

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ПОДБАРЬЕРНЫХ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ СКВОЗЬ БЕРИЛЛИЕВЫЕ ФОЛЫГИ И ПОКРЫТИЯ

В.Е.Варламов, П.Гельтенборт^{*1)}, *В.В.Несвижевский, М.Пендлебури*⁺¹⁾,
*А.П.Серебров*²⁾, *А.В.Стрелков*[□], *Р.Р.Тальдаев, А.Г.Харитонов,*
В.Н.Швецов[□], *К.Шрекенбах*^{×1)}

*Институт ядерной физики им.Б.П.Константинова РАН
188350 Гатчина, Россия*

** Institut Max von Laue - Paul Langevin
38042, Grenoble, France*

*+ University of Sussex
Brighton BN1 9QH, UK*

*□ Объединенный институт ядерных исследований
141980 Дубна, Россия*

*× Technische Universität München
D-85747 Garching, Germany*

Поступила в редакцию 5 августа 1997 г.

Обнаружено явление подбарьерного прохождения ультрахолодных нейтронов сквозь бериллиевые фольги и покрытия с вероятностью, существенно превышающей величину туннельного эффекта. Оно может быть причиной так называемых аномальных потерь УХН.

PACS: 28.20.-v

Введение. Основное свойство ультрахолодных нейтронов (УХН) - это их способность испытывать полное внутреннее отражение от поверхности и, следовательно, удерживаться в закрытых материальных ловушках. Сразу же после открытия УХН [1,2] были сделаны попытки получить теоретически предсказанные длительные времена хранения УХН в ловушках.

Однако исследования с УХН, начиная с 1968 г., породили ряд проблем, не имеющих ясных ответов. Главная из них - недостаточные времена хранения УХН в ловушках. Это явление было обнаружено в первых же экспериментах по хранению УХН [3,4]. В 1978 г. были найдены дополнительные потери УХН в стенках ловушки, связанные с нагревом УХН на примесях водорода на поверхности [5,6]. Однако для объяснения наблюдаемых потерь требовались большие концентрации водорода. Эта проблема стала более очевидной в 1990 г. в экспериментах в Гатчине по измерению времени жизни нейтрона [7] и при последующем тщательном исследовании бериллия, который является одним из лучших материалов для стенок ловушки УХН. Потери УХН в бериллиевых ловушках оказались на два порядка выше теоретических оценок, основанных на данных по захвату нейтронов, и составили $3 \cdot 10^{-5}$ (на один удар) при температуре 10 - 15 К. Кроме того, наблюдаемые потери почти не зависели от температуры в диапазоне ниже 80 К. В то же время, вероятность нагрева должна сильно зависеть от температуры, что находится в противоречии с наблюдениями [7]. Последующий тщательный анализ поверхности ловушек не показал наличия загрязнений с высоким сечением захвата. Явление характеризовалось как аномальные потери УХН [8].

¹⁾ P.Geltenbort, M.Pendlebury, K.Schreckenbach

²⁾ e-mail: serebrov@lnpi.spb.su

В последнее время было проведено несколько других необъясненных экспериментов с УХН: наблюдение селективного усиления захвата УХН на некоторых материалах [9], усиленный нагрев УХН на поверхности бериллиевой фольги [10] и др.

Если мы предположим, что существует процесс проникновения УХН внутрь материала, нам удастся, возможно, понять большинство существующих явлений. Мы не будем пытаться обсуждать в этой статье возможные теоретические основания для такого проникновения. Имеются отдельные попытки объяснить аномальные потери УХН [11,12]. В настоящее время идея о локализации УХН в среде с их последующей диффузией обсуждается наиболее активно [13].

Эта статья посвящена ряду экспериментальных фактов по проникновению подбарьерных УХН через бериллиевые фольги и покрытия. Поскольку энергия УХН, проникших через фольгу, в этом эксперименте не была измерена точно, мы не можем доказать, что наблюдалось проникновение УХН под барьером, более правильное утверждение именно то, что экспериментально наблюдалось проникновение подбарьерных УХН.

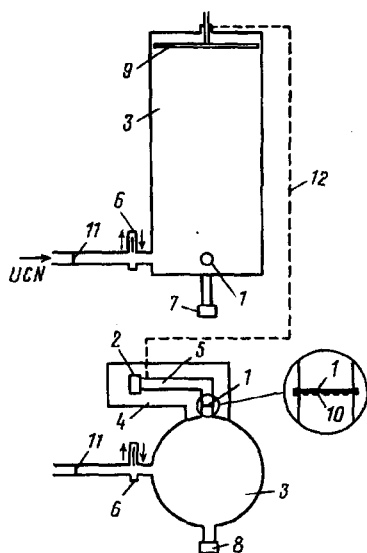


Рис.1. Схема установки на реакторе ИЛЛ в Гренобле для изучения подбарьерного проникновения сквозь бериллиевую фольгу: 1 - бериллиевая фольга толщиной 56 мкм, 2 - детектор УХН ("ДУНя"), 3 - сосуд хранения УХН (гравитационный спектрометр), 4 - защита детектора от нейтронов, 5 - изогнутый нейтронный канал, 6 - клапан УХН, 7 и 8 - мониторные детекторы УХН и надбарьерных нейтронов, соответственно, 9 - полиэтиленовый поглотитель, 10 - опорная решетка из нержавеющей стали, 11 - разделительная алюминиевая фольга, 12 - трубка откачки изогнутого нейтронного канала

Измерение проникновения подбарьерных УХН через бериллиевые фольги и покрытия. Первое указание на эффект проникновения подбарьерных УХН через 0,3–0,5 мкм бериллиевые покрытия (изготовленные методом магнитронного распыления) было получено в экспериментах [7,8]. Ловушка была изготовлена из алюминия и покрыта бериллием. В эксперименте измерялись полные потери УХН в диапазоне энергий $E_0 \sim 0 - 0,7$ м. Здесь энергии УХН выражены в терминах высоты подскока h в гравитационном поле Земли с использованием выражения $E_0 = mgh$. Максимальная энергия УХН $E_{max} = 0,7$ м в этом эксперименте ("КОВШ") была выше, чем критическая энергия алюминиевой подложки $E_{A1} = 0,52$ м. Используемая установка представляла собой гравитационный дифференциальный спектрометр полных потерь УХН. Детальное описание метода измерения энергетической зависимости полных потерь можно найти в [7]. Увеличение потерь в диапазоне энергий $E > E_{A1}$, а также резкое изменение коэффициента потерь при энергии E_{A1} могут означать, что УХН проникали в бериллий и затем в алюминий. Наблюдаемая вероятность проникновения составила $\sim 10^{-3}$ на столкновение, что намного выше вероятности туннелирования через такой слой бериллия. Однако в то

время качество покрытия тщательно не анализировалось и, как следствие, результаты были объяснены низким качеством покрытий.

Чтобы проверить гипотезу проникновения подбарьерных УХН, были проведены специальные исследования с 150-микрометровой вакуумно-плотной бериллиевой фольгой и с бериллиевыми покрытиями на алюминиевой фольге (Гатчина, 1991–1993 гг.), затем с 56-микрометровой вакуумно-плотной бериллиевой фольгой (Гренобль, 1997 г.). Схема нашей установки в Гренобле показана на рис. 1. Тот же самый метод использовался в экспериментах в Гатчине (1991–1993 гг.). Идея измерений заключается в следующем: когда объем хранения 3 заполнен УХН, детектор УХН 2 будет регистрировать только фон экспериментального зала и нейтроны, проникающие через фольгу 1. Для исключения ложных эффектов нужно удалить из объема хранения нейтроны с энергией $E > E_{Be} = 2,35$ м (критическая энергия бериллия). Это достигалось двумя способами: 1) предварительным приготовлением спектра в закрытой ловушке, у которой критическая скорость стенок значительно ниже, чем критическая скорость для бериллия; 2) последующим анализом временной зависимости интенсивности прошедших УХН.

Методика измерений заключается в следующем (рис.1): через клапан б газ УХН заполняет объем хранения 3, затем клапан закрывается. За несколько секунд поток надбарьерных нейтронов с $E > E_{Be}$ уменьшается до весьма малой величины, потому что надбарьерные (для бериллия) нейтроны теряются в полиэтиленовом поглотителе 9, а также в стенках объема хранения, который сделан из нержавеющей стали (критическая энергия $E_{SS} \sim 1,9$ м).

Предварительный объем хранения заполнялся в течение 100 с, затем клапан УХН б закрывался на 210 с. Полный цикл составил 310 с.

Решающее заключение относительно проникновения подбарьерных УХН будет исходить из измерения с вакуумно-плотной бериллиевой фольгой. Поэтому в дальнейшем именно эти измерения будут описаны подробно, а результаты с бериллиевыми покрытиями только перечислены.

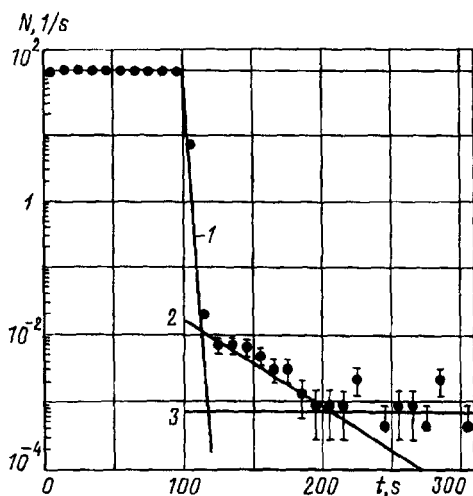


Рис.2. Зависимость интенсивности регистрации УХН от времени, дискриминация на пик Q = 0,764 МэВ: 1 — расчетная зависимость потока надграничных нейтронов от времени; 2 — поток подбарьерных нейтронов, измеряемый мониторным детектором и нормализованный к потоку проникновения УХН; 3 — уровень фона. 0 — 100 с — наполнение спектрометра. Счет детектора вызван надграничными нейтронами с короткими временами хранения; 100 — 120 с — резкое уменьшение интенсивности счета после закрытия входного клапана; 120 — 310 с — поток проникновения УХН уменьшается одновременно с уменьшением потока УХН в спектрометре вплоть до уровня постоянного фона

Вакуумно-плотная бериллиевая фольга (1, рис.1) была изготовлена методом прокатки до толщины 56 мкм из прессованного Ве. Она перекрывала все поперечное сечение нейтронвода 5 диаметром 9 см, который соединял объем хранения с детектором УХН 2. Чтобы защитить фольгу от повреждения давлением воздуха, была установлена решетка 10, сделанная из нержавеющей стали. Площадь фольги, которая не была заслонена решеткой, составила 48 см². Вертикальный цилиндр диаметром 0,6 м и высотой 2 м использовался

как объем хранения 3. Сосуд хранения и нейтронотоды были сделаны из полированной нержавеющей стали. Нейтроны транспортировались от турбины Штайерла (Steyerl) до объема хранения по нейтронотоду с алюминиевой разделительной фольгой 11. Нейтронотод может быть закрыт клапаном 6. Поток УХН на уровне бериллиевой фольги был равен $500 \text{ нейтрон} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. На высоте 1,8 м в спектрометре имеется полиэтиленовый поглотитель 9, который обеспечивает соответствующее обрезание спектра УХН сверху при $E_{\text{max}} \sim 1,8 \text{ м}$. Алюминиевая разделительная фольга 11 во входном нейтронотоду обеспечивает нижнюю границу спектра при $E_{\text{min}} \sim 0,52 \text{ м}$. Детектор УХН (10 торр ^3He и 900 торр Ar , 100-микронтовое алюминиевое окно площадью $60 \text{ см}^2 - 2$, рис.1) был помещен на другом конце изогнутого под углом 90° нейтронотода длиной $\sim 75 \text{ см}$ вдоль оси. При таком расположении детектор "не видит" бериллиевую фольгу непосредственно, что существенно уменьшает фон неупруго рассеянных нейтронов на фольге 1.

Бериллиевая фольга обеспечивала вакуумно-плотное разделение объема хранения с давлением $(1-2) \cdot 10^{-4}$ мбар и объема изогнутого нейтронотода. Уплотнение бериллиевой фольги исключало просачивание УХН в обход фольги.

Нейтронная защита 4 детектора УХН состоит из борированной резины толщиной 1 см и борированного полиэтилена толщиной 16 см.

На рис.2 показана временная зависимость счета УХН детектором 2. Поток УХН, проникающий через бериллиевую фольгу, оказался равен $(1,16 \pm 0,20) \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ для диапазона энергий $E_0 \sim (0,52 - 1,8) \text{ м}$. С учетом потока УХН, падающего на фольгу, вероятность проникновения УХН сквозь фольгу составила $(5,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-7}$ на один удар. Статистическая надежность измерения составила ~ 6 среднеквадратичных отклонений.

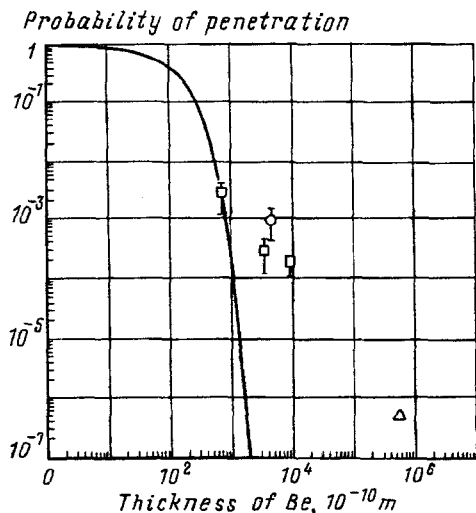


Рис.3. Сравнение вероятности туннелирования через фермиевский потенциал с экспериментальными данными по проникновению подбарьерных УХН через бериллиевые фольги и покрытия. Сплошная линия — оценка эффекта туннелирования, усредненного по спектру УХН, Δ — измерения в Гренобле с 56-микронтовой бериллиевой фольгой; \square — измерения в Гатчине с покрытиями на алюминиевой фольге; \circ — оценка проникновения УХН, полученная из измерений времени жизни нейтрона [7]

Вероятность проникновения подбарьерных УХН рассчитывалась фитированием экспериментальных данных функцией

$$\alpha_1 + \alpha_2 \exp\left(-t/\tau_{st}\right), \quad (1)$$

где α_1, α_2 — свободные параметры, которые соответствуют фону и потоку проникающих нейтронов, τ_{st} — время хранения в спектрометре, которое извлекалось из измерений с мониторным детектором 7. В обработке использовались данные только после 120-й секунды, когда поток надграницных нейтронов становится малым.

Отношение сигнал/шум составляет 15. Это достигнуто благодаря высокому потоку УХН на реакторе ИЛЛ, использованию низкофонового детектора УХН "ДУНя" с дифференциальной настройкой дискриминатора на узкий пик, соответствующий сигналу регистрации нейтрона, 4π -нейтронной защите детектора, а также благодаря очень низкому нейтронному фоновому потоку в экспериментальном зале реактора в Гренобле. В эксперименте одновременно регистрировались временной и амплитудный спектры импульсов детектора. Это позволило провести впоследствии анализ данных, изменяя уровень амплитудной дискриминации. Интересно сравнить, например, результаты для двух различных уровней дискриминации: один в пределах узкого пика реакции $n + {}^3\text{He} \rightarrow t + p$, $Q = 0,764$ МэВ, и другой с намного более широким диапазоном амплитуд с нижним пределом $E = 0,15$ МэВ. Сравнение результатов для этих двух случаев приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение двух вариантов амплитудной дискриминации сигнала детектора УХН

	Интенсивность регистрации УХН, с^{-1}	
	настройка на окно с пиком $Q = 0,764$ МэВ	настройка на диапазон $E > 0,15$ МэВ
Фон	$(7,4 \pm 1,8) \cdot 10^{-4}$	$(2,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$
Проникновение	$(1,16 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$(1,20 \pm 0,22) \cdot 10^{-2}$

Почти все зарегистрированные события найдены в амплитудном окне, соответствующем пику $Q = 0,764$ МэВ. Это означает, что наблюдаемый эффект вызван нейтронами, а не наводками, которые показали бы широкое амплитудное распределение. Фон защищенного детектора в окне, соответствующем пику реакции, при остановленном реакторе составил $(5,8 \pm 0,9) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Этот фон не связан с нейтронами, потому что четко выраженный пик в районе $Q = 0,764$ МэВ отсутствует. Эта величина является пределом для используемого детектора.

Нагрев УХН в диапазон энергий тепловых нейтронов на стенках спектрометра мог бы создавать ложный эффект при недостаточной толщине защиты детектора. Однако измерения показали, что счет совсем не защищенного детектора УХН не изменялся во времени, тогда как плотность УХН в спектрометре изменялась на несколько порядков.

Таблица 2

Зависимости потоков надбарьерных и подбарьерных нейтронов от давления воздуха в нейтроноводе, соединяющем бериллиевую фольгу с детектором УХН

Давление воздуха в нейтроноводе, мбар	Поток надбарьерных нейтронов, с^{-1}	Поток подбарьерных нейтронов, с^{-1}
0	$(123,5 \pm 1,0)$	$(1,16 \pm 0,20) \cdot 10^{-2}$
210	$(35,4 \pm 0,4)$	$(0,25 \pm 0,15) \cdot 10^{-2}$

Другая проверка того, что регистрируемые нейтроны не тепловые, это измерение зависимости интенсивности счета детектора от давления воздуха в нейтроноводе (5, рис.1). Можно оценить, что давление воздуха 210 мбар дает уменьшение счета приблизительно в 4,5 раза для УХН и надграницных нейтронов. Но тепловые нейтроны не почувствовали бы наличия воздуха в нейтроноводе. Это и было подтверждено экспериментом, результат которого приведен в табл. 2.

Итак, интенсивность регистрации УХН детектором, имеющая ту же самую временную зависимость, что и плотность УХН в спектрометре, определенно связана с УХН, достигающими детектора по нейтроноводу. В настоящее время мы не видим никакого другого объяснения этого факта, кроме как проникновение подбарьерных УХН.

Также имеются экспериментальные данные из измерений в Гатчине по проникновению УХН через бериллиевые покрытия на алюминиевых фольгах. Они не позволяют сделать вывод относительно проникновения подбарьерных УХН, потому что могли иметься малые, но многочисленные дефекты покрытия, которые не были найдены оптическими средствами. Но эти данные можно использовать, чтобы иметь более полную картину явления. Все образцы с покрытием толщиной 0,07–0,8 мкм показали проникновение УХН с вероятностью $2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$ (см. рис.3). Просмотр поверхности покрытия оптическим микроскопом с увеличением в 700 раз показал, что доля поверхности с дефектами не более 10^{-4} . Не было обнаружено проникновения УХН через 100-микрометровую алюминиевую фольгу с двухсторонним 0,5-микрометровым бериллиевым покрытием. Этот эксперимент позволяет прокалибровать зависимость от времени потока надбарьерных нейтронов, потому что проникновение подбарьерных нейтронов через такой образец незначительно, в то время как поток надбарьерных нейтронов почти не меняется. Для измерения абсолютного значения потока УХН в объеме хранения, так же как и его зависимости от времени, использовалась фольга с калиброванным отверстием.

Анализ экспериментальных результатов. Полезно сравнить вероятность наблюдаемого проникновения с вероятностью эффекта туннелирования под потенциальным барьером V_e . Это сравнение (рис.3) показывает, что имеется дополнительное проникновение УХН через бериллиевые фольги и покрытия. Оно становится важным при толщине 0,1 мкм, при которой эффект туннелирования начинает уменьшаться очень быстро с увеличением толщины. Использование вакуумно-плотных бериллиевых фольг не позволяет свести проблему к качеству технологии покрытий и указывает, что имеется другая причина этого явления.

Заключение. Экспериментально наблюдалось проникновение подбарьерных нейтронов через бериллиевые фольги и покрытия. Вероятность проникновения для 56 мкм вакуумно-плотной бериллиевой фольги составила $(5 \pm 1) \cdot 10^{-7}$ на столкновение. Это значение на много порядков величины больше, чем эффект квантовомеханического туннелирования для этой толщины. Обнаруженный эффект, очень вероятно, имеет ту же природу, что и эффект аномальных потерь УХН во время их хранения в ловушках. В дальнейших исследованиях наиболее важно достаточно точно измерить энергию нейтронов, проникающих через фольгу, чтобы подтвердить, что обнаруженный эффект — эффект подбарьерного проникновения.

Эксперимент выполнен при поддержке РФФИ (грант 92-02-18663) и INTAS (грант 93-0298). Авторы благодарны Н.В.Боровиковой за изготовление образцов, С.Ньюмайеру (S.Neumaier) за помощь во время эксперимента в Гренобле и всем нашим коллегам за полезные обсуждения и интерес к этой работе.

1. I. В.И.Лушиков, Ю.Н.Покотиловский, А.В.Стрелков и др., Письма в ЖЭТФ 9, 40 (1969).
2. A.Steyerl, Phys.Lett. B29, 33 (1969).
3. L.V.Groshev, V.N.Dvoretzky, A.M.Demidov et al., Phys.Lett. B34, 293 (1971).
4. А.И.Егоров, В.М.Лобашев, В.А.Назаренко и др., ЯФ 19, 300 (1974).
5. А.В.Стрелков, М.Хетцельт, ЖЭТФ 74, 23 (1978).
6. A.D.Stoica, A.V.Strelkov, and M.Hetzelt, Z.Phys. B29, 349 (1978).
7. В.П.Алфименков, В.Е.Варламов, А.В.Васильев и др., Письма в ЖЭТФ 52, 984 (1990).
8. В.П.Алфименков, В.В.Несвижевский, А.П.Серебров и др., Письма в ЖЭТФ 55, 92 (1992).
9. С.С.Арауманов, Л.Н.Бондаренко, Е.И.Коробкина и др., Письма в ЖЭТФ 65, 3 (1997).
10. A.V.Strelkov, G.N.Nekhaev, V.N.Shvetsov et al., ILL Research Report 3-14-52, Grenoble, 1997.
11. V.K.Ignatovich and M.Utsuro. Phys. Lett. A225, 195 (1997).
12. А.И.Франк, В.Г.Носов. ЯФ 58, 453 (1995).
13. A.P.Serebrov, Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, 13-17 May, 1997.