



Осцилляции нейтрино
Угол смешивания θ_{13}
Перспективы

5 апреля 2012

План

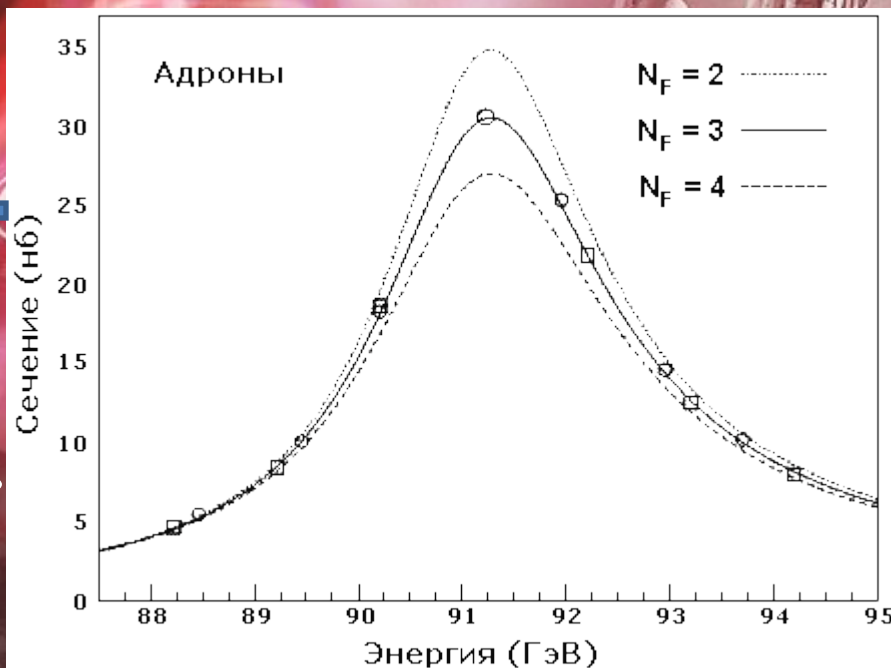
- Нейтрино в стандартной модели
- Осцилляции нейтрино
- Эксперимент Daya Bay
- Эксперимент RENO
- Выводы
- Перспективы

Стандартная модель

- Три типа (аромата) нейтрино: ν_e, ν_μ, ν_τ
- У каждого нейтрино есть партнёр: $W \rightarrow e \nu_e, W \rightarrow \mu \nu_\mu, W \rightarrow \tau \nu_\tau$
- Нейтрино безмассовые частицы: $m_\nu = m_\mu = m_\tau = 0$
- Сохраняются лептонные числа L_e, L_μ, L_τ
- Невозможны переходы (осцилляции) одного типа нейтрино в другой
- CP в лептонном секторе сохраняется

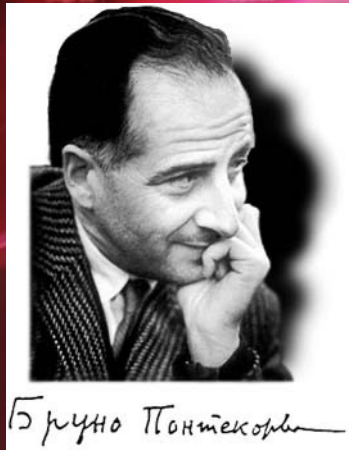


Число ароматов
 $n = 2.982 \pm 0.013$



Осцилляции нейтрино

В 1957 г. Б.М.Понтекорво предложил идею нейтринных осцилляций



Собственные
состояния

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Массовые
состояния

Унитарная матрица
смешивания

Анализ матрицы U

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13} \exp(-i\delta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13} \exp(-i\delta) & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

1. Осцилляция атмосферных нейтрино



2. Реакторные осцилляции



3. Осцилляции солнечных нейтрино



Вероятность осцилляций

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \underbrace{\delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{k>j} \operatorname{Re} \left[U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^* \right]}_{CP=1} \sin^2 \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{4E_\nu} + \underbrace{2 \sum_{k>j} \operatorname{Im} \left[U_{\alpha j}^* U_{\beta j} U_{\alpha k} U_{\beta k}^* \right]}_{CP \neq 1} \sin^2 \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{2E_\nu}$$

1. $\Delta m_{jk}^2 = 0 \Rightarrow P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta}$
2. Осцилляция в вакууме
3. Эксперименты на появление $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$
 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha)$
4. CP-нарушение только в экспериментах на появление
5. $\sum_{\beta} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 1$

Определение θ_{13}

Ускорительный эксперимент

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) = P(\delta, \alpha, \theta_{13}, \Delta m_{23}^2)$$

$$\delta - ?, \theta_{13} - ?, \text{sgn}(\Delta m_{23}^2) - ?$$

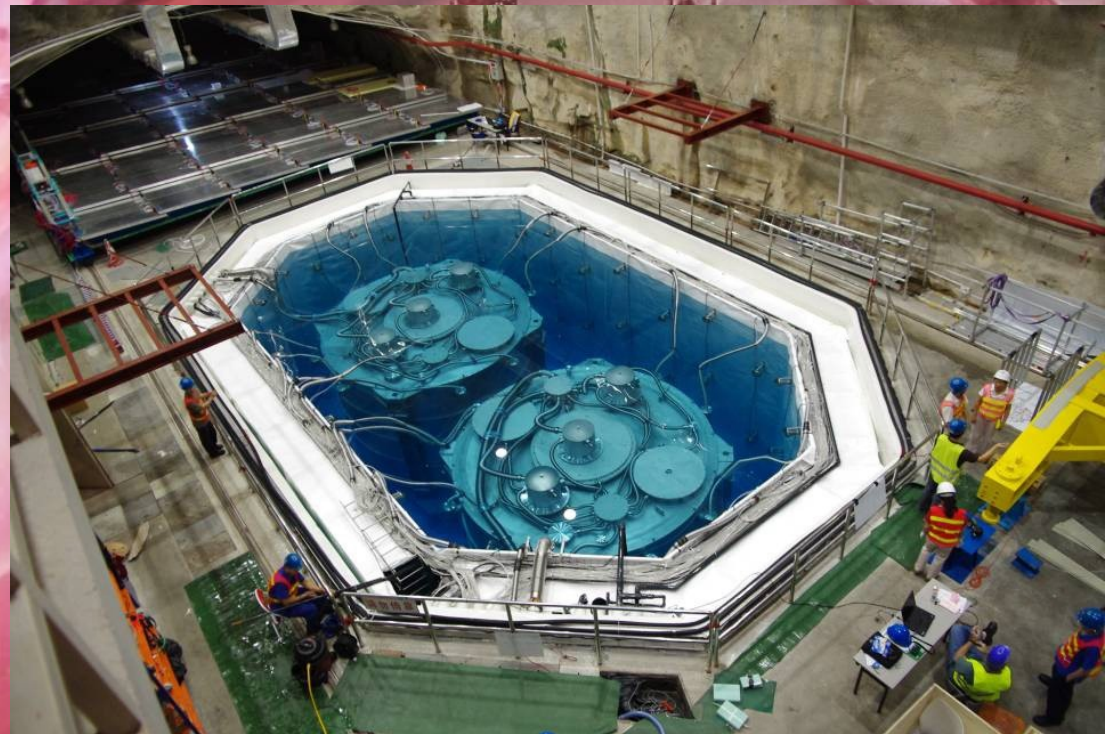
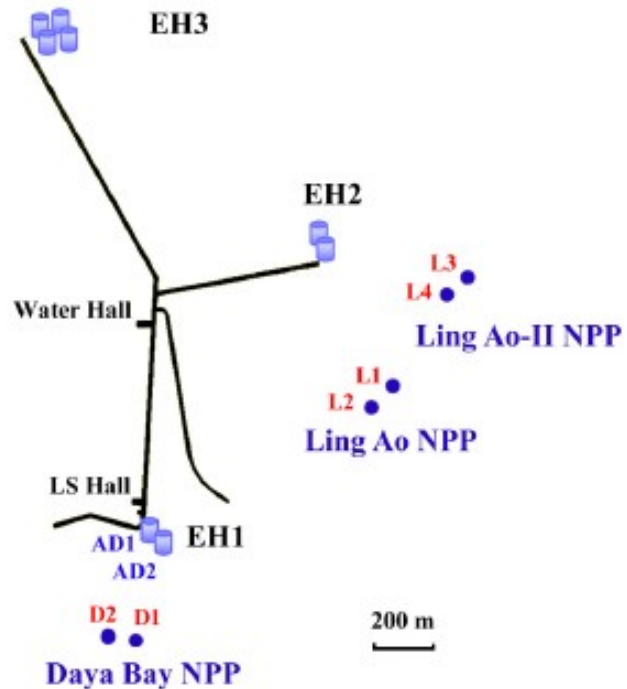
Реакторный эксперимент

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(1,267 \Delta m_{31}^2 L / E)$$



Если известен θ_{13} то из A_{CP} можно определить δ ,
а затем и иерархию масс

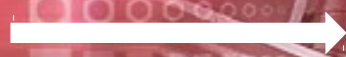
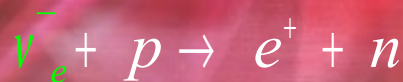
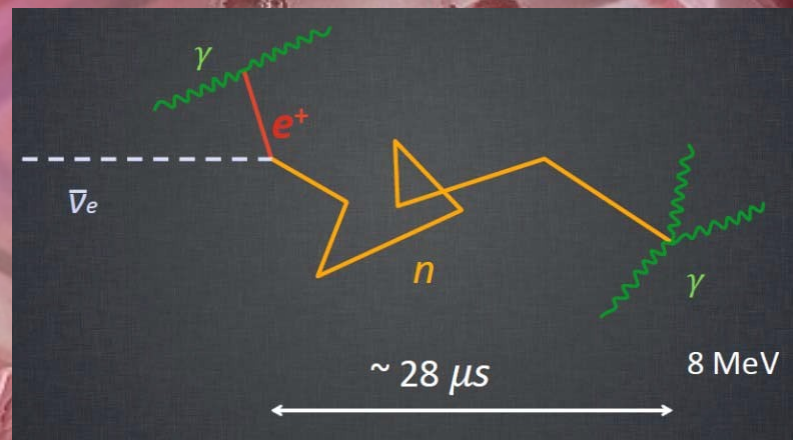
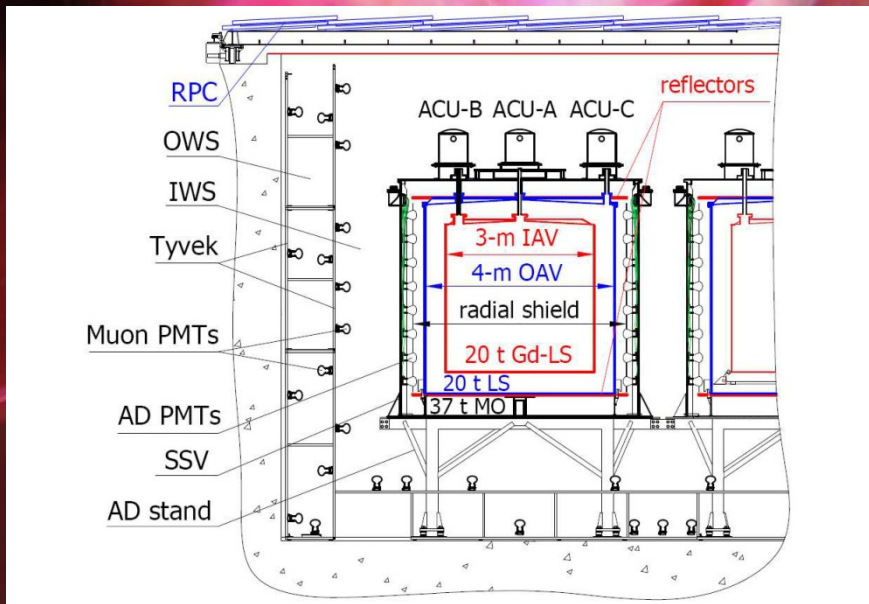
Эксперимент Daya Bay



- Набор статистики 24.12.2011-17.02.2012 г
- Результат опубликован 8.03.2012 г
- Реакторный эксперимент

	Overburden (MWE)	R_{μ} (Hz/m ²)	E_{μ} (GeV)	D1,2 (m)	L1,2 (m)	L3,4 (m)
EH1	250	1.27	57	364	857	1307
EH2	265	0.95	58	1348	480	528
EH3	860	0.056	137	1912	1540	1548

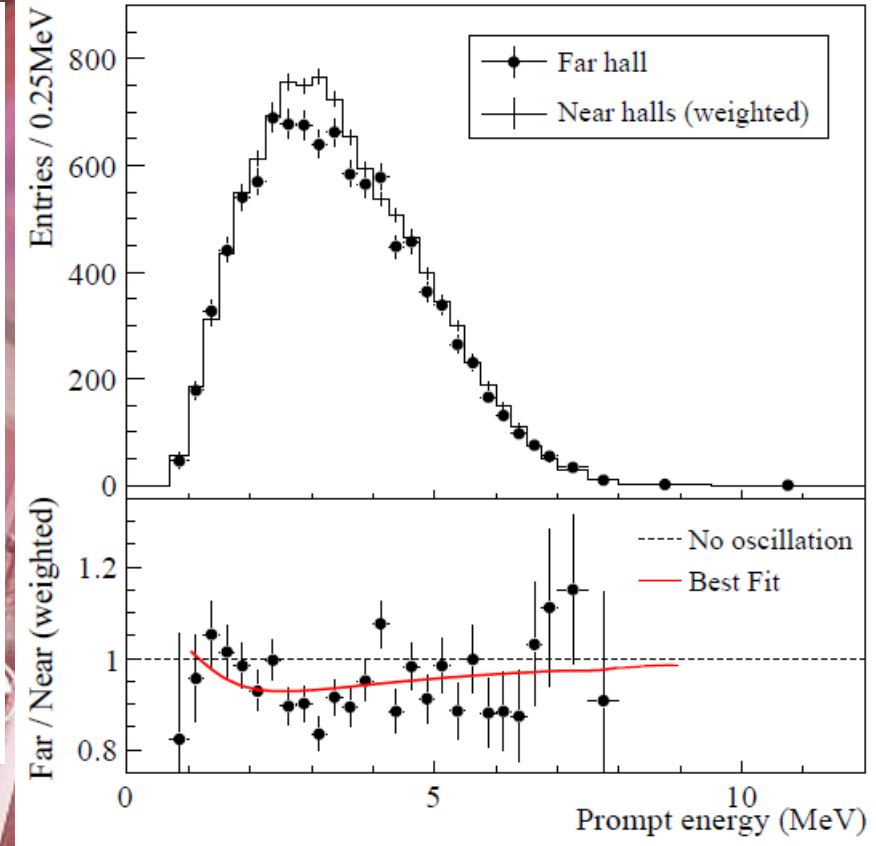
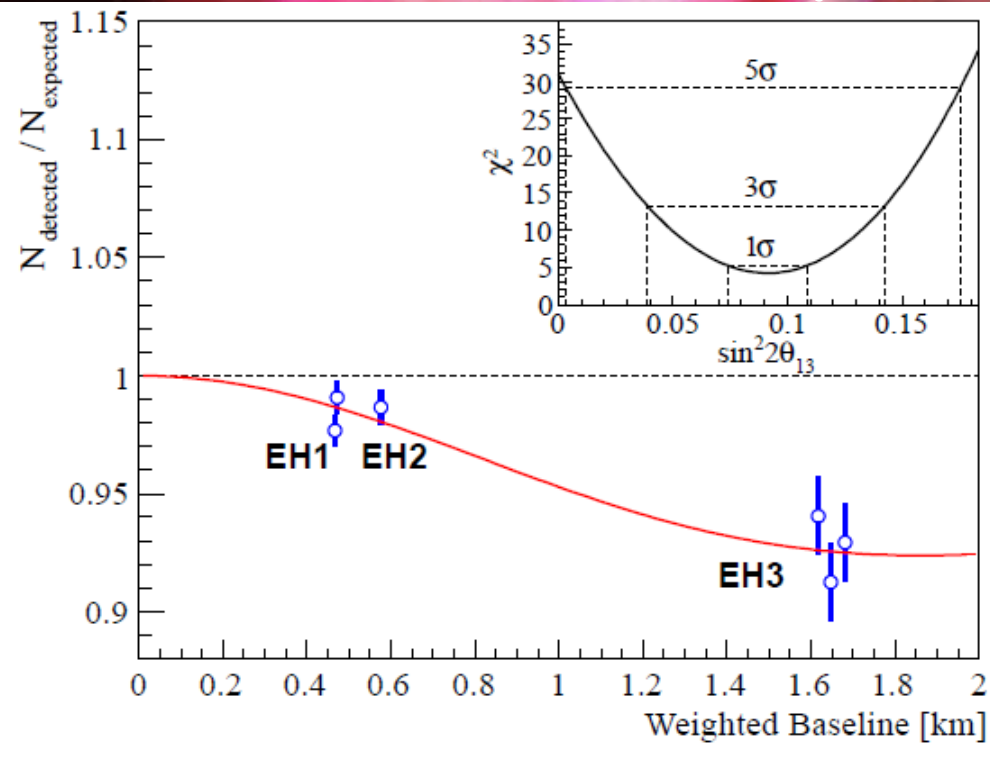
Детектирование нейтрино



28 мкс



Результаты



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0,092 \pm 0,016 \pm 0,005$$

$\theta_{13} \neq 0$ на уровне 5,2 σ

Эксперимент RENO



- Набор статистики
11.8.2011-26.03.2012 гг
- Результат опубликован
8.04.2012 г
- Реакторный эксперимент

Reactor No.	Near Detector (m)	Far Detector (m)
1	667.9	1556.5
2	451.8	1456.2
3	304.8	1395.9
4	336.1	1381.3
5	513.9	1413.8
6	739.1	1490.1

Наука в Республике Корея

J. K. Ahn,⁷ S. Chebotaryov,⁶ J. H. Choi,⁴ S. Choi,¹⁰ W. Choi,¹⁰ Y. Choi,¹² H. I. Jang,¹¹ J. S. Jang,² E. J. Jeon,⁸ I. S. Jeong,² K. K. Joo,² B. R. Kim,² B. C. Kim,² H. S. Kim,¹ J. Y. Kim,² S. B. Kim,¹⁰ S. H. Kim,⁷ S. Y. Kim,⁷ W. Kim,⁶ Y. D. Kim,⁸ J. Lee,¹⁰ J. K. Lee,⁷ I. T. Lim,² K. J. Ma,⁸ M. Y. Pac,⁴ I. G. Park,⁵ J. S. Park,¹⁰ K. S. Park,⁹ J. W. Shin,¹⁰ K. Siyeon,³ B. S. Yang,¹⁰ I. S. Yeo,² S. H. Yi,¹² and I. Yu¹²

(RENO Collaboration)

¹*Department of Physics, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea*

²*Department of Physics, Chonnam National University, Gwangju, 500-757, Korea*

³*Department of Physics, Chung Ang University, Seoul 156-756, Korea*

⁴*Department of Radiology, Dongshin University, Naju, 520-714, Korea*

⁵*Department of Physics, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701, Korea*

⁶*Department of Physics, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea*

⁷*Department of Physics, Pusan National University, Busan, 609-735, Korea*

⁸*Department of Physics, Sejong University, Seoul 143-747, Korea*

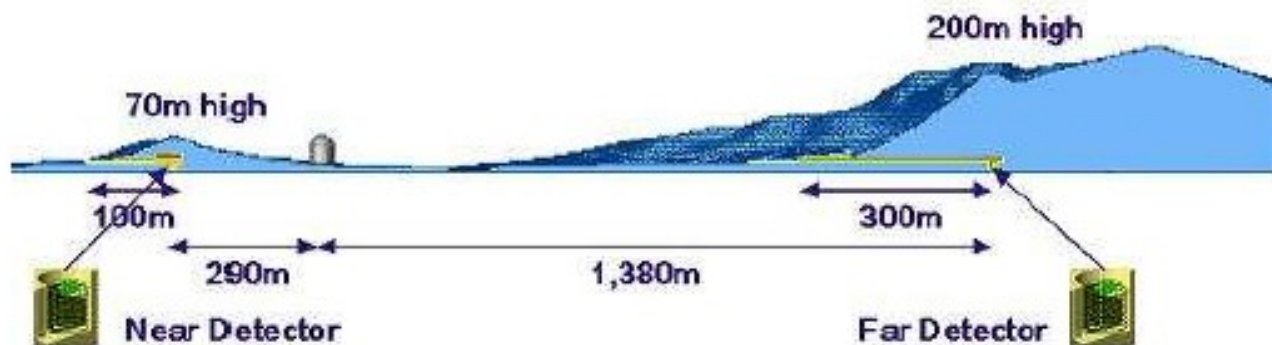
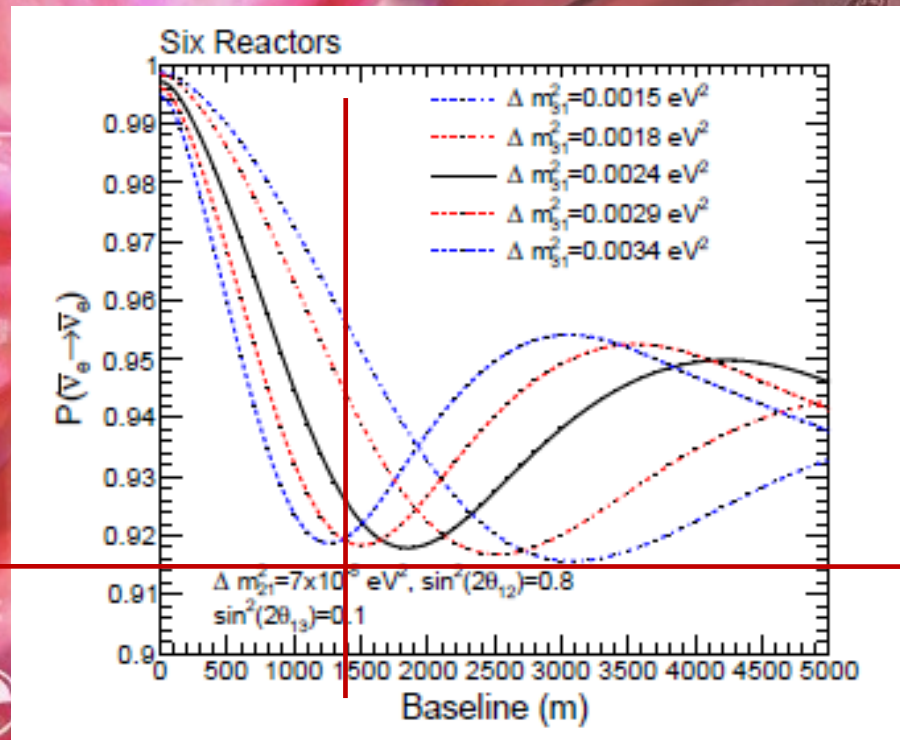
⁹*Division of General Education, Seokyeong University, Seoul, 136-704, Korea*

¹⁰*Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

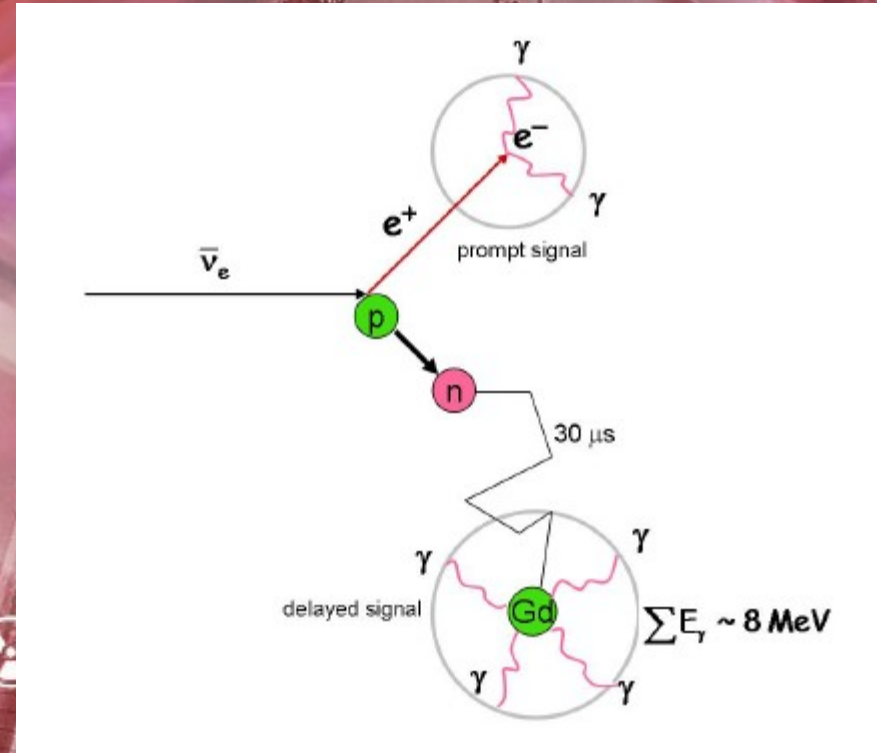
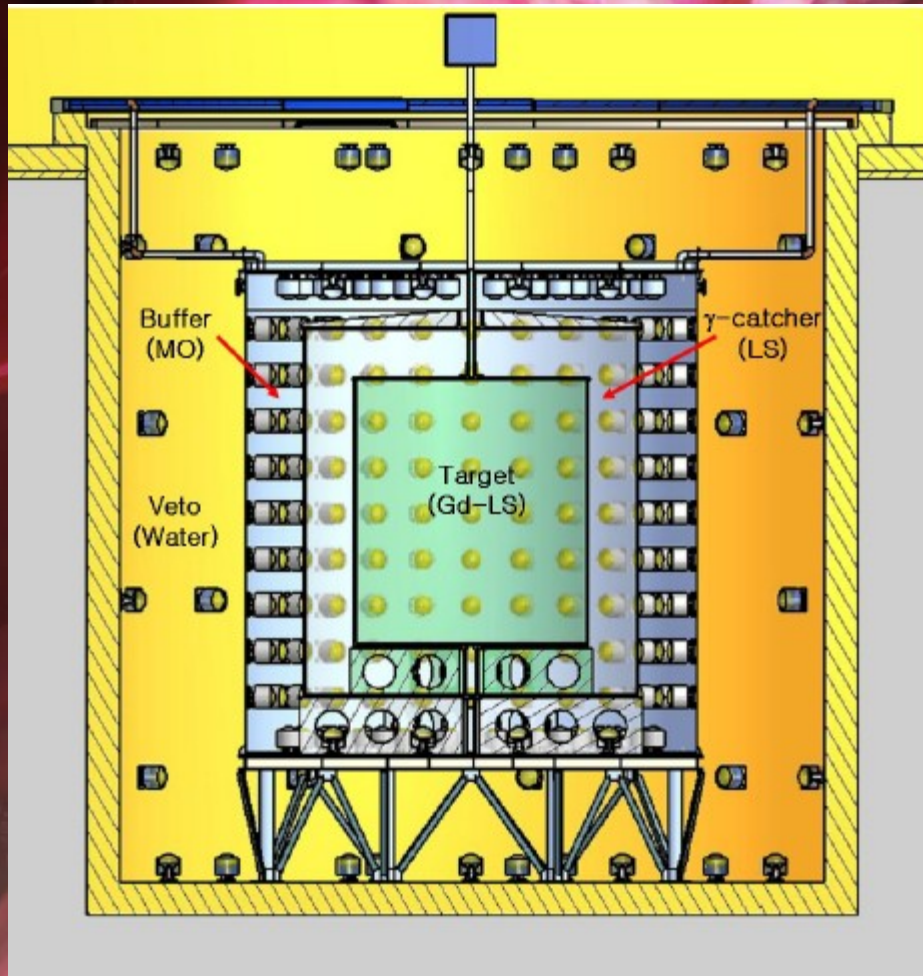
¹¹*Department of Fire Safety, Seoyeong University, Gwangju, 500-742, Korea*

¹²*Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea*

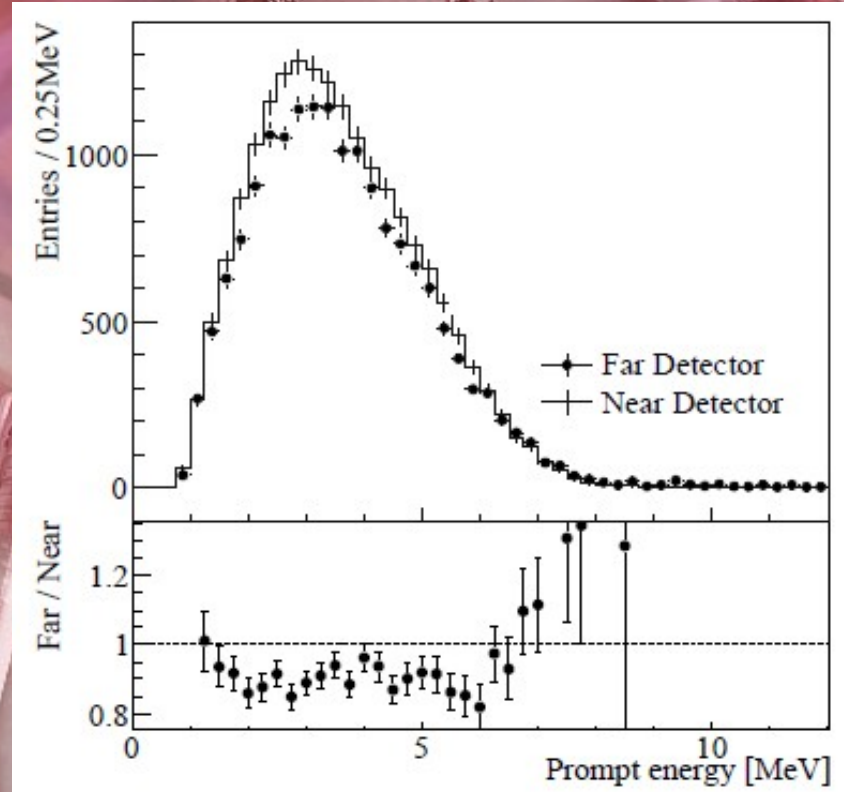
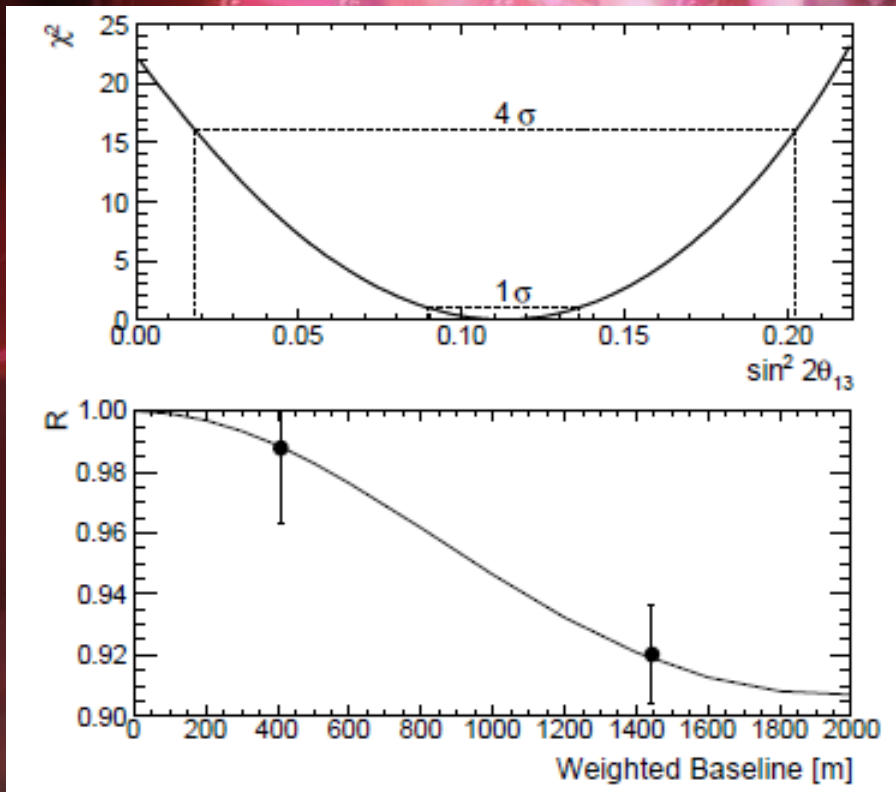
Расстояние до детектора



Детектирование нейтрино



Результаты



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0,0113 \pm 0,013 \pm 0,019$$

$\theta_{13} \neq 0$ на уровне 6,3 σ

Вывод

Большим преимуществом экспериментов Daya Bay и RENO является использование идентичных детекторов расположенных на разных расстояниях от реакторов, что исключает систематические ошибки, связанные с расчётом потоков нейтрино от реакторов.

$$\Delta m_{12}^2 = 7,65 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$|\Delta m_{23}^2| = 2,4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0,304$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0,5$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0,024$$

Перспективы

- Нормальная или обратная иерархия масс?
- CP-нарушение ?
- Абсолютные значения масс нейтрино?
- Стерильные нейтрино?
- Нейтрино дираковские или майорановские?

