

# ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕАКТОРНЫХ АНТИНЭЙТРИНО С ДЕЙТРОНОМ НА РОВЕНСКОЙ АЭС

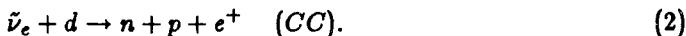
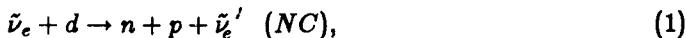
*А.Г.Вершинский, А.А.Мелузов, Л.А.Микаэлян, С.В.Николаев,  
М.Д.Скорохватов, А.В.Этенко*

*Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова  
123182, Москва*

Поступила в редакцию 10 апреля 1991 г.

Приведены новые результаты экспериментального исследования процессов взаимодействия реакторных антинейтрино с дейtronом, идущих по каналам нейтральных (*NC*) и заряженных (*CC*) токов. Измеренные сечения,  $\sigma_{NO} = (2,71 \pm 0,46$  (статистика)  $\pm 0,11$  (систематика))  $\cdot 10^{-44} \text{ см}^2/\text{деление}$  и  $\sigma_{CC} = (1,17 \pm 0,14$  (статистика)  $\pm 0,07$  (систематика))  $\cdot 10^{-44} \text{ см}^2/\text{деление}$  находятся в согласии с предсказанием стандартной модели электрослабых взаимодействий.

Недавно в работе<sup>1</sup> мы сообщили о наблюдении в эксперименте на реакторе Ровенской АЭС процессов взаимодействия электронных антинейтрино с дейtronом:



Обозначения (*NC*) и (*CC*) указывают на взаимодействие между нейтральными и заряженными токами.

Интерес к эксперименту связан, в основном, с открывающейся возможностью изучения слабых нейтральных токов в пределе нулевого переданного импульса ( $E_\nu < 10$  МэВ), проверки минимальной модели электрослабой теории, а также с поиском эффектов, выходящих за рамки модели, таких как, например, нейтринные осцилляции  $\bar{\nu}_e \rightleftharpoons \bar{\nu}_x$ .

В настоящей работе приводятся результаты последних измерений, продолжающихся в нейтринной лаборатории в потоке  $\bar{\nu}_e$  от реактора ВВЭР-440 с номинальной тепловой мощностью  $W = 1375$  МВт ( $\pm 2\%$ ). Схема эксперимента показана на рисунке (более подробно см<sup>1</sup>). Мишеню служит тяжелая вода высокого обогащения 99,9% весом  $2985 \pm 3$  кг и числом ядер  $N_d = 1,796 \cdot 10^{29}$ . Реакции регистрируются только по нейтронам с помощью

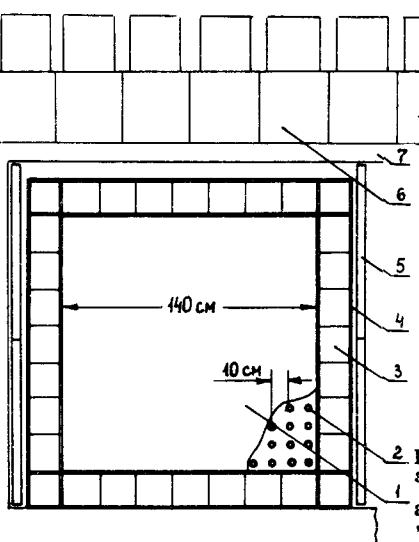


Рис. 1. Схема эксперимента:  $D_2O$  детектор - 1;  $^3\text{He}$ -счетчик - 2; графит - 3; кадмий - 4; система антисовпадений: сцинтилляционные пластины - 5; "зонт" - 6; полистилен - 7

пронизывающих мишень 196  $^3\text{He}$ -счетчиков. Для подавления фона, связанного с космическим излучением, используется система антисовпадений из сцинтилляционных пластин, расположенных вокруг детектора, и "зонта" из баков с жидким сцинтиллятором. Детектор установлен на расстоянии  $R = 18,06 \pm 1,05$  м от центра активной зоны реактора.

Отбор событий проводится по амплитуде и кратности импульсов во временном окне ожидания  $T_{\text{ож}} = 1500$  мкс. Для регистрации процесса (1) с одним нейтроном в конечном состоянии используются только одиночные события, которые не сопровождаются повторными импульсами в течении  $T_{\text{ож}}$ . В реакции (2) рождаются два нейтрона, поэтому она может быть источником как одиночных событий, если один из нейтронов не был зарегистрирован, так и двухкратных событий, т.е. с повторным импульсом за время  $T_{\text{ож}}$ . События с кратностью три и выше возникают только в фоновых процессах и регистрируются для контроля. Импульсы системы антисовпадений блокируют сбор полезных событий на время  $T_{\text{бл}} = 1000$  мкс, а фоновые события, поступившие за время  $T_{\text{бл}}$  контролируются отдельно для выяснения постоянства фона.

К настоящему времени были проведены измерения в течение двух кампаний работы реактора - кампаний 1989 г. <sup>1</sup> и 1990 г. В эксперименте 1989 г. источником коррелированного с мощностью реактора фона одиночных событий служили нейтроны реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ , которые проникали в детектор из полистиолена, расположенного в зазоре между пластинами антисовпадений и корпусом детектора. Поэтому в работе <sup>1</sup> при определении сечения реакции (1) использовались только данные центральной части детектора, содержащей  $10 \times 10$  счетчиков. В эксперименте 1990 г. полистиолен вокруг детектора был заменен графитовой кладкой и слоем кадмия (см. рисунок). Суммарный коэффициент ослабления коррелированных нейтронов составил  $0,10 \pm 0,02$ . Изменение пассивной защиты позволило при анализе событий реакции (1) использовать данные всего детектора, т.е. увеличить светосилу эксперимента в  $\approx 1,8$  раза.

Эффективности регистрации событий реакций (1) и (2) находились экспериментально с помощью нейтронных источников  $SbBe$  ( $E_n = 24$  кэВ) и  $PuLi$

(средняя энергия нейтронов  $\approx 200$  КэВ), активность которых определялась с точностью около двух процентов в отдельном эксперименте. Источник последовательно с шагом 10 см перемещался внутри детектора, имитируя равномерное рождение нейтронов по объему мишени. Эффективность детектора находилась усреднением по всем точкам рождения. С учетом амплитудного отбора, просчетов двукратных событий и конечного интервала  $T_0$ , были получены следующие значения:

$$\langle \epsilon \rangle = 0,330 \pm 0,010, \quad (3)$$

$$2 \langle \epsilon(1 - \epsilon) \rangle = 0,255 \pm 0,009, \quad (4)$$

$$\langle \epsilon^2 \rangle = 0,236 \pm 0,012, \quad (5)$$

где (3), (4) и (5) соответствуют эффективностям регистрации событий реакции (1) и одного или двух нейтронов реакции (2). Погрешности в (3)-(5) определяются, в основном, разницей энергетических спектров нейтронов реакций (1), (2) и использованных источников. Нейтроны от PuLi имеют более жесткий спектр, поэтому небольшие отличия (1,5 – 4%) результатов, полученных с SbBe и PuLi источниками, принимались в качестве верхних границ ошибок (3)-(5), связанных с энергиями нейтронов.

Полное число взаимодействий в мишени детектора по каналам нейтральных и заряженных токов связано с мощностью реактора:

$$N_{NC(CC)} = \frac{W}{E_f} \frac{1}{4\pi R^2} N_d \sigma_{NC(CC)}, \quad (6)$$

где  $E_f = \sum \alpha_i^i E_f$  – средняя энергия, поглощаемая в активной зоне при одном делении,  $\sigma = \sum \alpha_i^i \sigma$  – среднее для данного изотопного состава топлива сечение. Величины  $\alpha_i$  ( $i = 5, 9, 8, 1$ ) – это вклады  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$  и  $^{241}\text{Pu}$  в общее число делений.

Измерения были проведены при выключенном реакторе ( $W = 0$ , измерение фона) и в период работы реактора на двух стационарных уровнях мощности (измерение эффекта и фона). Данные измерений приведены в таблице, в которой показаны также значения эффективной мощности  $W_{eff}$ , учитывающей вклад других реакторов Ровенской АЭС в полный поток нейтрин.

$W$ МВт	$W_{eff}$ МВт	$T_{изм} \cdot 10^5$ с	скорости счета с кратностью $i$ , $N_i$ за $10^5$ с		
			$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
0	49,5	18,3	$8153 \pm 21$	$419 \pm 5$	$84 \pm 2$
855,3	904,8	10,0	$8309 \pm 29$	$445 \pm 7$	$84 \pm 3$
1368,1	1409,4	28,3	$8388 \pm 17$	$470 \pm 4$	$80 \pm 2$

Нейтринный эффект за  $10^5$  с, соответствующий номинальной мощности 1375 МВт, по данным измерений, приведенным в таблице, составил:

$$N_1 = 238 \pm 27 \text{ и } N_2 = 51 \pm 6.$$

Из числа зарегистрированных одиночных событий был вычен коррелированный нейтринный фон от реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ :

а)  $4 \pm 1$  событие за  $10^5$  с, связанных с примесью водорода к тяжелой воде;  
 б)  $14 \pm 4$  событий за  $10^6$  с, обусловленных нейтронами, притекающими из водородосодержащих материалов за графитовой кладкой. Последняя величина была найдена как на основании расчета, так и прямым сравнением данных 1989 г. для всего детектора, полученных в условиях притока коррелированных нейтронов без ослабления.

Полное число взаимодействий  $N_{NC} = 500 \pm 85$  и  $N_{CC} = 216 \pm 25$  были вычислены с использованием (3)-(5) из соотношений:

$$\langle \epsilon^2 \rangle N_{CC} = N_2,$$

$$\langle \epsilon \rangle N_{NC} + 2 \langle \epsilon(1 - \epsilon) \rangle N_{CC} = (N_1 - 18)$$

На основании (6) были найдены сечения:

$$\sigma_{NC} = [2,71 \pm 0,46(\text{статистика}) \pm 0,11(\text{систем.})] \cdot 10^{-44} \text{см}^2/\text{деление}$$

$\delta_{CC} = [1,17 \pm 0,14(\text{статистика}) \pm 0,07(\text{систем.})] \cdot 10^{-44} \text{см}^2/\text{деление}$   
соответствующие изотопному составу активной зоны реактора:

$$\alpha_5 = 59,9\%; \quad \alpha_9 = 28,1\%; \quad \alpha_8 = 7,4\%; \quad \alpha_1 = 4,6\%.$$

Экспериментальные сечения согласуются с ожидаемыми:

$$\begin{aligned} \sigma_{NC} &= (2,96 \pm 0,12) \cdot 10^{-44} \text{см}^2/\text{деление}, \\ \sigma_{CC} &= (1,08 \pm 0,07) \cdot 10^{-44} \text{см}^2/\text{деление} \end{aligned} \quad (7)$$

вычисленными в работе <sup>2</sup> для стандартного энергетического спектра  $\bar{\nu}_e$  реактора ВВЭР-440. Погрешности в (7) учитывают неопределенности, связанные с использованием спектра. В расчетах сечений не рассматривались вклады обменных мезонных токов, слабого магнетизма, эффектов отдачи и радиационных поправок, что может вносить в (7) дополнительную ошибку масштаба 5–6%.

Более полный анализ результатов измерений, а также других экспериментальных <sup>3,4</sup> и теоретических <sup>5</sup> значений сечений реакций (1) и (2), будет проведен в готовящейся публикации.

Авторы благодарят Гапонова Ю.В. и Фаянса С.А. за полезные обсуждения теоретических вопросов и коллег по лаборатории за помощь в подготовке и проведении эксперимента.

### Литература

1. Вершинский А.Г., Мелузов А.А., Микаэлян Л.А. и др. Письма в ЖЭТФ, 1990, 51, 82.
2. Климов Ю.В. и др. ЯФ, 1990, 52, 1574.
3. Pasierb E. et al. Phys.Rev. Lett., 1979, 43, 96.
4. Видякин Г.С., Выродов В.Н., Гуревич И.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1990, 51, 245.
5. Гапонов Ю.В. Труды международной школы по физике слабых взаимодействий при низких энергиях, Дубна, 1991.