

Измерение временной зависимости фона запаздывающих нейтронов на 1-ом канале ИБР-2.

Копач Ю.Н.¹, Кузнецов В.Л.^{1,2}, Кузнецова Е.В.^{1,2}, Седышев П.В.¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория нейтронной физики
141980 Дубна, Жолио -Кюри 6, Московская область, Россия

² Институт ядерных исследований, Российская Академия Наук, 117312 Москва, 60-тия
Октябрьской Революции 7а, Россия

Аннотация. В работе [1] был предложен новый времяпролетный метод измерения времени жизни нейтрона τ_n . Времяпролетный метод измерения времени жизни нейтрона τ_n очень чувствителен к фону. Было установлено, что фон должен быть меньше 10^{-6} . Согласно [2], между импульсами мощности реактора ИБР-2 выделяется около 7% мощности реактора. Поскольку число нейтронов пропорционально мощности реактора, фон от задержанных нейтронов также будет составлять 7% за 200 миллисекунд. Выполнены измерения фона запаздывающих нейтронов и установлена сложная зависимость фона от времени. Приведена оценка влияния фона запаздывающих нейтронов на точность измерения времени жизни нейтрона времяпролетным методом. Для регистрации времяпролетных спектров использовалась система сбора и накопления спектров “TIMECODER” разработанная в ЛНФ ОИЯИ [3].

Введение

Точное определение времени жизни нейтрона очень важно для физики частиц и астрофизики [4, 5]. Известны два типа экспериментов измерения времени жизни нейтронов: первые из них – пучковые, другие – эксперименты по хранению УХН в материальных и магнитных ловушках. Начиная с 2005 года, было выполнено 8 работ по измерению времени жизни нейтрона, в основном методом хранения УХН и только одна – пучковым методом.

В работе [6] проведен анализ результатов измерений времени жизни нейтрона, методом хранения нейтронов в материальных ловушках и пучковым методом. Основной результат состоял в том, что после проведенных корректировок, средневзвешенное значение времени жизни нейтрона, измеренное пучковым методом и методом хранения УХН в материальных ловушках, включенное в рассмотрение PDG 2013, отличаются

$$\Delta \tau_n^b = \tau_n^{beam} - \tau_n^{bottle} = (888,0 \pm 2,1) \text{ с} - (879,6 \pm 0,8) \text{ с} = (8,4 \pm 2,2) \text{ с}$$

и расхождение составляет $3,8 \sigma$.

Причины такого расхождения могут лежать как в наличии неучтенных систематических погрешностей в проведенных измерениях, так и в новых физических эффектах и явлениях, которые могут привести к принципиальному различию времени жизни нейтрона во всех пучковых экспериментах от всех экспериментов по хранению нейтронов.

В нашей работе [1] предложен новый метод измерения времени жизни нейтрона на импульсных источниках нейтронов, основанный на изменении спектра нейтронов за время их пролета достаточно большой пролетной базы, за счет их распада. Предложенный метод имеет свои достоинства и недостатки.

Достоинство предложенного метода в том, что в нем используются относительные измерения. С помощью моделирования эксперимента было рассмотрено влияние экспериментальных условий, фона, не идентичности детекторов и давления остаточного газа, на точность измерения времени жизни нейтрона. Эти систематические погрешности могут быть измерены экспериментально.

Недостатком предложенного метода является маленькая величина измеряемого эффекта, измерение потоков нейтронов с очень большой импульсной плотностью и большая величина фона запаздывающих нейтронов реактора ИБР-2.

В данной работе представлены результаты исследования измерения фона запаздывающих нейтронов.

Измерение фонов

В реальном эксперименте можно ожидать, как минимум 3 вида фона: внешний фон экспериментального зала и космоса, фон рассеянных нейтронов и гамма-квантов от пучка нейтронов установки, фон от запаздывающих нейтронов. В работе [1] было выполнено моделирование экспериментов по измерению времени жизни нейтрона времяпролетным методом, в предположении, что фон одинаков на обеих времяпролетных базах. Чтобы зависимость определения времени жизни нейтрона от величины фона была видна более отчетливо, количество зарегистрированных нейтронов было увеличено до $3 \cdot 10^{18}$. Результаты моделирования представлены на рисунке 1.

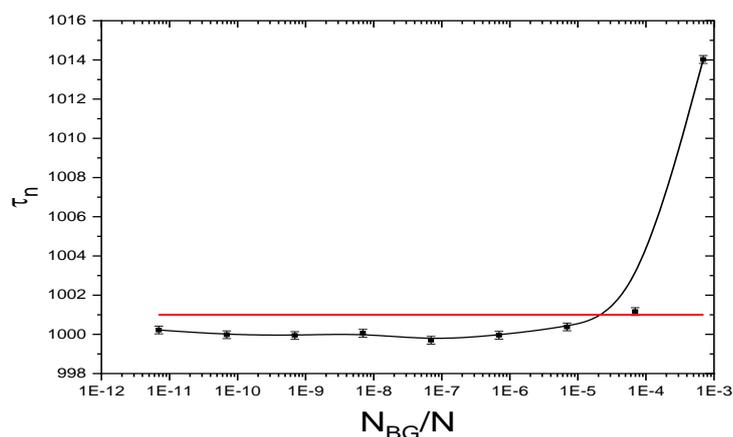


Рис. 1. Зависимость точности измерения времени жизни нейтрона от величины фонового счета детекторов.

Для того чтобы систематическая погрешность была меньше секунды, необходимо чтобы отношение фонового счета нейтронов к замедленным нейтронам вспышки было меньше чем $1 \cdot 10^{-5}$. Это условие заведомо не выполняется для запаздывающих нейтронов. Так, согласно [2], примерно 7% мощности реактора ИБР-2

выделяется между импульсами мощности реактора, а так как количество нейтронов пропорционально мощности, то фон от запаздывающих нейтронов то же будет 7% процентов. Понятно, что необходимо разработать метод измерения запаздывающих нейтронов на уровне точности $\sim 10^{-4} - 10^{-3}$.

В данной работе представлены результаты измерения фона запаздывающих нейтронов методом пропускания нейтронов через образец с хорошо известным сечением поглощения нейтронов.

При прохождении $N_0(t)$ нейтронов через образец с известной толщиной $n\sigma_{tot}$ количество зарегистрированных нейтронов $N(t)$ имеет вид

$$N(t) = N_0(t) \cdot \exp(-n\sigma_{tot}(t)) + \int B(t) \cdot \exp(-n\sigma_{tot}(t)) \quad (1),$$

здесь $B(t)$ – фоновый счет запаздывающих нейтронов, $N_1(t) = (N_0(t) + B(t))$ – число зарегистрированных нейтронов без образца, $N_0(t)$ – поток нейтронов, связанный с импульсом мощности реактора, $\int B(t) \cdot \exp(-n\sigma_{tot}(t))$ – сумма запаздывающих нейтронов с энергией большей кадмиевой границы. Наиболее подходящими образцами могут быть образцы Sm, Gd и Cd.

С помощью системы коллиматоров был сформирован пучок нейтронов с поперечным сечением $24 \times 24 \text{ мм}^2$ и угловой расходимостью $3.3 \cdot 10^{-3}$ радиана. В качестве детекторов нейтронов использовались счетчики СМ-18. Чтобы детекторы не перегружались, пучок нейтронов был перекрыт 10 см свинца, установленными на 12-ти метровой времяпролетной базе. Для регистрации времяпролетных спектров использовалась система сбора и накопления спектров “TIMECODER”, разработанная в ЛНФ ОИЯИ [3].

На рисунке 2а приведены черной линией измерения времяпролетных спектров нейтронов, прошедших 10 сантиметров свинца. Красная линия – пучок нейтронов перекрыт 10 см свинца и 2 мм кадмия. Кадмий «выедает» тепловые нейтроны и в тепловой области спектра проявляется вклад эпитепловых нейтронов, генерируемых запаздывающими нейтронами.

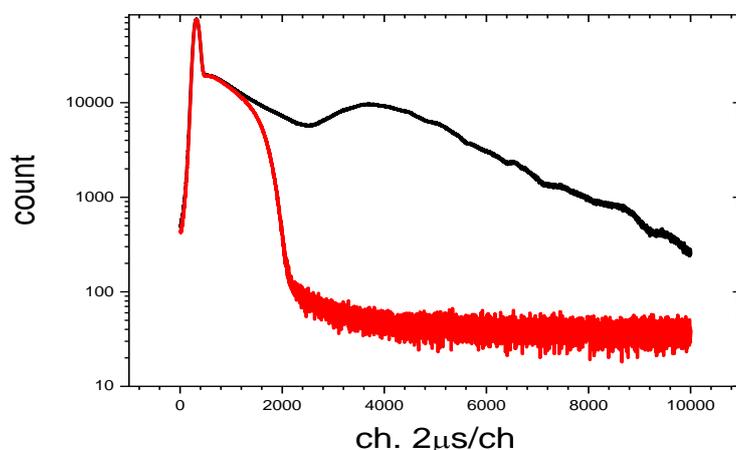


Рис. 2а. Измерение фона на 29,33 м времяпролетной базе 1-го канала реактора ИБР-2. Черная линия – пучок нейтронов перекрыт 10 см свинца. Красная линия – пучок нейтронов перекрыт 10 см свинца и 2 мм кадмия.

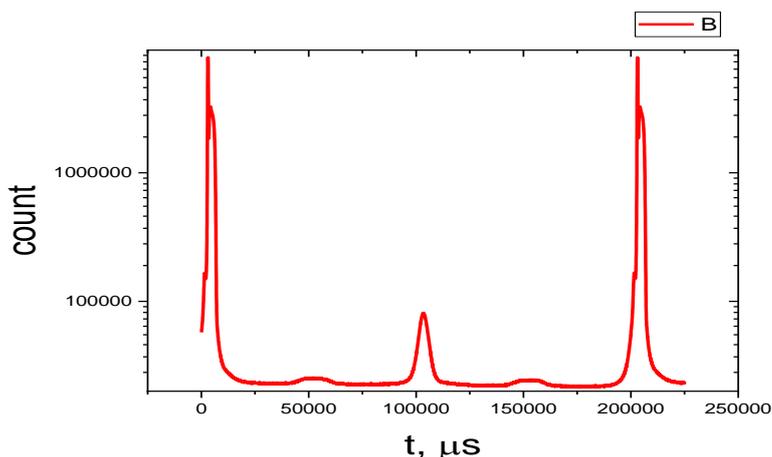


Рис. 26. Измерение фона на 29,33 м времяпролетной базе 1-го канала реактора ИБР-2. Красная линия – пучок нейтронов (пучок перекрыт 10 см свинца и 2 мм кадмия) от вспышки до следующей вспышки.

Из рисунка 26 можно сделать вывод, что временная зависимость фона запаздывающих нейтронов от вспышки до вспышки довольно сложная.

На рисунке 3 показан фрагмент времяпролетного спектра рисунка 2а с 2882 канала по 10000 канал. Видно, что фон запаздывающих нейтронов зависит от времени. Линейная аппроксимация фона изображена красной линией $y = a + b \cdot x$. Значения параметров: $b = -(9,54 \pm 0,12)^{-4}$, $a = 30,87 \pm 0,16$. Черная линия показывает временную зависимость от всех групп запаздывающих нейтронов. Наклон обусловлен изменением реактивности реактора. Таким образом, вклад запаздывающих нейтронов может повлиять на определение времени жизни нейтрона.

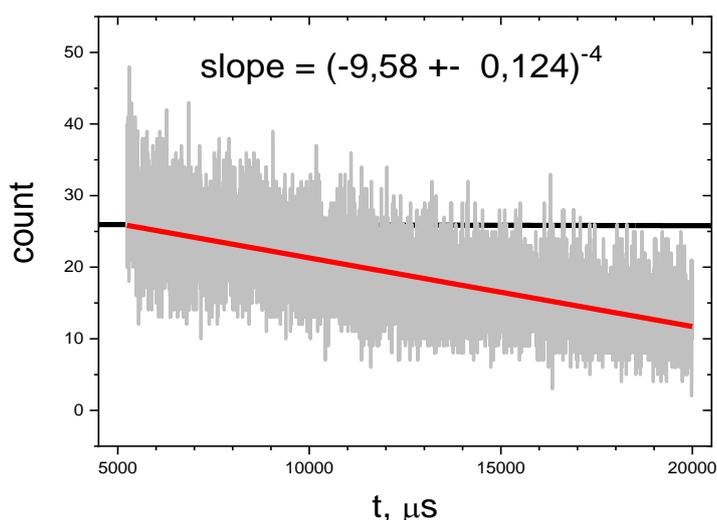


Рис. 3. Временная зависимость фона запаздывающих закадмиевых нейтронов – серая линия. Черная линия – количество запаздывающих нейтронов от деления ^{239}Pu ; красная линия – линейная аппроксимация фона запаздывающих закадмиевых нейтронов.

Важно отметить, что в любом канале временного анализатора представлен вклад всего спектра нейтронов, порожденного запаздывающими нейтронами. Поэтому, перекрыв пучок нейтронов кадмием и выбрав область временного спектра, где нейтроны, порожденные импульсом мощности реактора, практически отсутствуют, мы получим вклад запаздывающих нейтронов с большей кадмиевой границы.

Чтобы получить величину фона запаздывающих нейтронов, надо умножить спектр нейтронов ниже кадмиевой границы на коэффициент, найденный из отношения измеренных времяпролетных спектров нейтронов $N(t)$ и $N_1(t)$. Полученный коэффициент был равен 4,207.

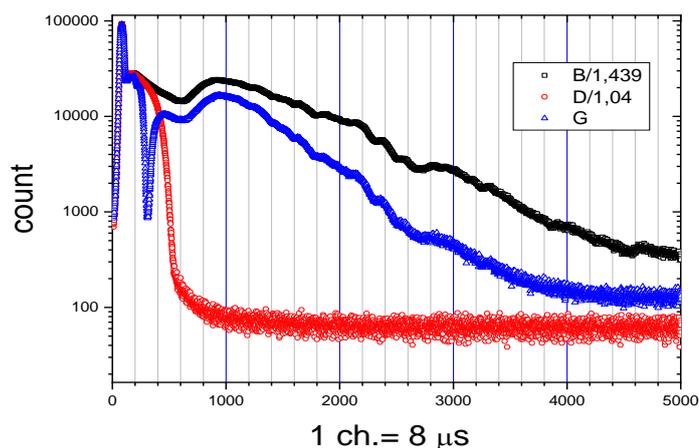


Рис. 4. Черные квадратики – спектр прямого пучка нейтронов, красные кружочки – пучок нейтронов перекрыт 2 мм кадмия, синие треугольники – пучок нейтронов перекрыт 1 мм индия.

На рисунке 4 представлены фрагменты времяпролетных спектров нейтронов, полученных при цене канала 8 микросекунды. Черные квадратики – спектр прямого пучка нейтронов, красные кружочки – пучок нейтронов перекрыт 2 мм кадмия, синие треугольники – пучок нейтронов перекрыт 1 мм индия.

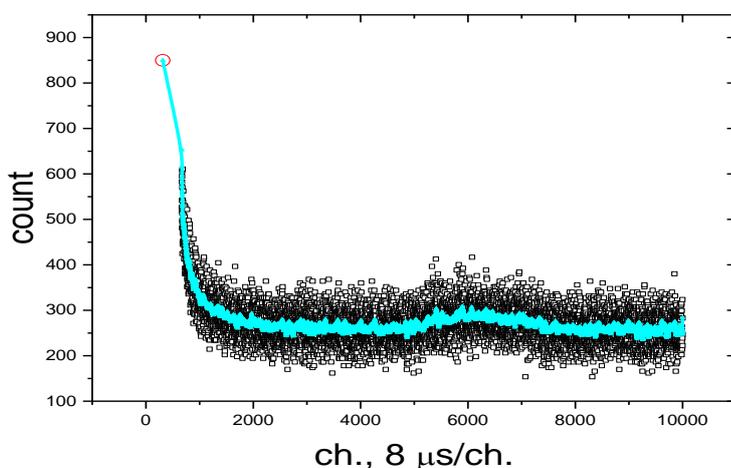


Рис. 5. Оцененный спектр запаздывающих нейтронов.

На рисунке 5, где приведен сглаженный спектр запаздывающих нейтронов, видна довольно сложная зависимость спектра от времени. В работе [1] рассматривался случай постоянного фона. Наши измерения показали, что фон не является постоянным.

Фон запаздывающих нейтронов в интересующей нас области времен составляет примерно 2 %. Точность часовых измерений с ослабленным примерно в 100 раз пучком нейтронов составляет примерно 10 %. Таким образом, измерение фона запаздывающих нейтронов надо проводить непрерывно.

Для понимания результатов необходимы дальнейшие исследования.

Авторы благодарны В.Н. Швецову, Е. Лычагину, В. Новицкому и другим сотрудникам ЛНФ ОИЯИ, а также Е.А. Коптелову за помощь и поддержку в работе.

Список литературы

1. V.L. Kuznetsov, E.V. Kuznetsova, P.V. Sedyshev. *Measuring Neutron Lifetime on an IBR-2 Pulsed Neutron Source*. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2018. Vol. 15, No. 6, pp. 678 – 684.
2. Е.А. Бондарченко, Ю.Н. Пепельшев, А.К. Попов. *Экспериментальное и модельное исследование особенностей динамики импульсного реактора периодического действия ИБР-2*. ЭЧАЯ, 2004, т.35, вып.4, с.927-983
3. V.N. Shvetsov, S.V. Alpatov, N.V. Astakhova et al. *The data acquisition system was developed in the LNP JINR*. Instruments and Experimental Techniques, V.55, N 5, pp.561-568, 2012.
4. Dubbers D., Schmidt M. *The neutron and its role in cosmology and particle physics*. Rev. Mod. Phys. 2011.V. 83. P. 1111-1171.
5. Серебров А.П. *Измерение времени жизни нейтрона с использованием гравитационных ловушек ультрахолодных нейтронов*. УФН. 2005. Т.175, №9. С. 905-924.
6. A.T. Yue et al. *Improved Determination of the Neutron Lifetime*. Phys. Rev. Lett. **111** 222501 (2013)