

ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ НА РЕАКТОРЕ РОВЕНСКОЙ АЭС

А.А.Кувшинников, Л.А.Микаэлян, С.В.Николаев, М.Д.Скорохватов,
А.В.Этенко

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

Поступила в редакцию 2 июля 1991 г.

На реакторе Ровенской АЭС с помощью детектора интегрального типа нового поколения завершено измерение сечения реакции $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. На основании 120 тысяч зарегистрированных событий реакции получено значение: $\sigma = 6,29 \cdot 10^{-43}$ см²/деление ²³⁵U + 2,9%. Анализ результатов показал хорошее согласие предсказаний стандартной модели электрослабого взаимодействия с данными эксперимента. Получено значение аксиальной константы бета-распада: $G_A = (1,777 + 0,042) \cdot 10^{-49}$ λ = 1,256 + 0,030.

Настоящая работа завершает цикл измерений полного сечения реакции



начатые на реакторе ВВЭР-440 Ровенской АЭС в 1983 г.

Цель этой работы состоит в возможно более точном изучении взаимодействия электронного антинейтрино со свободным нуклоном, в измерении фундаментальных констант бета-распада и проверке минимальной модели электрослабого взаимодействия. Сечение реакции (1) используется также при анализе ведущихся экспериментов по изучению реакций взаимодействия $\tilde{\nu}_e$ с дейтроном ¹, для абсолютной нормировки измеряемых на РАЭС энергетических спектров $\tilde{\nu}_e$ ², при поиске осцилляций $\tilde{\nu} = \tilde{\nu}_x$ ³ и при разработке основ дистанционного контроля реакторов по нейтринному излучению ⁴.

В измерениях использовался созданный для этих целей детектор реакции (1) интегрального типа, усовершенствованный по сравнению с детектором, применявшимся ранее ⁵. Внесенные усовершенствования позволили улучшить соотношение эффекта и фона, точнее определить число протонов мишени и эффективность регистрации событий реакции (1). Напомним, что в детекторе интегрального типа реакция (1) регистрируется только по образующимся нейтронам с помощью пропорциональных счетчиков, наполненных ³He.

Мишенью для $\tilde{\nu}_e$ и замедлителем нейтронов служила дистиллированная вода, в которой счетчики располагались в виде квадратной матрицы 16 × 16 с шагом 70 мм. Отбор полезных событий проводился по амплитуде, соответствующей пику полного поглощения продуктов реакции $n + {}^3\text{He} \rightarrow T + p$, для импульсов в центральных 14 × 14 счетчиков.

Как и в более ранних работах на РАЭС для определения рабочего объема мишени использовался принцип компенсации притока и утечки нейтронов на границах рабочего объема. Специально проведенные эксперименты с использованием низкоэнергетических источников нейтронов Pu - Li ($E_n \sim 200$ кэВ) и Sb - Be ($E_n = 24$ кэВ) позволили с погрешностью, не превышающей 0,5%, проверить степень компенсации и зафиксировать рабочий объем мишени V_{eff} . Полное число протонов мишени N_p определялось из соотношения $N_p = V_{eff} n$, $n = 2 \cdot \rho \cdot N_A / A = 6,66 \cdot 10^{22}$ см³, где $\rho = 0,9964$ г·см³ - плотность воды при

рабочей температуре 25°C, $A = 18,016$ - атомный вес воды, N_A - число Авагадро.

Абсолютное значение эффективности регистрации нейтронов измерялось по множественности мгновенных нейтронов спонтанного деления ^{252}Cf . При этом использовалось новое значение среднего числа мгновенных нейтронов на один акт деления ^{252}Cf : $\bar{\nu}_p = 3,757 \pm 0,010$ ⁶ (ранее мы пользовались величиной $\bar{\nu}_p = 3,735 \pm 0,014$ ⁷). Более подробно методические вопросы обсуждаются в готовящейся публикации.

В течение двух кампаний работы реактора было проведено два цикла измерений сечения реакции (1) в несколько отличающихся условиях (далее эксперименты 1 и 2). Данные измерений и условия экспериментов представлены в табл.1.

Таблица 1

	Эксперимент 1	Эксперимент 2
число протонов, N_p	$5,034 \cdot 10^{28} \pm 0,5\%$	$4,953 \cdot 10^{28} \pm 0,5\%$
эффективность, ϵ	$0,402 \pm 1\%$	$0,403 \pm 1\%$
эффект + фон за 10^5с	$3502,6 \pm 7,9$	$4092,9 \pm 9,9$
нейтринный эффект за 10^5	$1210 \pm 17,1$	$1161,3 \pm 15,7$
расстояние, R^2	$325,66 \text{ м}^2 \pm 0,5\%$	$336,38 \text{ м}^2 \pm 0,5\%$

Измерения фона детектора проводились при остановке реактора на частичную перегрузку топлива. Для нахождения нейтринного эффекта отбирались серии измерений при работе реактора по мощности, близкой к номинальной (120 тысяч нейтринных событий). После вычитания фона были получены скорости счета нейтринных событий N_ν в каждом эксперименте (см. табл.1), соответствующие тепловой мощности $W = 1375 \text{ МВт} \pm 2\%$ и одинаковому среднему составу активной зоны реактора:

Изотоп	^{235}U	^{239}Pu	^{238}U	^{241}Pu
Вклад в общее число делений	0,614	0,274	0,074	0,038

Экспериментальное значение сечения определялось из соотношения

$$N_\nu = \frac{W}{E_f} \frac{1}{4\pi R^2} (N_p \epsilon) \sigma^{\text{нсп}}, \quad (3)$$

где $E_f = 204,8 \text{ МэВ} \pm 0,4\%$ ⁸ - средняя энергия, поглощаемая в активной зоне реактора на одно деление; R - расстояние между центрами детектора и активной зоны реактора. Значение $\sigma^{\text{нсп}}$ в каждом эксперименте и результирующая величина, найденная после усреднения только статистики измерений, приведены в табл.2.

Таблица 2

Эксперимент 1	$\sigma^{\text{нсп}} = 5,83 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 2,1\% \text{ (дет)} \pm 2,1\% \text{ (реак)}$
Эксперимент 2	$\sigma^{\text{нсп}} = 5,87 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 2,1\% \text{ (дет)} \pm 2,1\% \text{ (реак)}$
Результат	$\sigma^{\text{нсп}} = 5,85 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 1,8\% \text{ (дет)} \pm 2,1\% \text{ (реак)}$

Первая погрешность в $\sigma^{\text{нсп}}$ связана с характеристиками детектора и статистикой, вторая учитывает погрешность измерения мощности W энергии E_f и неопределенность в геометрии. Складывая погрешности квадратично находим окончательный результат для приведенного выше состава ядерного топлива

$$\sigma^{\text{нсп}} = 5,85 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 2,8\%. \quad (4)$$

Ожидаемое (теоретическое) сечение реакции (1) определялось в рамках стандартной $V - A$ модели слабого взаимодействия суммированием вероятности захвата моноэнергетических, $\tilde{\nu}_e$ протоном по спектру реакторных антинейтрино $\rho(E_\nu)$:

$$\sigma^{\text{теор}} = \int \sigma^{V-A}(E_\nu) \rho(E_\nu) dE_\nu. \quad (5)$$

Значение σ^{V-A} , выраженное через векторную константу бета-распада G_V , а также импульс p и энергию E позитрона реакции (1), можно представить в виде

$$\sigma^{V-A} = \frac{1}{\pi c^3 \hbar^4} G_V^2 (1 + 3\lambda^2) p E (1 - \delta_c) (1 + \delta_R), \quad (6)$$

где δ_c - поправка, включающая учет ядерной структуры и эффекты отдачи; δ_R - внешняя радиационная поправка; λ отношение аксиальной и векторной констант бета-распада. Поправки δ_c и δ_R были найдены в работах ^{9,10}, значение

$$G_V^2 (1 + 3\lambda^2) = [3,4135 \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3]^2 \pm 0,3\% \quad (7)$$

принято по результатам исследований прямой реакции - распада свободного нейтрона и соответствует времени жизни $\tau_n = 888,6 \pm 2,6 \text{ с}$ ¹¹.

Спектры антинейтрино от осколков деления ²³⁵U, ²³⁹Pu и ²⁴¹Pu взяты из работ ^{12,13}, спектр $\tilde{\nu}_e$ осколков ²³⁸U найден на основании расчета ¹⁴.

Определенное таким образом ожидаемое для смеси (2) сечение составило:

$$\sigma^{\text{теор}} = 5,94 \cdot 10^{-44} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 2,7\%, \quad (8)$$

где погрешность определяется неопределенностью в спектре $\tilde{\nu}_e$.

Следуя традиции приведем также экспериментальное и теоретическое сечения, пересчитанные к спектру ²³⁵U:

$$\sigma_{\text{эксп}} = 6,29 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 2,9\%, \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{теор}} = 6,38 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 2,5\%, \quad (10)$$

Сделаем некоторые выводы из результатов экспериментов:

1) из (4) и (8) получаем:

$$\sigma_{\text{эксп}}/\sigma^{\text{теор}} = 0,985 \pm 0,038, \quad (11)$$

что подтверждает хорошее согласие стандартной модели с экспериментальными данными;

2) сравнение (7) с измеренным в настоящем эксперименте значением

$$G_V^2 (1 + 3\lambda^2) = [3,388 \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3]^2 \pm 3,9\% \quad (12)$$

и их совпадение в пределах ошибок, является, по-видимому, наиболее точной проверкой равенства вероятностей прямого и обратного процессов, протекающих под действием слабых взаимодействий. Соответствующее (12) время жизни свободного нейтрона составляет

$$\tau_n = 902 \pm 35\text{с}; \quad (13)$$

3) используя значение $G_V/(hc)^3 = (1,14939 \pm 0,00065) \cdot 10^{-5}$ ГэВ⁻², найденное в ¹⁵ по данным $0^+ \rightarrow 0^+$ переходов и результат (12), находим

$$\lambda = 1,256 \pm 0,030,$$

$$G_A = (1,777 \pm 0,042) \cdot 10^{-49} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3; \quad (14)$$

4) следуя методике ¹⁶ анализа данных было получено ограничение на спиральность $\tilde{\nu}_e$:

$$h \geq 0,95 \text{ (уровень достоверности - 68\%)}$$

В заключение отметим, что результат нового измерения сечения реакции (1) хорошо согласуется с полученным на РАЭС ранее (см. ¹⁷) для ²³⁵U

$$\sigma_{\text{эксп}} = 6,28 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 5\%$$

и усредненным (по всем эксперимента до 1988 г.) значением сечения, найденным в работе ¹⁸

$$\sigma_{\text{эксп}} = 6,32 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{деление} \pm 3,3\%.$$

Авторы благодарят коллег по научному отделу и персонал Ровенской АЭС за помощь при проведении экспериментов и обработке результатов измерений.

1. Вершинский А.Г., Мелузов А.А., Микаэлян Л.А. Письма в ЖЭТФ, 1991, 53, 489.
2. Климов Ю.В., Копейкин В.И. и др. ЯФ, 1990, 52, 1574.
3. Микаэлян Л.А., Николаев С.В. и др. Труды международной школы по физике слабых взаимодействий при низких энергиях, Дубна, 1991.
4. Архипов В.В., Кетов С.Н. и др. Изв. АН СССР сер. Энергетика и транспорт, 1990, N 6, 3.
5. Афонин А.И., Беленький С.Н. и др. Препринт ИАЭ-4878/2, М.: 1989.
6. Holden N.E., Zucher M.S. Proc. Topl. Mtg. Safeguards and Technology, Hilton Head, South Carolina, 1983 г.
7. Lazarev Yu.A. Atomic Energy Review, 1977, 15, 75.
8. Копейкин В.И. Препринт ИАЭ-4305/2 М., 1988.
9. Фаянс С.А. ЯФ, 1985, 42, 929.
10. Vogel P. Phys. Rev., 1984, D29, 1918.
11. Dubbers D. et al. Europhys Lett., 1990, 11, 195.
12. Feilitzsch F. et al. Phys. Lett., 1982, 118B, 162.
13. Sreckenbach K. et al. Phys. Lett., 1985, 160B, 325.
14. Vogel P. et al. Phys. Rev., 1981, C24, 1543.
15. Hardy C et al. Nucl. Phys., 1990, A509, 429.
16. Ахмедов Е.Х., Боровой А.А., Гапонов Ю.В., Херувимов А.Н. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 258.
17. Афонин А.И., Кетов С.Н., Копейкин В.И. ЖЭТФ, 1988, 94, 1.
18. Микаэлян Л.А., Скорохватов М.Д., Этенко А.В. Письма в ЖЭТФ, 1988, 47, 124.