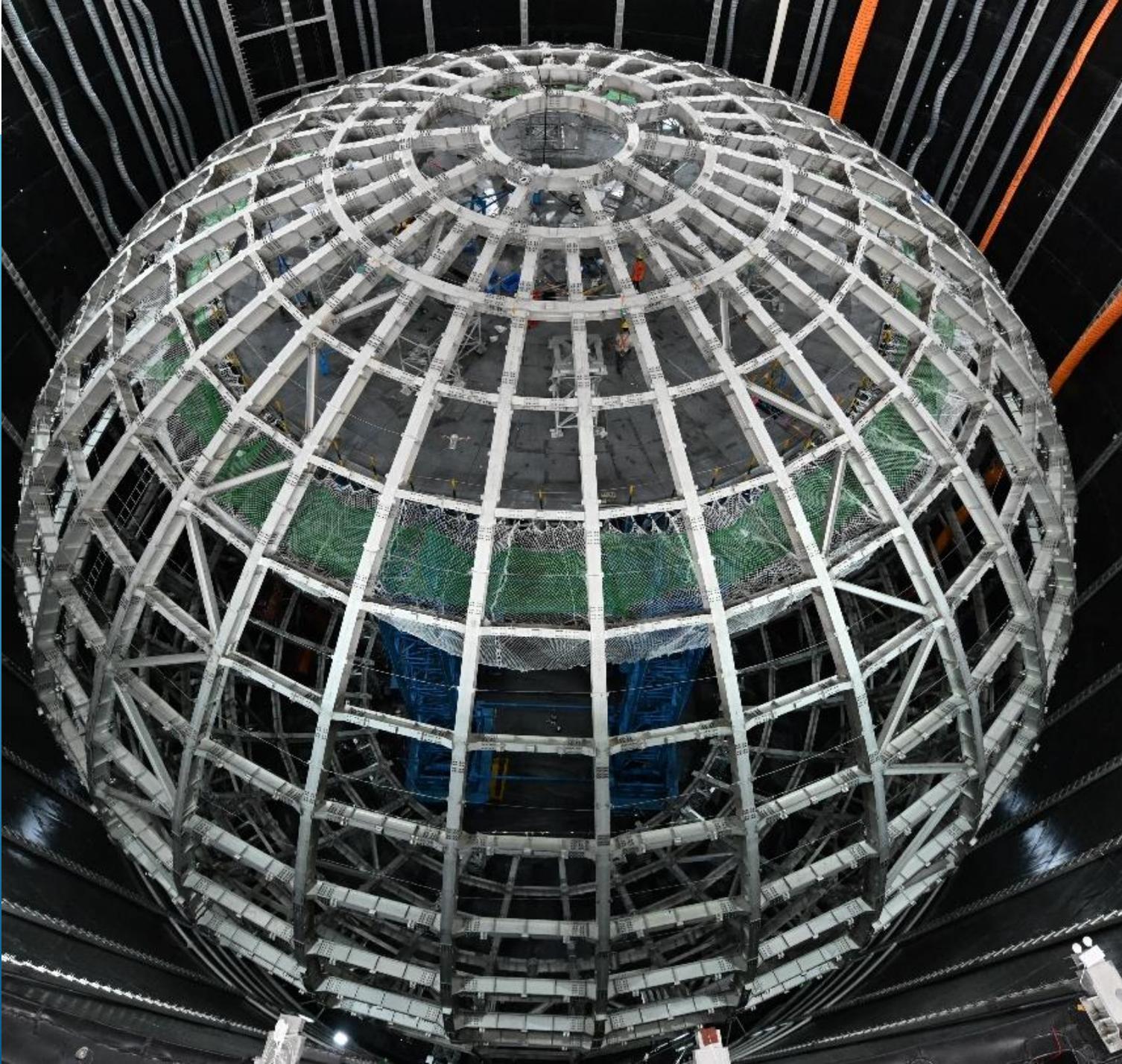
- ⇒ 光电倍增管紧密排布
- ⇒ 大小光电倍增管构成双量能器



国际最大的有机玻璃容器安装中



- ▶ 有机玻璃总重600吨
- ▶ 已拼装12/23层。
- ▶ 很多都是非标的，没有参考标准，摸索前行。



国内最大的不 锈钢网壳

- ▶ 安装基本完成
- ▶ 1000吨，14层楼高
- ▶ 不能有焊接，全部铆接
- ▶ 安装精度要求高，mm量级

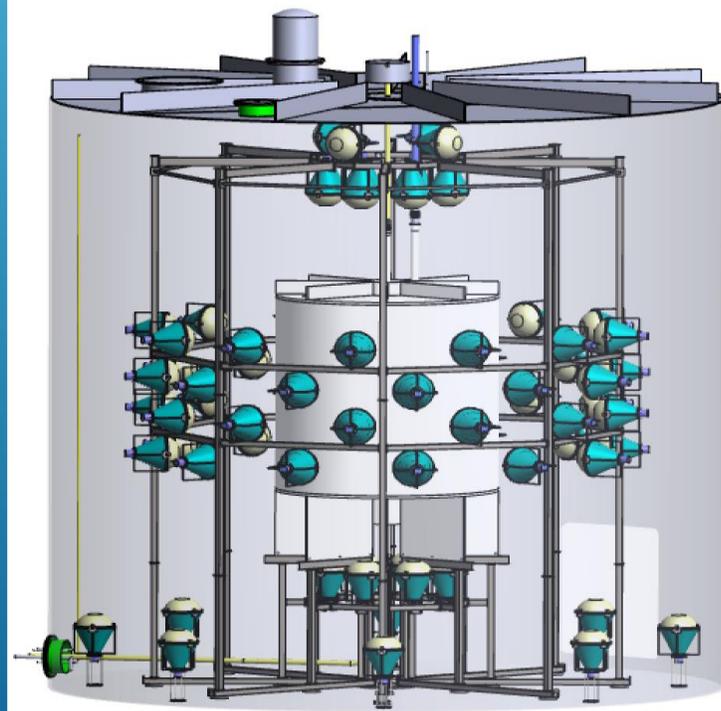


国际上最透明的液体闪烁体

- ▶ 光衰减长度>20米
- ▶ 放射性本底极低， 10^{-15} - 10^{-17} g/g
- ▶ 6个月内完成2万吨液闪的批生产，~6-7吨/小时（国际最大1吨/小时）
- ▶ 质量检测极难，需自行建立检测方法，研制检测设备
- ▶ 过滤、蒸馏、混制、萃取、蒸汽剥离、灌装，成千上万个接头、法兰、不能有一丁点泄露。
- ▶ 各个系统基本就位，安装、调试。



✓ 成功研制液闪中型纯化系统，利用大亚湾的一个探测器，完成20吨液闪的置换、纯化实验，衰减长度超过20米，为国际最好水平。





新型光电倍增管研制成功

▶ 难度与挑战:

- ▶ 国内从未做过大尺寸(>5吋)PMT，日本滨松长期垄断，价格昂贵。
- ▶ 研制世界上最高量子效率的20吋静电聚焦型MCP-PMT
- ▶ 国际同行研究类似产品，耗资巨大，最终失败!

▶ 重大成果: 研制成功20吋高量子效率低本底MCP-PMT，并实现产业化

- ▶ 组建产学研联合攻关合作组，经过多年努力，研制成功，**打破日本垄断**，探测效率平均达到30%。
- ▶ 完全自主知识产权的生产线研制成功，**国际领先**。完成了2万支PMT生产，攻克一系列技术难题：玻壳本底控制、峰谷比改善、分辨率改善、解决波形输出失真。



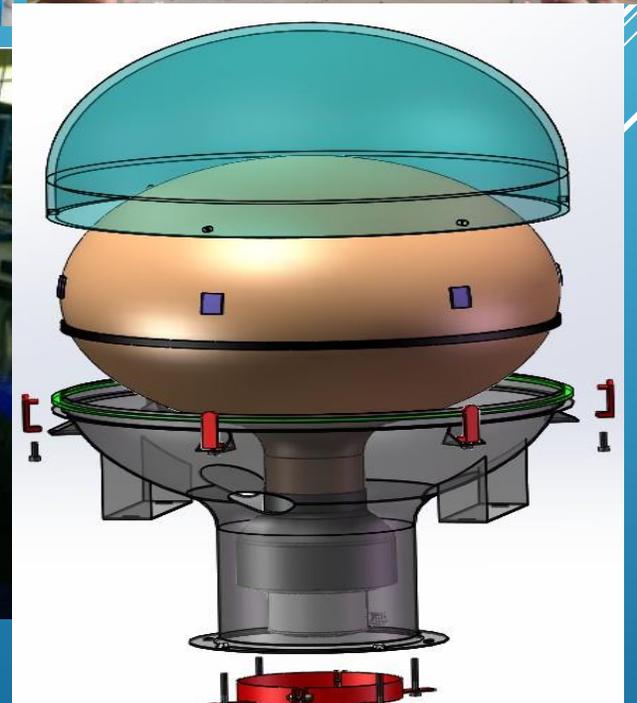
PMT测试存储@中山泛亚



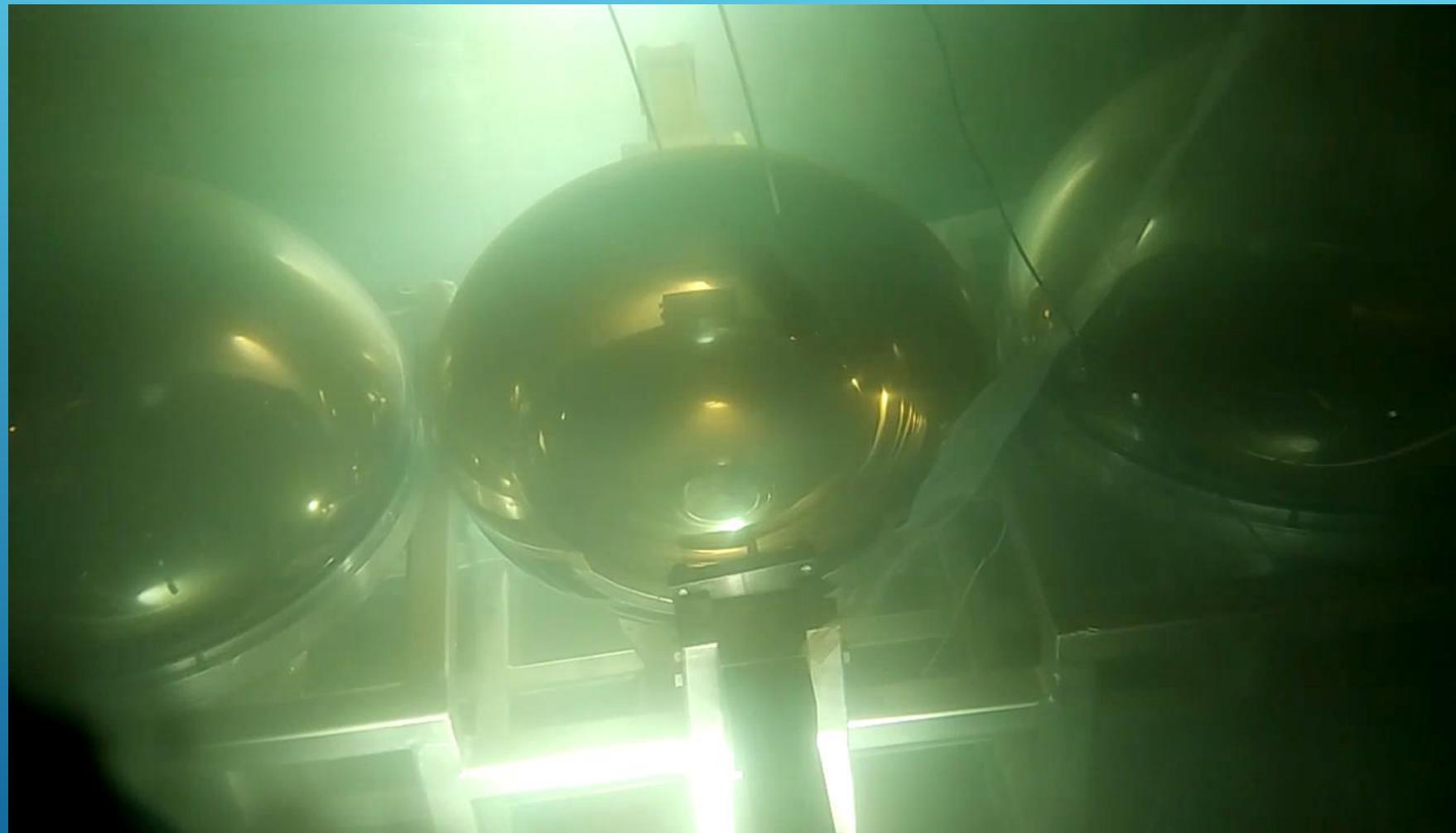
高透明PMT保护罩



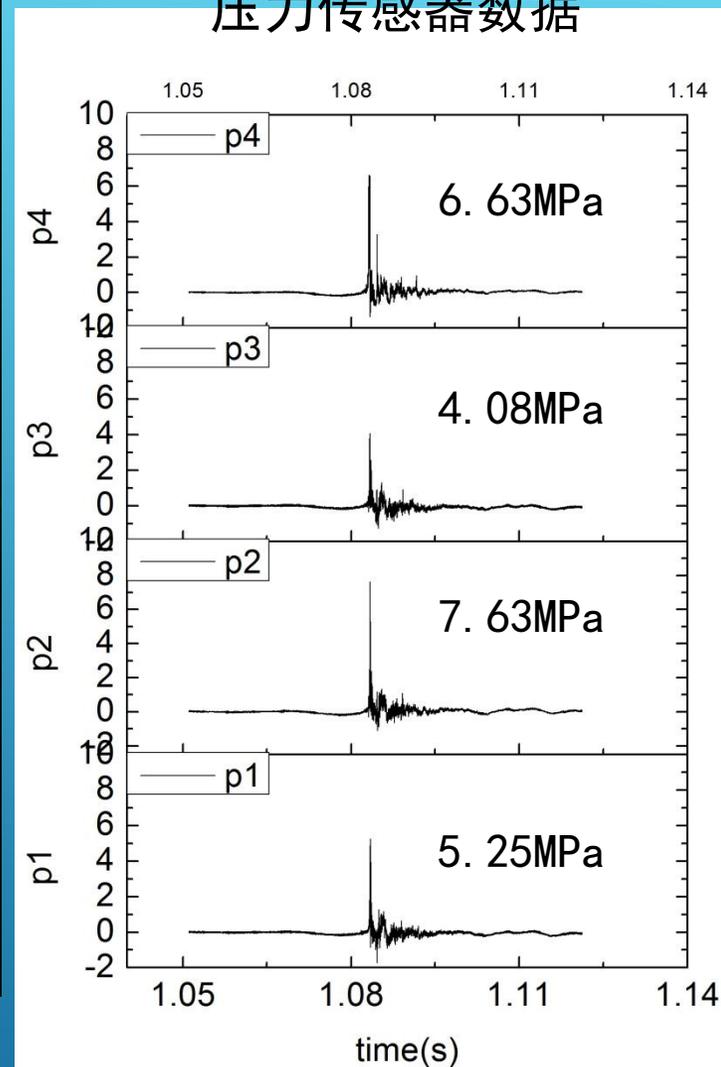
防水封装



PMT防爆罩水压实验



压力传感器数据



▶ 每种实验都包含着成百上千次的失败和成功，各种研究。

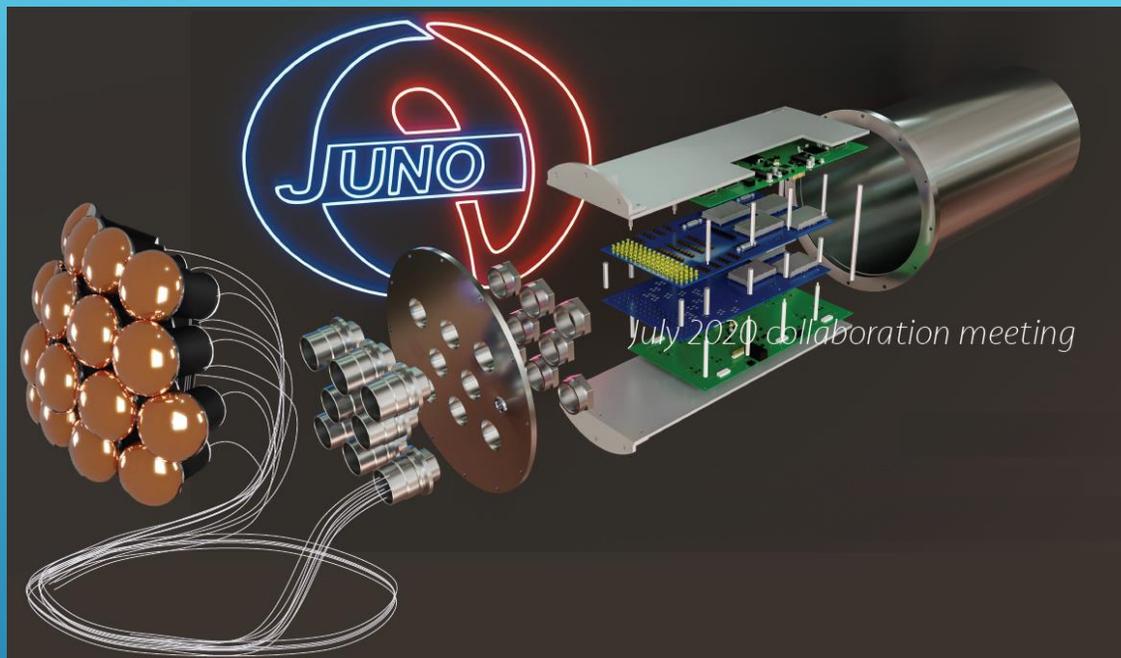
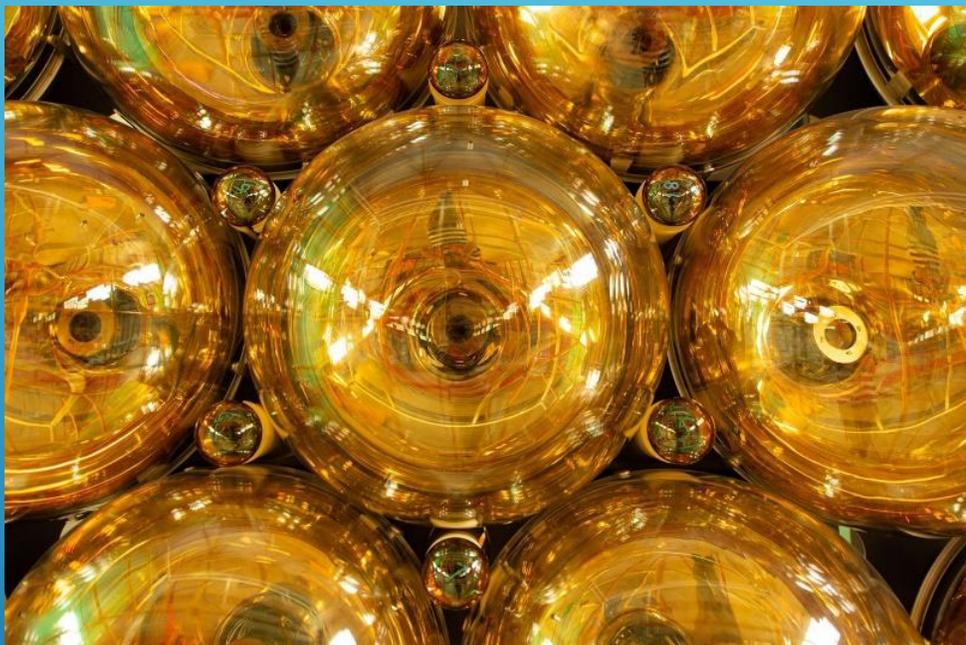
20英寸光电倍增管安装进行



▶ 已装
~30%

小光电倍增管（SPMT）系统

- 大小PMT构成双量能器，提高探测器的能量分辨率。

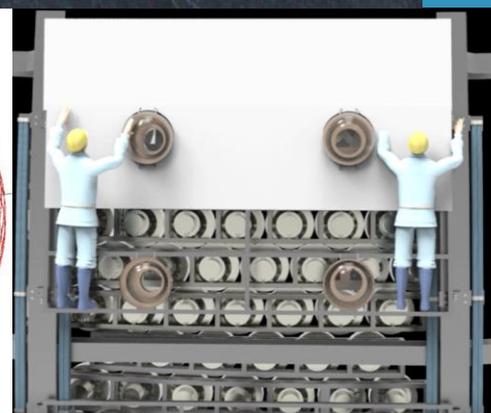
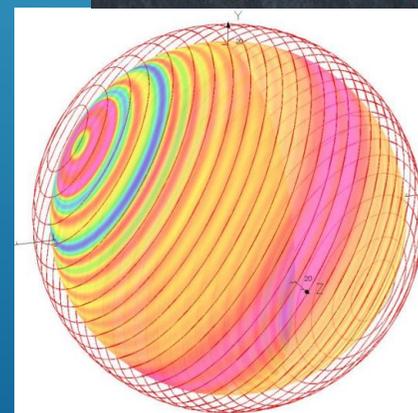
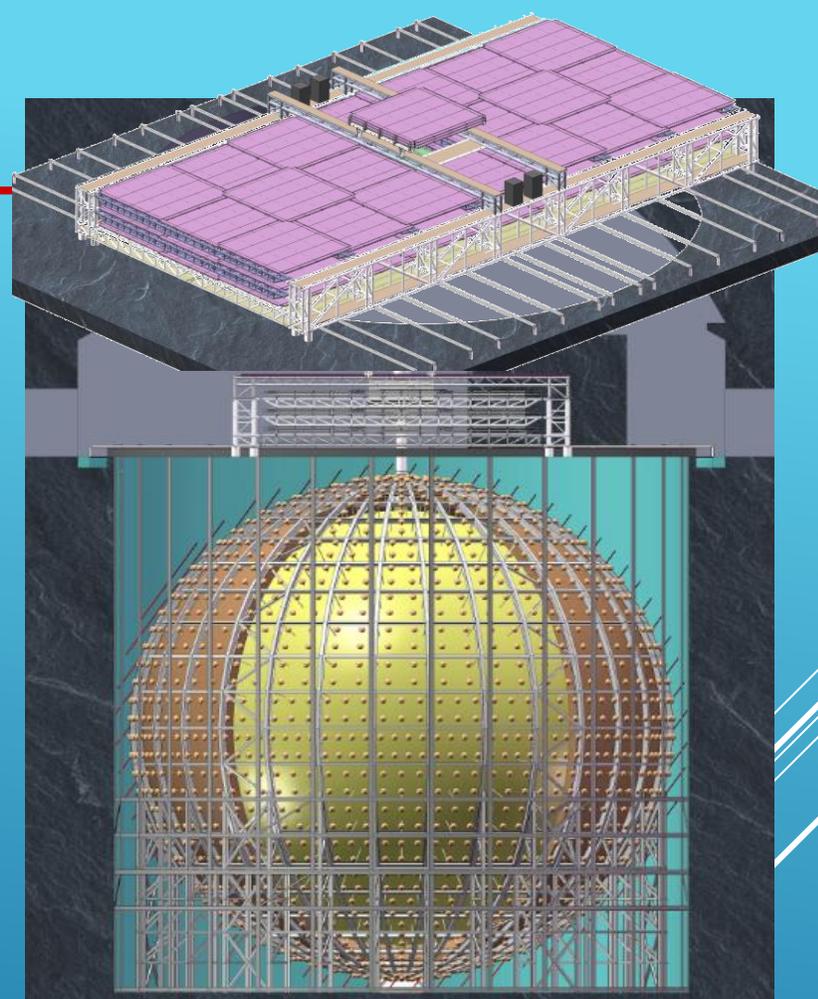


- 26000支PMT批量生产测试完成，
- ~9k支在现场，17k支在广西大学存储。
- 已安装5600/25600 ~ 22%
- 中、法、智利、美、台湾地区、俄、意



水契伦科夫探测器

- ▶ 要求水循环系统在中心探测器40米尺度上水温变化小于1度 (21 ± 1) °C
- ▶ 氦气含量要求比大亚湾低1000倍，水池内衬要求40米尺度上防水防氦
- ▶ 探测器配置：
 - ▶ 3.5万吨超纯水，2400个20英寸PMT
 - ▶ **地磁线圈**：屏蔽地磁场，剩磁小于10%
 - ▶ 开创性应用**嵌钉土工膜**于中微子探测实验
 - ▶ 反光膜Tyvek覆盖钢架表面，将来是个白色的池子。
 - ▶ 水池cover：氮气密封，保持水质。
 - ▶ 顶部径迹探测器测量宇宙线。

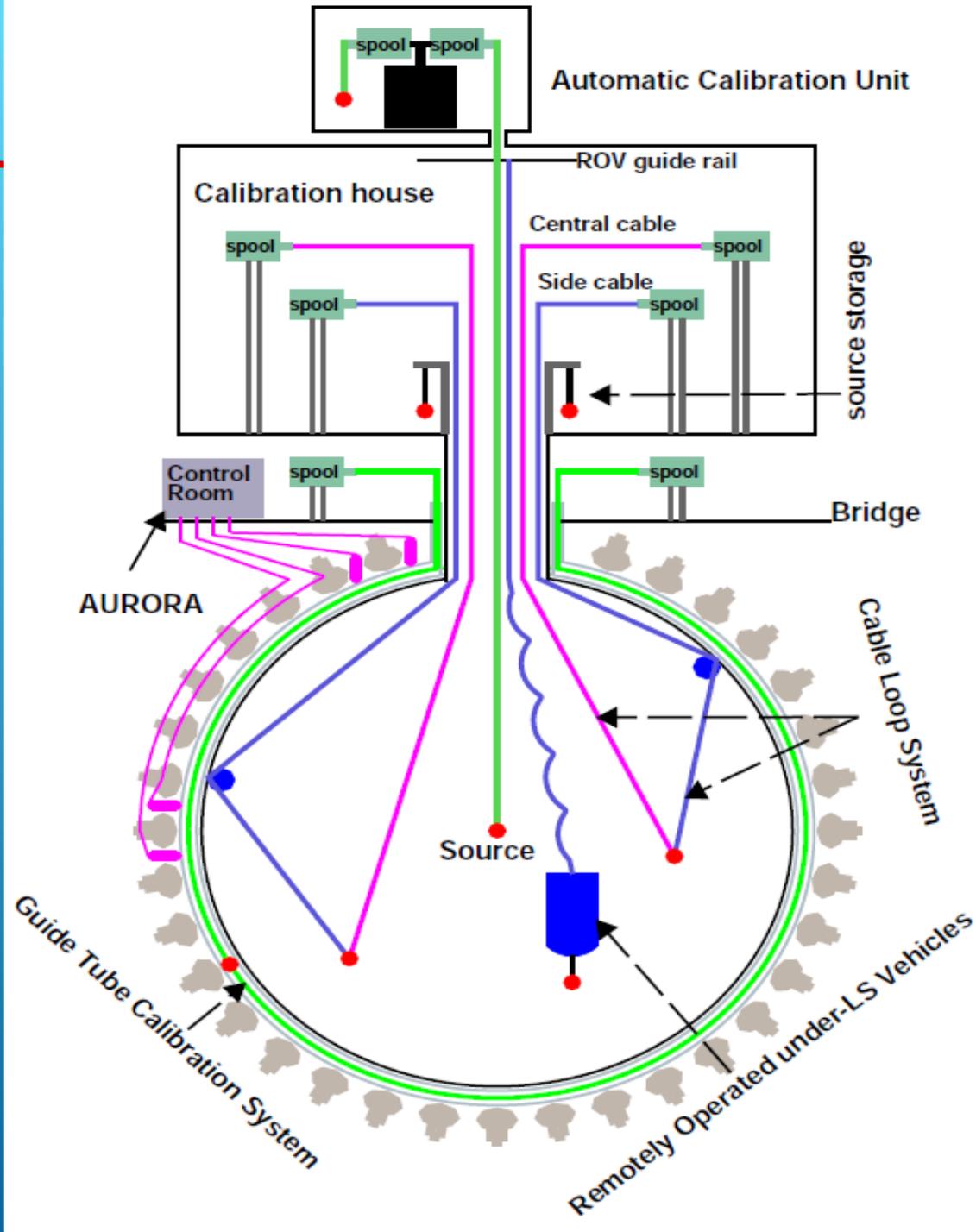




刻度系统

- 1D: Automatic Calibration Unit (ACU)
- 2D: Cable Loop System (CLS) and Guide Tube Calibration System (GTCS)
- 3D: Remotely Operated Vehicle (ROV)
- **Auxiliary systems:** Calibration house, Ultrasonic Sensor System (USS), CCD and A Unit for Researching Online the LSc tRAnsparency (AURORA)
 - ▶ 主要部件生产完成
 - ▶ 部分刻度系统正随着探测器逐步安装

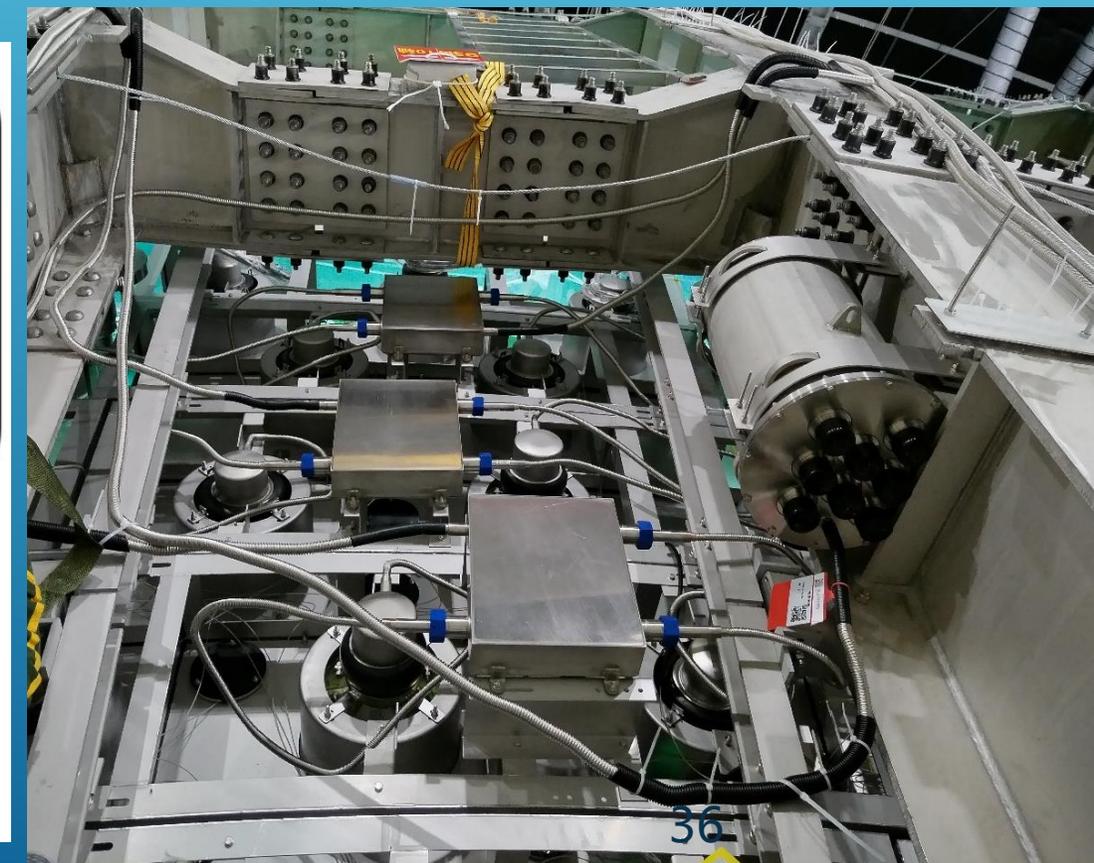
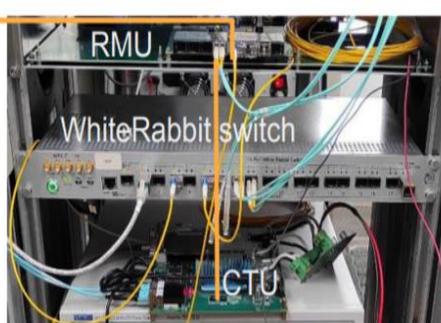
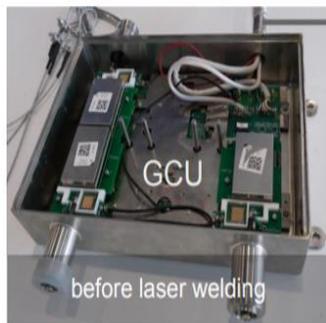
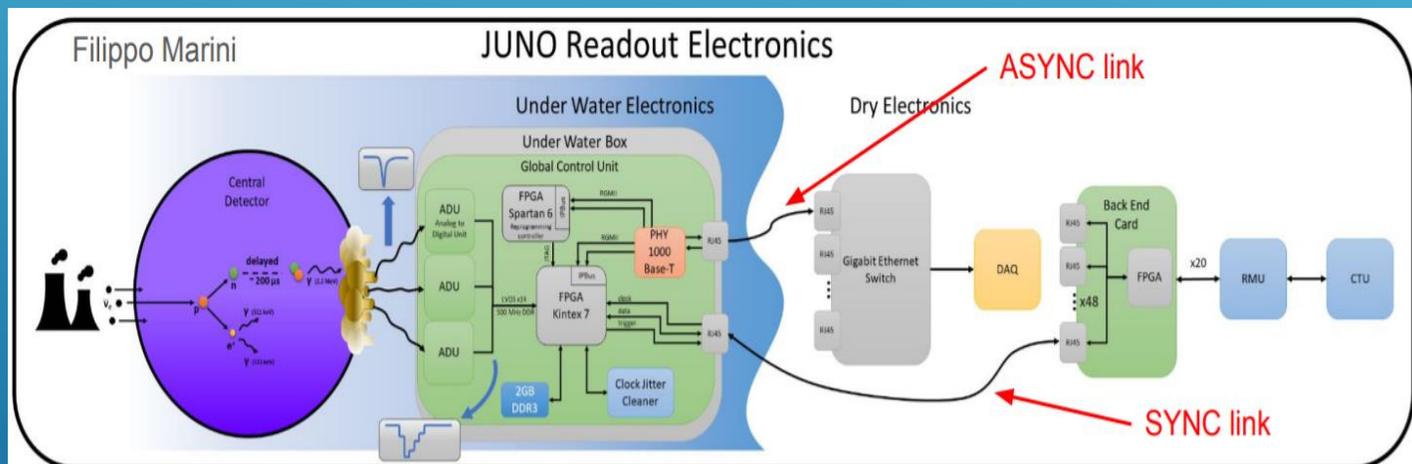
上海交大
西安交大
东莞理工
德国

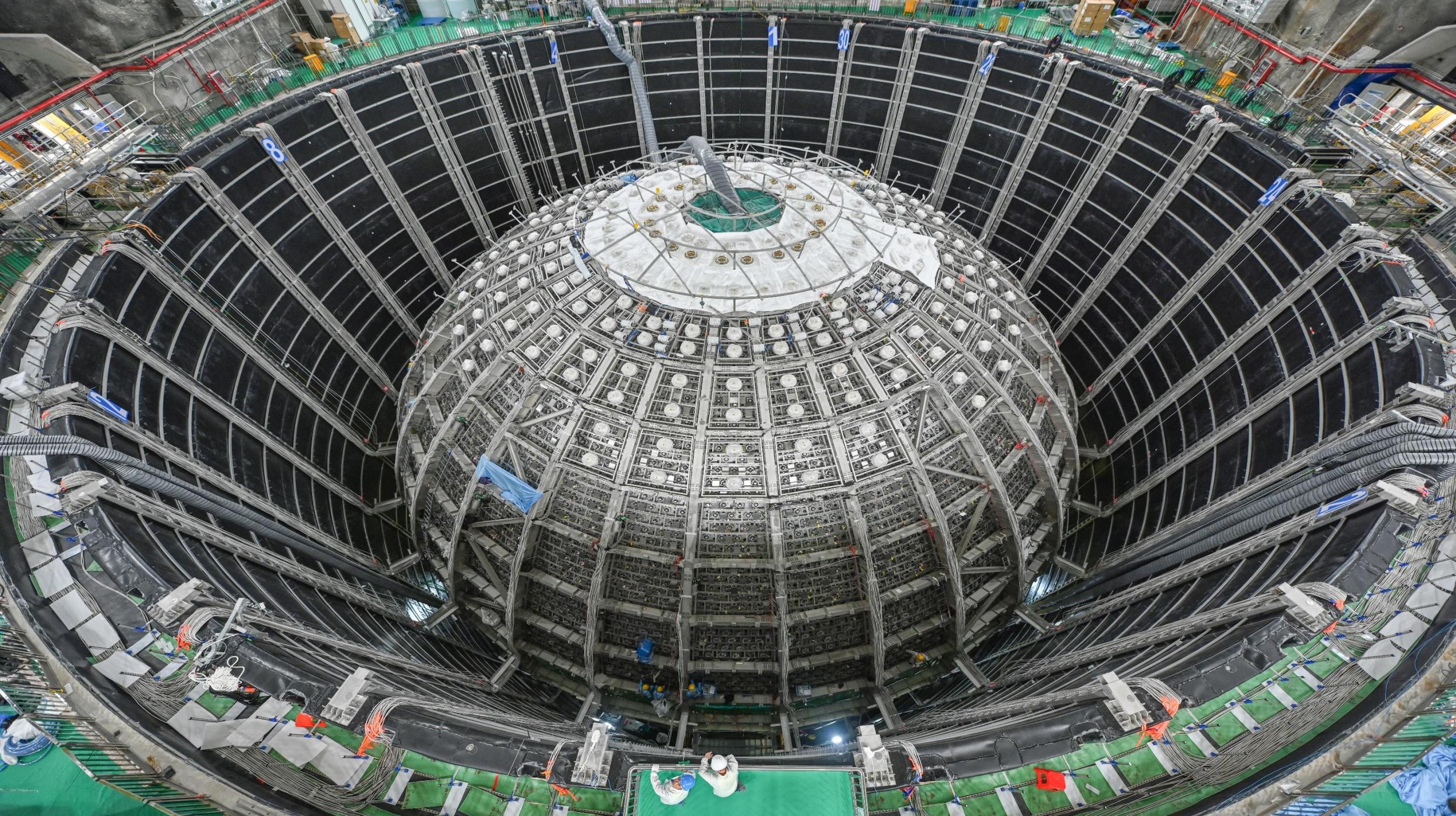


读出电子学与触发

- ▶ 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，现有商用器件难以满足或成本昂贵
- ▶ 数据传输及实时处理要求高
- ▶ 水下电子学可靠性要求高：失效率 $< 0.5\%$ @ 6years（与航天要求相当）

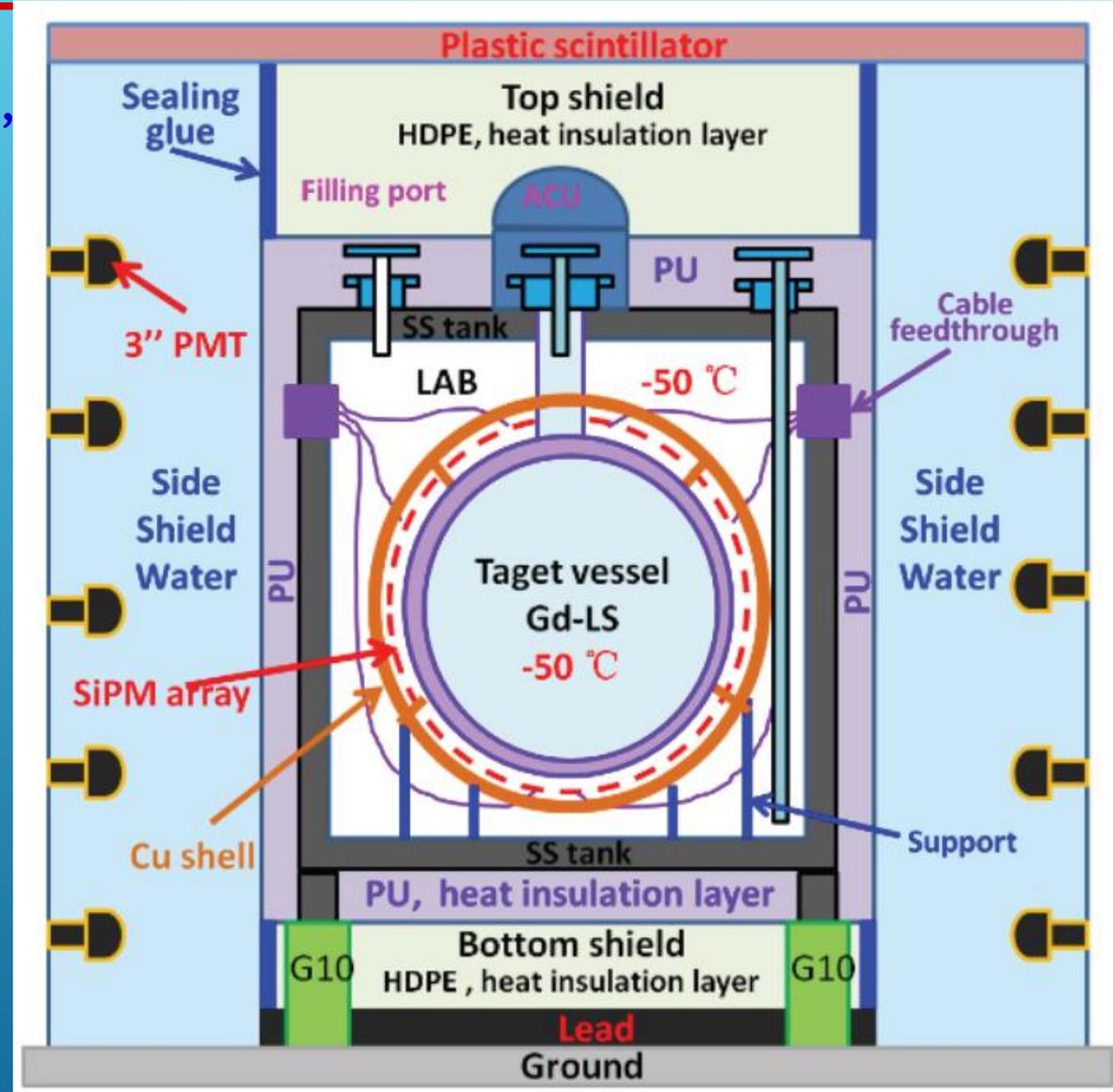
生产测试完成，
正在安装





JUNO-TAO

- ▶ Taishan Antineutrino Observatory (TAO), 一个吨级高能量分辨率的液闪探测器。
- ▶ 距离台山反应堆仅30米，
- ▶ 独立测量，作为江门实验的参考
 - ▶ Model-independent reference spectrum for JUNO
 - ▶ A benchmark for investigation of the nuclear database
- ▶ 探测器设计
 - ▶ 2.8 ton Gadolinium doped liquid scintillator
 - ▶ 10 m² 95% coverage with SiPM
 - ▶ Photon detect efficiency > 50%
 - ▶ Operate at -50 °C (SiPM dark noise)
 - ▶ 4500 p. e. /MeV
 - ▶ 2000 reactor antineutrinos / day



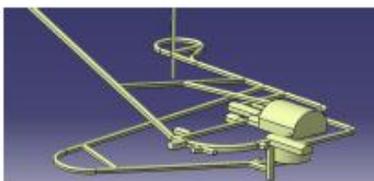


实验进展总览



2014

- International collaboration established
- Conceptual design



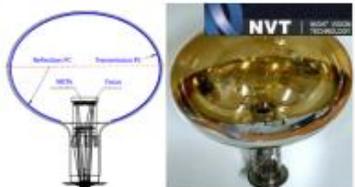
2015

- PMT production line setup
- CD parts R&D
- Civil construction start



2016

- PMT production start
- CD parts production start
- Yellow book published



2017

- PMT testing start
- TT arrived



2018

- PMT potting
- Start delivery of surface building
- Start production of acrylic sphere



2019- 2023

- Electronics production starts
- Civil construction and lab preparation completed
- Detector construction

2024

- Detector ready for data taking



中微子有什么用？

- ▶ 监测核反应堆的运行；
- ▶ 中微子通讯？
- ▶ 勘探地球断层？
- ▶ 天体物理研究
 - ▶ 中微子质量微小又具有非常好稳定性，且能够在星球内部自由穿行，不容易拐弯，准确发现宇宙射线来源等。



总结

- ▶ 中微子的研究已经走过了60年，成为了粒子物理标准模型的重要组成部分，不再神秘。
- ▶ 中微子振荡在1998年被证实，是迄今唯一实验观测到的超出标准模型的物理现象。
- ▶ 大亚湾实验发现了第三种中微子振荡，精确测量了 θ_{13} ，推动了下一代中微子实验的开展。
- ▶ 在大亚湾实验的基础上，提出了江门中微子实验，测量中微子质量顺序。
- ▶ 中国在反应堆中微子研究领域，从无到有，逐步做到世界领先
- ▶ 中微子物理与实验研究还将持续至少数十年
 - ▶ 1-2年：大亚湾数据分析，江门实验建设
 - ▶ 2-30年：江门数据分析，丰富的物理题目
 - ▶ 15-xx年：加速器中微子，无中微子双贝塔衰变……



谢谢!



江门中微子实验测量中微子的意义

- ▶ 在宇宙演化、太阳及超新星中微子的产生和传播、各种长基线中微子振荡等方面有重要影响。
- ▶ 明确测量中微子振荡参数，使检验中微子混合矩阵的幺正性、发现新物理成为可能，对中微子物理的未来发展具有重要意义。
- ▶ 中微子是研究天体和地球内部的探针，将在检验超新星爆发机制、验证地球物理模型、研究太阳物理等方面发挥关键作用。