



中微子实验进展

曹俊

中国科学院 高能物理研究所

2023.8.10

中微子

◆ 中微子：构成物质世界的基本粒子之一

⇒ 与物质相互作用极为微弱 → 穿透力强，难探测

⇒ 质量极轻

◆ 20年前发现中微子振荡，间接证明中微子有质量

⇒ 唯一超出粒子物理标准模型的确凿实验现象

◆ 存在众多未解之谜

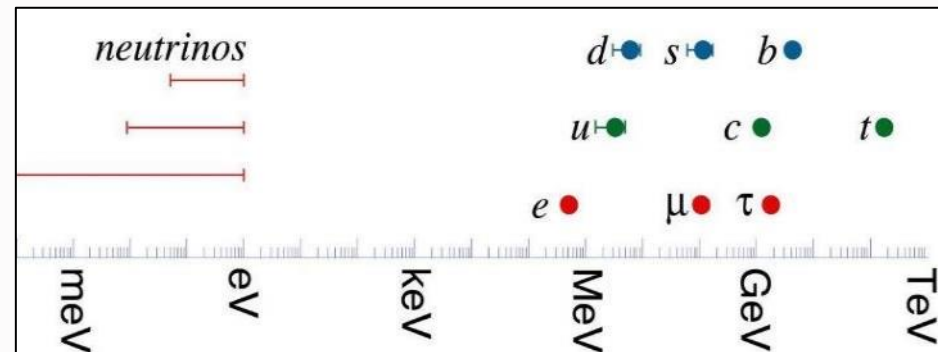
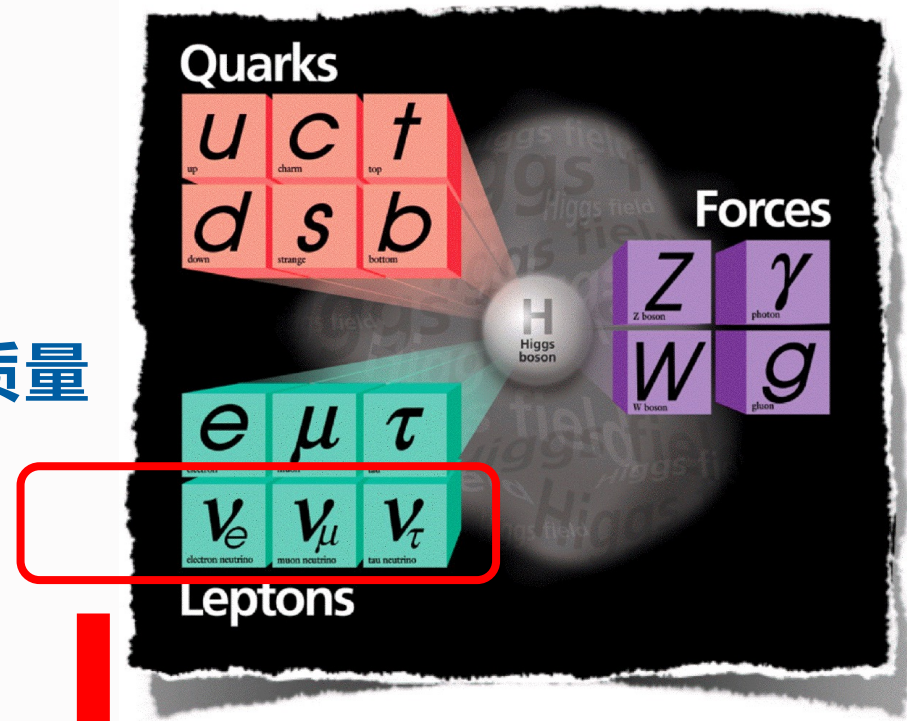
⇒ 质量大小和起源

⇒ 是否为马约拉纳粒子

⇒ 是否造成了宇宙中物质与反物质的不对称

◆ 中微子研究是发现新物理最重要的突破口之一

⇒ 也是研究核物理、天体物理、宇宙学的新工具



中微子从哪里来?



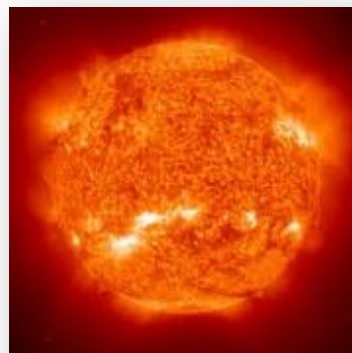
宇宙大爆炸

3万亿/cm²/s



超新星爆发

1e58个



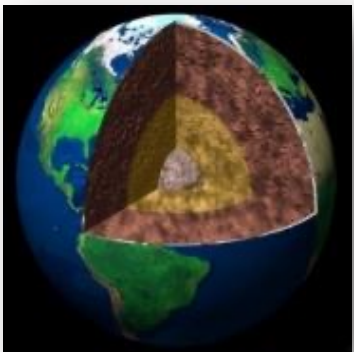
太阳

氢核聚变, 600亿/cm²/s



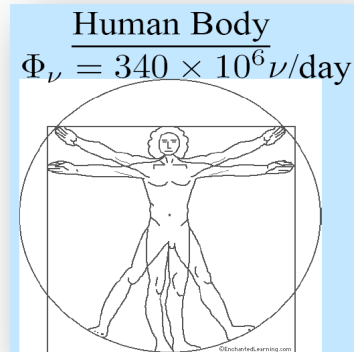
大气中微子

宇宙线撞击大气



地球

铀、钍、钾衰变



人体

钾40、碳14衰变



反应堆

裂变产物衰变, ~万亿亿/s



加速器

质子撞击原子核

中微子研究简史

1930年

提出中微子假说

为解决原子核β衰变的能量不守恒问题，奥地利物理学家泡利首次提出中微子存在的假说

1962年

发现第二种中微子

莱德曼、施瓦茨和斯坦博格利用美国布鲁克海文的加速器证明存在第二种中微子



获1988年度
诺贝尔奖

1987年

首次探测到超新星中微子

日本科学家小柴昌俊领导的神冈实验，首次观测到超新星SN1987A产生的中微子



获2002年度
诺贝尔奖

2001年

发现太阳中微子振荡

加拿大科学家麦克唐纳领导的SNO实验发现太阳中微子振荡



获2015年度
诺贝尔奖

1956年

首次探测中微子

美国物理学家莱因斯和柯温在核反应堆附近开展实验，首次直接证实中微子的存在



获1995年度
诺贝尔奖

1968年

首次探测到太阳中微子

戴维斯等人首次观测到太阳核聚变产生的中微子，并发现它远少于预期，引发了持续40余年的“太阳中微子丢失之谜”的研究



获2002年度
诺贝尔奖

1998年

发现大气中微子振荡

梶田隆章代表超级神冈实验宣布发现大气中微子振荡，表明中微子具有非零质量



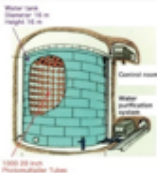
获2015年度
诺贝尔奖

2012年

发现第三种中微子振荡模式

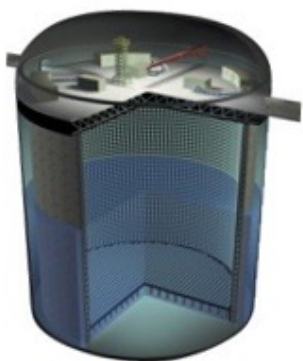
中国大亚湾反应堆中微子实验发现一种新的中微子振荡模式，并测量了其混合角 θ_{13}

发现中微子振荡



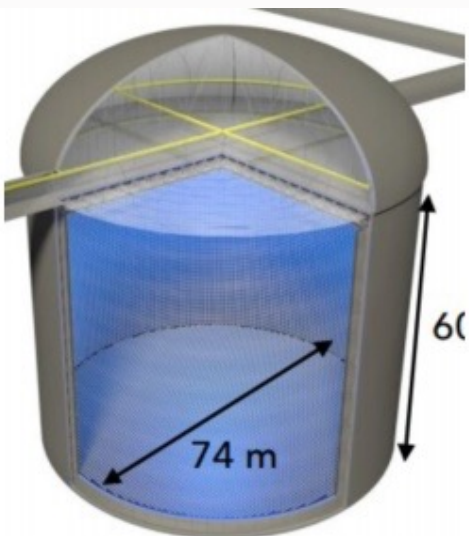
神冈 3千吨, 1983

目标寻找质子衰变, 发现大气中微子反常, 首次探测到超新星中微子



超级神冈 5万吨, 1996

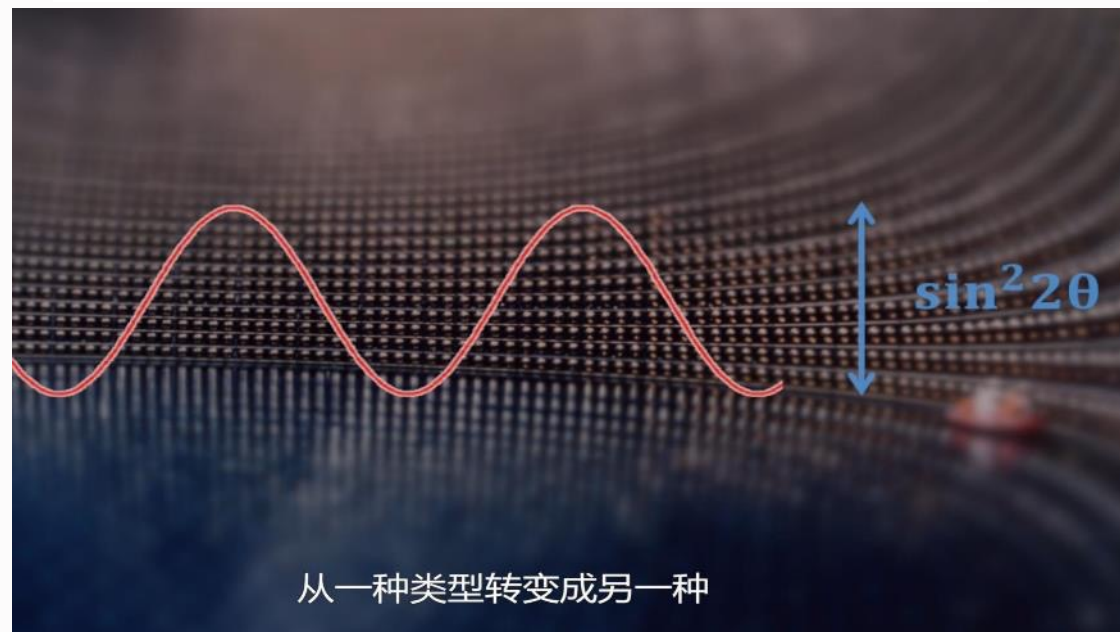
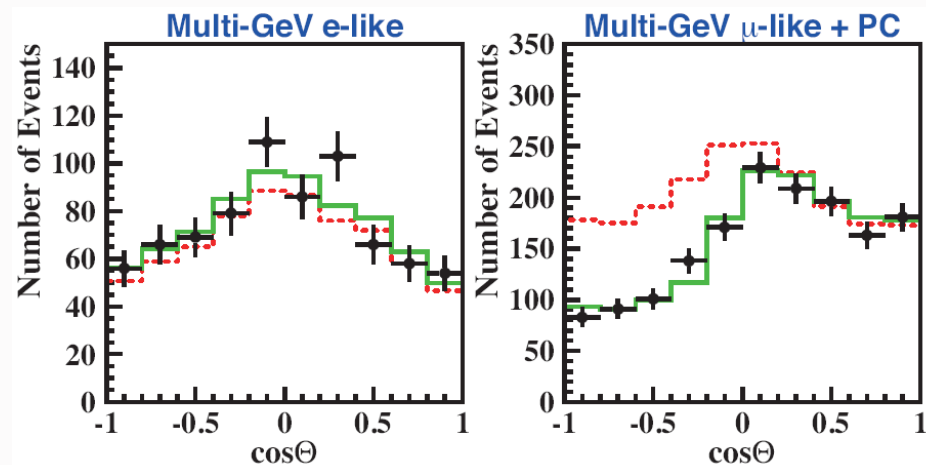
1998年发现大气中微子振荡



顶级神冈

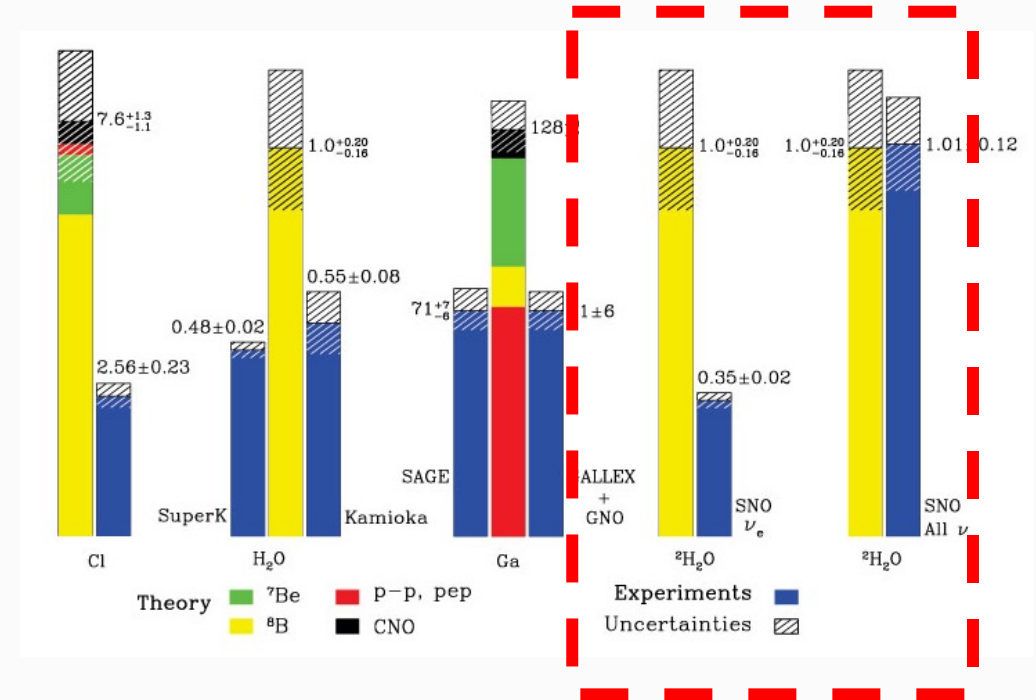
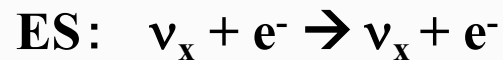
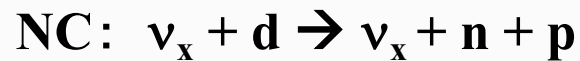
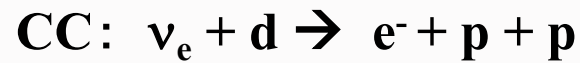
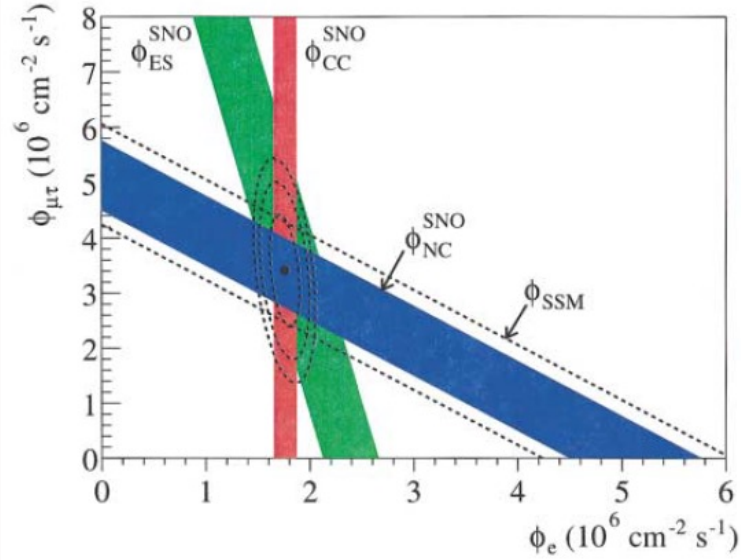
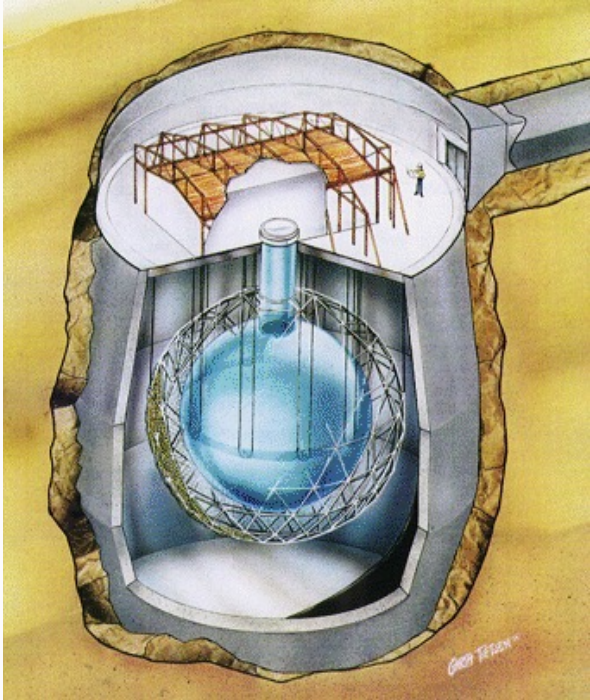
26万吨, 2027

测量电荷宇称破坏、质量顺序, 寻找质子衰变

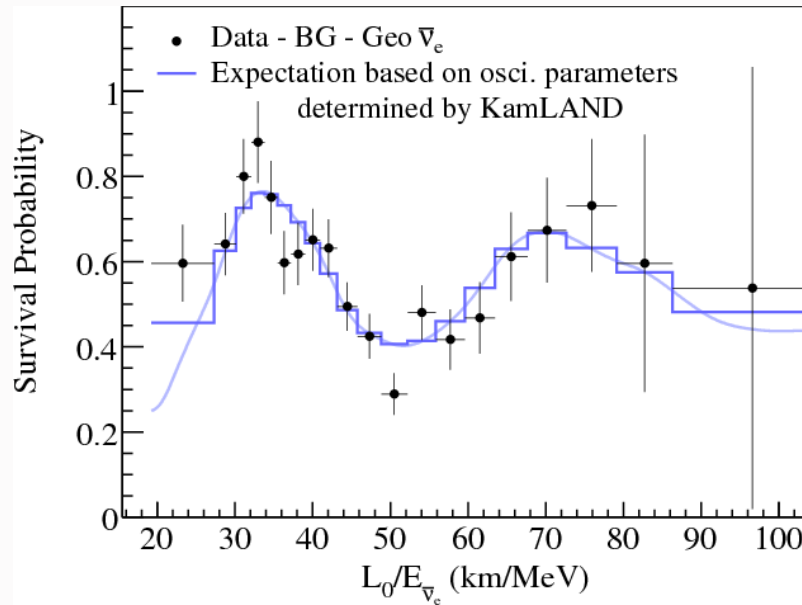
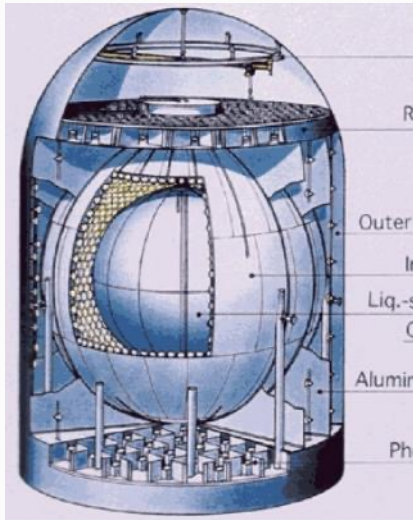


发现太阳中微子振荡

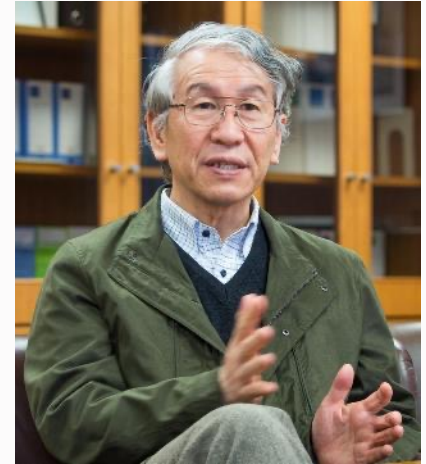
- ◆ 1968年，戴维斯首次探测到太阳中微子 → 太阳中微子失踪之谜
- ◆ 2001年，加拿大SNO实验用1千吨重水同时探测三种中微子，测得电子中微子丢失，但中微子总数未变 → 出现了新的缪中微子和陶中微子



确认中微子振荡

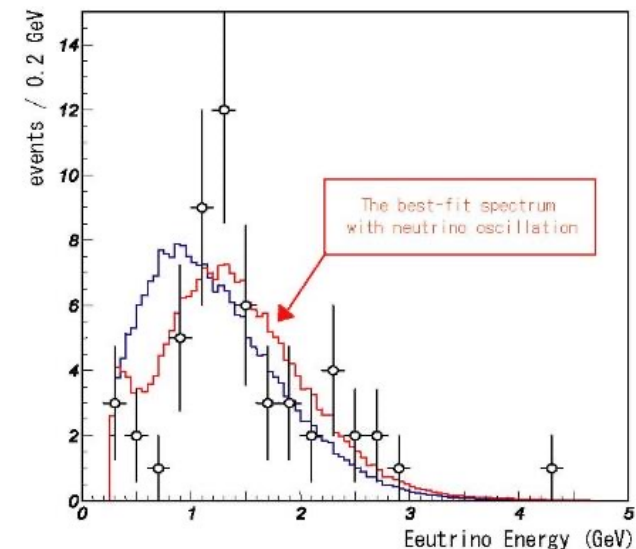
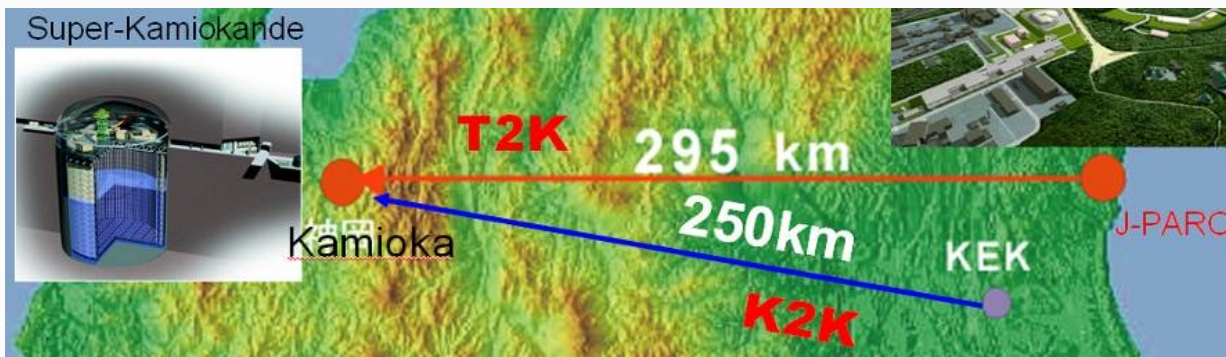


2002年日本
KamLAND实验用反应堆中
微子证实了太阳
中微子振荡。



Atsuto Suzuki

2003年日本的K2K实验用加速器
验证了大气中微子振荡。



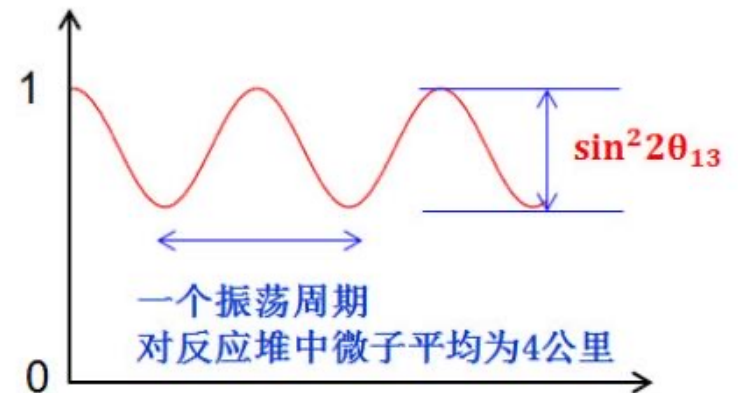
中微子振荡规律

- ◆ 中微子有三种（味道）：电子中微子 ν_e ，缪中微子 ν_μ 和陶中微子 ν_τ
- ◆ 中微子振荡：中微子在飞行过程中会自发地、周期性地改变其自身的种类
 - ⇒ 只有中微子质量不为零时才能发生。而粒子物理标准模型一直认为中微子质量为零
 - ⇒ 一个电子中微子（或其它种类的中微子）由三种不同质量的量子态（ ν_1, ν_2, ν_3 ）叠加组成，不同质量态的量子本征频率不同，在飞行过程中，这些态的量子干涉导致一部分电子中微子转化为其它种类的中微子，形成中微子振荡
- ◆ 由6个参数描述：三个混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ ，两个质量平方差 $\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$ ，一个相角 δ_{CP}

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

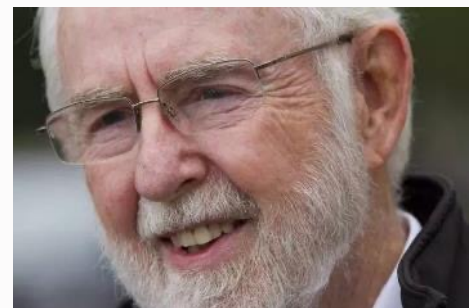
飞行距离/中微子能量

$$P_{sur} \approx 1 - \underbrace{\sin^2 2\theta_{13}}_{\text{振幅大小}} \cdot \underbrace{\sin^2 \left(1.27 \cdot \Delta m_{31}^2 \cdot \frac{L}{E} \right)}_{\text{振荡频率}}$$



中微子振荡

2002年左右中微子振荡得到确立



阿瑟·麦克唐纳
2015年诺贝尔奖



$$\sin^2 2\theta_{12} = 0.85$$
$$\Delta^2 m_{21} = 7.5 \times 10^{-5} eV^2$$

太阳中微子模式

太阳中微子
反应堆中微子

$$\sin^2 2\theta_{23} = 1$$
$$\Delta^2 m_{32} = 2.5 \times 10^{-3} eV^2$$

大气中微子模式

大气中微子实验
加速器中微子



梶田隆章
2015年诺贝尔奖



“发现中微子振荡现象，证实中微子有质量。”

中微子有质量，是第一次有坚实证据超出粒子物理标准模型的新现象

中微子振荡

三代中微子的框架内，由6个参数描述中微子振荡

θ_{12}	θ_{23}	θ_{13}	δ_{CP}
Δm^2_{21}	$ \Delta m^2_{32} $	Δm^2_{31}	

质量顺序

$$\Delta^2 m_{21} = 7.5 \times 10^{-5} eV^2$$

$$\Delta^2 m_{32} \approx \Delta^2 m_{31} = 2.5 \times 10^{-3} eV^2$$

$\delta \sim -1/2\pi?$

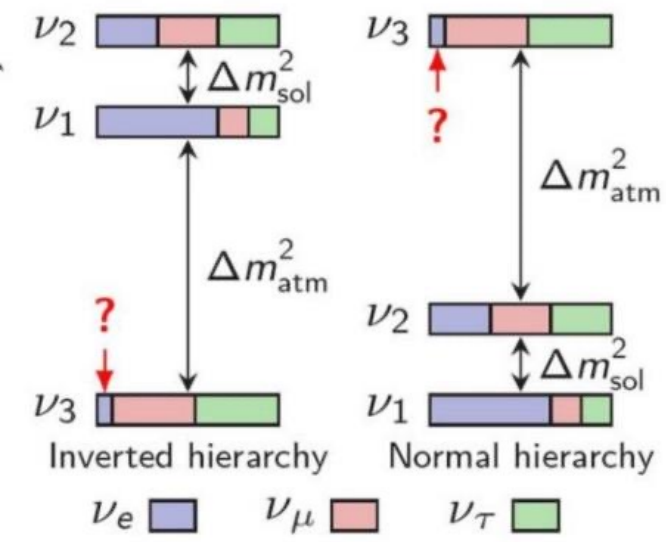
加速器中微子

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

$\theta_{23} \sim 45^\circ$
大气中微子
加速器中微子

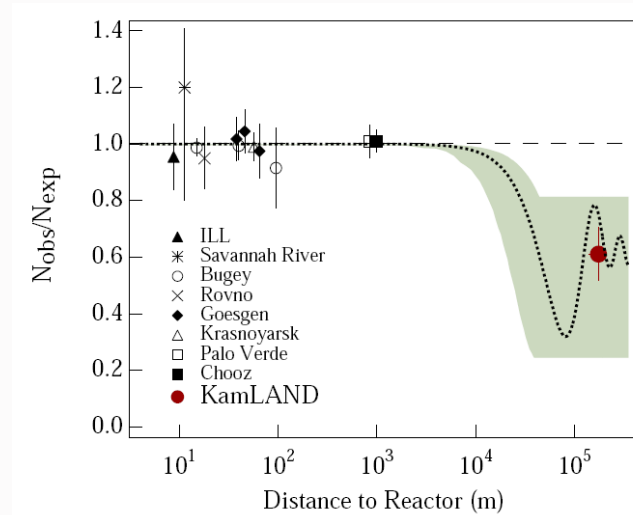
$\theta_{13} \sim 9^\circ$
反应堆中微子
加速器中微子

$\theta_{12} \sim 34^\circ$
太阳中微子
反应堆中微子

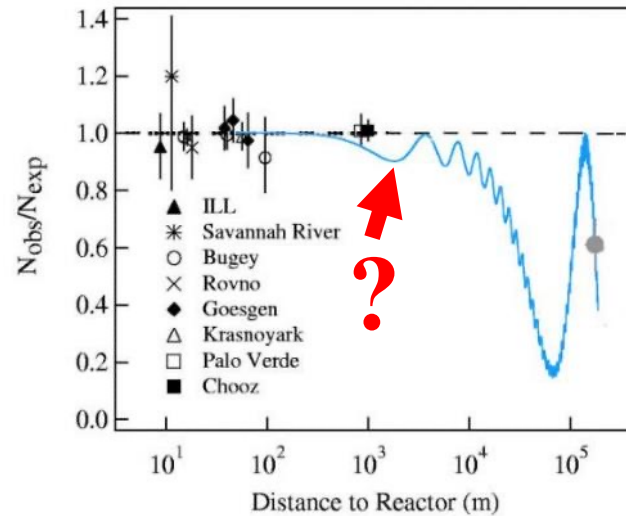


寻找第三种中微子振荡

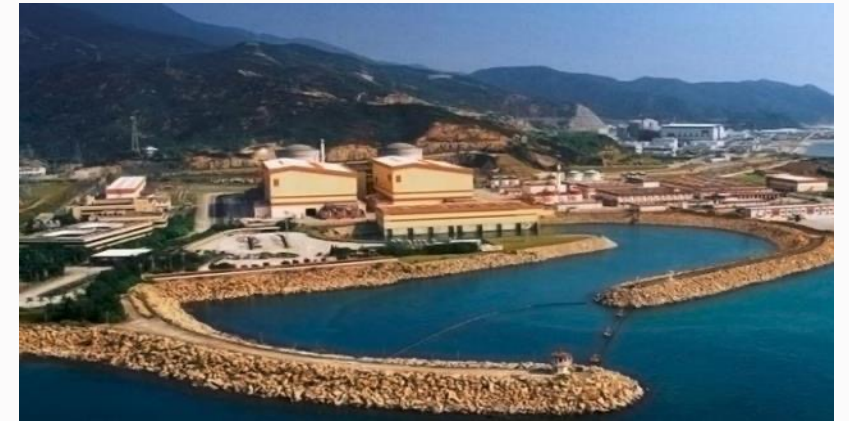
- ◆ 三种中微子，应该存在3种振荡
- ◆ 1997-1999，在距反应堆1公里处，法国和美国两个实验没有发现振荡



2002年日本KamLAND实验



第3种振荡(θ_{13})是否真的存在?



中广核集团大亚湾、岭澳核电站（深圳）

- ◆ 2003年左右，7个国家提出8个方案，利用反应堆寻找第3种振荡 (θ_{13})
- ◆ 大亚湾核电站是最佳实验地点：反应堆群功率高（世界第二）、紧临山

探测反应堆中微子

◆ 反应堆发电时，同时发射出大量中微子，称为“反应堆中微子” ($\bar{\nu}_e$)

⇒ 平均每裂变释放200MeV能量和6个中微子

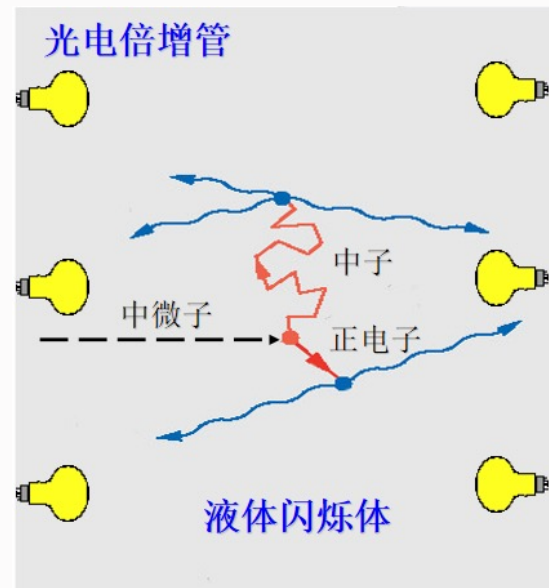
⇒ 每个反应堆（2.9GW）每秒发射6万亿亿个中微子

◆ 液体闪烁体探测器探测反应堆中微子

⇒ 反应堆中微子 + 氢核 → 正电子 + 中子

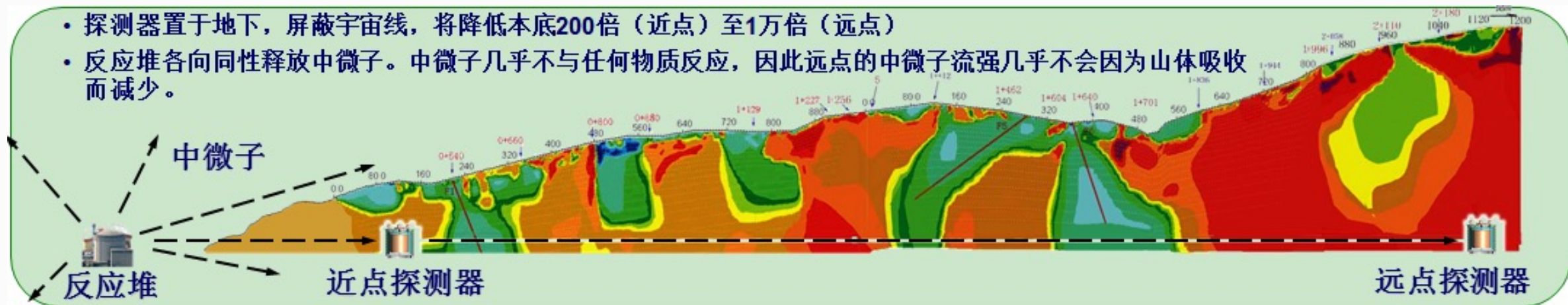
⇒ 距反应堆360米，20吨液体闪烁体，每天700个中微子信号

⇒ 反应堆功率越高越好；探测器要大；要放在地下屏蔽宇宙线



• 探测器置于地下，屏蔽宇宙线，将降低本底200倍（近点）至1万倍（远点）

• 反应堆各向同性释放中微子。中微子几乎不与任何物质反应，因此远点的中微子流强几乎不会因为山体吸收而减少。



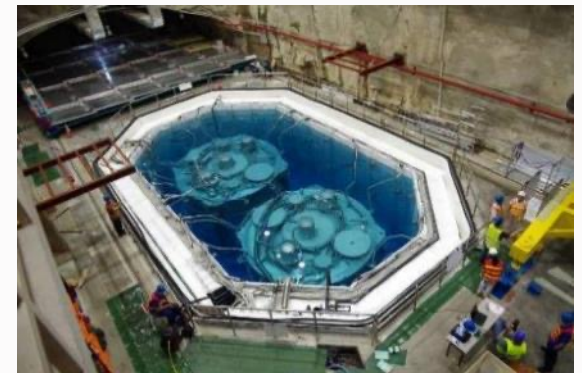
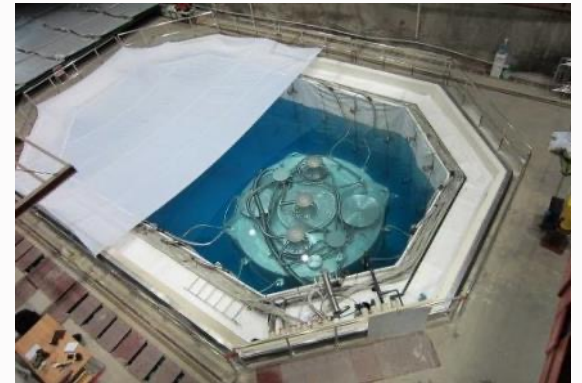
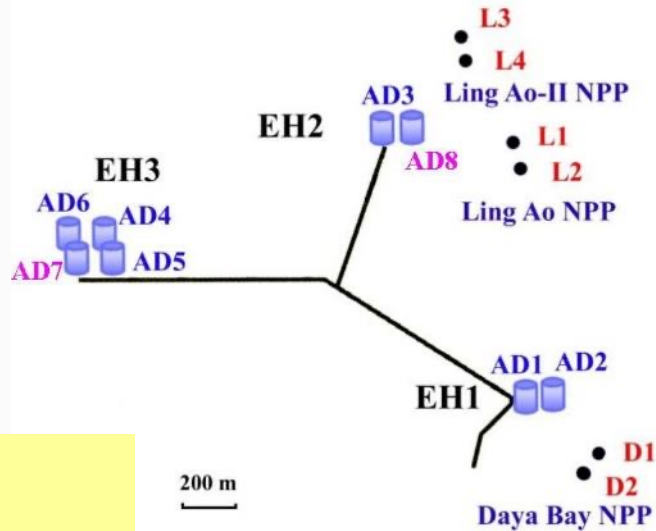
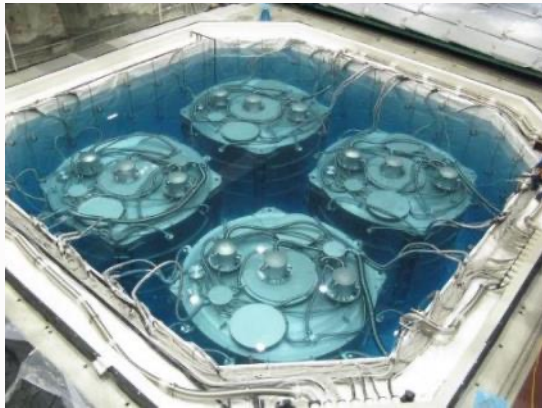
大亚湾反应堆中微子实验

◆ 2003年提出方案，2007开工建设，独创设计，精度国际最高

⇒ 独创多模块设计方案，确保最高精度

⇒ 一系列技术创新：最透明、稳定的掺钷液体闪烁体；水切伦科夫探测器；精确标定……

◆ 250名科学家，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
- 3 个地下实验厅
- 3 个水切伦科夫探测器 (4400 吨纯净水)
- 8 个 110 吨重的中微子探测器

发现中微子振荡新模式

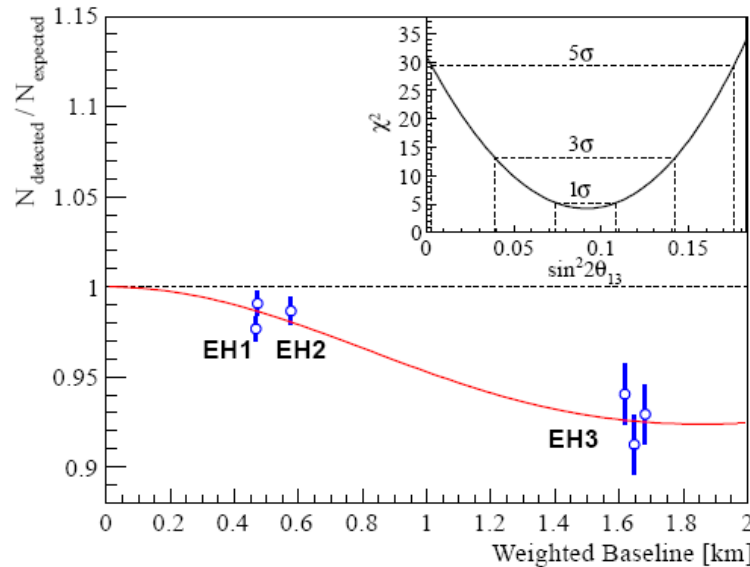
◆ 2011年底提前以6个探测器运行，2012年3月以55天的数据，率先发现中微子振荡新模式，发现振幅 (θ_{13}) 远大于预期。

⇒ θ_{13} 是自然界的基本参数之一，是解开宇宙中“反物质消失之谜”的必备钥匙

- 描述正反物质不对称性的Jarlskog不变量 = $\sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \cos \theta_{13} \sin \delta$

- 2023年4月，Cecilia Jarlskog与大亚湾实验共同获得欧洲物理学会“高能与粒子物理奖”

⇒ 它的大小决定了未来中微子实验研究的发展方向



入选《科学》杂志今年十大科学突破
大亚湾中微子实验成果世界瞩目
被认为是对物质世界基本规律的新认识

国内外二十多个项重要奖项

⇒ 2016年度国家自然科学一等奖；未来科学大奖……

⇒ 美国“基础物理学突破奖”；美国物理学会“潘诺夫斯基奖”；日本“日经亚洲奖”；俄罗斯“庞蒂科夫奖”；欧洲物理学会“高能与粒子物理奖”……

大亚湾反应堆中微子实验后续成果

◆ 大亚湾实验2020年退役

- ⇒ 国际最精确的振荡振幅 θ_{13} 、振荡频率 Δm_{31}^2
- ⇒ 国际最精确的反应堆中微子能谱，**发现与理论预期不符**
- ⇒ 国际领先的惰性中微子研究



中微子未知问题

中微子振荡

1个半未知参数:

质量顺序、CP破坏、 θ_{13} 正性

是否为自身反粒子?

中微子质量大小?

反常磁矩?

是否存在惰性中微子?

核心问题：中微子质量问题

做为一种新探测工具

超新星、宇宙大尺度结构、太阳物理、
超高能宇宙线起源、地球物理、核物理

宇宙大爆炸中微子?

中微子振荡

反应堆

中国大亚湾, 韩国RENO, 法国
Double Chooz, 十来个近距离实验

未来: 中国江门 (JUNO)

太阳中微子

日本Super-K, 意大利BOREXINO

未来: 日本Hyper-K, 中国JUNO,
加拿大SNO+

大气中微子

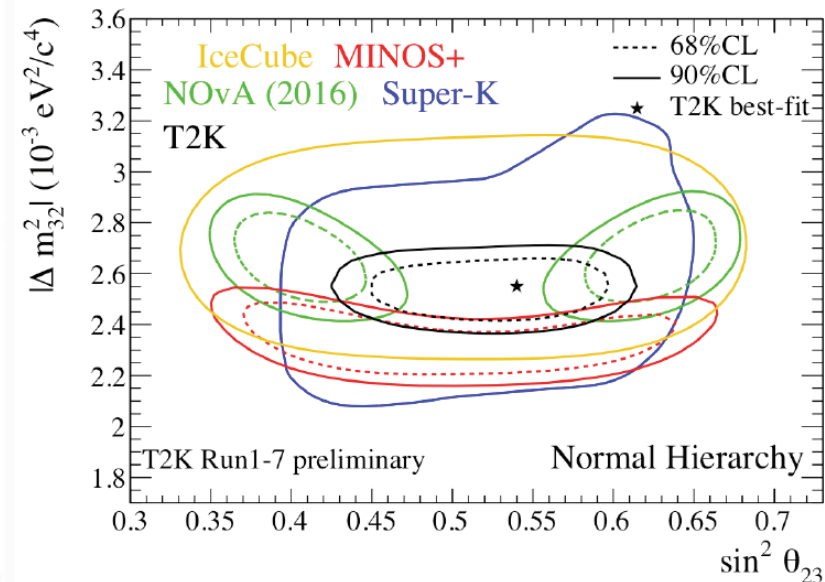
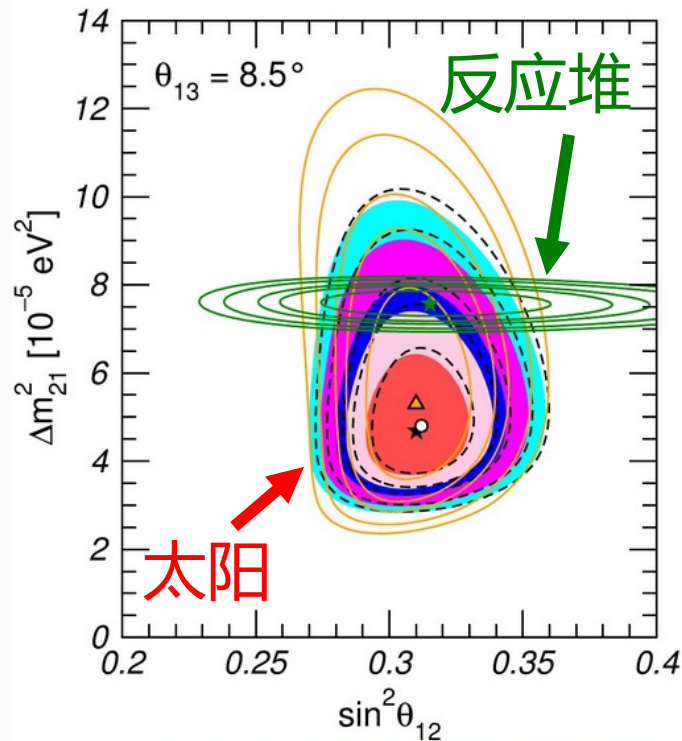
日本Super-K

未来: 日本Hyper-K, 美国PINGU,
法国ORCA

加速器中微子

日本T2K, 美国NOvA

未来: 日本T2HK, 美国DUNE



Super-K, SNO, Borexino

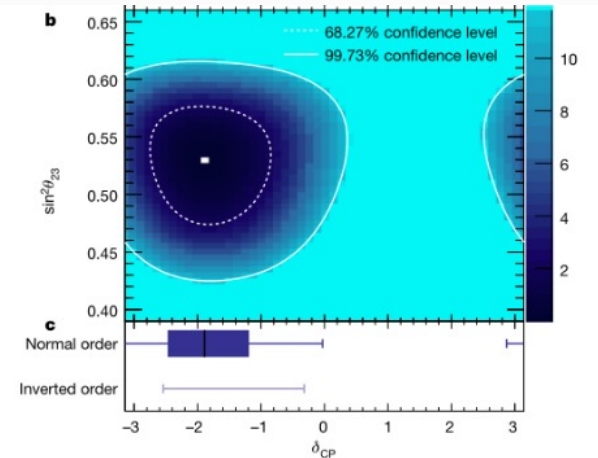
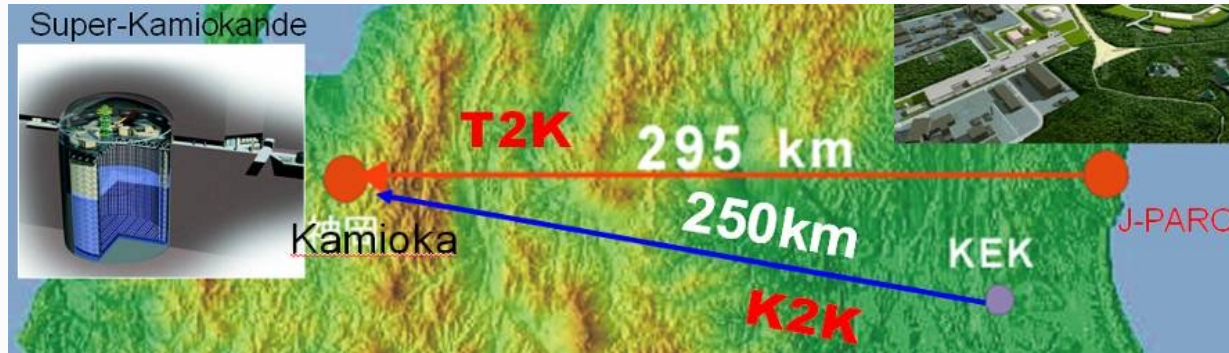
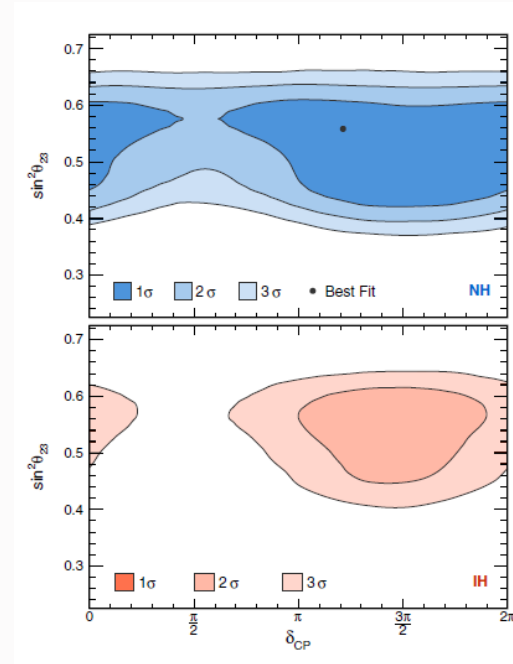
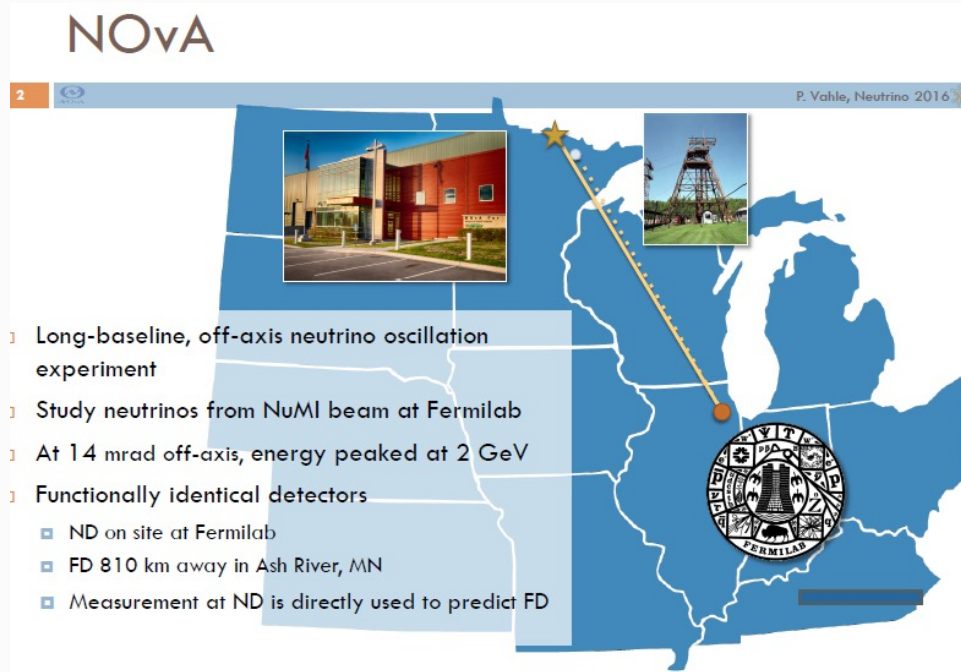
→ Hyper-K, SNO+, JUNO

Super-K, IceCube

→ Hyper-K, JUNO,
PINGU, ORCA

振荡：质量顺序与CP相角

NOvA和T2K计划运行到2026年，有希望对质量顺序和CP不为0给出证据 (3σ)





中微子束流

VOLUME 9, NUMBER 1

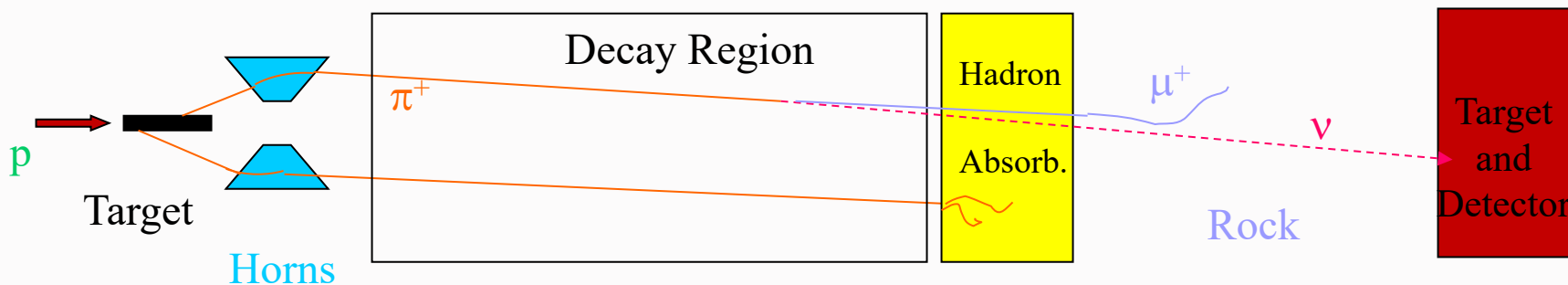
PHYSICAL REVIEW LETTERS

JULY 1, 1962

OBSERVATION OF HIGH-ENERGY NEUTRINO REACTIONS AND THE EXISTENCE OF TWO KINDS OF NEUTRINOS*

G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz,[†] and J. Steinberger[†]

Columbia University, New York, New York and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York
(Received June 15, 1962)



- ◆ Proton on target
- ◆ Pion decays

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\downarrow$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

长基线加速器中微子实验

- ◆ 日本
 - ⇒ **K2K, T2K, Hyper-K**
- ◆ 美国
 - ⇒ **MINOS, NOvA, DUNE**
 - ⇒ **MiniBooNE, MicroBooNE, ...**
- ◆ 欧洲
 - ⇒ **ICRUS, OPERA, LBNO, ESS-nu**

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$$

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

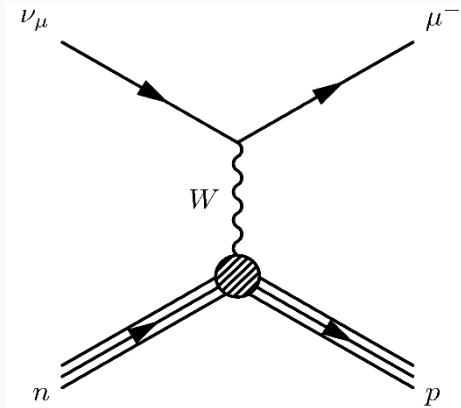
$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \sim 1 - (\cos^4 2\theta_{13} \sin^2 2\theta_{23} + \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23}) \sin^2 \Delta m_{31}^2 \frac{L}{4E}$$

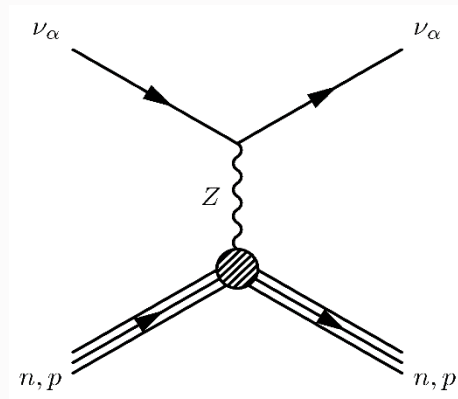
$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31} \quad \text{Leading Term} \\ & + 8c_{13}^2 s_{13} s_{23} c_{23} s_{12} c_{12} \sin \Delta_{31} [\cos \Delta_{32} \cos \delta - \sin \Delta_{32} \sin \delta] \sin \Delta_{21} \quad \text{CPV Term} \\ & - 8c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 s_{12}^2 \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} \\ & + 4c_{13}^2 s_{12}^2 [c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{23}^2 s_{13}^2 - 2c_{12} c_{23} s_{12} s_{23} s_{13} \cos \delta] \sin^2 \Delta_{21} \quad \text{Solar Term} \\ & - 8c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 (1 - 2s_{13}^2) \frac{aL}{4E_\nu} \sin \Delta_{31} \left[\cos \Delta_{32} - \frac{\sin \Delta_{31}}{\Delta_{31}} \right] \quad \text{Matter Term} \end{aligned}$$

加速器中微子探测

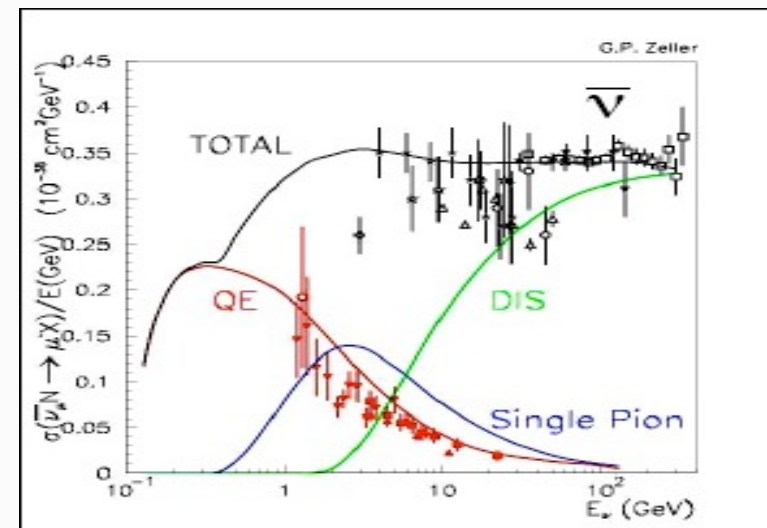
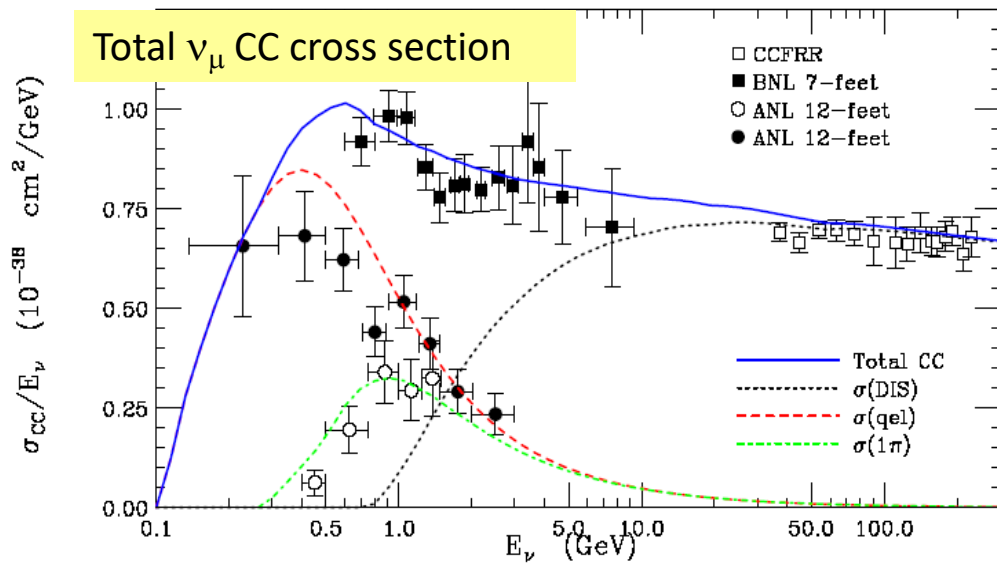
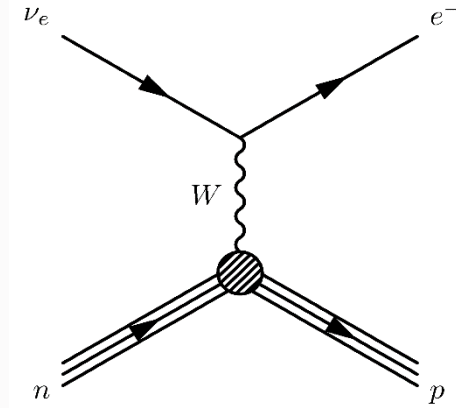
ν_μ CC Event



NC Event

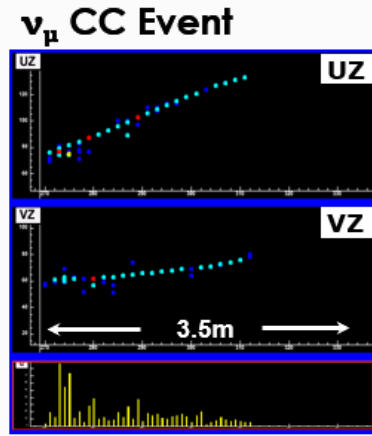
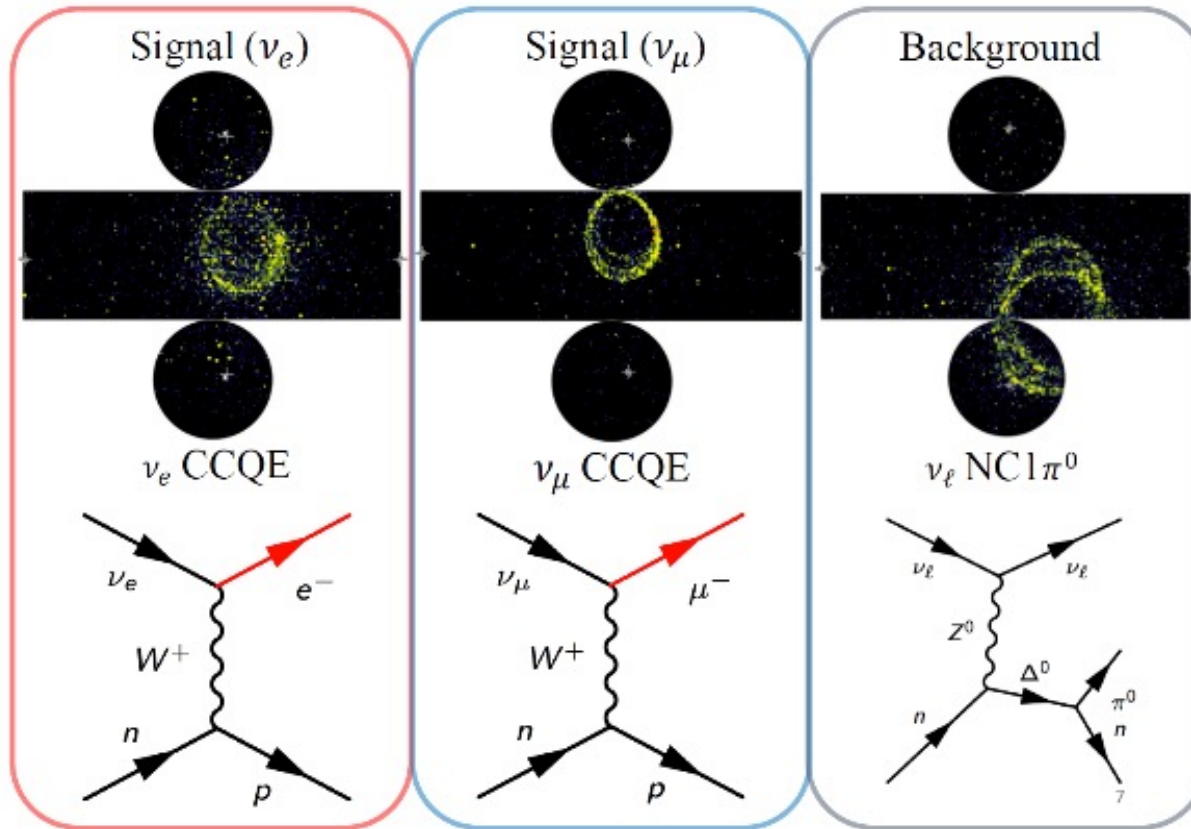


ν_e CC Event

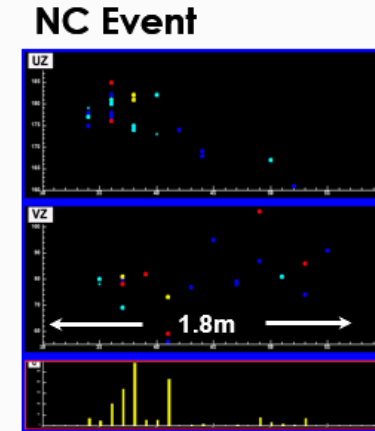


粒子鉴别

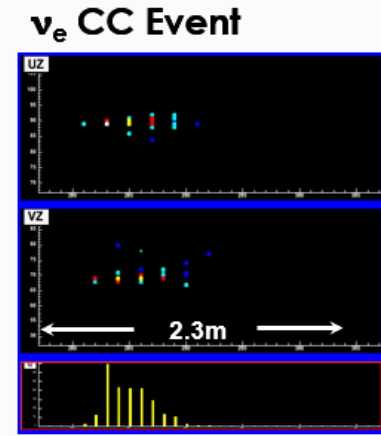
Neutrino Detection at SK Far Detector



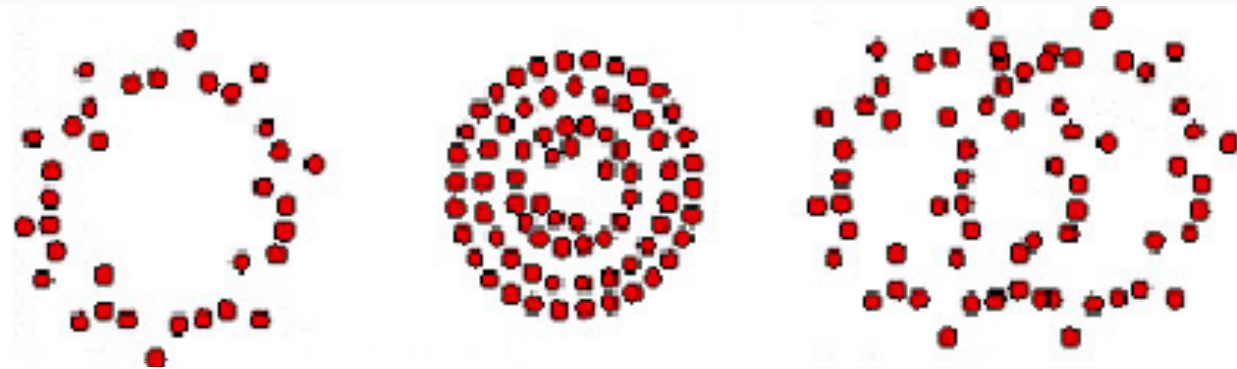
long μ track & hadronic activity at vertex



short event, often diffuse



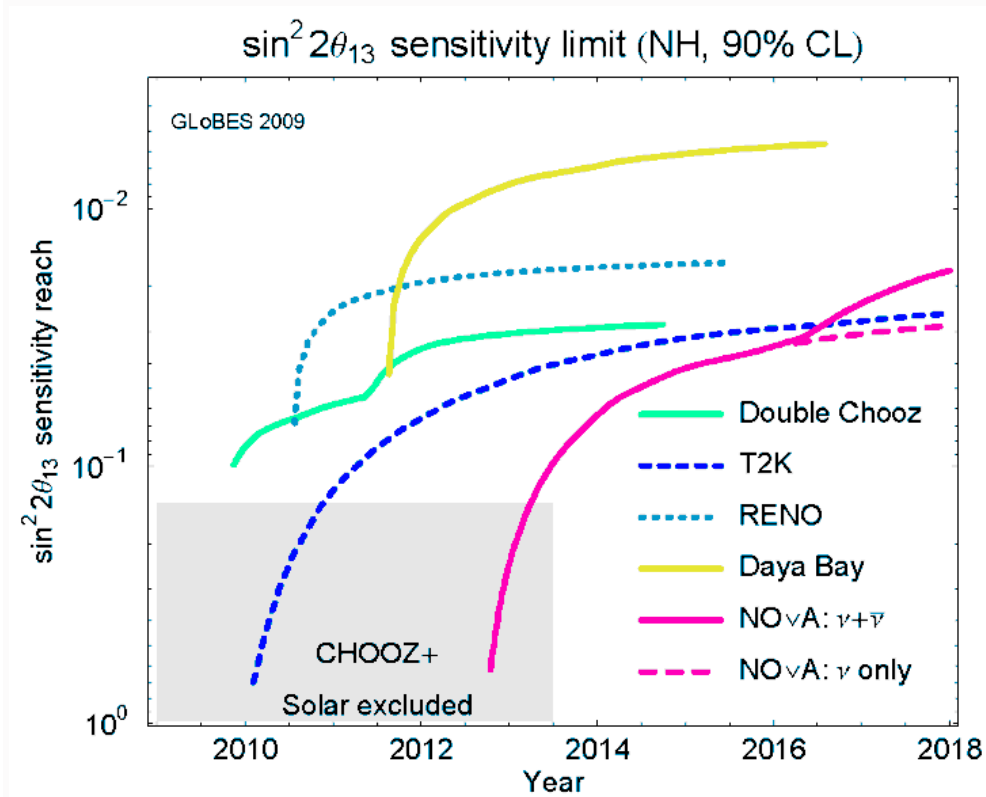
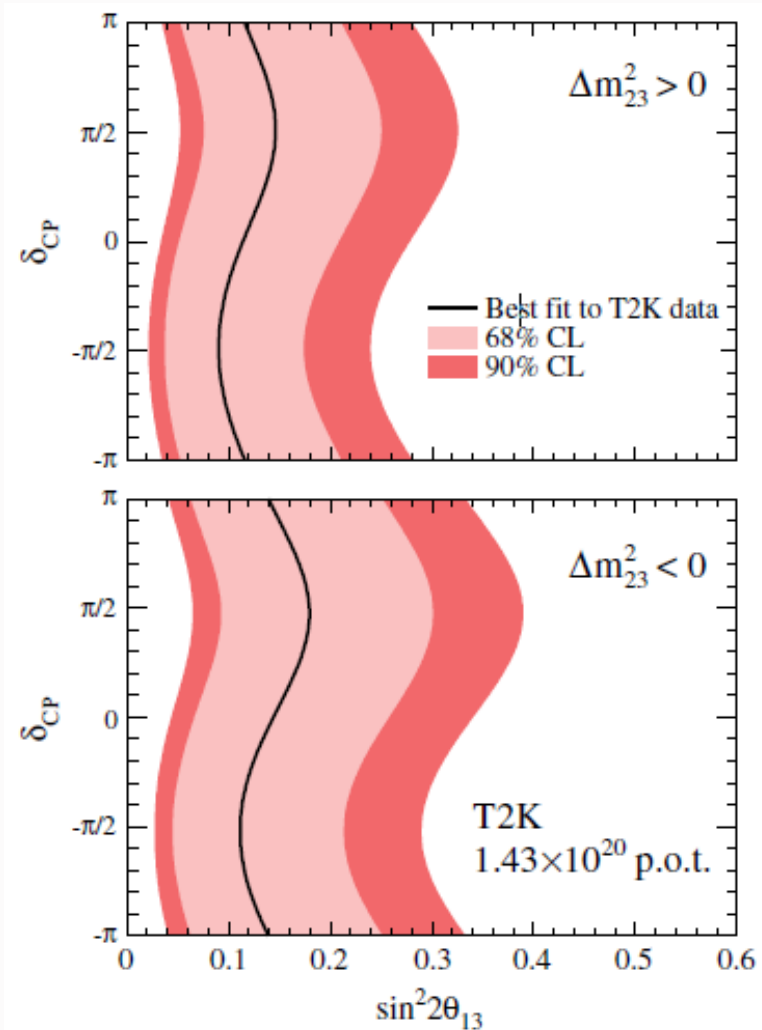
short, with typical EM shower profile





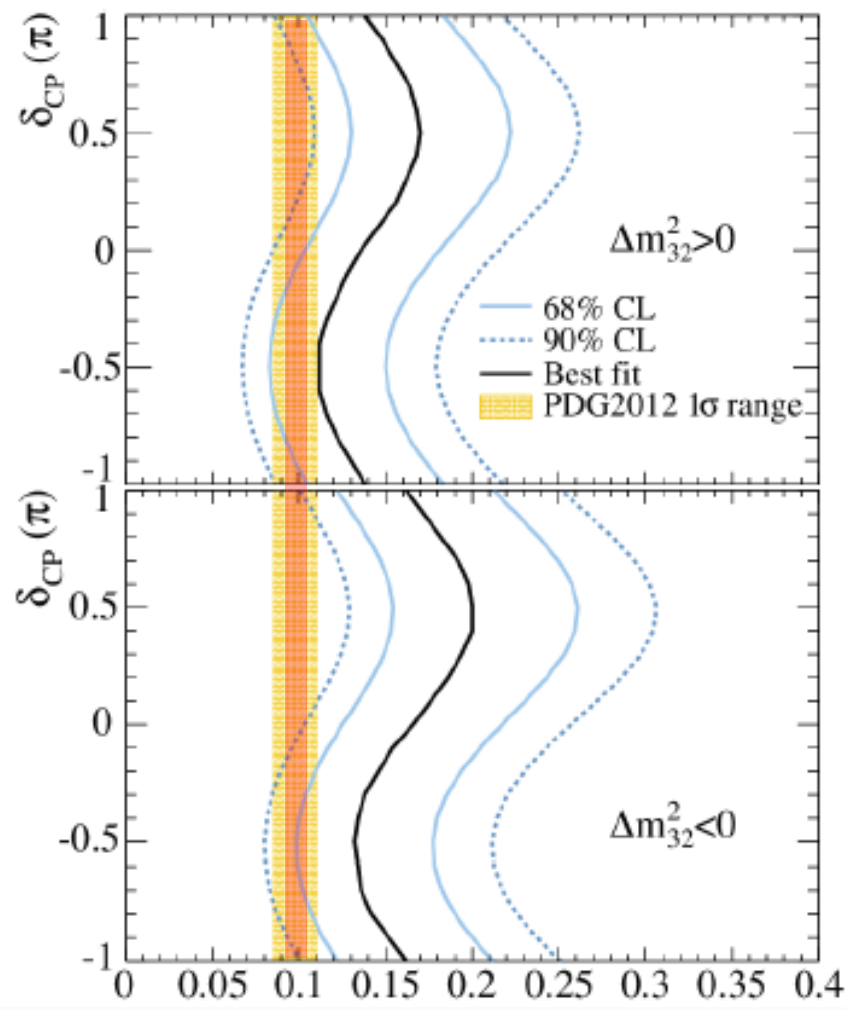
T2K发现theta13非零迹象

- ◆ 2011年6月15日，日本T2K实验宣布探测到6个电子中微子
- ◆ 2011年3月11日福岛地震

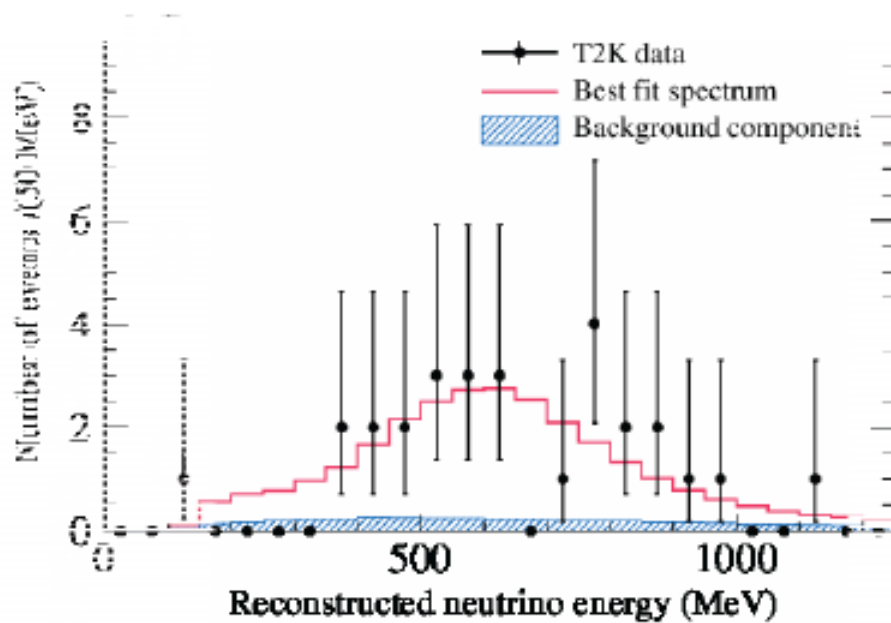


T2K与反应堆测量的 θ_{13} 结合 \rightarrow

- Comparing with the external reactor constraint the best overlap is for the normal hierarchy with $\delta_{cp} = -\pi/2$.
- This is a **lucky point!**
- You also need to increase the θ_{23} mixing angle to account for the number of observed events.



T2K observation of ν_e Appearance



4.92 ± 0.55 events expected background

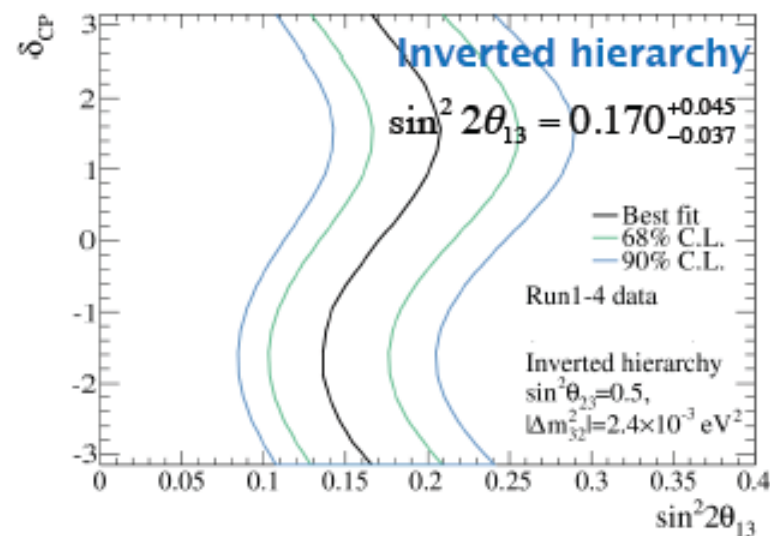
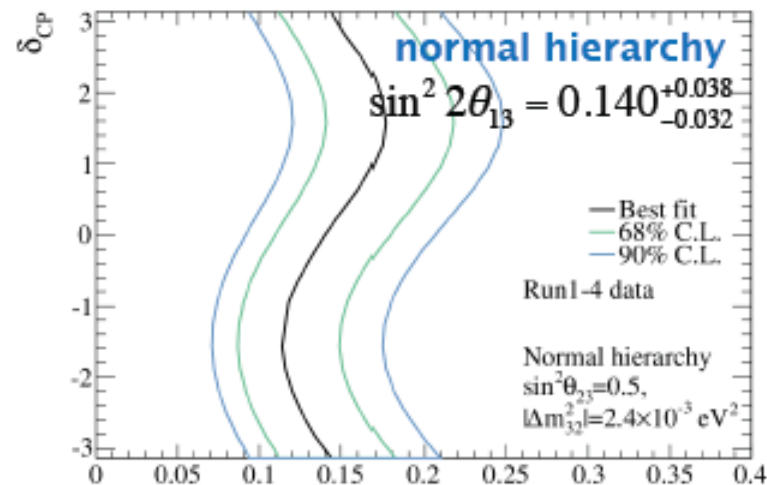
28 events observed

21.6 events expected @ $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$

$\delta_{CP} = 0, \sin^2 \theta_{23} = 0.5$

7.3 σ significance for non-zero θ_{13}

First ever observation ($>5\sigma$) of an explicit ν appearance channel

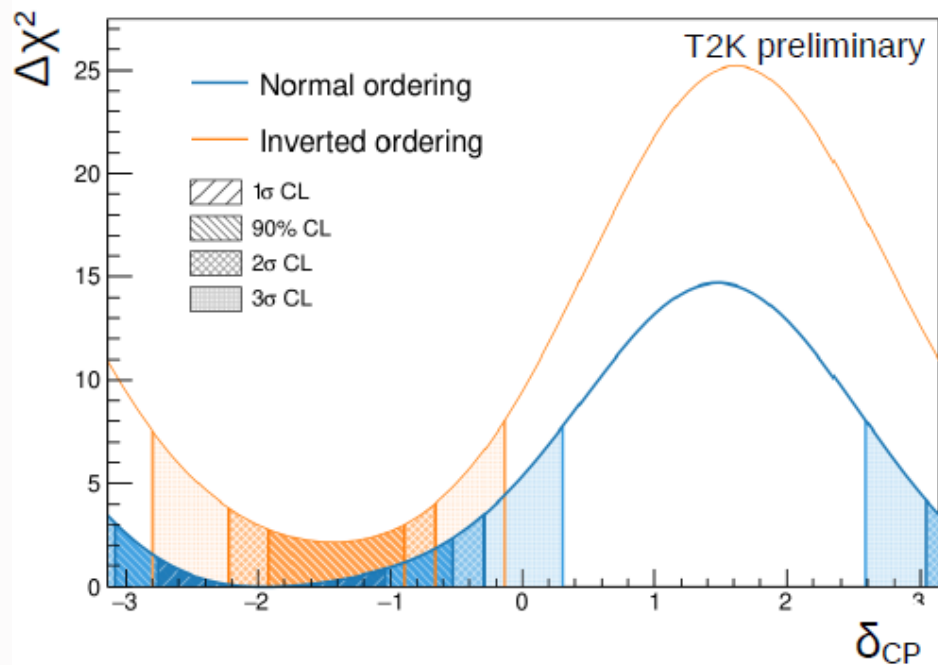


T2K最近CP测量结果

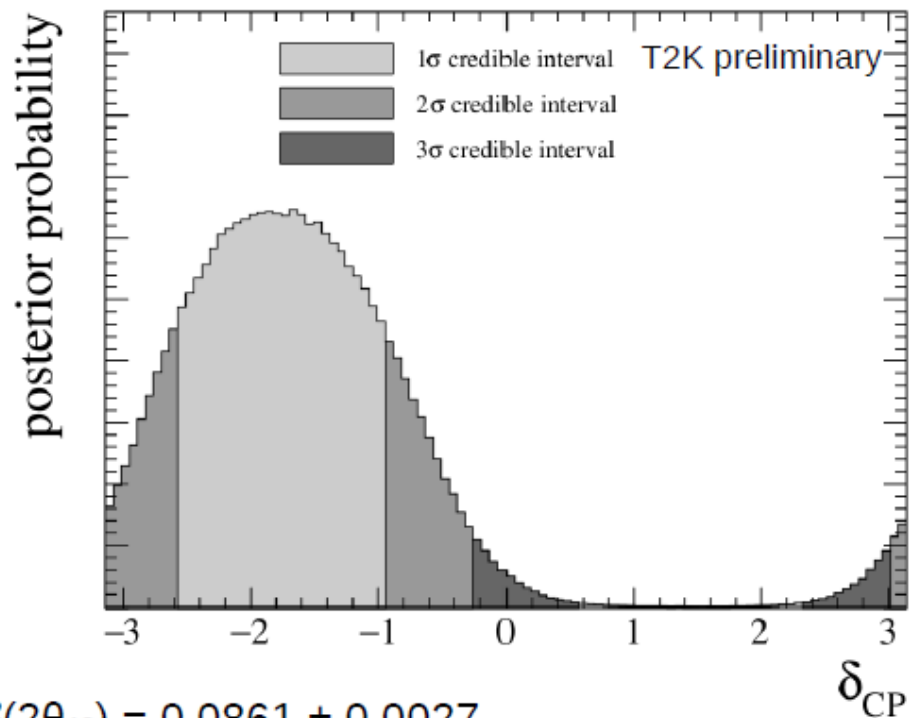
提升

- CP-conserving values of $\delta=0$ and $\delta=\pi$ outside of 90% CL intervals
- Tested effect of alternative interaction model, did not find biases that would change this conclusion

Frequentist results
(Feldman-Cousins method)



Bayesian results
(marginalized over MO)



Using θ_{13} constraint from reactor experiments: $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.0861 \pm 0.0027$

NOvA结果与计划

Best Fit

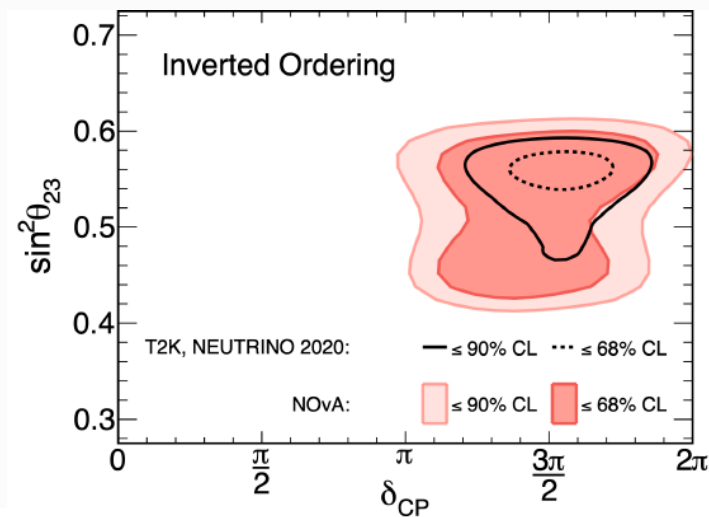
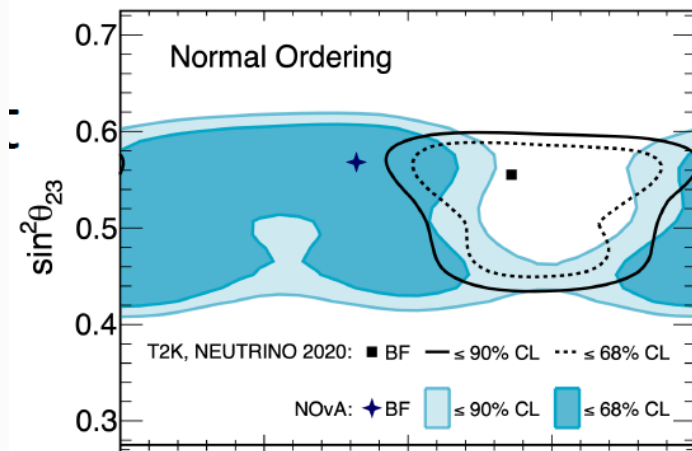
Normal hierarchy

$$\Delta m_{32}^2 = (2.41 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

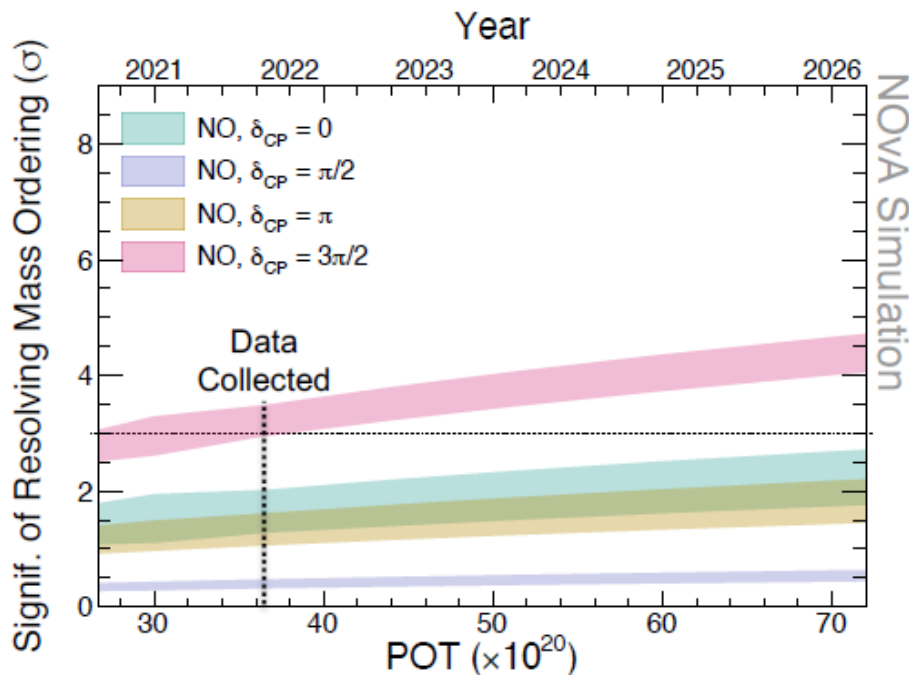
$$\sin^2 \vartheta_{23} = 0.57^{+0.04}_{-0.03}$$

$$\delta = 0.82\pi$$

2U2U data set: <https://arxiv.org/abs/2108.08219>

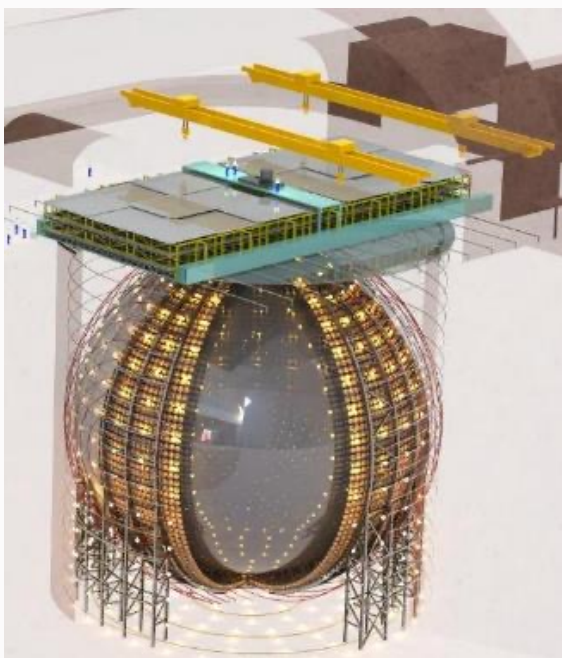


- Increasing sensitivity to mass ordering to come
 - Will more than double data set in both beams
 - $>3\sigma$ mass ordering sensitivity for 30-40% of δ -values
 - By run end, statistical errors still significantly larger than current systematics on ν_e



下一代国际三大中微子实验

◆ 大亚湾实验发现 θ_{13} 较大 → 可以测量**中微子质量顺序**和**电荷宇称相角**

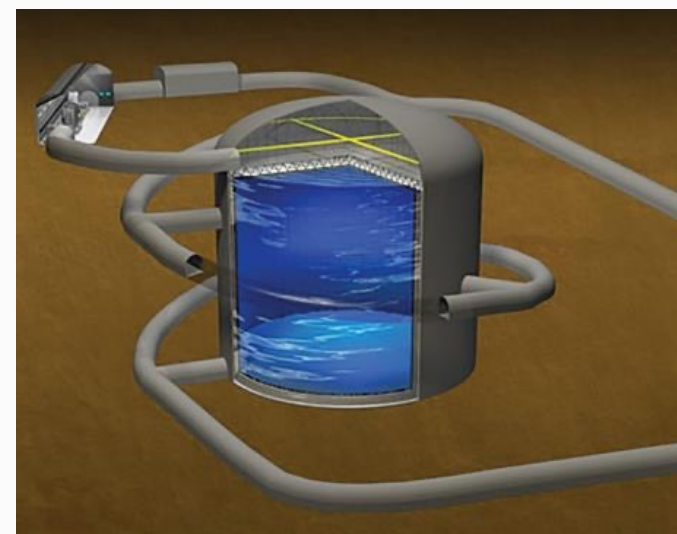


江门中微子实验 (JUNO)

2万吨液闪, 2008年提出, 2023年建成
质量顺序, 精确测量, 天体中微子
液闪/反应堆: 大亚湾, 江门

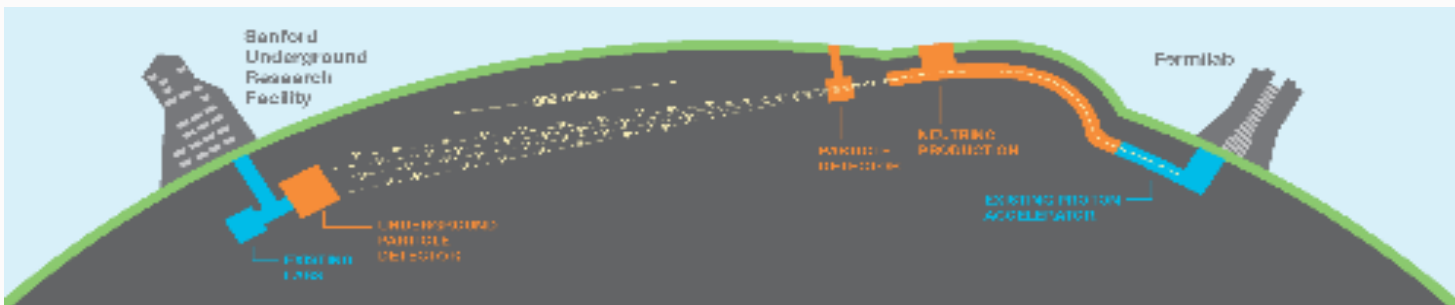
美国“沙丘” (DUNE)

4万吨液氩+加速器, ~2030年建成
质量顺序, CP破坏, 天体中微子
加速器: MINOS, NOvA, DUNE

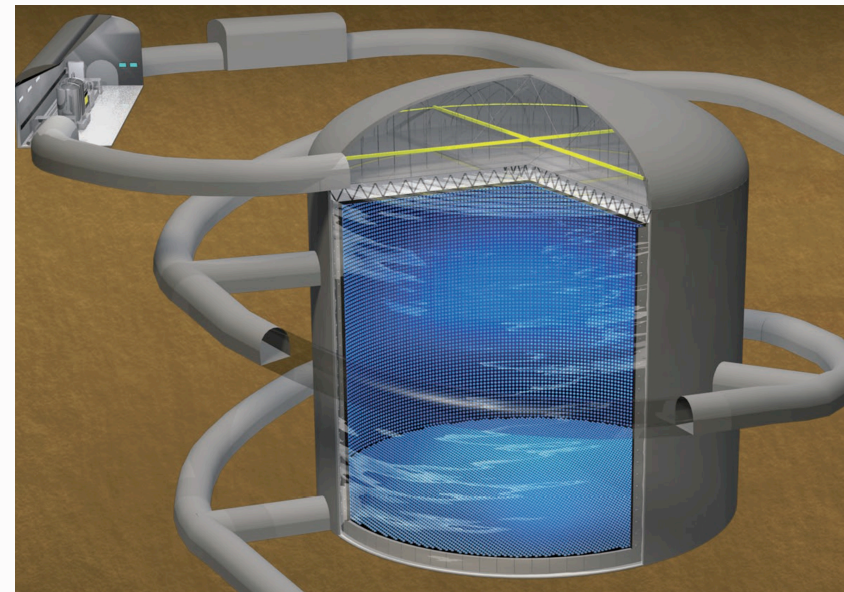
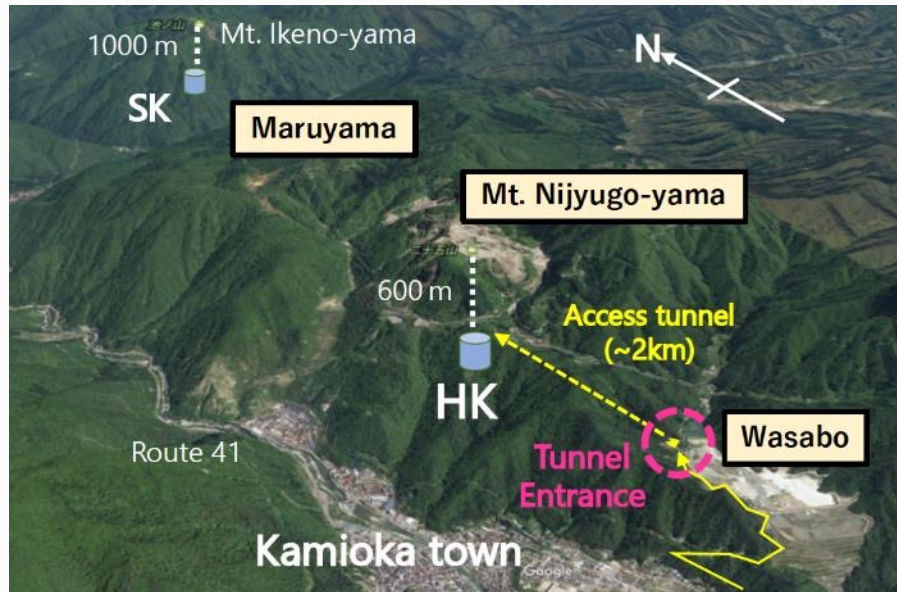


日本顶级神冈 (Hyper-K)

26万吨水+加速器, 2027年建成
CP破坏, 质量顺序, 天体中微子
水: Kamioka, SuperK, HyperK



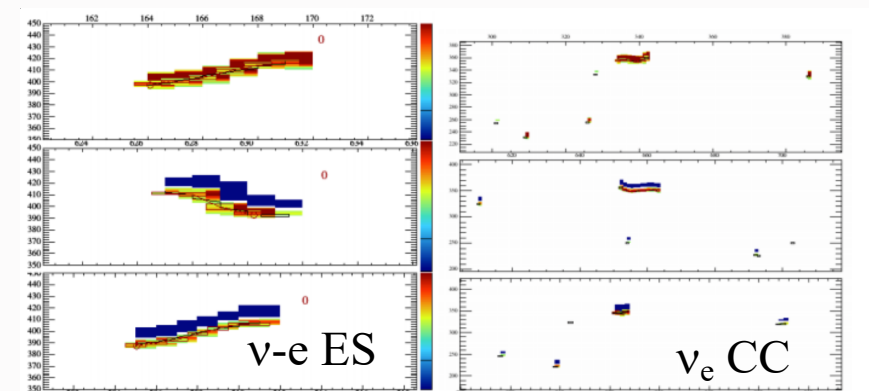
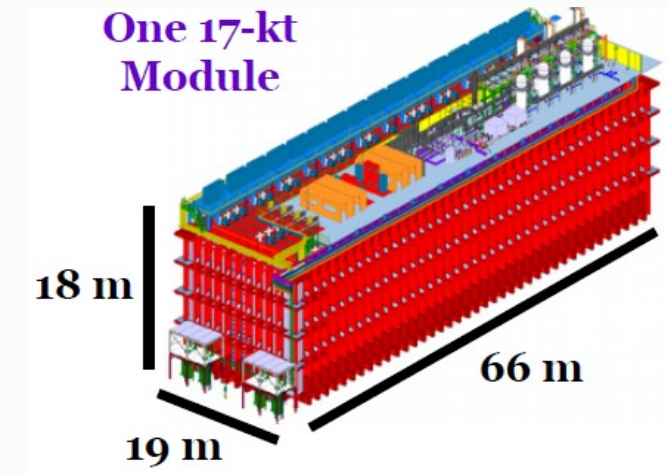
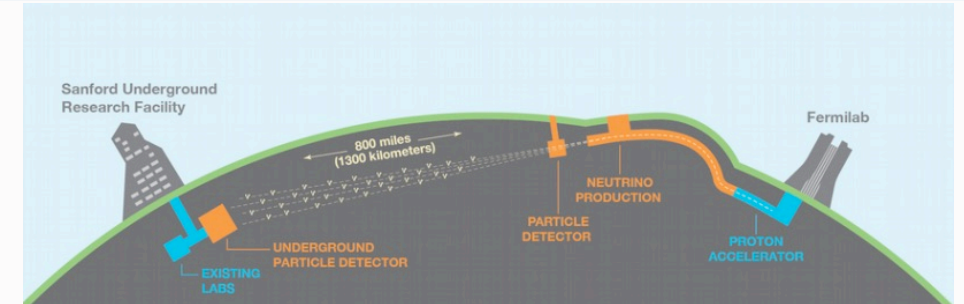
Hyper-K



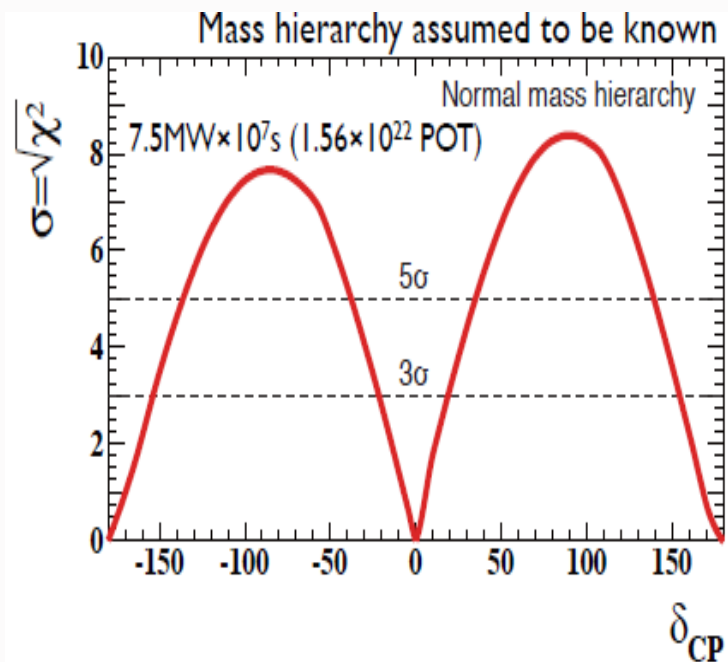
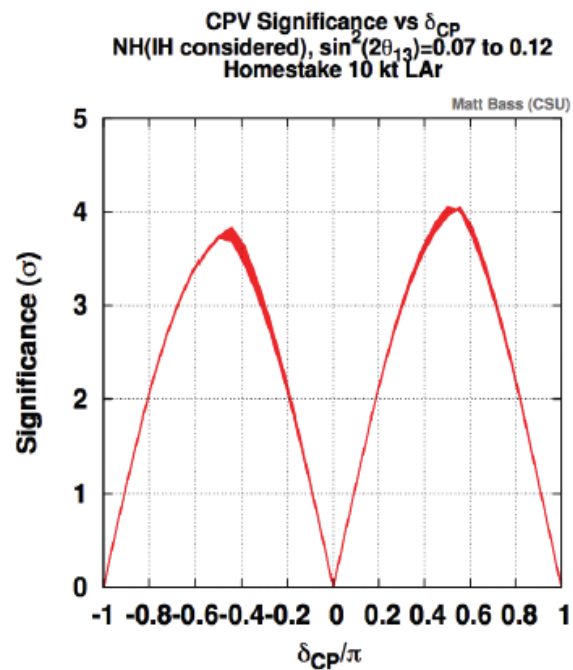
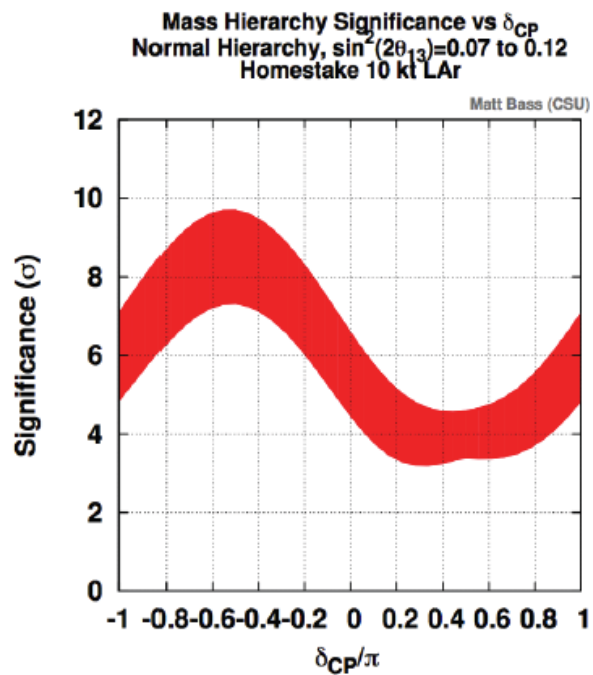
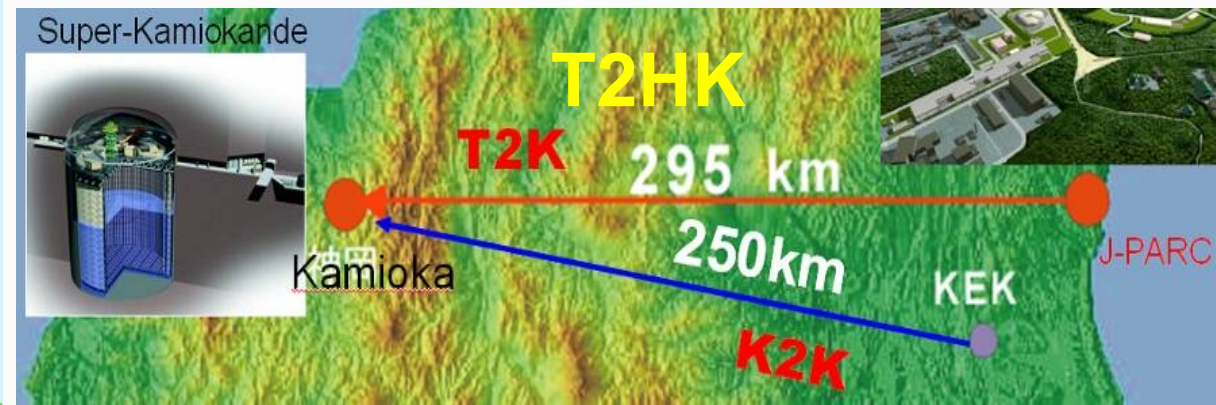
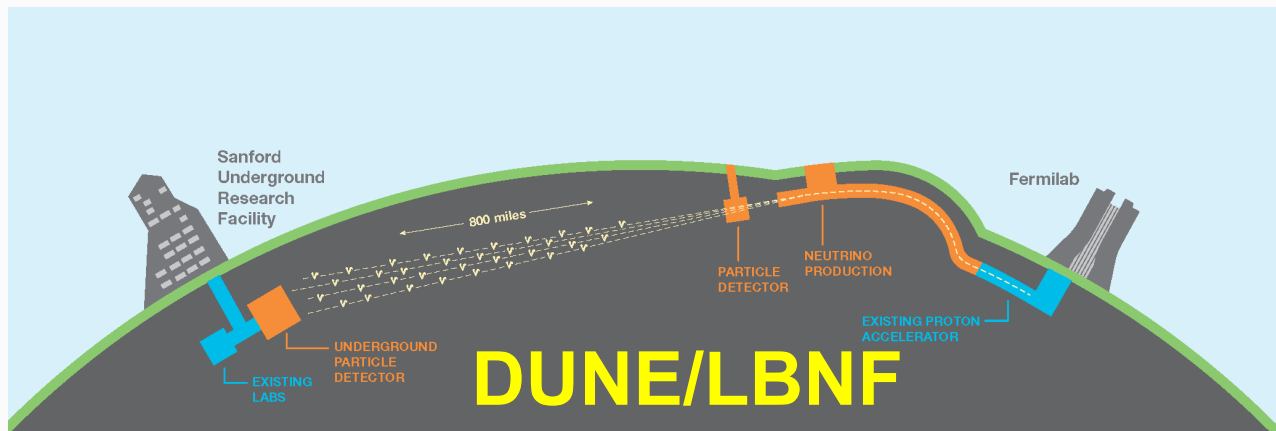
- Hyper-K with 8.4 times larger fiducial mass (190 kton) than Super-K with double-sensitivity PMTs (20,000 + 20,000, and mPMT optional)
- Physics: oscillation (CP phase, mass ordering, θ_{23} octant), astrophysics (solar, SN, DSNB, proton decay...)
- Civil construction started in 2020; 5 years excavation + subsequent 2 years detector construction. Water filling and detector commissioning in Dec. 2026. Data taking from 2027.

DUNE

- **Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE),** neutrino beam from FNAL to SURF (South Dakota), baseline 1300 km
- **4 LArTPC modules deployed in stage, each 10 kt FV.**
- **Physics goal:**
 - Accelerator ν : **Mass ordering**, **CP phase**, θ_{23} , and θ_{13}
 - Astrophysics: SN, solar
 - BSM
- **Excavation started in 2017, begin taking data in late 2020s**
- **ProtoDUNE: Single Phase operating since 2018; Dual Phase since 2019**



未来加速器中微子 (质量顺序, θ_{23} , CP)



1300公里, 对质量顺序和CP灵敏

295公里, 对质量顺序不灵敏, CP灵敏度高

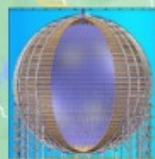
江门中微子实验 地点

国际合作组：19个国家和地区，74个研究单位，700多名合作者

- China (34), Taiwan,China (3), Thailand (3), Pakistan, Armenia
- Italy (8), Germany (7), France (5), Russia (3), Belgium, Czech, Finland, Slovakia, Latvia, UK
- Brazil (2), Chile (2), USA (2)



**地下700米
2万吨液闪**



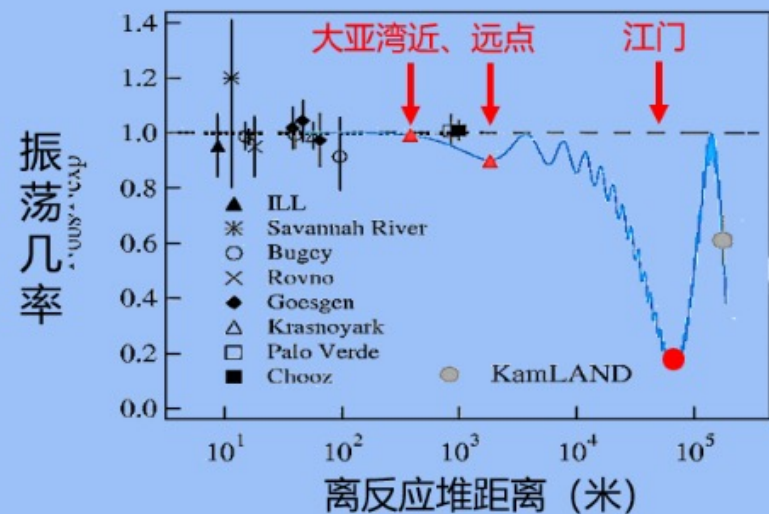
江门中微子实验

53 km

台山中微子实验

台山核电站

阳江核电站

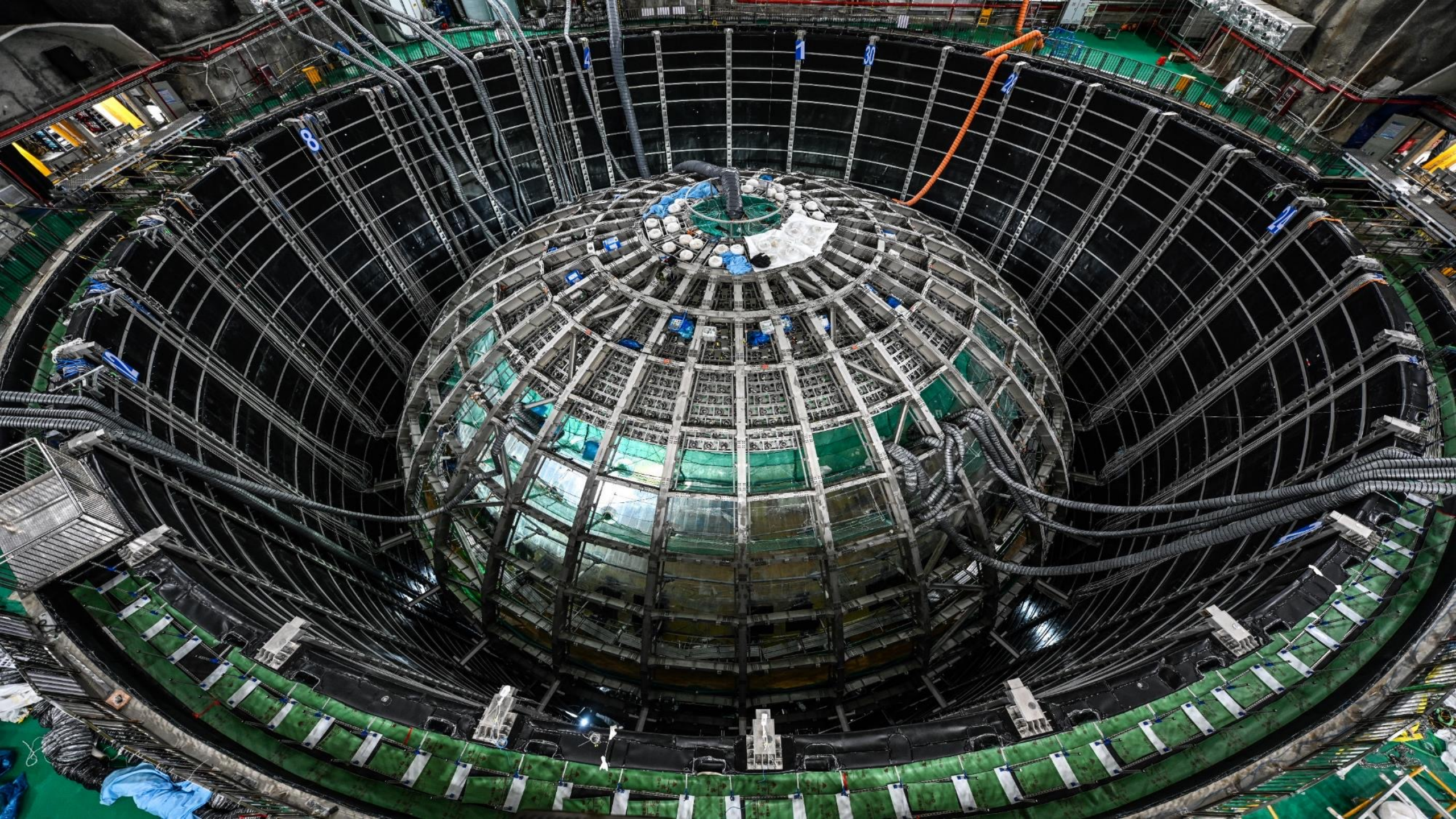


江门中微子实验 园区

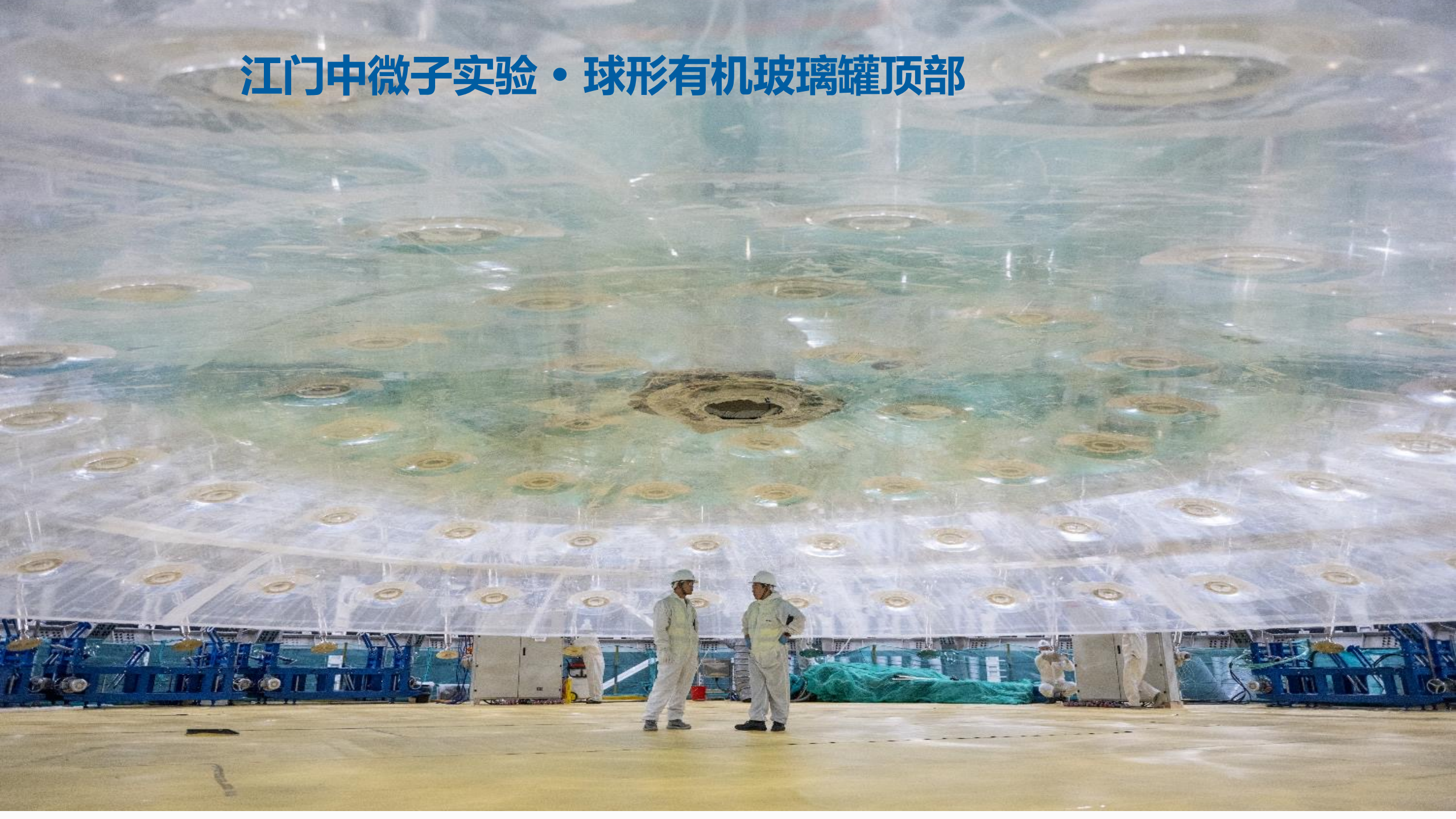
地面建筑

- 地面安装大厅
- 液闪存储 (5千吨) 和纯化
- 水纯化设施
- 计算机房、动力中心
- 斜井缆车
- 小型生活、办公设施





江门中微子实验·球形有机玻璃罐顶部



江门中微子实验 探测器

PMT测试系统:

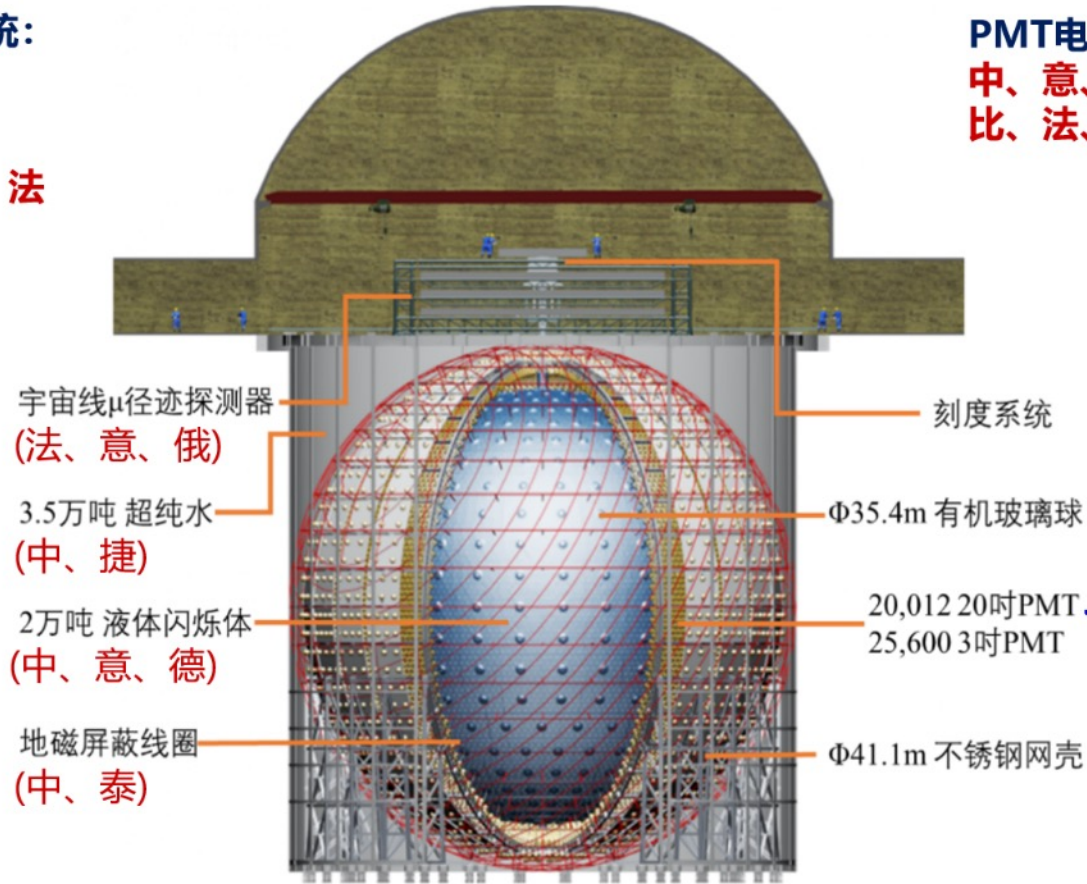
中、德、俄

计算能力:

中、俄、意、法

低本底:

中、意、法



PMT电子学读出:

中、意、俄、
比、法、智



- ◆ 国内跨度最大的地下洞室
- ◆ 能量精度3%，比当前国际最好水平高1倍
- ◆ 极低放射性本底，灰尘总量 <0.008 克/2万吨

丁肇中院士参观江门中微子实验
地下实验室建设现场（2023年5月22日）

江门最重要的科学目标 质量顺序

◆ 有望率先测得中微子质量顺序：哪种中微子最轻？

- ⇒ 影响所有振荡几率，是测量CP破坏（物质-反物质不对称）的必要条件
- ⇒ 决定另一类实验——无中微子双贝塔衰变实验（中微子是否为自身反粒子）的发展方向
- ⇒ 理解中微子质量起源和中微子混合

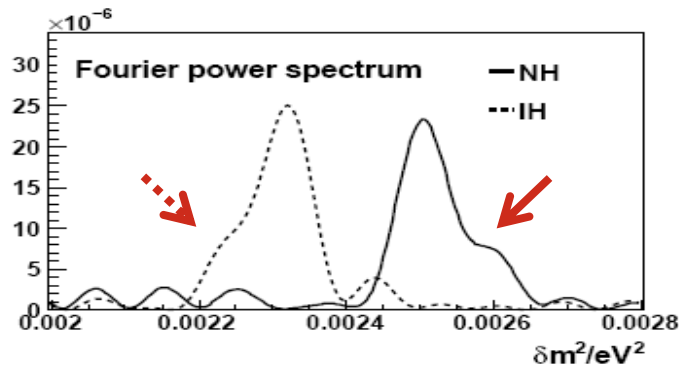
$$P_{ee}(L/E) = 1 - P_{21} - P_{31} - P_{32}$$

$$P_{21} = \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(\Delta_{21})$$

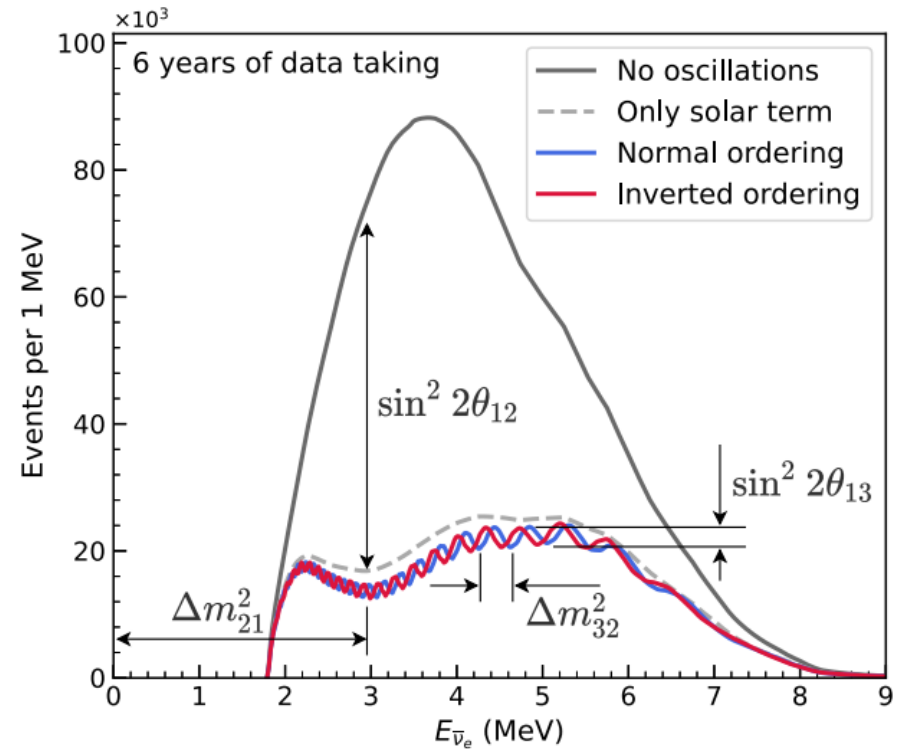
$$P_{31} = \cos^2(\theta_{12}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta_{31})$$

$$P_{32} = \sin^2(\theta_{12}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta_{32})$$

$$\Delta_{ij} = \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}$$

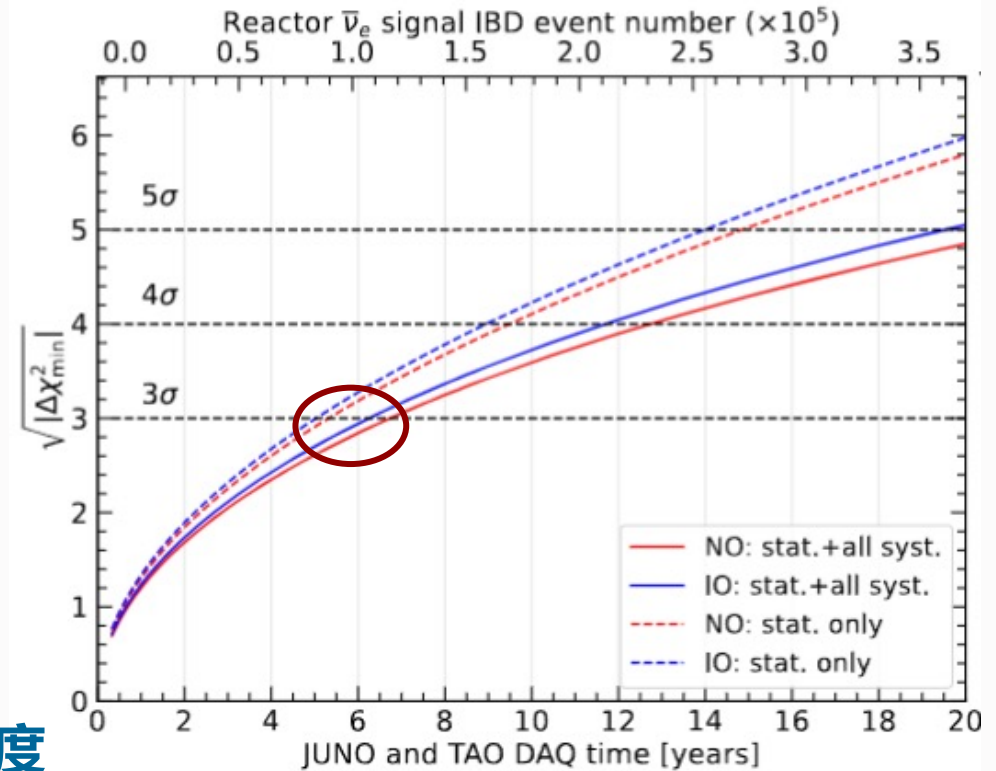


Petcov et al., PLB533(2002) 94,
J. Learned et al., PRD78, 071302 (2008),
L. Zhan, Y. Wang, J. Cao, L. Wen,
PRD78:111103, 2008,
PRD79:073007, 2009



江门最重要的科学目标 质量顺序

实验项目	预期取数时间	灵敏度
美国 DUNE	2030	$>5\sigma$ (1-3年)
日本 Hyper-K	2027	$3-5\sigma$ (10年)
法国 ORCA	未知	$2-4\sigma$ (3年)
美国 IceCube	2026	$2-4\sigma$ (7年)
中国 江门	2024	$3-4\sigma$ (6年)



- ◆ 唯一的真空振荡测量，与加速器 (DUNE, HyperK)、大气(HyperK, ORCA, PINGU)联合，可显著提高灵敏度

Δm_{31}^2 and Δm_{32}^2
Interplay

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

Matter Effect

Reactor

Atmospheric

Accelerator

江门科学目标 精确测量 \rightarrow 混合矩阵么正性

arXiv:2204.13249, Chin. Phys. C 46 (2022) 123001

Precision of $\sin^2\theta_{12}$, Δm_{21}^2 , $|\Delta m_{32}^2| < 0.5\%$ in 6 yrs

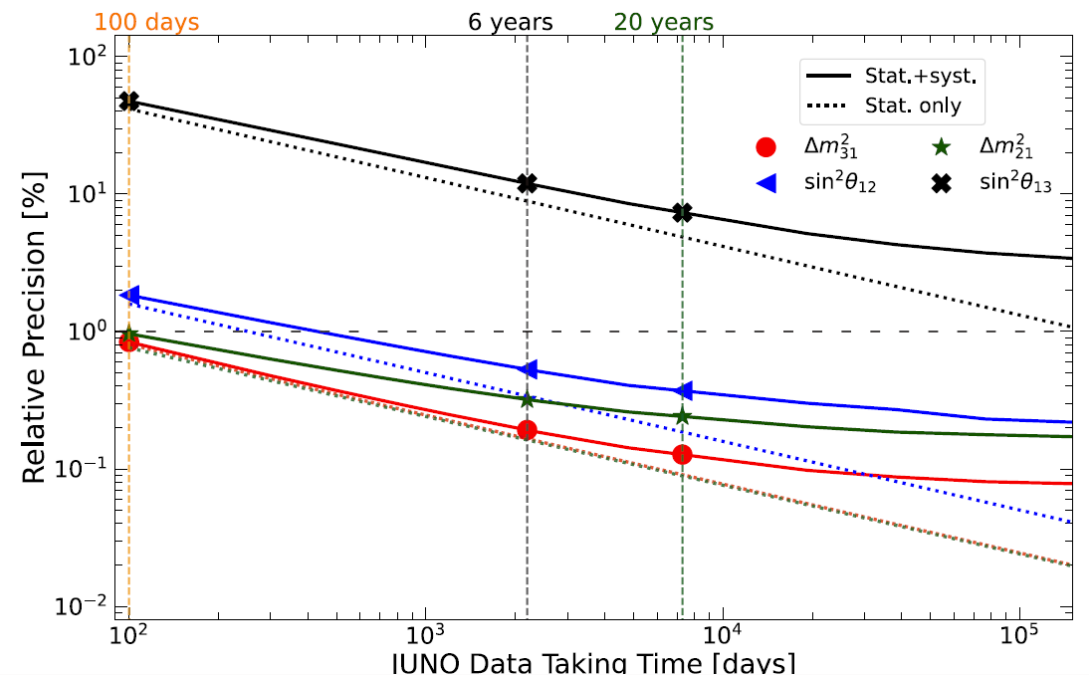
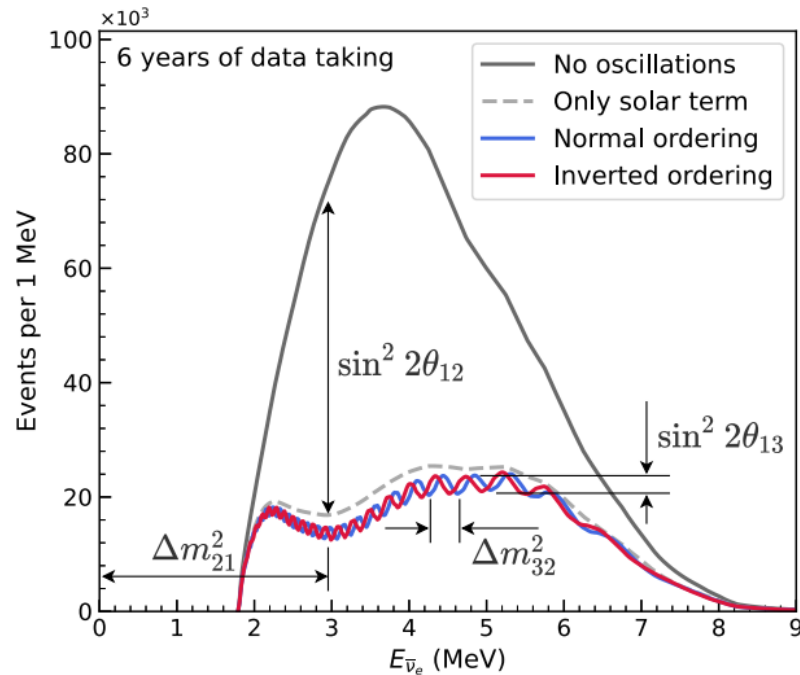
	Central Value	PDG2020	100 days	6 years	20 years
Δm_{31}^2 ($\times 10^{-3}$ eV ²)	2.5283	± 0.034 (1.3%)	± 0.021 (0.8%)	± 0.0047 (0.2%)	± 0.0029 (0.1%)
Δm_{21}^2 ($\times 10^{-5}$ eV ²)	7.53	± 0.18 (2.4%)	± 0.074 (1.0%)	± 0.024 (0.3%)	± 0.017 (0.2%)
$\sin^2\theta_{12}$	0.307	± 0.013 (4.2%)	± 0.0058 (1.9%)	± 0.0016 (0.5%)	± 0.0010 (0.3%)
$\sin^2\theta_{13}$	0.0218	± 0.0007 (3.2%)	± 0.010 (47.9%)	± 0.0026 (12.1%)	± 0.0016 (7.3%)

Direct Measurement

2.3% ($|\Delta m_{32}^2|$, DYB)

2.5% (KamLAND)

5% (SNO)



江门子实验 台山中微子实验

◆ 大亚湾发现反应堆中微子能谱反常 → 理论预期不可靠，影响江门物理目标

◆ 台山中微子实验 (TAO)

⇒ 为江门提供模型独立的输入能谱

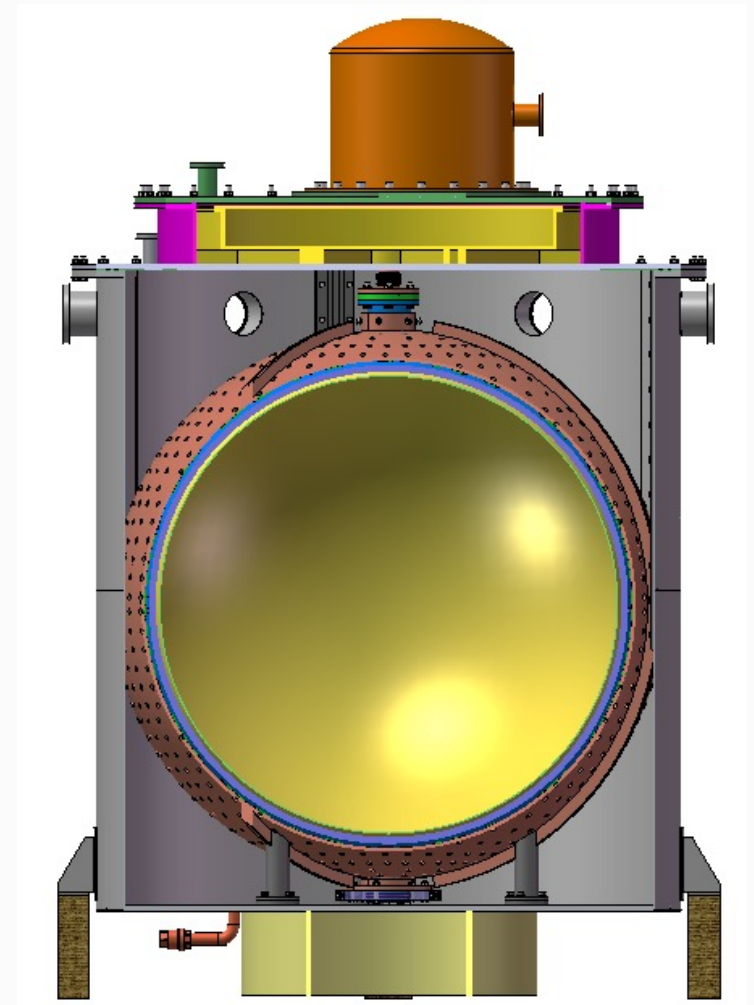
⇒ 为核数据库提供基准检验数据，IAEA推荐的优先研究方向

◆ 原创实验概念，能量精度趋近液体闪烁体探测器极限 → 带来新发现潜力

⇒ 硅光电管探测 + 低温液体闪烁体，零下50度运行

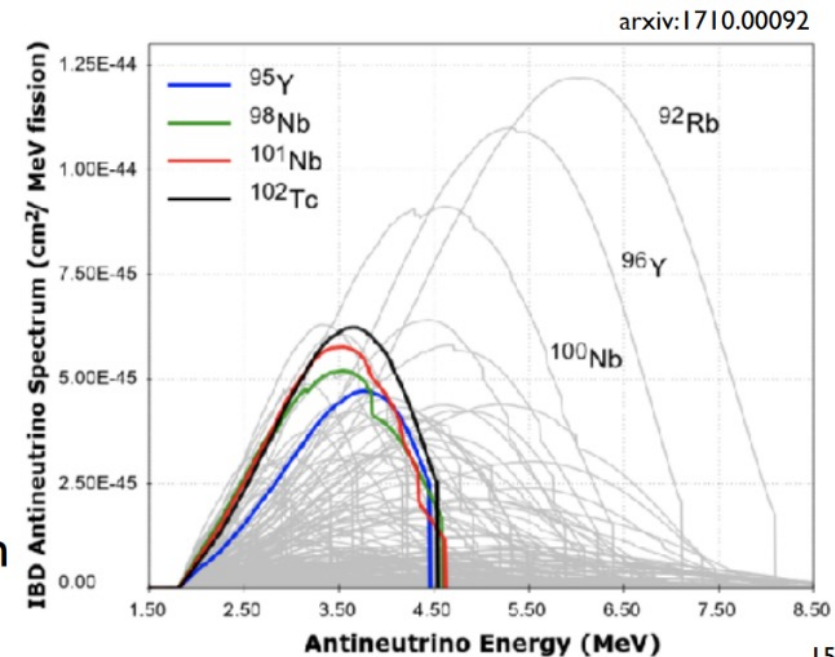
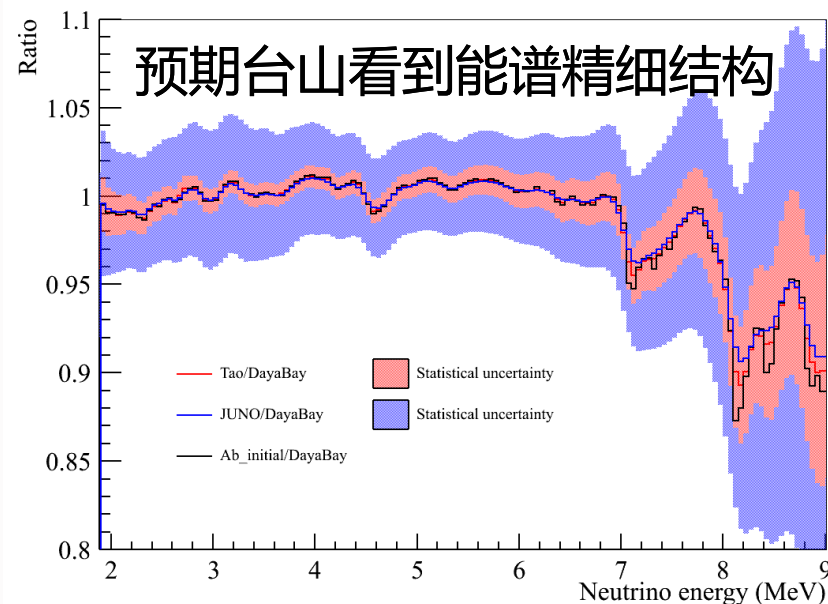
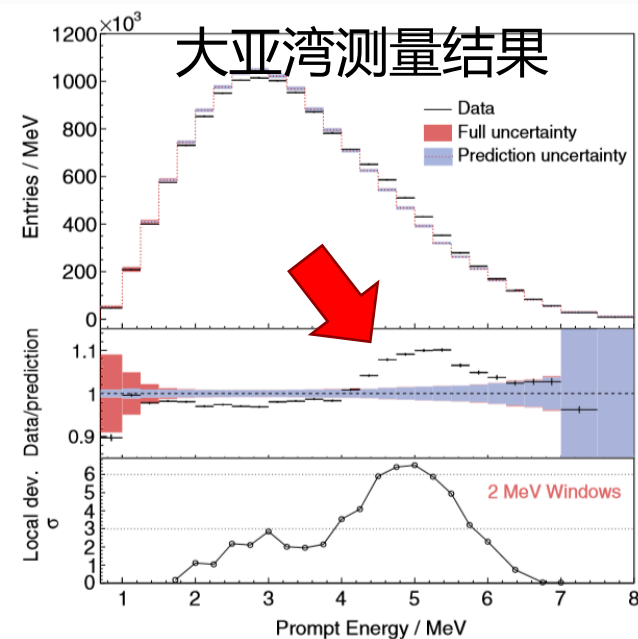
⇒ 能量精度国际最好为5%，江门3%，TAO可达<2%

◆ 距台山反应堆堆芯44米，计划2024年完成建设



高精度反应堆中微子能谱 → 核物理

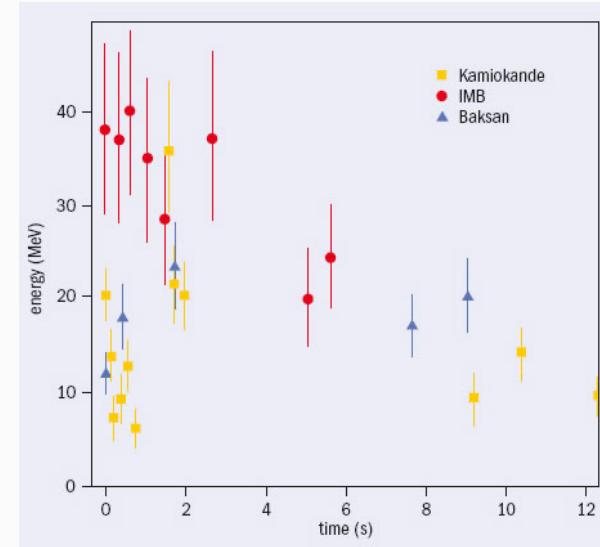
- ◆ 利用台山中微子实验数据（2024年-），测量高精度反应堆中微子能谱（1-6年），高精度检验核数据库，解决能谱反常问题
 - 反应堆中微子能谱与理论模型不一致，很可能说明核数据库不够准确
 - 台山中微子实验以国际上最高的能量分辨率和能谱精度测量反应堆中微子能谱
 - ✓ 一方面提高江门中微子实验测量中微子质量顺序的灵敏度
 - ✓ 另一方面将为核数据库提供高精度的基准检验数据。



超新星中微子



- ◆ **The only one SN w/ ν observed!**
- ◆ Kamiokande-II (Japan)
 - ⇒ Water Cherenkov, 2140 tons, 12
- ◆ Irvine-Michigan-Brookhaven (US)
 - ⇒ Water Cherenkov, 6800 tons, 8
- ◆ Baksan Scintillator Telescope (Soviet Union)
 - ⇒ Scintillator, 200 tons, 5
- ◆ **Neutrinos bring most energy!**



- ◆ **超新星在宇宙演化中非常重要**
- ◆ **中微子推动的延迟爆发机制**

- 99% energy by neutrinos
- 1% by kinetic energy
- 0.01% by photons

- ◆ **迄今只观测到一次 (1987A) , 20多个中微子。江门可观测到约8000个 (银河系中心) , 包括全部种类的中微子 (高能量精度、低阈值)**

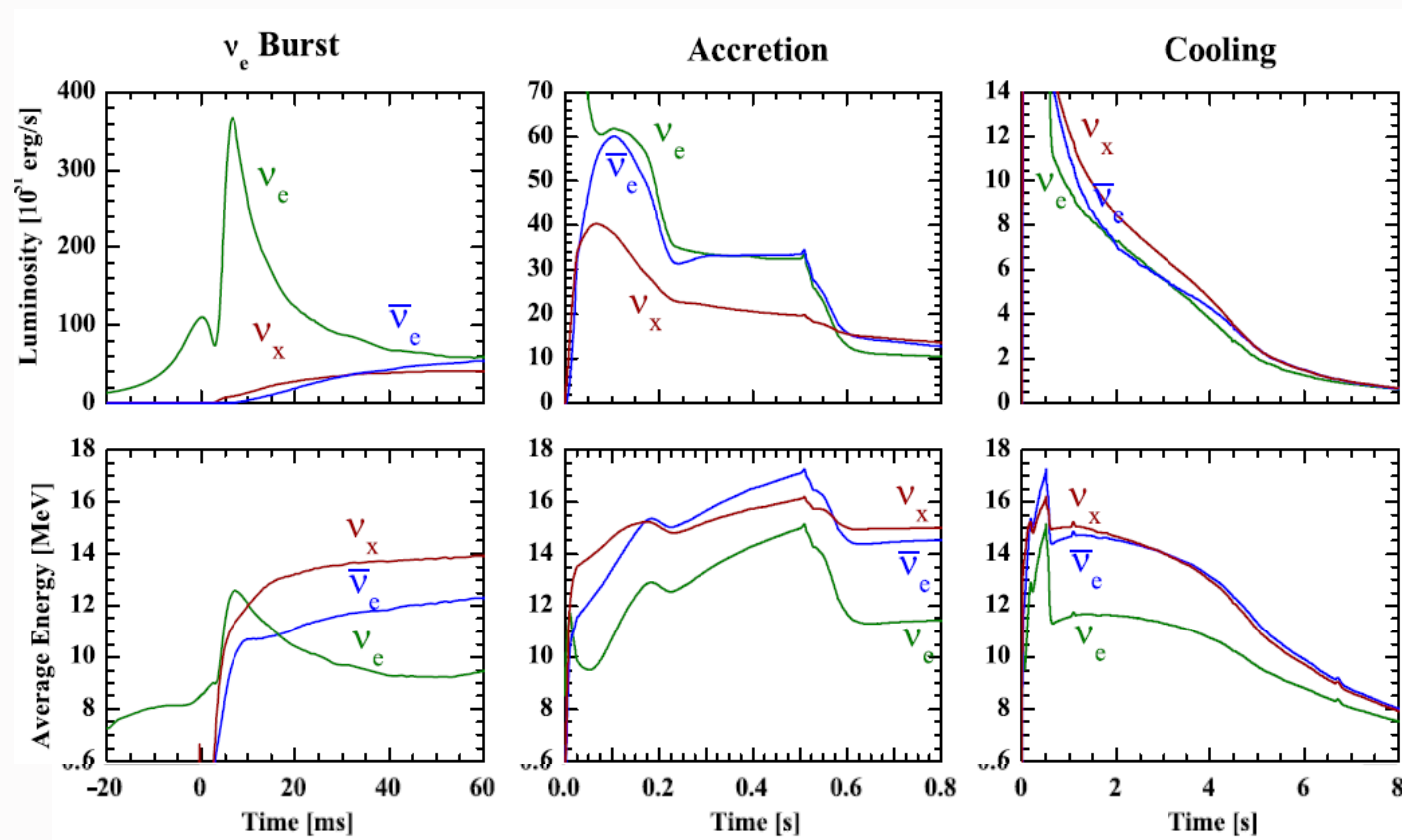
超新星中微子

For astrophysics:

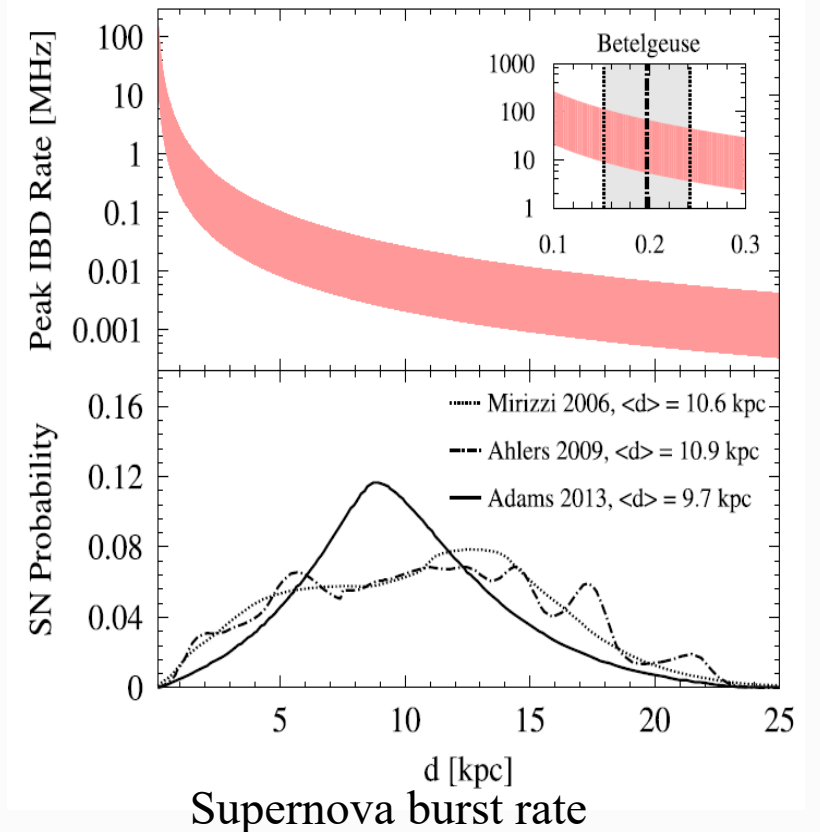
- SN explosion mechanism
- Locating SN (early warning)
- SN nucleosynthesis, ...

For particle physics:

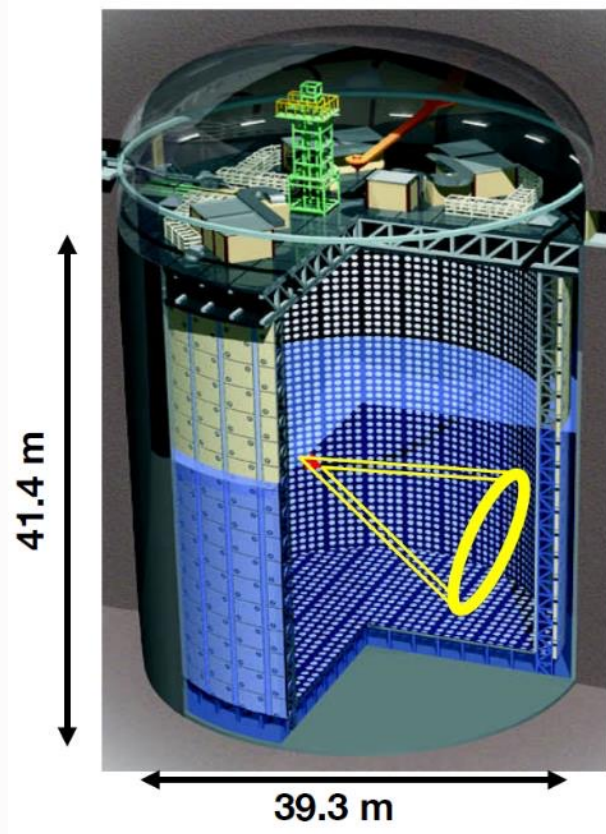
- Collective neutrino oscillation
- Absolute neutrino mass
- Neutrino mass ordering, ...



Model dependent



Super-Kamiokande



5,000-10,000 SN_ν @10 kpc

(32 kton SK volume, 4.5 MeV threshold)

■ Operational since 1996

- Kamioka, Japan
- 50-kton water Cherenkov detector, 11000 20-inch PMTs.
- Overburden 2700 mwe
- Atmospheric ν (discovered oscillation), accelerator ν (T2K), solar ν , proton decay

■ 2019: SK-V, refurbish detector for Gd-loading. Transitioning to SK-Gd since 2020 for DSNB

- w/o Gd, **20% eff.** for 2.2 MeV gamma from n capture on H to tag IBD
- Currently **0.02% Gd, 50% eff.** for 8 MeV gamma's from n capture on Gd \rightarrow 4 MeV visible energy
- Goal: **0.2% Gd, 90% eff.**
- SK-IV 10y result for DSNB: $<2.7 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$ (prediction $1.7 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$)

Hyper-K

■ 54-90 k events for SN at 10 kpc (most sensitive to $\bar{\nu}_e$)

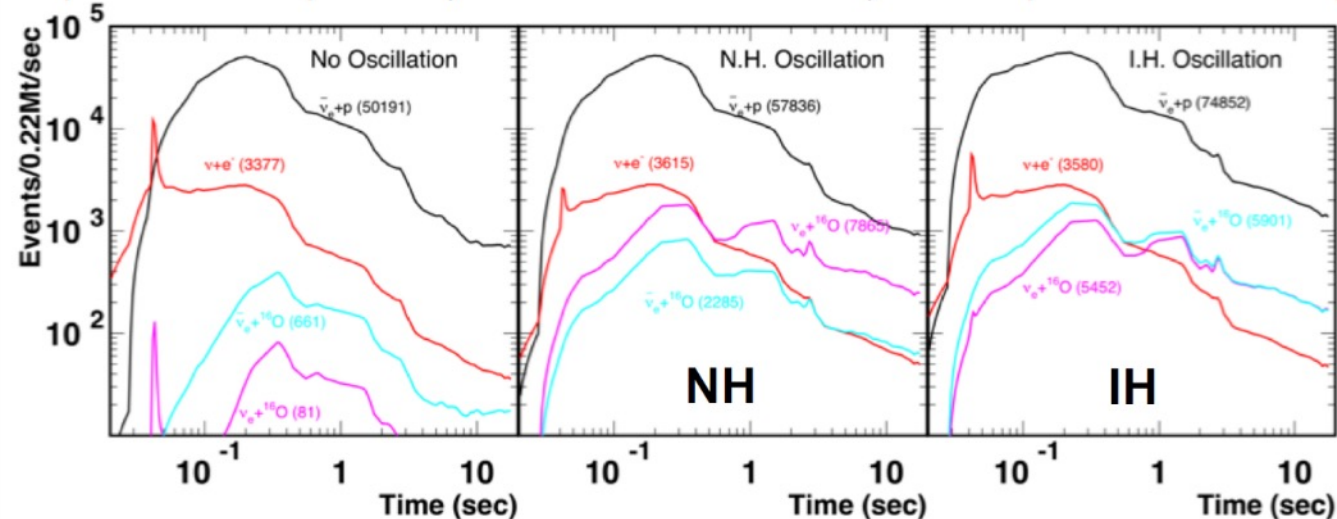
- Precise neutrino time profile
- Precise spectrum measurement
- Investigation of the SN mechanism (SASI/Rotation/Convection)
- Discriminate models $\rightarrow\rightarrow\rightarrow$
- Pointing resolution 1° - 2°

		Reconstructed Model					
		Normal	Couch	Nakazato	Tamborra	Totani	Vartanyan
True Model	Couch		98.2	0.2	1.6	0.0	0.0
	Nakazato		0.1	99.9	0.0	0.0	0.0
	Tamborra		1.6	0.0	98.0	0.2	0.2
	Totani		0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
	Vartanyan		0.0	0.0	0.0	0.0	100.0

		Reconstructed Model					
		Inverted	Couch	Nakazato	Tamborra	Totani	Vartanyan
True Model	Couch		99.9	0.1	0.0	0.0	0.0
	Nakazato		0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
	Tamborra		0.0	0.0	97.4	0.1	2.5
	Totani		0.0	0.0	0.0	100.0	0.0
	Vartanyan		0.0	0.0	0.8	0.0	99.2

[arXiv:2101.05269 \(2021\)](https://arxiv.org/abs/2101.05269)

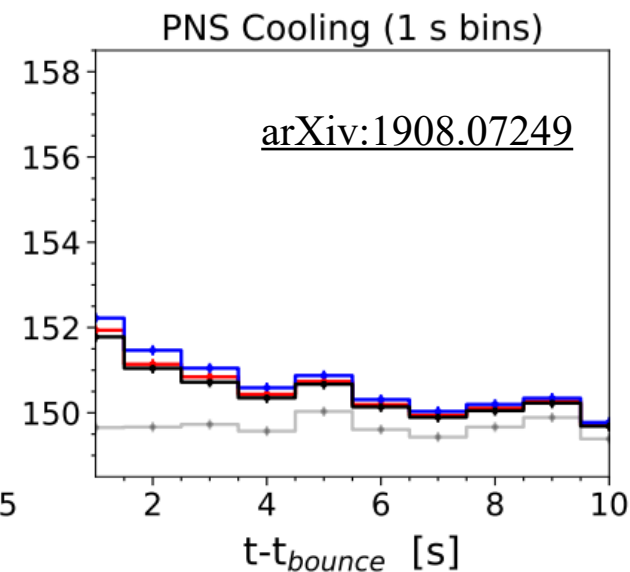
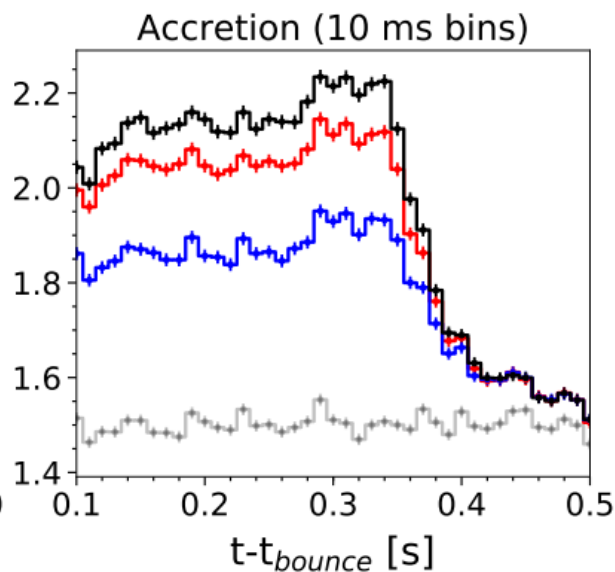
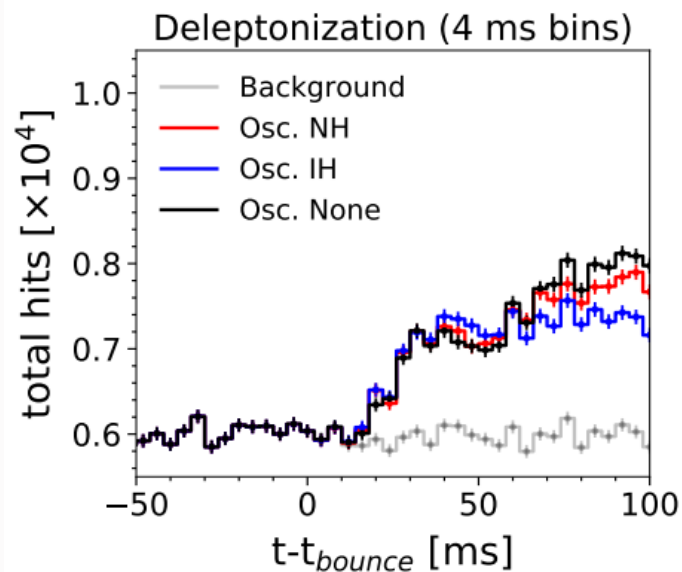
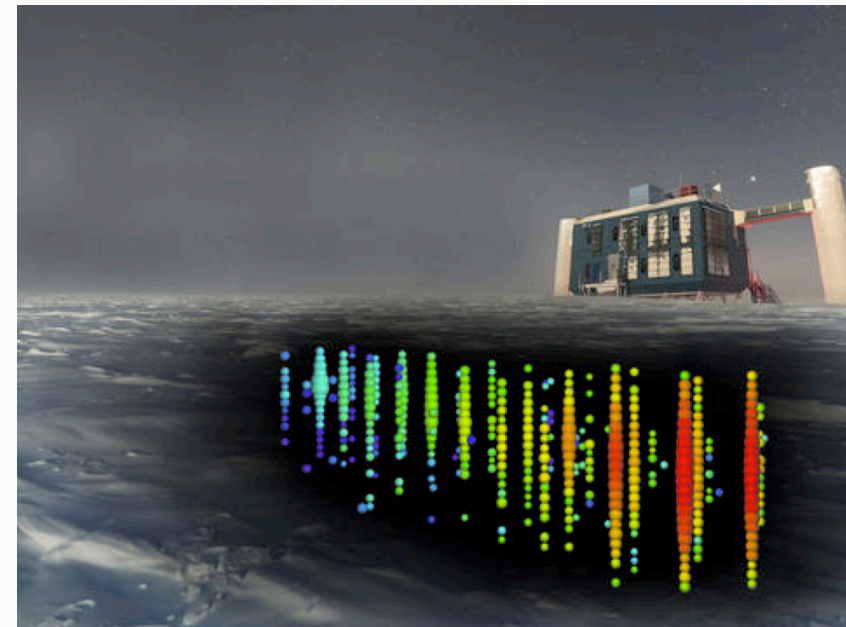
Expected time profile (Livermore simulation) of a supernova at 10 kpc





IceCube / KM3Net / Baikal

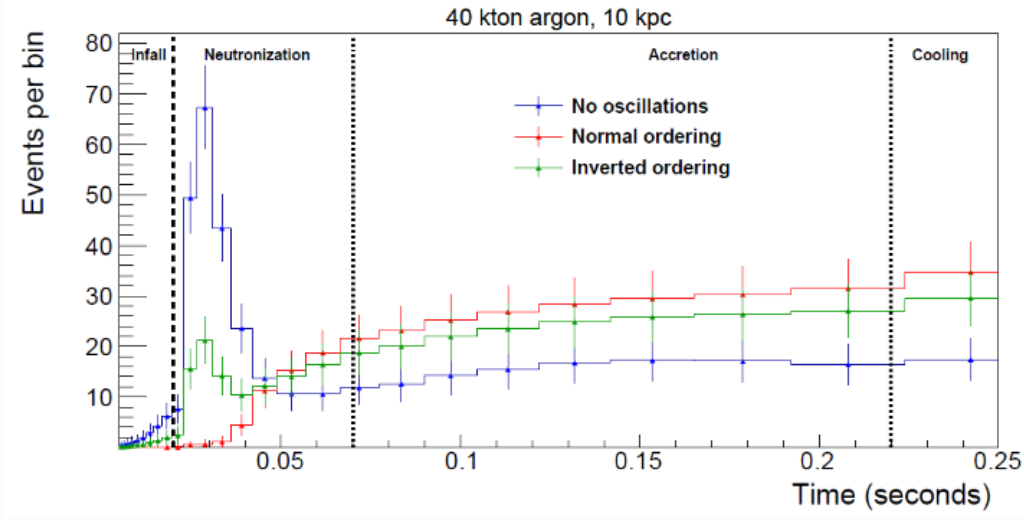
- ◆ Designed for high energy cosmic ν
- ◆ IceCube (ice, since 2010, upgrading), KM3Net (sea water) and Baikal (lake water) under construction
- ◆ SN appears as “correlated noise” in PMTs. Not event-by-event, time profile
- ◆ Low temperature, low radioactivity ice \rightarrow low dark noise ~ 500 Hz/PMT



SN at DUNE

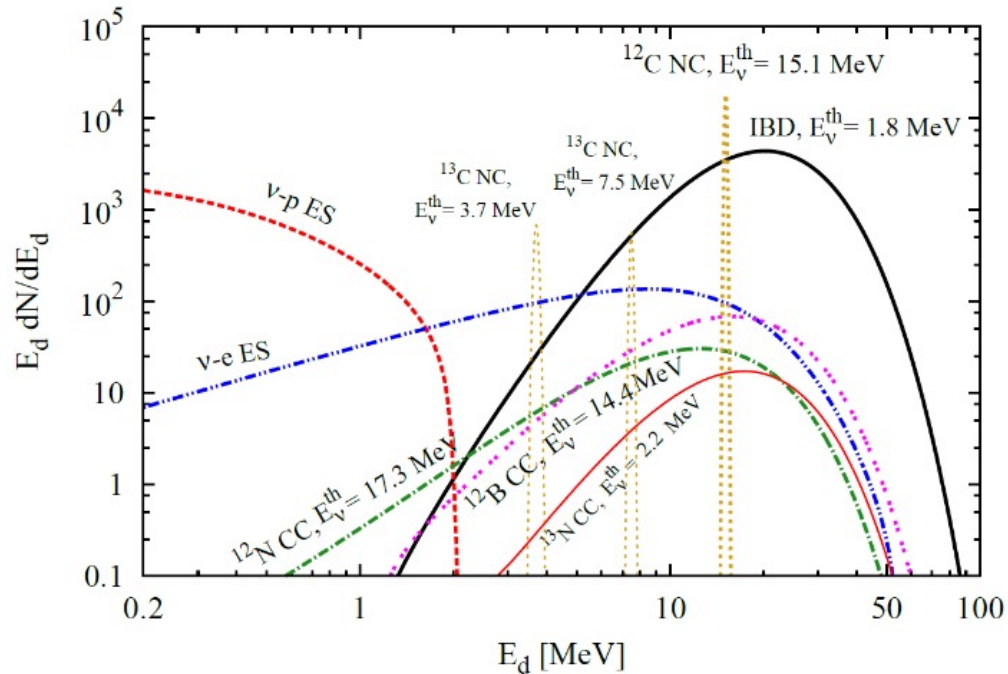
Channel	Livermore	GKVM	Garching
$\nu_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^- + {}^{40}\text{K}^*$	2648	3295	882
$\bar{\nu}_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^+ + {}^{40}\text{Cl}^*$	224	155	23
$\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$	341	206	142
Total	3213	3656	1047

- ◆ Sensitive to neutrinos >5 MeV, energy resolution 10~20%.
- ◆ ν_e flavor dominates. A large, cleanly tagged SN ν_e sample
- ◆ Expect good sensitivity to supernova ν_e spectral parameters.
- ◆ Early warning to astronomers: pointing resolution 4.5°



[arXiv:2008.06647](https://arxiv.org/abs/2008.06647) (2021)

Supernova Burst Neutrinos at JUNO



- **Full flavor** detection and **low threshold energy** ~ 0.2 MeV
- **IBD**: ~ 5000 events for SN@10kpc
- Pointing resolution $\sim 9^\circ$
- **ν -p ES channel provides more information about ν_x , better than other type of detectors, e.g. WC, LAr-TPC**
- **Pulse Shape Discrimination** distinguish ν -e ES and ν -p ES events

Dedicated Design for SN

- **2GB memory/3 PMTs** to completely handle SN beyond 0.5 kpc ($>2M$ events)
- Online vertex reconstruction to achieve 0.2 MeV threshold (dark noise)
- Dedicated multi-messenger trigger to achieve ultra-low threshold of $O(10$ keV)

Channel	events@10 kpc
IBD	5000
ν -e ES	300
ν -p ES	2000
NC on Carbon	200
CC on Carbon	300

超新星中微子

Experiment	Since	Mass	Type	ν 's @10kpc	Feature
Baksan	1980	0.33 kt	Scintillator	~ 80	Little maintenance
Super-K	1996-	50 kt	Water + Gd	5,000-10,000	Large statistics
IceCube	2010-	-	Ice	-	
HALO	2012-	0.079 kt	Lead+ ³ He	~ 40	Little maintenance
KamLAND	2002-	1 kt	Scintillator	~ 250	
SNO+	2022	0.78 kt	Scintillator	~ 200	
JUNO	2023	20 kt	Scintillator	$\sim 8,000$	All flavor with pES, NC
Hyper-K	2027	260 kt	Water	54,000-90,000	Largest statistics
DUNE	2027	10-40 kt	Argon	$\sim 3,000$	Unique for ν_e

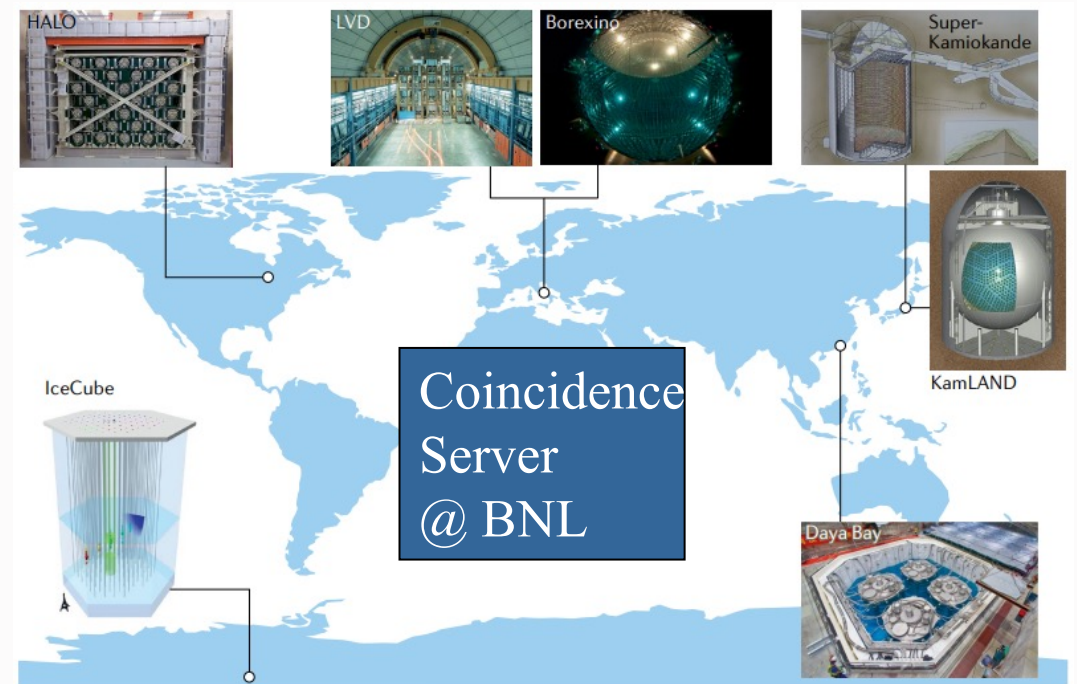
HyperK统计量最大，DUNE能清楚看到中子化，JUNO能看到全部味道、能量精度最高



- ◆ Neutrinos arrive several hours before photons, thus can alert astronomers several hours in advance.
- ◆ If Supernova Early Warning System (SNEWS) computer finds a coincidence within 10s, it sends out an automated alert to a mailing list. Running since 1998.

- ◆ SNEWS 2.0 (New J. Phys.23, 031201 (2021))
- ◆ Implement triangulation, in combination with intrinsic pointing information.
- ◆ Pre-supernova neutrino capabilities are also in the works.

<http://snews.bnl.gov>



超新星背景中微子 Diffused Supernova Background

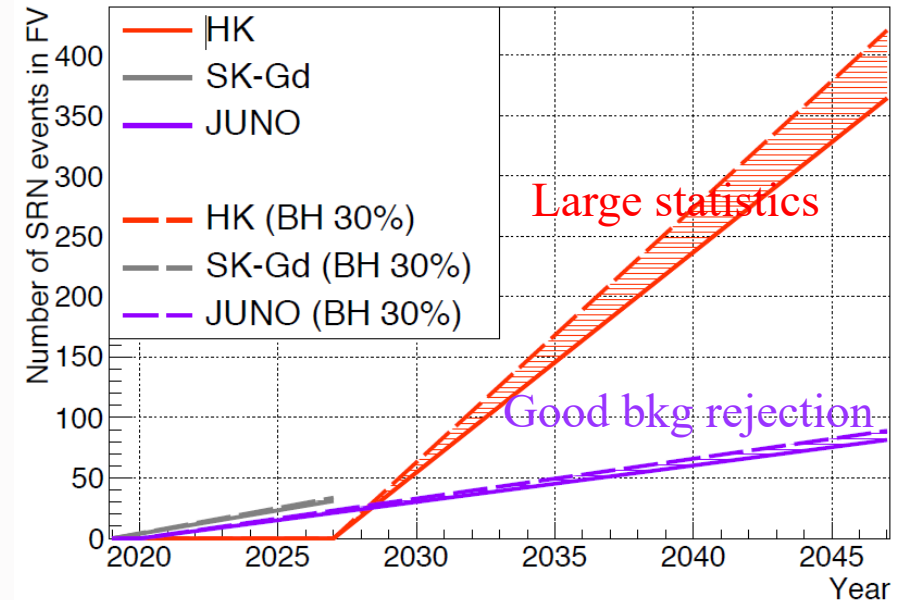
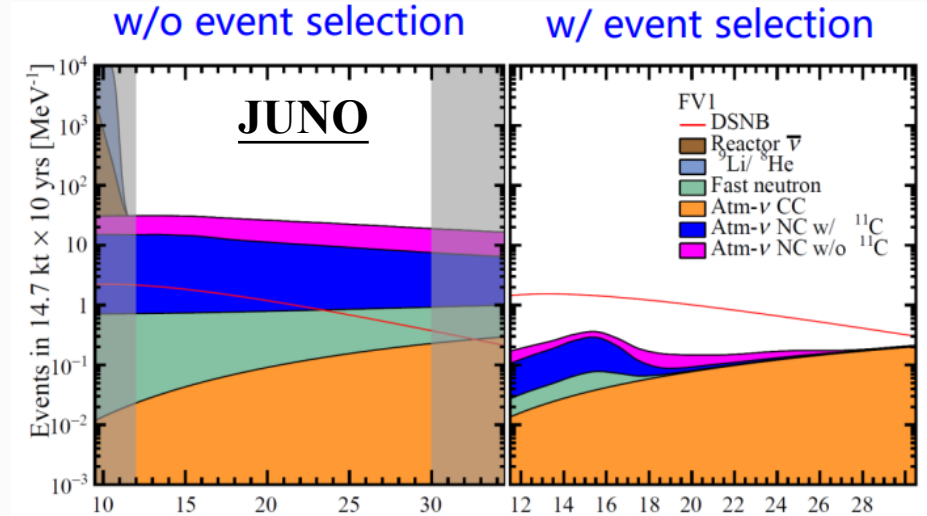
■ DSNB: Past core-collapse events

- 10/sec in the visible universe
- Cosmic star-formation rate
- Core-collapse neutrino spectrum
- Rate of failed SNe

■ Not observed yet. SK-IV 10y result $< 2.7 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$ (prediction $1.7 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$)

■ 江门有望率先测到DSNB

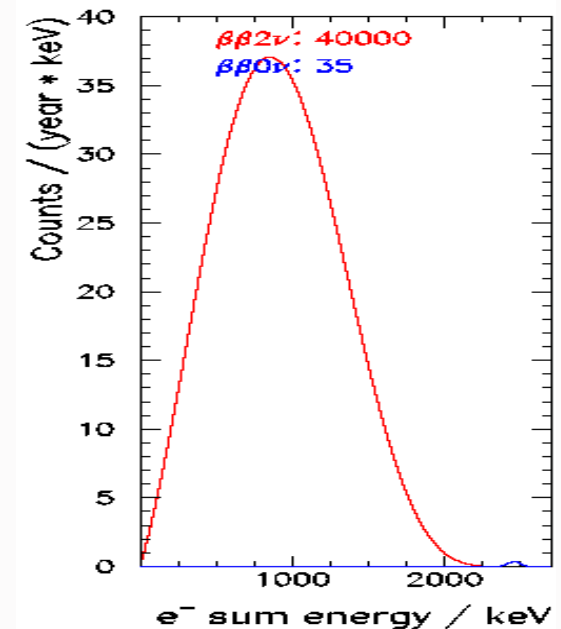
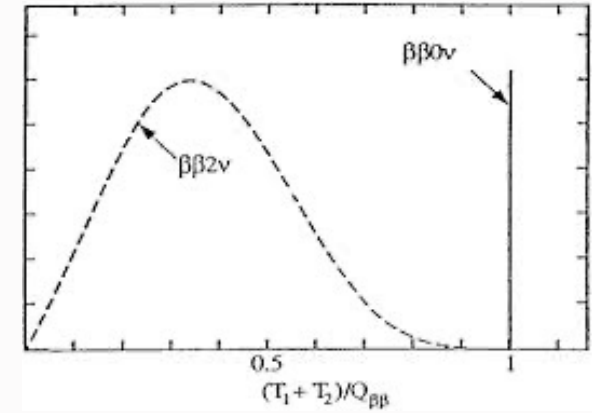
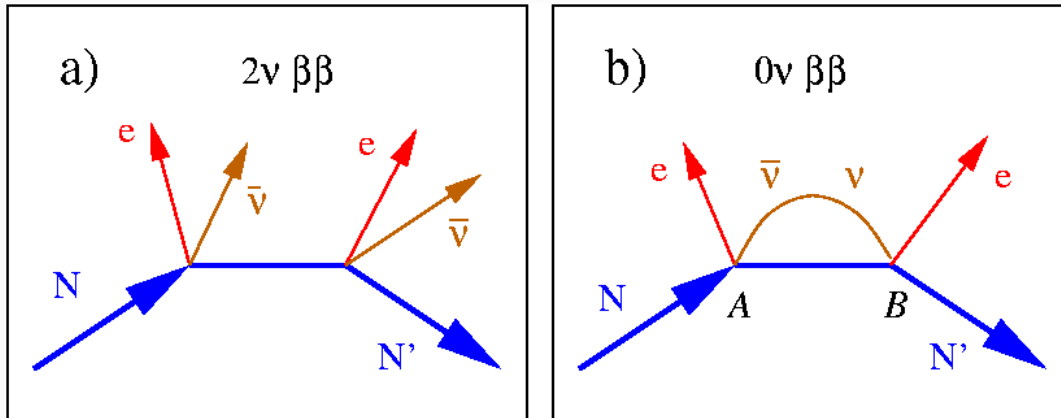
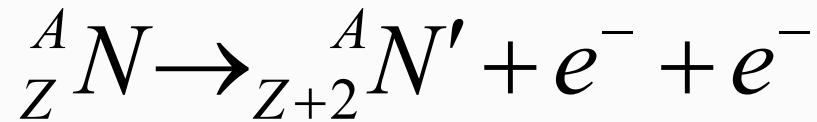
	Signal	Sensitivity
Super-K	Significantly improved w/ Gd	
JUNO	17 (3.6 bkg)	3σ in 3y, 5σ in 10 y
Hyper-K	$\sim 70 \pm 17$	$> 4\sigma$



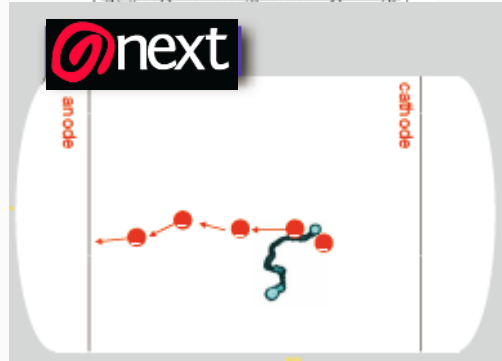
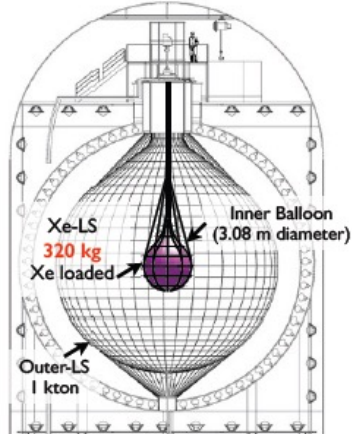
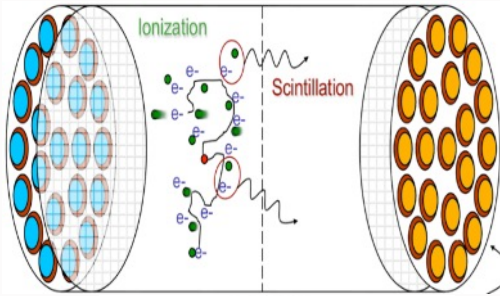
T. Yano

无中微子双贝塔实验 ($0\nu\beta\beta$)

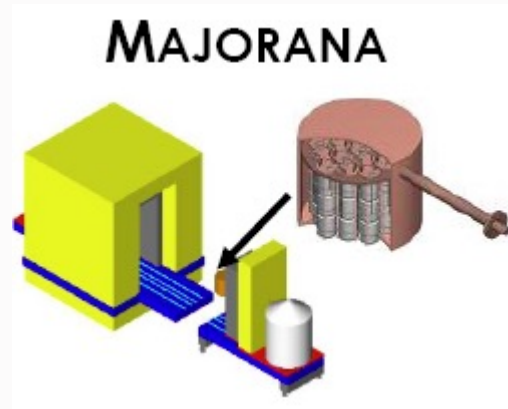
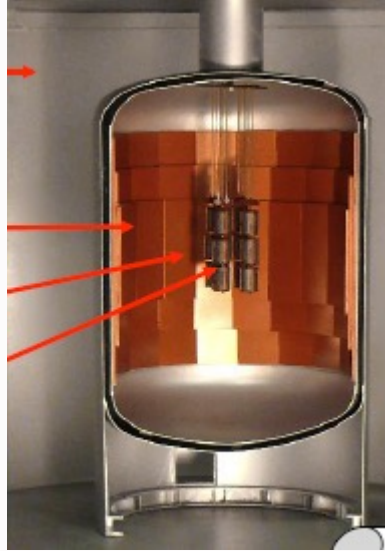
- 中微子是不是自己的反粒子？
即：Dirac粒子还是Majorana粒子？
- 质量产生机制 (Seesaw)
- 绝对质量测量



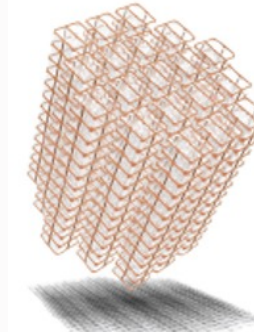
$0\nu\beta\beta$ 实验



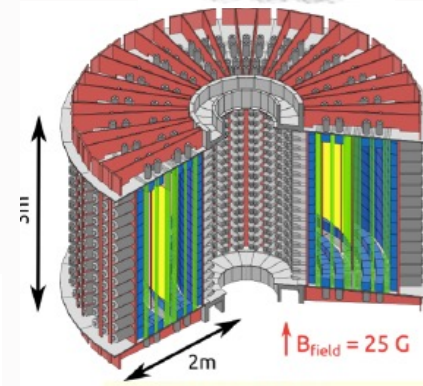
^{136}Xe



^{76}Ge



^{130}Te



^{82}Se
 (^{130}Te , ^{116}Cd ,
 ^{48}Ca , ^{96}Zr ,
 ^{150}Nd , ^{100}Mo)

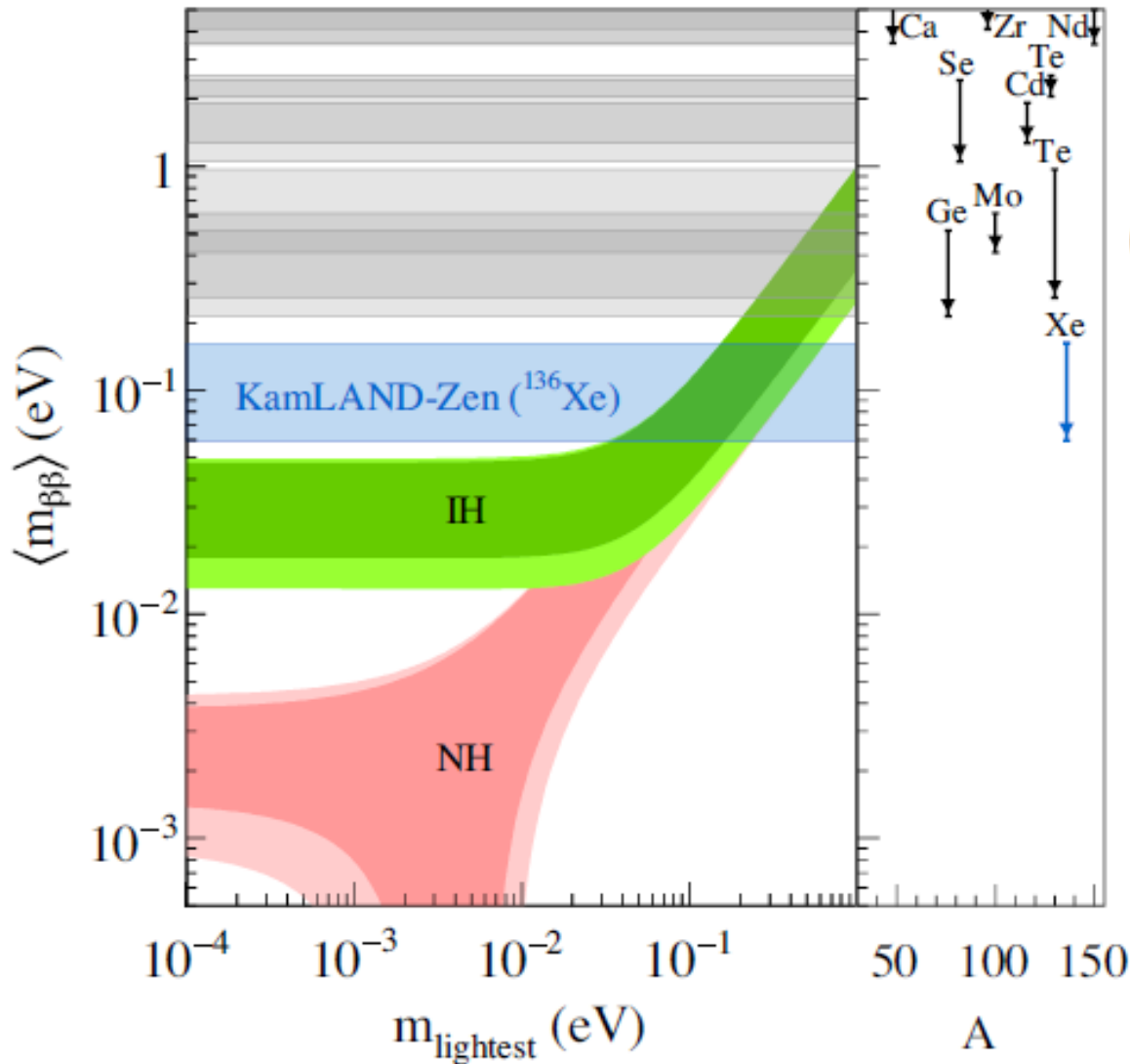


^{130}Te

SNO+

LUCIFER,

Best Results from Xe-136



KLZ Phase I+II:

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$$

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G_{0\nu}(Q, Z) |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 61 - 165 \text{ meV}$$

EXO-200 limit:

$$T_{1/2} > 1.1 \times 10^{25} \text{ yr (90\%CL)}$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 190 - 450 \text{ meV}$$

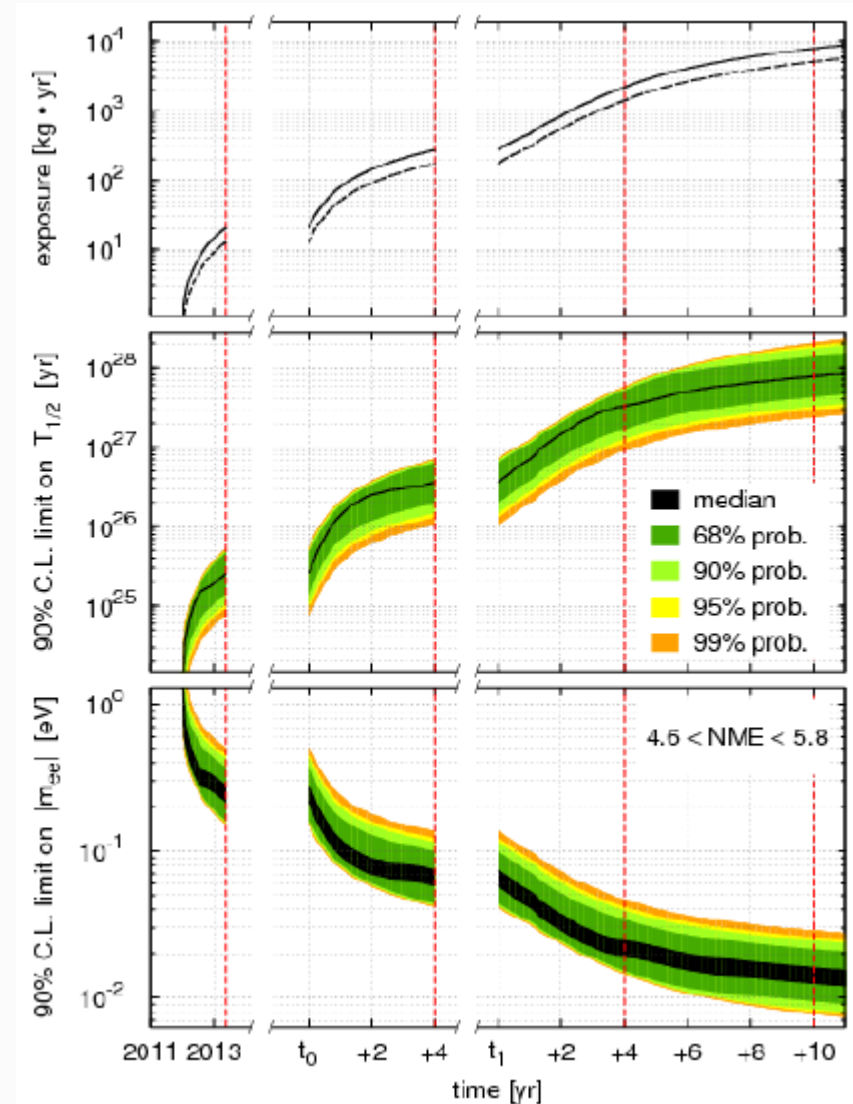
New Limit from Gerda



$$T_{1/2}^{0\nu} > 5.3 \cdot 10^{25} \text{ yr @ 90 C.L.}$$

$$m_{\beta\beta} < (150 - 330) \text{ meV}$$

Almost background-free



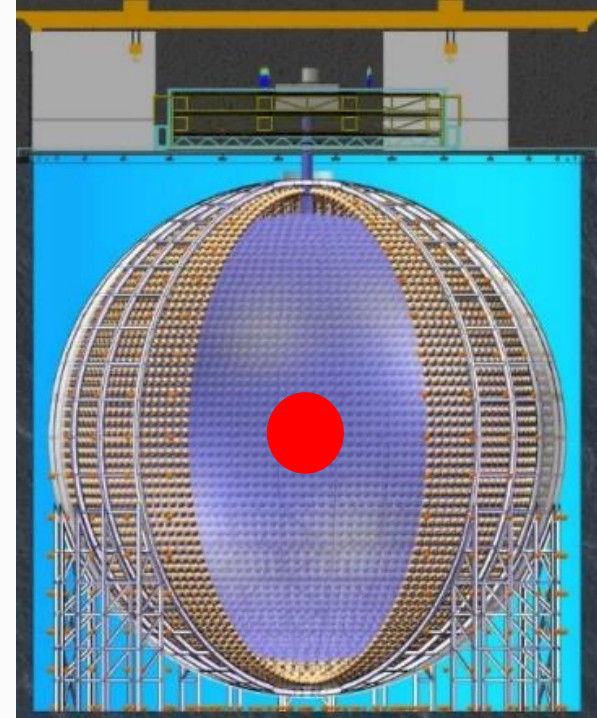
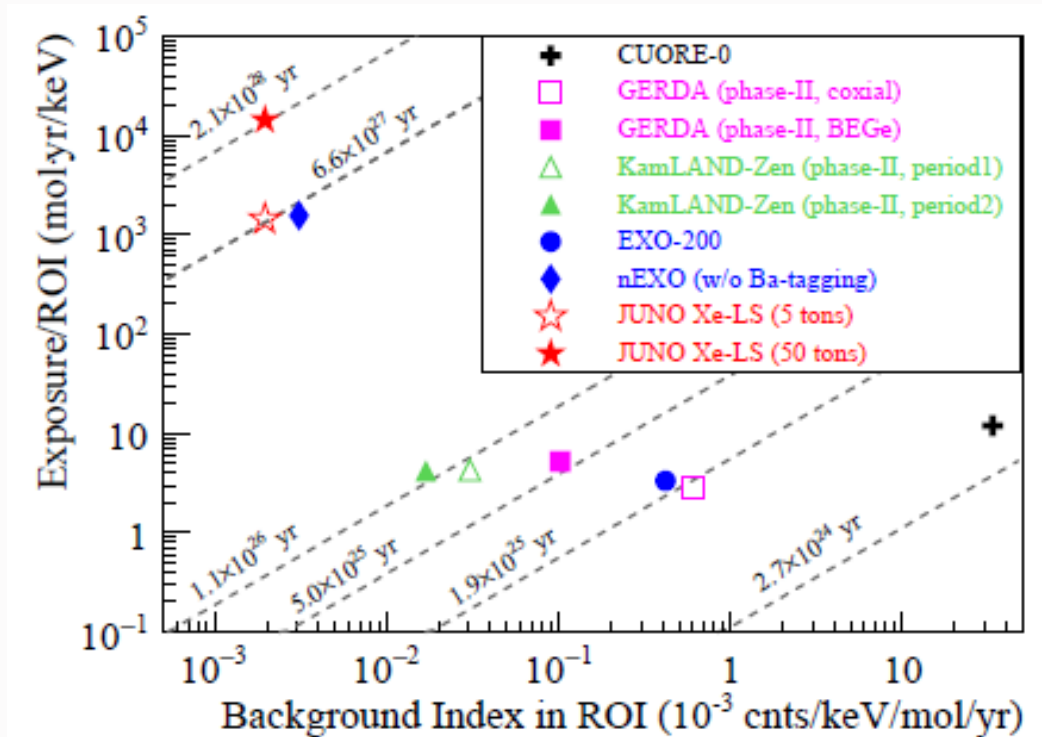
■ LEGEND=GERDA+Majorana → 1 ton enriched Ge

$0\nu\beta\beta$ 实验国内计划

- 高能所参与了美国EXO200, 参与nEXO研发
- JUNO计划后续增加 $0\nu\beta\beta$ 实验, 全探测器掺碲, 或小气球掺5-50吨氙
- 上海交大, 高压气体TPC (氙), 已完成模型实验
- 清华, 富集锗-76, 已富集
- 华中师大, 1吨高压气体TPC (六氟化硒)
- 复旦大学, 晶体方案

江门中微子实验 未来升级

◆ 江门完成质量顺序测量后 (~2030)

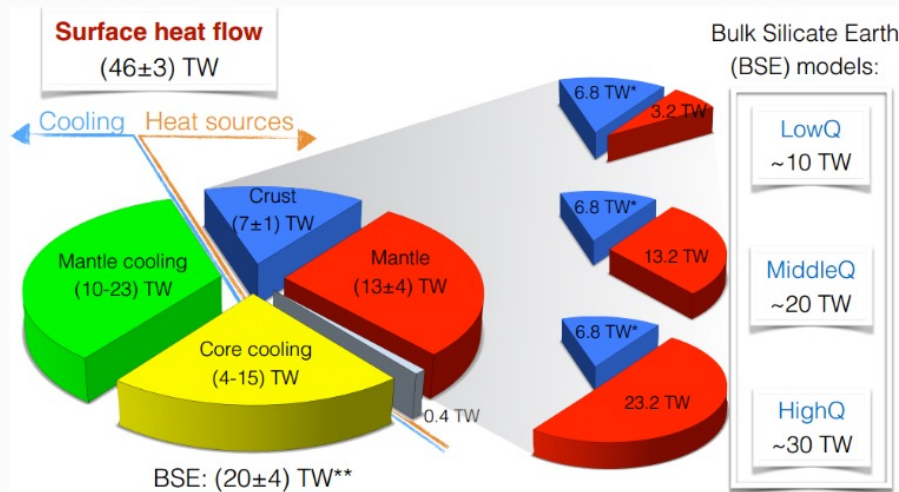
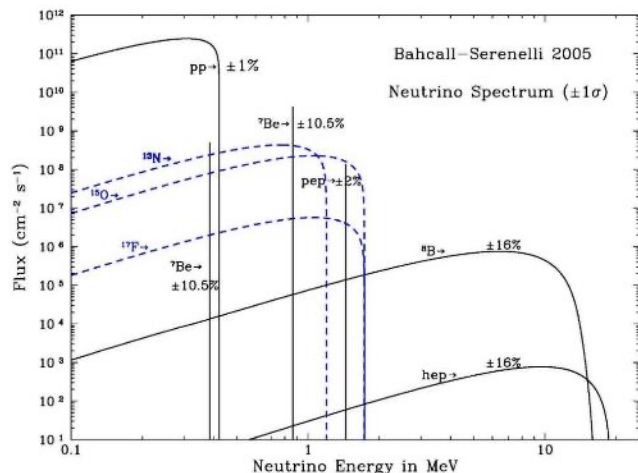
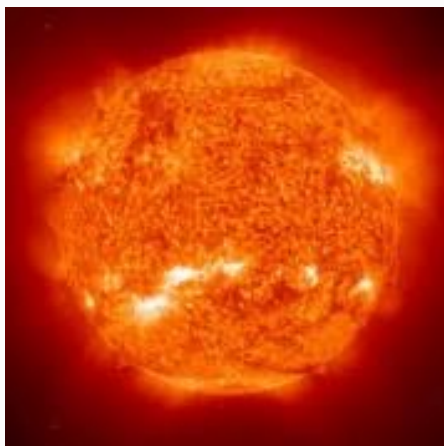


◆ 两种方案:

⇒ 小气球载入 ^{136}Xe

⇒ 液闪中均匀溶入 ^{130}Te (研发中)

太阳中微子 地球中微子



◆ 太阳中微子仍有很多重要问题

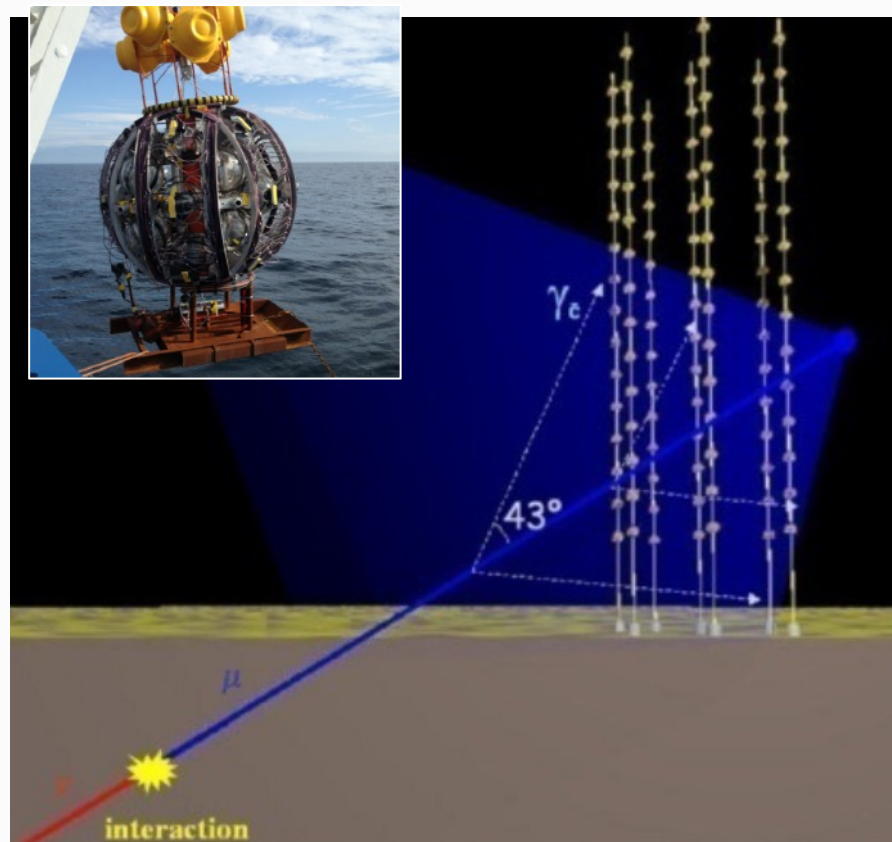
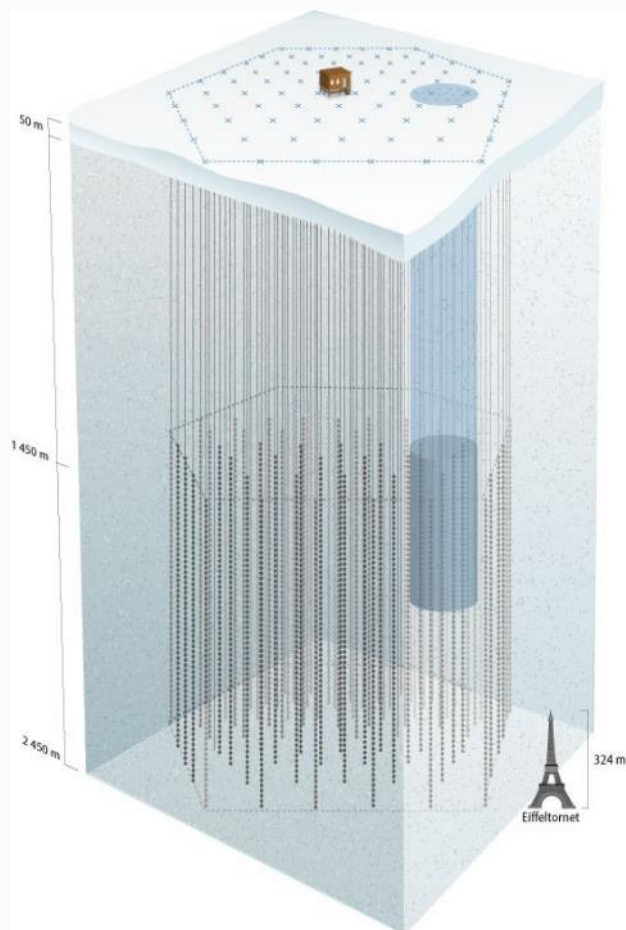
- ⇒ 太阳物理：金属丰度疑难；对流层深度
- ⇒ 粒子物理：太阳与反应堆结果差异；寻找新物理
- ⇒ 江门中微子实验对太阳 ^8B 、 ^7Be 、pep、CNO中微子可达2%、1%、7%、12%的国际最高测量精度

◆ 地球U/Th产生地热及中微子

- ⇒ 总共探测到~100个地球中微子，江门每年探测400个
- ⇒ 已针对华南地质建立了3维模型
- ⇒ 将对不同地球物理模型给出判定，为地幔对流模式、地磁场形成等提供依据

中微子望远镜

- 寻找宇宙线起源 → 超高能中微子
- 美国南极IceCube, 法国地中海ORCA/KM3Net, 俄国贝加尔湖Baikal
- 高能所LHAASO团队 (贝加尔湖或南海), 上海交大 (南海)



江门中微子实验 预期成果

十多个多个研究方向，多数达到国际领先水平



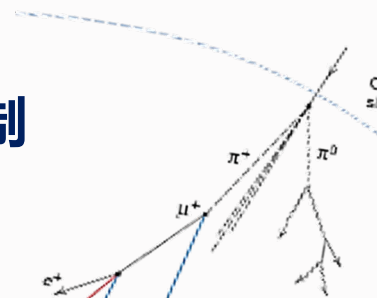
太阳中微子

检验恒星演化的动力学，
1-5年达到国际领先水平

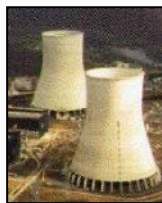


超新星中微子：宇宙演化、
恒星形成、超新星爆发机制

超新星背景中微子：
3-5年，有率先发现潜力

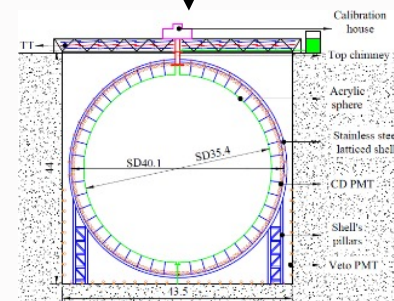
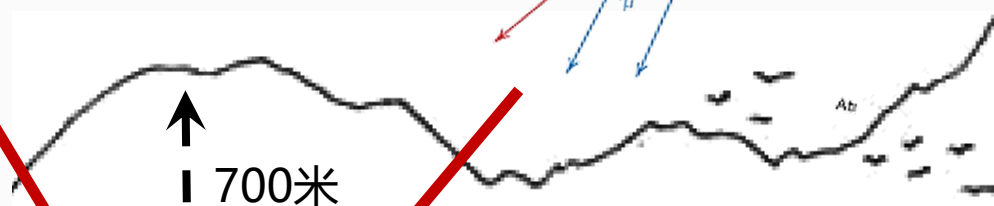


大气中微子：
提高质量顺序
灵敏度



反应堆中微子：

- ⇒ 质量顺序 (6年) ;
- ⇒ 精确测量3个振荡参数：
半年达到国际最高精度



地球中微子：

- ⇒ 1年国际领先；
- ⇒ 6-10年确定地球物理模型

质子衰变：

检验粒子物理大统一理论，
10年达到国际先进