

## НЕЙТРИННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА РЕАКТОРЕ РОВЕНСКОЙ АЭС: СЕЧЕНИЕ ОБРАТНОГО БЕТА-РАСПАДА

А.И.Афонин, А.А.Боровой, Ю.Л.Добрынин, С.Н.Кетов,  
В.И.Копейкин, Л.А.Миказлян, М.Д.Скорохватов,  
С.В.Толоконников, А.Н.Херувимов

В нейтринной лаборатории на ровенской АЭС в одном и том же потоке  $\tilde{\nu}_e$  с помощью различных методик одновременно проведено два эксперимента по измерению сечения реакции  $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ . Зарегистрировано  $29 \cdot 10^3 \tilde{\nu}_e$ . Найдено, что сечение, отнесенное к антинейтрину, сопровождающим один акт деления  $^{235}\text{U}$ , составляет  $\sigma_f^2 = 6,08 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 / \text{дел.} \pm 3,5\%$  (реактор)  $\pm 5\%$  (детектор). Результат сравнивается с расчетными значениями сечения. Обсуждается проблема поиска осцилляций Понтекорво и приводятся ограничения на их параметры.

1. С целью возможно более точного изучения характеристик фундаментального процесса



в нейтринной лаборатории на ровенской АЭС в 1982 г. начаты измерения его сечения. Предварительные результаты, полученные к лету 1983 г., были опубликованы в <sup>1</sup> и <sup>2</sup>. После ряда улучшений методики в 1984 г. была предпринята серия новых измерений с существенно более высокой статистикой. Измерения проведены на расстоянии 18 м от центра активной зоны реактора ВВЭР-440 с тепловой мощностью 1375 МВт.

Оставляя на будущее подробное описание методики, отметим наиболее существенные моменты развиваемого подхода.

а) Измерения ведутся в одном и том же потоке  $\tilde{\nu}_e$  с помощью двух различных детекторов.

В одном из них — сцинтилляционном спектрометре — мишенью для  $\tilde{\nu}_e$  и замедлителем нейтронов служит жидкий органический сцинтиллятор, содержащий гадолиний. Регистрация ведется по запаздывающим совпадениям между позитроном и нейтроном. Энергетический порог при регистрации позитронов снижен до 0,6 МэВ, что позволяет надежно провести экстраполяцию к нулевому порогу.

В другом детекторе регистрация реакции (1) производится только по нейтронам. Мишенью для  $\tilde{\nu}_e$  и замедлителем нейтронов служит полиэтилен, пронизанный счетчиками, наполненными гелием-3. Отказ от регистрации позитронов весьма привлекателен с точки зрения измерения полного сечения. В то же время, отсутствие совпадений ухудшает соотношение эффекта и фона.

б) Эффективность регистрации актов обратного бета-распада в названных детекторах в 2 – 3 раза выше, чем в других детекторах, используемых в последние годы в реакторных экспериментах. Это увеличивает статистику и, что не менее важно, позволяет надежнее определять эффективность регистрации реакции и, тем самым, ее сечение.

Ниже приводятся основные характеристики установок

	сцинтилляционный спектрометр	нейтронный детектор
Мишень	сцинтиллятор CH <sub>1,92</sub> 190 кг	полиэтилен CH <sub>2</sub> , 134 кг
эффективность	32 %	54 %
скорость счета	310 / 10 <sup>5</sup> с	370 / 10 <sup>5</sup> с
число зарегистрированных событий		
1984 г.	15 · 10 <sup>3</sup>	14 · 10 <sup>3</sup>

Измерения велись до остановки реактора на профилактический ремонт, во время остановки и после нее. Средний состав зоны (по числу делений) за период измерений составил

изотоп ( $i$ )	$^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{238}\text{U}$	$^{241}\text{Pu}$
вклад $\alpha_i$	0,606	0,277	0,074	0,043

(2)

2. Были получены следующие значения сечения реакции (1), относящиеся к смеси изотопов (2):

$$\text{сцинтилляционный спектрометр} \quad \sigma_f = 5,97 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 / \text{дел} \pm 3,0\% \text{ (реактор)} \\ \pm 7\% \text{ (детектор)}$$

$$\text{нейтронный детектор} \quad \sigma_f = 5,7 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 / \text{дел} \pm 3,0\% \text{ (реактор)} \\ \pm 6\% \text{ (детектор)}$$

средневзвешенное по обоим экспериментам:

$$\sigma_f = 5,82 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 / \text{дел} \pm 3\% \text{ (реактор)} \\ \pm 5\% \text{ (детектор)} \quad (3)$$

Первая из приведенных погрешностей "реактор" — общая для обоих экспериментов — отражает нашу оценку ошибки в знании мощности реактора и геометрии эксперимента. Вторая — "детектор" — включает ошибки, связанные со статистикой и другими флуктуациями, а также с точностью определения характеристик детекторов.

Определим еще из (3) сечение  $\sigma_f^5$  основного изотопа  $^{235}\text{U}$ . Очевидно

$$\sigma_f = \sigma_f^5 \left( 1 + \sum_{i=9,8,1} \alpha_i \left( \frac{\sigma_f^i}{\sigma_f^5} - 1 \right) \right) \equiv \sigma_f^5 (1 + K).$$

По нашим оценкам, при составе зоны (2)  $K = -0,043 \pm 40\%$  и

$$\sigma_f^5 = 6,08 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2 / \text{дел} \pm 3,5\% \text{ (реактор)} \pm 5\% \text{ (детектор)}. \quad (4)$$

Отметим, что погрешность в сечении обратного бета-распада все еще втрое выше ошибки времени жизни свободного нейтрона.

3. Сечение реакции (1) можно вычислить, используя равновесные спектры  $\tilde{\nu}_e$  продуктов деления урана и плутония  $^{3-6}$ . В вычислениях был использован анализ распада нейтрона  $^7$ , период полураспада  $T_{1/2} = 623$  с и эффекты отдачи, слабого магнетизма и радиационные поправки в процессе (1). В результате для смеси изотопов (2) были получены значения (см<sup>2</sup>/дел):

$$7,05 \cdot 10^{-43} \quad ^3; \quad 6,03 \cdot 10^{-43} \quad ^4; \quad 5,73 \cdot 10^{-44} \quad ^1) \quad ^5 \text{ и } 5,66 \cdot 10^{-43} \quad ^6$$

Видно, что эксперимент хорошо подтверждает  $^5$ ;  $^4$  и  $^6$  также не противоречат эксперименту, а спектр  $^3$  приводит к заметно более высокому сечению.

4. В последнее время опубликованы работы  $^{8-10}$ , в которых с целью поиска осцилляций Понтекорво реакция (1) изучалась на различных расстояниях от реактора: Гренобль  $^8$  — 8,76 м; Буже —  $^9$  — 13,6 и 18,3 м; Гезген — 37,9 и 45,9 м $^{10}$ , Ровно (настоящая работа) — 18 м.

Мировая статистика зарегистрированных событий на 1984 г. превысила 100 тыс., что могло бы быть использовано для сравнения и уточнения результатов. Такое сравнение затруднено однако тем, что в работах  $^{8-10}$  приводится не само сечение, а скорость счета по отношению к ее "ожидаемому" значению. По-видимому, сечение  $^{10}$ , полученное на расстояниях 37,9 и 45,9 м на несколько процентов выше, чем в настоящей работе, но различие лежит в пределах ошибок. Что касается работ  $^8$  и  $^9$ , то их результаты еще труднее поддаются сравнению.

5. Создается впечатление, что ведущийся в мировом масштабе эксперимент на реакторах не дает определенных указаний на проявление осцилляций Понтекорво. В то же время имеющиеся данные все еще допускают известную свободу и оставляют простор для спекуляций.

1) В  $^5$  спектры  $\tilde{\nu}_e$  приведены только для основных изотопов —  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Спектры для  $^{238}\text{U}$  и  $^{241}\text{Pu}$  получены нами комбинацией данных  $^4$  и  $^6$ .

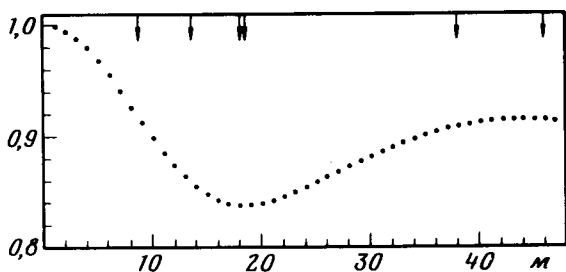


Рис. 1

Рис. 1. Ход с расстоянием сечения реакции (1) в модели осциллирующий с параметрами  $\sin^2 2\theta = 0,2$ ;  $\Delta^2 = 0,25 \text{ эВ}^2$ . Стрелки – расстояния, на которых поставлены эксперименты

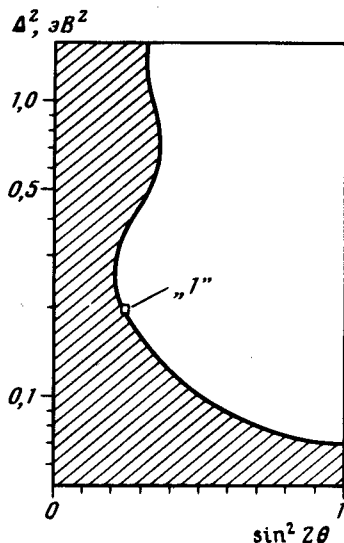


Рис. 2

Рис. 2. Ограничения на параметры осцилляций Понтекорво. Заштрихована область, в которой осцилляции могут иметь место. "1" – Наилучшая подгонка согласно <sup>11</sup>

Как иллюстрация к сказанному, на рис. 1 представлен ход относительного изменения сечения с расстоянием  $R$  от реактора, ожидаемый в модели двух смешивающихся состояний. ( $m_1$  и  $m_2$  – массы,  $\theta$  – угол смешивания Понтекорво). Сечение при этом имеет структуру

$$\sigma(R) = \sigma(0) [1 - \sin^2 2\theta f(R \cdot \Delta^2)],$$

где  $\Delta^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ , а  $f$  – функция от произведения  $R\Delta^2$  практически не чувствительная к конкретному выбору спектра реакторных  $\bar{\nu}_e$ . Вычисления проведены для  $\sin^2 2\theta = 0,2$ ,  $\Delta^2 = 0,25 \text{ эВ}^2$ . Получающаяся картина при имеющихся погрешностях тоже, по-видимому, не противоречит известным данным. При названных параметрах первый минимум приходится как раз на 18 м., сечение в нем на 16 % меньше, чем  $\sigma(0)$ , а к первому максимуму, лежащему на 40 – 50 м, возрастает на 9 %. На расстояниях же 9, 38 и 46 м сечения с большой точностью равны друг другу (при одинаковых составах зоны реактора).

В момент написания этой статьи появилось сообщение французской группы о наблюдении осцилляций на реакторе Буже <sup>11</sup>. Приведенные выше экспериментальные данные запрещают осцилляции не слишком жестко и не противоречат параметрам работы <sup>11</sup> (рис. 2).

На данной стадии мы консервативно полагаем, что эффект осцилляций на расстояниях  $R \geq 18$  м от реактора если и понижает сечение, то не более, чем на 16 %. Из этого следуют ограничения, показанные на рис. 2, где заштрихована область параметров  $\Delta^2$ ,  $\sin^2 2\theta$ , в которой осцилляции могут иметь место.

Авторы благодарят С.Т.Беляева и А.Г.Зеленкова за интерес к работе, С.А.Фаянса за полезные обсуждения, дирекцию и сотрудников РАЭС – за постоянную помощь.

#### Литература

1. Афонин А.И и др. Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 361.
2. Белецкий С.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, 406; Белецкий С.Н. и др. ЯФ, 1984, 40, 148.
3. Конейкин В.И. ЯФ, 1980, 32, 1507.
4. Vogel P. et al. Phys. Rev., 1981, c24, 1543.
5. Van Feiliszsch F. et. al. Phys. Lett., 1982, 118B, 162.
6. Latorre H.V., Metzinger J. Phys. Lett., 1982, 112, 22.
7. Wilkinson D.H. Nucl. Phys., 1982, A377, 474.
8. Kwon H. et. al. Phys. Rev., 1981, D24, 1097.
9. Cavaignac J.F. et. al. Lapp-Exp.-84-03, ISN-84-11.

10. *Gabathuler K. et. al.* Phys. Lett., 1984, **138B**, 449.

11. *Cavaignac J.F. et al.* Phys. Lett., 1984, **148B**, 387.

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию  
12 февраля 1985 г

---