



# 大亚湾中微子实验发现电子反中微子消失 → 一种新的中微子振荡

王贻芳

中国科学院高能物理研究所

# 物质世界最基本的单元之一：中微子

- ◆ 中微子是构成物质世界的最基本单元之一：

$$\begin{pmatrix} e & \mu & \tau \\ \nu_e & \nu_\mu & \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u & c & t \\ d & s & b \end{pmatrix}$$

- ◆ 中微子质量极轻，不带电荷，与物质的相互作用十分微弱，极难探测 → 需要用体积庞大的探测器
- ◆ 宇宙中的中微子与光子一样多， $\sim 100/\text{cm}^3$ ，其质量因此对宇宙的形成与演化有重要影响
- 中微子与宇宙学关系密切：
  - 构成宇宙中的暗物质
  - 中微子振荡与宇宙中物质与反物质不对称有关
  - 中微子与大尺度宇宙结构的形成有关

**中微子是粒子物理，天体物理与宇宙学研究中的热点与交叉**

# 中微子振荡：检测中微子质量的方法

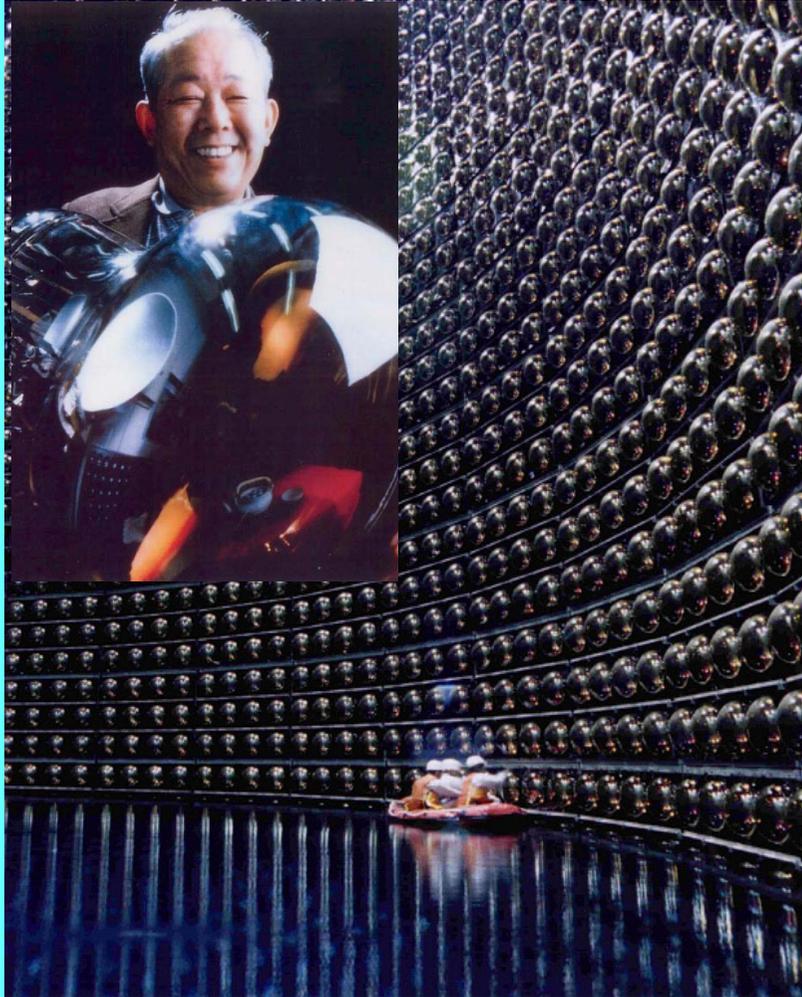
- 中微子如果质量不为零，就应该有振荡：即中微子在飞行中从一种中微子变为另一种中微子



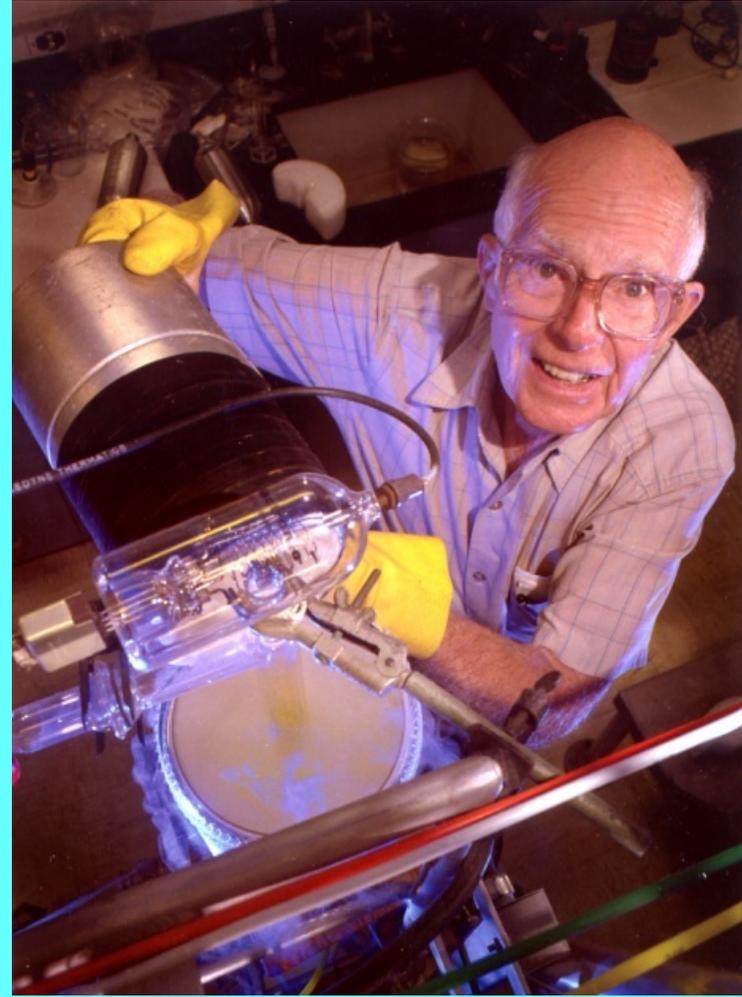
- 中微子振荡是中微子的基本性质，是粒子世界的一种基本规律
- 中微子振荡与宇宙学中的一些关键问题有关
  - 比如宇宙中物质-反物质不对称就可能与中微子振荡中的宇称及电荷反演破坏（CP破坏）有关
- 研究中微子振荡，可以探究宇宙形成与演化中的许多秘密。

中微子振荡是中微子研究中的中心问题

# 中微子振荡的发现：2002年诺贝尔奖

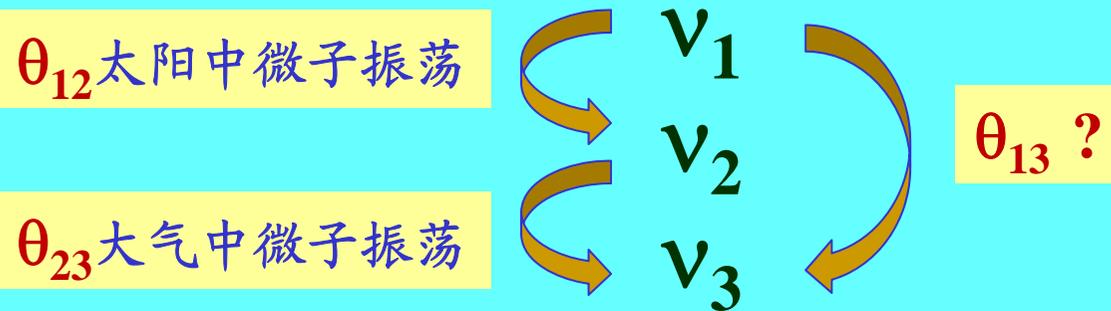


大气中微子振荡：小柴昌俊



太阳中微子振荡：R. Davis

# 大亚湾实验：寻找新的中微子振荡



- ◆ 第三种中微子振荡，用 $\theta_{13}$ 表示：
  - ◆ 基本的物理现象与规律
  - ◆ 基本的物理参数 $\theta_{13}$ ，其数值大小可以影响许多物理过程
  - ◆ 影响未来中微子物理研究的方向
    - ◆ 与宇宙中“反物质消失之谜”的研究有关
    - ◆ 如果 $\theta_{13}$ 太小，我们无法在可见的将来通过加速器实验来寻找CP破坏

# 过去的搜寻：一些迹象

- **Palo Verde & Chooz: 没有结果**

$$\begin{aligned} \sin^2 2\theta_{13} &< 0.12 \text{ @ } 90\% \text{C.L.} \\ &\text{if } \Delta M_{23}^2 = 0.0024 \text{ eV}^2 \end{aligned}$$

- **T2K: 2.5  $\sigma$**

$$\begin{aligned} 0.03 &< \sin^2 2\theta_{13} < 0.28 \text{ @ } 90\% \text{C.L. for NH} \\ 0.04 &< \sin^2 2\theta_{13} < 0.34 \text{ @ } 90\% \text{C.L. for IH} \end{aligned}$$

- **Minos: 1.7  $\sigma$**

$$\begin{aligned} 0 &< \sin^2 2\theta_{13} < 0.12 \text{ @ } 90\% \text{C.L. NH} \\ 0 &< \sin^2 2\theta_{13} < 0.19 \text{ @ } 90\% \text{C.L. IH} \end{aligned}$$

- **Double Chooz: 1.7  $\sigma$**

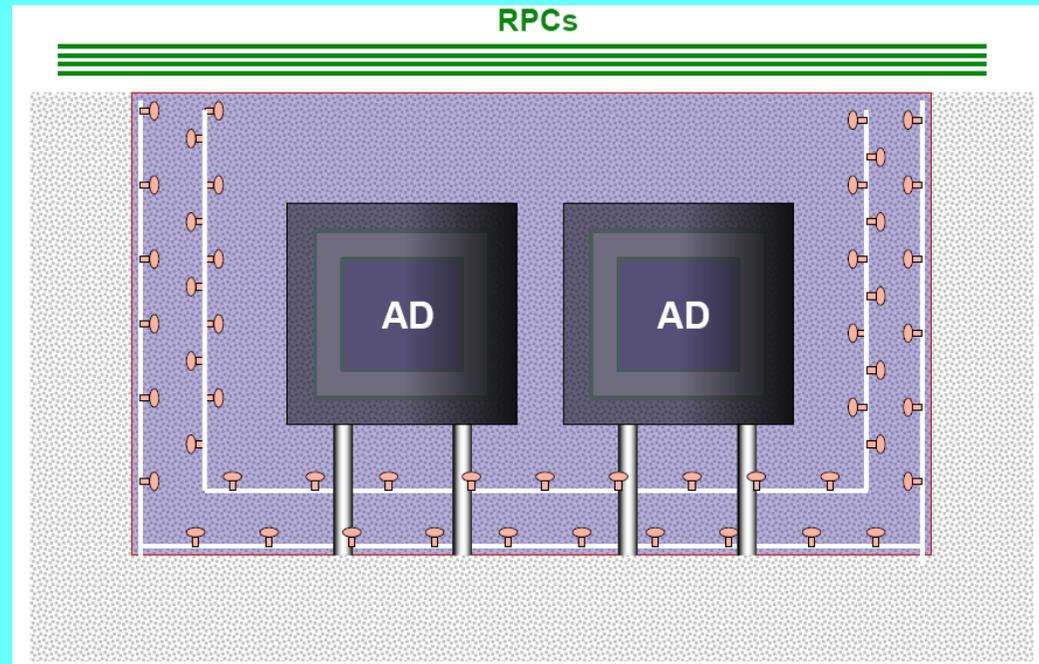
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.041(\text{stat}) \pm 0.030(\text{sys})$$

# 大亚湾反应堆中微子实验

- 用大亚湾反应堆测量  $\theta_{13}$  是我国粒子物理发展的一个重大机遇：
  - 功率高（世界第二）
  - 周围有山，便于建设地下实验室以屏蔽宇宙线本底
  - 造价较低，没有根本的技术困难
- 世界各国共有8个实验建议，三个正在进行中
- 难点：精度较过去提高一个量级
- 我们的突破：独特设计+环境优势 → 达到精度要求

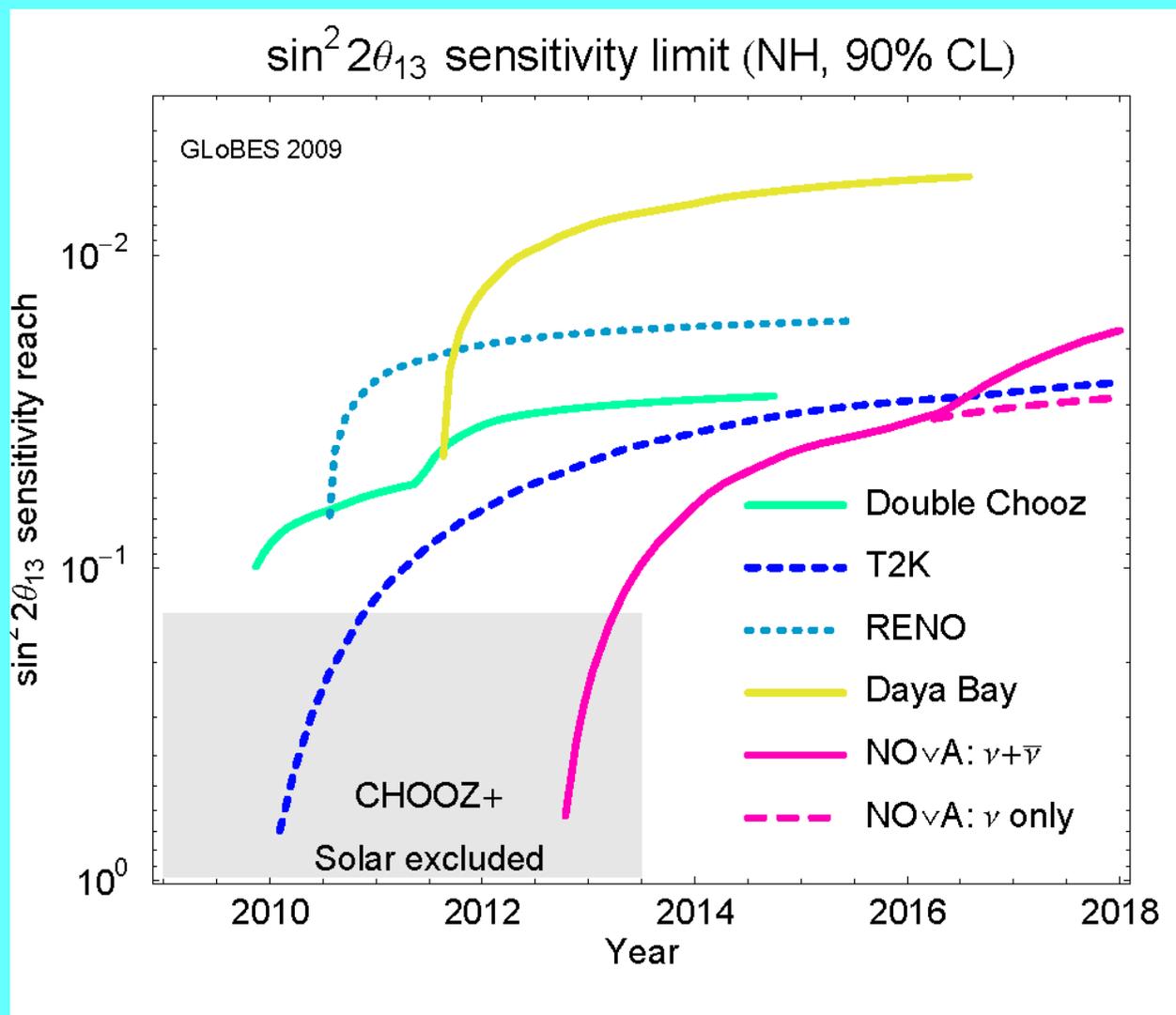


# 实验方案



- 通过远近点之间的相对测量提高精度
  - 2个近点+1个远点
- 同一点的多模块中微子测量以降低系统误差并相互校验
  - 近点：2个模块
  - 远点：4个模块
- 多重宇宙线反符合探测器提高效率，降低降低系统误差
  - 4层RPC + 2层水契仑柯夫探测器

# 国际竞争



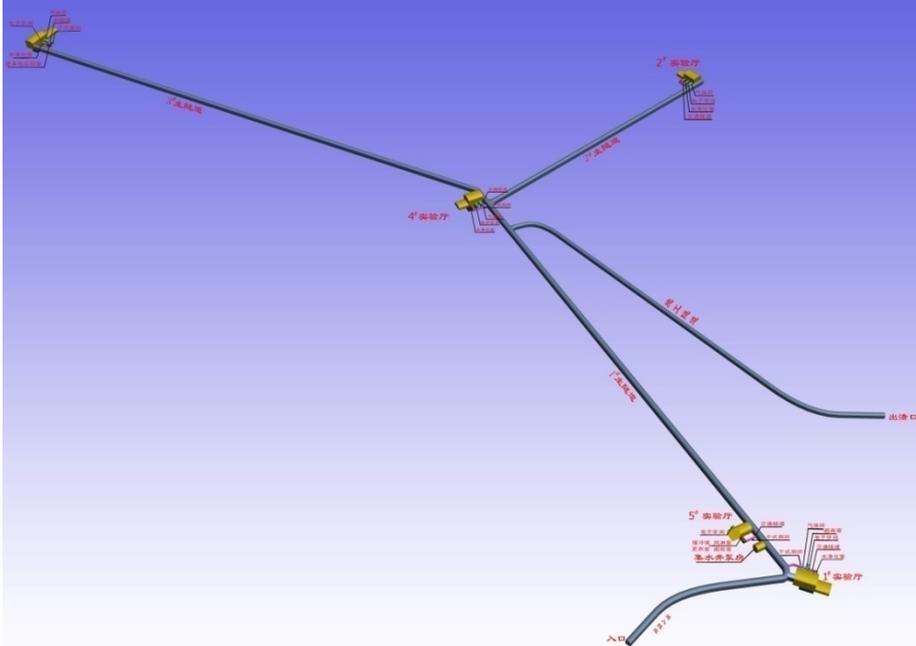


# 开工建设：2007年10月



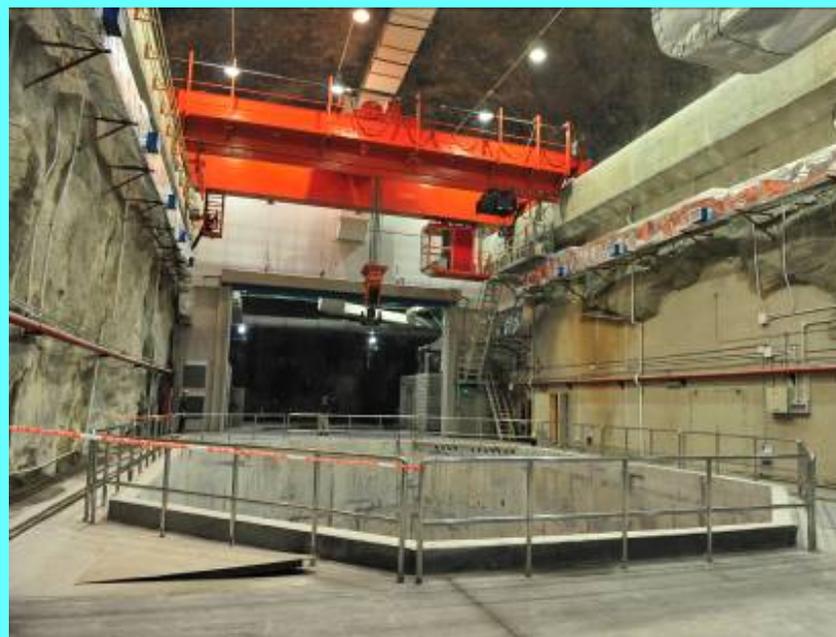
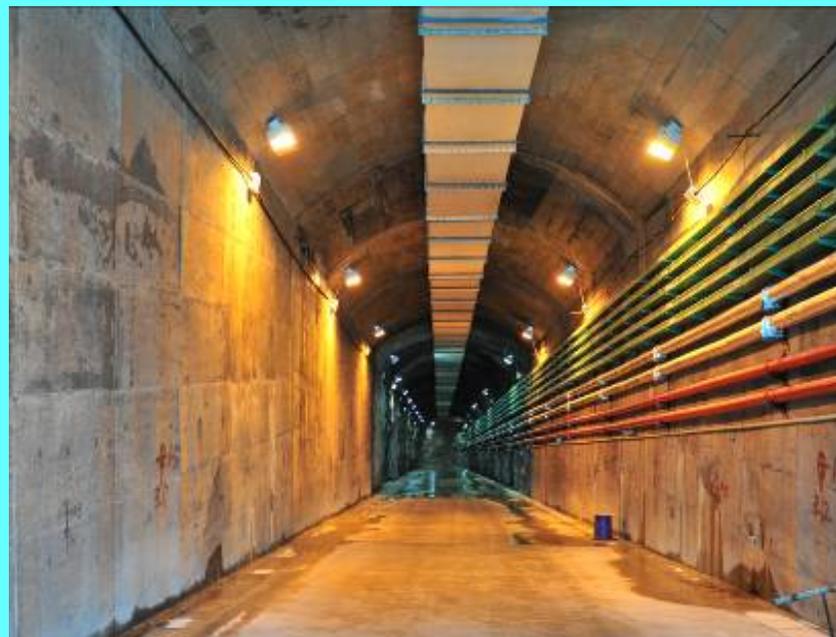
# 地下实验室

大亚湾反应堆中微子实验站隧道  
及实验厅洞室布置示意图

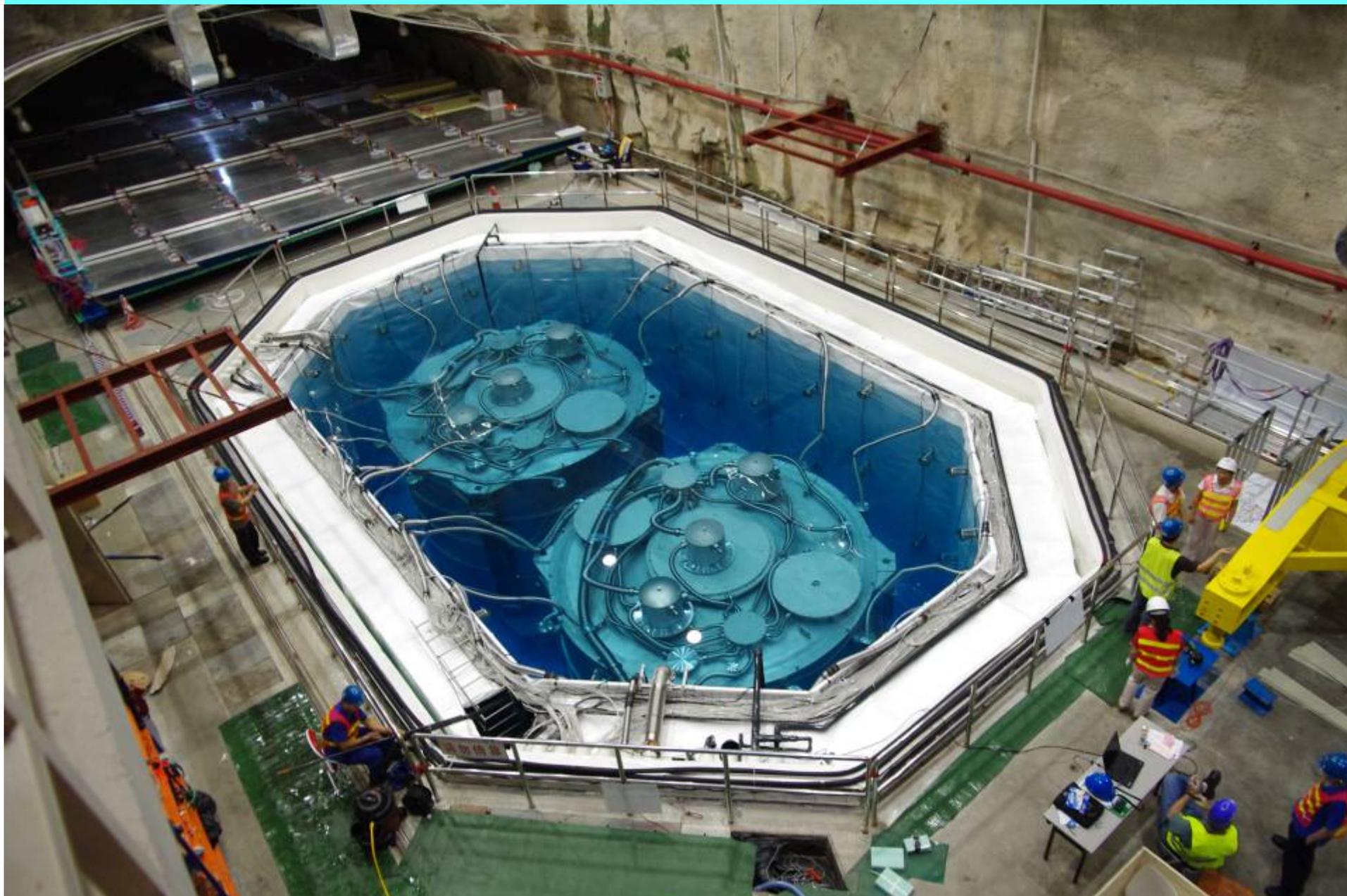


黄河勘测规划设计有限公司

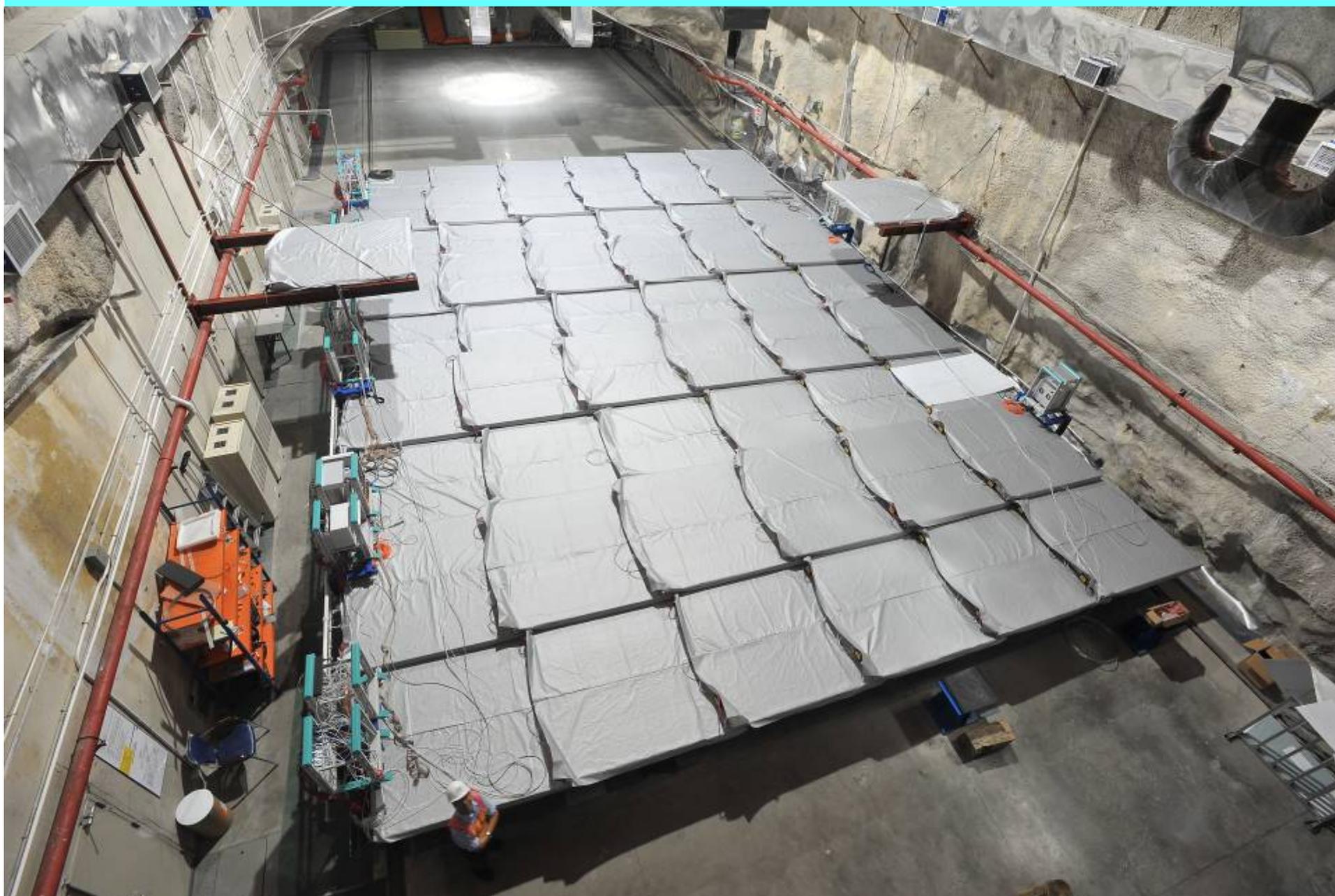
- 3000 米隧道
- 3个实验大厅
- 1个安装大厅
- 一个水处理厅



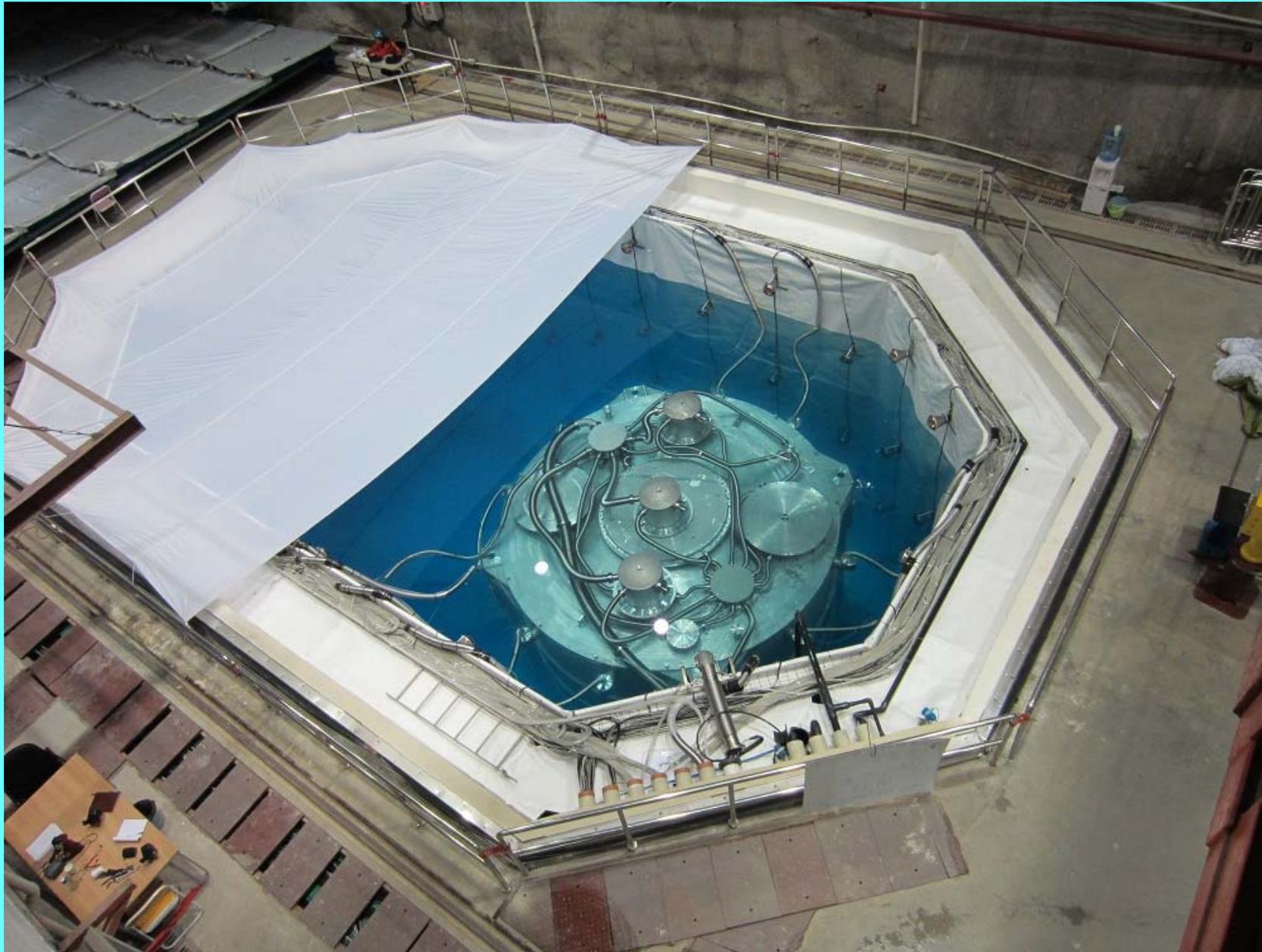
# 中微子探测器安装在水池中



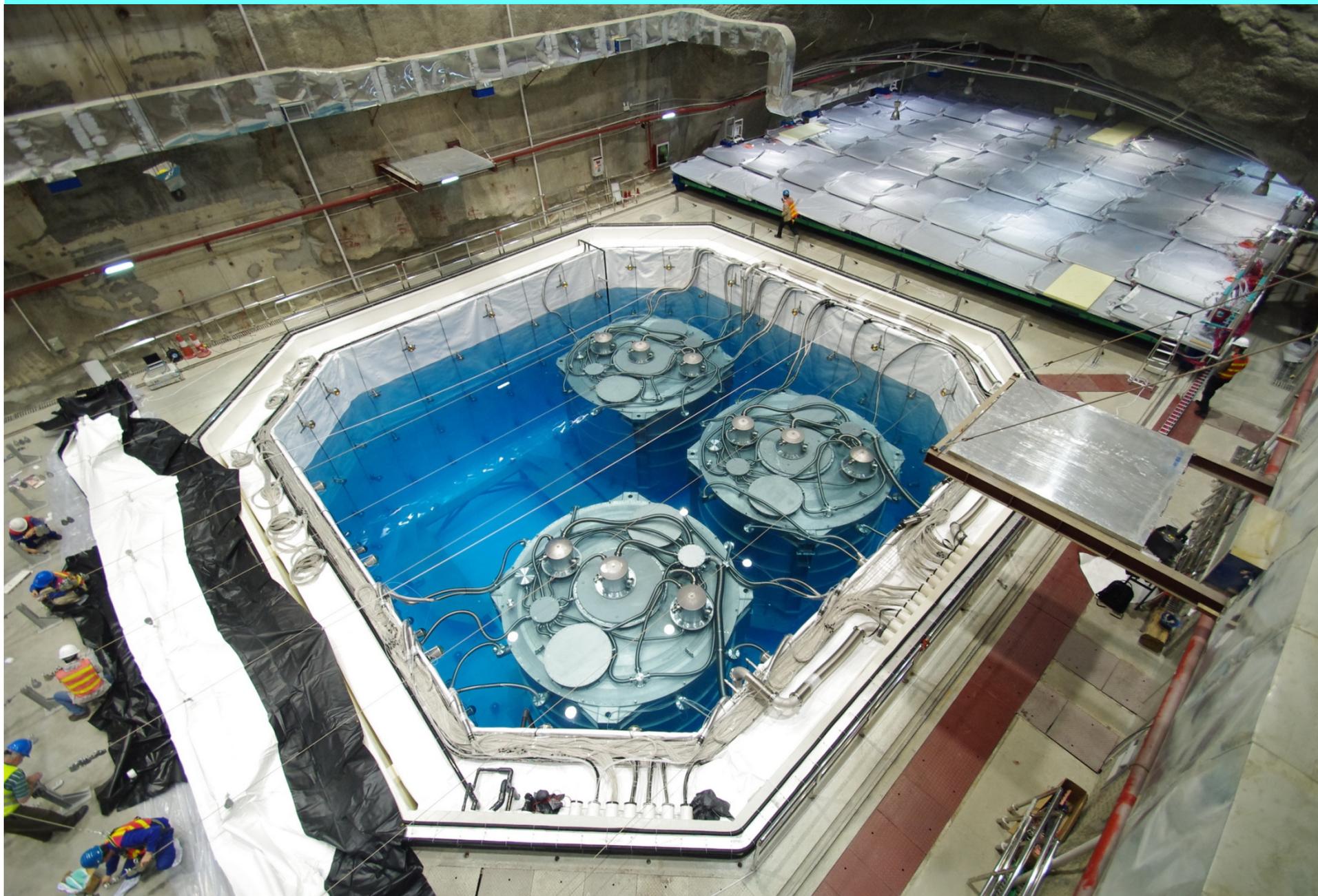
**1号厅 于 2011年8月15号开始运行取数**



**2号厅 于2011年11月5日开始运行取数**



3号厅于 2011年12月24日开始运行

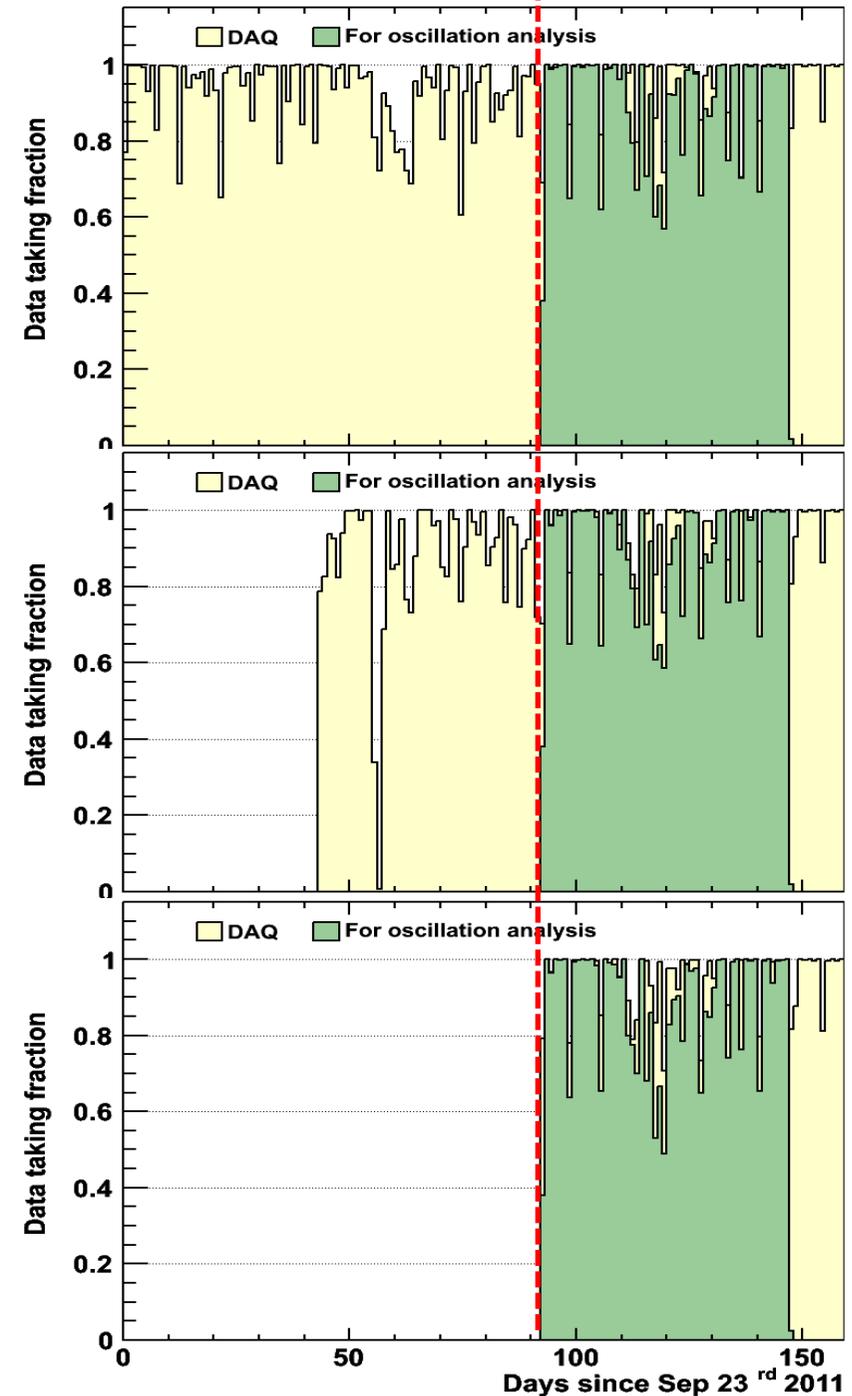


# 特殊措施

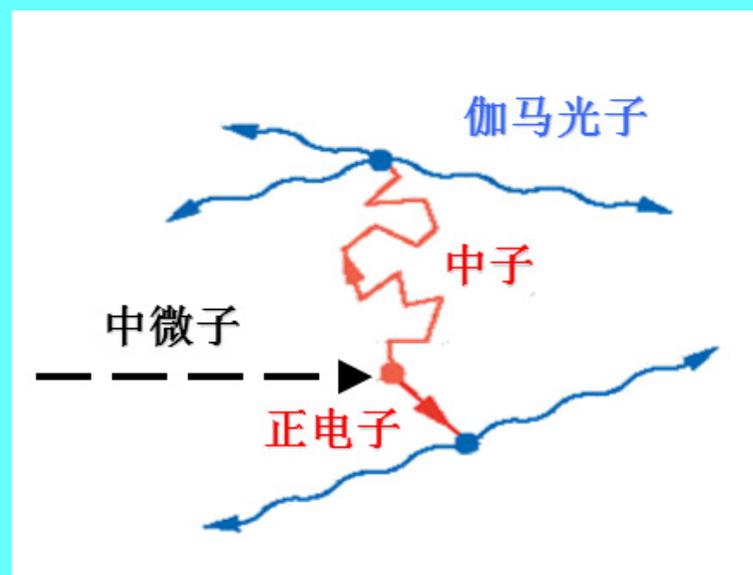
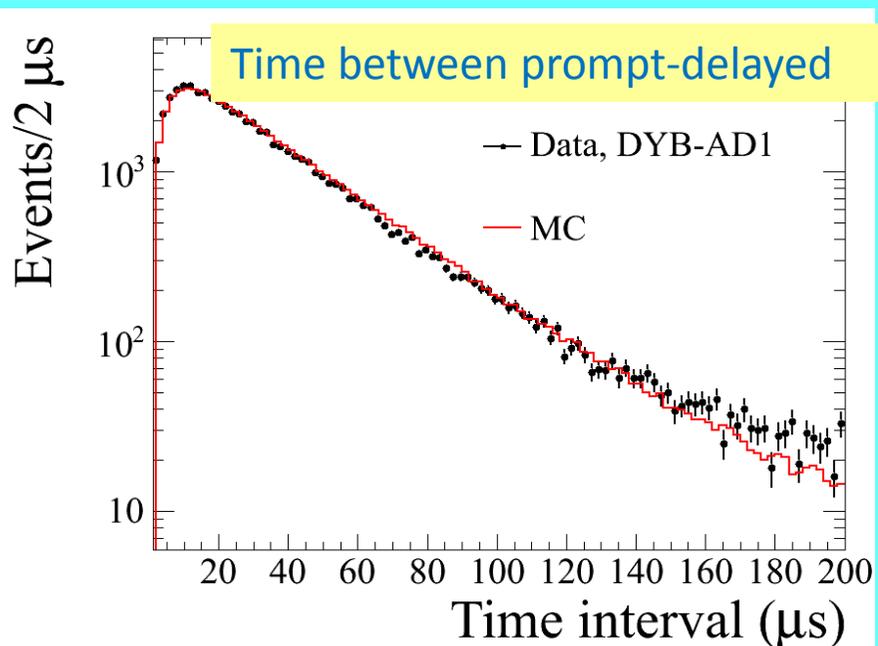
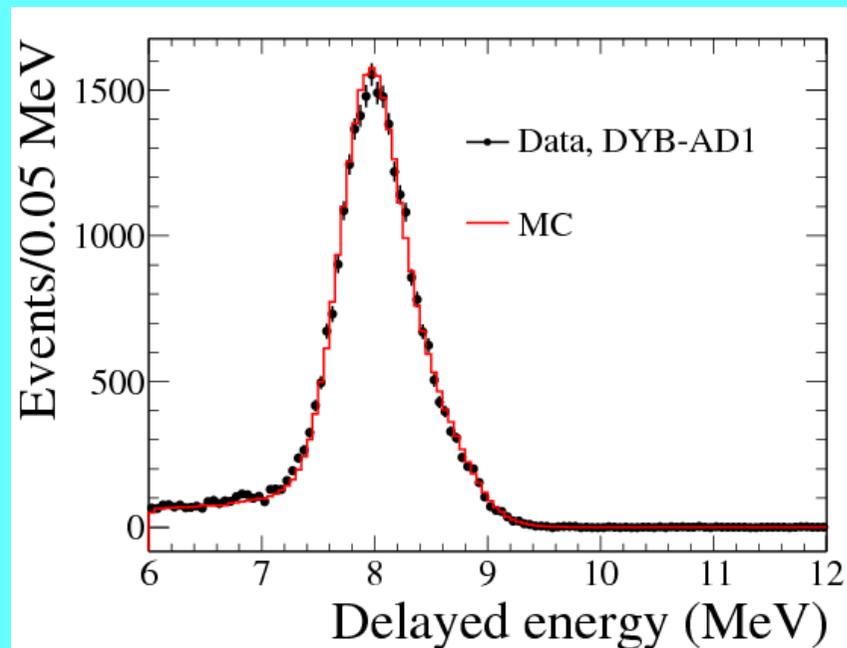
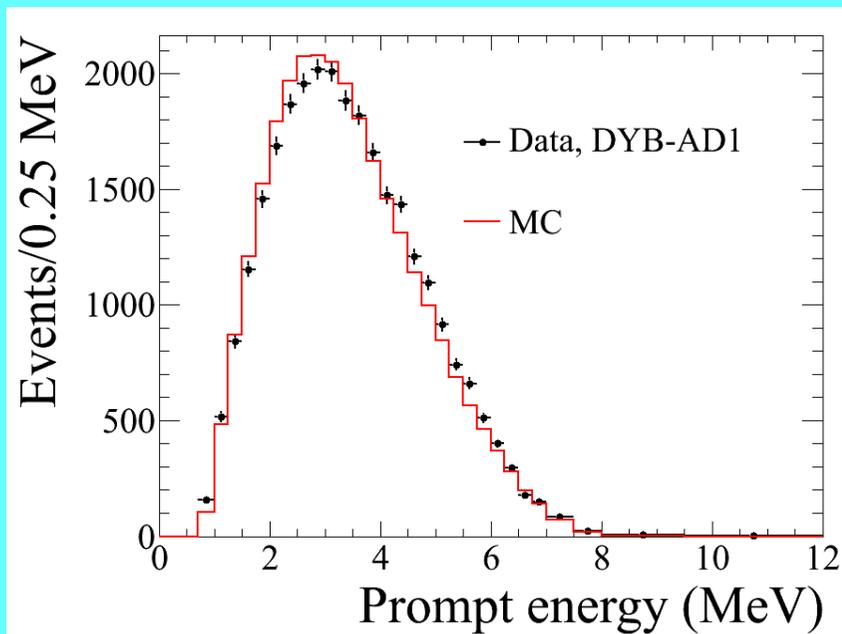
- 为抢得先机，采取了一些特殊措施
  - 修改安装计划
  - 加班加点，提前完成安装计划
  - 采取**2-1-3**模式，提前结束安装
  - 高质量的工作，提前开始取数

# 数据分析

- 自2011年12月24日起至2012年2月17日止，共55天
- 数据量: 15TB
- 数据获取效率 ~ 97%
- 物理分析有效时间 ~ 89%

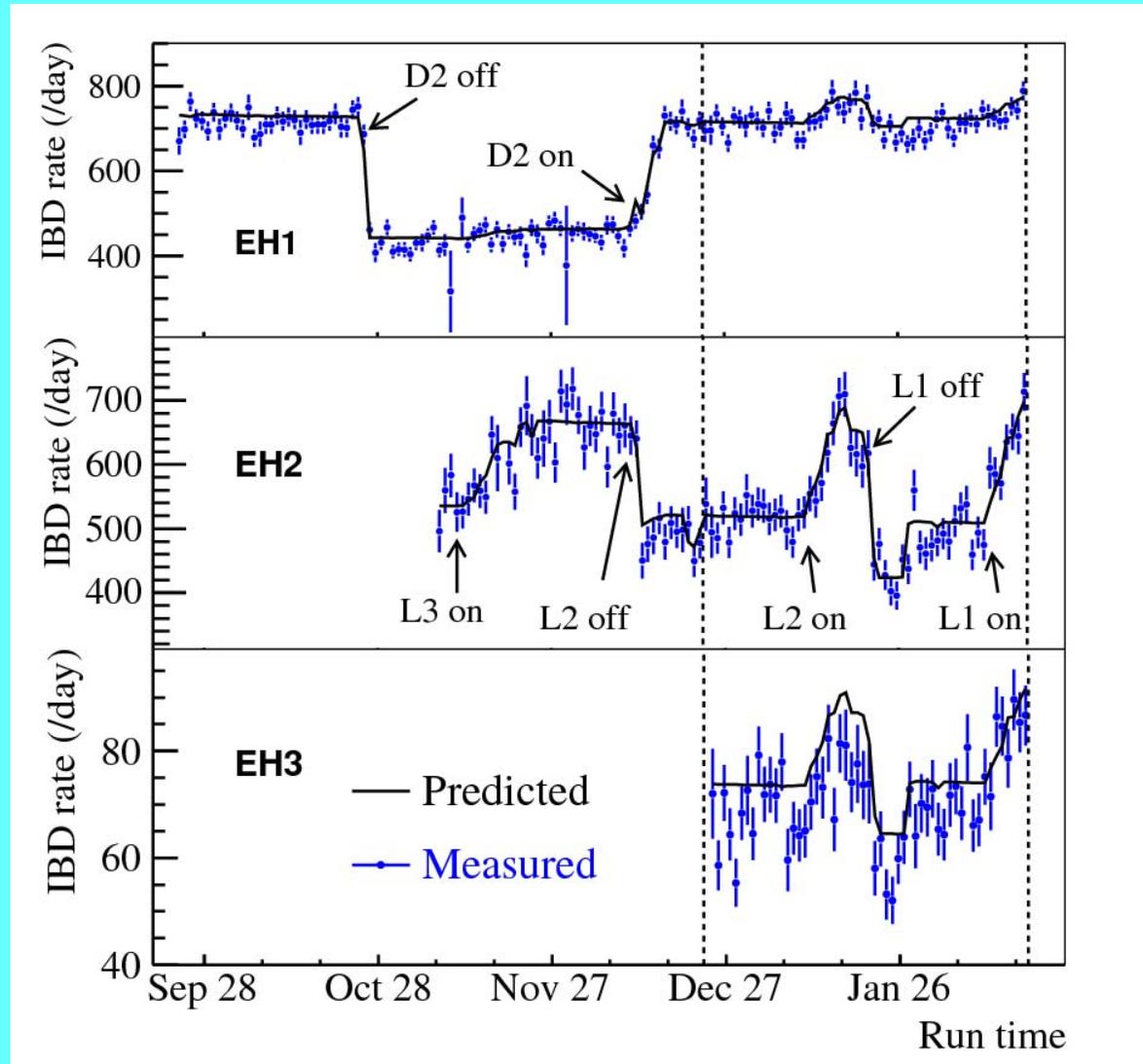


# 看到的中微子事例：与预期符合



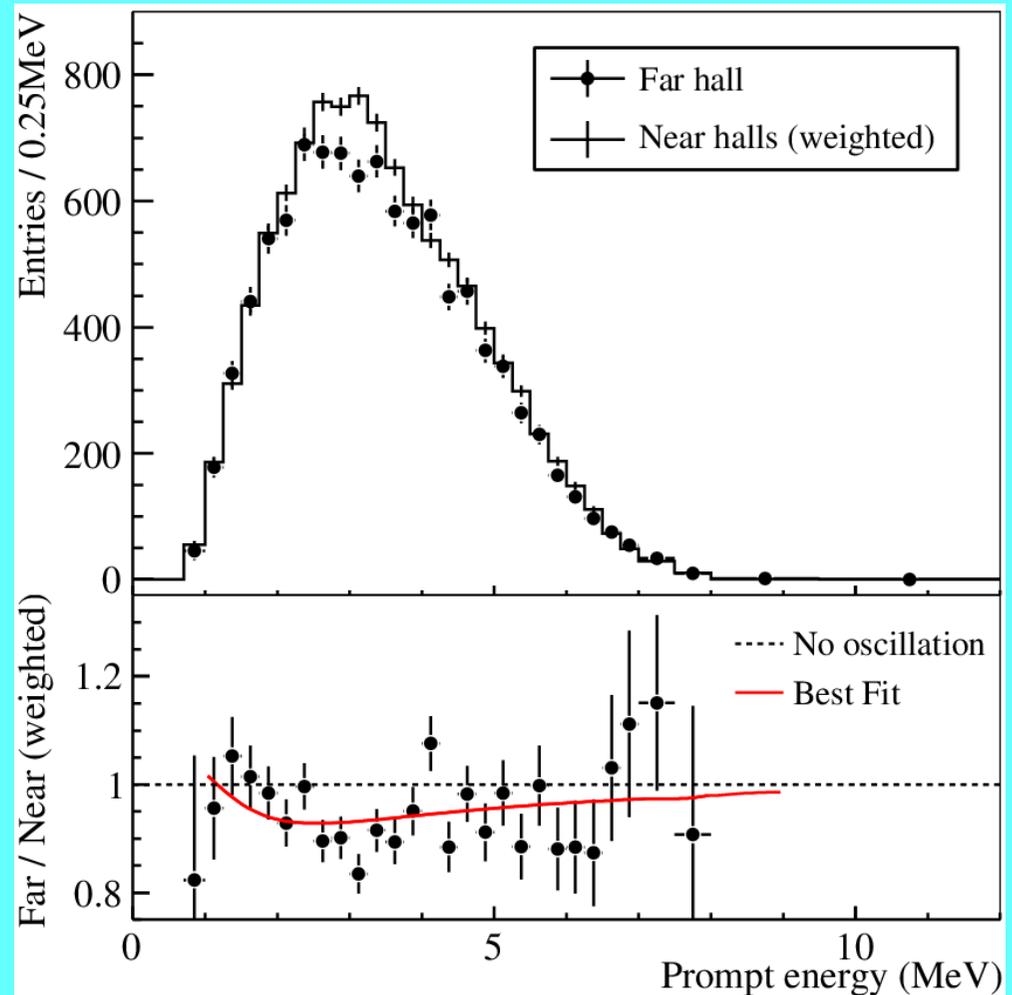
# 每天的中微子事例

- 事例率的变化反映了反应堆的开关变化



# 物理结果：发现电子反中微子消失

- 3号厅观测到：**9901** 个中微子
- 从1/2号厅的观测预言3号厅应该观测到：**10530** 个中微子
- 其比值表明中微子消失：  
 **$R = 0.940 \pm 0.011$  (stat)**  
 **$\pm 0.004$  (syst)**
- 中微子消失的最自然解释是中微子振荡
- 观测到的能谱畸变也与中微子振荡符合

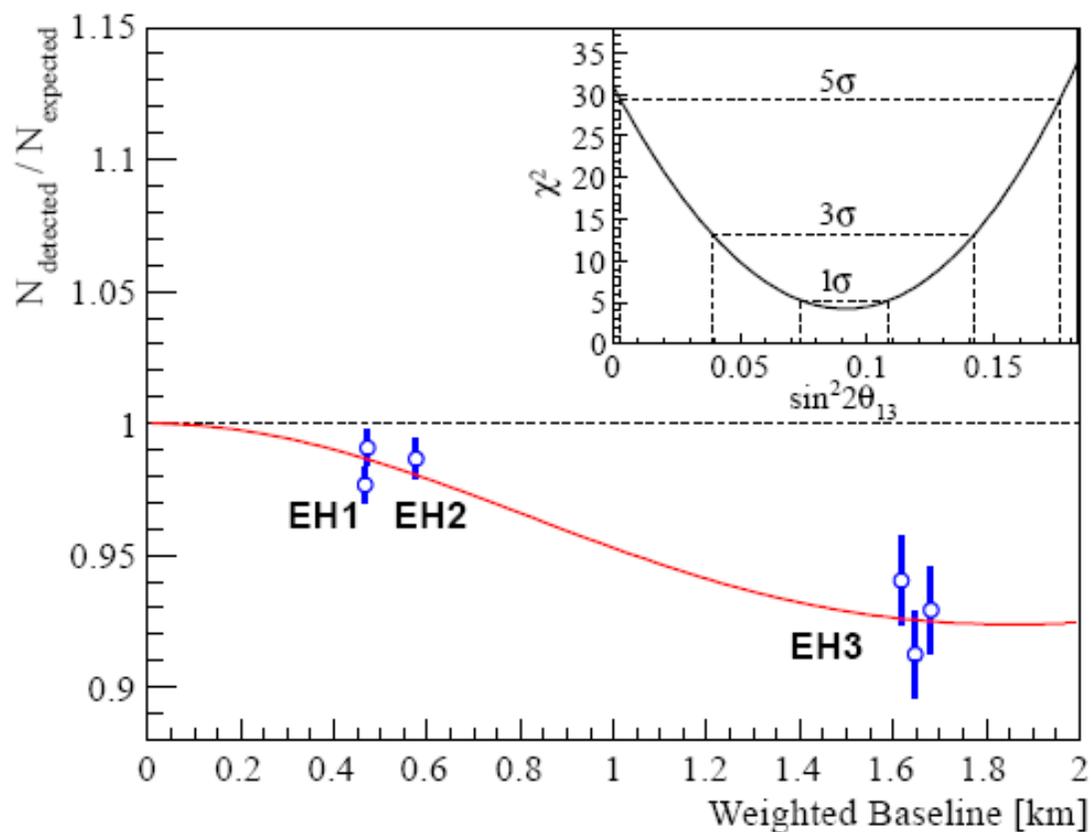


# 定量分析结果

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

发现 $\theta_{13}$ 不为零，等价于发现新的中微子振荡模式

信号显著性为5.2倍标准偏差：振荡不存在的概率为一千万分之一



粒子物理中的信号显著性一般定义：

3倍标准偏差以下：迹象  
3倍以上：证据  
5倍以上：发现

# 结论

- 大亚湾实验发现了反应堆发出的反电子中微子消失现象

$$\mathbf{R = 0.940 \pm 0.011 (stat) \pm 0.004 (syst)}$$

- 该现象与中微子振荡的预期符合，其能谱畸变也与中微子振荡的预期符合
- 发现了一种新的中微子振荡模式，信号显著性为5.2倍标准偏差，其振幅为

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

# 意义

- 发现了一种新的中微子振荡模式，使我们对物质世界的基本规律有了新的认识
- 这种振荡的振幅比预期要大得多，使我们能够很好地准备下一代物理实验，解决中微子振荡中另外两个问题：
  - 中微子质量顺序
  - 中微子振荡中是否有宇称和电荷反演破坏

致谢

# 经费支持单位

- 科学技术部
  - 国家自然科学基金委员会
  - 中国科学院
  - 广东省人民政府
  - 深圳市人民政府
  - 中国广东核电集团有限公司
- 
- 美国能源部
  - 香港特别行政区研究资助局
  - 台湾科学委员会
  - 台湾大学
  - 捷克教育部青年基金会
  - 联合核子研究所基金会

# 参与建设的主要协作单位

- 黄河勘测规划设计有限公司(Yellow River Engineering Consulting Co.,Ltd.)
- 中铁十五局集团有限公司(China Railway 15th Bureau Group Co.,Ltd.)
- 中国广东核电集团有限公司(China Guangdong Nuclear Power Group)
- 中国科学院地质与地球物理研究所(Institute of Geology and Geophysics,Chinese Academy of Sciences)
- 中国科学院武汉岩土力学研究所(Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences)
- 广东中泽重工有限公司(Guangdong Zhongze Heavy Industry Co.,Ltd.)
- 中国石化金陵公司烷基苯厂 (China Petrochemical Group Jinling Petrochemical Company Alkylbenzene Factory)
- 杭州石化有限责任公司(Hangzhou Petrochemical Co., Ltd.)
- 新乡市起重设备厂有限责任公司(Xinxiang Hoisting Equipment Factory Co.,Ltd.)
- 太原钢铁（集团）有限公司技术中心(Taiyuan Iron and Steel (Group ) Co.,Ltd. Technology Center)
- 深圳市超纯环保科技有限公司(Shenzhen Ultra pure Environmental Technology Co.,Ltd.)
- 龙海市金水族有机玻璃有限公司(Gold Aqua system technical Co.,Ltd)
- 巨力索具股份有限公司(Juli Sling Co.,Ltd.)
- 青岛卓越集装箱包装材料有限公司(Qingdao Zhuoyue Container Packing Material Co.,Ltd.)
- 上海玻乐机械五金制造有限公司(Shanghai Bole Machine & Hardware Manufacture Co.,Ltd.)
- 北京高能科迪科技有限公司(Beijing High Energy KeDi Technology Co.,Ltd.)
- 川北真空科技（北京）有限公司(ChuanBei Vacuum Technology (Beijing) Co.,Ltd.)
- 天津朝日物产彩印有限公司(Tianjin Zhaori Colour Printing Co.,Ltd.)
- 中国机械工业机械化施工公司—河南省立丰实业有限公司(China Machinery Industry Mechanization Construction Company---Henan Lifeng Industrial Co., Ltd.)
- 广东东方雨虹防水工程有限公司(Guangdong Oriental Yuhong Waterproof engineer Co., Ltd.)
- 无锡市西邦工贸有限公司(Wuxi Shape Inflatable Manufacturing Co., Ltd.)
- 惠州市华仑机电有限公司(Huizhou HuaLun Machinery Co.,Ltd.)
- 中野国际（台北）有限公司(Nakano International (Taiwan) Co.,Ltd.)
- Reynolds Polymer Technology (Grand Junction, CO, USA)
- TDS Automation (Waverly, IA, USA)
- Tobar Industries (San Jose, CA, USA)
- Tank Services (Houston, TX, USA)
- Nor-Cal Products (Yreka, CA, USA)
- Proto Labs,Inc. (Maple Plain, MN, USA)
- Hamamatsu Photonics (Japan)

我国高能物理学界的广大同仁