

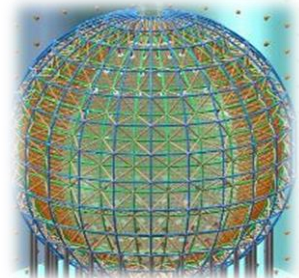
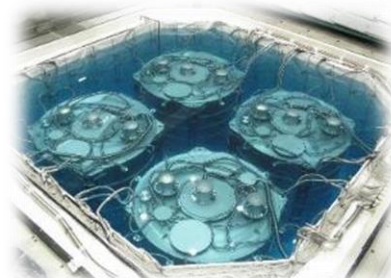


江门中微子实验简介

曹俊

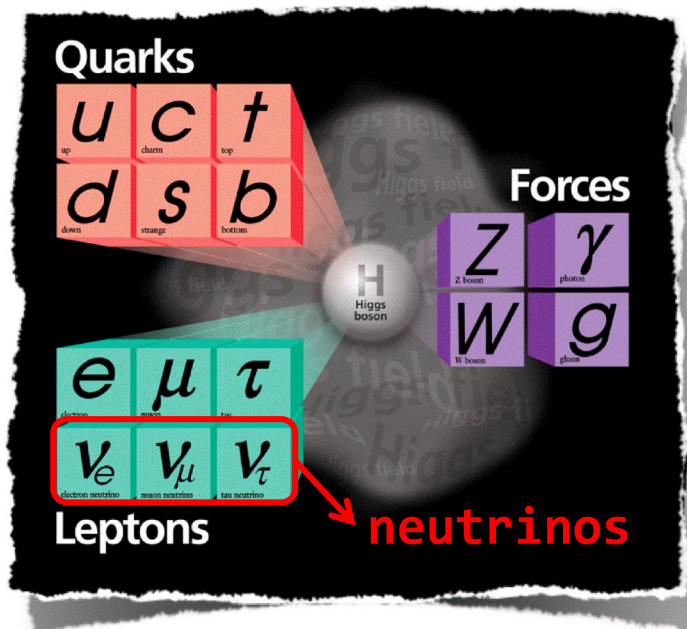
中科院高能所

JUNO中微子天文和天体物理学研讨会，北京，2015-5-25



中微子 (ν)

标准模型中的基本粒子



Neutral
Massless
Weak interaction



W. Pauli
postulated the
existence of
neutrino in
1930

Body

Postulated 1930



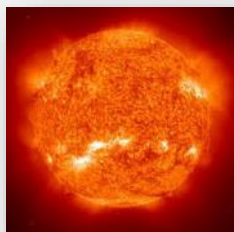
Discovery of
neutrino in 1956



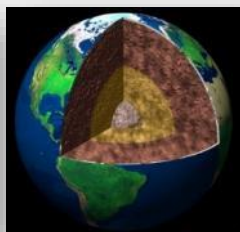
Discovery of
muon neutrino
in 1962



Discovery of tau
neutrino in 2000



Sun



Earth



Big Bang



Supernova



Atmosphere



Reactor



Accelerator

美《科学》杂志十大突破

◆ 1998年

- ⇒ 1 . 通过对超新星的研究发现：宇宙中存在一种反引力，导致宇宙不断地加速膨胀。（**Ia型**）
- ⇒ 4 . 日本进行的实验表明中微子具有质量，这一发现与传统的理论相悖。（**Super-K发现中微子振荡**）

◆ 2001年

- ⇒ 3 . 太阳中微子的失踪之谜被揭示。加拿大萨德伯里中微子实验证实太阳中微子事实上没有失踪。（**SNO实验**）

◆ 2002年

- ⇒ 7 . 揭开太阳中微子失踪之谜。太阳产生的电子中微子在抵达地球过程中没有丢失，而是转化成了 μ 中微子和 τ 中微子。在日本进行的研究也为此找到了新线索（**KamLAND实验和SNO实验**）

◆ 2012年

- ⇒ 4 . 中国**大亚湾反应堆中微子实验**报告了最后一个混合角： θ_{13} 等于8.8度加减0.8度。如果物理学家无法发现超越希格斯玻色子的新粒子，中微子物理可能会代表粒子物理学的未来，**大亚湾的实验结果可能就是标志着这一领域起飞的时刻。**

新物理的窗口：中微子物理

◆ 中微子振荡

- ⇒ 1998年发现中微子振荡，证实中微子具有微小的质量。这是唯一超出**粒子物理标准模型**的实验现象。
- ⇒ 由6个参数描述，已测4个半。

◆ 非振荡物理

- ⇒ 无中微子双贝塔($0\nu\beta\beta$)过程: 中微子是否为自身反粒子?
- ⇒ 中微子的绝对质量?
- ⇒ 寻找反常现象
- ⇒ 中微子天文学

◆ 中微子振荡主要研究手段：

- ⇒ 太阳中微子：证实核聚变， θ_{12} ， Δm^2_{21} ，物质效应，太阳物理
- ⇒ 大气中微子：发现中微子振荡， θ_{23} ， Δm^2_{32} ，质量顺序
- ⇒ 加速器中微子：验证大气中微子振荡， Δm^2_{32} ，质量顺序，CP相角
- ⇒ 反应堆中微子：发现中微子，验证太阳中微子振荡， θ_{13} ，质量顺序

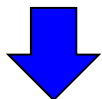
中微子振荡

◆ 六个参数描述中微子振荡

⇒ θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , Δm_{21}^2 , $|\Delta m_{32}^2|$

⇒ $|\Delta m_{32}^2|$ 符号 (质量顺序), δ_{CP}

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



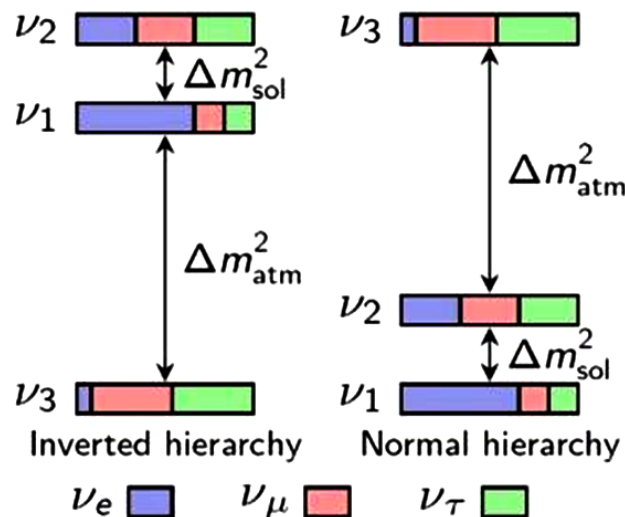
$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & e^{-i\delta} & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\rho} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\theta_{23} \sim 45^\circ$
Atmospheric
Accelerator

$\theta_{13} \sim 9^\circ$
Reactor
Accelerator

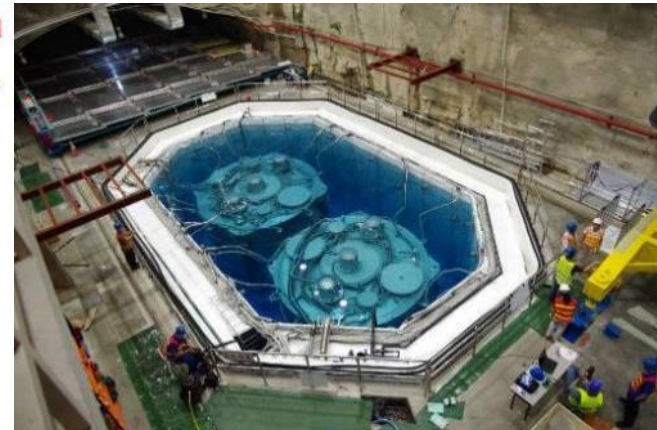
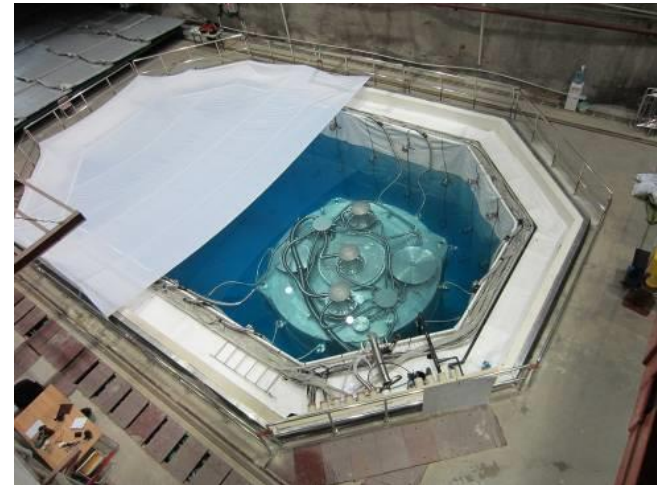
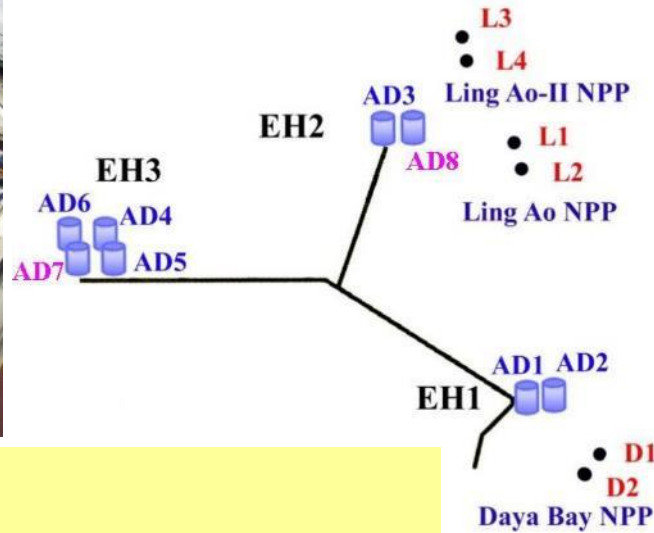
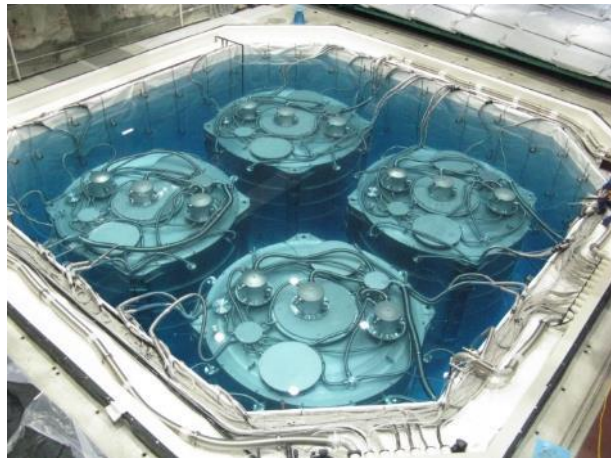
$\theta_{12} \sim 34^\circ$
Solar
Reactor

$0\nu\beta\beta$



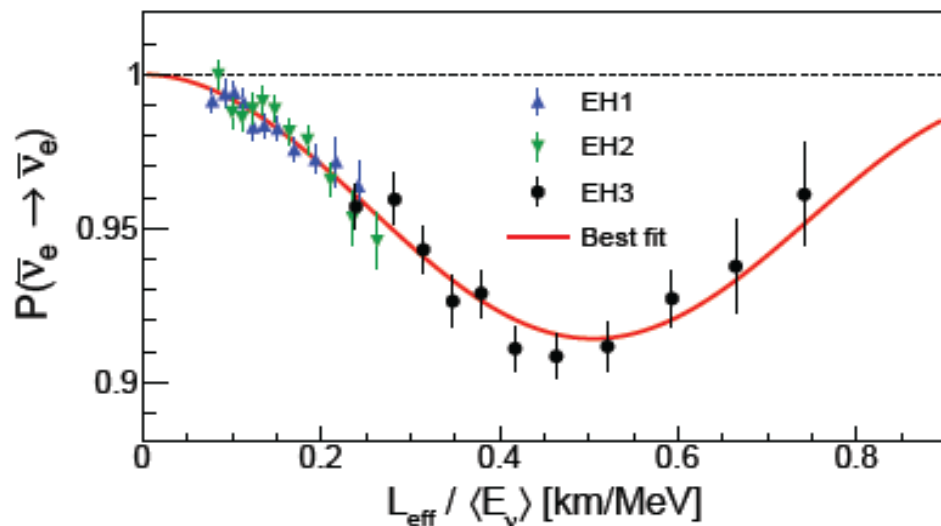
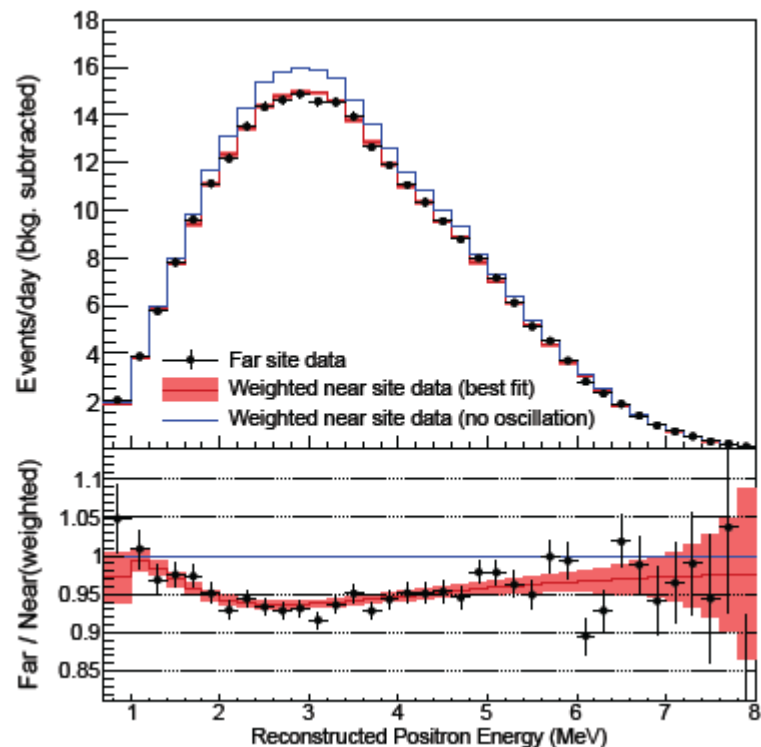
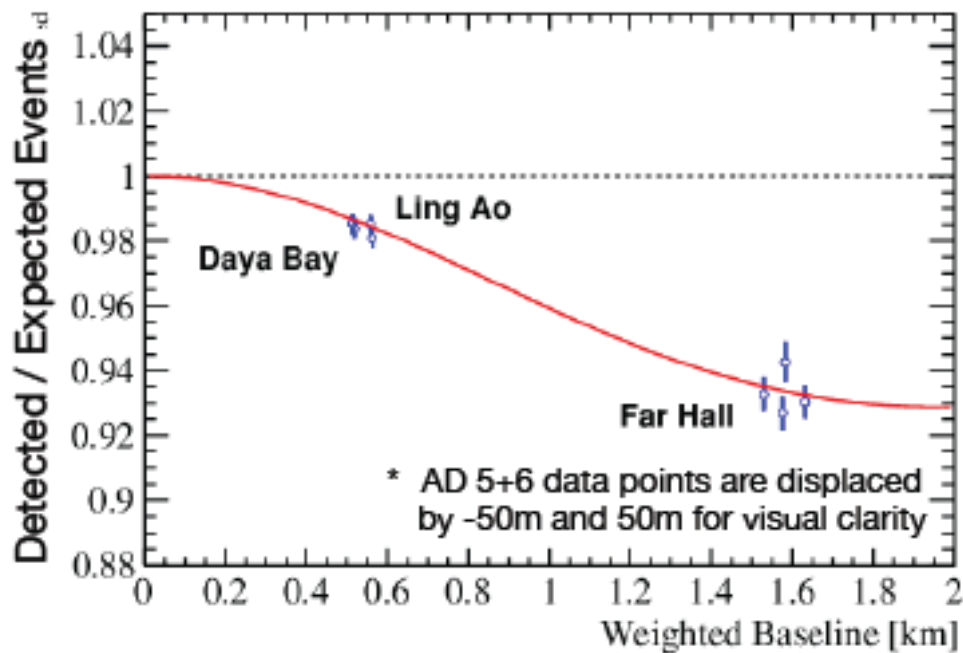
大亚湾反应堆中微子实验

- ◆ 目标为测量中微子混合角 θ_{13} 。2003年提出项目建议，2007年开始建设，2011年底建成，2012年发现新的中微子振荡。
- ◆ 美国承担了约一半的探测器，俄、捷、港、台都有实质性贡献。



- 3000 米隧道
- 5 个地下实验厅
- 8 个 110 吨重的中微子探测器
- 3 个水切伦科夫探测器 (4400 吨纯净水)
- 3200 m² 阻性板探测器
- 8000 道电子学读出。

大亚湾最新结果

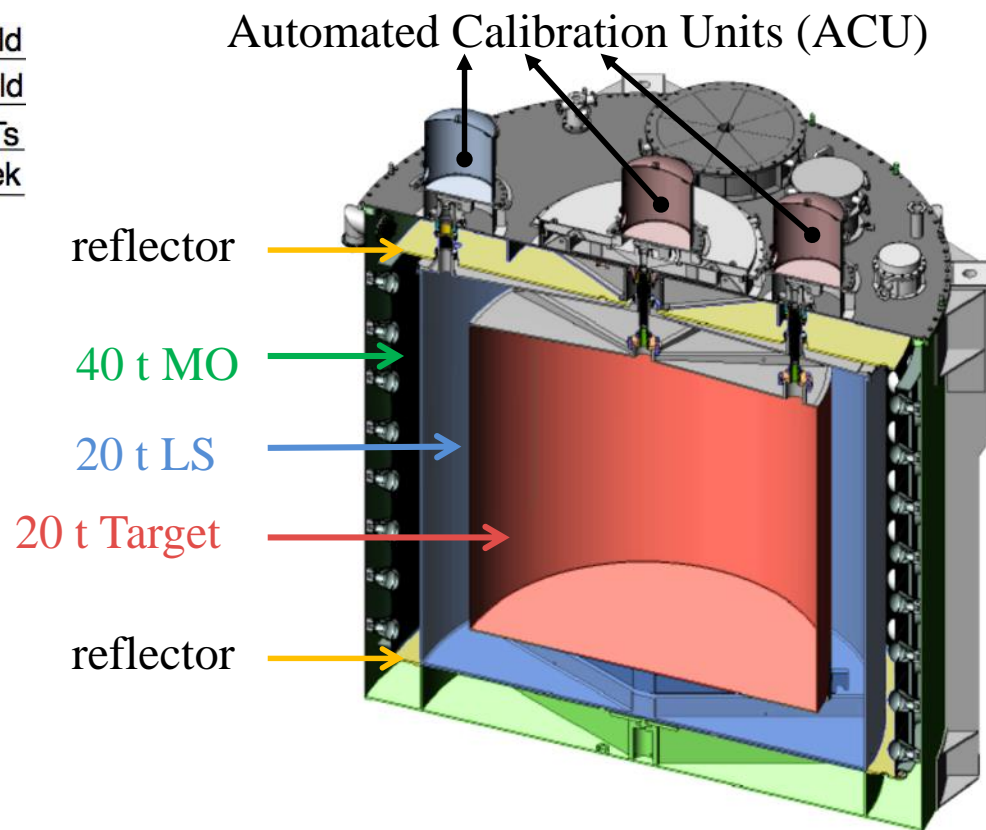
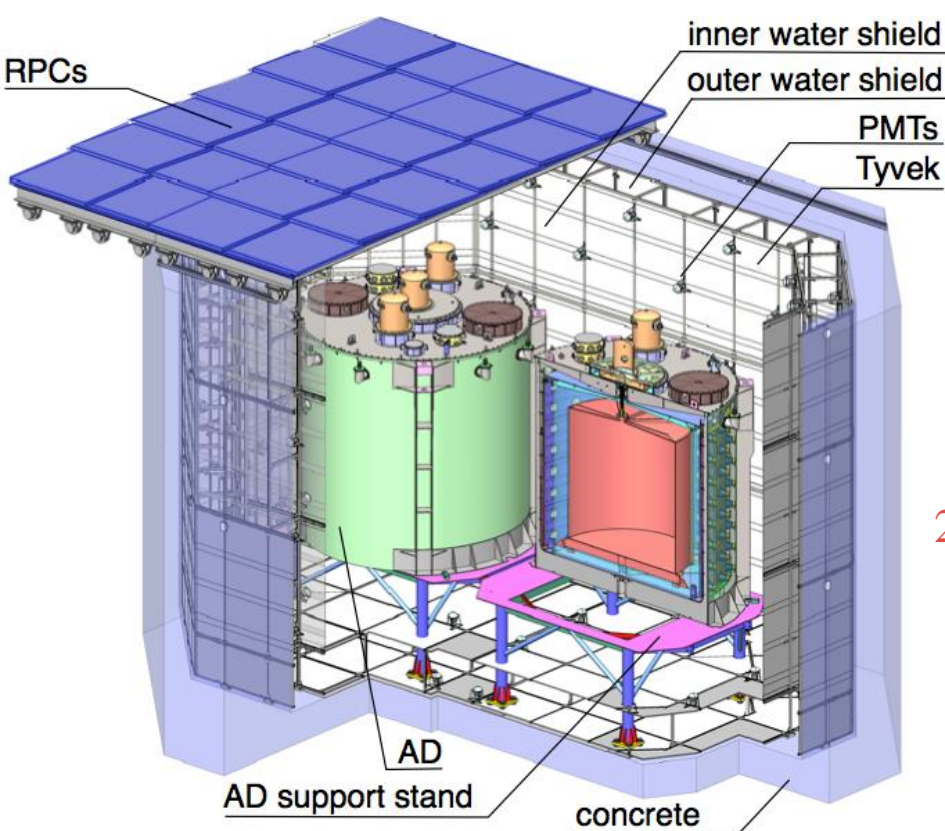


$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.084^{+0.005}_{-0.005}$$

$$|\Delta m_{ee}^2| = 2.44^{+0.10}_{-0.11} \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

$$\chi^2/NDF = 134.7/146$$

大亚湾探测器



- 中心探测器（中微子探测器）
- 多重反符合探测器
 - 两层水切伦科夫探测器
 - 阻性板探测器（RPC）：4层 + 望远镜

隧道入口

Control Room

Surface Assembly
Building



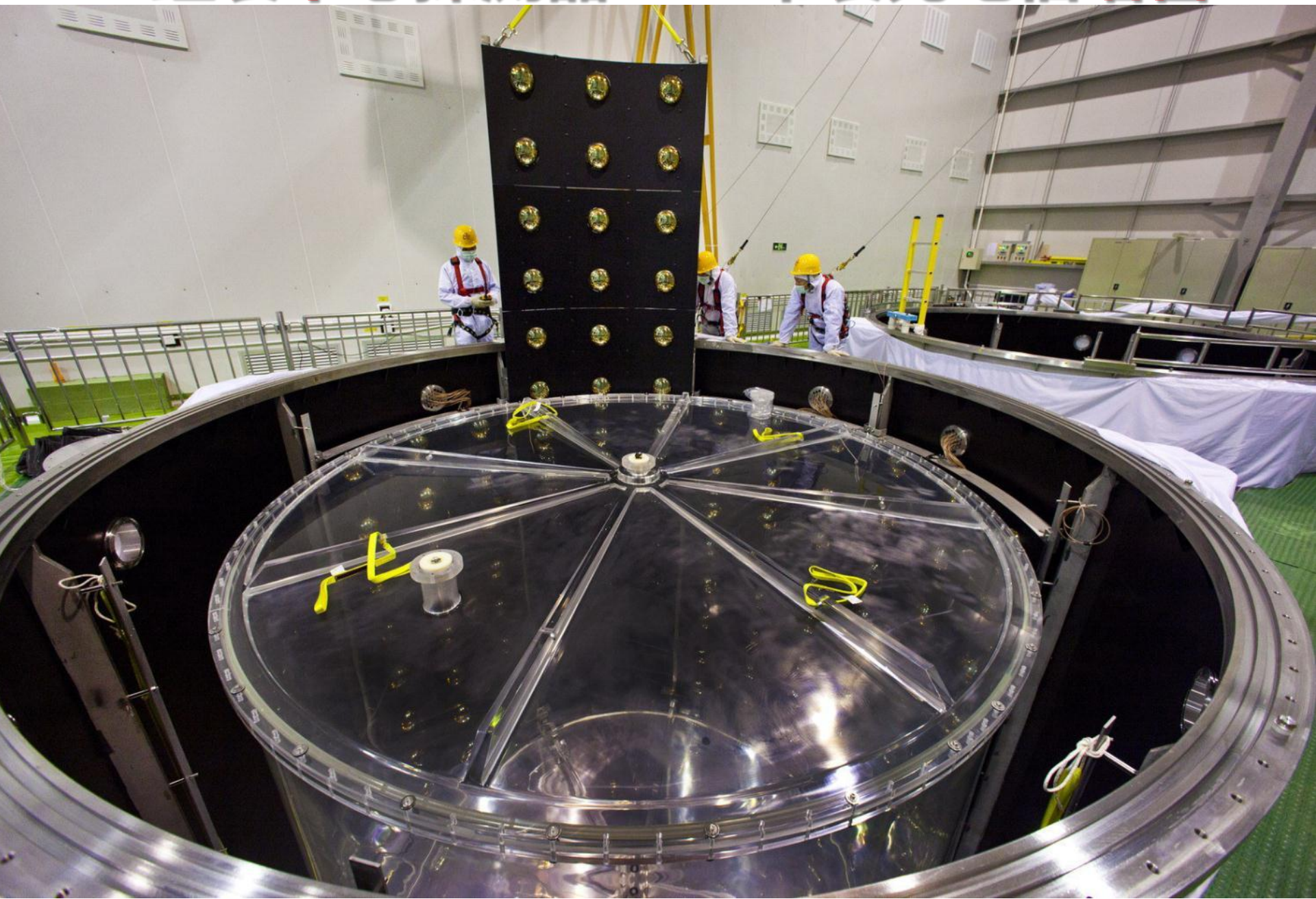
隧道，7米宽，7米高，全长3000米



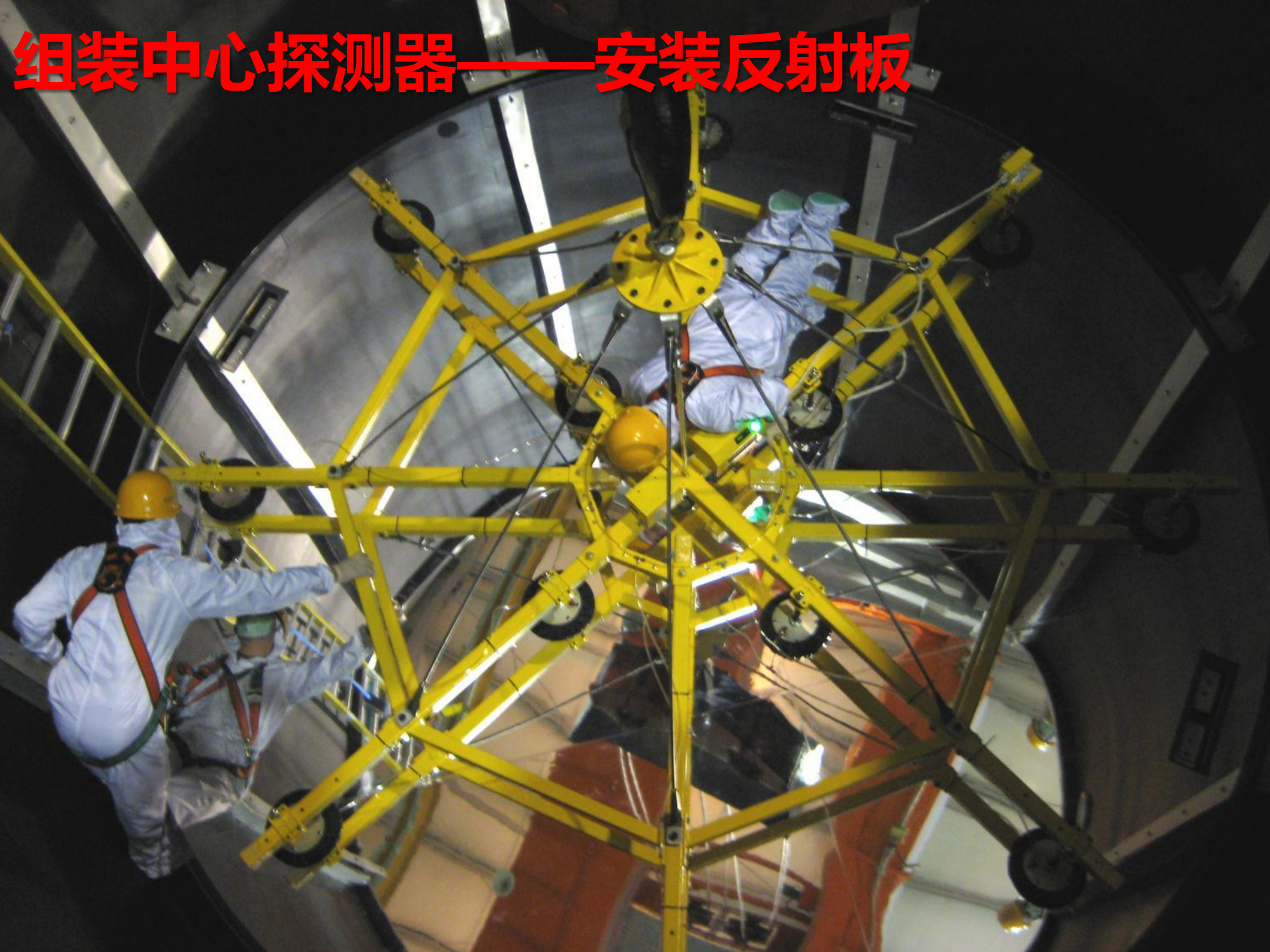
组装中心探测器 (5米x5米, 110吨)



组装中心探测器——吊装光电倍增管



组装中心探测器——安装反射板



中心探测器完成组装 (30吨)



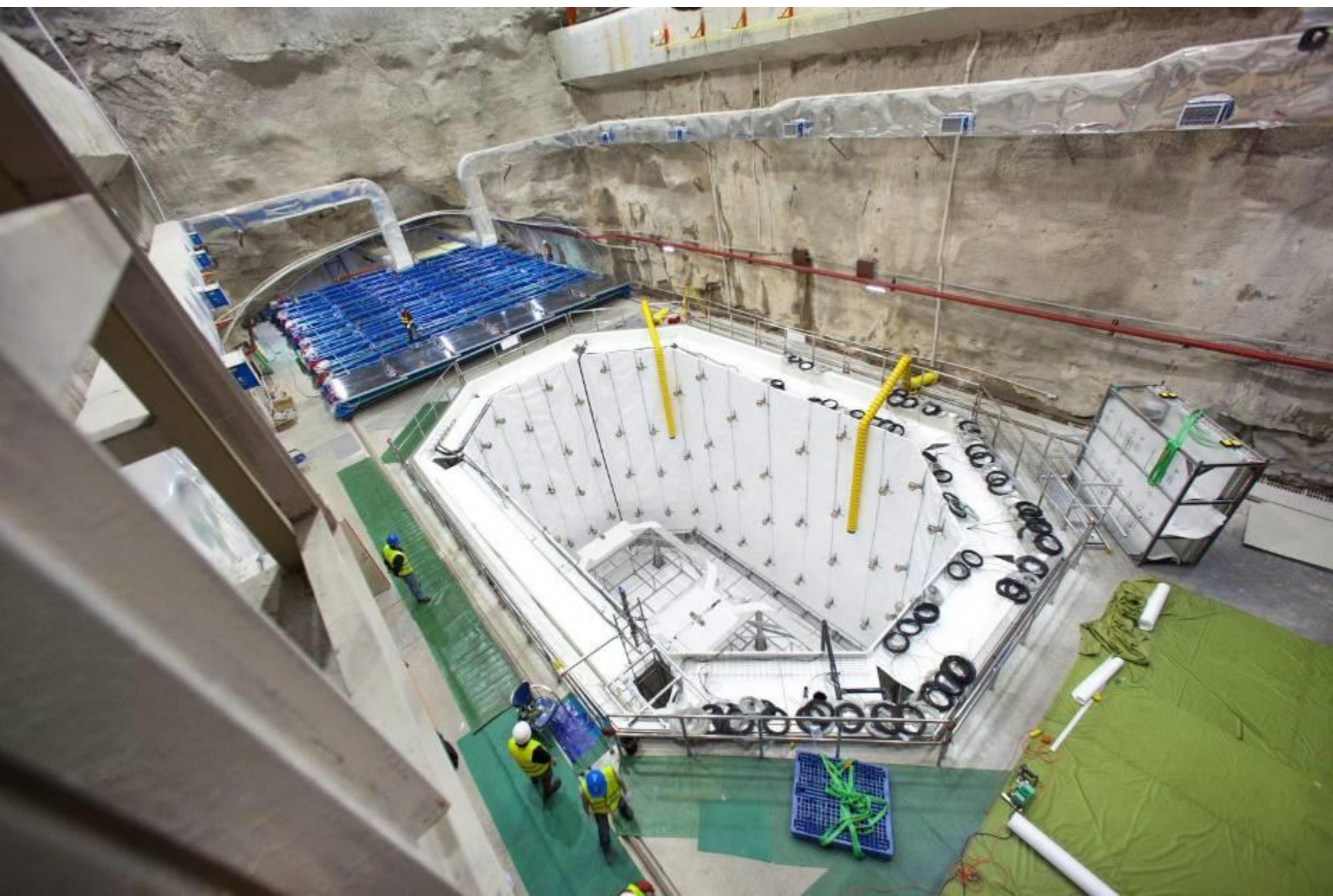


运输至地下实验室

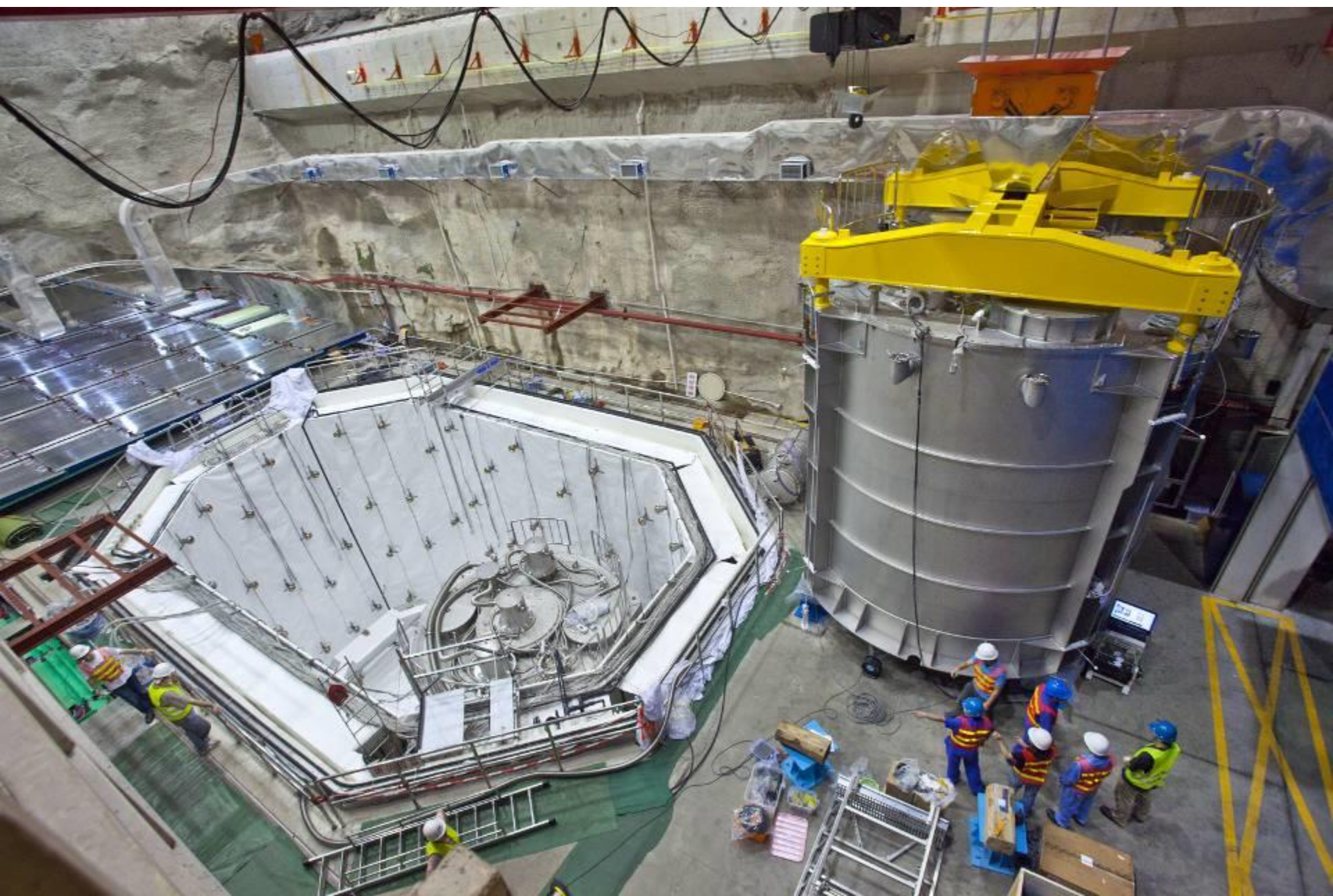


混制、灌装液体闪烁体（20+20+40吨）

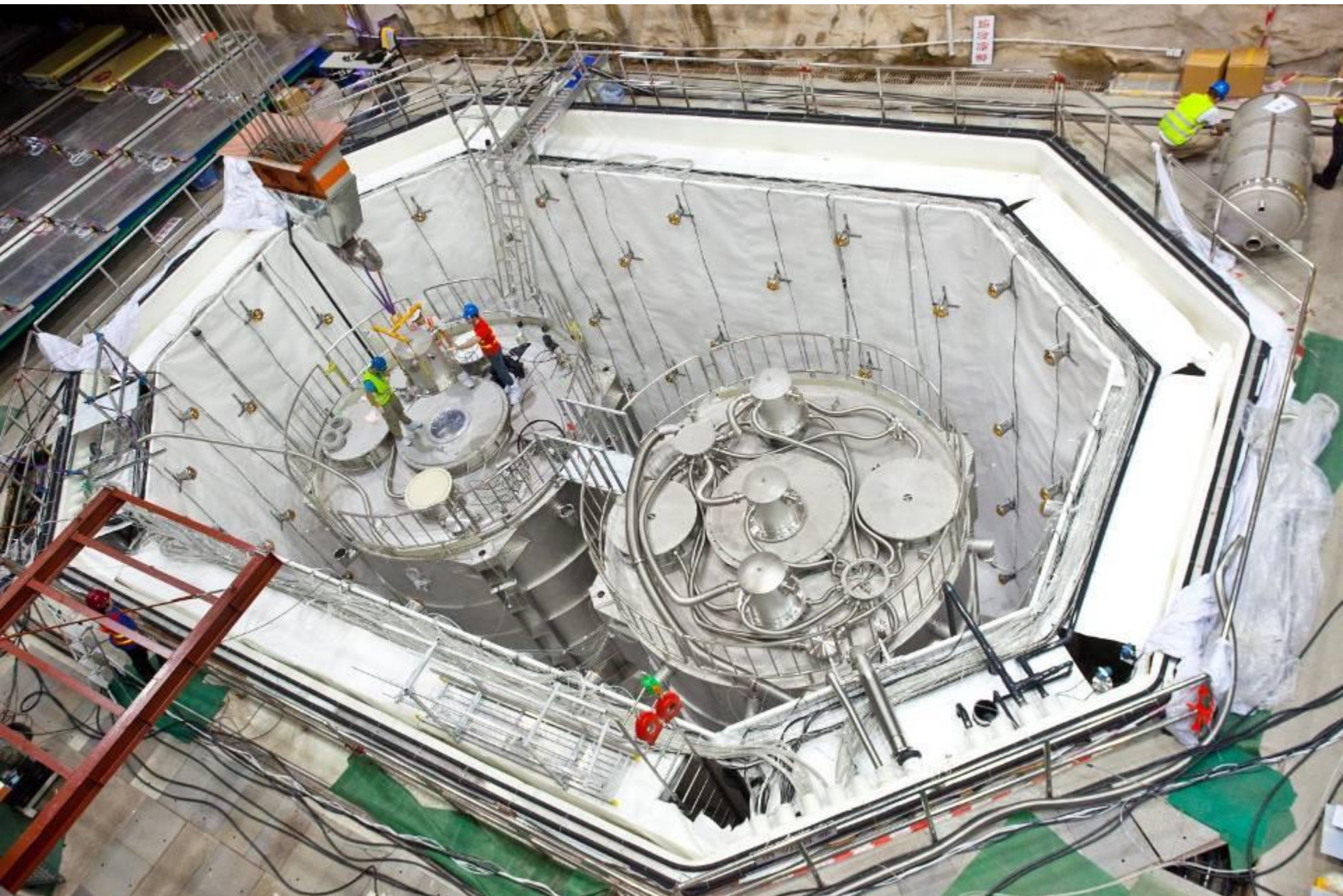
实验大厅内安装水池



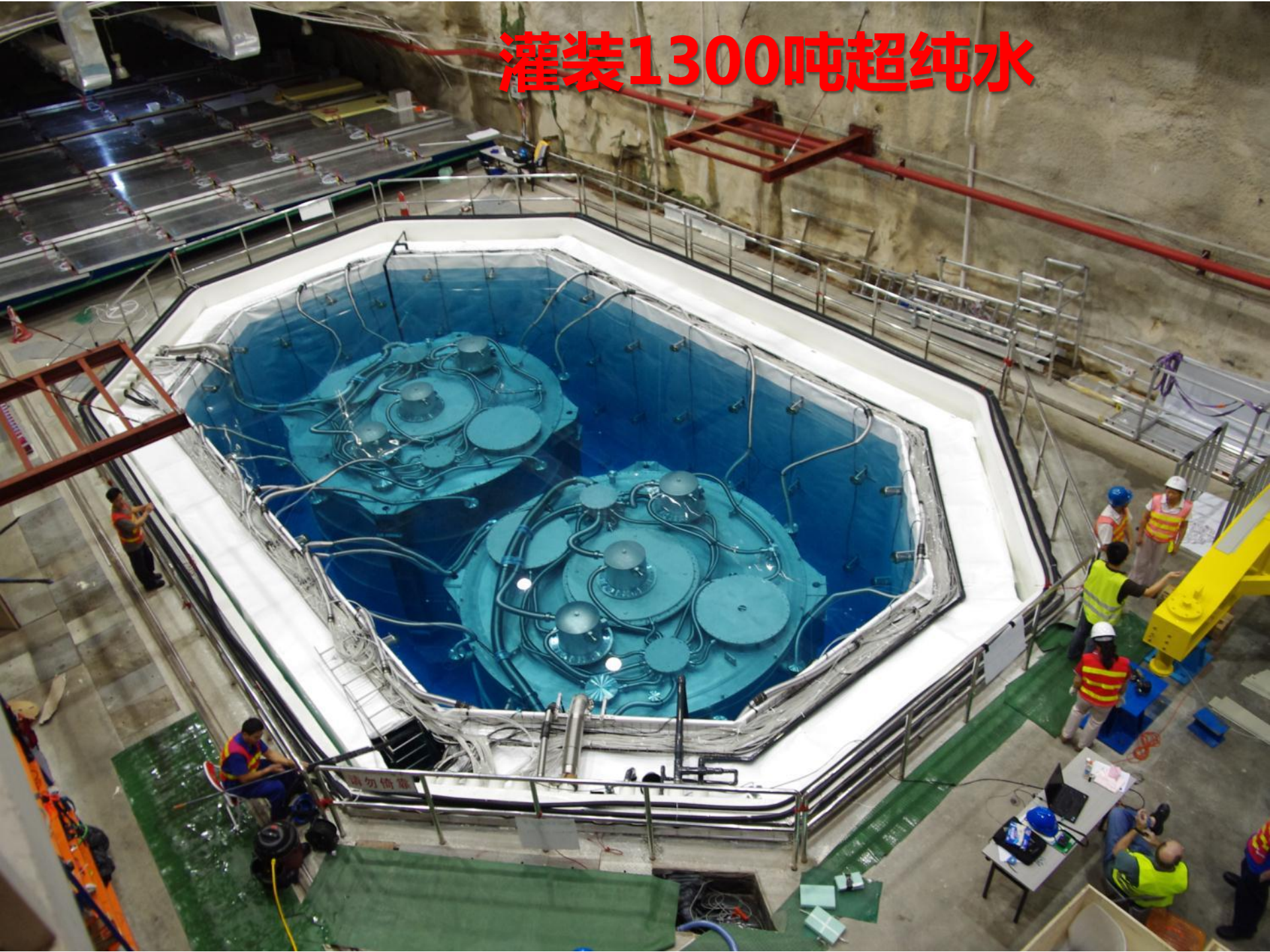
吊装中心探测器至水池中



安装电缆、气管、刻度装置



灌装1300吨超纯水

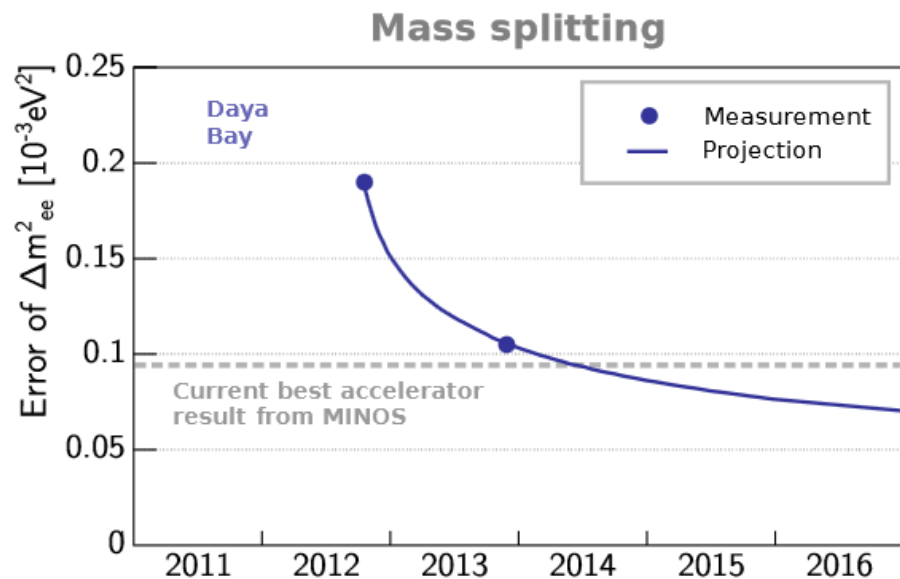
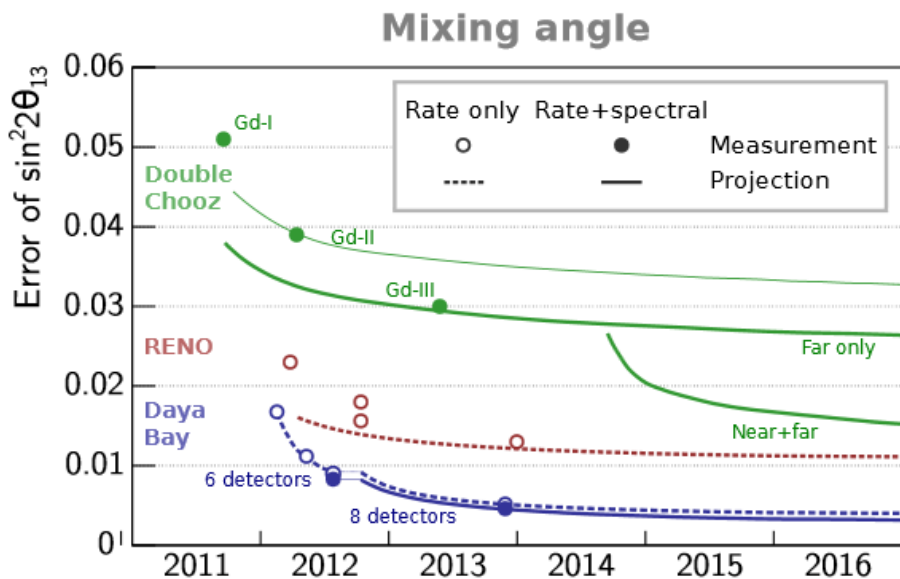


密封水池，覆盖宇宙线探测器RPC



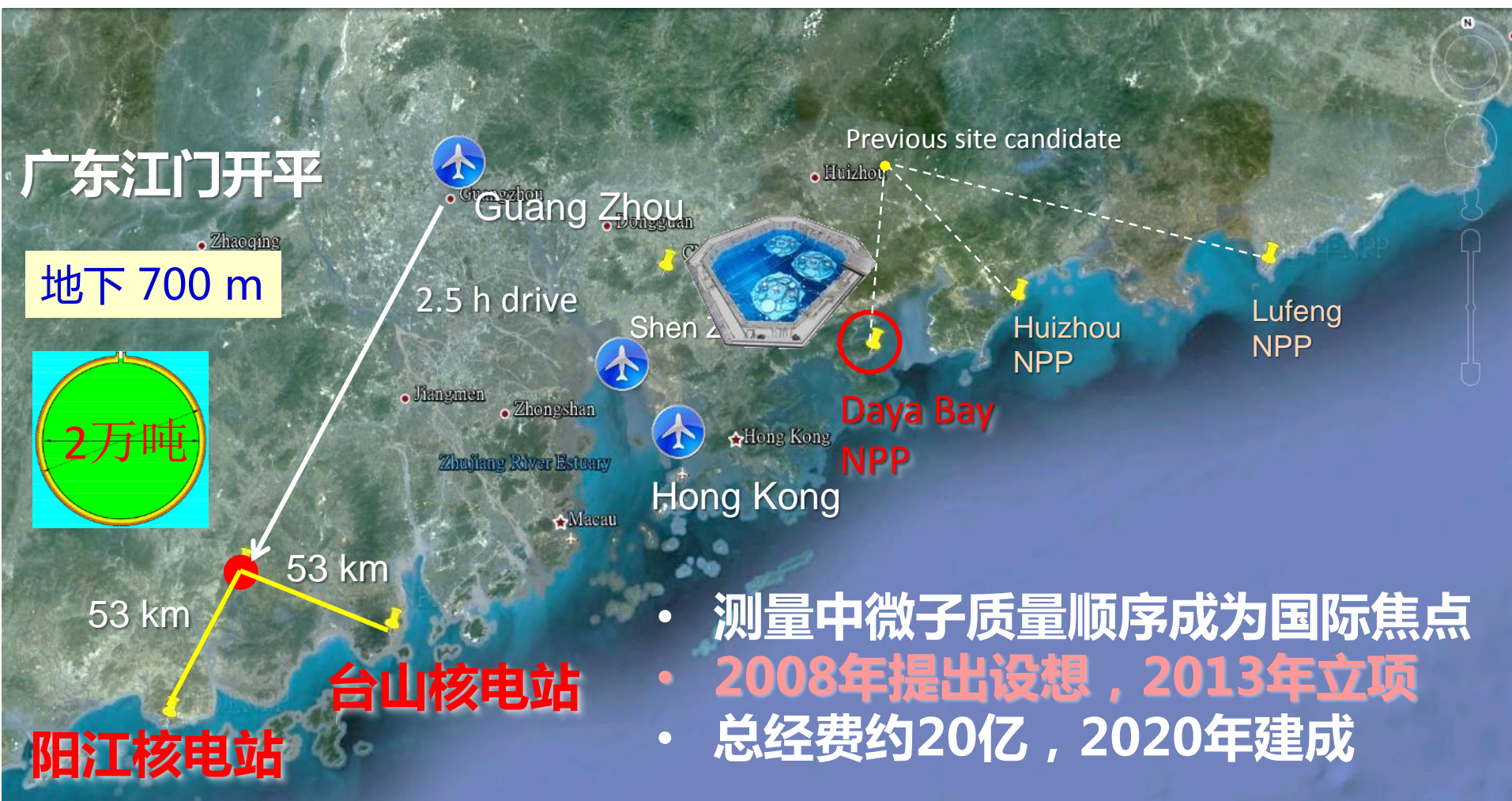
大亚湾未来精度

- ◆ 大亚湾实验将继续运行
- ◆ 预期2017年精度：
 - ⇒ $\Delta(\sin^2 2\theta_{13}) \sim 0.003$ (3.5%)
 - ⇒ $\Delta(\Delta m_{ee}^2) \sim 0.07$ (3%)
- ◆ 自然界基本参数；未来数十年不会有更精确的测量。
- ◆ 为江门中微子实验做技术研究



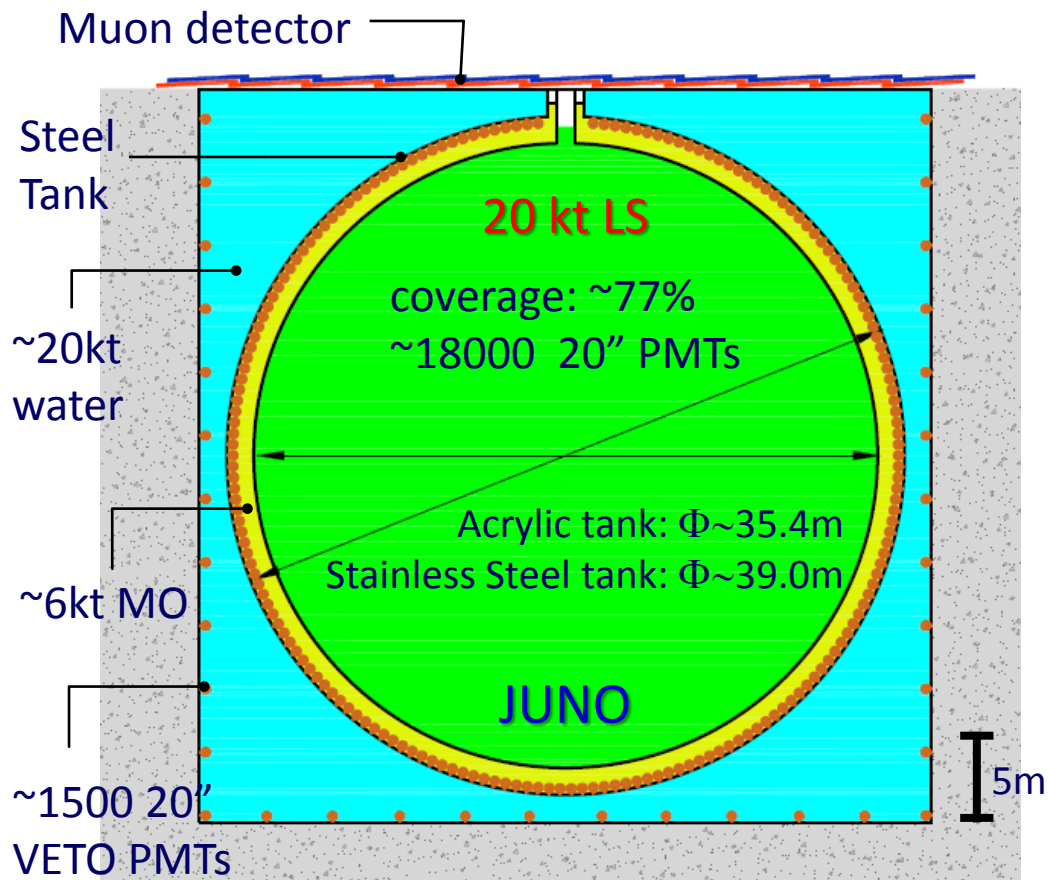
江门中微子实验 (JUNO)

NPP	Daya Bay	Huizhou	Lufeng	Yangjiang	Taishan
Status	Operational	Planned	Planned	Under construction	Under construction
Power	17.4 GW	17.4 GW	17.4 GW	17.4 GW	18.4 GW



- 测量中微子质量顺序成为国际焦点
- 2008年提出设想，2013年立项
- 总经费约20亿，2020年建成

江门实验探测器



相比国际最好的探测器:

- ◆ 体积大20倍
- ◆ 能量精度高1倍

液体闪烁体探测器

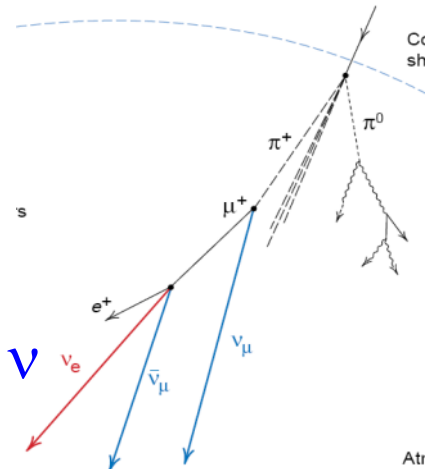
- ◆ 能量阈值 0.2 MeV
- ◆ 探测效率高
- ◆ 响应快, 事例率 100kHz

	KamLAND	BOREXINO	JUNO
LS mass	1 kt	0.5 kt	20 kt
Energy Resolution	$6\%/\sqrt{E}$	$5\%/\sqrt{E}$	$3\%/\sqrt{E}$
Light yield	250 p.e./MeV	511 p.e./MeV	1200 p.e./MeV

Supernovae ν
 $\sim 5k$ in 10s for 10kpc



中微子事例率



Solar ν
tens/day

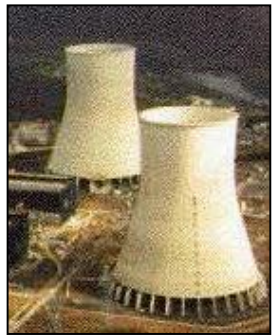
Atmospheric ν
 ~ 4 /day

打石山

700米

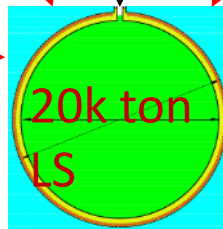
Cosmic muons
 $\sim 250k$ /day

0.003 Hz/m²
210 GeV



36 GW, 53 km

reactor ν , ~ 60 /day

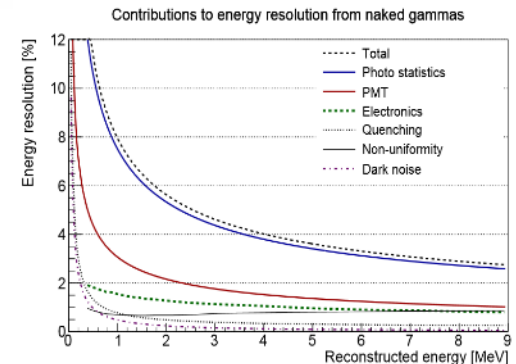
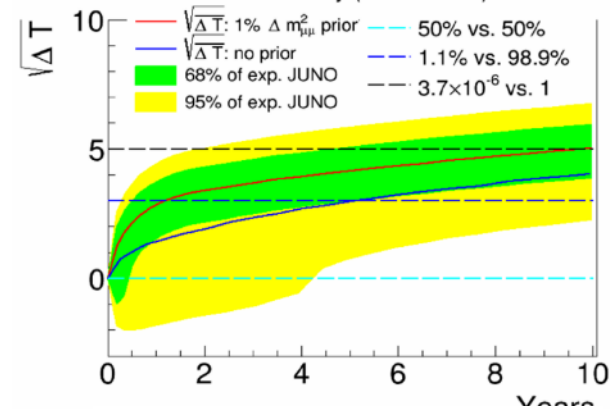


Geo-neutrinos
1-2/day

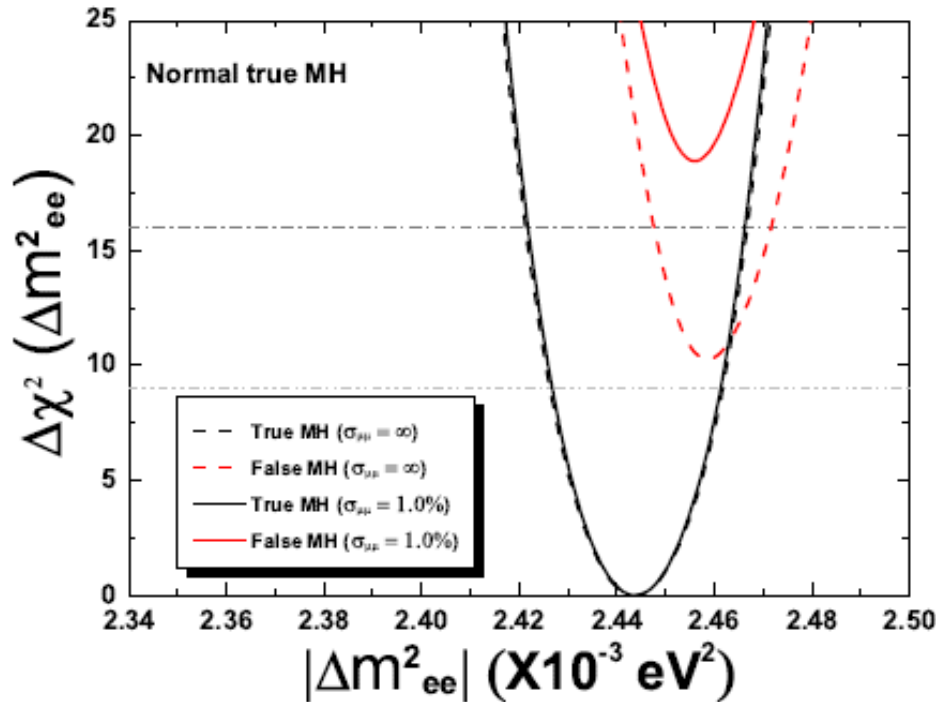
JUNO 物理研究



- ⇒ 质量顺序 : 6年 $3-4\sigma$, 能量精度研究
- ⇒ 精确测量混合参数: $\sin^2 \theta_{12}$ 0.7%, Δm_{21}^2 0.6%, Δm_{ee}^2 0.44%
- ⇒ 超新星中微子 : 5-8k事例 , 中性流
- ⇒ 超新星背景中微子: 首次 $3-7\sigma$
- ⇒ 太阳中微子: Be7、 B8中微子
- ⇒ 地球中微子: 3TNU, 首次判别模型
- ⇒ 大气中微子: $1-2\sigma$
- ⇒ 惰性中微子
- ⇒ 质子衰变 : $>4 \times 10^{34}$ y (10x SuperK)
- ⇒ 间接暗物质寻找
- ⇒ 稀有事例寻找



质量顺序与精确测量



	Current	DYB II
Δm^2_{12}	3%	0.6%
Δm^2_{23}	5%	0.6%
$\sin^2\theta_{12}$	6%	0.7%
$\sin^2\theta_{23}$	20%	N/A
$\sin^2\theta_{13}$	14% → 4%	~ 15%

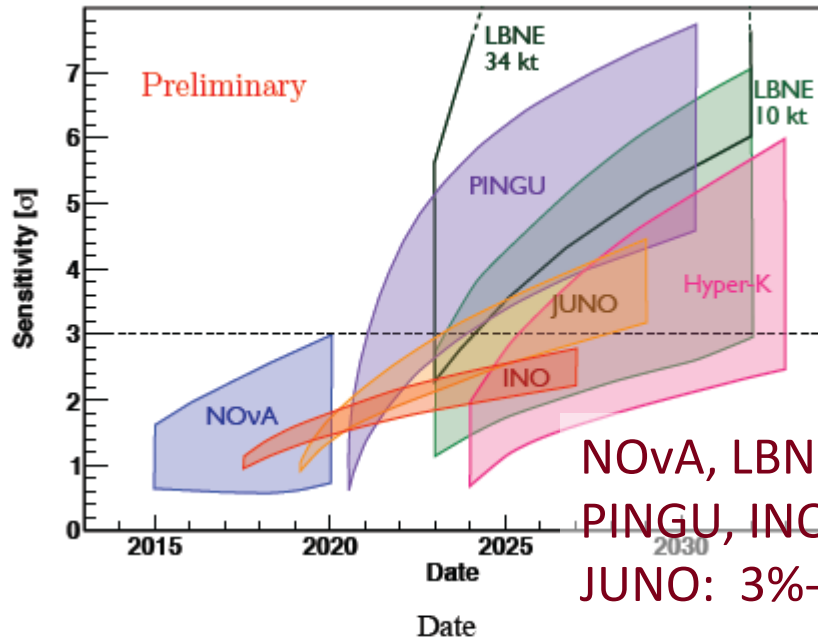
**New physics searches:
Check the unitarity of mixing
matrix to ~1%**

MH sensitivity with 6 years' data of JUNO (PRD88, 013008 (2013))

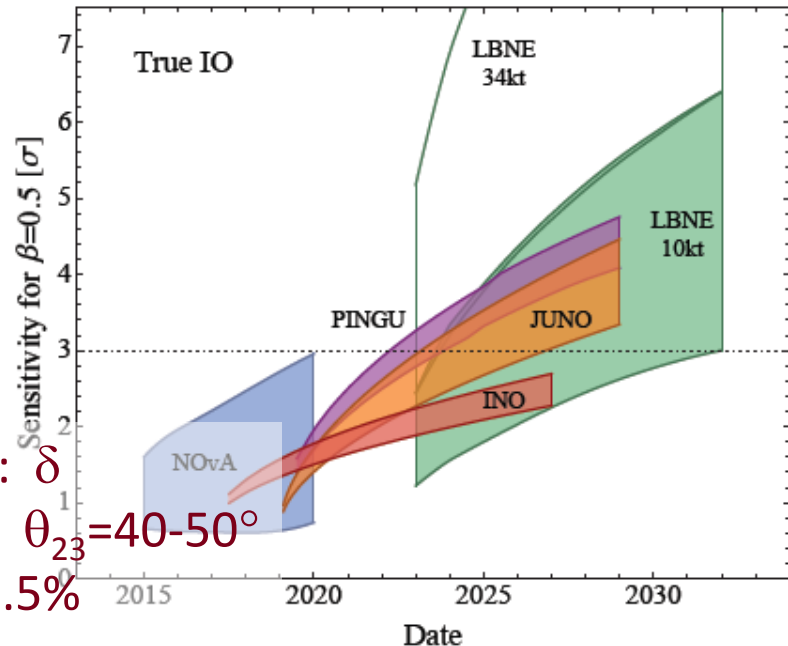
- ◆ Ideal case: 4 σ with relative measurement, 5 σ with absolute Δm^2 measurement
- ◆ Taking into account the spread of reactor cores, uncertainties from energy non-linearity, etc. 3 σ with relative measurement, 4 σ with absolute Δm^2 measurement

质量顺序测量

PINGU LOI, arXiv:1401.2046



M. Blennow et al., arXiv:1311.1822(2013)



NOvA, LBNE: δ
 PINGU, INO: $\theta_{23} = 40-50^\circ$
 JUNO: 3%-3.5%

- ⇒ 美国 Nova+日本 T2K+大亚湾
- ⇒ 美国 DUNE (LBNE) : 1万吨液氙, 2024, 每年增加1万吨
- ⇒ 美国南极 PINGU: 2021取数, 4年 3σ
- ⇒ 法国 地中海 ORCA (KM3) : 2020取数, 4年 3σ
- ⇒ 日本 Hyper-K: 2016提交建议, 2025取数
- ⇒ 韩国 RENO-50: 三星支持2M\$预研

质量顺序测量

Δm_{31}^2 and Δm_{32}^2
Interference (ϕ)

Δm_{ee}^2 and $\Delta m_{\mu\mu}^2$
difference

Matter Effect

Reactor

atmospheric

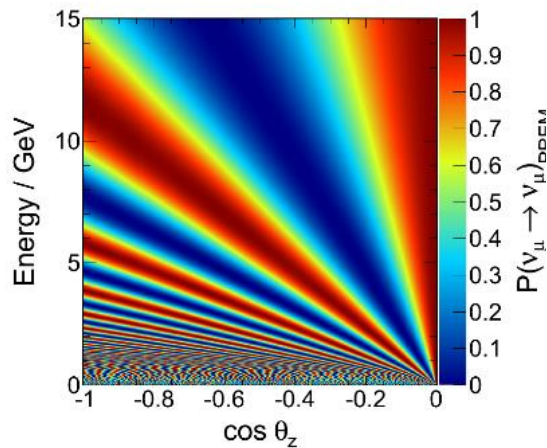
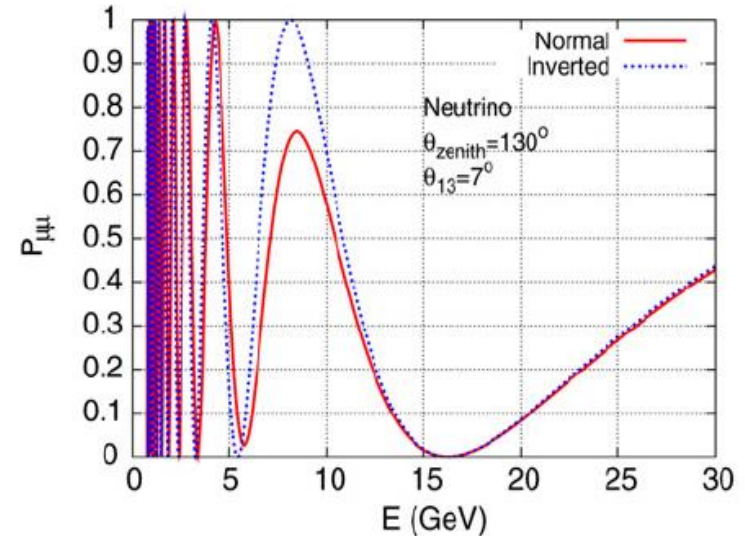
Accelerator

- ⇒ 美国Nova+日本 T2K+大亚湾
- ⇒ 美国 DUNE (LBNE) : 1万吨液氙, 2024, 每年增加1万吨
- ⇒ 美国南极 PINGU: 2021取数, 4年 3σ
- ⇒ 法国 地中海ORCA (KM3) : 2020取数, 4年 3σ
- ⇒ 日本 Hyper-K: 2016提交建议, 2025取数
- ⇒ 韩国RENO-50: 三星支持2M\$预研

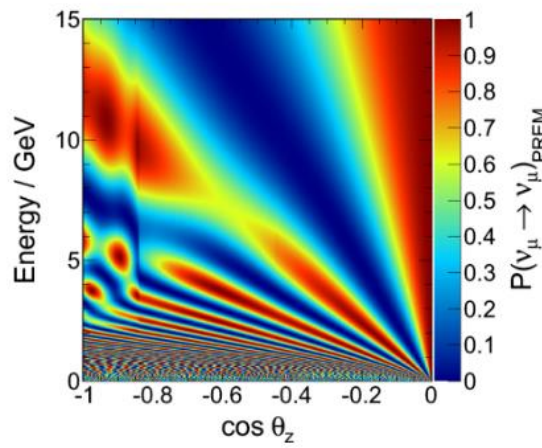
Mass Hierarchy from Atmospheric



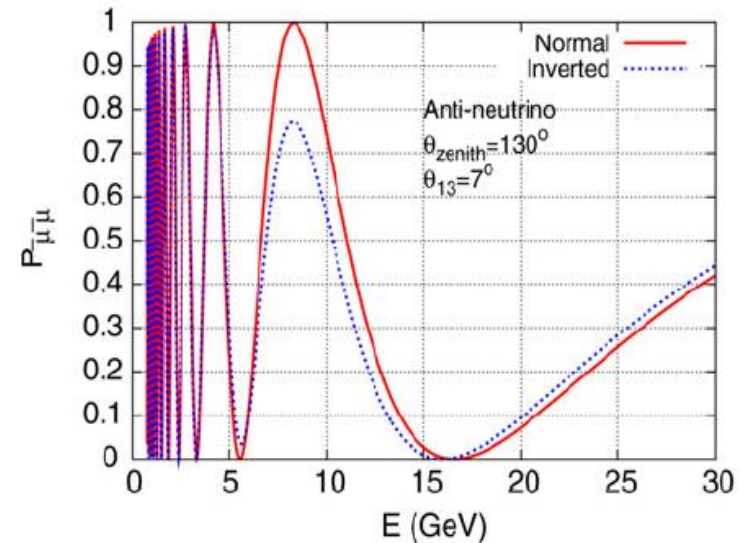
- ◆ Due to matter effect, oscillation probability of atmospheric muon neutrino when passing the Earth depends on mass hierarchy
- ◆ JUNO will have 1-2 σ sensitivity.
 - ⇒ Measure both lepton and hadron energy
 - ⇒ Good tracking and energy resolution



IH

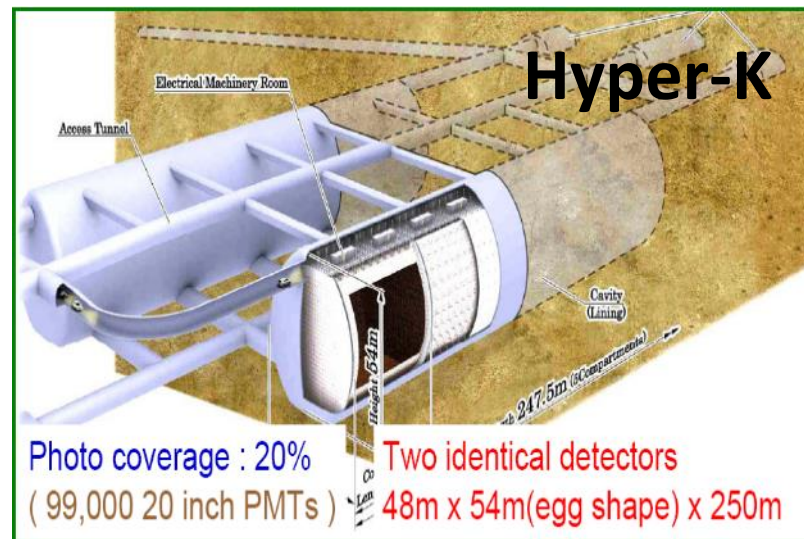
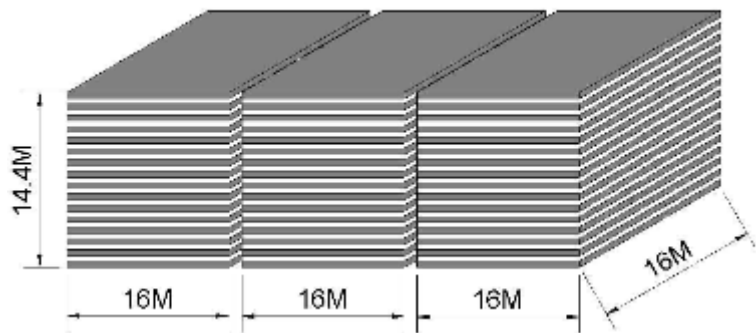


NH

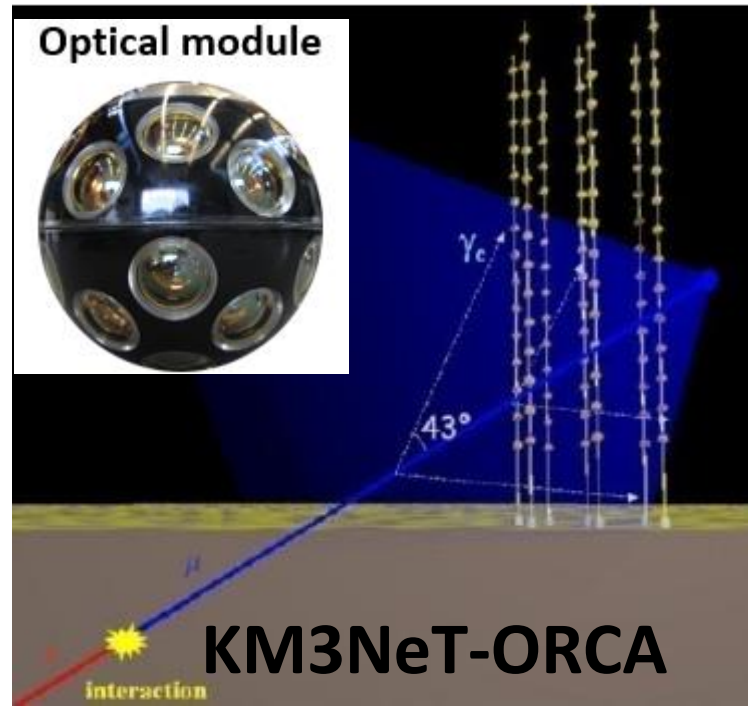
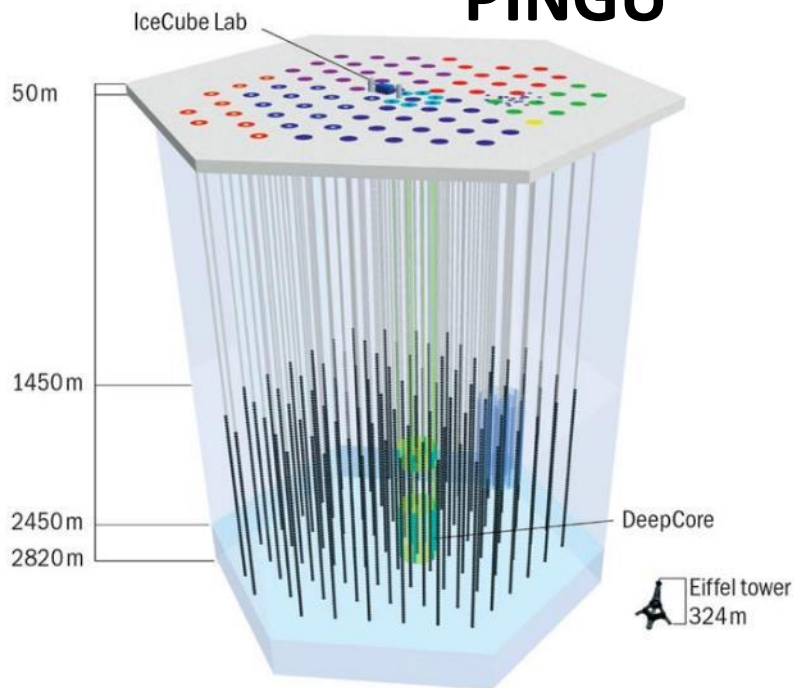


未来大气中微子实验

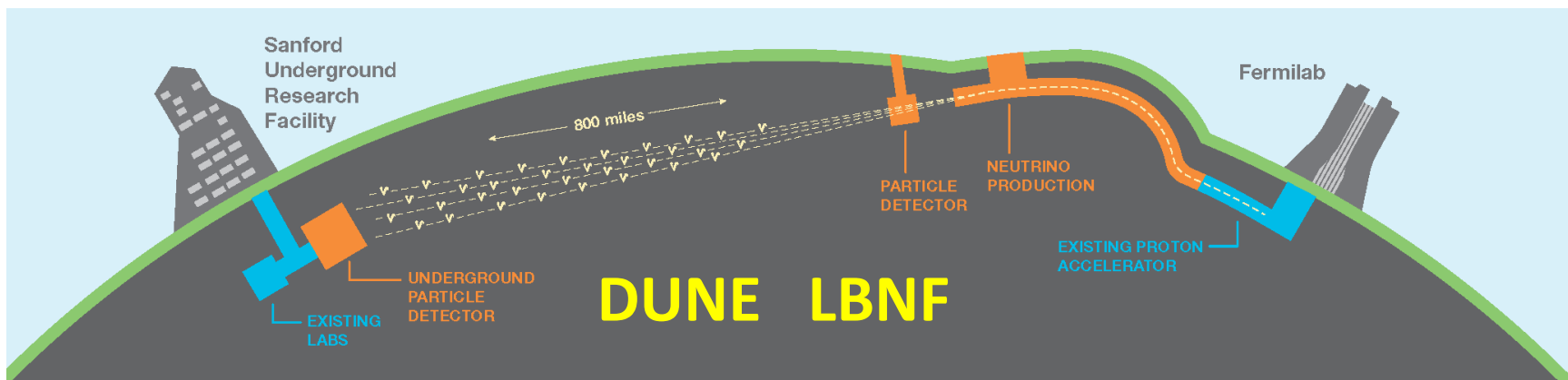
INO



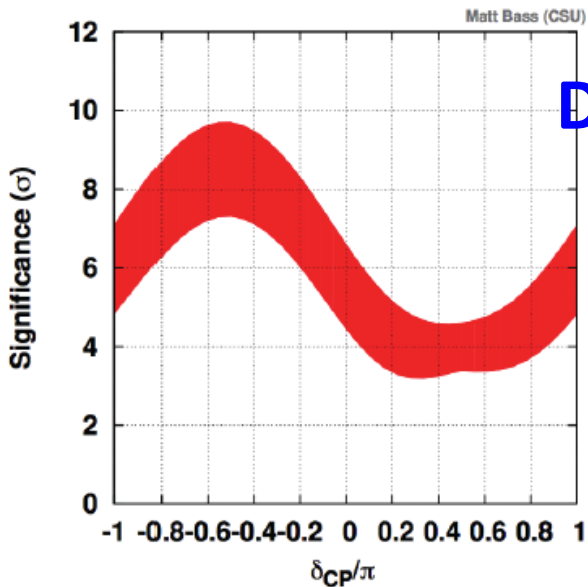
PINGU



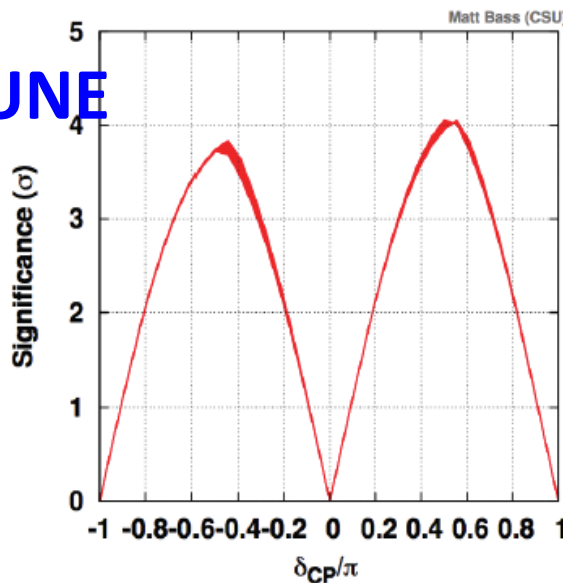
未来加速器中微子



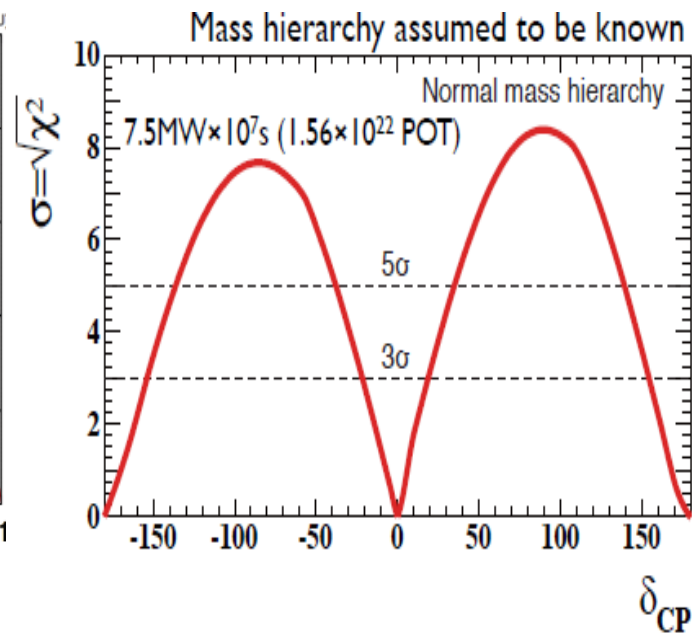
Mass Hierarchy Significance vs δ_{CP}
 Normal Hierarchy, $\sin^2(2\theta_{13})=0.07$ to 0.12
 Homestake 10 kt LAr



CPV Significance vs δ_{CP}
 NH(IH considered), $\sin^2(2\theta_{13})=0.07$ to 0.12
 Homestake 10 kt LAr

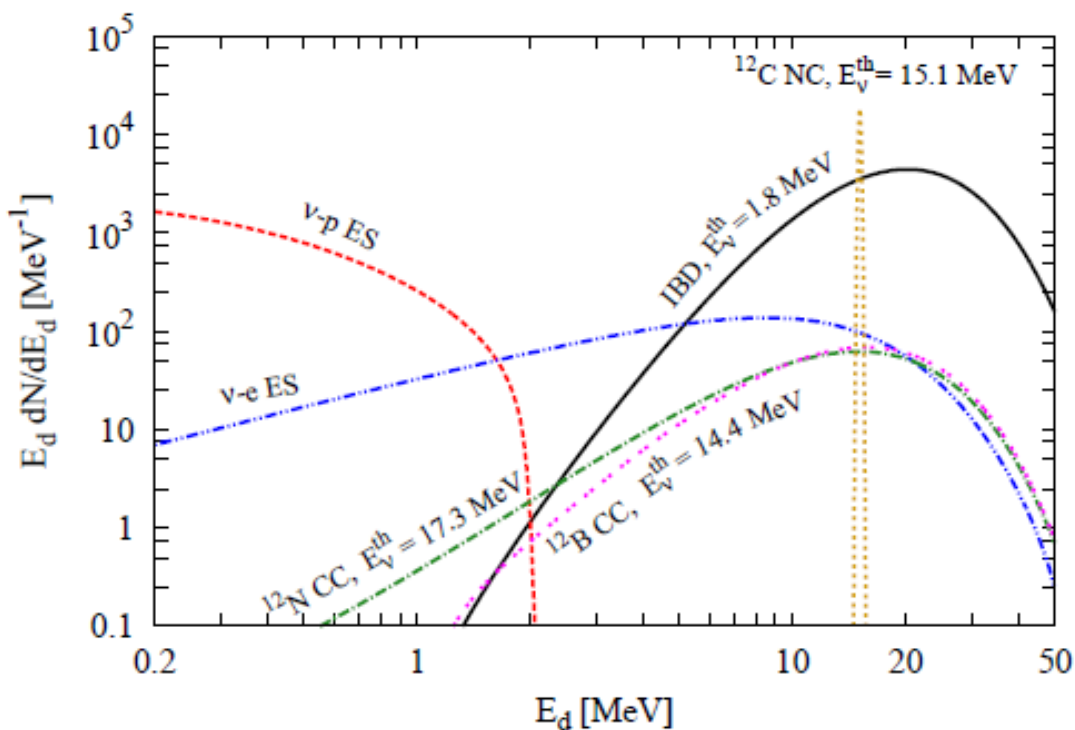
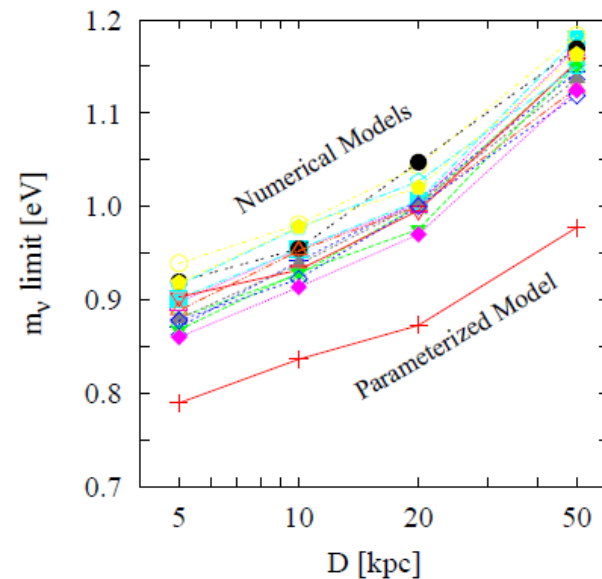


T2HK



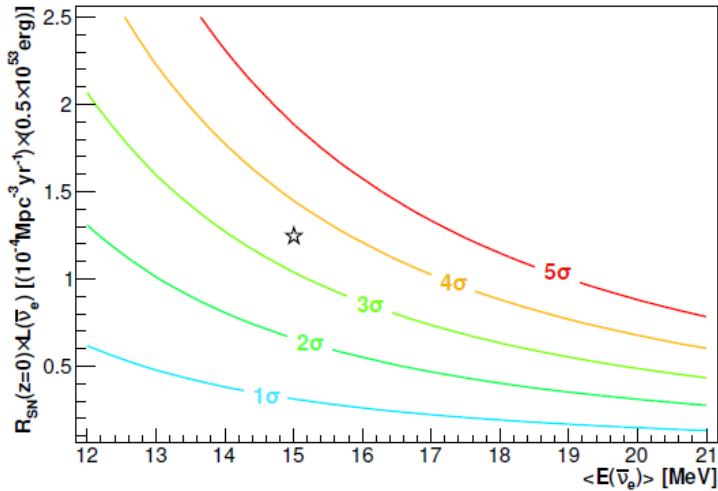
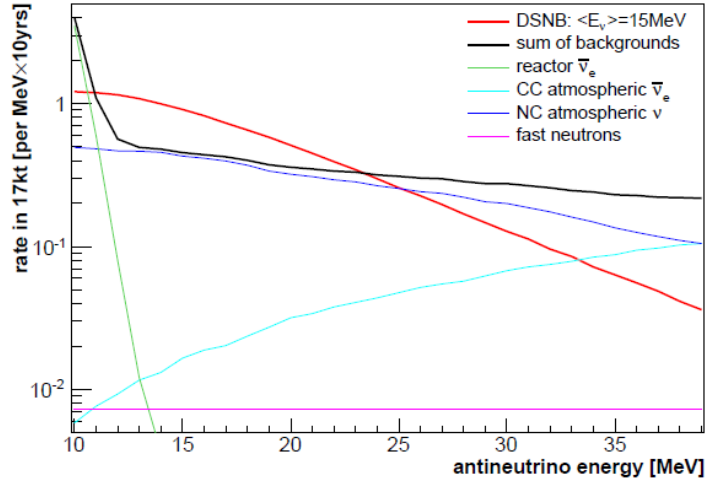
超新星中微子

- ◆ Less than 20 events observed so far
- ◆ Assumptions:
 - ⇒ Distance: 10 kpc (our Galaxy center)
 - ⇒ Energy: 3×10^{53} erg
- ◆ **江门可探测所有类型中微子；能谱精度高**



- ◆ Super-K (2.25万吨水)
- ◆ Hyper-K (50万吨水)
- ◆ JUNO (2万吨LS)
- ◆ DUNE (1-4万吨Ar)
- ◆ PINGU/KM3NeT

超新星背景中微子



◆ DSNB: Past core-collapse events

- ⇒ Cosmic star-formation rate
- ⇒ Core-collapse neutrino spectrum
- ⇒ Rate of failed SNe

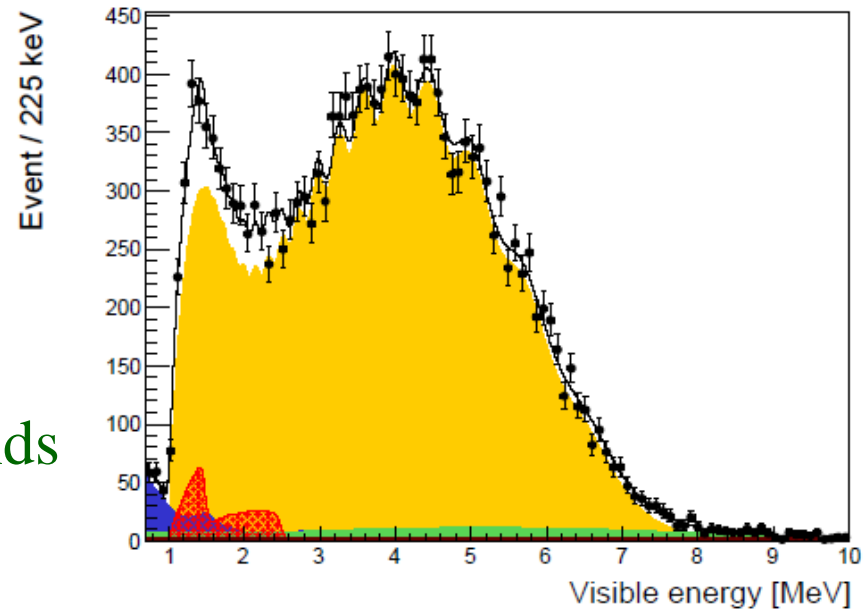
Item		Rate (no PSD)	PSD efficiency	Rate (PSD)
Signal	$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 12 \text{ MeV}$	12.2	$\varepsilon_{\nu} = 50 \%$	6.1
	$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 15 \text{ MeV}$	25.4		12.7
	$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 18 \text{ MeV}$	42.4		21.2
	$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle = 21 \text{ MeV}$	61.2		30.8
Background	reactor $\bar{\nu}_e$	1.6	$\varepsilon_{\nu} = 50 \%$	0.8
	atm. CC	1.5	$\varepsilon_{\nu} = 50 \%$	0.8
	atm. NC	716	$\varepsilon_{\text{NC}} = 1.1 \%$	7.5
	fast neutrons	12	$\varepsilon_{\text{FN}} = 1.3 \%$	0.15
	Σ			9.2

10 Years' sensitivity

Syst. uncertainty BG	5%		20%	
	rate only	spectral fit	rate only	spectral fit
$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle$				
12 MeV	1.7 σ	1.9 σ	1.5 σ	1.7 σ
15 MeV	3.3 σ	3.5 σ	3.0 σ	3.2 σ
18 MeV	5.1 σ	5.4 σ	4.6 σ	4.7 σ
21 MeV	6.9 σ	7.3 σ	6.2 σ	6.4 σ

地球中微子

- ◆ Current results
 - KamLAND: 30 ± 7 TNU
 - Borexino: 38.8 ± 12.2 TNU
 - Statistics dominant
- ◆ Desire to reach an error of 3 TNU
- ◆ JUNO: 40 TNU, $\times 20$ statistics
 - ⇒ Huge reactor neutrino backgrounds
 - ⇒ Need accurate reactor spectra



Source	Events/year
Geoneutrinos	408 ± 60
U chain	311 ± 55
Th chain	92 ± 37
Reactors	16100 ± 900
Fast neutrons	3.65 ± 3.65
${}^9\text{Li} - {}^8\text{He}$	657 ± 130
${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$	18.2 ± 9.1
Accidental coincidences	401 ± 4

Combined shape fit of geo- ν and reactor- ν

	Best fit	1 y	3 y	5 y	10 y
U+Th fix ratio	0.96	17%	10%	8%	6%
U (free)	1.03	32%	19%	15%	11%
Th (free)	0.80	66%	37%	30%	21%

Solar and other Physics



◆ Solar neutrino

⇒ Metallicity? Vacuum oscillation to MSW?

⇒ ${}^7\text{Be}$ and ${}^8\text{B}$ at JUNO

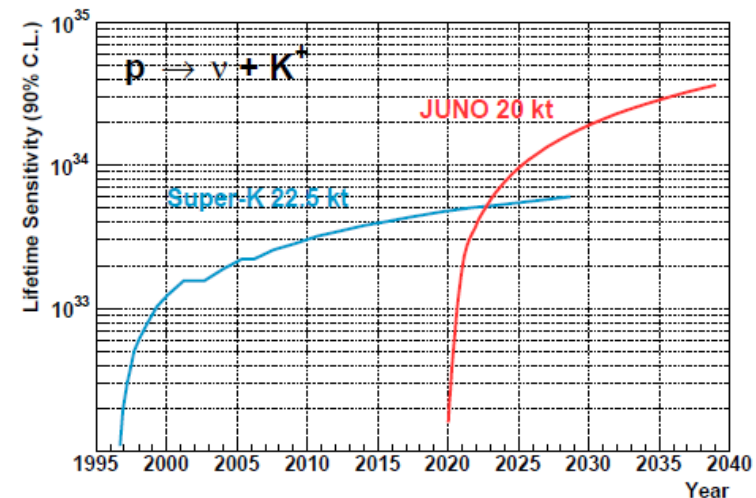
Source	Rate [cpd/1kt]
pp	1337
${}^7\text{Be}$ [line 0.384 MeV]	19
${}^7\text{Be}$ [line 0.862 MeV]	475
pep	28
${}^8\text{B}$	4.5
${}^{13}\text{N}$	25
${}^{15}\text{O}$	28
${}^{17}\text{F}$	0.7

Liquid Scintillator	U238	Th232	K40	Pb210 (Rn222)	Ref.
No Distillation	10^{-15}	10^{-15}	10^{-16}	$1.4 \cdot 10^{-22}$	Borexino CTF, KamLAND
After Distillation	10^{-17}	10^{-17}	10^{-18}	10^{-24}	

◆ Proton Decay

◆ Neutrinos from dark matter in Sun or galaxy

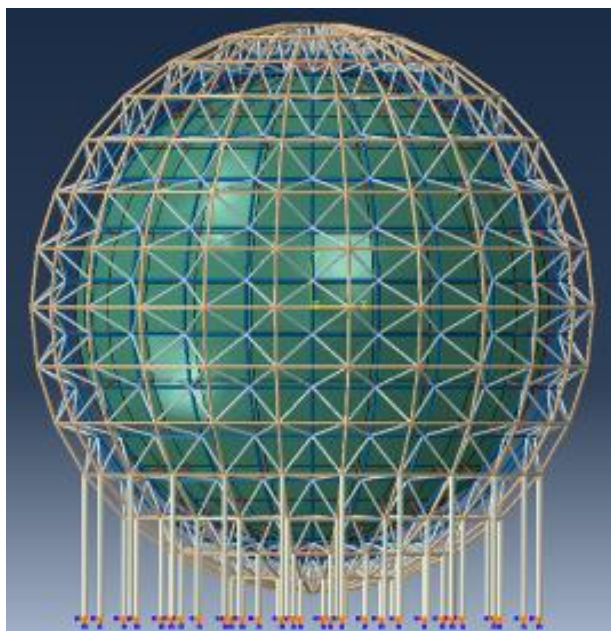
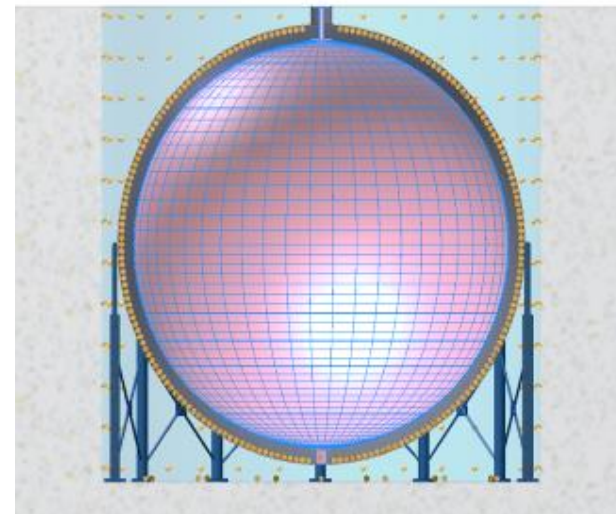
◆ Sterile neutrino



中心探测器



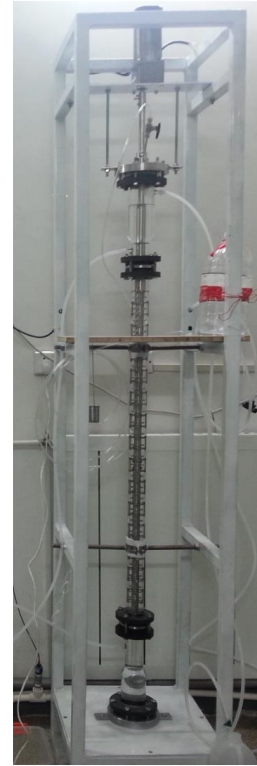
- ◆ 2万吨液闪，直径35.4米
- ◆ 2014年由多个方案集中为2个方案
 - ⇒ 有机玻璃球方案：板材成型+粘接实验，材料测试
 - ⇒ 气球方案：1/3原型球正在生产
- ◆ 计划2015年确定探测器方案



液闪



- ◆ 类似大亚湾液闪，多50倍，透明度、放射性本底的要求更高。
- ◆ 液闪光学纯化、放射性纯化
 - ⇒ 烷基苯工厂改进质量
 - ⇒ Al_2O_3 过滤
 - ⇒ 蒸馏
 - ⇒ 水萃取
 - ⇒ 氮萃取
- ◆ 初步工程设计和原型试验。
- ◆ 2015年在大亚湾地下实验室进行原型测试（包括意大利设备），纯化20吨烷基苯



Linear Alky Benzene (LAB)	Atte. Length @ 430 nm
RAW (specially made)	14.2 m
Vacuum distillation	19.5 m
SiO_2 coloum	18.6 m
Al_2O_3 coloum	25 m

光电倍增管



◆ 2014年成功生产第一支20英寸 MCP-PMT

- ⇒ 高能所+北方夜视+西安光机所
- ⇒ 新型光阴极：高量子效率
- ⇒ 收集效率显著提高
- ⇒ 改进长期稳定性

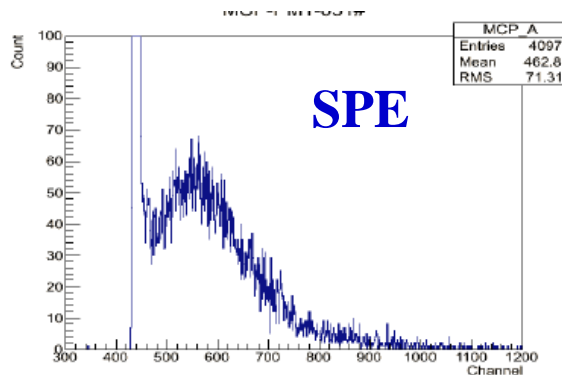
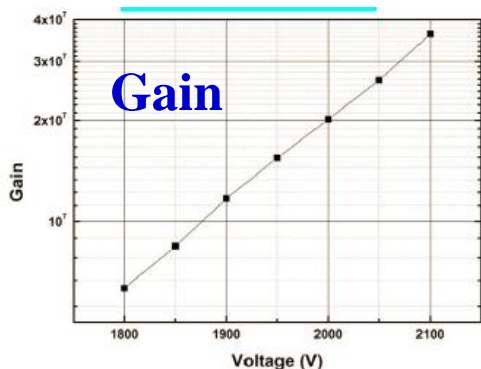
◆ 其它备选方案

- ⇒ 日本滨松
- ⇒ 海南展创

◆ 探测器小模型测试：各种PMT



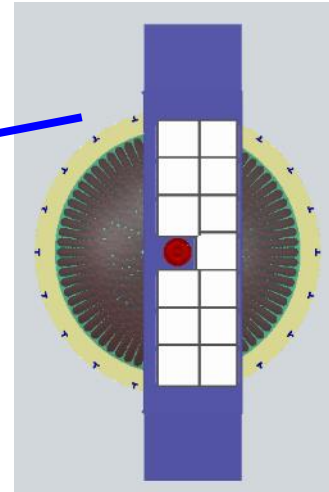
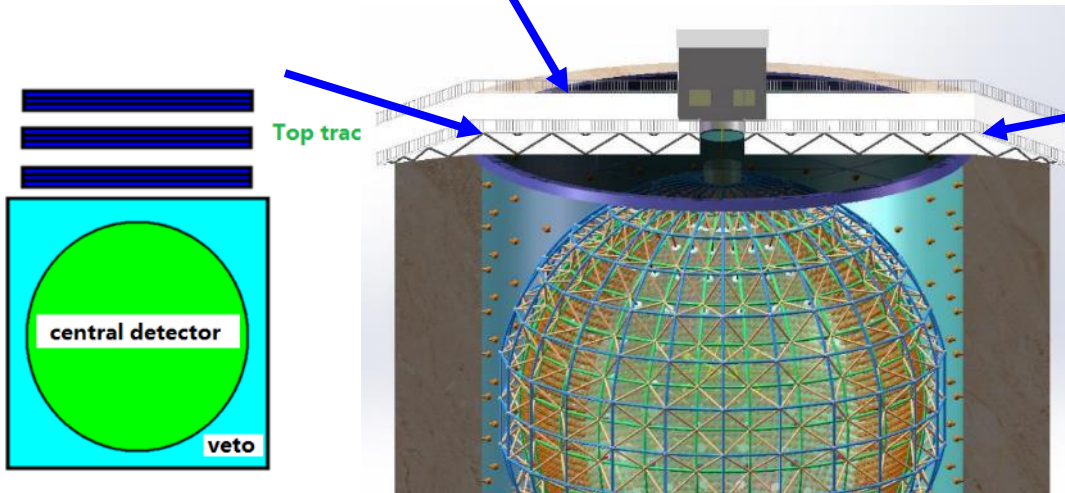
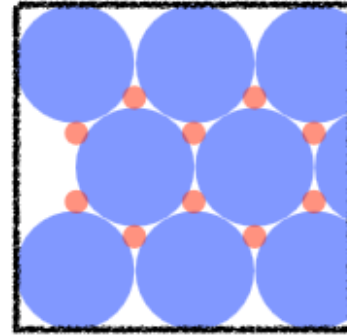
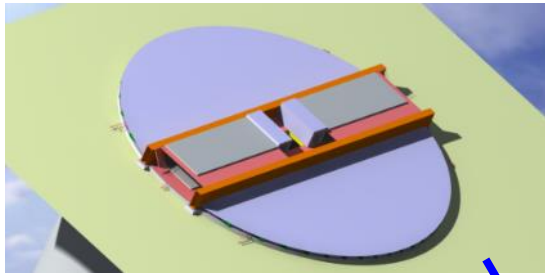
20" and 8" MCP-PMTs



	R5912	R5912-100	MCP-PMT
QE@410nm	25%	35%	25%
Rise time	3 ns	3.4ns	5ns
Dark noise	1kHz	3.5kHz	2.2kHz
P/V of SPE	>2.5	>2.5	~2
TTS	5.5ns	1.5 ns	3.5 ns

反符合探测器、电子学等

- ◆ 水切伦科夫探测器+顶部径迹探测器优化。采用塑料闪烁体（ OPERA实验 ，由法国提供 ）
- ◆ 电子学明确了技术指标：三种读出方案
- ◆ 小PMT设计方案

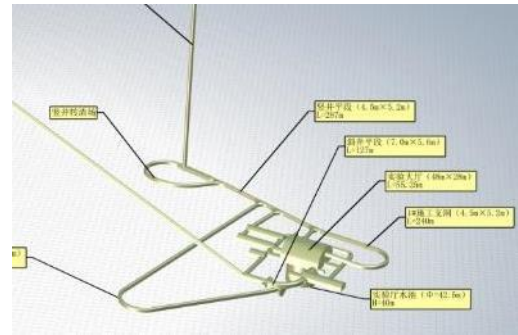


江门中微子实验建设启动会

Jiangmen Underground Neutrino Observatory
Construction Start-up Meeting

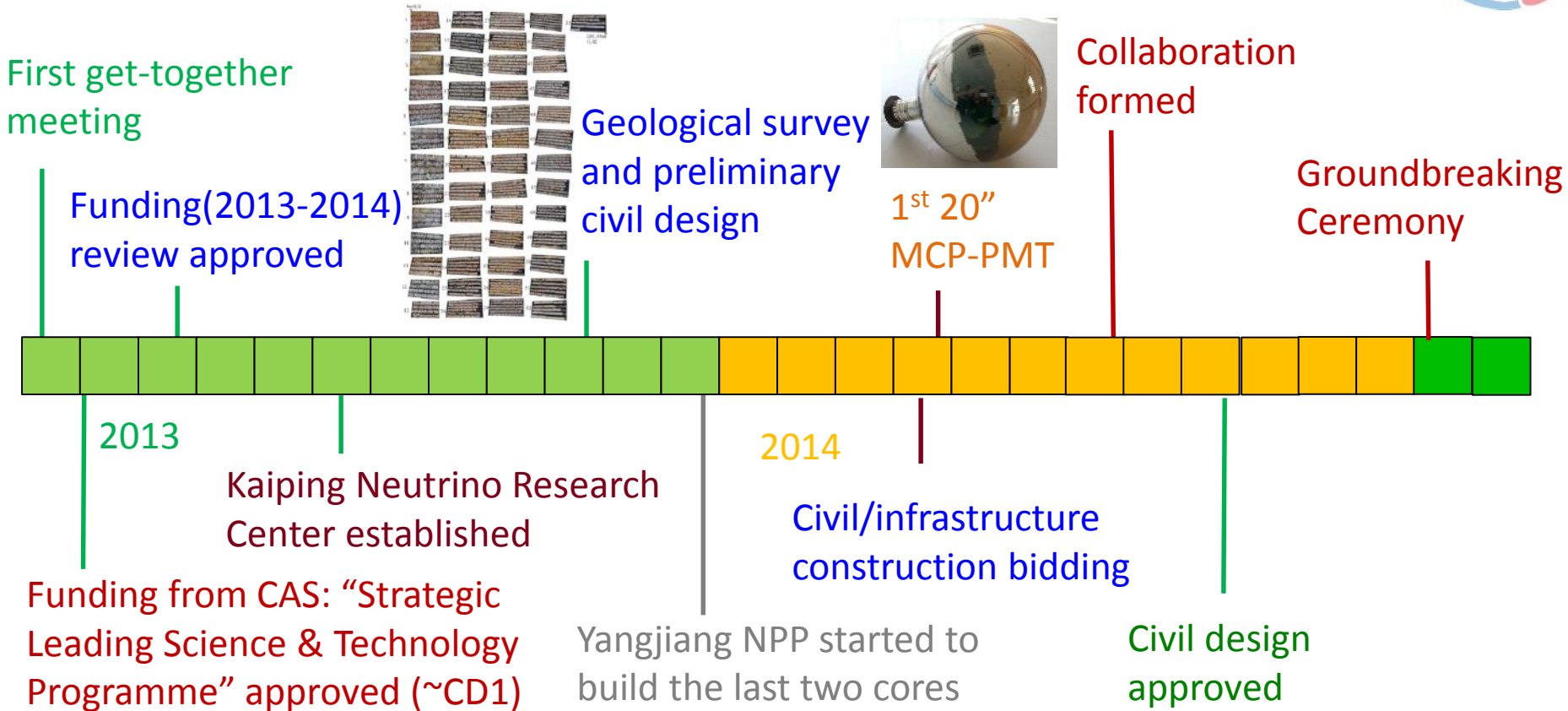
Jan. 10, 2015

广东省, 开平市, 金鸡镇
2015.1.10.



600 m vertical shaft
1300-m long tunnel(40% slope)
50-m diameter, 80-m high cavern

Project Plan and Progresses



- ◆ **3年完成土建 : 2015-2017**
- ◆ **探测器R&D : 2013-2016**
- ◆ **现场安装 : 2018-2019**
- ◆ **灌装、取数 : 2020**



江门国际合作组

2014年7月成立国际合作组，成员 380人
 高能所~100，国内大学~120，欧洲~160
 发言人：王贻芳，副发言人：曹俊，G.Ranucci

观察员

- 美国
- 俄罗斯 (1)
- 意大利 (1)
- 奥地利HEPHY
- 巴西PUC
- 智利PCUC
- 芬兰JyvaskylaU



美国 (1)

欧洲 (24)

亚洲 (28)

法国 (5)

- APC Paris
- CPPM Marseille
- IPHC Strasbourg
- LLR Paris
- Subatech Nantes

意大利 (7)

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

德国 (6)

- FZ Julich
- RWTH Aachen
- TUM
- U Hamburg
- U Mainz
- U Tuebingen

芬兰 (1)

- U Oulu
- 捷克 (1)
- Charles U

俄罗斯 (2)

- JINR
- INR Moscow

比利时 (1)

- ULB

亚美尼亚 (1)

- YPI

北师大

- 地质科学院
- 重庆大学
- 原子能院
- 东莞理工
- 华东理工
- 广西大学
- 哈工大
- 高能物理所
- 吉林大学

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

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

总结

- ◆ 江门中微子实验以反应堆中微子实验为主要物理目标，将确定中微子质量顺序，精确测量3个混合参数到 $<1\%$ 精度
- ◆ 江门2万吨探测器将国际液闪探测器水平提高一个等级，为超新星中微子、超新星背景中微子、太阳中微子、暗物质等天体物理课题提供难得的平台。
- ◆ 成立了国际合作组，共11个国家和地区，58个单位，380人，以及多个观察员单位。成立了合作组管理机构。国外贡献部分确定。
- ◆ 江门实验2013年获中科院先导专项支持。2015年1月10日土建启动仪式。土建进展顺利，预期2020年建成。
- ◆ 探测器设计与研发进展顺利。计划2015年确定中心探测器方案、确定是否采用3英寸PMT、初步确定电子学方案；将进行液闪纯化中试、探测器小模型测试等。

谢谢！