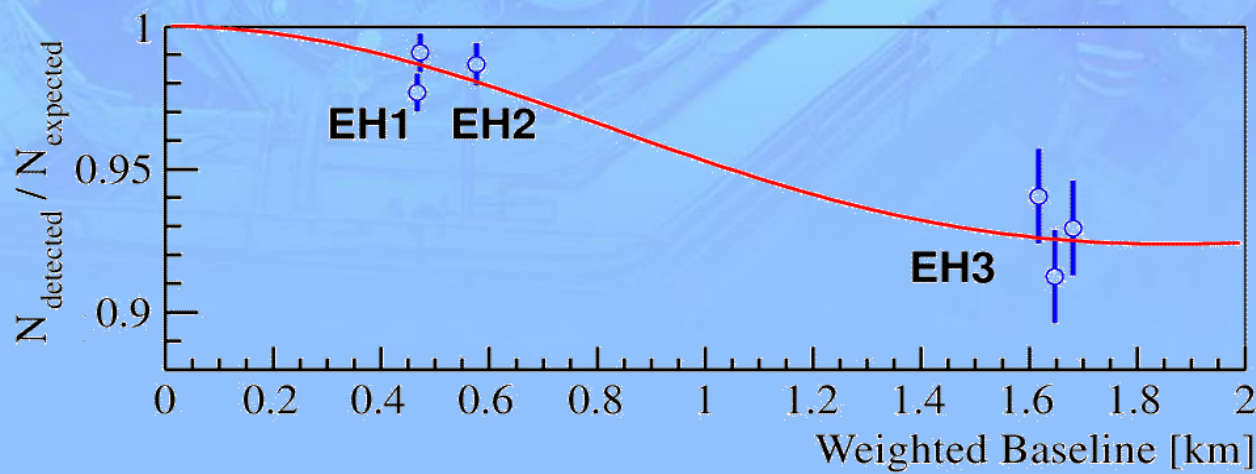
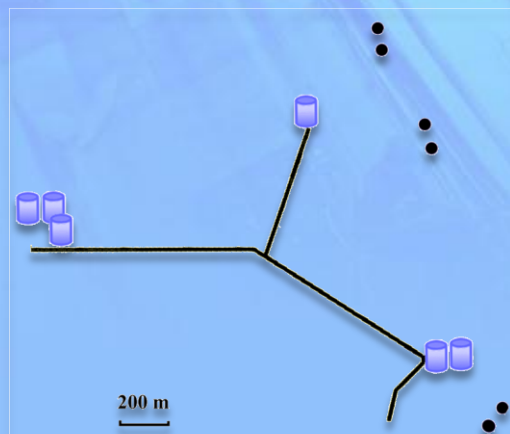


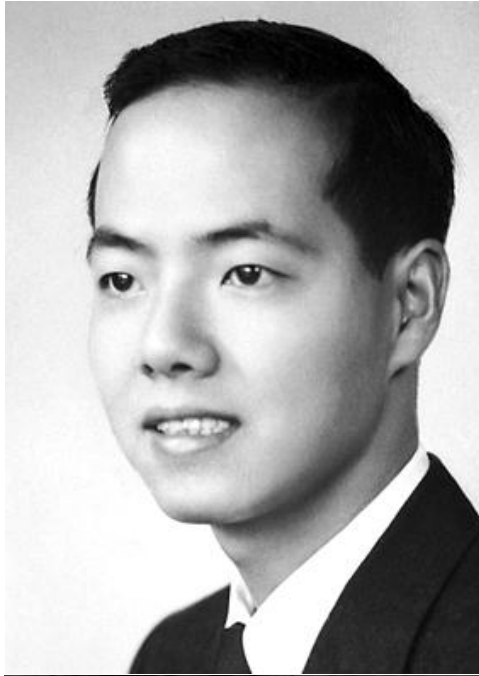
大亚湾实验发现新的中微子振荡

曹 俊

高能所第八届公众科学日，2012年5月20日



微观世界 左右不对称



- ◆ 1956年，李、杨提出弱作用中**宇称不守恒**，即左右不对称。
- ◆ 1957年被吴健雄用实验证实。
- ◆ 1957年诺贝尔奖。

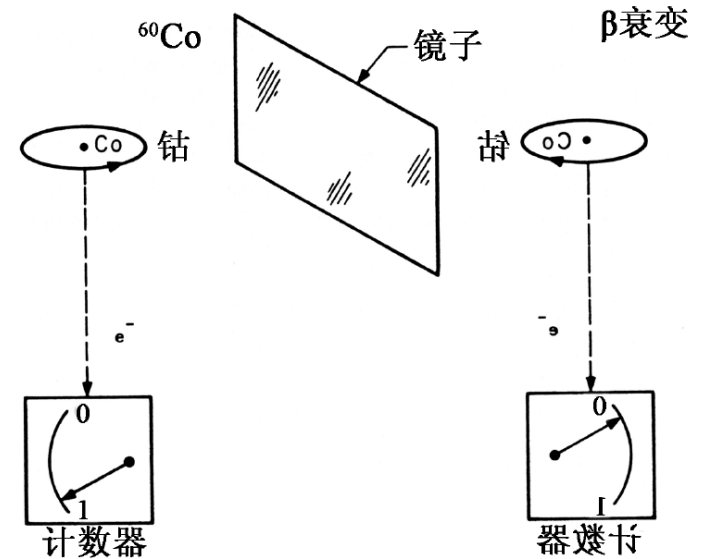


图6 吴健雄设计的实验方案

吴健雄实验

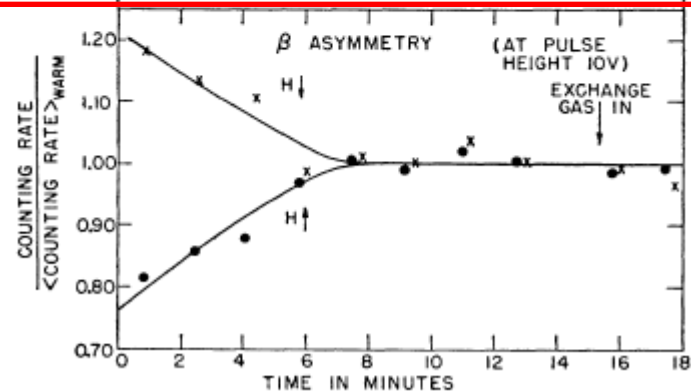
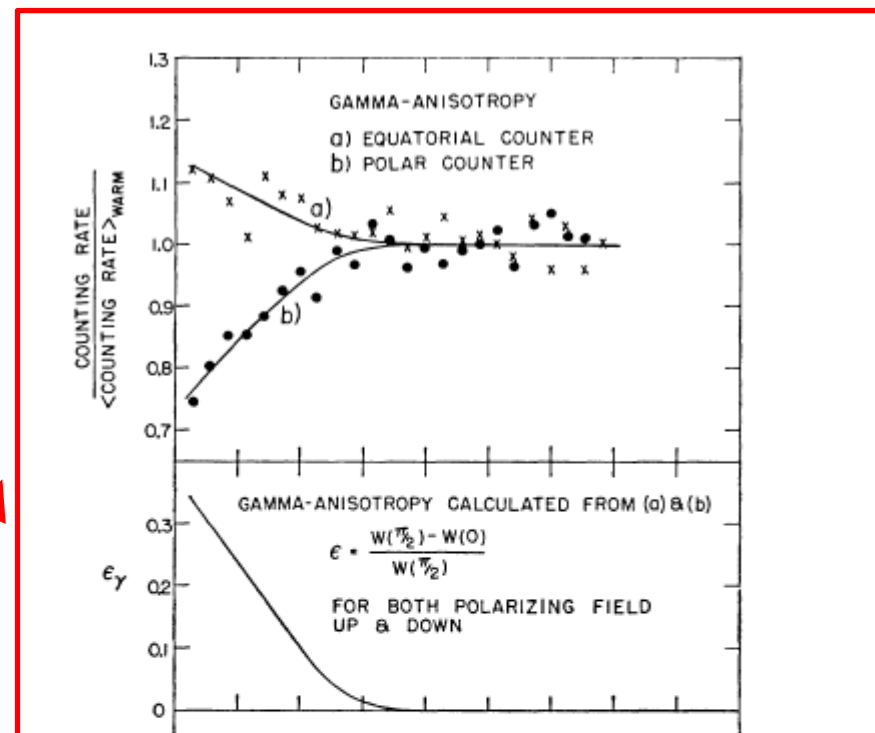


FIG. 2. Gamma anisotropy and beta asymmetry for polarizing field pointing up and pointing down.

为什么宇称不守恒？

泡利：别听那两个年青人的。我不相信上帝是一个**软弱的**左撇子。



- ◆ 只存在左旋的中微子或者右旋的反中微子
- ◆ 中微子只参与弱作用，因此弱作用中宇称不守恒。但在强作用和电磁作用中守恒。



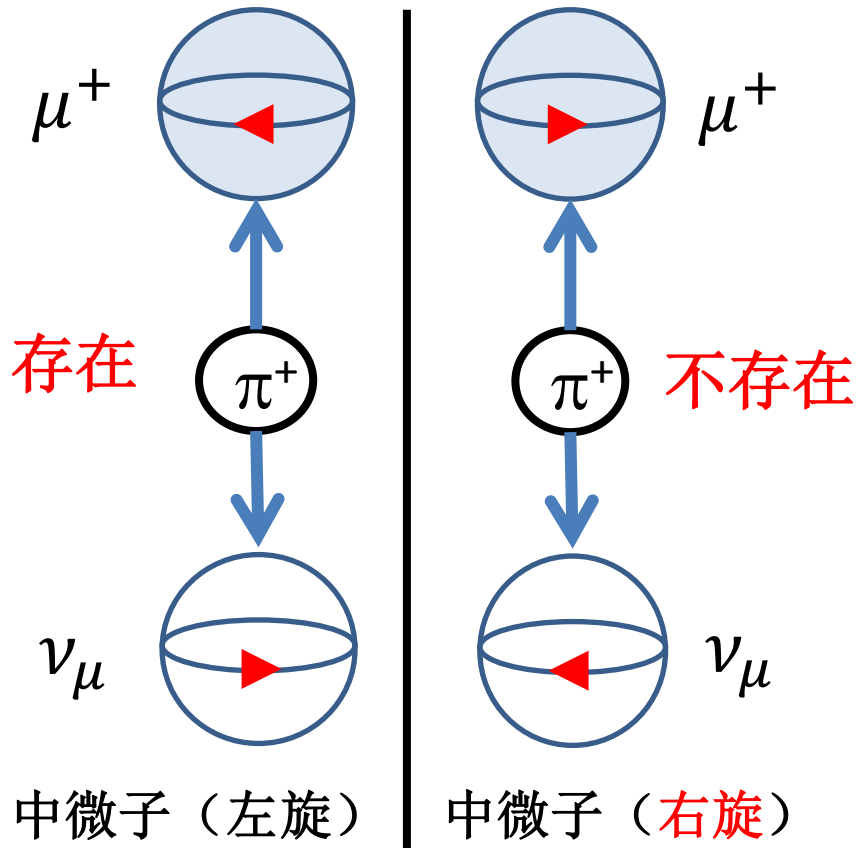
图4 吴健雄与泡利在纽约

李政道，物理·41卷(2012年)3期

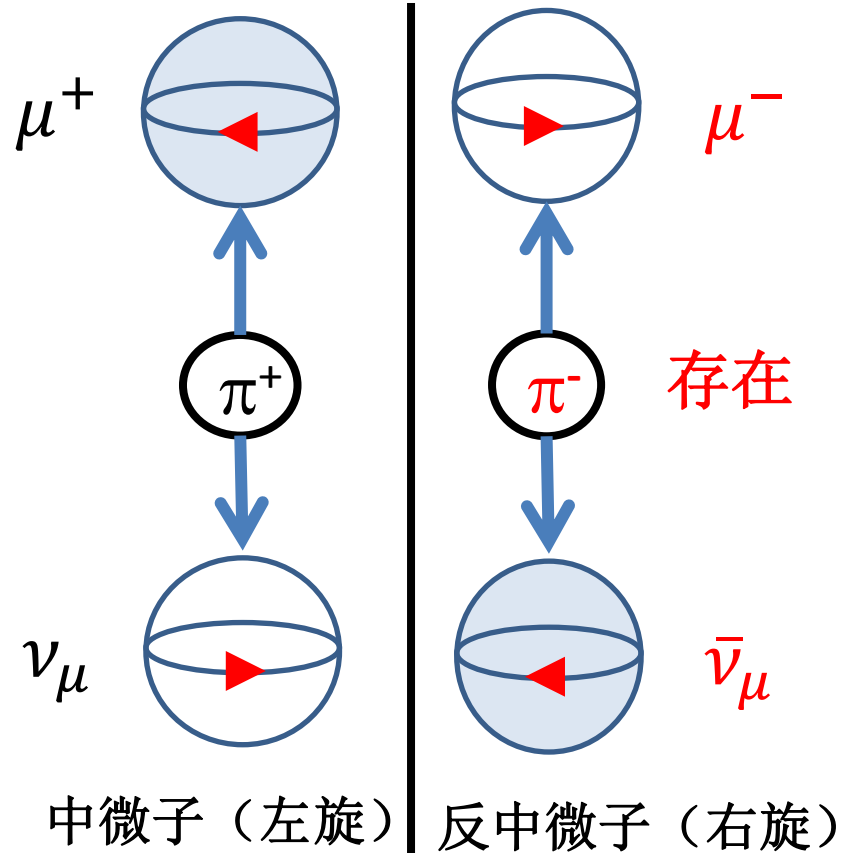
另一个实验

- ◆ 莱德曼等人 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (1月4日, 3天完成)
- ◆ 吴健雄9日完成。同在15日发表。莱德曼的文章中说: 实验开始之前, 我们已得知了吴的初步结果。

宇称变换



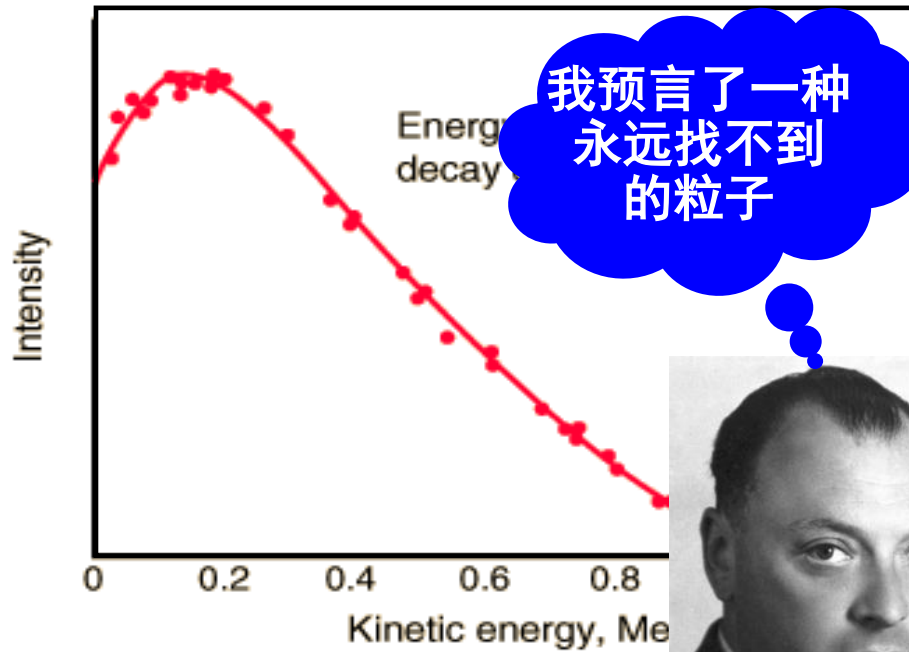
电荷宇称变换 (CP)



什么是中微子？



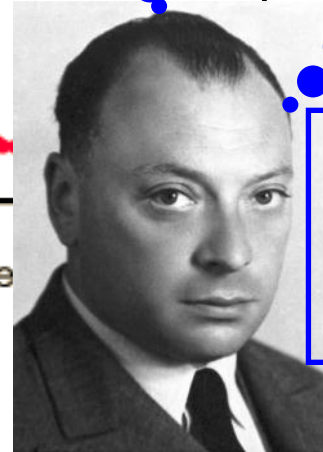
James Chadwick



我预言了一种
永远找不到的
粒子

中性，
无质量，
相互作用弱

1930年泡利提
出中微子存在
的假定。

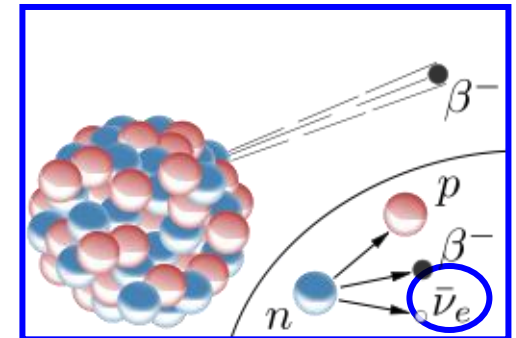
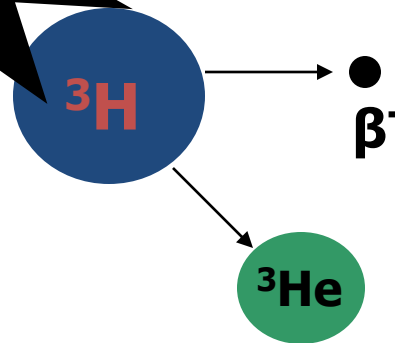


Wolfgang Pauli



Niels Bohr

能量动量不
守恒？



发现中微子

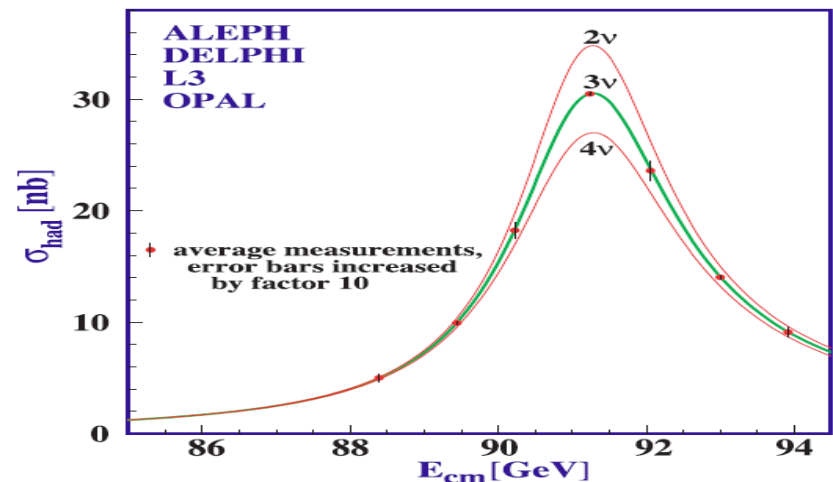


- ◆ 每次核裂变释放6个中微子
- ◆ 大亚湾+岭澳核电站 6个反应堆
每秒钟产生 3.5×10^{21} 个中微子
(35万亿亿)
- ◆ **1956年**莱因斯和柯万利用反应堆
首次捕捉到中微子 (**1995年**诺贝尔奖)



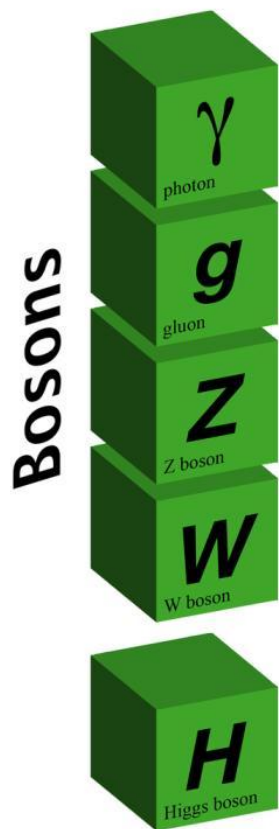
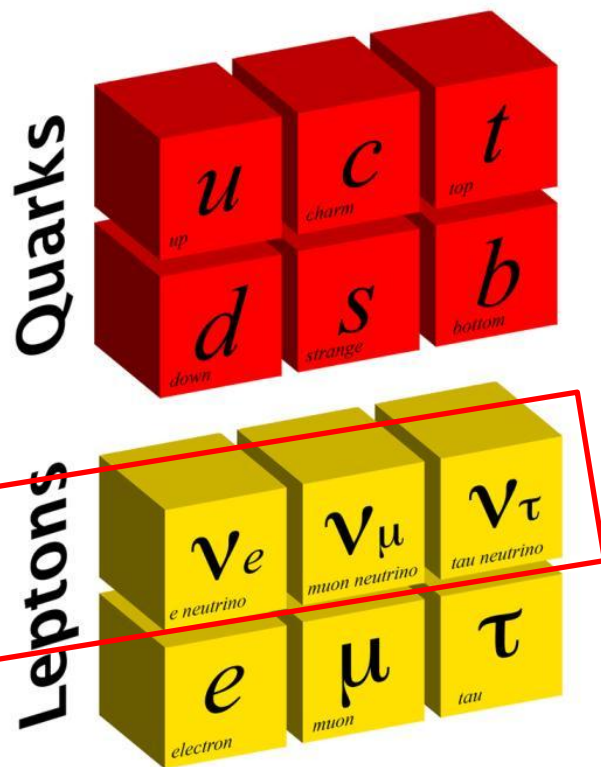
发现第二、三种中微子

- ◆ 1962年，莱德曼、舒瓦茨、施坦博格发现第二种中微子—— μ 中微子
(1988年诺贝尔奖)
- ◆ 1989年，欧洲核子研究中心证明存在且只存在三种中微子。
- ◆ 2000年，美国费米实验室发现第三种中微子， τ 中微子。



粒子物理的“标准模型”

Fundamental Particles of the Standard Model



十二块砖，

四种胶水：

电磁力

强力

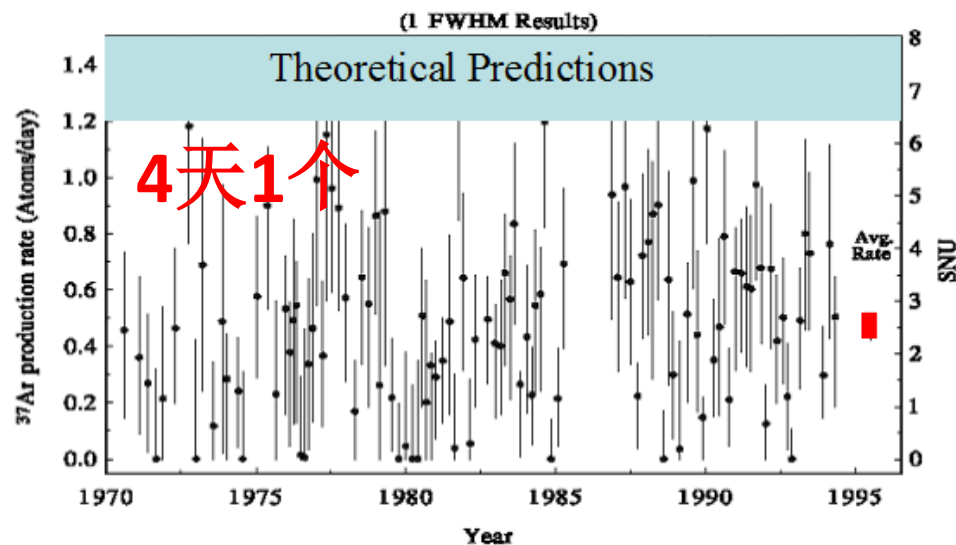
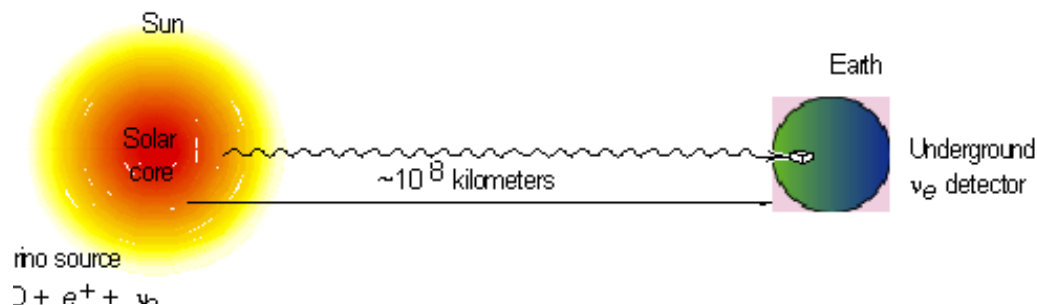
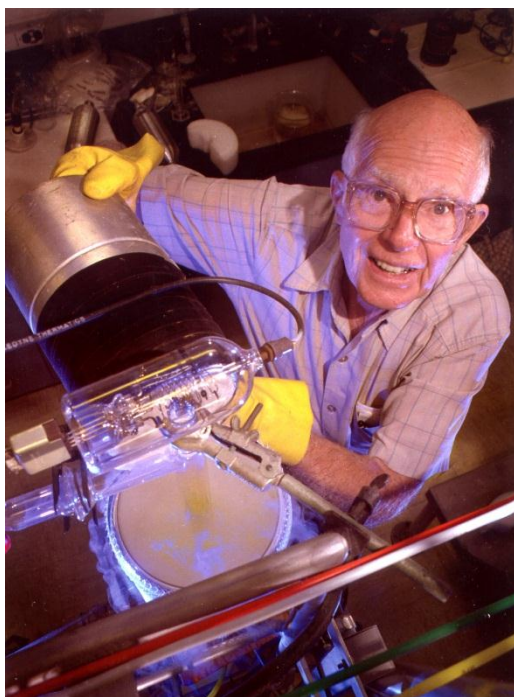
弱力

引力（未包括）

自上世纪50年代，高能物理占诺贝尔物理奖的1/3强，
其中为**奠定标准模型**所颁发的诺贝尔物理奖就达**17次**。

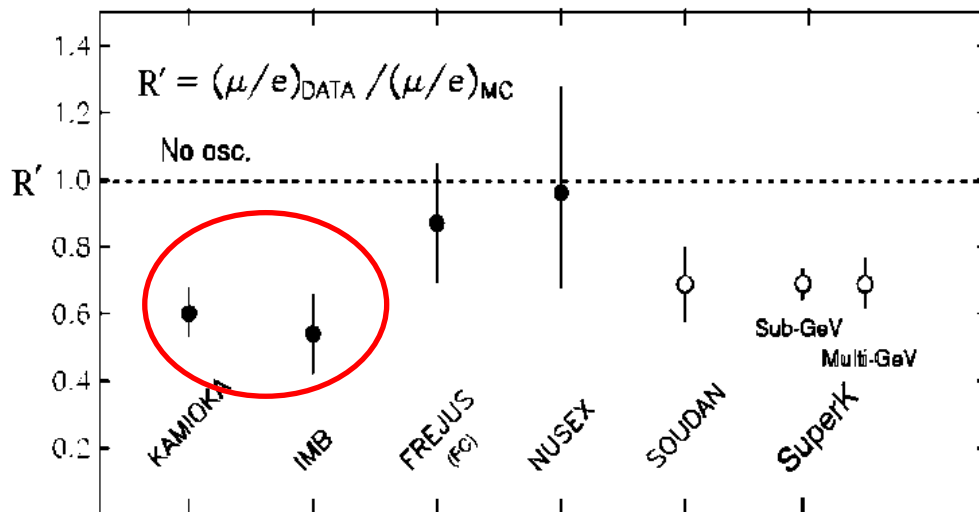
太阳中微子丢失之谜

- ◆ 标准模型是否完美无缺？中微子说：No！
- ◆ 核聚变产生中微子。在地球1平方厘米表面上，每秒就会落下约600亿个来自太阳的中微子。

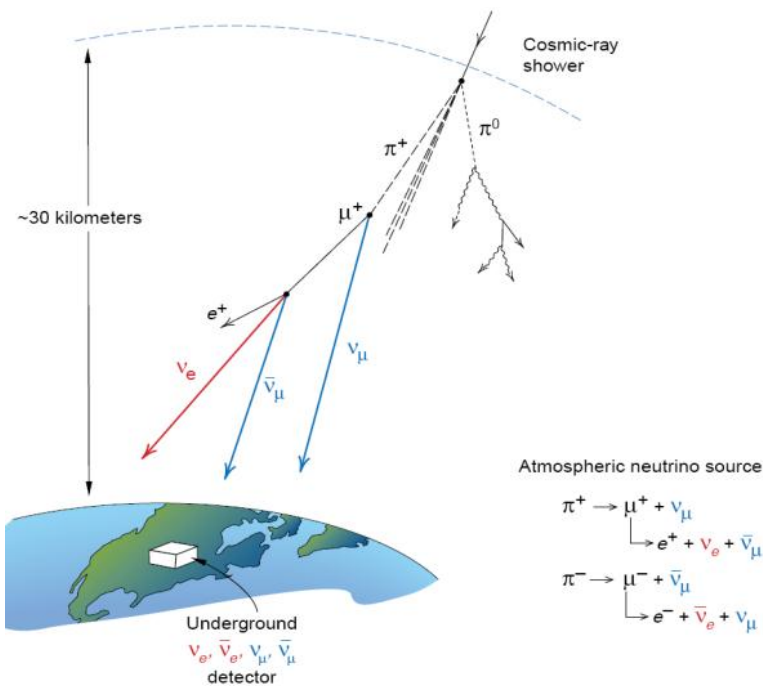


戴维斯：2002年诺贝尔奖

大气中微子反常



日本神冈实验、美国IMB实验
发现大气中微子比预期少



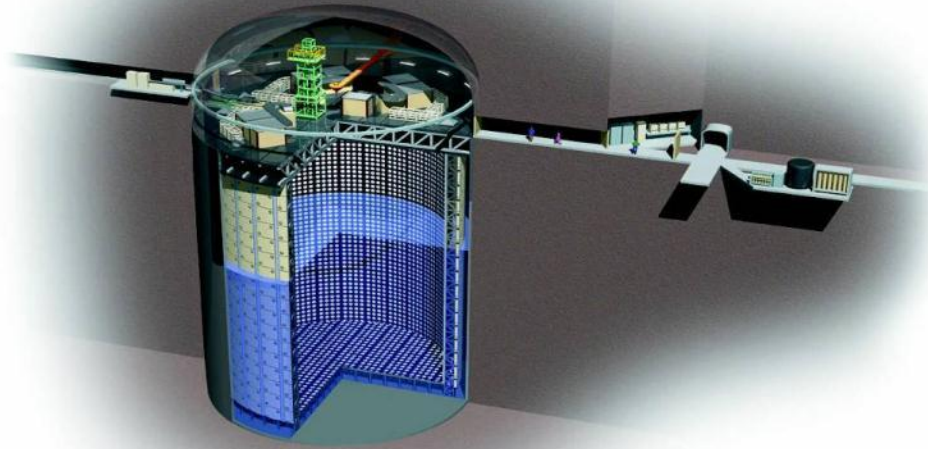
小柴昌俊：2002年诺贝尔奖

我不是好学生

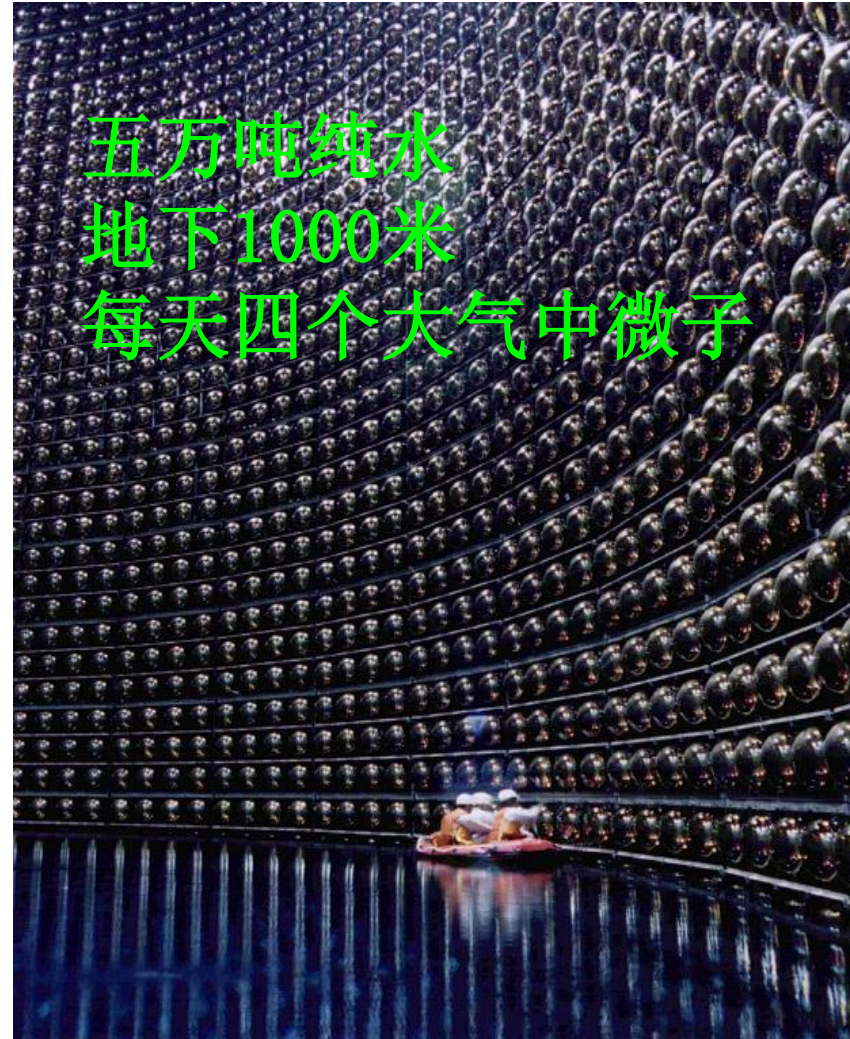
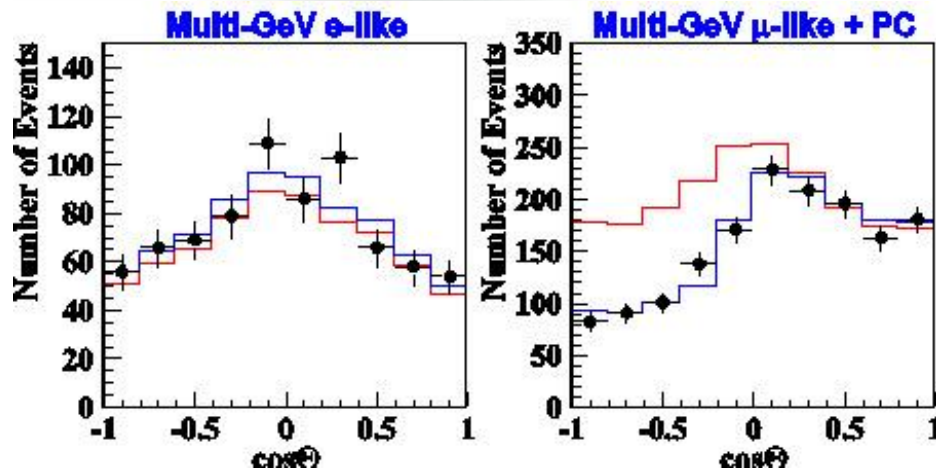
诺贝尔奖获得者
小柴昌俊的传奇人生

发现中微子振荡

1998年日本超级神冈实验发现大气中微子振荡！

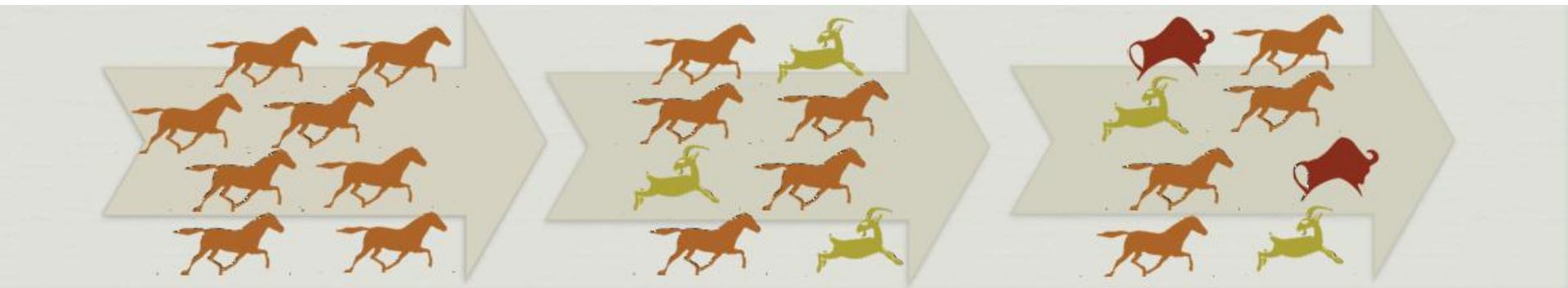


五万吨纯水
地下1000米
每天四个大气中微子



什么是中微子振荡？

- ◆ 一种中微子在飞行过程中会变成另外的中微子



- ◆ 如果探测器只对一种中微子敏感，会发现它变少了。
- ◆ 如果能测量其它中微子，会发现原本没有的，会多出来。



为什么会振荡：量子相干现象

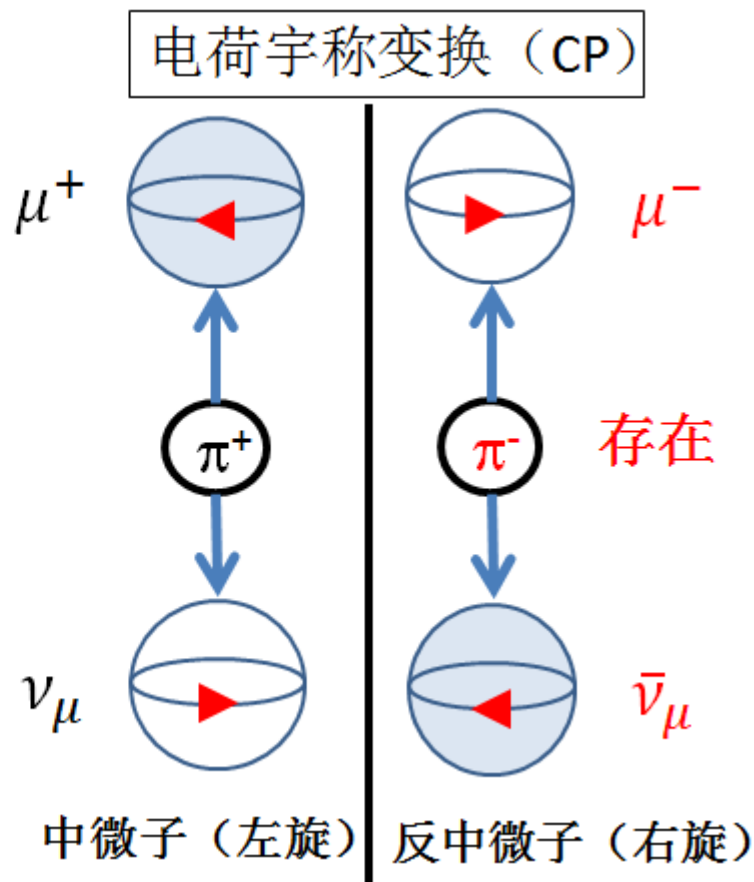
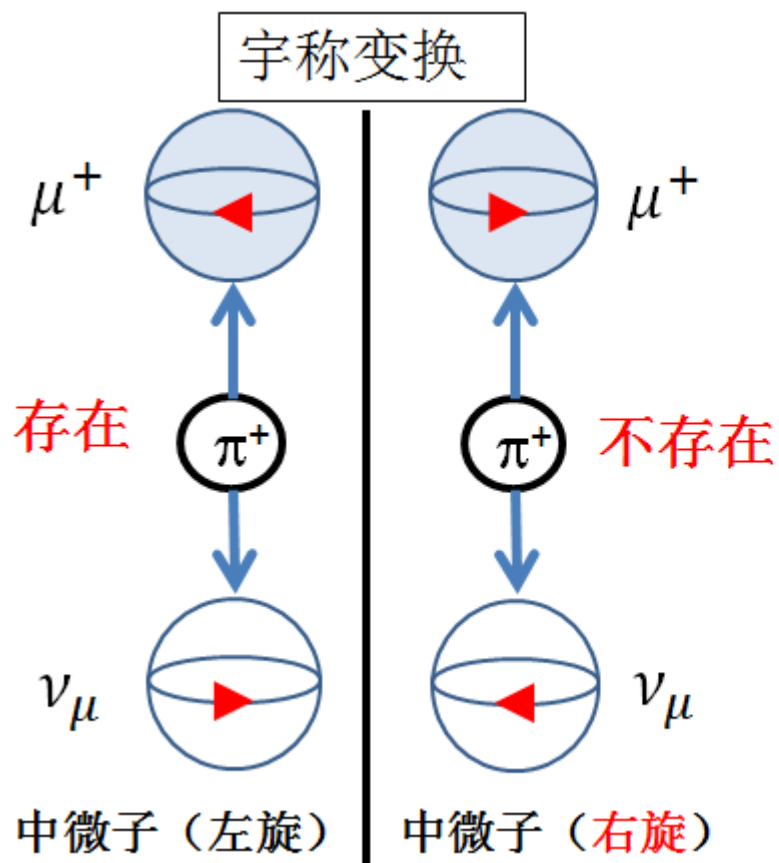
- ◆ 从不同的角度看苹果
 - ⇒ 按颜色分：红、青、黄
 - ⇒ 按味道分：酸、甜、涩
- ◆ 从不同角度看中微子（量子数）
 - ⇒ 按质量分： ν_1 、 ν_2 、 ν_3
 - ⇒ 按味道分： ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ

$$|\nu_e\rangle = \quad \quad \quad = c_1 |\nu_e\rangle + c_2 |\nu_\mu\rangle + c_3 |\nu_\tau\rangle$$

产生时是纯的味道态，可以看成由不同质量态组合而成。
不同质量态的中微子飞行时振荡频率不一样。

中微子振荡的条件

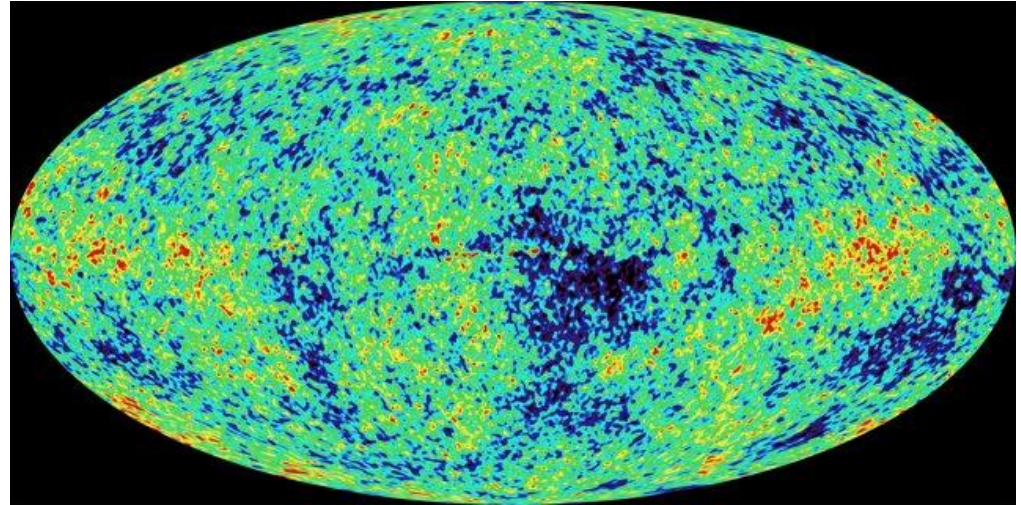
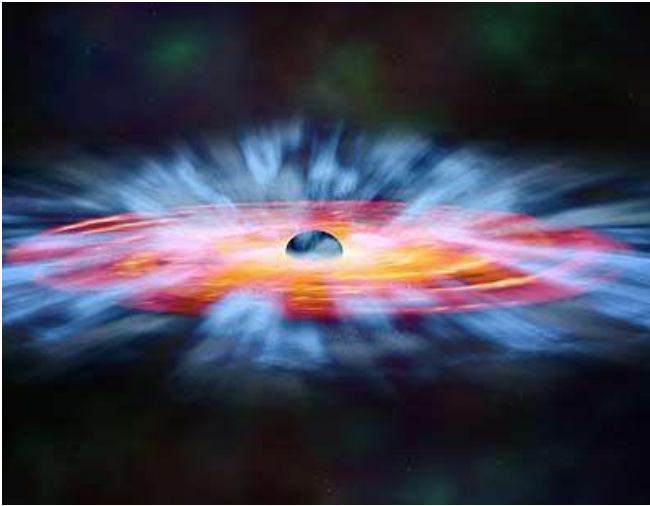
- ◆ 中微子在飞行中将发生振荡，即从一种中微子变成另一种中微子，如果
 - ⇒ 中微子有质量，且
 - ⇒ 中微子味道本征态不等于质量本征态
- ◆ 振荡：中微子有质量（特别轻，至今没有测出来）
 - ⇒ 中微子也有右旋态！
 - ⇒ 有可能破坏CP对称性！
 - ⇒ 质量起源：它有可能是它自己的反粒子！
- ◆ 中微子振荡，首次也是唯一，发现超出标准模型的现象。



也存在，只是特别小，
现在还不能观察到

在CP变换下也可能不
对称 (CP破坏)

CP破坏与宇宙起源



- ◆ 宇宙起源：137亿年前的一次大爆炸
 - ⇒ 微波背景辐射、红移、氢氦元素丰度等等
- ◆ 粒子物理定律：能量转化为物质时，正反物质成对产生
 - ⇒ 宇宙中正反物质应该相等
- ◆ 实际上，并没有观测到宇宙中存在大量反物质

反物质哪里去了？

Murayama: 中微子也许是我们的母亲

something occurred
over there
one billion years ago

BIG
BANG

Inflation

t 10^{-44} 10^{-37} s
 T 10^{32} 10^{28}
 E 10^{19} 10^{15}

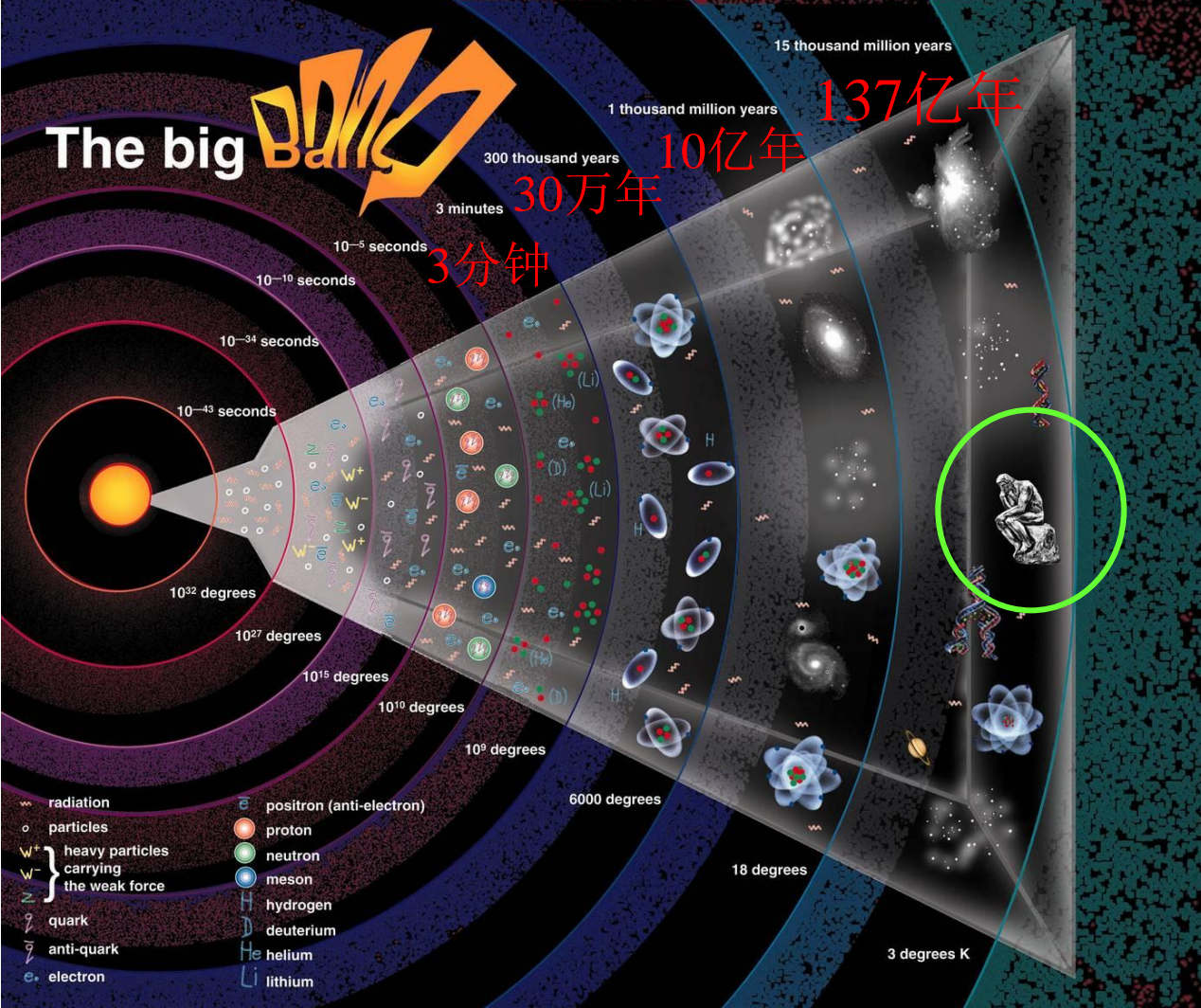
L
↓
B

possible dark matter relic

cosmic microwave radiation visible

Key:

W, Z bosons	photon
quark	meson
gluon	baryon
electron	ion
muon	atom
tau	black hole
neutrino	



宇宙大爆炸产生的中微子

在地球1平方厘米表面上，每秒就会落下约**10万亿**个宇宙中微子 (relic neutrino)。

在大爆炸第一秒钟内产生了无数的中微子，由于它几乎不被吸收，绝大多数存留到现在，就在我们身边。每立方厘米有300个。

二种中微子之间的振荡

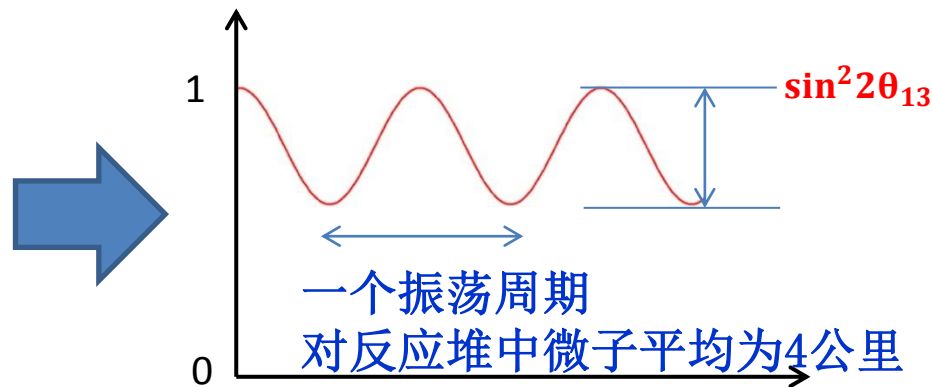
飞行距离L/中微子能量E

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

振幅大小

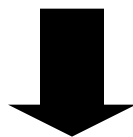
振荡频率

一个中微子飞行一段距离后，仍然是它自己的几率



三种中微子混合规律

$$\text{弱作用本征态} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \text{质量本征态}$$



$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

θ_{23}

大气中微子振荡

$\theta_{13} = ?$

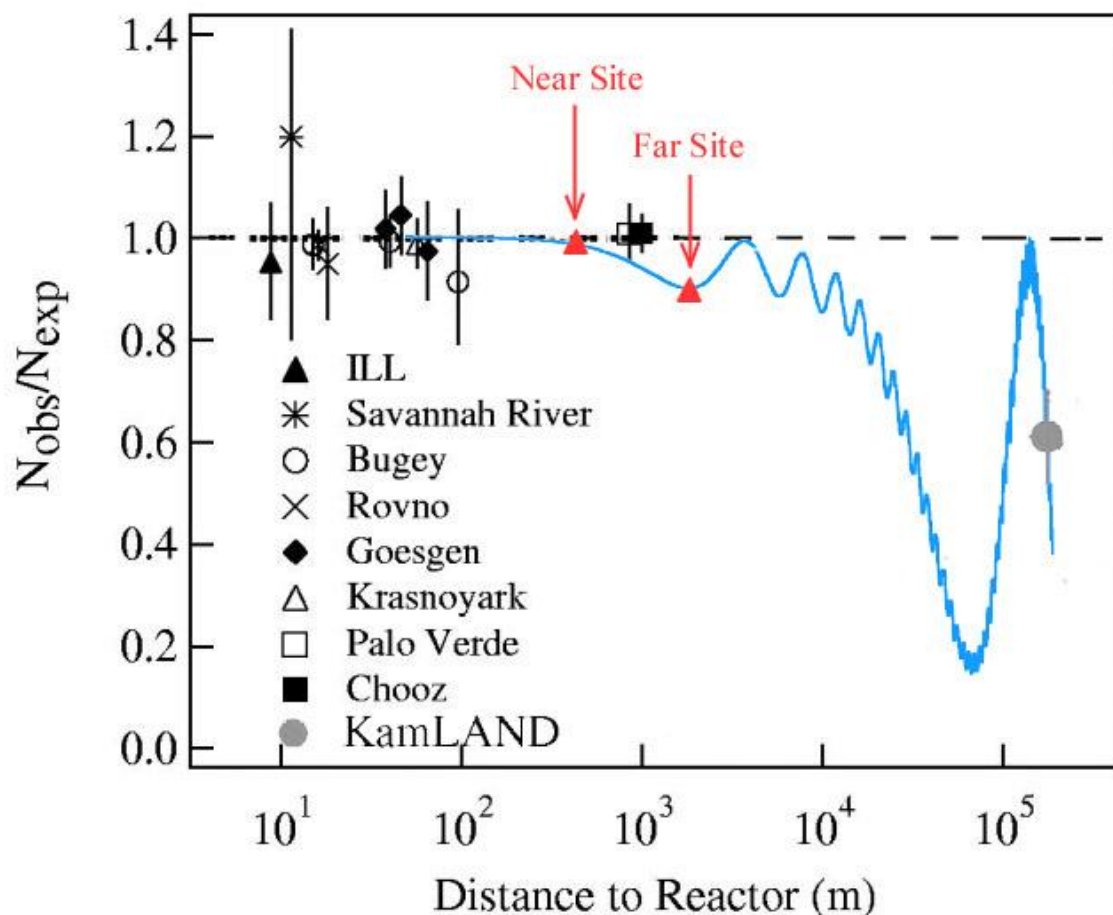
$\delta_{\text{CP}} = ?$

θ_{12}

太阳中微子振荡

反应堆中微子振荡

$$P_{ee} \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \right) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \right)$$



反应堆中微子能量平均4 MeV:

$$\Delta m_{32}^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

最大振荡@~2公里

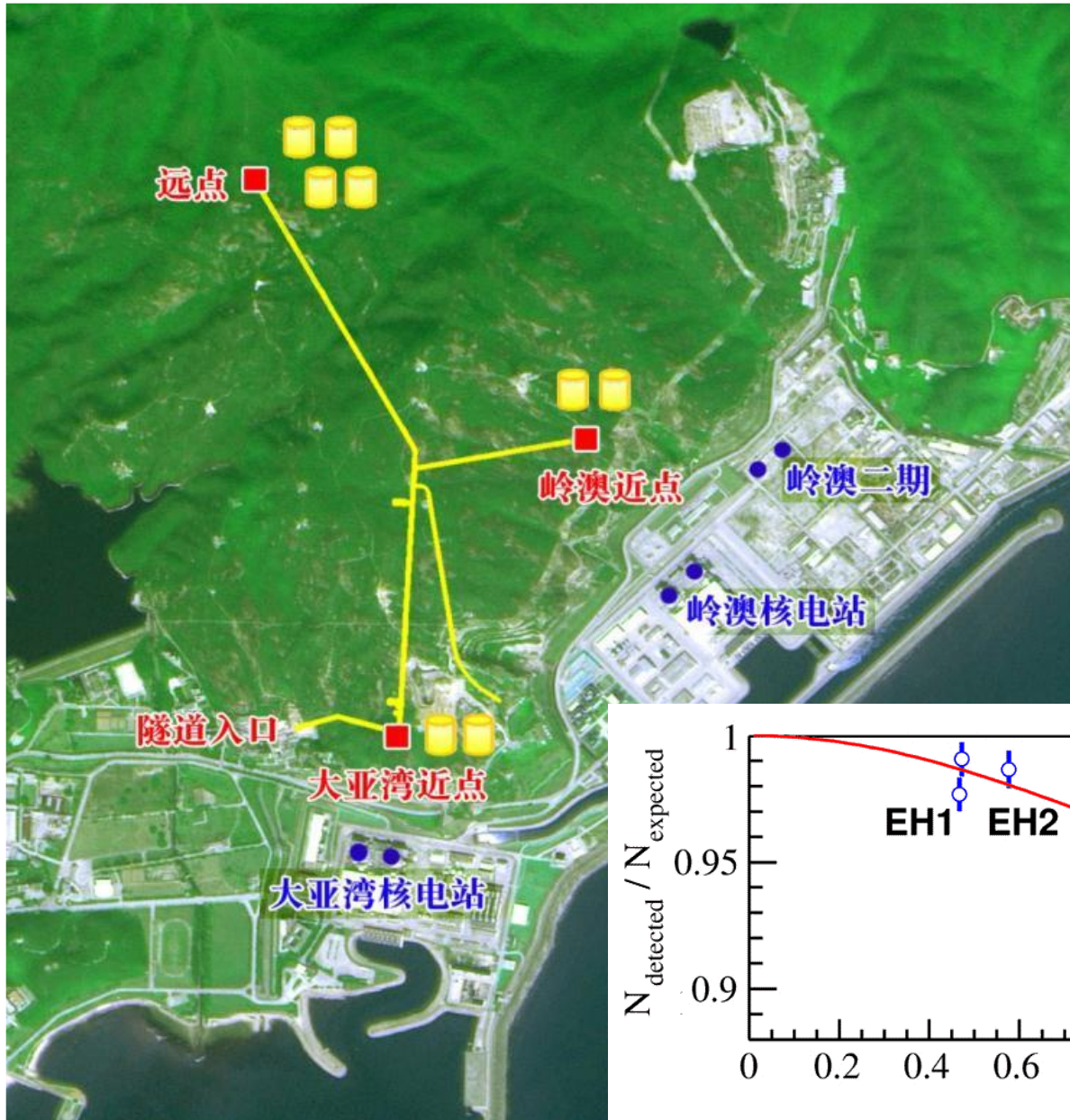
$$\Delta m_{21}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

最大振荡@~60公里

大亚湾实验测量 θ_{13}

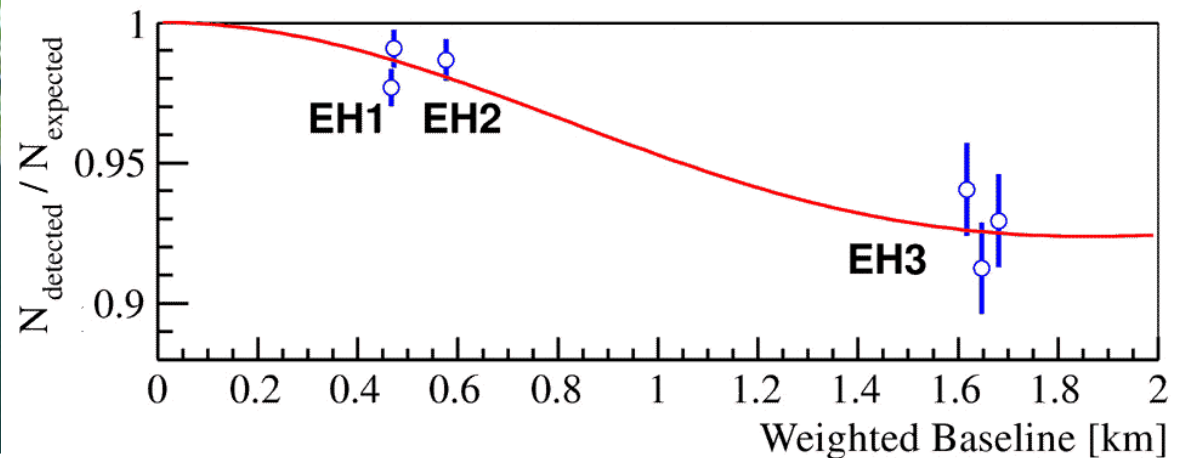


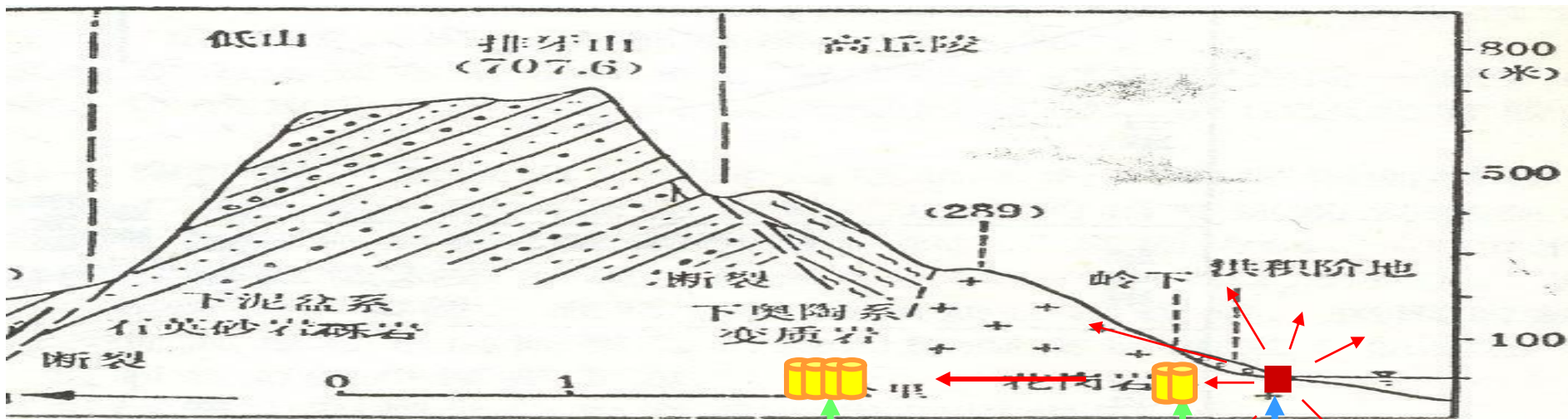
实验方案



为什么要近点？

θ_{13} 很小，需要精确测量。





远点

近点

反应堆



Control Room

Entrance

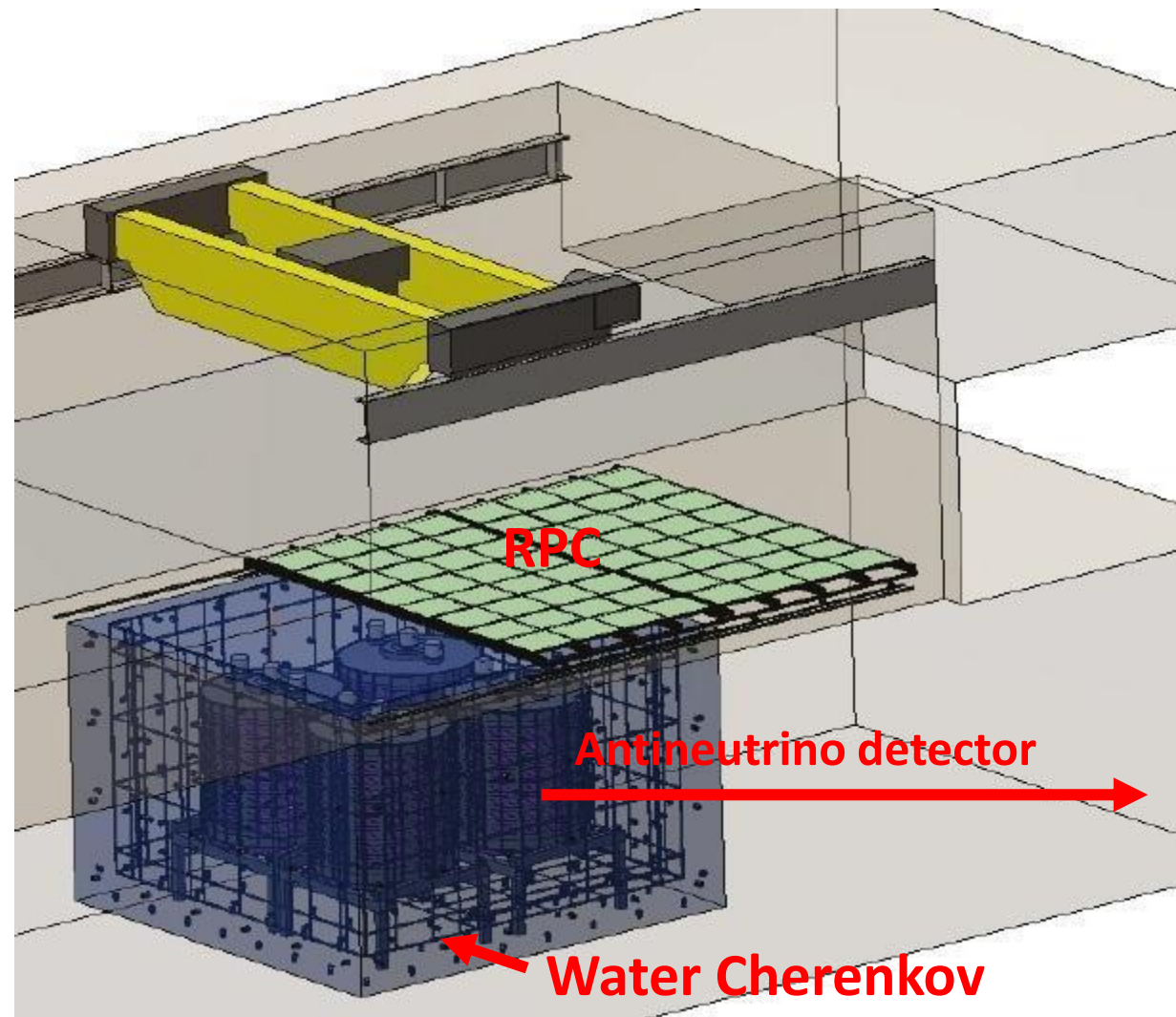
Surface Assembly Building (SAB)



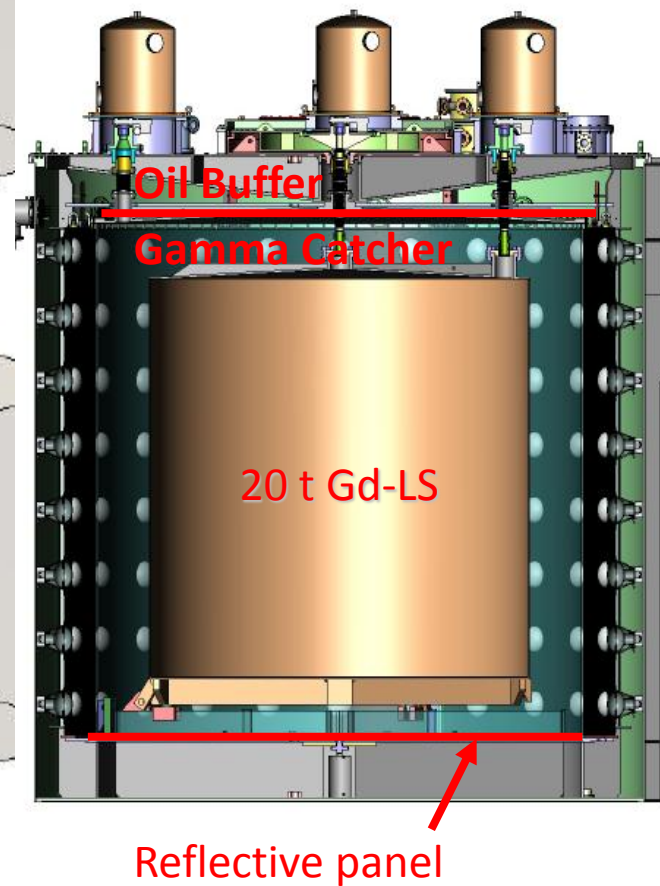
地下隧道，7米高7米宽，总长3000米



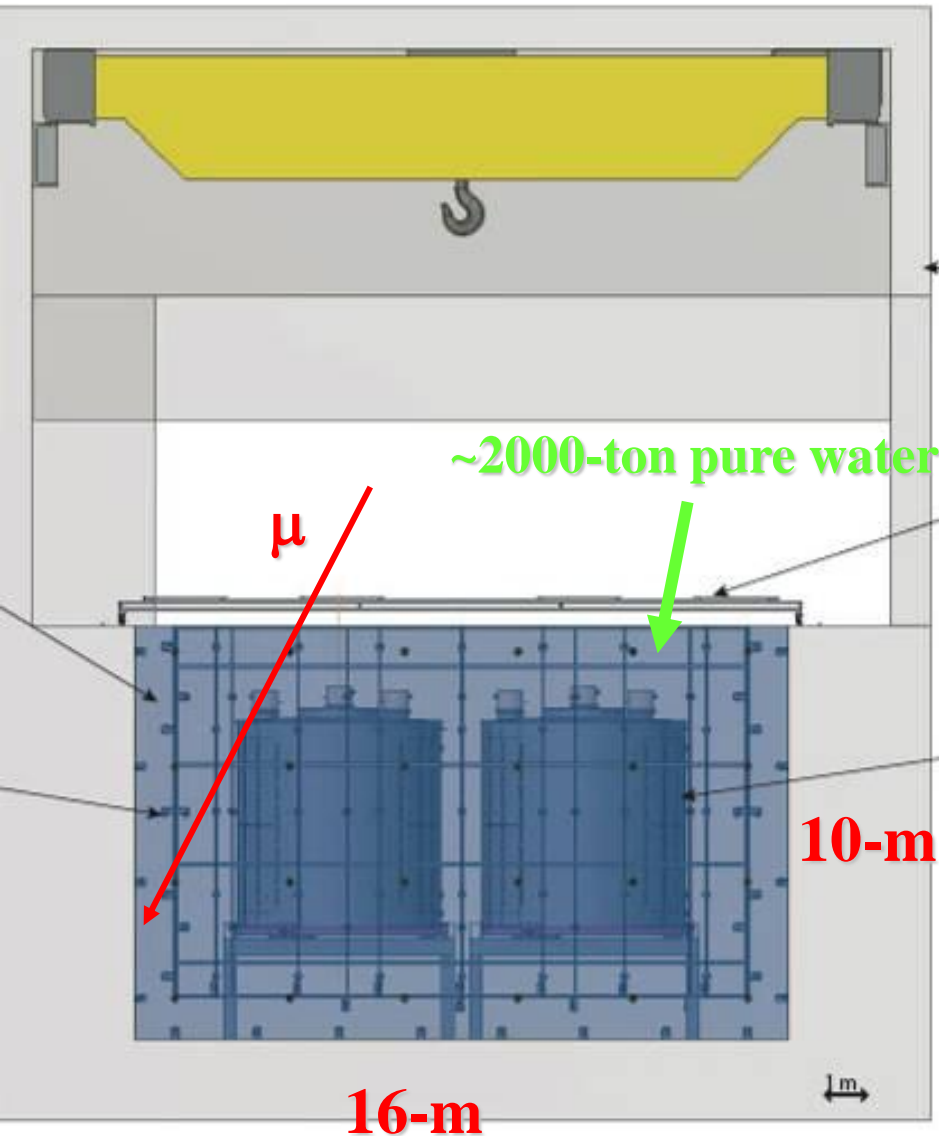
三种探测器



Water Pool: Cherenkov + shielding



宇宙线探测系统



◆ 2000吨纯净水

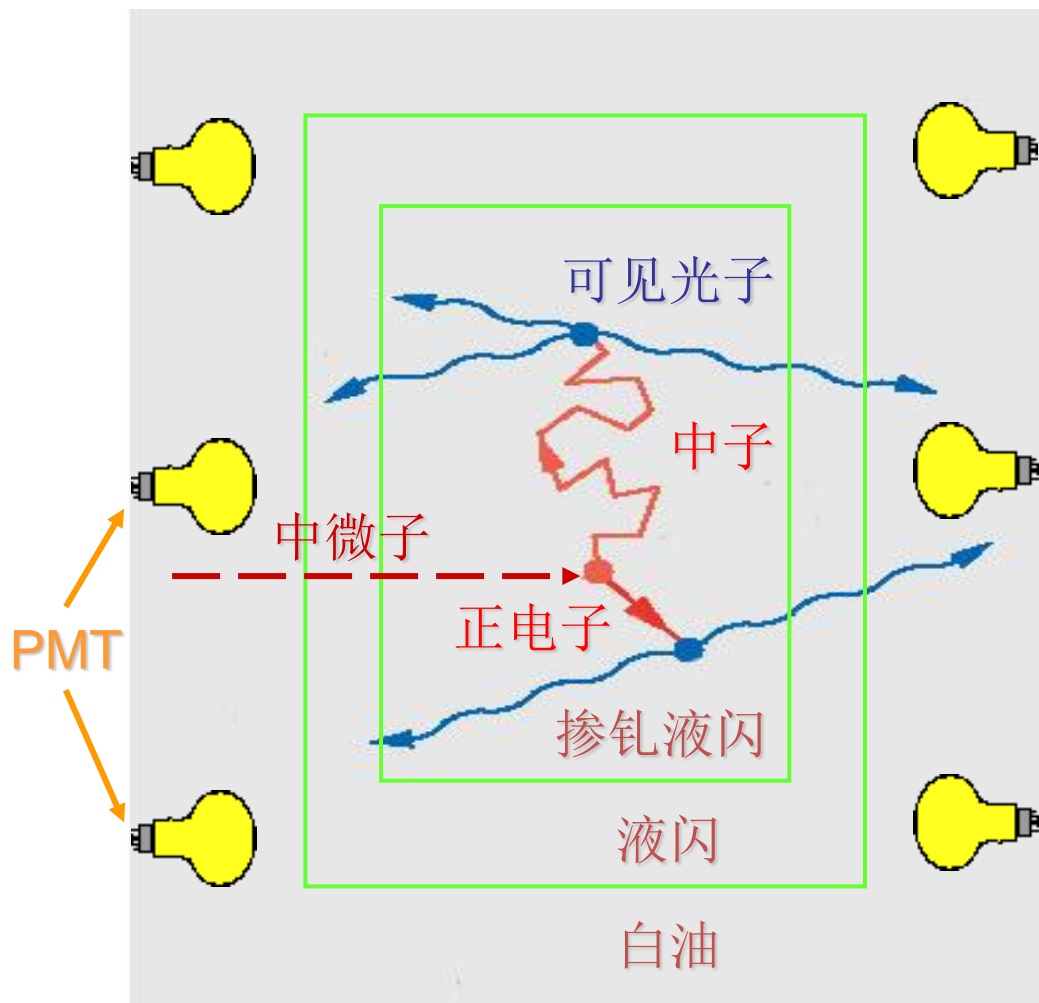
⇒ 阻挡天然放射性

⇒ 探测宇宙线

◆ 阻性板探测器

⇒ 探测宇宙线

怎样探测反应堆中微子



一快一慢两个信号

快：正电子

慢：中子（28 微秒）

中心探测器（每个110吨）

刻度系统

192个8"光电倍增管

矿物油 50cm厚

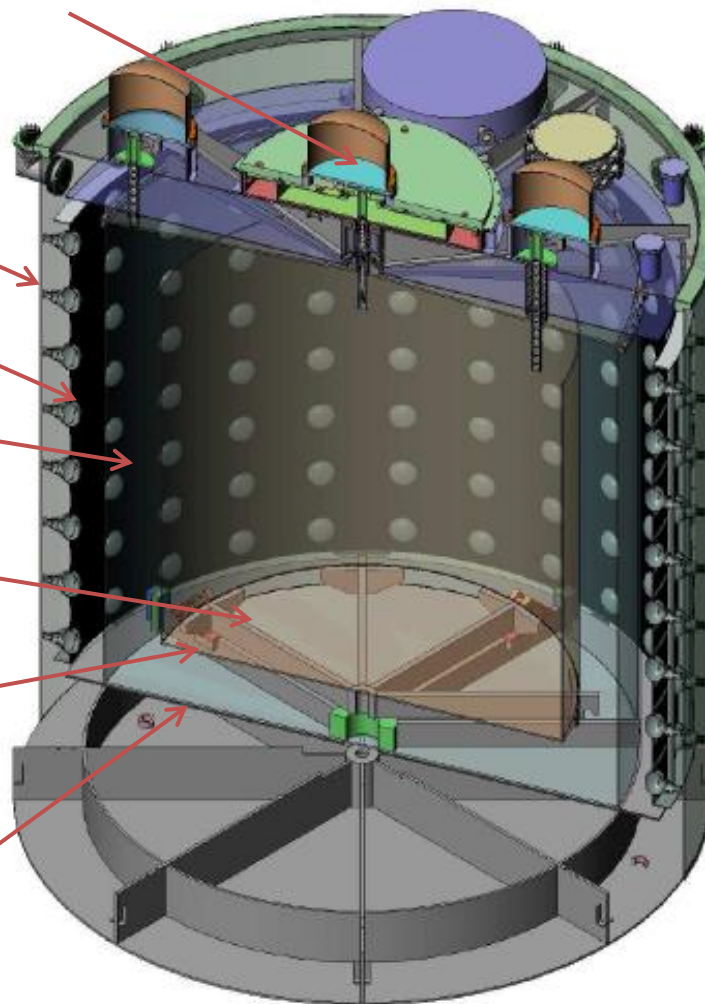
液体闪烁体 50cm厚

20吨掺钆液闪

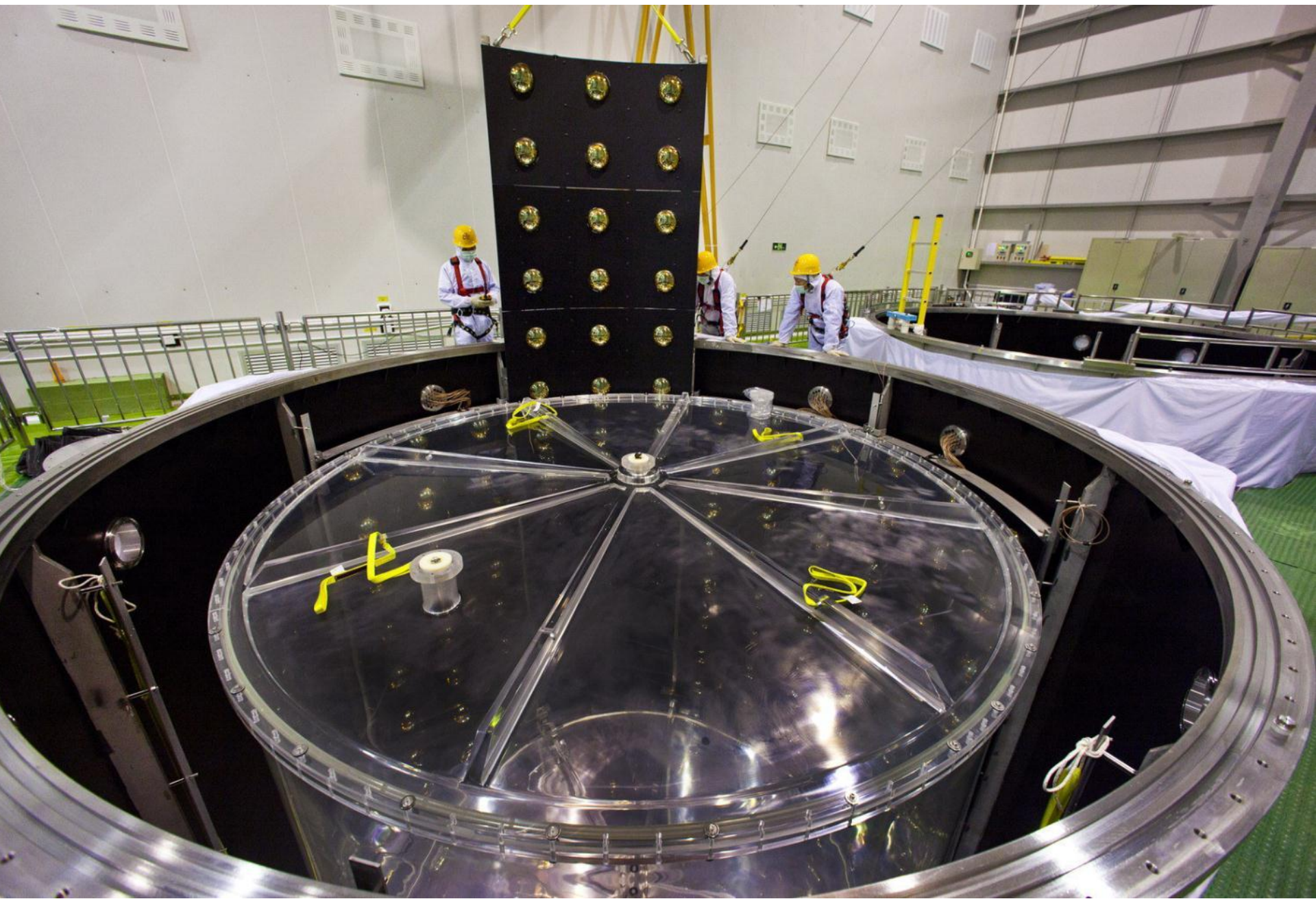
3.1米有机玻璃罐

4.0米有机玻璃罐

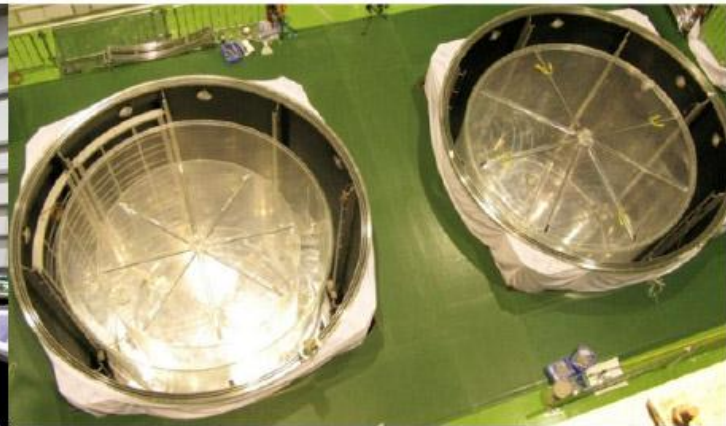
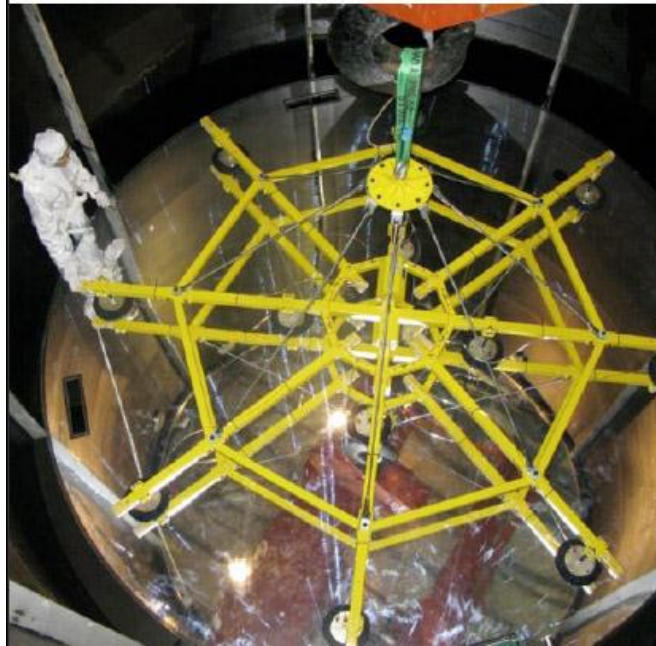
钢罐5米X5米



中心探测器装配



中心探测器装配



detector assembly in pairs
AD1-4 assembled and filled
AD5,6 assembly in progress

液閃大厅

Mineral Oil

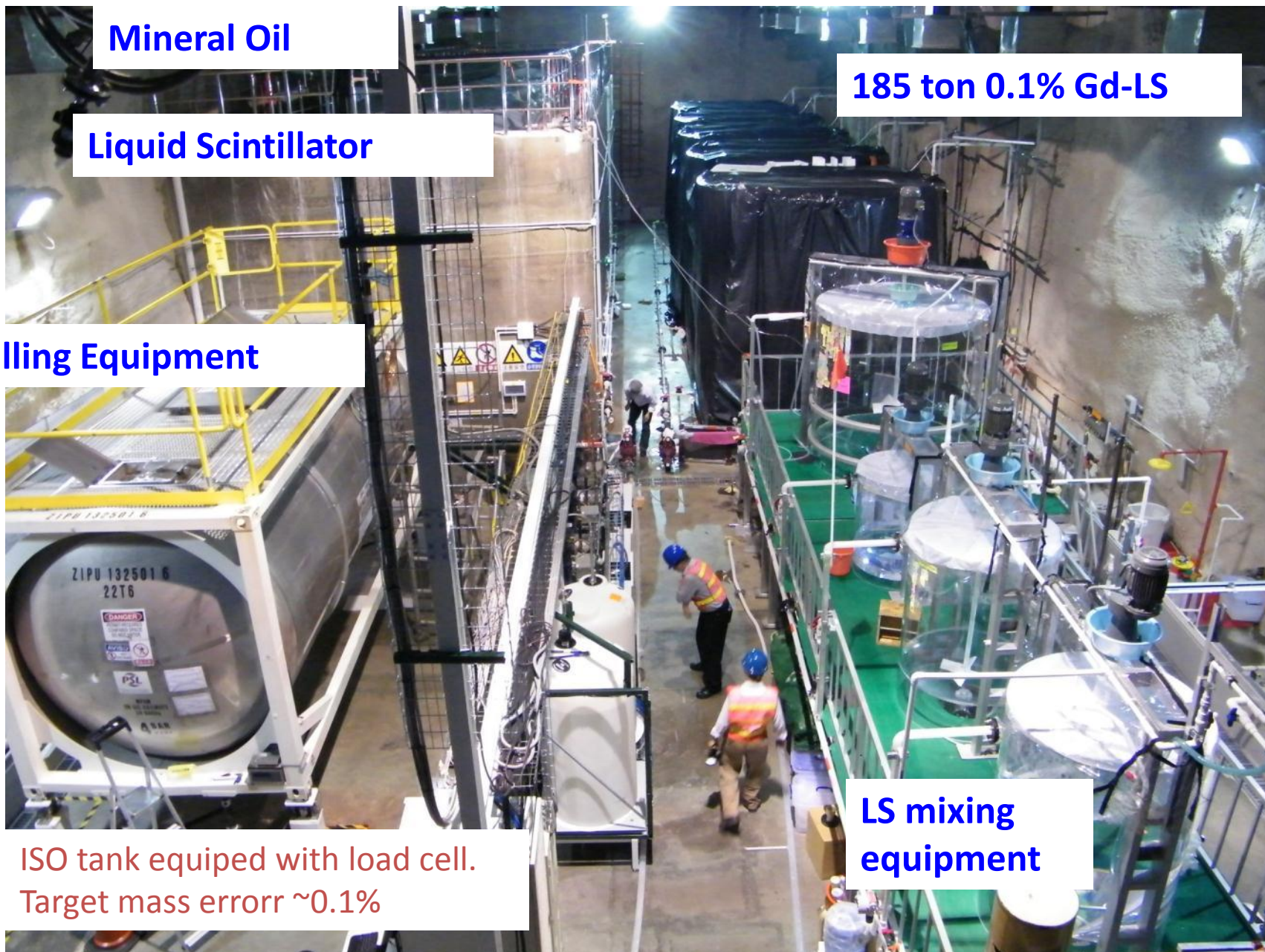
Liquid Scintillator

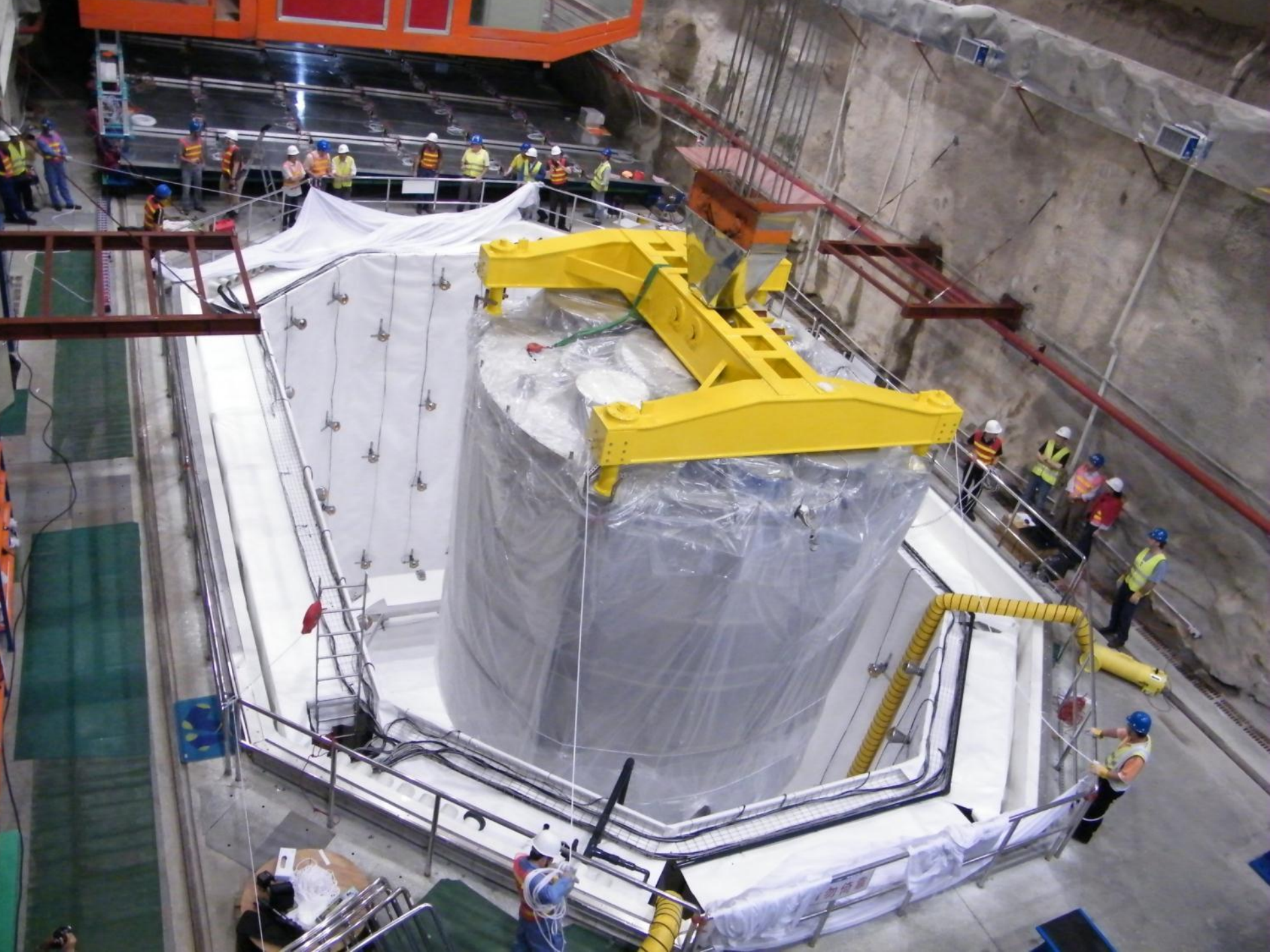
185 ton 0.1% Gd-LS

Filling Equipment

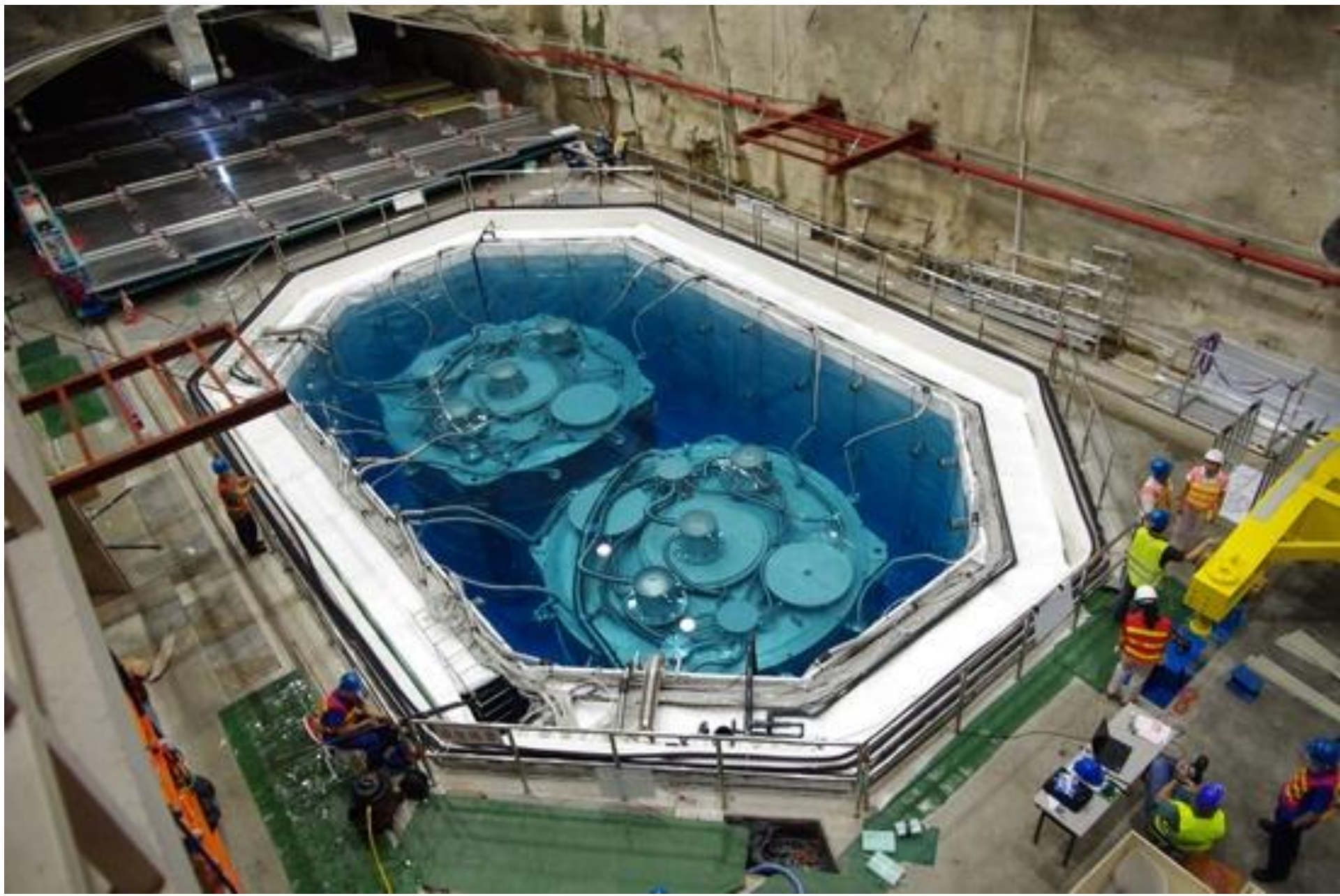
LS mixing
equipment

ISO tank equipped with load cell.
Target mass error $\sim 0.1\%$

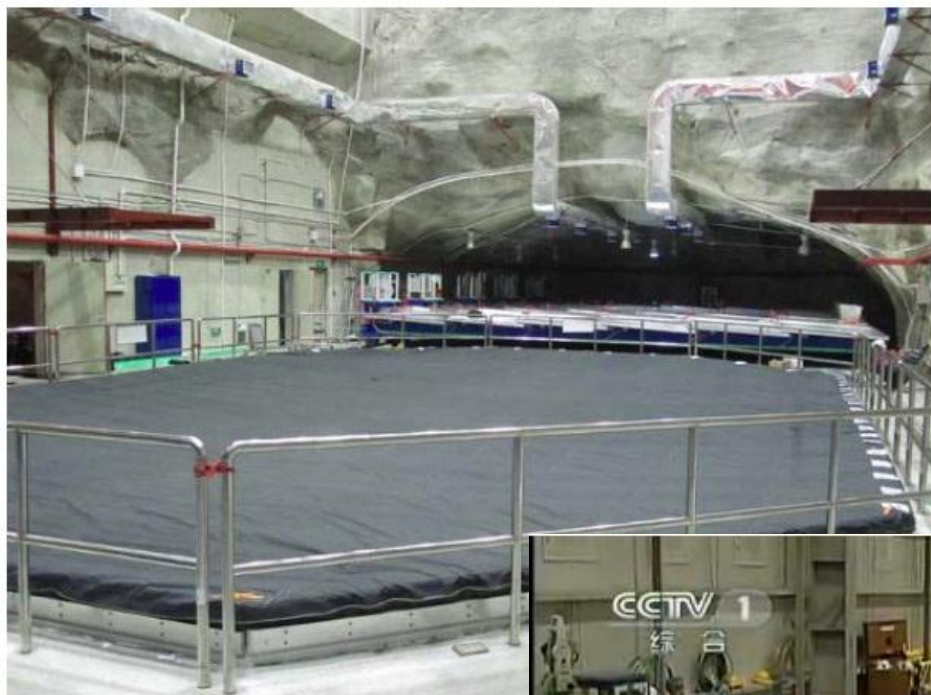




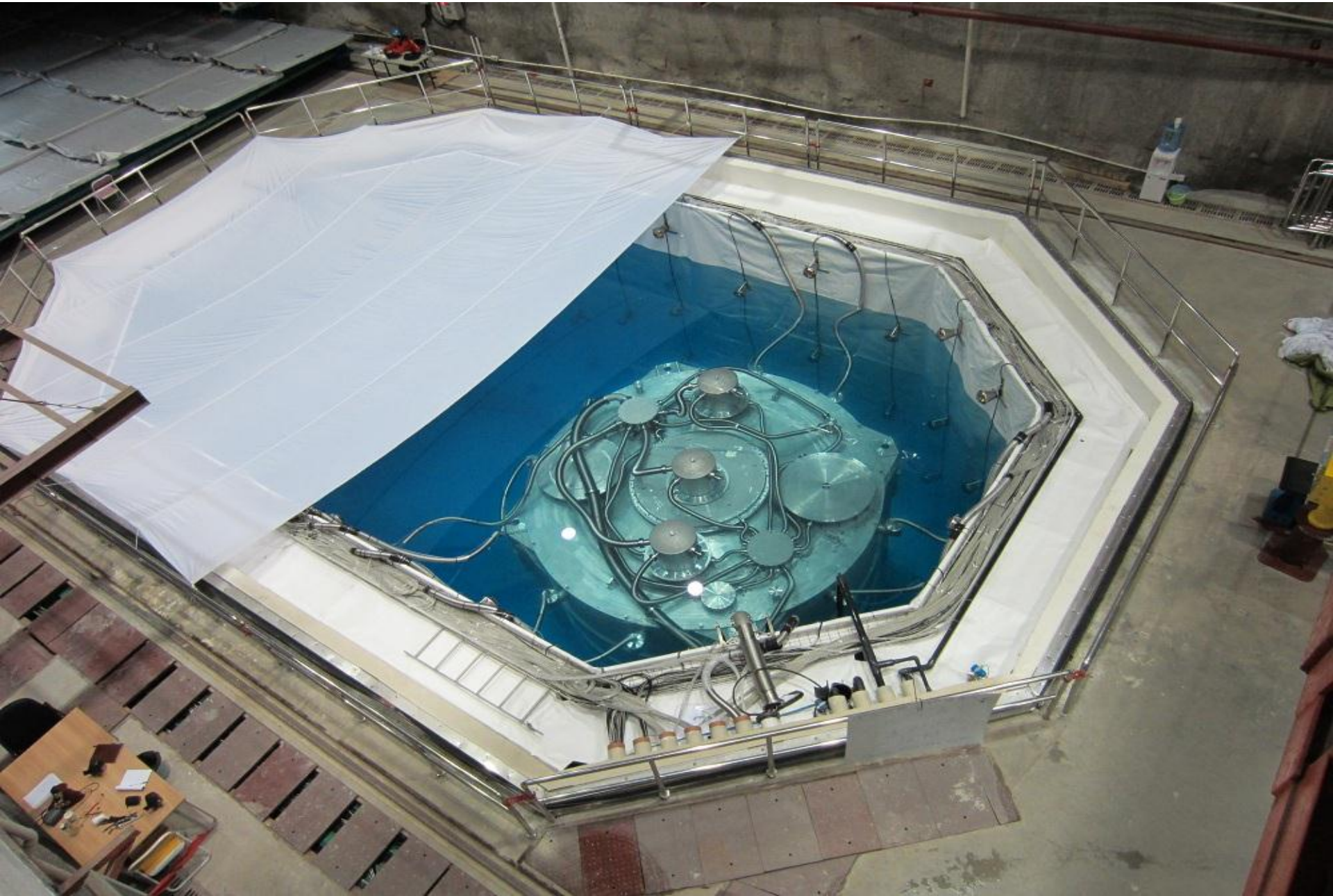
大亚湾近点探测器



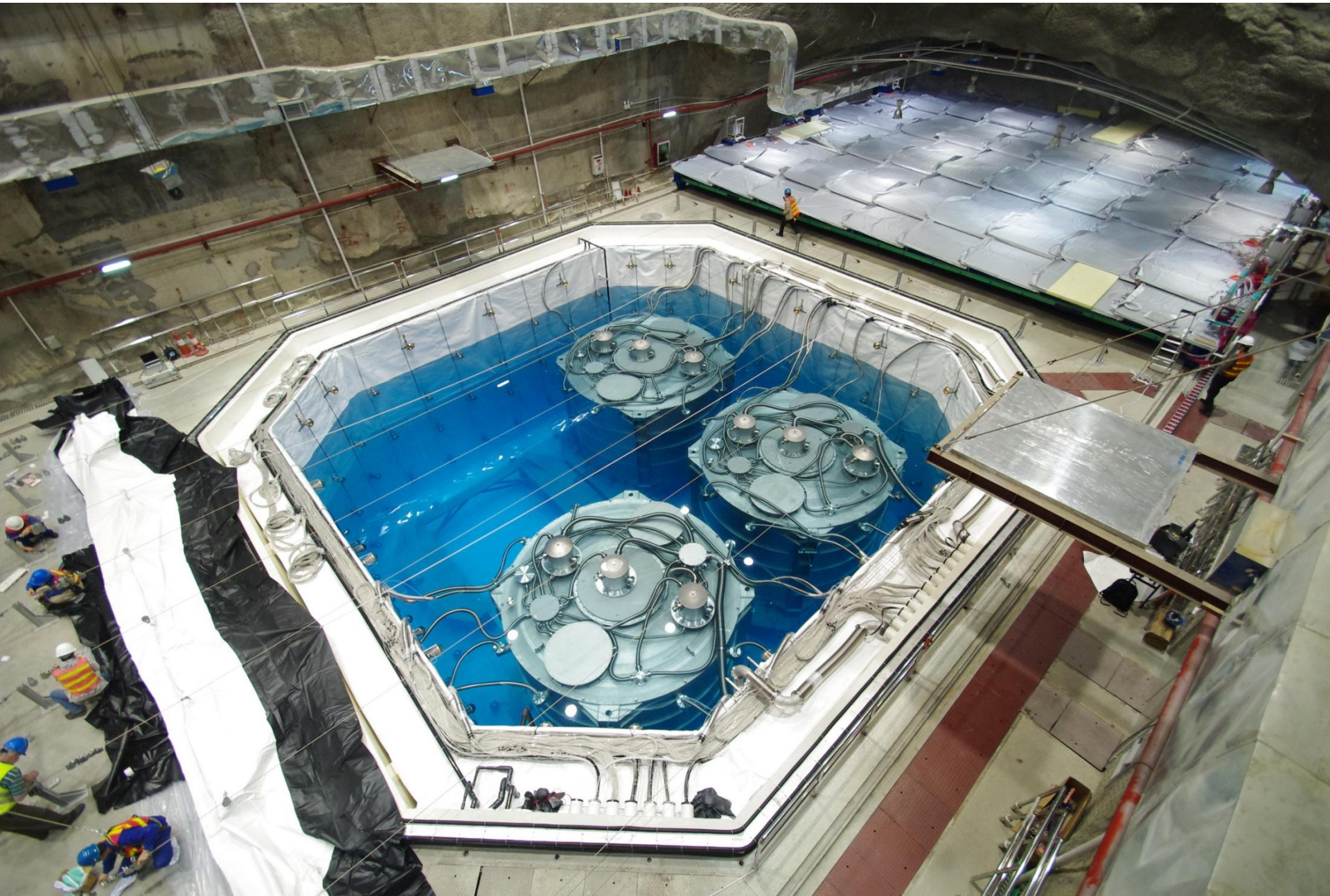
大亚湾近点取数：2011.8.15



岭澳近点：2011.11.5



远点：2011.12.24



2012.3.8

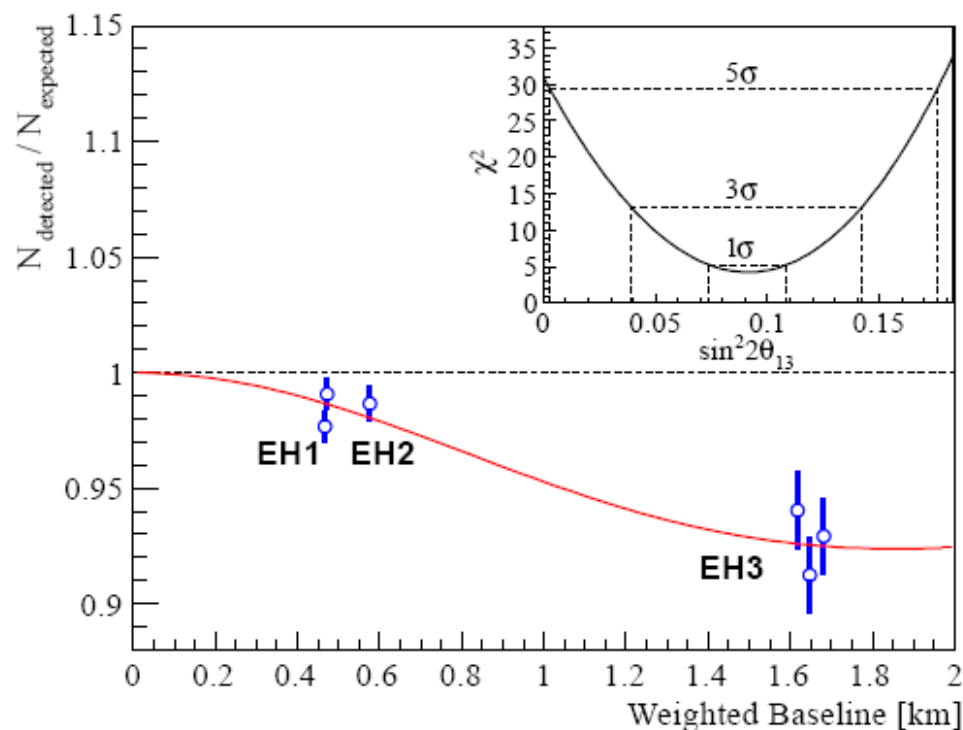
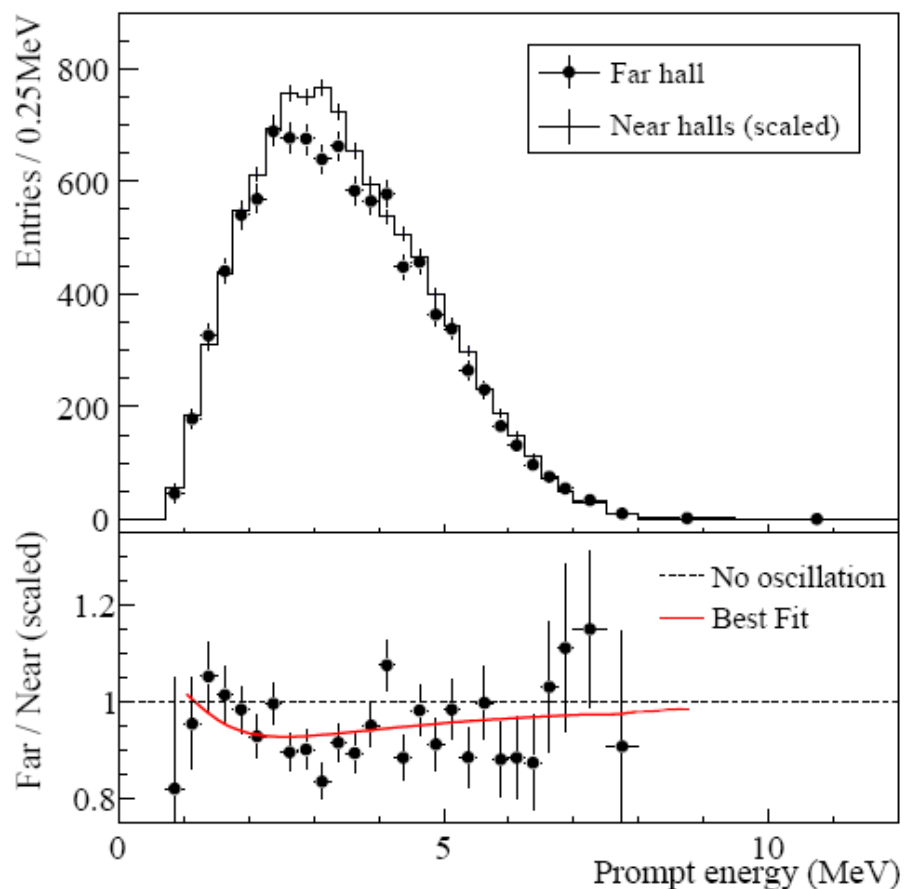


朝闻天下 **新中微子振荡被发现 意义重大**

06:32 雨转冻雨 0~2℃ • 昆明 晴 8~20℃ • 太原 阵雪转



首次发现第三种振荡



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

和生兄、贻芳兄：

最热忱的恭贺！

在你们领导下，很精确地
测量了 θ_{13} ，这是
粒子物理中极基本、极重要
的参数！

李政道

二〇一二年三月八日

We are excited about the promising future prospect of the neutrino oscillation experiments. With this large θ_{13} , perhaps if nature is continually kind to us, both the matter hierarchy and CPV phase can be discovered in our lifetime!

**Takashi Kobayashi and
Chang Kee Jung**
T2K Spokespersons

出人意料的结果

- ◆ 2003年美国物理学将 θ_{13} 的测量列为中微子振荡研究的第一优先。为了这个数字，全世界中微子物理学家已经等了9年。
- ◆ 没有人预料到大亚湾实验会这么快这么好地公布结果。大亚湾实验探测器精度达到了国际少见的0.2%。
- ◆ θ_{13} 出人意料的大。在2003年的时候，大家普遍认为 $\sin^2 2\theta_{13}$ 可能会在0.01-0.03之间，因此大亚湾实验将设计精度定为0.01，结果几乎比预期大了10倍。而一个大的 θ_{13} 对中微子的中微子研究下一步发展是一个大好消息，所有人都为此感到兴奋。

中微子未解之谜

◆ 中微子振荡实验

⇒ 中微子混合角 θ_{13} 是否非零？（！）

⇒ 中微子是否有 **CP** 破坏？

⇒ 中微子质量等级？

◆ 中微子的质量大小？质量如何起源？

◆ 中微子是否是自己的反粒子？ $0\nu\beta\beta$

◆ 是否存在惰性中微子（或第4代中微子）？

◆ 中微子是否有反常磁矩和反常相互作用？

◆ 能否探测到宇宙大爆炸中微子？

◆