

Время жизни нейтрона и структура фона в магнитной нейтронной ловушке

В. В. Васильев¹⁾

Институт теоретической и экспериментальной физики, 117218 Москва, Россия

Поступила в редакцию 24 ноября 2002 г.

После переработки 6 февраля 2003 г.

Проведен новый цикл обработки экспериментальных данных по хранению нейтронов в магнитно-гравитационной ловушке (1985–1986 г.). Показано, что выявленные уровни скорости счета фона обладают кратностью относительно постоянной распада нейтрона. Это объясняется тем, что фон в эксперименте по хранению ультрахолодных нейтронов был обусловлен счетом электронов от распада нейтронов фона, пронизывающих стенки ловушки. Большое количество измерений при малом и переменном количестве нейтронов фона в ловушке обеспечило возможность извлечь и использовать данные для определения среднего времени жизни нейтрона, которое оказалось равным $\tau_n = 900.01 \pm 0.15$ с в неоднородном магнитном поле.

PACS: 14.20.Dh

1. Введение. Эксперименты по магнитному хранению ультрахолодных нейтронов (УХН) проводились в ИТЭФ в 1981–1986 гг. с целью доказательства возможности длительного хранения нейтронов в неоднородном магнитном поле. Тогда было показано, что существует “долгоживущий” компонент нейтронов в ловушке, время хранения которого превышает 700 с [1–3]. В связи с актуальностью проверки условия унитарности с помощью нейтронных параметров [4] и подготовкой новых экспериментов в последнее время была проведена новая обработка полного набора данных [2] с целью четкого выделения вклада фона в счет УХН и более точного определения времени хранения нейтронов. Оказалось, что фоновые данные имеют самостоятельное значение, что особенно ясно проявилось в самой последней измерительной серии, где были приняты специальные меры по подавлению “короткоживущих” нейтронов, время хранения которых составляло 200–300 с в зависимости от условий хранения [1, 3]. Для полноты картины ниже описана схема эксперимента по хранению УХН в магнитно-гравитационной ловушке, способ их ввода и вывода и детектор УХН. Однако результаты хранения УХН и кривая хранения в данной работе не рассматриваются. Основное внимание уделено удержанию нейтронов в ловушке, при котором нейтронный детектор регистрирует фон и нейтроны, не отвечающие условиям хранения и вытекающие из ловушки на детектор. При более тщательном анализе данных была выявлена определенная структура фона, которая выглядит так, как если бы с наибольшей вероятностью

реализовались вполне определенные уровни скорости счета фона. Предложена гипотеза, что фон, регистрируемый нейтронным детектором, представлял собой счет электронов от распада нейтронов, пронизывающих стенки и крышку магнитной ловушки. В условиях, когда детектор почти одинаково пригоден для регистрации и ультрахолодных нейтронов и электронов от распада нейтронов, нейтроны фона, а точнее, электроны от их распада стали определяющим вкладом на длительных интервалах удержания. Как показано ниже, оказалось, что имеющихся данных по определению скорости счета вполне достаточно для определения значения времени жизни нейтрона в неоднородном магнитном поле.

2. Экспериментальная установка. Экспериментальная установка для магнитного хранения УХН, использовавшаяся в ИТЭФ до 1987 г., показана схематически на рис.1. Для оценки обсуждаемых результатов, в основном, важен только интервал удержания нейтронов из полного измерительного цикла “наполнение–удержание–сток на детектор”. После наполнения ловушки ультрахолодными нейтронами магнитный затвор включается на полный ток и удерживает УХН в области удержания. Одновременно с закрытием затвора труба устройства ввода-вывода поворачивается в положение “вывод”, то есть соединяет камеру ловушки с детектором. В этом положении устройство остается до открытия затвора и затем до окончания стока нейтронов на детектор. Это обеспечивает регистрацию нейтронов, не соответствующих условиям хранения, а также измерение фона.

¹⁾e-mail: basil_v@vitep1.itep.ru

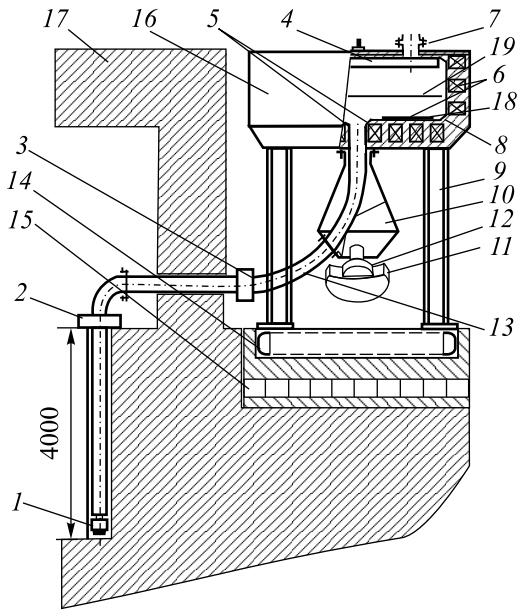


Рис.1. Схема установки ИТЭФ для вывода из реактора и хранения ультрахолодных нейтронов: 1 – блок конвертора, 2 – верхняя камера, 3 – шибер УХН, 4 – корректирующая обмотка, 5 – магнитный затвор, 6 – обмотка основного магнита, 7 – патрубок откачки, 8 – вакуумная камера, 9 – опора накопителя, 10 – устройство для ввода-вывода нейтронов, 11 – защита детектора, 12 – детектор УХН, 13 – патрубок детектора, 14 – бетон блока-фундамента, 15 – железосвинцовая защита, 16 – магнитный накопитель, 17 – защита реактора, 18 – слой полиэтилена, 19 – дополнительный поглотитель. Показано положение ввода нейтронов. В положении “удержание” нейтронотвод внутри устройства 10 соединяет горловину ловушки с патрубком детектора 12

Детектор УХН конструкции А.В. Стрелкова (ОИЯИ, ЛНФ) представлял собой пропорциональный двухнитевой газовый счетчик со смесью ($\text{Ar}-\text{CO}_2-^3\text{He}$) под давлением 1.02 атм и алюминиевым окном толщиной 10^{-4} м. Диаметр входного окна счетчика соответствовал диаметру медной электрополированной трубы поворотного нейтронотода – $9.5 \cdot 10^{-2}$ м. Толщина и материал фольги выбирались из условий регистрации УХН, выходящих через открытый магнитный затвор и ускоряемых в гравитационном поле до скорости, позволяющей преодолеть барьер фольги ($v_{\text{гр}} = 3.2$ м/с для Al). Особенностью детектора, как будет показано ниже, является его универсальность. Прибор пригоден для регистрации как УХН, так и электронов при энергии более 150 кэВ [5].

Величина магнитного поля на оси затвора составляла 3.2 кГс в точке максимума и 2.5 кГс на уровне дна вакуумной камеры. Магнитопровод ловушки выполнен из Ст. 3. Радиальная ширина полюсов и

обмоток составляют $6 \cdot 10^{-2}$ м, диаметр центральной обмотки (магнитного затвора) – $1.2 \cdot 10^{-1}$ м. Спад поля от дна по вертикали и от стенки по горизонтали приблизительно описывается экспонентой [6].

В эксперименте особое внимание было уделено защите детектора и устройства ввода. Корпус магнита, его стенки и крышка вакуумной камеры не защищались дополнительно нейтронозамедляющими и нейтронопоглощающими материалами. Анализу подвергнуто более полутора тысяч измерительных циклов “наполнение–удержание–сток”. Минимальный интервал считывания Δt в циклах хранения был равен 2 с, а максимальный – 22 с. В некоторых сериях интервал считывания задавался равным 5 с. Реализованные циклы с разными интервалами считывания дали при двух разных магнитных режимах в сумме 324 средневзвешенных значения скорости счета (вариант 1). Из указанных 324 значений 159 были получены при наличии поглотителя УХН на полувысоте ловушки (рис.1) при токе 300 А в нижней обмотке стенки и выключенных двух верхних обмотках (вариант 2). Остальные значения получены без поглотителя при токах 200 А в трех обмотках стенки. При определении скоростей счета вся совокупность данных приведена к интервалам 7, 8, 10, 12, 15, 22 с, то есть набор значений смешан из шести независимых групп. Время измерений каждой группы данных составляло от 1 до 2 недель. Таким образом, нейтронный фон (тепловые и быстрые нейтроны) за время эксперимента мог меняться в зависимости от режима реактора, окружающих экспериментов и условий защиты. Как отмечалось ранее, интегральный фон составлял от $6 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-2} с^{-1} для разных серий. Все попытки усилить защиту детектора не привели к снижению фона ниже достигнутого порога.

Гипотеза автора, инициировавшая данную работу, сводится к утверждению, что указанный фон объясняется регистрацией электронов от распада нейтронов фона, пронизывающих крышку и стенки электромагнита и камеры. Оказалось, что экспериментальные данные полностью подтверждают эту гипотезу.

3. Метод обработки данных и определение времени жизни нейтрона. Легко убедиться, что после дифференцирования по времени закона радиоактивного распада $N = N_0 \cdot \exp(-t/\tau)$, где N – число нейтронов в момент времени t в некоторой области, τ – время жизни нейтрона и, соответственно, $\lambda = 1/\tau$ – постоянная распада, получим правило для скорости $G = dN/dt$ рождения электронов и протонов в этой области:

$$G = dN/dt = \lambda \cdot N. \quad (1)$$

Соотношение (1) выражает форму закона распада, удобную для случая протока нейтронов через контролируемую область. Если поток нейтронов меняется ступенями N_1, N_2, \dots, N_k , то получаем $G_1 = \lambda \cdot N_1, G_2 = \lambda \cdot N_2, \dots, G_k = \lambda \cdot N_k$, то есть ступенчатое изменение скорости счета. Предположим, что область распада нейтронов контролируется детектором электронов распада, то есть электроны из этой области достигают детектора и регистрируются с интегральной эффективностью ε . Естественно считать ε константой во времени. Умножая левую и правую части соотношения (1) на ε , получим $d(\varepsilon N)/dt = \lambda \cdot (\varepsilon N)$, или скорость регистрации электронов

$$g = dn/dt = \lambda \cdot n, \quad (2)$$

где $n = \varepsilon N$. Таким образом, эффективность есть фактор подобия, преобразующий (1) в (2). Итак, скорость счета детектором электронов от распада нейтронов пропорциональна числу нейтронов, распад которых “видит” детектор, а коэффициент пропорциональности точно равен постоянной распада нейтрона. Разумеется, если детектор “видит” распад одного, двух, трех и т.д. нейтронов, то скорость счета детектора также меняется ступенчато с шагом λ . Удобным способом представления информации в данном случае является частотная гистограмма. На частотной гистограмме число измерений, приходящееся на каждый интервал, отложено по оси ординат (см. рис.2). Если детектор регистрирует электроны от переменного количества нейтронов, то результатом является

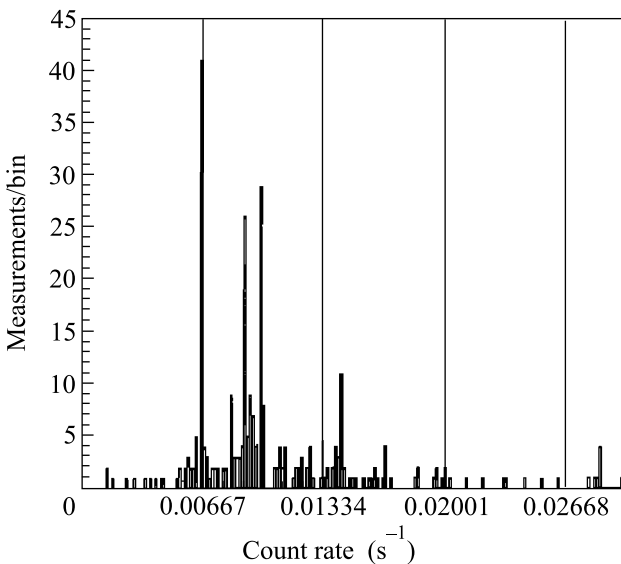


Рис.2. Частотная гистограмма скоростей счета, полученных в эксперименте. Масштаб шкалы соответствует $\tau = 900$ с

множество значений скорости счета $g_k = \lambda \cdot n_k$. После умножения на τ получим соотношение

$$\tau \cdot g_k = n_k. \quad (3)$$

Это соотношение означает, что масштаб шкалы скоростей счета определяется временем жизни нейтрона, то есть если τ равно истинному времени жизни нейтрона, то деления шкалы совпадают с вершинами пиков частотной диаграммы скоростей счета. Шкала скоростей счета g_k будет состоять из значений, приблизительно равных 0.0011, 0.0022, 0.0033 и т.д., и, поскольку $\tau \approx 900$, то число нейтронов n_k , соответственно, равно 1, 2, 3,.. 6,.. 9,.. и т.д. Если же для времени жизни использовано другое, ошибочное значение, то возникает смещение делений шкалы от физически обусловленных положений пиков диаграммы скоростей счета. Таким образом, расстояния между пиками зависят от количества нейтронов, соответствующих тому или другому измерению, и постоянной распада нейтрона. Отсюда можно оценить количества нейтронов, которые определяют счет детектора. Для этого следует умножить скорости счета на предполагаемое время жизни нейтрона, полученные числа округлить до целого (в случае варианта 2) или до выбранного шага округления (в зависимости от глубины усреднения первичных измерений, в случае варианта 1 это 0.17 или 0.1), то есть получить n_k . Но при этом можно и проверить, насколько соответствует экспериментальным данным использованное значение времени жизни нейтрона и полученный ряд значений n_k . Для этого следует вычислить функционал $F(\lambda)$, приведенный ниже:

$$F(\lambda) = \sum_{k=1}^{k=K} \frac{(g_k - n_k \times \lambda)^2}{\sigma_k^2}. \quad (4)$$

Здесь σ_k – погрешность измерения g_k . Если значение времени жизни при настройке шкалы скоростей счета подобрано правильно, то есть значение λ_0 соответствует времени жизни нейтрона, то $F(\lambda)$ имеет минимум в точке $\lambda = \lambda_0$. В противном случае $F(\lambda)$ превысит $F(\lambda_0)$, то есть истинное значение времени жизни соответствует такой настройке шкалы скоростей счета, при которой деления шкалы максимально приближаются к физическим максимумам гистограммы скоростей счета. Все другие значения дадут худшее согласие по приведенной выше МНК-подобной оценке. Очевидно, что значение λ_0 и его погрешность можно определить из условия минимума этого функционала: $dF(\lambda)/d\lambda = 0$. Этот метод настройки шкалы можно проверить на данных эксперимента ИТЭФ 1986 г. Понятно, что вакуумная

Вероятные значения времени жизни нейтрона

№	Время жизни, с	Погрешность, с	№	Время жизни, с	Погрешность, с	№	Время жизни, с	Погрешность, с
	левое "крыло"			среднее значение		правое "крыло"		
1	886.95	0.15	3	900.01	0.15	4	911.08	0.155
2	888.87	0.15				5	913.01	0.155

камера магнитной ловушки является той областью, которая контролируется детектором. Нейтроны фона, пронизывающие намагниченные стенки ловушки, при этом поляризуются и распадаются в объеме камеры с соответствующей постоянной распада, рождая, в частности, электроны. Неоднородное магнитное поле дна и стенок ловушки, предназначенное для хранения нейтронов, отражает электроны и собирает их в центральной части ловушки на отверстие стока (см. рис.1). Магнитный затвор ориентирует импульс электрона вдоль оси нейтронотода, ведущего электроны к детектору. При низком значении нижнего порога детектор УХН оказывается и детектором электронов.

4. Результаты обработки данных и обсуждение. На рис.2 показана частотная гистограмма скоростей счета, а на рис.3 – около 300 значений

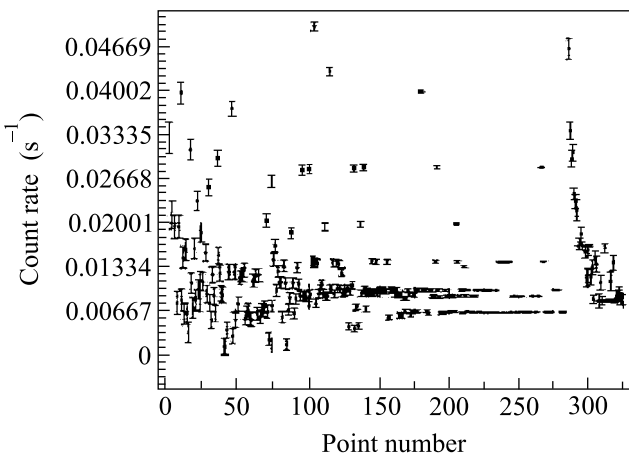


Рис.3. Значения скоростей счета детектора при удержании УХН и вытекании

скоростей счета с погрешностями. Погрешность вычислялась методом средневзвешенного [7] за полное количество серий, в котором это значение скорости счета получено. Указанным выше методом вся совокупность скоростей счета (по варианту 1) исследована в диапазоне предполагаемого времени жизни τ от 884 до 916с, что соответствует известным из прошлых экспериментов значениям времени жизни нейтрона. Построена зависимость функционала $F(\tau)$ ((4), см. рис.4) от пробного времени жизни нейтро-

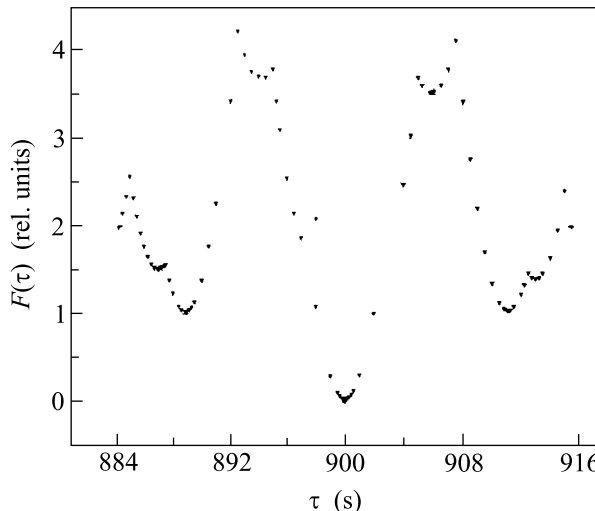


Рис.4. Вид МНК-подобного функционала для полученного массива скоростей счета

на τ . Оказалось, что в данной области функционал (4) имеет не один, а семь локальных минимумов. Наиболее достоверные пять значений сведены в таблицу.

Результаты по варианту 2 дают одно значение $\tau_0 = 899.99 \pm 0.45$ с (см. рис.5). В таблице наиболее

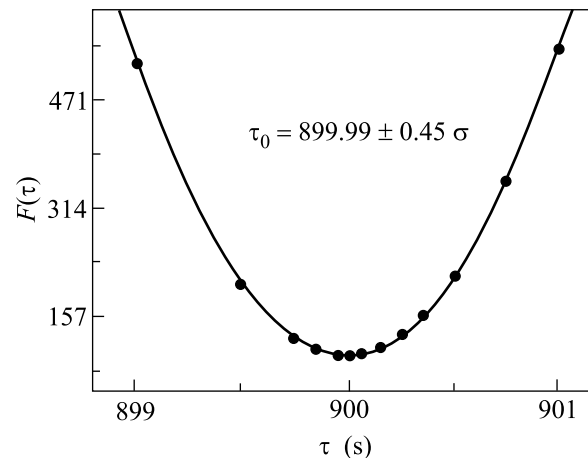


Рис.5. Определение времени жизни по МНК-подобному функционалу для варианта 2 (159 измерений скорости счета)

достоверным выглядит значение № 3. Два "левых" значения дают в среднем 888с (левее точки 900с на кривой) и два "правых" значения соответствуют

среднему 912 с. Эти значения хорошо совпадают с известными результатами прошлых измерений времени жизни нейтрона с использованием магнитного поля [8]. Все это выглядит как следствие вполне возможного эффекта расщепления времени жизни нейтрона в магнитном поле при регистрации электронов распада. Однако происхождение этого “расщепления” нуждается в дополнительном исследовании, поскольку может быть техническим следствием метода. В рамках применяемого метода настройки шкалы распада наиболее достоверно определено среднее значение: 900.01 ± 0.15 с. Это значение получено при обработке полной совокупности измерений скорости счета (вариант 1, 324 точки).

5. Выводы и заключение. Показано, что в эксперименте с магнитной ловушкой основным фактором фона являлись электроны от распада поляризованных нейтронов внешнего фона внутри ловушки. Предложен и применен к полученным данным по скорости счета метод настройки шкалы распада. Получено указание на существование эффекта расщепления времени жизни нейтрона при распаде поляризованных нейтронов в магнитном поле, что проявилось как соответствие части данных временам жизни, одно из которых (≈ 888.0 с) меньше, а другое (≈ 912.0 с) больше, чем среднее значение времени жизни нейтрона в неоднородном магнитном поле. Значение 888 с весьма близко к результатам наиболее точных последних экспериментов [8], основанных на хранении УХН в материальных сосудах, а значение 912 с соответствуют [9]. Впрочем, это указание нуждается в дополнительной проверке.

Показано, что среднее время жизни нейтрона в неоднородном магнитном поле равно 900.01 ± 0.15 с. По-

лученный результат, возможно, является дополнительным стимулом уточнения времени жизни нейтрона как методами хранения нейтронов, так и регистрацией продуктов распада нейтронов.

Данная работа основана на результатах, полученных при хранении ультрахолодных нейтронов в 1985–1986 гг. на реакторе ИТЭФ. Автор весьма признателен Ю. Г. Абову за привлечение его к работе по магнитному хранению УХН и В. В. Владимирскому за инициацию этих работ.

Автор благодарит И. Л. Карпихина за поддержку в период обработки данных.

Этап обработки поддержан фондом INTAS, грант # 00-00043.

1. Ю. Г. Абов, С. П. Боровлев, В. В. Васильев и др., ЯФ **38**, 122 (1983).
2. Ю. Г. Абов, В. В. Васильев, В. В. Владимирский, И. Б. Рожнин, Письма в ЖЭТФ **44**, 369 (1986).
3. Ю. Г. Абов, В. В. Васильев, О. В. Шведов, ЯФ **63**, 1381 (2000).
4. H. Abele and M. Kreuz, Proc. the ILL millenium symposium & European user meeting 6-7 April 2001, p. 217.
5. А. П. Бабичев, И. А. Бабушкина, А. М. Братковская и др., *Физические величины*, Справочник под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Михайлова, М.: Энергоатомиздат, 1991, с. 1169.
6. В. В. Васильев. Препринт ИТЭФ №39, 1977 г., Москва.
7. Д. Худсон, *Статистика для физиков*, М: Мир, 1970, с. 182.
8. Ю. В. Гапонов, Ю. А. Мостовой, ЯФ **63**, 1432 (2000).
9. C. J. Christensen, A. Nielsen, A. Bahnsen et. al, Phys. Rev. **D5**, 1628 (1972).