

## ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРИННЫХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

*Г.С.Видякин, В.Н.Выродов, Ю.В.Козлов, А.В.Мартемьянов,  
В.П.Мартемьянов, А.Н.Одинокоев, С.В.Сухотин, В.Г.Тарасенков,  
Е.В.Турбин, С.Г.Тюренок, С.В.Халтурцев, С.Х.Хакимов*

*Российский научный центр "Курчатовский институт"  
123182 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 25 октября 1993 г.

После переработки 21 февраля 1994 г.

В работе представлены новые результаты по наблюдению реакции обратного бета-распада протона, полученные в подземной лаборатории вблизи ядерных реакторов Красноярского комбината. Предыдущие результаты были существенно обогащены за счет режимов, связанных с поэтапной остановкой двух из трех реакторов. Определено значение сечения реакции обратного бета-распада протона:  $\sigma_{\text{экс}}(\bar{\nu}p) = (6,26 \pm 0,26) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{дел.}$  и ограничения на параметры нейтринных осцилляций  $\Delta m_{1,2}^2 \leq 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$  при  $\sin^2 2\theta = 1$  и  $\sin^2 2\theta \leq 0,15$  для  $\Delta m_{1,2}^2 \geq 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}^2$ .

Измерение сечения обратного бета-распада проводилось интегральным методом с помощью детектора, представленного в работе [1]. Детектор выполнен в виде шестигранной призмы, заполненной 458,4 кг гранулированного полиэтилена с плотностью 0,553 г/см<sup>3</sup> и пронизанной 90 пропорциональными <sup>3</sup>He счетчиками с пониженным собственным альфа-фоном [2]. Эффективность детектора к нейтронам от реакции обратного бета-распада протона  $\epsilon = (29,4 + 1,0)\%$ , светосила детектора (произведение эффективности на количество атомов водорода) составляет  $1,21 \cdot 10^{28}$ .

Сечение процесса обратного бета-распада при наличии осцилляций зависит от расстояния между реактором и детектором ( $R$ ) и записывается в виде

$$\sigma_{\text{экс}} = \sigma_0 [1 - l(R) \sin^2(2\theta)],$$

где

$$\sigma_0 = \int_E \sigma(E) n(E) dE$$

– сечение реакции в отсутствие осцилляций,

$$l(R) = \frac{1}{\sigma_0} \int_E \sigma(E) n(E) \sin^2 \left( 1,27 \frac{\Delta m^2}{E} R \right) dE$$

– осцилляционный член,  $\sigma(E)$  – дифференциальное сечение взаимодействия антинейтрино с протоном,  $n(E)$  – спектр реакторных антинейтрино,  $E$  – энергия антинейтрино в МэВ,  $\theta$  – угол смешивания двух состояний нейтрино.

Измерения проводились в потоке реакторных антинейтрино от трех реакторов, расположенных на расстояниях 57,0; 57,6 и 231,4 м от детектора. Живое время всего эксперимента составило –  $800 \cdot 10^5$  с.

Результаты измерений можно представить в виде системы из семи уравнений:

$$\begin{aligned}
 (+ + +) & 1,058N_1 + 1,041N_2 + 1,058N_3 + N_{\Phi} = 404,9 \pm 1,1 \\
 (+ + -) & 1,058N_1 + 0,882N_2 + 0,000N_3 + N_{\Phi} = 380,6 \pm 1,9 \\
 (+ - +) & 1,059N_1 + 0,000N_2 + 1,059N_3 + N_{\Phi} = 292,6 \pm 2,7 \\
 (+ - -) & 1,026N_1 + 0,000N_2 + 0,000N_3 + N_{\Phi} = 276,8 \pm 1,5 \\
 (- + +) & 0,000N_1 + 1,027N_2 + 1,047N_3 + N_{\Phi} = 284,8 \pm 2,2 \\
 (- - +) & 0,000N_1 + 0,000N_2 + 1,051N_3 + N_{\Phi} = 166,6 \pm 5,6 \\
 (- - -) & 0,000N_1 + 0,000N_2 + 0,000N_3 + N_{\Phi} = 157,1 \pm 2,1,
 \end{aligned}$$

где "+" – режим, когда реактор включен, "-" – реактор выключен,  $N_1$  – счет нейтринных событий за  $10^5$  с, связанных с работой реактора, удаленного на 57,0 м,  $N_2$  – на 57,6 м,  $N_3$  – на 231,4 м,  $N_{\Phi}$  – счет фоновых событий, который складывается из нейтронного фона и фона альфа-частиц, связанного с естественной радиоактивностью стенок счетчиков. Эффекты от всех реакторов приведены к одной мощности, а в уравнениях введены поправочные коэффициенты, учитывающие реальную мощность реакторов.

Все три реактора идентичны и работали практически на одной мощности, кроме того, расстояния от детектора до первого и второго реакторов отличаются на  $\sim 1\%$ , поэтому эффекты от первого и второго реакторов сведены к эффекту от одного реактора, удаленного на расстояние 57,0 м.

В результате была получена переопределенная система уравнений:

$$\begin{aligned}
 2,077N_1 + 1,058N_3 + N_{\Phi} &= 404,9 \pm 1,0 \\
 1,921N_1 + 0,000N_3 + N_{\Phi} &= 380,6 \pm 1,9 \\
 1,059N_1 + 1,059N_3 + N_{\Phi} &= 292,6 \pm 2,7 \\
 1,026N_1 + 0,000N_3 + N_{\Phi} &= 276,8 \pm 1,5 \\
 1,005N_1 + 1,047N_3 + N_{\Phi} &= 284,8 \pm 2,2 \\
 0,921N_1 + 0,000N_3 + N_{\Phi} &= 266,0 \pm 2,4 \\
 0,000N_1 + 1,051N_3 + N_{\Phi} &= 166,6 \pm 5,6 \\
 0,000N_1 + 0,000N_3 + N_{\Phi} &= 157,1 \pm 2,1.
 \end{aligned}$$

Решение этой системы уравнений приводит к следующим результатам:

$$N_1 = 114,54 \pm 1,09, \quad N_3 = 8,07 \pm 1,43, \quad N_{\Phi} = 159,4 \pm 1,46;$$

при этом  $\chi^2 = 0,97$ , а  $P(\chi^2) = 0,43$ .

Имеются два общепризнанных метода оценки осцилляционных параметров. Первый – сравнение экспериментального сечения с  $\sigma_0$ . Другой – измерение на двух расстояниях, когда сравниваются величины

$$K_{\text{эксп}} = \frac{N_1}{N_3} \left( \frac{R_1}{R_3} \right)^2 \quad \text{и} \quad K_{\text{теор}} = \frac{1 - I(R_1) \sin^2 2\theta}{1 - I(R_3) \sin^2 2\theta},$$

где  $N_1$  и  $N_3$  – эффекты при измерениях на расстояниях  $R_1$  и  $R_3$  от реактора. Это отношение малочувствительно к спектру антинейтрино и мощности реактора.

Из измерений на двух реакторах (удаленных на 57,0 и 57,6 м) следует величина сечения реакции обратного бета-распада на протоне в пересчете на одно деление  $^{235}\text{U}$  с небольшой (0,7%) поправкой на композицию горючего:  $\sigma_{\text{эксп}}(\bar{\nu}p) = (6,26 \pm 0,26) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{дел}$  (в ошибке учтены неопределенности в

знании эффективности детектора (3,4%) и мощности реактора (2,5%). Теоретическое сечение  $\sigma_0$  рассчитывается по формуле

$$\sigma_0(\bar{\nu}p) = 0,98 \frac{G_V^2 + 3G_A^2}{\pi c^2 \hbar^4} \int_E n(E)(E - 1,293) [(E - 1,293)^2 + 0,511^2]^{1/2} dE,$$

где 0,98 – коэффициент, учитывающий поправки на эффекты отдачи, слабый магнетизм и поправки однофотонного обмена [3]. Для расчета использовались  $n(E)$  – спектр реакторных антинейтрино Шрекенбаха из работы [4],  $G_V = 1,41271 \cdot 10^{-43}$  эрг·см<sup>3</sup> [5] и  $G_A/G_V = 1,2628 \pm 0,0019$  – наилучшая оценка по работе [6].

Сравнение экспериментально полученного сечения реакции с сечением, рассчитанным без учета осцилляций ( $\sigma_0 = (6,33 \pm 0,17) \cdot 10^{-43}$  см<sup>2</sup>/дел), дает отношение

$$\frac{\sigma_{\text{эксп}}(\bar{\nu}p)}{\sigma_0(\bar{\nu}p)} = (0,99 \pm 0,05).$$

При сравнении эффектов от ближнего и дальнего реакторов получаем отношение

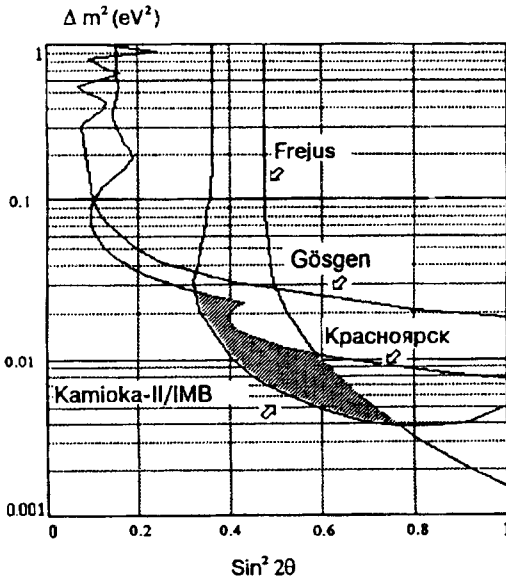
$$K_{\text{эксп}} = \frac{N_1}{N_3} \left( \frac{R_1}{R_3} \right)^2 = 0,86 \pm 0,15.$$

Обработка результатов измерений обоими методами приводит к следующим ограничениям на параметры нейтринных осцилляций с 90%-ным уровнем достоверности:

$$\Delta m_{1,2}^2 \leq 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2 \quad \text{при} \quad \sin^2 2\theta = 1,$$

$$\sin^2 2\theta \leq 0,15 \quad \text{для} \quad \Delta m_{1,2}^2 \geq 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}^2.$$

На рисунке показаны полученные ограничения на параметры нейтринных осцилляций.



Ограничения на параметры нейтринных осцилляций

В работе группы КАМИОКА-II [7] утверждается, что обнаружены осцилляции типа  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ . На рисунке область разрешенных параметров лежит справа от представленной кривой. В работах [8,9] даны ограничения на параметры нейтринных осцилляций (на рисунке запрещенные области лежат правее кривых). Заштрихованная область удовлетворяет результатам всех представленных экспериментов. Для того чтобы подтвердить или исключить возможность существования осцилляций с параметрами, соответствующими заштрихованной области, необходимо провести измерения сечения обратного бета-распада на ядрах водорода при большем удалении детектора от источника нейтрино (антинейтрино) – 1 км и более.

В заключение авторы выражают благодарность С.Т.Беляеву за интерес к работе и полезные обсуждения, А.И.Кирееву и Э.В.Лыхину за помощь в подготовке и выполнении эксперимента, а также персоналу реакторов за обеспечение хороших условий проведения работ.

- 
1. Г.С.Видякин, В.Н.Выродов, И.И.Гуревич и др., ЖЭТФ **98**, 764 (1992).
  2. Г.С.Видякин, В.Н.Выродов, Ю.В.Козлов и др., ПТЭ №4, 70 (1989).
  3. С.А.Фаянс, ЯФ **42**, 929 (1985).
  4. K. Screckenbach, G.Colvin, W.Gelltly et al., Phys. Lett. **160B**, 325 (1985).
  5. D.H.Wilkinson, Nucl. Phys. **A317**, 474 (1982).
  6. J.Deutch and P.Quin, Precision Tests of the Standard Electroweak Model. World Scientific Advanced Series on Directions in High Energy Physics (1993); P.Langacker, Editor.
  7. K.S.Hirata, K.Inoue, T.Ishida et al. Phys. Lett. **B280**, 146 (1992).
  8. R.Becker-Szendy, C.B.Bratton, D.Casper et al., Phys. Rev. **D 46**, 3720 (1992).
  9. Ch.Berger, M.Fröhlich, H.Mönch et al., Phys. Lett. **245B**, 305 (1990).