

Систематические эффекты при измерении времени жизни нейтрона в магнитных ловушках ультрахолодных нейтронов

В. Ф. Ежов^{+*1)}, В. Л. Рябов⁺

⁺Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 188300 Гатчина, Россия

* Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 16 ноября 2022 г.

После переработки 16 ноября 2022 г.

Принята к публикации 6 декабря 2022 г.

Обсуждаются возможные систематические эффекты в экспериментах по измерению времени жизни нейтрона с использованием хранения ультрахолодных нейтронов в магнито-гравитационных ловушках. Предлагаются методы регистрации возможных потерь, включая потери на деполяризацию и малый нагрев нейтронов в процессе их хранения в ловушке в режиме on-line.

DOI: 10.31857/S1234567823020015, EDN: odxbqg

1. Введение. Время жизни нейтрона τ_n , а также отношение аксиально-векторной и векторной констант слабого взаимодействия $\frac{G_A}{G_V}$, являются важнейшими параметрами слабого взаимодействия, используемыми в ядерной физике, физике частиц, астрофизике, космологии и в описании процесса первичного нуклеосинтеза. Они позволяют определить V_{ud} – матричный элемент матрицы Кабиббо–Кобаяши–Маскава без влияния ядерных поправок и получить ограничения на “новую физику”, выходящую за рамки Стандартной модели [1].

Эксперименты по измерению времени жизни нейтрона разделяются на 2 класса: пучковые и эксперименты с хранением ультрахолодных нейтронов (УХН) в материальных и магнитных ловушках. Наиболее подробно все эксперименты рассмотрены в обзоре [2]. В пучковых экспериментах одновременно измеряется абсолютное количество продуктов распада и число нейтронов в области распада. В экспериментах же с УХН нейтроны хранятся в ловушках, и измеряется количество УХН оставшихся в ловушке после определенного времени хранения. Важно отметить, что одновременно с увеличением точности экспериментов проявилось расхождение между результатами пучковых экспериментов и экспериментов с хранением УХН в ловушках. Среднее измеренное значение времени жизни нейтрона в пучковых экспериментах составляет $\tau_n = 887.3 \pm 2.8$ с, а в экспериментах с хранением УХН $\tau_n = 879.4 \pm 0.6$ с. Возможные причины этого расхождения широко об-

суждаются [3, 4]. В последнем выпуске Partical data group приводит данные только экспериментов с хранением УХН рис. 1.

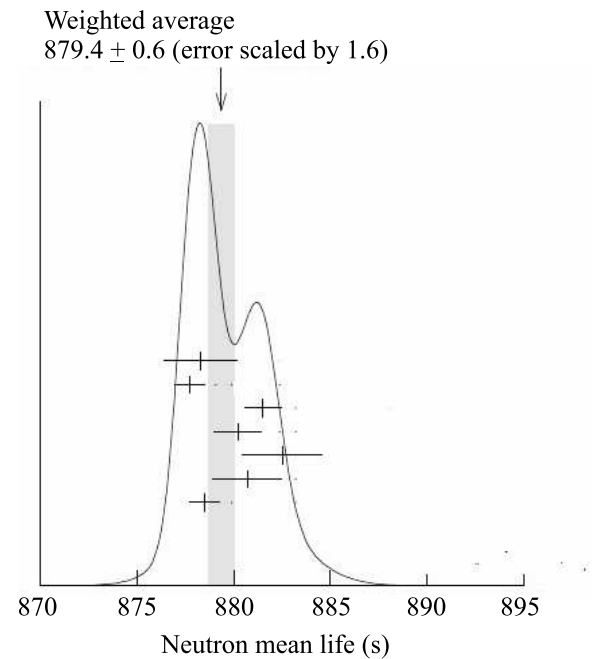


Рис. 1. Результаты последних наиболее точных экспериментов по измерению времени жизни нейтрона. Среднее измеренное значение времени жизни нейтрона в пучковых экспериментах составляет $\tau_n = 887.3 \pm 2.8$ с, а в экспериментах с хранением УХН $\tau_n = 879.4 \pm 0.6$ с (<https://pdglive.lbl.gov/>)

Итак, в экспериментах по измерению времени жизни нейтрона существуют две проблемы: устано-

¹⁾e-mail: Ezhov_VF@npfi.nrcki.ru

вить причины расхождения результатов экспериментов в пучковом варианте и в экспериментах с хранением УХН, а также необходимость довести экспериментальную точность до точности порядка 0.3 с, которая необходима для определения величины матричного элемента матрицы Кабаяши–Маскава V_{ud} и, соответственно, проверки Стандартной модели.

Важно отметить, что при измерении времени жизни нейтрона на пучке нейтронов необходимо собрать все продукты распада нейтрона и измерить абсолютное значение интенсивности нейтронного пучка. При этом неполный сбор продуктов распада будет приводить к увеличению измеренной величины времени жизни нейтрона. В экспериментах с хранением УХН нет абсолютных измерений, однако наличие неконтролируемых потерь во время хранения УХН в ловушке может приводить к занижению измеренной величины времени жизни нейтрона.

2. Магнитное хранение УХН. В экспериментах используют два типа ловушек для хранения УХН: материальные и магнитные. В первом случае при соударении нейтронов с материальными стенками ловушки возникают потери, которые сложно контролировать с необходимой точностью. Магнитные ловушки позволяют исключить соударение хранящихся УХН со стенкой. Основным потенциальным преимуществом магнитных ловушек по сравнению с материальными является, как будет показано ниже, возможность регистрации потерь УХН непосредственно во время их хранения в магнитном сосуде. Магнитное поле в таких ловушках сильно неоднородно, и основным источником потерь является деполяризация (переворот магнитного момента нейтрона относительно направления магнитного поля) хранящихся нейтронов. Полностью исключить деполяризацию невозможно, поскольку условие адиабатичности, которое описывает вероятность деполяризации в неоднородных магнитных полях, всегда выполняется с какой-то точностью, а значит, на этом уровне точности деполяризация будет присутствовать всегда. Например, выполнение условия адиабатичности с точностью 10^{-6} означает, что один нейтрон на миллион будет деполяризован. Таким образом, создание ловушки без потерь невозможно. Наибольший прогресс в создании магнитных ловушек достигнут в конструкциях из постоянных магнитов [5] и [6]. Впервые использование постоянных магнитов для создания ловушек УХН было предложено в работе [7] и реализовано в [8].

Магнитное хранение УХН имеет огромное преимущество по сравнению с материальными ловушками. Наличие в магнитной ловушке на выпуск-

ном нейтроноводе магнитного затвора, который прозрачен для деполяризованных нейтронов, позволяет проводить эксперименты по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией возможных потерь УХН в процессе их хранения в ловушке (в режиме on-line). Дело в том, что деполяризованные нейтроны не погибают, а продолжают храниться в сосуде, если его магнитные стенки покрыты отражающим веществом, ядерный барьер которого превышает энергию деполяризованных нейтронов. В этом случае они, после нескольких соударений проходят в нейтроновод через прозрачный для них барьер и регистрируются детектором. Без использования этой уникальной возможности эксперименты с магнитным хранением практически не отличаются от экспериментов с хранением УХН в материальных ловушках. Таким образом, наличие магнитного затвора является принципиальным моментом для экспериментов по измерению времени жизни нейтрона в магнитной ловушке. Одна из возможных конструкций магнитного затвора реализована в [9].

Другим принципиальным моментом в экспериментах с хранением УХН является наполнение ловушки и выбор времени, необходимого для полной очистки нейтронного спектра от нейтронов, энергия которых превышает величину потенциального барьера стенок. Это время можно измерить, например, наполняя ловушку нейтронами, энергия которых заведомо превышает энергию барьера. Недостаточное время, выделенное для очистки спектра УХН будет занижать время жизни нейтрона.

Особое внимание следует обратить на возможность “малого” нагрева нейтронов. Потенциальным источником “малого” нагрева УХН могут быть тепловые и акустические флуктуации магнитного поля постоянных магнитов [10].

Возможные систематические эффекты. Рассмотрение возможных систематических эффектов в экспериментах с магнитным хранением УХН проведем на примере эксперимента по измерению времени жизни нейтрона [5]. На рисунке 2 приведена схема экспериментальной установки. Наполнение магнито-гравитационной ловушки осуществляется через ее верхнюю открытую часть с помощью своеобразного нейтронного лифта. При падении нейтрона с высоты h он приобретает энергию mgh (m – масса нейтрона, g – ускорение свободного падения). Такие нейтроны невозможно хранить в ловушке, поскольку при отражении от дна ловушки они взлетают выше ее верхнего края. Поэтому необходимо опустить нейтроны в ловушку без их нагрева. Это можно сделать с помощью лифта. При

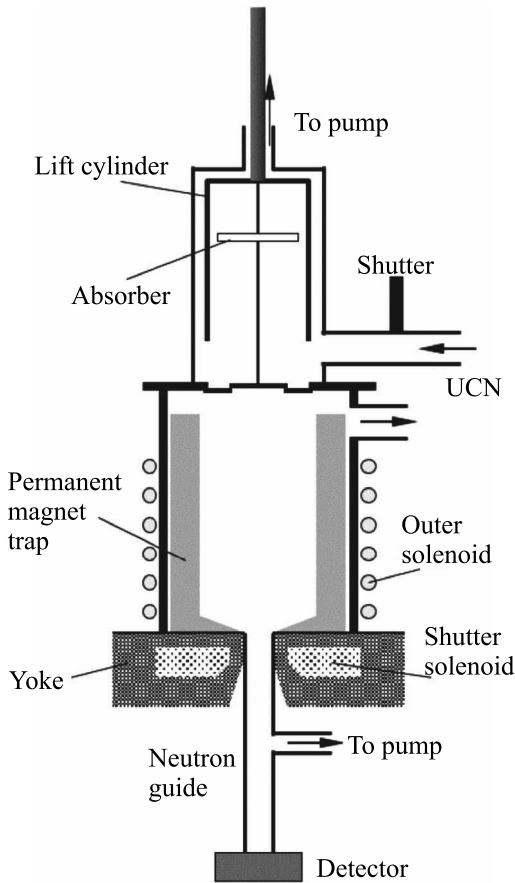


Рис. 2. Схема экспериментальной установки [5]. Основные части: лифт (момент заполнения), магнитогравитационная ловушка, соленоидальный магнитный затвор с его ярмом, внешняя обмотка соленоида для создания магнитного поля на оси ловушки и детектор УХН

этом должно быть выполнено условие адиабатичности: скорость нейтронов должна быть много больше скорости движения лифта. Иными словами, нейтрон должен испытать большое количество соударений с дном лифта при движении лифта вниз. Лифт представляет собой алюминиевый цилиндр диаметром 18.4 см, внутренняя поверхность которого покрыта фомблином. Цилиндр находится внутри вакуумной камеры, изготовленной из нержавеющей стали. Внутри цилиндра расположен поглотитель, позволяющий формировать спектр УХН при его наполнении. При открытии затвора нейтроновод лифт наполняется УХН в течение 50 с, затем цилиндр опускается, и часть нейтронов остается в цилиндре лифта. Лифт движется вниз со скоростью около 5 см/с, что в 50 раз меньше средней скорости УХН. В нижней точке дно лифта открывается и УХН заполняют ловушку, а лифт с открытым дном

поднимается в исходное состояние. Все перемещения осуществляются без нарушения вакуума посредством магнитных муфт. Вакуум в камере составлял 1.1×10^{-6} мбар.

Для успешного применения магнитного затвора боковые стенки ловушки должны отражать деполяризованные нейтроны. С этой целью в работе [5] стенки ловушки покрыты слоем фомблина, ядерный потенциал которого превышает магнитный и достаточен для отражения деполяризованных УХН. Магнитный барьер стенок прозрачен для деполяризованных нейтронов, более того, они ускоряются при прохождении этого барьера, но отражаются слоем фомблина, которым покрыта поверхность магнитов. Деполяризованные нейтроны после нескольких соударений со стенками ловушки проникают через магнитное поле магнитного затвора, перекрывающего выход в нейтроновод, и попадают на детектор.

До выхода из ловушки деполяризованные нейтроны испытывают некоторое количество соударений с материальной стенкой ловушки, и при этом могут быть захвачены или испытать неупругое рассеяние и покинуть ловушку. Для фомблина эти процессы маловероятны, поскольку фактор потерь при соударении УХН с фомблином составляет всего ($\eta = 2.2 \pm 0.1 \times 10^{-5}$) [11], а число соударений мало. Тем не менее вероятность потерь необходимо измерить. Это может быть легко осуществлено введением принудительной деполяризации УХН при их хранении в магнитной ловушке. Принудительная деполяризация может быть легко осуществлена, например, созданием нулей магнитного поля в ловушке путем включения дополнительного магнитного поля. При включении принудительной деполяризации количество УХН, вытекающих из ловушки во время хранения, возрастает. В результате меньшее количество нейтронов будет зарегистрировано при опорожнении ловушки в конце цикла. Сравнение количества вытекших и оставшихся в ловушке УХН с включенной деполяризацией и без нее позволяет измерить вероятность потерь деполяризованных нейтронов в ловушке при их соударениях со стенкой, покрытой фомблином. Обозначим число захваченных нейтронов в ловушке после достижения равновесия как $N_T(t)$, а число деполяризованных нейтронов, которые вытекают из ловушки и затем детектируются $N_L(t)$. В этом случае динамика процесса хранения УХН в ловушке описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{N}_T(t) = -\lambda_n N_T(t) - \lambda_{SF} N_T(t), \quad (1)$$

$$\dot{N}_L(t) = \epsilon \lambda_{SF} N_T(t), \quad (2)$$

где λ_n и λ_{SF} – постоянная распада нейтрона и, соответственно, постоянная, характеризующая вытекание деполяризованных нейтронов, ϵ – вероятность для деполяризованного нейтрона покинуть ловушку. Эти уравнения предполагают, что время вытекания деполяризованных нейтронов во много раз меньше времени жизни нейтрона. Предполагая, что величина ϵ постоянная, постоянная распада нейтрона может быть записана в виде:

$$\lambda_n = \lambda_S - \lambda_{SF} = \lambda_S(1 - \alpha_{SF}), \quad (3)$$

где λ_S – постоянная хранения УХН в ловушке, а α_{SF} – поправка, связанная с наличием деполяризации в ловушке. При начальных условиях $N_T(0) = N_0$ и $N_L(0) = 0$ и при времени хранения УХН в ловушке T получаем:

$$\lambda_S = \frac{1}{T} \ln \left[\frac{N_0}{N_T(T)} \right] \quad (4)$$

и

$$\alpha_{SF} = \frac{1}{\epsilon} \frac{N_L(T)}{N_0 - N_T(T)}. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что зависимость поправки α_{SF} от эффективности сбора деполяризованных нейтронов ϵ подавлена соотношением $N_L(T) \ll \ll N_0 - N_T(T)$. Другими словами, когда утечки малы, требуемая точность измерения эффективности сбора деполяризованных нейтронов также уменьшается.

При планировании эксперимента по измерению времени жизни нейтрона в магнитных ловушках необходимо также учитывать систематический эффект, связанный с возможными потерями УХН из-за трансформации их энергетического спектра в процессе хранения, например, за счет малого нагрева УХН или вибраций. Рассмотрим малый нагрев УХН. Для того, чтобы учесть такой эффект, достаточно держать магнитный барьер магнитного затвора меньше величины магнитного барьера стенок ловушки. В этом случае, нагревающиеся УХН еще будут отражаться магнитным барьером стенок, но будут проникать через магнитный барьер затвора и регистрироваться детектором так же, как и деполяризованные нейтроны.

Наличие принудительной деполяризации и возможность измерения эффективности сбора деполяризованных нейтронов дают уникальную возможность измерения степени очистки энергетического спектра УХН от нейтронов с энергией, превышающей величину магнитного барьера. Мы рассматривали ϵ как вероятность потерь деполяризованных нейтронов при соударении со стенкой. Однако наличие

надбарьерных УХН в ловушке приводит к увеличению величины ϵ , так как быстрые нейтроны не отражаются магнитным барьером, и полная вероятность потерь при соударении УХН со стенкой возрастает. Таким образом, для определения времени, необходимого для полной очистки нейтронного спектра от быстрой компоненты достаточно измерить зависимость ϵ от времени очистки нейтронного спектра. Спектр будет полностью очищен, когда ϵ перестанет изменяться с увеличением времени чистки.

В ходе эксперимента необходимо контролировать величину наполнения ловушки. Она может флуктуировать в зависимости от стабильности работы источника УХН, от точности работы впускного шибера, одинаковости времени наполнения ловушки. В идеальном случае нужно измерять количество УХН непосредственно в ловушке при каждом наполнении. Такую возможность предоставляет наполнение магнитной ловушки неполяризованными нейтронами с включенным магнитным затвором. В этом случае половина нейтронов, поляризация которых не позволяет хранить их в магнитной ловушке, через магнитный затвор сразу попадет на детектор. В эксперименте [5] это осуществлялось путем наполнения ловушки с помощью лифта. На рисунке 3 приведена интенсивность УХН на детекторе в процессе наполнения ловушки неполяризованными нейтронами с включенным и выключенным магнитным затвором. До 50-й секунды происходит наполнение объема лифта, в процессе которого имеется небольшая утечка нейтронов через уплотнение дна лифта. При движении лифта вниз утечка слегка увеличивается. На 64-й секунде дно лифта открывается и нейтроны заполняют ловушку. Подъем лифта осуществляется с открытым дном лифта, а нейтроны остаются в ловушке.

При выключенном магнитном затворе в нижней части ловушки все нейтроны вытекают из нее (рис. 3, красная кривая). При включенном магнитном затворе вытекают УХН, поляризация которых не позволяет им храниться в ловушке (эти нейтроны ускоряются в градиенте магнитного поля), а также нейтроны, энергия которых превышает высоту магнитного барьера затвора (рис. 3, черная кривая). Разность этих кривых соответствует количеству нейтронов, оставшихся в ловушке. Таким образом, измерение количества нейтронов, вытекающих из ловушки при ее наполнении, является уникальным мониторингом, позволяющим измерять непосредственное количество УХН в ловушке при каждом ее наполнении.

Наконец, о вакууме. В идеальном случае вакуум в ловушке должен быть таким, что его вклад в погрешность измерений был бы незначительным. Как по-

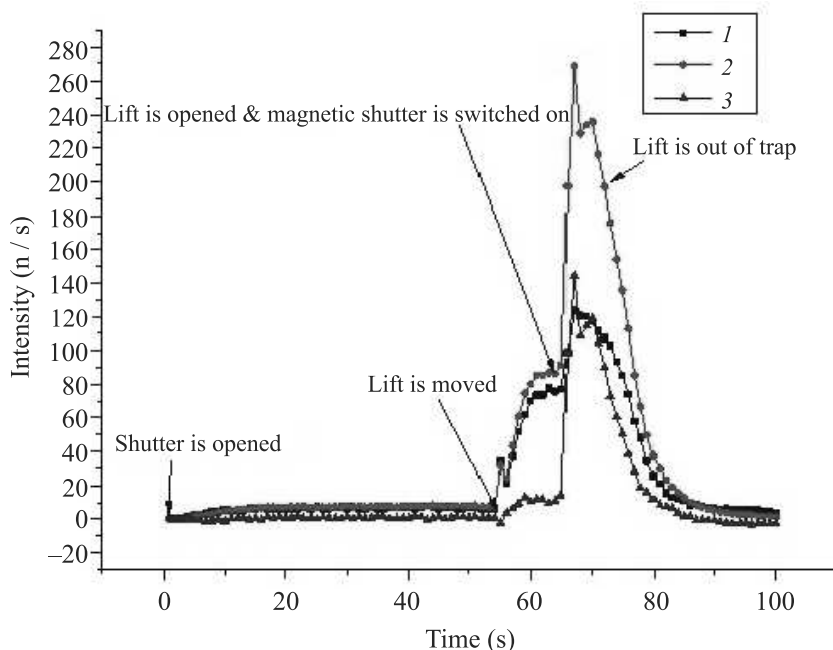


Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимость интенсивности УХН на детекторе от времени при наполнении неполяризованными УХН и последующим опускании лифта в магнито-гравитационную ловушку при различных состояниях магнитного затвора. 1 – Магнитный затвор выключен, и все УХН вытекают. 2 – Магнитный затвор включен, вытекают УХН одной поляризации и УХН, энергия которых превышает высоту магнитного барьера затвора. 3 – Разность кривых 1 и 2 дает количество УХН, оставшихся в ловушке

казывает опыт экспериментов по измерению времени жизни нейтрона [5], для достижения точности на уровне 0.3 с вакуум должен быть порядка 10^{-7} мбар.

4. Заключение. Основным преимуществом магнитного хранения УХН является возможность регистрации непосредственно в процессе хранения деполаризованных нейтронов и нейтронов, испытавших малый нагрев. Необходимым условием для этого является наличие в ловушке магнитного затвора. Именно затвор позволяет осуществить регистрацию как деполаризованных, так и нагретых нейтронов в режиме on-line. Конструкция затвора может быть различной, но его наличие дает возможность исключить основные систематические эффекты в экспериментах по измерению времени жизни нейтрона методом хранения УХН в магнитных ловушках.

Данная работа была выполнена в рамках тематического плана НИОКР НИЦ КИ «ПЯЯФ». Авторы благодарят за активное участие в создании магнитной ловушки сотрудников лаборатории Молекулярных и атомных пучков Н. Н. Дмитриева, А. Г. Глушкова, Б. А. Базарова, Г. Б. Крыгина.

1. D. Dubbers and M. G. Schmidt, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1111 (2011).
2. F. E. Wietfeld and G. L. Greene, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1173 (2011).
3. A. P. Serebrov, *J. Phys. Conf. Ser.* **139**, 012007 (2019).
4. A. Czarnecki, W. J. Marciano, and A. Sirlin, *Phys. Rev. Lett.* **120**(20), 202002 (2018).
5. V. F. Ezhov, A. Z. Andreev, G. Ban, B. A. Bazarov, P. Geltenbort, A. G. Glushkov, V. A. Knyazkov, N. A. Kovrizhnykh, G. B. Krygin, O. Naviliat-Cuncic, and V. L. Ryabov, *JETP Lett.* **107**(11), 671 (2018).
6. F. M. Gonzalez, E. M. Fries, C. Cude-Woods et al. (Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **127**, 162501, (2021).
7. V. F. Ezhov, B. A. Bazarov, P. Geltenbort, N. A. Kovrizhnykh, G. B. Krygin, V. L. Ryabov, and A. P. Serebrov, *Technical Physics Letters* **27**(12), 1055 (2001).
8. V. F. Ezhov, A. Z. Andreev, B. A. Bazarov et al. (Collaboration), *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **110**(1), 345 (2005).
9. V. F. Ezhov, V. L. Ryabov, A. Z. Andreev, B. A. Bazarov, A. G. Glushkov, and V. A. Knyazkov, *Technical Physics Letters* **44**(7), 602 (2018).
10. L. Jinfangt, P. Shumingt, L. Heliet, H. Denglu, and N. Xiangfu, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **24**, 384 (1991).
11. J. C. Bates, *Phys. Lett. A* **88**, 427 (1982).