

СПЕКТРЫ $\tilde{\nu}_e$ НА ДВУХ РАССТОЯНИЯХ ОТ РЕАКТОРА РОВЕНСКОЙ АЭС: ПОИСКИ ОСЦИЛЛЯЦИЙ

*А.И.Афонин, С.А.Богатов, А.Г.Вершинский, С.Н.Кетов,
Ю.В.Климов, В.И.Копейкин, А.А.Кувшинников,
А.А.Лабзов, И.Н.Мачулин, Л.А.Микаэлян, К.В.Озеров,
В.В.Синев, С.В.Толоконников*

На расстояниях 18,3 и 25,3 м от реактора измерены спектры позитронов реакции $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. В пределах статистики (~ 32 тыс. зарегистрированных $\tilde{\nu}_e$), спектры совпадают друг с другом. Получены ограничения на параметры нейтринных осцилляций. Не подтверждается сообщение о наблюдении осцилляций на реакторе Буже в опыте на расстояниях 13,6 и 18,3 м.

1. В нейтринной лаборатории на Ровенской АЭС продолжается исследование реакции



С помощью двух различных детекторов, расположенных в одном и том же потоке $\tilde{\nu}_e$ на расстоянии 18 м от центра активной зоны, было получено полное сечение этой реакции, отнесенное к одному делению ^{235}U ¹:

$$^5\sigma_f = 6,08 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{дел} \pm 5,4\% \quad (\text{уровень достоверности} - 68\%) \quad (2)$$

и спектры позитронов в абсолютной нормировке ².

Знание абсолютных характеристик реакции (1) важно с многих точек зрения. Они, в частности, служат метрологической базой при изучении других процессов взаимодействия реакторных $\tilde{\nu}_e$. При исследовании вопроса об осцилляциях Понтекорво, однако, возникают известные трудности, связанные с одной стороны с недостаточным знанием реального спектра реакторных антинейтрино и с погрешностями в определении характеристик детектора с другой.

2. В этой статье мы сообщаем об измерениях энергетических спектров позитронов реакции (1), выполненных на двух различных расстояниях от реактора: $^1R = 18,3$ м и $^2R = 25,3$ м. Сравнение спектров, измеренных на разных расстояниях, позволяет получить оценки на параметры осцилляций, свободные от ряда погрешностей, присущих абсолютному методу.

В модели осцилляций с двумя состояниями, имеющими массы m_1 и m_2 , и характеризующейся углом смешивания θ , спектр позитронов $S(E_e)$ реакции (1) меняется с расстоянием R от точки рождений $\tilde{\nu}_e$:

$$S_{\theta, \Delta^2}(E_e, R) = S_0(E_e) \left[1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1,27 \Delta^2 R}{E_e + 1,29} \right], \quad (3)$$

где $S_0(E)$ – спектр в отсутствие осцилляций, $\Delta^2 = |m_1^2 - m_2^2| \text{ эВ}^2$, E_e – полная энергия позитрона, связанная с энергией $\tilde{\nu}_e$ соотношением $E_e + 1,29 = E_{\tilde{\nu}_e}$ (МэВ).

Из (3) следует, что для каждой энергии позитрона интенсивность меняется с расстоянием со своим пространственным периодом, который обратно пропорционален $E_e + 1,29$ МэВ, так что спектральный эксперимент эквивалентен поиску осцилляций для многих энергий одновременно.

3. Измерения проводились с помощью спектрометра, содержащего 238 л жидкого органического сцинтиллятора с добавками гадолиния³. Нейтринные события выделялись методом запаздывающих совпадений между позитроном и γ -лучами захвата нейтронов в гадолинии. Эффективность регистрации составляет 32% и не зависит от направления потока $\tilde{\nu}_e$. Функция отклика при регистрации позитронов зависит от истинного энергетического разрешения спектрометра и спектра энергий, оставляемых аннигиляционными квантами в рабочем объеме. Для моноэнергетических позитронов ее ширина на половине высоты меняется от 0,75 МэВ (при $E_e = 1,5$ МэВ) до 1,0 МэВ (при $E_e = 6,5$ МэВ). Всего в эксперименте было зарегистрировано около 32 тыс. событий, из которых 16 тыс. — на расстоянии 25 м.

Энергетическая шкала спектрометра до энергии 4 МэВ контролировалась с погрешностью 0,7% по пикам полного поглощения ^{60}Co и ^{24}Na , а при больших энергиях — по спектру γ -квантов захвата нейтронов в гадолинии.

Для того, чтобы свести к минимуму неопределенности, связанные с изменением спектра $\tilde{\nu}_e$ реактора в ходе кампании, измерения на каждом из расстояний велись единообразно: до остановки реактора на перегрузку, во время остановки (измерение фона) и снова после выхода реактора на мощность. Поэтому состав топлива на обоих расстояниях был почти одинаков.

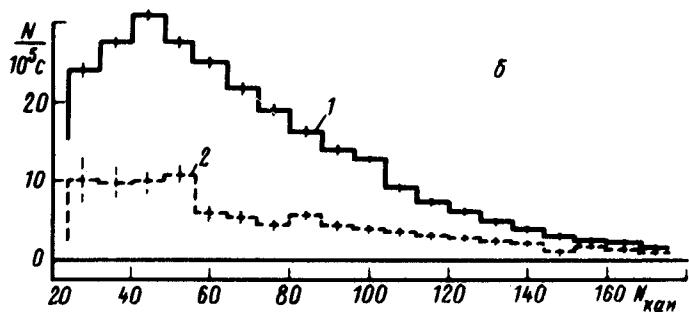
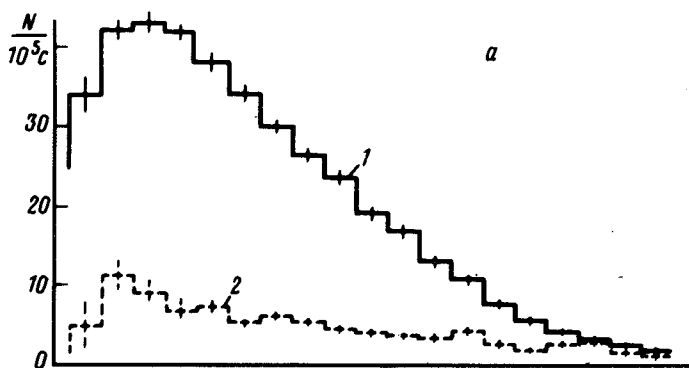


Рис. 1. Экспериментальные спектры, измеренные при работающем (1) и остановленном (2) реакторе: а — $^1R = 18,3$ м, б — $^2R = 25,3$ м

Измеренные в опыте спектры при работающем (эффект + фон) и остановленном реакторе (фон) приведены на рис. 1. После вычитания фона в спектры вносились небольшие поправки, учитывающие вклад другого реактора РАЗС.

Спектр, измеренный на 25 м приводился к спектру на 18 м путем умножения на геометрический фактор 1,908 и на коэффициент 0,995 учитывающий небольшие различия в условиях

регистрации на двух расстояниях. Полученные таким образом спектры и их отношение $(^{25}S/^{18}S)^{экс}$ приведены на рис. 2. Отношение интегралов по этим спектрам составило $(^{25}I/^{18}I) = 0,977 \pm 4,7\%$.

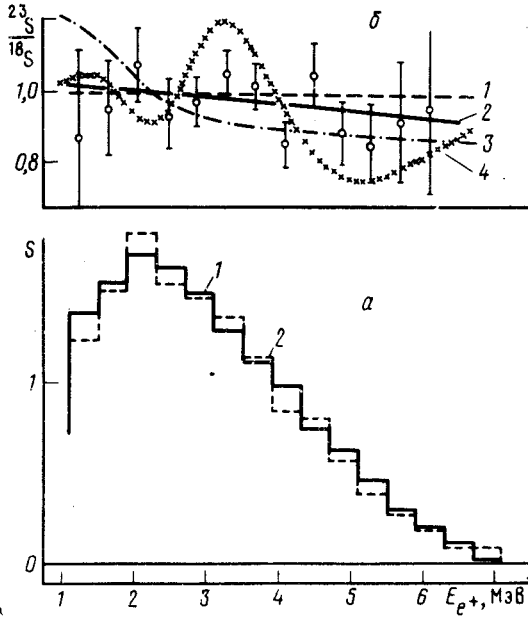


Рис. 2. *a* – Экспериментальные спектры e^+ , измеренные на расстояниях 18,3 м (1) и 25,3 м (2); *б* – отношения спектров: точки с ошибками – эксперимент, кривые – расчет: 1 – с учетом реальных составов активной зоны, 2 – наилучшее согласие с экспериментом (без осцилляций), 3 – в случае осцилляций с параметрами $\sin^2 2\theta = 0,25$, $\Delta^2 = 0,2$ (эВ)²; 4 – то же: $\sin^2 2\theta = 0,25$; $\Delta^2 = 0,9$ (эВ)²

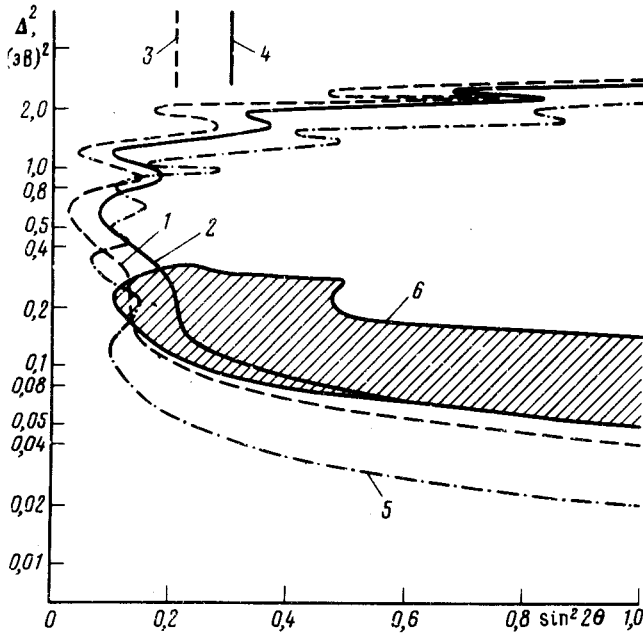


Рис. 3. Ограничения на параметры осцилляций на плоскости $(\sin^2 2\theta, \Delta^2)$. Ровно (настоящая работа): 1 – уровень достоверности 68%, 2 – уровень достоверности 90%. Ровно¹: 3 – уровень достоверности 68%, 4 – уровень достоверности 90%, 5 – Гестген⁷ – уровень достоверности 90%, 6 – заштрихована область, в которой, согласно⁶ обнаружены осцилляции

4. Из приведенных на рис. 2 данных видно, что измеренные на двух расстояниях спектры в пределах ошибок не отличаются друг от друга. Наилучшее согласие между спектрами было получено путем небольшой дополнительной подстройки спектров друг к другу, заключающейся в изменении относительных нормировок на 0,8 % и относительном растяжении шкал на 1,34 % друг относительно друга. При такой подстройке достигалось минимальное значение χ^2 . Поиск ограничений на параметры осцилляций Δ^2 , $\sin^2 2\theta$ проводился путем сравнения экспериментальных отношений $(^{25}S/^{18}S)^{экс}$ с теоретическими $(^{25}S/^{18}S)^T$ методом наибольшего правдоподобия. При сравнении теоретические отношения усреднялись по размерам активной зоны и функции отклика детектора.

5. Полученные ограничения приведены на рис. 3. При малых Δ^2 опыт теряет чувствительность. Для больших Δ^2 , $\sin^2(1,27 \Delta^2 R)/(E_e + 1,29)$ начинает быстро осциллировать, так что при усреднении по геометрии и функции отклика в спектре (3) пропадает зависимость от Δ^2 и $S \rightarrow S_0(1 - 1/2 \sin^2 2\theta)$.

Для того, чтобы получить ограничения на $\sin^2 2\theta$ при больших Δ^2 остается использовать абсолютный метод. Сечение при больших Δ^2 стремится к предельному значению

$$\sigma_{\text{осц}} = \sigma_0(1 - 1/2 \sin^2 2\theta), \quad (4)$$

где σ_0 — сечение в отсутствие осцилляций.

Для вычисления σ_0 мы использовали последний спектр $\tilde{\nu}_e$ для ^{235}U из работы ⁴. С учетом поправок на отдачу, слабый магнетизм и радиационных поправок, введенных согласно ⁵, $\sigma_0 = 6,31 \cdot 10^{-43} \text{ см}^2/\text{дел}$. Сравнивая (4) с (2) находим

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_f^{\text{экс}}}{\sigma_0} &= \frac{6,08 \pm 5,4\% \text{ (уровень достоверности - 68\%)}}{6,31 \pm 4,2\% \text{ (уровень достоверности - 68\%)}} = \\ &= 0,964 \pm 0,068 \text{ (уровень достоверности - 68\%)}, \end{aligned} \quad (5)$$

отсюда получается ограничение:

$$\sin^2 2\theta \leq 0,21 \text{ (уровень достоверности - 68\%) (большие } \Delta^2) \quad (6)$$

Мы видим таким образом (см. рис. 3), что сообщение ⁶ о наблюдении эффекта осцилляций на реакторе Буже не подтверждается нашими экспериментами. В тоже время чувствительность реакторных экспериментов пока еще невелика. Из рис. 3 следует, что если бы осцилляции существовали в действительности, но угол смешивания составлял $(0,7 \div 1,0)\theta_C$ от угла смешивания кварков ($\theta_C \approx 13^\circ$, угол Кабиббо), то это обстоятельство осталось бы незамеченным в поставленных до сих пор экспериментах на реакторе.

Авторы благодарят Н.А.Маркова и С.Т.Беляева за интерес и внимание к работе, С.Л.Гаврилова, Л.А.Левину и А.Н.Херувимова за помощь в проведении измерений, А.А.Борового и С.А.Фаянса за полезные обсуждения, В.Т.Данилова, Ю.Г.Куватова и Ю.И.Муринова за помощь в обеспечении сцинтиллятором, а также дирекцию и службы РАЭС за постоянную помощь.

Литература

1. Афонин А.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, **41**, 353.
2. Афонин А.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, **42**, 230.
3. Афонин А.И. и др. Письма в ЖЭТФ, 1983, **37**, 122.
4. Schreckenbach K. et al. Phys. Lett., 1985, **160B**, 325.
5. Фаянс С.А. и др. ЯФ, 1985, **42**, 929.
6. Cavaignac J.F. et al. Phys. Lett., 1984, **148B**, 387.
7. Zacek V. et al. Phys. Lett., 1985, **164B**, 193.