



大亚湾实验介绍和 物理灵敏度

占亮

中国科学院高能物理研究所

2010-04-19

主要内容

- 大亚湾实验简介
 - 中微子振荡参数测量
 - 实验目的和意义
 - 实验总体设计方案
 - 探测器的设计

- 大亚湾物理灵敏度
 - 灵敏度的计算
 - 实验的误差来源

- 大亚湾实验的竞争

中微子振荡参数测量

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

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{23} & S_{23} \\ 0 & -S_{23} & C_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{13} & 0 & \hat{S}_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\hat{S}_{13} & 0 & C_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{12} & S_{12} & 0 \\ -S_{12} & C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} \\ e^{i\phi_2} \\ 1 \end{pmatrix} \rightarrow \text{三代中微子混合角}$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left[1.27 \Delta m_{ij}^2 \left(\frac{L}{E} \right) \right] + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left[2.54 \Delta m_{ij}^2 \left(\frac{L}{E} \right) \right] \rightarrow \text{中微子振荡几率}$$

混合参数	最佳拟合值	1σ 范围	2σ 范围	3σ 范围
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	7.65	7.45-7.88	7.25-8.11	7.05-8.34
$ \Delta m_{32}^2 [10^{-3} \text{eV}^2]$	2.40	2.29-2.52	2.18-2.64	2.07-2.75
$\sin^2 \theta_{12}$	0.304	0.288-0.326	0.27-0.35	0.25-0.37
$\sin^2 \theta_{23}$	0.50	0.44-0.57	0.39-0.63	0.36-0.67
$\sin^2 \theta_{13}$	0.01	≤ 0.026	≤ 0.040	≤ 0.056

中微子振荡参数测量基本问题

1. 测量 θ_{13} ，决定其是否非零
2. 测量中微子的质量等级
3. 测量CP相角
4. 精确测量中微子参数

表 1.1: 2008 年的中微子混合参数全局拟合的结果

θ_{13} 测量实验

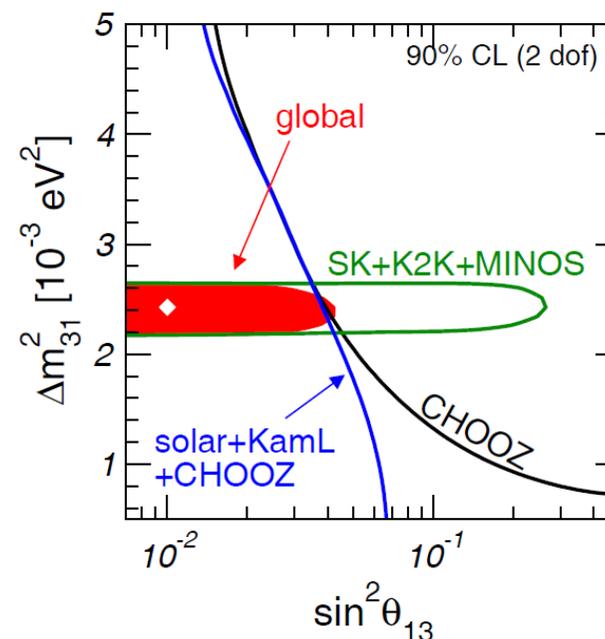
- 短基线反应堆实验 (DayaBay, Double-CHOOZ, RENO)
 - 造价低, 干扰因素小。

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \simeq 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(1.27\Delta m_{32}^2 L/E)$$

- 加速器中微子实验 (NoVA实验, T2K实验)
 - 加速器中微子实验可以测量多个振荡参数
 - 干扰因素多, 受到物质效应, CP相角和质量等级的干扰

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31} \\
 & + 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21} \\
 & - 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \sin \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21} \\
 & + 4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos \delta) \sin^2 \Delta_{21} \\
 & - 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 (1 - 2S_{13}^2) \frac{aL}{4E_\nu} \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31}, \quad (1.3)
 \end{aligned}$$

参数空间
 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.17$

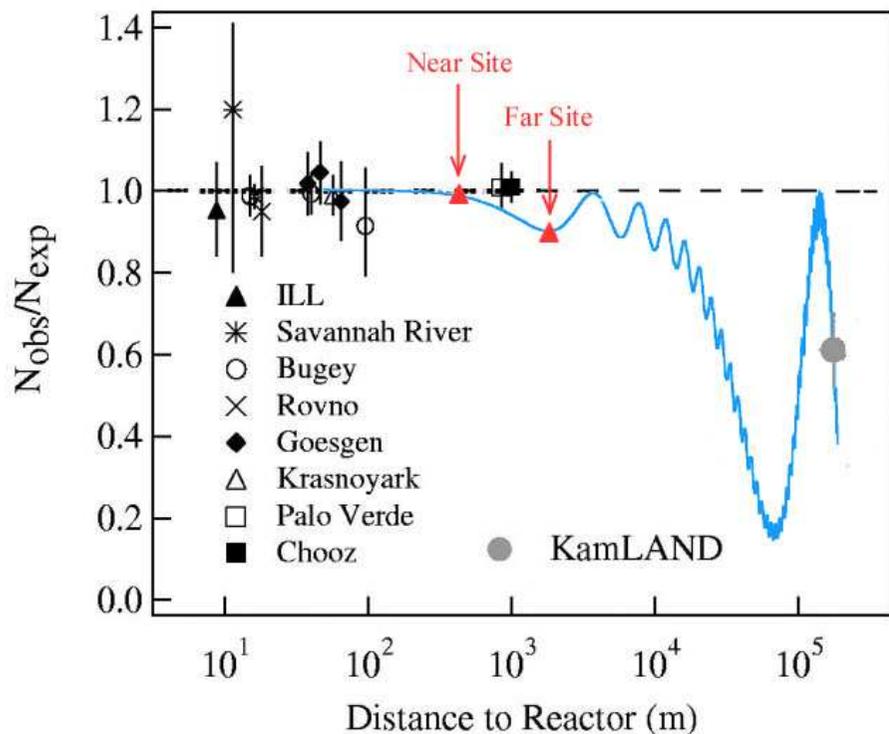


大亚湾实验目的和意义

- 实验目的：精确测量 θ_{13} ，使 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度达到0.01。
- 实验意义
 - 精确测量中微子混合参数，需要考虑三代中微子的混合，需要对 θ_{13} 有一定了解。
 - 与以往结果相比，灵敏度提高一个量级以上，根据现有模型预言，有大于一半几率测量到非零的 θ_{13} 值。
 - CP相角和质量等级引起的物理效应，往往与 $\sin^2 2\theta_{13}$ 大小有直接关系，因此 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的值对未来测量CP相角和质量等级实验有重要指导意义。

以往的反应堆中微子实验

- 反应堆中微子振荡效应包括
 - 与太阳中微子振荡参数(θ_{12} Δm_{21}^2)有关的大振荡
 - 基线~60km为第一个振荡极大
 - 与 θ_{13} 有关的小振荡
 - 基线~2km为第一个振荡极大

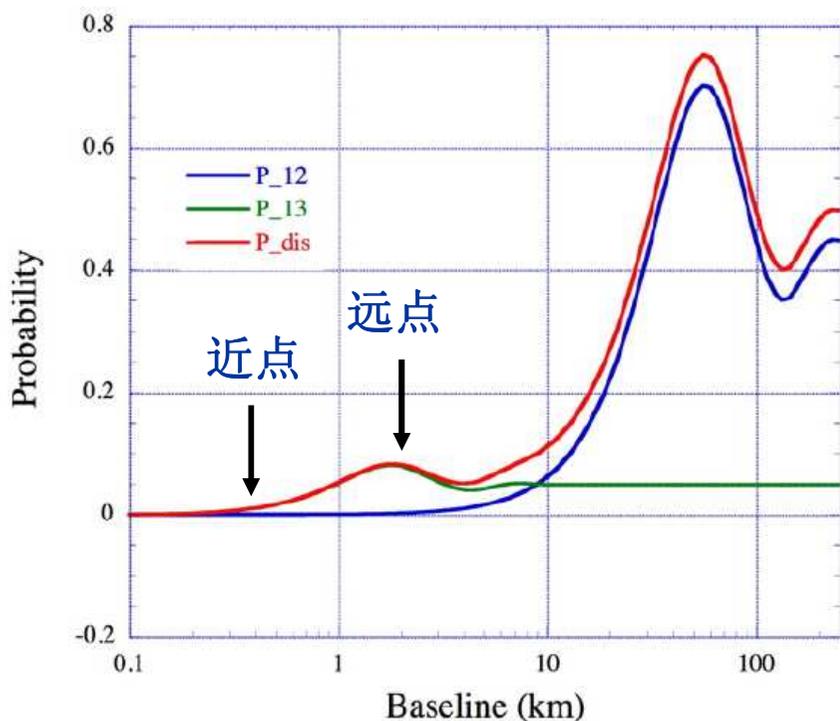


振荡存活几率公式

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(\Delta_{21}) - \cos^2(\theta_{12}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta_{31}) - \sin^2(\theta_{12}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta_{32})$$

大亚湾实验布局

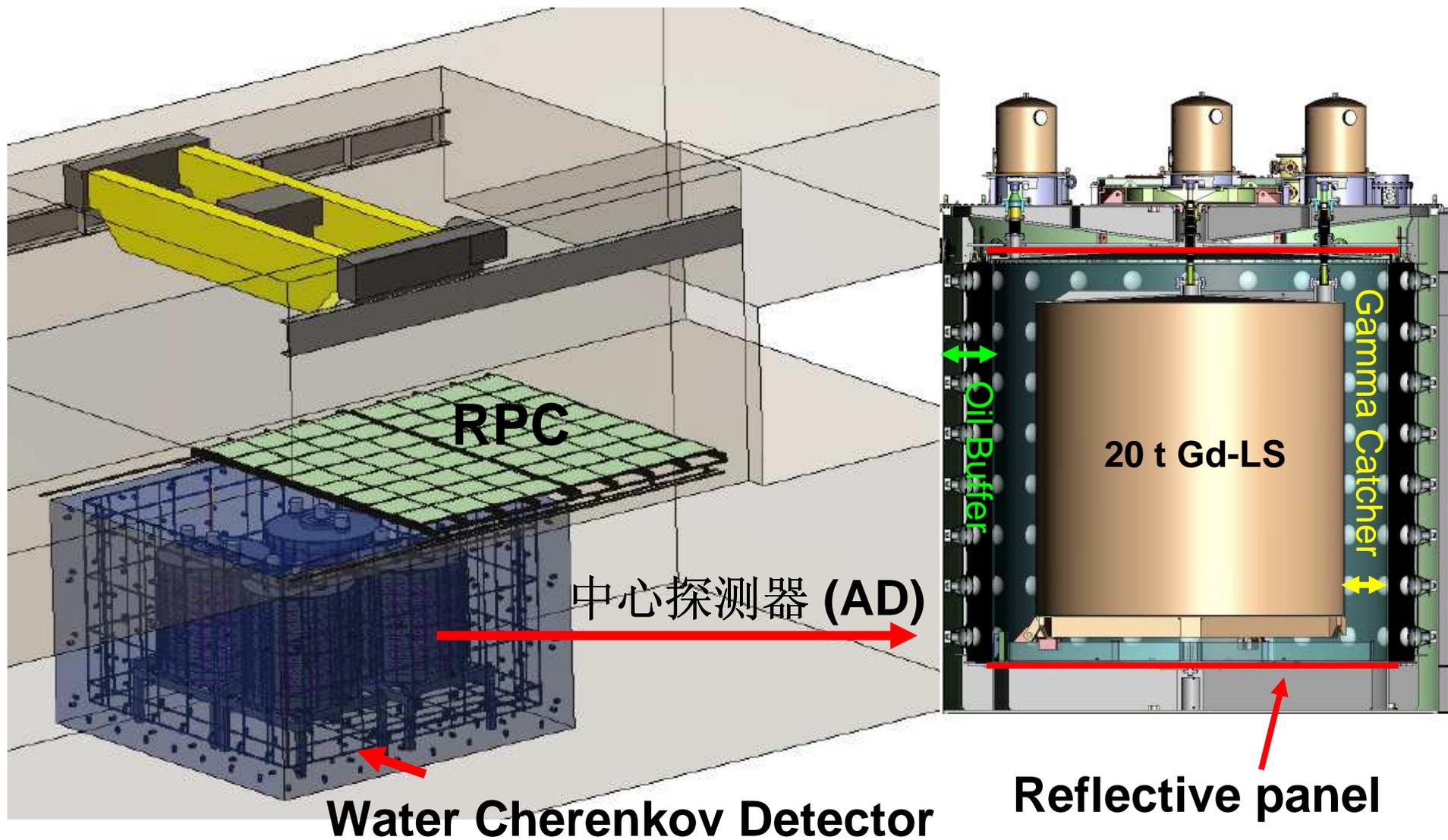
- 隧道总长度~3200m
- 反应堆功率17.4GW (2011以后, 6 cores)
- 三个试验厅
- 每个厅多个探测器模块
- 各自独立刻度



大亚湾实验总体设计

- 压低实验统计误差
 - 反应堆功率**17.4GW**，大亚湾将成为世界第二大反应堆群。
 - 远点4个探测器模块，靶质量共达**80吨**，三年实验时间。
- 压低实验系统误差
 - 实验厅选址兼顾基线优化和岩石覆盖，尽量使中微子振荡几率达到极大，同时压低宇宙线引起的本底。
 - 远近点都放置探测器，做相对测量，抵消了大部分来自于反应堆中微子流强的不确定性导致的误差。
 - 采用多个全同探测器模块，可以减小由于探测器差异导致的系统误差。有可能进行远近点探测器交换进一步减小系统误差。
 - 中心探测器采用三层结构，掺钆液闪-液闪-矿物油，矿物油屏蔽本底，液闪减少能量逃逸，提高探测效率。
 - 双重反符合探测器，RPC探测器和水池切伦科夫探测器相结合，对muon子探测效率能达99.5%以上，同时水池可以屏蔽大量中子本底。

大亚湾探测器设计



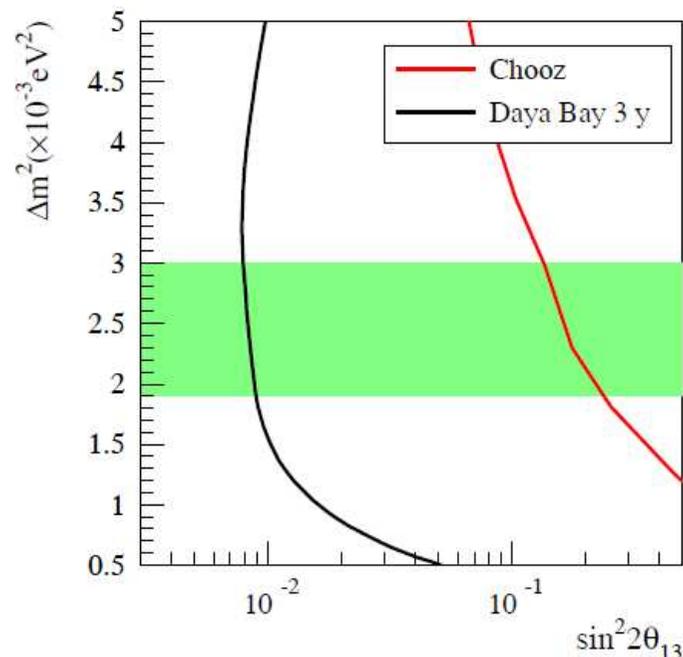
大亚湾灵敏度分析

$$\begin{aligned}
 \chi^2 = & \min_{\gamma} \sum_{d=1}^8 \sum_{i=1}^{N_{bin}} \frac{[M_i^d - T_i^d (1 + \alpha_R + \sum_r \omega_r^d \alpha_r + \beta_i + \epsilon_D + \epsilon^d) - \eta_{cal}^d \Delta T_i^d - \eta_f^d F_i^d - \eta_a^d A_i^d - \eta_h^d H_i^d]^2}{T_i^d + (\sigma_{b2b} T_i^d)^2} \\
 & + \frac{\alpha_R^2}{\sigma_R^2} + \sum_r \frac{\alpha_r^2}{\sigma_r^2} + \sum_{i=1}^{N_{bin}} \frac{\beta_i^2}{\sigma_{shp}^2} + \frac{\epsilon_D^2}{\sigma_D^2} + \sum_{d=1}^8 \left[\left(\frac{\epsilon^d}{\sigma_d} \right)^2 + \left(\frac{\eta_{cal}^d}{\sigma_{cal}^d} \right)^2 + \left(\frac{\eta_f^d}{\sigma_f^d} \right)^2 + \left(\frac{\eta_a^d}{\sigma_a^d} \right)^2 + \left(\frac{\eta_h^d}{\sigma_h^d} \right)^2 \right]. \quad (5.3)
 \end{aligned}$$

系统误差的pull项

➤ 输入条件

- 中微子测量能谱
- 中微子预测能谱
- 各项系统误差
- 本底能谱



实验误差的来源

- 测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 的灵敏度(90% C.L.)达到0.01, 需要 $\sin^2 2\theta_{13}$ 测量误差小于0.006, 中微子振荡幅度小于1%。
- 实验对统计误差和系统误差的要求非常严格

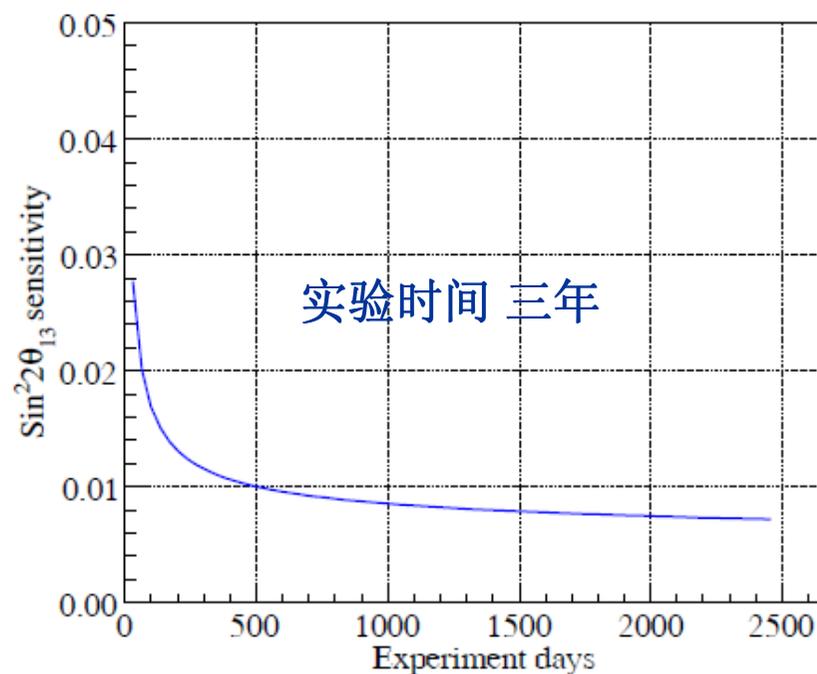
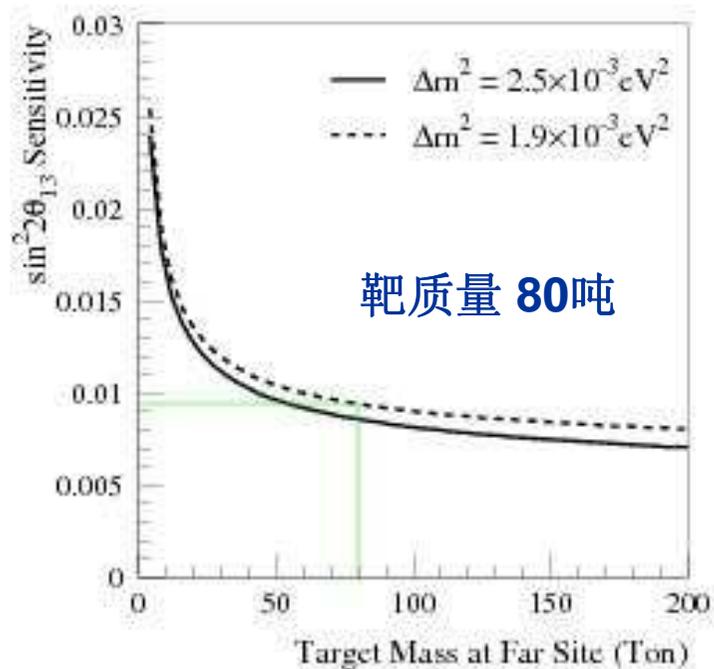
误差要求	近点	远点
统计误差	0.07%	≤0.24%
探测器相关误差	≤0.38%/模块	
反应堆相关误差	≤0.2%	
本底相关误差	0.3%	0.2%

统计误差

➤ 统计误差主要由远点探测器探测到的中微子事例数决定，依赖于：

- 反应堆功率
- 靶质量
- 实验活时间

	DYB site	LA site	Far site
Signal (events/day)	930	760	90
Radioactivity (Hz)	<50	<50	<50
Muon Rate (Hz)	36	22	1.2



探测器相关误差

- 各探测器模块几何‘全同’
- 靶物质液闪（**200吨GdLS**，**200吨LS**）由一个批次生产，液闪混制过程严格控制质量
- 低天然放射性本底，严格控制探测器材料放射性
- 能量标度误差 < 1%

Source of uncertainty		Chooz (<i>absolute</i>)	Daya Bay (<i>relative</i>)		
			Baseline	Goal	Goal w/Swapping
# protons		0.8	0.3	0.1	0.006
Detector Efficiency	Energy cuts	0.8	0.2	0.1	0.1
	Position cuts	0.32	0.0	0.0	0.0
	Time cuts	0.4	0.1	0.03	0.03
	H/Gd ratio	1.0	0.1	0.1	0.0
	n multiplicity	0.5	0.05	0.05	0.05
	Trigger	0	0.01	0.01	0.01
	Live time	0	<0.01	<0.01	<0.01
Total detector-related uncertainty		1.7%	0.38%	0.18%	0.12%

反应堆相关误差

- 以往实验计算反应堆中微子流强误差~2%。
- 采用远近点相对测量能抵消绝大部分反应堆误差。

$$\rho = \left[\alpha \sum_r \frac{\phi_r}{(L_r^{DB})^2} + \sum_r \frac{\phi_r}{(L_r^{LA})^2} \right] / \sum_r \frac{\phi_r}{(L_r^f)^2}$$

$$\phi_r' = (1 + \sigma_r + \sigma) \phi_r$$

- 反应堆关联误差 σ (~2%)，完全被抵消，反应堆关联误差 σ_r (~2%)，绝大部分被抵消。
- 理论上，对于N个反应堆，N+1个探测器可以完全抵消来自反应堆的误差。探测器放置于对于反应堆对称的位置也可以抵消误差。
- 大亚湾采用两个近点，一个远点抵消了绝大部分反应堆误差。

Number of cores	α	$\sigma_\rho(\text{power})$	$\sigma_\rho(\text{location})$	$\sigma_\rho(\text{total})$
4	0.338	0.035%	0.08%	0.087%
6	0.392	0.097%	0.08%	0.126%

实验本底

- 反符合探测器和足够的屏蔽层，大大排除了或压低了实验本底。
- 三类主要实验本底
 - 快中子本底：中子反冲和中子俘获信号
 - He8/Li9本底： β -n衰变信号
 - 偶然符合本底：放射性本底和中子本底偶然符合

	DYB site	LA site	Far site
Signal (events/day)	930	760	90
Fast n / signal	0.1%	0.1%	0.1%
${}^9\text{Li}$ - ${}^8\text{He}$ / signal	0.3%	0.2%	0.2%
Accidental/signal	<0.2%	<0.2%	<0.1%

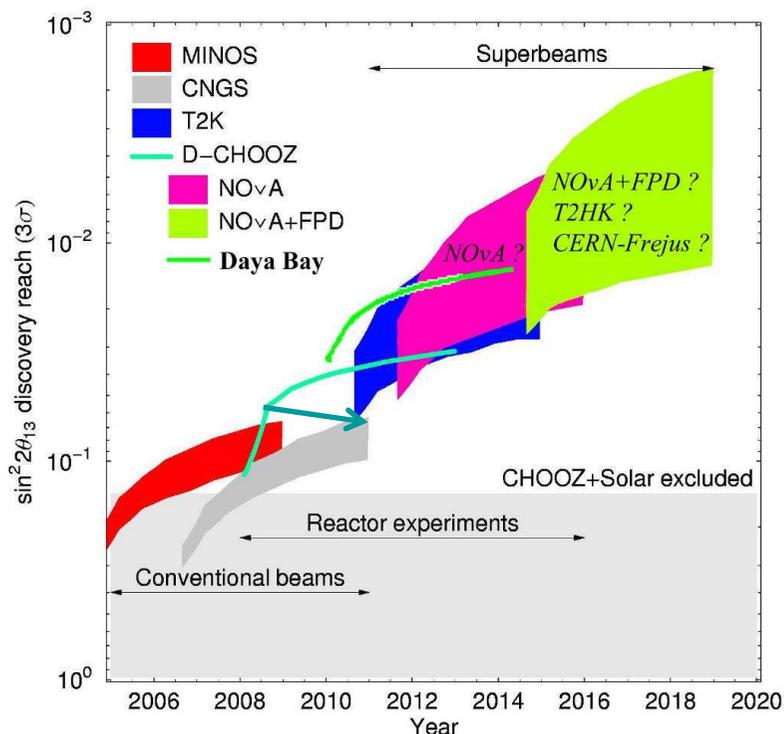
大亚湾实验面临的竞争

- 竞争来自长基线中微子实验（Nova, T2K）以及反应堆中微子实验 Double Chooz和RENO。
- 大亚湾实验灵敏度高于Double Chooz和RENO

	靶质量	反应堆功率	基线长度(m)	岩石覆盖 near/far (mwe)	灵敏度
Daya Bay	4x20吨	17.4GW	360/500/1750	270/950	<0.01
Double Chooz	8.3吨	8.5GW	280/1050	80/300	0.02~0.03
RENO	15吨	16.4GW	~250/1200	90/440	~0.02

大亚湾实验面临的竞争

➤ 假如各实验均能按计划达到预期目标:



- 如果 $\sin^2 2 \theta_{13} > 0.03$, Double Chooz或长基线率先测得 θ_{13} 非零, 大亚湾给出最精确的 θ_{13} 测量值 (精度提高3倍)。
- 如果 $\sin^2 2 \theta_{13} : 0.01-0.03$
 - 其它参数空间不利于长基线, 大亚湾率先测得非零 θ_{13}
 - 参数空间利于长基线实验, 有可能长基线实验率先确定 θ_{13} 非零 (但误差较大)。大亚湾给出误差较小的结果。
- 如果 $\sin^2 2 \theta_{13} < 0.01$, 均未测出 θ_{13} , 大亚湾给出上限, 现有技术无法测量CP相位和质量等级。

大亚湾实验与长基线实验互补: 利用大亚湾测量的精确 θ_{13} 值, 长基线实验可以对CP相角和质量等级的参数空间进行约束。

总结

- 中微子振荡现象已经被多个实验证实，中微子物理进入一个由发现振荡现象到精确测量振荡参数的时代， θ_{13} 的测量对未来的中微子实验有着重要意义。
- 大亚湾实验是一个高精度的中微子实验，物理目标是测量 $\sin^2 2\theta_{13}$ 灵敏度达到到0.01。
- 利用大亚湾实验条件，考虑到各项实验误差，通过三年实验时间，大亚湾物理灵敏度能够小于0.01。
- 大亚湾实验灵敏度优于其他反应堆实验，且测量结果对长基线实验有重要参考意义。