

# 中微子非标准相互作用对大亚湾实验的影响\*

鲁公儒<sup>1)†</sup> 冯 磊<sup>1)</sup> 杨金民<sup>2)</sup>

1) (河南师范大学物理与信息工程学院, 新乡 453007)

2) (中国科学院理论物理研究所, 北京 100190)

(2009 年 3 月 27 日收到; 2009 年 12 月 24 日收到修改稿)

大亚湾中微子实验的目标是测量中微子混合矩阵中的最小混合角  $\theta_{13}$ . 如果考虑中微子的非标准相互作用 (NSIs), 中微子的振荡概率公式要做相应的改写, 其效应将和  $\theta_{13}$  纠缠在一起, 从而降低了实验对  $\theta_{13}$  的灵敏度 (sensitivity). 讨论了在 NSIs 存在的情况下大亚湾实验对  $\theta_{13}$  的灵敏度, 发现这个实验不可能同时测量出 NSIs 和  $\theta_{13}$  的值. 由于当  $\theta_{13} = 0$  时反应堆产生的反中微子将没有振荡现象 (NSIs 的效应也将消失), 如果大亚湾实验测量到了中微子振荡效应, 那将表明  $\theta_{13} \neq 0$ ; 但是, 由于非零的  $\theta_{13}$  的效应和 NSIs 的效应有可能抵消而导致中微子没有振荡. 如果大亚湾实验没有测量到中微子振荡, 不能排除非零的  $\theta_{13}$ .

**关键词:** 中微子非标准相互作用, 大亚湾中微子实验

**PACC:** 0370, 1650G

## 1. 引 言

中微子振荡理论中的参数包括两个质量平方差 ( $\Delta_{21}^2, \Delta_{32}^2$ )、三个混合角 ( $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ ) 和一个  $CP$  相位 ( $\delta$ ), 其中,  $\Delta_{21}^2$  和  $\theta_{12}$  已经被太阳中微子实验<sup>[1]</sup> 和反应堆中微子实验 KamLAND 精确测量<sup>[2,3]</sup>,  $\Delta_{32}^2$  和  $\theta_{23}$  已经被大气中微子实验 Super-K<sup>[4,5]</sup> 和加速器中微子实验 MINOS<sup>[6]</sup> 精确测量. 与中微子振荡相关的理论和实验是一个非常活跃的领域, 国内一些作者也做出了突出的成绩<sup>[7,8]</sup>.  $\theta_{13}$  的值还没有被测量出来 (只有一个实验上限),  $CP$  相位  $\delta$  还知之甚少, 它在中微子振荡中的效应和  $\theta_{13}$  紧贴在一起, 只有当  $\theta_{13}$  不太小时  $\theta_{13}$  的效应才能显现, 所以近期中微子实验的主要目标就是精确测量  $\theta_{13}$ . 大亚湾中微子实验<sup>[9,10]</sup> 的目标就是精确测量混合角  $\theta_{13}$ , 它通过测量反应堆辐射出的中微子  $\bar{\nu}_e$  在传播 1000 m 后的剩余量, 从而测量出混合角  $\theta_{13}$  的大小. 中微子的相互作用在标准模型中有精确的描述, 在低能区域中微子的相互作用可以用  $V-A$  型四 Fermi 子相互作用算符有效的描述. 但是, 由于超出标准模型的新物理可能在 TeV 能标出现, 新物理也会改变低能区中微

子的相互作用, 这些超出标准模型所给出的标准的  $V-A$  型四 Fermi 子相互作用的部分被称为非标准相互作用 (non-standard interactions, NSIs), NSIs 在中微子振荡中的影响最先被 Grossman 所研究<sup>[11]</sup>. 在此之后很多理论工作者进一步深入研究了 NSIs 对各类中微子振荡实验的影响, 比如: 长基线中微子振荡实验<sup>[12]</sup>、中微子工厂<sup>[13]</sup>、反应堆和加速器中微子实验<sup>[14]</sup>.

在本文中讨论了 NSIs 对大亚湾实验的影响, 发现这个实验不可能同时测量出 NSIs 和  $\theta_{13}$  的值. 由于当  $\theta_{13} = 0$  时中微子将没有振荡 (NSIs 的效应也将消失), 如果大亚湾实验测量到了中微子振荡效应, 那将表明  $\theta_{13} \neq 0$ ; 但是, 由于非零的  $\theta_{13}$  的效应和 NSIs 的效应有可能抵消而导致中微子没有振荡, 如果大亚湾实验没有测量到中微子振荡, 不能排除  $\theta_{13} \neq 0$ .

## 2. 中微子非标准相互作用

在低能量标度, 中微子的弱相互作用可以用如下的有效四 Fermi 相互作用描述

$$\mathcal{L}_v = \frac{G_F}{\sqrt{2}} [\bar{\nu}_\alpha \gamma^\rho (1 - \gamma^5) l_\alpha]$$

\* 国家自然科学基金 (批准号: 1057209), 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20060476002) 资助的课题.

† E-mail: lugongru@sina.com

$$\times [\bar{f}'\gamma_\rho(1 - \gamma^5)f], \quad (1)$$

和

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{MSW} = & \frac{G_F}{\sqrt{2}} [\bar{\nu}_\alpha \gamma^\rho (1 - \gamma^5) \nu_\alpha] \\ & \times [\bar{f}'\gamma_\rho(1 - \gamma^5)f], \quad (2) \end{aligned}$$

其中,  $\nu_\alpha$  为  $\alpha$  的中微子场,  $l_\alpha$  是相应的荷电的 Fermi 子场.  $G_F$  是 Fermi 常数,  $f, f'$ , 是弱相互作用二重态的任意分量.

很多新物理在低能量标度下的有效场论形式具有和(1), (2)式类似的结构, 相应的我们称之为非标准相互作用, 如果只考虑轻子数守恒的情况, 最一般的非标准相互作用的拉格朗日的形式为

$$\mathcal{L}_{NSIs} = \mathcal{L}_{V\pm A} + \mathcal{L}_{S\pm P} + \mathcal{L}_T, \quad (3)$$

其中不同的项根据它们在洛伦兹变换下的结构来区分, 即

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{V\pm A} = & \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{f, f'} \tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}^{f, f', V\pm A} [\bar{\nu}_\beta \gamma^\rho (1 - \gamma^5) l_\alpha] \\ & \times [\bar{f}'\gamma_\rho(1 \pm \gamma^5)f] \\ & + \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{f, f'} \tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}^{f, f', V\pm A} [\bar{\nu}_\alpha \gamma^\rho (1 - \gamma^5) \nu_\beta] \\ & \times [\bar{f}'\gamma_\rho(1 \pm \gamma^5)f], \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{S\pm P} = & \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{f, f'} \tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}^{f, f', S\pm P} [\bar{\nu}_\beta (1 + \gamma^5) l_\alpha] \\ & \times [\bar{f}'(1 \pm \gamma^5)f], \quad (5) \end{aligned}$$

$$\mathcal{L}_T = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{f, f'} \tilde{\varepsilon}_{\alpha\beta}^{f, f', T} [\bar{\nu}_\beta \sigma^{\rho\tau} l_\alpha] [\bar{f}'\sigma_{\rho\tau} f]. \quad (6)$$

其中  $G_F$  是 Fermi 常数,  $\nu$  和  $l$  是中微子和荷电轻子场, 无量纲系数  $\tilde{\varepsilon}$  与  $G_F$  的乘积表征了 NSIs 的强度.  $\tilde{\varepsilon}$  的上标  $s$  表示中微子在中微子源或者探测器的非标准相互作用,  $m$  表示非标准相互作用的物质效应. 在一些具体的新物理模型中, 新的规范玻色子  $W'$  和  $Z'$  往往会导致偏离标准模型的新的带电流和中性流  $\mathcal{L}_{V\pm A}$  的存在, 新的标量粒子会导致  $\mathcal{L}_{S\pm P}$  的存在, 高阶的圈图效应会导致  $\mathcal{L}_T$  的存在. 所以, 在具体的新物理模型中, 能够找到  $\tilde{\varepsilon}$  的相应形式, 比如, 在  $R$ -宇称破缺的超对称模型中,  $\mathcal{L}_{S-P}$  中的  $\tilde{\varepsilon}$  具有形式

$$\tilde{\varepsilon} \sim M_W^2/M_{\tilde{\tau}}^2, \quad (7)$$

其中  $M_{\tilde{\tau}}$  代表轻子的超对称伴子的质量. 这样, 通过中微子振荡实验探索 NSIs, 就可以进一步探索新物理模型.

由于以上超出标准模型的新的相互作用的存在, 中微子源通过弱相互作用产生的中微子态并不是一个纯态, 而是如下弱相互作用产生本征态的组合

$$|\nu_\alpha^s\rangle = |\nu_\alpha\rangle + \sum_{\beta=e,\mu,\tau} \varepsilon_{\alpha\beta}^s |\nu_\beta\rangle \quad (8)$$

例如, (4) 式中第一个方括号表示, 味道为  $\alpha$  的荷电轻子通过这种新的耦合, 可以产生任何味道的中微子. 而不仅仅是标准模型中味道为  $\alpha$  的中微子. 相似的, 探测器并非对中微子的相互作用本征态敏感, 而是对本征态的组合敏感, 形式如下:

$$\langle \nu_\beta^d | = \langle \nu_\beta | + \sum_{\alpha=e,\mu,\tau} \varepsilon_{\alpha\beta}^d \langle \nu_\alpha |. \quad (9)$$

这些描述 NSIs 的参数  $\varepsilon^s$  和  $\varepsilon^d$  的上限可以通过分析现有的实验给出来. 通过分析轻子衰变和  $\pi$  介子衰变实验, 能够得到限制<sup>[15,16]</sup>:  $\varepsilon_{\alpha\beta}^s = \mathcal{O}(0.1)$  和  $\varepsilon_{\alpha\beta}^d = \mathcal{O}(0.2)$ .

### 3. NSIs 存在情况下的大亚湾实验的观测测量

大亚湾实验观测反应堆中微子(反电子中微子  $\bar{\nu}_e$ )的存活概率(survival probability). 考虑 NSIs 后, 反电子中微子的存活概率是<sup>[12]</sup>(类似的研究也可见文献[17—23])

$$\begin{aligned} P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e^d} = & 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \\ & + 2 |\varepsilon_{ee}^s| \cos \phi_{ee}^s + 2 |\varepsilon_{ee}^d| \cos \phi_{ee}^d \\ & - 4 |\varepsilon_{\mu e}^s| s_{13} s_{23} \cos(\delta_{cp} - \phi_{\mu e}^s) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \\ & + 2 |\varepsilon_{\mu e}^s| s_{13} s_{23} \sin(\delta_{cp} - \phi_{\mu e}^s) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E} \\ & - 4 |\varepsilon_{\tau e}^s| s_{13} c_{23} \cos(\delta_{cp} - \phi_{\tau e}^s) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \\ & + 2 |\varepsilon_{\tau e}^s| s_{13} c_{23} \sin(\delta_{cp} - \phi_{\tau e}^s) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E} \\ & - 4 |\varepsilon_{\mu e}^d| s_{13} s_{23} \cos(\delta_{cp} + \phi_{\mu e}^d) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \\ & - 2 |\varepsilon_{\mu e}^d| s_{13} s_{23} \sin(\delta_{cp} + \phi_{\mu e}^d) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E} \\ & - 4 |\varepsilon_{\tau e}^d| s_{13} c_{23} \cos(\delta_{cp} + \phi_{\tau e}^d) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \\ & + 2 |\varepsilon_{\tau e}^d| s_{13} c_{23} \sin(\delta_{cp} + \phi_{\tau e}^d) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{2E}. \quad (10) \end{aligned}$$

在上式中,假定 NSIs 的效应是很小,因而略去了它们的高阶项. 从上式中可以看到,由于 NSIs 的效应,反电子中微子的存活概率依赖于很多参数. 如果假设新物理中的破坏 CP 守恒的相因子为零,即  $\phi_{e\mu}^s, \phi_{e\tau}^s, \phi_{e\mu}^d$  和  $\phi_{e\tau}^d$  都等于 0, 并考虑到一个重要的关系式<sup>[14]</sup>

$$\varepsilon_{ei}^s = \varepsilon_{ie}^{d*} = \varepsilon_{ie} (i = e, \mu, \tau). \quad (11)$$

得到简化了的反电子中微子的存活概率公式

$$P_{\nu_e^s \rightarrow \nu_e^d} = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} + 4 |\varepsilon_{ee}| - 8 |\varepsilon_{e\mu}| s_{13} s_{23} \cos(\delta_{cp}) \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} - 8 |\varepsilon_{e\tau}| s_{13} c_{23} \cos(\delta_{cp}) \times \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}. \quad (12)$$

大亚湾反应堆中微子实验有两个探测器,近端探测器和远端探测器. 实验要测量的参数  $\sin^2 2\theta_{13}$  依赖于这两组探测器探测到的反电子中微子的事例数的比例. 探测器能够得到反电子中微子的事例数由下式给出<sup>[10]</sup>

$$N_{\text{det}} = \frac{N_p}{4\pi L^2} \int \varepsilon' \sigma P_{\text{sur}} S dE, \quad (13)$$

其中  $N_p$  是探测器的自由质子的数目,  $L$  是反应堆到探测器之间的距离,  $\varepsilon'$  是探测器探测反电子中微子的效率,  $\sigma$  是反应的散射截面,  $P_{\text{sur}}$  是中微子的存活概率,  $S$  是反应堆辐射的反电子中微子随能量变化的数密度. 在能量  $E$  到  $E + dE$  之间, 远近两个探测器探测到的反中微子的事例数的比例可以由下式给出

$$\frac{N_f}{N_n} = \frac{N_{p,f} L_n^2 \varepsilon_f' P_{\text{sur}}(E, L_f)}{N_{p,n} L_f^2 \varepsilon_n' P_{\text{sur}}(E, L_n)}. \quad (14)$$

在大亚湾实验中, 远近两个探测器可以认为是完全相同的具有相同的自由质子数和探测器效率  $\varepsilon'$ , 所以远近探测器事例数的比例仅仅依赖于距离和存活概率. 距离反应堆近的探测器, 由于距离很短,  $\sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}$  的值约等于 0, 于是得到如下近似公式:  $P_{\text{sur}}(E, L_n) = 1 + 4\varepsilon_{ee}$ . 将这些条件代入(14)式, 得到

$$\frac{N_f}{N_n} = \frac{L_n^2}{L_f^2} \left\{ 1 - 4\sin\theta_{13} [\sin\theta_{13} \cos^2\theta_{13} + 2(|\varepsilon_{e\mu}| \sin\theta_{23} + |\varepsilon_{e\tau}| \cos\theta_{23}) \cos\delta_{cp}] \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right\}. \quad (15)$$

式中  $|\varepsilon_{ee}|$  的项是高阶的(线性项不出现)因而可以被忽略. 从这个方程可以看到: 1) 当  $\theta_{13} = 0$  时, 反电子中微子没有振荡(NSIs 的效应也将消失); 2) 当  $\theta_{13} \neq 0$  时, 由于 NSIs 的效应, 在  $\delta_{cp}$  大于 90 度时, 方程

$$\sin\theta_{13} \cos^2\theta_{13} + 2(|\varepsilon_{e\mu}| \sin\theta_{23} + |\varepsilon_{e\tau}| \cos\theta_{23}) \cos\delta_{cp} = 0, \quad (16)$$

仍然有解. 在这种情况下, 实验探测不到振荡现象.

#### 4. 数值分析

由(15)式可以看到, 实验观测的量依赖于五个参数:  $\theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{cp}, |\varepsilon_{e\mu}|$  和  $|\varepsilon_{e\tau}|$ , 单靠一个实验是无法完全确定这些参数的. 在下面的数值计算中定义  $\varepsilon$  表征 NSIs

$$\varepsilon \equiv 2(|\varepsilon_{e\mu}| \sin\theta_{23} + |\varepsilon_{e\tau}| \cos\theta_{23}) \cos\delta_{cp}. \quad (17)$$

由于  $\varepsilon_{e\mu}$  和  $\varepsilon_{e\tau}$  的实验上限的量级是 0.1,  $\sin\theta_{23}$  约等于  $\cos\theta_{23}$ , 所以  $\varepsilon$  的上限的量级是  $\mathcal{O}(0.1)$ . 让  $\varepsilon$  在范围是从 -0.25 到 0.25 自由变化. 其他有关参数的取值是:  $L_f = 1985\text{m}, L_n = 363\text{m}$ <sup>[10]</sup>,  $\Delta m_{31}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ <sup>[24,25]</sup>. 中微子能量的取值为  $4\text{MeV}$ <sup>[10]</sup>, 因为反应堆发射的中微子在这一能量具有最大的数密度.

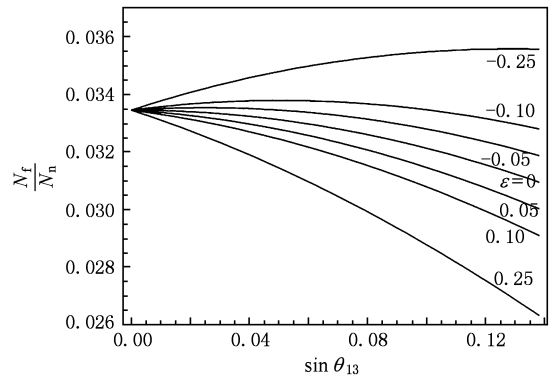


图 1 大亚湾中微子实验的观测量  $N_f/N_n$  对于参数  $\sin\theta_{13}$  的依赖关系, 每条曲线上标记的数值是  $\varepsilon$  的取值

图 1 给出在  $\varepsilon$  取不同的值时大亚湾中微子实验的观测量  $N_f/N_n$  对于参数  $\sin\theta_{13}$  的依赖关系. 可以看到  $\varepsilon$  不同的取值对  $N_f/N_n$  与  $\sin\theta_{13}$  的依赖关系影响很大.

图 2 是观测量  $N_f/N_n$  在  $\sin\theta_{13}$ - $\varepsilon$  平面的等高线. 大亚湾中微子实验测量出  $N_f/N_n$  后, 将在  $\sin\theta_{13}$ - $\varepsilon$

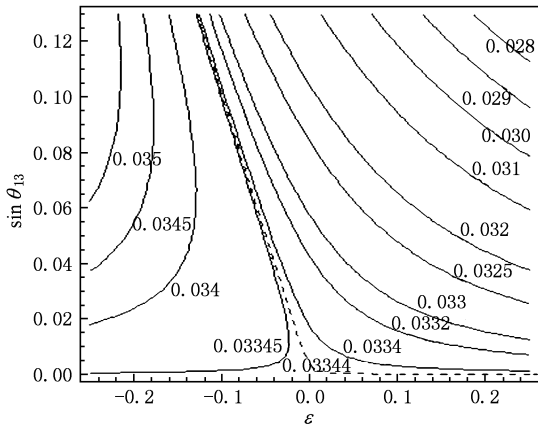


图2 大亚湾中微子实验可观测量  $N_l/N_n$  在  $\sin\theta_{13}$ - $\varepsilon$  平面的等高线, 其中的点线对应中微子没有振荡的情形

平面给出一条等高线, 但是定不出  $\sin\theta_{13}$  和  $\varepsilon$  的值. 如果  $N_l/N_n = (363/1985)^2 \approx 0.03344$ , 事例数的减少完全可以用粒子束的通量按照半径平方的倒数衰减来解释, 这代表中微子没有振荡的情形. 图 2

中的虚线表示的正是这种情形. 从图中可以看出, 若观测结果是中微子没有振荡,  $\sin\theta_{13}$  不一定等于 0, 可能是由于 NSIs 的效应与非零  $\sin\theta_{13}$  的效应正好抵消.

## 5. 结 论

如果考虑中微子的非标准相互作用 (NSIs), NSIs 将影响中微子的振荡概率, 其效应将和  $\sin\theta_{13}$  纠缠在一起, 从而降低了大亚湾中微子实验对  $\theta_{13}$  的敏感度 (sensitivity), 单个实验不可能同时测量出 NSIs 和  $\theta_{13}$  的值. 由于当  $\theta_{13} = 0$  时中微子将没有振荡 (NSIs 的效应也将消失), 如果大亚湾实验测量到了中微子振荡效应, 表明  $\theta_{13} \neq 0$ ; 但是, 由于非零的  $\theta_{13}$  的效应和 NSIs 的效应有可能抵消而导致中微子没有振荡, 如果大亚湾实验没有测量到中微子振荡, 不能排除非零的  $\theta_{13}$ .

感谢杨炳麟教授的有益讨论.

- [1] Cattadori C, Ferrari N, Pandola L 2005 *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **143** 3
- [2] Kamland Collaboration 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 021802
- [3] Kamland Collaboration 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 081801
- [4] Super-Kamiokande Collaboration 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562
- [5] Super-Kamiokande Collaboration 2005 *Phys. Rev. D* **71** 112005
- [6] Minos Collaboration 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 131802
- [7] Huang X J, Li Z J, Wang Y J 2006 *Chin. Phys. B* **15** 229
- [8] Zhang J, Liu M Q, Wei B T, Luo Z Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5448 (in Chinese) [张洁、刘门全、魏丙涛、罗志全 2005 物理学报 **57** 5448]
- [9] Cao J 2006 *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **155** 229
- [10] Daya Bay Collaboration 2007 arXiv:hep-ex/0701029
- [11] Grossman Y, 1995 *Phys. Lett. B* **359** 141
- [12] Ota T, Sato J, Yamashita N A 2002 *Phys. Rev. D* **65** 0903015
- [13] Huber P, Schwetz T, Valle J W F 2002 *Phys. Rev. D* **66** 013006
- [14] Kopp J, Lindner M, Ota T, Sato S 2008 *Phys. Rev. D* **77** 013007
- [15] Bergmann S, Grossman Y, Pierce D M 2000 *Phys. Rev. D* **61** 053005
- [16] Gonzalez-Garcia M C, Grossman Y, Gusso A, Nir Y 2001 *Phys. Rev. D* **64** 096006
- [17] Antusch S, Biggio C, Fernandez-Martinez E, Gavela M B, Lopez-Pavon J 2006 *Journal High Energy Physics* **10** 084
- [18] Fernandez-Martinez E, Gavela M B, J. López-Pavón J, Yasuda O 2007 *Phys. Lett. B* **649** 427
- [19] Goswami S, Ota T 2008 *Phys. Rev. D* **78** 033012
- [20] Xing Z Z, Zhou S 2008 *Phys. Lett. B* **666** 166
- [21] Luo S 2008 *Phys. Rev. D* **78** 016006
- [22] Altarelli G, Meloni D 2008 arXiv:0809.1041 [hep-ph]
- [23] Ohlsson T, Zhang H 2008 arXiv:0809.4835 [hep-ph]
- [24] Maltoni M, Schwetz T, Tortola M A, Valle J W F 2004 *New J. Phys.* **6** 122
- [25] Fogli G L, Lisi E, Marrone A, Melchiorri A, Palazzo A, Serra P, Silk J, Slosar A 2007 *Phys. Rev. D* **75** 053001

# Effect of non-standard interaction on Daya Bay experiment<sup>\*</sup>

Lu Gong-Ru<sup>1)†</sup> Feng Lei<sup>1)</sup> Yang Jin-Min<sup>2)</sup>

1) (*College of Physics and Information Engineering, Henan Normal University, Xixiang 453007, China*)

2) (*Key Laboratory of Frontiers in Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Academia Sinica, Beijing 100190, China*)

(Received 27 March 2009; revised manuscript received 27 December 2009)

## Abstract

The goal of the Daya Bay reactor experiment is to determine unknown neutrino mixing angle  $\theta_{13}$ . The non-standard interactions (NSIs) of the neutrinos will affect the neutrino oscillation probability. In this paper we check the Daya Bay experimental sensitivity to  $\theta_{13}$  in the presence of NSIs. Clearly, in this single experiment the values of  $\theta_{13}$  and NSIs cannot be determined. The experimental observation of neutrino oscillation indicates a non-zero  $\theta_{13}$ . But if we do not observe the neutrino oscillation, it will not be meant that the value of  $\theta_{13}$  must be zero.

**Keywords:** non-standard interaction of neutrinos, Daya Bay experiment

**PACC:** 0370, 1650G

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10575209), The PhD Programs Foundation of Ministry of Education of China (Grant No. 20060476002).

<sup>†</sup> E-mail: lugongru@sina.com