

СПЕКТР ЭЛЕКТРОННЫХ АНТИНЕЙТРИНО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА И ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОСЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

С.Н.Кетов, В.И.Копейкин, Л.А.Микаэлян,
С.В.Толоконников

На статистике 78 тыс. зарегистрированных событий обратного бета-распада на Ровенской АЭС измерен абсолютный спектр $\tilde{\nu}_e$, необходимый для экспериментальной проверки теории электрослабого взаимодействия в мало изученном спектре электронных антинейтрино. Приведены "рекомендованные" сечения взаимодействия $\tilde{\nu}_e$ с дейтроном в каналах нейтрального и заряженного токов и сечение $\tilde{\nu}_e - e$ рассеяния.

1. Изучение слабого взаимодействия с участием электронных антинейтрино, проводимое на ядерных реакторах, требует надежного и возможно более точного знания энергетического спектра $\tilde{\nu}_e$.

В настоящее время готовятся эксперименты, направленные на выяснение характеристик плохо изученных реакций, описываемых в теории электрослабого взаимодействия обменом Z^0 -бозоном (нейтральные токи). На Ровенской АЭС, например, предполагается измерить ¹ сечения процессов $\tilde{\nu}_e + d \rightarrow 2n + e^+$ и $\tilde{\nu}_e + d \rightarrow n + p + \tilde{\nu}_e$, определяющихся аксиальными константами заряженного и нейтрального тока и сечение $\tilde{\nu}_e - e$ рассеяния ², в которое входят нейтральный и заряженный токи и их интерференция. Исследование реакций с дейтроном готовится также в США ³. Знание спектров существенно и в экспериментах по поиску нейтринных осцилляций, ведущихся на различных реакторах группами ³⁻⁷.

2. Уточним понятие "спектр $\tilde{\nu}_e$ реактора". Известно, что он формируется в результате бета-распада осколков, возникающих при делении ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²³⁸U и ²⁴¹Pu, спектры которых отличаются друг от друга. Из-за накопления ²³⁹Pu суммарный спектр реактора заметно меняется в ходе кампании.

На практике однако оказывается, что средний за время эксперимента состав ядерного горючего на данном реакторе от кампании к кампании остается почти неизменным, а разные, но однотипные реакторы, такие как на Ровенской АЭС ⁴, в Гезгене ⁵ и Буже ⁶ по составу топлива мало отличаются друг от друга (см. табл.).

Вклады (%) делящихся изотопов в общее число делений

Эксперимент	Год	Расстояние от реактора	^{235}U	^{239}Pu	^{238}U	^{241}Pu
Гезген ⁵	81 – 82	37,9 м	62,7	26,5	6,7	4,1
– ” –	82 – 83	45,9 м	59,3	29,1	6,8	4,8
– ” –	84 – 85	64,7 м	55,1	32,2	7,0	5,7
Ровно ⁴	84	18 м	60,6	27,7	7,4	4,3
– ” –	85	25 м	55,7	31,3	7,6	5,4
– ” –	86	18 м	60,6	27,4	7,4	4,6

Таким образом можно говорить о стандартном спектре реактора, учитывая, при необходимости, только небольшие отклонения.

Эти отклонения можно учесть, если использовать спектры $\tilde{\nu}_e$, полученные независимым способом. Наилучшие результаты дает метод конверсии, позволяющий по суммарному спектру бета-электронов осколков данного изотопа найти соответствующий спектр $\tilde{\nu}_e$. Для ^{235}U и ^{239}Pu конвертированные спектры протабулированы в ⁸, а для двух остальных изотопов имеются расчеты, основанные на суммировании спектров индивидуальных осколков деления ⁹.

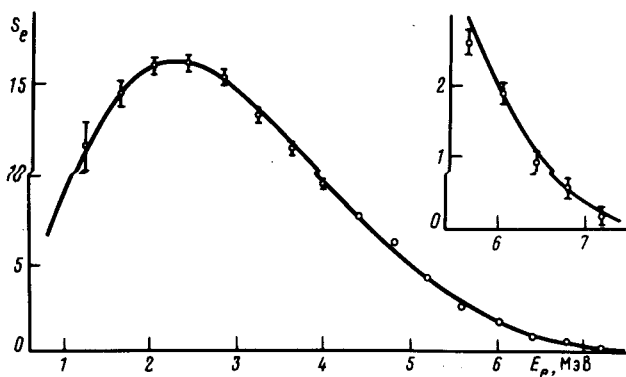
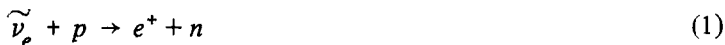


Рис. 1. Спектр позитронов реакции (1) ($10^{-44} \text{ см}^2 \cdot \text{дел}^{-1} \cdot \text{МэВ}^{-1}$); точки с ошибками – эксперимент, сплошная кривая – расчет по $\rho_R(E_\nu)$

3. В настоящей статье приводятся результаты измерений спектра $\tilde{\nu}_e$, проведенные на Ровенской АЭС по реакции



на расстояниях 18 и 25 м от реактора. Использовался сцинтилляционный спектрометр запаздывающих совпадений между позитроном и нейтроном реакции (1). Поскольку в последних экспериментах ^{4, 5, 7} не было обнаружено эффекта нейтринных осцилляций (см., однако, ⁶), полученные на 18 и 25 м спектры позитронов были усреднены друг с другом. Результирующий спектр $S^{\text{экс}}(E_e)$ (52 тыс. событий!) в абсолютных единицах представлен на рис. 1 (точки). Другие результаты, полученные на РАЭС, суммированы в ⁴.

Спектр антинейтрино $\rho(E_\nu)$ искался методом наибольшего правдоподобия в виде экспоненты со степенным рядом по E_ν в показателе. При минимизации функции правдоподобия ($\chi_{\text{min}}^2 \approx 0,7$ на степень свободы), наряду со спектром $S^{\text{экс}}(E_e)$ использовалось и полное сечение реакции (1), измеренной в том же потоке $\tilde{\nu}_e$ с помощью детектора интегрального типа, регистрировавшего только нейтроны реакции (1) (26 тыс. событий). В результа-

те было найдено выражение для спектра $\rho(E_\nu)$, МэВ⁻¹ дел⁻¹:

$$\rho_R(E_\nu) = 6,78 \exp \left[- (E_\nu/1,342) - (E_\nu/6,868)^2 - (E_\nu/8)^{10} \right] \quad 2,3 \leq E_\nu \leq 8,7 \quad (2)$$

матрица ошибок.

Этот спектр соответствует составу ядерного горючего

$$^{235}\text{U} - 59,6\%, \quad ^{235}\text{Pu} - 28,3\%, \quad ^{238}\text{U} - 7,4\%, \quad ^{241}\text{Pu} - 4,7\% \quad (3)$$

Высокая степень E_ν в (2) потребовалась, чтобы отразить крутое падение спектра позитронов в области $E_e > 5,6$ МэВ (рис. 1). В более узком диапазоне энергий спектр $\tilde{\nu}_e$ можно описать и трехпараметрическим распределением Гаусса, опробованным впервые в ¹⁰ и недавно в ⁵ (см. выражение (4) ниже). Спектр (2) приведен на рис. 2 б, а его погрешность (\pm ст. ошибка) – заштрихованной полосой на рис. 2 а.

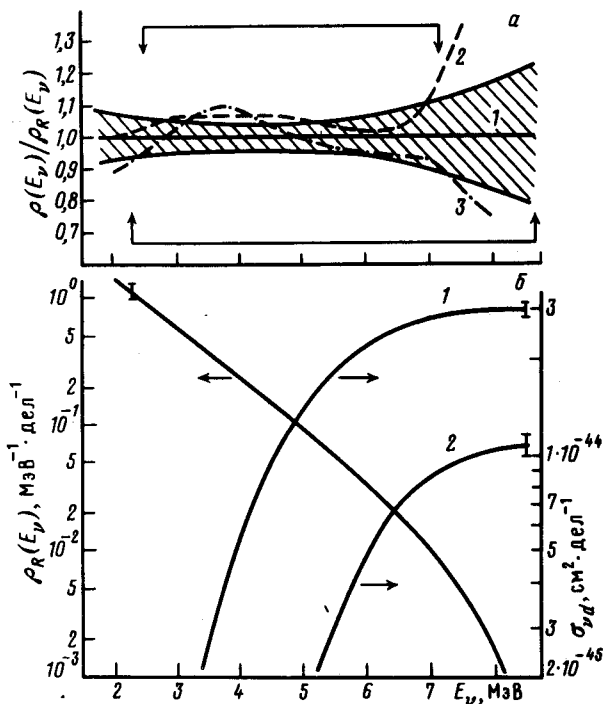


Рис. 2. а – Отношение спектров: 1 – настоящая работа; заштрихована полоса ± 1 стандартная погрешность; 2 – $\rho_G(E_\nu)$ ⁵; 3 – “конвертированный” спектр ^{8, 9}. Диапазоны измерений: $\rho_R(E_\nu)$ – стрелки внизу, $\rho_G(E_\nu)$ – вверху. б – $\rho_R(E_\nu)$ – настоящая работа; “накопления” сечения $\sigma_{\nu d}$ взаимодействия $\tilde{\nu}_e$ с дейтроном. 1 – нейтральный ток, 2 – заряженный ток

По спектру 2 найдены сечения взаимодействия $\tilde{\nu}_e$ с дейтроном: $\sigma^{dCC} = (1,05 \pm 7,3\%) \cdot 10^{-44}$ см²/дел (заряженный ток) и $\sigma^{dNC} = (2,89 \pm 4,9\%) \cdot 10^{-44}$ см²/дел (нейтральный ток), отношение $\sigma^{dCC} / \sigma^{dNC} = 0,364 \pm 3,6\%$ и отношение $\sigma(\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n) / \sigma^{dNC} = 20,2 \pm 2,5\%$. Приведенные ошибки учитывают только неопределенность в спектре $\tilde{\nu}_e$. В расчетах использовались выражения для сечений взаимодействия $\tilde{\nu}_e$ с дейтроном, в которых ядерная часть матричного элемента находилась в приближении эффективного радиуса ¹. В планируемом на РАЗС эксперименте ¹ предполагается одновременно измерить все приведенные выше величины. Были найдены также сечения $\tilde{\nu}_e - e$ рассеяния $\sigma(T > E_n)$ (10^{-45} см² дел⁻¹/электрон), где T – кинетическая энергия электрона, E_n – порог регистрации МэВ):

$$\sigma(> 1,5) = 5,04 \pm 4,3\%, \quad \sigma(> 2,5) = 1,52 \pm 4,3\%, \quad \sigma(> 3,5) = 0,46 \pm 5,3\%, \\ \sigma(> 4,5) = 0,127 \pm 7,3\%$$

Приведенные выше сечения $\tilde{\nu}_e - d$ и $\tilde{\nu}_e - e$ можно рассматривать как "рекомендованные" сечения, найденные в соответствии с минимальной моделью Э.—С. взаимодействия для "стандартного" спектра (2) реактора.

Хотя найденные погрешности сечений и их отношений сравнительно невелики, жесткая часть спектра $E_\nu > 7$ МэВ требует дальнейшего уточнения, тем более, что ее вклад в сечение σ^{dCC} не очень мал (см. рис. 2 б, где показаны "накопления" сечений $\int_{E_n}^{E_\nu} \rho(E_\nu) d\sigma(E_\nu)$).

4. В итоговой работе коллаборации ⁵ (Гезген, 30 тыс. событий) приведены спектры e^+ в диапазоне энергий 0,88 — 5,5 МэВ на трех расстояниях (см. таблицу), которые описываются общим спектром $\tilde{\nu}_e$

$$3,80 \cdot 10^{19} \exp(-0,571 E_\nu - 0,044 E_\nu^2) \text{ МэВ}^{-1} \text{ с}^{-1}$$

при средней мощности реактора 2810 Мвт. Отсюда легко найти ρ_G , $\text{МэВ}^{-1} \cdot \text{дел}^{-1}$

$$\rho_G(E_\nu) = 5,22 \exp(-0,571 E_\nu - 0,044 E_\nu^2) \quad 2,5 \leq E_\nu \leq 7,2 \quad (4)$$

для состава топлива, совпадающего в пределах 1 % с (3). Из рис. 2 а видно, что (4) согласуется в пределах взаимных ошибок со спектром 2 настоящей работы.

Учитывая множество факторов, влияющих на результаты, согласие между независимо измеренными спектрами можно считать удовлетворительным. Отметим, однако, что трехпараметрический спектр ρ_G нельзя использовать для нахождения полных сечений, т. к. он не допускает экстраполяции в область больших энергий.

На рис. 2 а приведен также "конвертированный" спектр (см. п. 2 выше), который также согласуется со спектром настоящей работы, хотя в области очень больших энергий спадает, по-видимому, несколько круче.

Отметим, в заключение, что использование при анализе нейтринных экспериментов измеренного спектра $\tilde{\nu}_e$ имеет то принципиальное достоинство, что позволяет выразить вероятности процессов взаимодействия $\tilde{\nu}_e$ в естественных единицах — комбинации фундаментальных констант, $g_\nu^2 + 3g_A^2$ заряженных токов, определяющих сечение реакции обратного бета-распада (1).

Литература

1. Добрынин Ю.Л., Миказян Л.А., Николаев С.В. и др. Препринт ИАЭ-4383/2, 1987.
2. Дербин А.В. и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, 164.
3. Le Roy Price. XI Int. Workshop on Weak Interact., Saute Fe, New Mexico, 1987.
4. Афонин А.И., Кетов С.Н., Копейкин В.И. и др. ЖЭТФ, 1988, 94, 430.
5. Zacek G. et al. Phys. Rev., 1986, D34, 2621.
6. Cayagnac J.F. et al. Phys. Lett., 1984, B148, 387.
7. Видякин Г.С. и др. ЖЭТФ, 1987, 93, 527.
8. Schreckeubach K. et al. Phys. Lett., 1985, B160, 325; Feilitzsch F.V. et al. Phys. Lett., 1982, B118, 162.
9. Vogel P. et al. Phys. Rev., 1981, C24, 1543.
10. Nezhick F.A., Reines F. Phys. Rev., 1966, 142, 852.