大亚湾实验基于中子氡俘获法的 中微子振荡研究

报告人:李讲京(代表大亚湾实验合作组) 邮箱: jinjing-li@foxmail.com 清华大学工程物理系 2022年8月11日

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会



• 实验介绍及物理意义

- 信号选择与本底分析
- 系统误差
- Rate+Shape分析
- 总结与展望



本分析使用的数据: 2011年12月24日至2017年8月31日,约1958天采取的数据



大亚湾中微子实验

- ・两个近点实验厅: EH1和EH2
 - 对反应堆中微子流强进行精确测量
 - 各有两个全同设计的探测器(共四个)
- 一个远点实验厅EH3
 - 在振荡概率极大处测量中微子缺失
 - 四个探测器(与近点探测器均为全同设计)



精确测量印动物理意义

- θ_{13} 的测量结果具有重要理论和实际意义
 - 轻子CP破坏相角
 - 中微子质量谱顺序
 - θ_{23} 卦限测定
- 方法的独立性
 - 对大亚湾基于钆俘获的测量结果给出高精度的独立检验



DOI: 10.1038/s41586-020-2177-0



利用氢俘获的013测量

22 ton LS 20 ton Gd-LS

快信号

- 特点,困难,带来独立性 • 非大亚湾原始设计方案 • 统计独立

- 80%的信号来自LS容器, 高本底 • 不同的能量选择条件,新的符合距离条件 • 系统误差独立



大亚湾历年报道的印印和测量结果

- Rate-only测量
 - 只关注中微子振荡导致不同探测器上的信号数缺失
- Rate+Shape测量
 - 在Rate-only的基础上关注不同中微子能量上的振荡效应差异
 - 能够测量出更精确的振荡曲线
- nGd结果始终提供了世界上最精确的 θ_{13} 测量
 - 使用同时期数据的nH结果能够达到世界上第二精确的水平

Date	nGd
2012	$0.092 \pm 0.016 (\text{stat.}) \ \pm 0.005 \ (\text{sy})$
2013	$0.089 \pm 0.010 (\text{stat.}) \pm 0.005 (\text{sys})$
2014	$0.090^{+0.008}_{-0.009}$ (Rate+Shap
2015	0.084 ± 0.005 (Rate+Sha
2016	
2017	$0.0841 \pm 0.0027 (stat.) \pm 0.0019 (syst.)$
2018	0.0856 ± 0.0029 (Rate+SI
2022	
	•

	nH	
vst.) (Rate)		
st.) (Rate)		
pe)	0.083 ± 0.018 (Rate)	
ape)		
	0.071 ± 0.011 (Rate)	
) (Rate+Shape) hape)	5	计量将提升为三倍!
-	(Rate+Shape, this work)	_

IBD信号的选择



- 偶然符合本底与信号数的比值, 在远点探测器中接近1:1
 - 对高精度测量是极具挑战性的
- 通过统计减法,构造出偶然符合本底的谱形,将其从数据中扣除 • 在数据中挑选出无关的事例两两组和,来模拟偶然符合本底的形成



偶然符合本底

- 偶然符合本底估计结果的正确性经过了多种方法的严格检验
- 将toy MC产生的事例样本筛选结果与理论计算结果进行比较
 - 详见: Chin.Phys.C 39 (2015) 5, 056201
- •利用数据中扣除偶然符合之后的距离和时间分布,在无信号区的事例数进行检验



偶然符合本底估计的检验





- 高硼硅玻璃中:
 - ・U238含量: 1.9±0.3 Bq/Kg
 - •Th232含量:1.4±0.4 Bq/Kg
- 进一步测量了硼钠等关键元素的含量



• 在本次测量中首次被考虑的本底

• 主要以两种方式产生中子,进而形成快慢关联本底

- 1. U238自裂变 (每天约12.9次)
 - 同时产生平均约6个γ和2个中子
- **2.** (*α*, *n*)过程
 - U/Th衰变产生 α , α 与玻璃中的硼反应生成中子
 - 每天约367个中子产生
 - 考虑了 (α, n) 未态核处于激发态的情况

• 快慢信号的形成机制

- 快信号: 中子反冲 $\eta\gamma$
- 慢信号: 中子俘获

通过模拟确定了被筛选为IBD本底的概率

信号选择与本底分析结果

- •除了前述两种本底,还有
 - 宇生本底: 快中子和Li/He本底
 - •中子刻度源本底:Am-C
- 在决定 θ_{13} 测量精度的远点探测器中
 - 偶然符合本底数与信号数(~50个每天)比值接近1:1
 - 其他偶然符合本底事例数占比约为0.5%

nH-IBD筛选结果



nGd-IBD筛选结果

11

系统误差分析

每个探测器探测到的信号数,与靶质子数 N_p 、基线反平方 $\frac{1}{L^2}$ 、探测效率 ϵ 、振荡概率 P_{sur} 和反应堆流强S成正比 $N_{ m det} = rac{N_p}{4\pi L^2}\int\epsilon\sigma P_{ m sur}SdE$

远近点两个探测器的信号数比值

$$\frac{N_{\rm f}}{N_{\rm n}} = \left(\frac{N_{\rm p,f}}{N_{\rm p,n}}\right) \left(\frac{L_{\rm n}}{L_{\rm f}}\right)^2 \left(\frac{\epsilon_{\rm f}}{\epsilon_{\rm n}}\right) \left[\frac{P_{\rm sur}\left(E,L_{\rm f}\right)}{P_{\rm sur}\left(E,L_{\rm n}\right)}\right]$$

 θ_{13} 与远近点信号数比值的差异

$$\sin^2 2\theta_{13} \approx \frac{1}{\sin^2 \left(1.267 \Delta m_{31}^2 L_{\rm f} / E \right)} \left(1 - \left(\frac{N_{\rm f}}{N_{\rm n}} \right) \left(\frac{L_{\rm f}}{L_{\rm n}} \right)^2 \right)$$

• 关键的系统误差项来自探测器间的差异

- 靶质子数 -> ~0.13%
- 快信号能量选择 (>1.5 MeV) -> 0.17%
- 慢信号能量选择 (μ ± 3σ) -> 0.2%
- 距离时间联合选择 -> 0.25%
- 与之前的分析相比存在显著改善

- 除此之外,一般还使用多个样本进行交叉检验
- 靶质子数的系统误差基于实验上液闪测量结果 •选择条件的系统误差全部基于Data-driven的评估方式 • 以贡献最大的距离时间选择条件为例



系统误差评估方法

探测器能标的检查和精细刻度

- 散裂中子(SPN)能形成与nH-IBD极为接近的2.2 MeV能量峰
 - 检查能标在时间上的稳定性
 - 检查能标在探测器不同位置处的非均匀性
 - 检查多个探测器上能标的一致性
- 使用SPN样本对IBD样本进行精细刻度





2.2 MeV氢俘获能标在8个 探测器间的差异在0.2%以 满足实验要求! 内、



Rate+Shape振荡分析

- Rate+Shape分析能够同时测量振荡频率($\Delta m_{32}^2/\Delta m_{31}^2$)和振幅(θ_{13})
- •提高 θ_{13} 的测量精度
- 更高的需求:完善地理解中微子能量到快信号探测能量的转化,并考虑其系统误差
 - 需要构建完整的能量响应模型





- •能量响应模型的构建基于GEANT4
 - 提取原始物理模拟信息,考虑能量泄漏效应
 - 液闪非线性和电子学非线性
 - 能量非均匀性
 - 能量分辨率
 - 与数据测量结果对齐

真实的中微子能量

LS区间明显的能量泄漏效应,与 nGd分析具有显著差异

能量响应模型

- 能量响应模型的作用体现为两方面
 - 能量响应矩阵
 - 帮助完成基准信号能谱的预测, 与测量值比较
 - 研究探测器相关的能谱系统误差





- 使用大亚湾实验1958天采取的数据,完成了中子氢 俘获方法的中微子振荡研究,通过同时研究振荡振 幅和频率,测量了 $\sin^2 2\theta_{13}$ 和 Δm_{32}^2
- •利用新的数据样本,重新估计了各项本底,并研究 了新的PMT玻璃本底,改进了信号选择流程,显著 压低了系统误差
- 大亚湾实验已于2020年12月12日关停,未来可使用 全部数据,进一步改善系统误差,提升测量精度
- nH的关键分析方法也将在未来的实验中发挥重要作 用,比如JUNO实验





