



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-79

P3-98-79

В.В.Несвижевский<sup>1</sup>, А.В.Стрелков, П.Гельтенборг<sup>2</sup>,  
П.С.Яйджиев<sup>3</sup>

## НАБЛЮДЕНИЕ НОВОГО МЕХАНИЗМА ПОТЕРЬ УХН В ЛОВУШКАХ

Направлено в журнал «Ядерная физика»

---

<sup>1</sup>Институт Лауэ–Ланжевена, Гренобль, Франция,  
Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия

<sup>2</sup>Институт Лауэ–Ланжевена, Гренобль, Франция

<sup>3</sup>Лаборатория Резерфорда–Эплтона, Дидкот, Англия,  
Институт ядерных исследований и ядерной энергетики, София,  
Болгария

1998

## 1. Введение

Свойство УХН (нейтронов с энергией  $\sim 10^{-7}$  эВ, соответствующей их максимальному подъему в гравитационном поле Земли на высоту  $\sim 1$  м) удерживаться в ловушках объясняется их полным внутренним отражением от поверхности вещества, если их энергия меньше эффективного потенциала вещества. Длительные, теоретически предсказываемые, времена удержания УХН в ловушках (близкие к времени жизни нейтрона  $\sim 900$  с) очень полезны в экспериментальных фундаментальных исследованиях. Изучение самого процесса хранения УХН в ловушках выявило интересную особенность вероятности их потерь при взаимодействии с поверхностью: большие дополнительные температурно-независимые, так называемые аномальные, потери УХН. В любом случае, лучшие экспериментально полученные времена хранения УХН в ловушках всегда намного меньше теоретических ожиданий. Исследование хранения УХН в ловушках является долгосрочным проектом коллаборации ПИЯФ-ОИЯИ. В последние годы, благодаря развитию международного сотрудничества, началась интенсивная программа совместных исследований в ИЛЛ с использованием источника УХН в Гренобле.

В одном из этих экспериментов [1] мы наблюдали “аномальное” проникновение хранящихся в ловушке УХН сквозь 56 мкм Ве-фольгу, являющуюся частью одной из стенок этой ловушки. Вероятность проникновения нейтронов с энергией (0,6—1,9) м составила  $(5,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-7}$ , что на много порядков больше значения туннельного эффекта проникновения для этого образца. Здесь и далее энергия

УХН измеряется в высоте  $h$  максимального подъема нейтрона в гравитационном поле Земли ( $g=9,8 \text{ мс}^{-2}$ ) согласно соотношению  $E=mgh$  ( $1 \text{ нэВ} \approx 1 \text{ см}$ ). Уровень дна сосуда-спектрометра соответствует  $h=0$ . В настоящей работе еще раз проверялся факт проникновения хранящихся в ловушке УХН сквозь тонкую стенку части поверхности этой ловушки (сплошная вакуумно-плотная фольга) и экспериментально изучался механизм этого процесса.

Ко времени проведения настоящего измерения авторам было известно несколько моделей, описывающих проникновение УХН сквозь фольги, некоторые из которых опубликованы [2-4]. Феноменологическая модель взаимодействия УХН с поверхностью, в рамках которой мы планировали настоящий эксперимент, требовала существования некоторого процесса потери УХН из ловушки без изменения его энергии (по крайней мере без большого изменения энергии), давала предсказания измеряемых величин, но была нечувствительна к конкретному механизму. Еще более десяти лет назад А.Д.Стойка и А.В.Стрелков предложили для непротиворечивого объяснения различных экспериментов по хранению УХН идею их "малого нагрева", т.е. процесса нетермодинамического неупругого рассеяния УХН в область энергий очень холодных нейтронов. В результате проверки этого предположения было исключено влияние неупругого рассеяния УХН в широкий диапазон скоростей рассеянных нейтронов от  $\sim 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  до тепловых [5], что в энергетической шкале составляет 5 порядков. Однако оставался неисследованным узкий

диапазон энергий (скоростей) от начальной энергии УХН до величины, в несколько раз превышающей энергию УХН.

В настоящей работе наблюдался процесс нагрева УХН именно в этот диапазон энергий. Ниже приводится подробное описание этого эксперимента в отличие от краткого сообщения [6].

## 2. Методика измерения и экспериментальная установка

Эксперимент выполнялся на реакторе ИЛЛ в Гренобле. Для измерения и формирования распределения УХН по скоростям использовался гравитационный спектрометр (4, рис.1). Это вакуумированный вертикально установленный цилиндр диаметром 60 см и высотой 200 см, изготовленный из листовой полированной нержавеющей стали с толщиной боковых стенок 2 мм. В части измерений с Al-фольгами дно спектрометра и его стенки до высоты около 25 см были покрыты безводородными вазелином и маслом фомблин. Кроме того, в этом случае на дне спектрометра имелись (оставшиеся от предыдущих экспериментаторов, пользовавшихся этой же установкой) дополнительные поверхности сложной формы, также покрытые фомблином, увеличивающие примерно в полтора раза суммарную площадь. Внутри спектрометра по всей высоте цилиндра может перемещаться поглотитель УХН - алюминиевый диск ( $\varnothing 57 \text{ см}$ ,  $h = 2 \text{ см}$ ), на который снизу и сбоку натянута полиэтиленовая пленка толщиной 0,2 мм (6, рис.1). Вероятность потери УХН при ударе о поверхность поглотителя  $\approx 1$ , поскольку полиэтилен имеет почти нулевую граничную энергию и достаточную тол-

щину. Перемещая поглотитель УХН по высоте, можно ограничивать сверху на нужном уровне спектр хранящихся УХН.

Тонкая фольга (1, рис.1) установлена на коротком патрубке в нижней части спектрометра так, что она является частью его стенки и герметично отделяет его от детектора УХН (2, рис.1). Если УХН не проникают сквозь фольгу, то счет в детекторе не увеличивается, когда спектрометр заполнен подбарьерными УХН (нейтронами с энергией ниже барьера фольги), а если проникают, то поток регистрируемых нейтронов меняется пропорционально потоку УХН, падающих из спектрометра на тонкую фольгу.

Спектрометр заполняется УХН, поступающими от турбины Штайерла по нейтроноводу сквозь Al-фольгу (7, рис.1) (отделяющую объем спектрометра от турбины) в течение 110 с, и периодически закрывается клапаном УХН<sup>\*)</sup> (5, рис.1) на 200—480 с в зависимости от режима измерения. Таким образом, один цикл работы установки длится 310—590 с.

В первоначальном спектре нейтронов от турбины Штайерла доля надбарьерных нейтронов (энергия которых больше граничной энергии стенок нейтроновода и спектрометра) намного превышает долю УХН (подбарьерных нейтронов). Чтобы устранить влияние обычного надбарьерного проникновения, которое изначально, при заполнении спектрометра, на много порядков превышает искомый эффект, надо с высокой эффективностью избавиться от надбарьерных нейтронов в начальном спектре и надежно контролировать их влияние

на последующее измерение. Это достигается таким предварительным формированием спектра УХН в спектрометре, чтобы их максимальная энергия в приготовленном спектре была значительно ниже граничной энергии вещества фольги (1, рис.1), а также постоянным временным анализом потока регистрируемых УХН. Следует отметить, что поглотитель с почти нулевой граничной энергией, помещенный над объемом хранения, является самым эффективным из известных способов очистки спектра УХН (их сравнение см., например, в [7]).

Измерение и изменение спектра УХН в спектрометре, а также контроль за динамикой осуществляется путем перемещения поглотителя по высоте. Измерение спектра нейтронов, прошедших сквозь фольгу, возможно: 1) вариацией толщины фольги, 2) вариацией граничной энергии фольги, 3) специальными измерениями с несколькими последовательно расположенными фольгами (будет описано далее), 4) методом измерения скорости счета детектора при подъеме его в гравитационном поле Земли (при вращении изогнутого нейтроновода (3, рис.1) вместе с детектором).

Al-окно детектора и не достаточно зеркальные стенки подводющего нейтроновода отражают часть УХН, что затрудняет расчет эффективности их регистрации. Для устранения этого недостатка в измерении потока УХН, падающих на тонкую фольгу, и его зависимости от времени, на место тонкой фольги устанавливалась толстая мембрана с известным калибровочным отверстием ( $1,07 \pm 0,03$ ) см<sup>2</sup>, отстоящая на некотором расстоянии от детектора. Та-

<sup>\*)</sup> Специальные измерения показали, что просачиваемость УХН через этот клапан в закрытом положении не превышает  $\sim 10^{-8}$ .

кая постановка эквивалентна измерению с "черным детектором", т.к. почти все нейтроны, попавшие в отверстие в мембране, в конечном итоге регистрируются детектором (площадь окна которого во много раз больше отверстия в мембране), а не возвращаются из полости между детектором и мембраной через отверстие обратно в спектрометр.

Тонкие фольги из Al или Be с диаметром 106 мм установлены так, что их внутренняя часть диаметром 88 мм и, соответственно, площадью около  $60 \text{ см}^2$  открыта для потока УХН из спектрометра. Середина фольги находится на высоте около 11 см относительно дна спектрометра. Фольга герметично отделяет объем спектрометра от полости изогнутого нейтронотода (3, рис.1) длиной 180 см, изготовленного из нержавеющей стали, также с диаметром 88 мм, соединяющего спектрометр с детектором. Герметизация фольги достигается обжатием ее краев между двумя тефлоновыми прокладками. Поскольку конструкция уплотнения не устраняет принципиально "просачивание" малой доли УХН с энергией выше граничной энергии тефлона сквозь конструкционные щели, а затем последовательно сквозь 2 тефлоновые прокладки, то для надежного устранения возможного "просачивания" все зазоры были полностью закрыты кадмием и полиэтиленом - эффективными поглотителями УХН.

Детектор УХН - пропорциональный счетчик, содержащий 10 Торр  $^3\text{He}$  и 900 Торр Ag с Al-окном толщиной 100 мкм и площадью  $60 \text{ см}^2$  - установлен на конце изогнутого нейтронотода так, что он на 100 см находится ниже уровня фольги. Такое опускание детектора позволяет, используя ускорение УХН в поле тяжести Земли,

подавить отражение УХН от потенциала Al-окна детектора, а удаление детектора от фольги и расположение его вне прямой видимости образца и спектрометра позволило эффективно подавить фон тепловых нейтронов, порожденный неупругорассеянными (нагретыми) УХН на поверхности фольги и внутренних поверхностях спектрометра. Для защиты от нейтронов детектор и подводный нейтронотод были обернуты борной резиной толщиной около 1,5 см со всех сторон. Дифференциальный амплитудный спектр сигнала детектора УХН измерялся каждые 10 с эксперимента, что позволяет проводить дополнительный анализ данных после его окончания, выбирая разные пороги дискриминации амплитуды импульсов. Одновременно использовались два рабочих интервала дискриминации: 1) настройка порогов дискриминации на узкий пик реакции  $n + ^3\text{He} \rightarrow t + p$ ,  $Q = 0,764 \text{ МэВ}$ , 2) настройка на значительно более широкий диапазон амплитуд, ограниченный только снизу на уровне, соответствующем энергии  $E > 0,15 \text{ МэВ}$ . В первом случае фон детектора является минимальным, что позволяет измерять маловероятные процессы. При этом электронная эффективность регистрации УХН составляет  $\sim 62\%$  (отношение числа зарегистрированных импульсов к числу актов захвата нейтронов ядрами  $^3\text{He}$ ). Во втором случае обеспечивается почти 100% электронная эффективность регистрации УХН. Естественно, все калибровочные измерения потоков УХН и времен хранения в спектрометре проводились с теми же порогами дискриминации, что и соответствующие основные измерения. Стабильность амплитудно-дифференциальной характеристики детектора и электроники, которые очень важны при

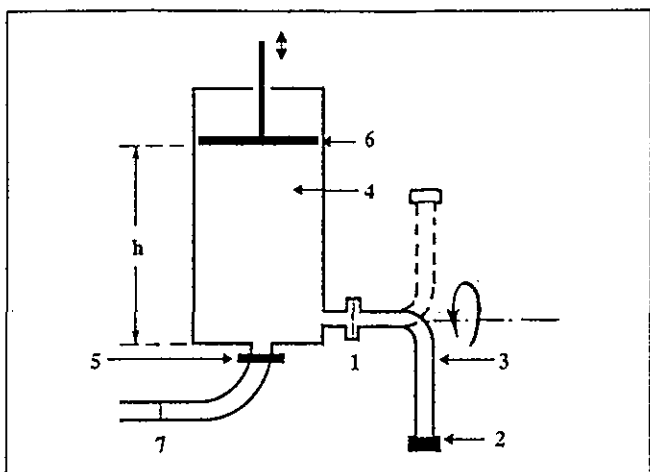


Рис.1. Схема установки: 1) тонкая (Al- или Be-) фольга, 2) детектор УХН, 3) изогнутый нейтронный трубопровод, 4) гравитационный спектрометр, 5) клапан УХН, 6) полиэтиленовый поглотитель, 7) разделительная фольга из Al

настройке на узкий пик, контролировались во время всех измерений, что позволяет утверждать, что в нашем эксперименте полностью подавлено влияние всевозможных электрических наводок и пробоев.

Поток проникающих нейтронов (экстраполяция к моменту закрытия шибера) извлекается фитированием экспериментальных данных зависимостью  $\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \exp(-t/\tau_{xp})$ , где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - свободные параметры, соответствующие уровню фона и потоку проникающих УХН,  $\tau_{xp}$  - время хранения в спектрометре, извлеченное из измерений с калибровочным отверстием. Для фитирования используются только данные после 160-й секунды в измерениях со спектрометром, покрытым безводородными вазелином и маслом фомблин и после 190-й секунды в измерениях со спектрометром со стенками из нержавеющей стали, когда

поток неуничтоженных надбарьерных нейтронов в начальном спектре становился пренебрежимо мал. Подробнее процедура измерения потока проникающих сквозь фольги УХН описана в работе [1].

### 3. Результаты измерений

В настоящих измерениях использовались последовательно Al и Be тонкие фольги. Ранее, в работе [1], мы использовали только Be-фольгу, а замена ее на Al-фольгу позволила: 1) хранить в спектрометре нейтроны как ниже, так и выше граничной энергии фольги, поскольку  $E_{Al} < E_{\text{нерж.стали}} < E_{Be}$ ; 2) проводить измерения вблизи граничной энергии фольги, где предсказывалось увеличение вероятности проникновения в большинстве моделей; 3) уменьшить потери УХН в фольгах в измерениях при комнатной температуре благодаря использованию более тонких образцов; 4) расширить круг возможных экспериментов благодаря более доступным и дешевым Al-фольгам; 5) при использовании "мягкого" начального спектра УХН, соответствующего измерениям с Al-фольгой, потери УХН на стенках спектрометра минимальны, что приближает чувствительность эксперимента к максимальной в соответствующем диапазоне энергий.

#### 3.1. Калибровочные измерения

Калибровочные измерения проводились дважды: для спектрометра со стенками из нержавеющей стали и в случае, когда они покрыты безводородными вазелином и маслом фомблин. На рис.2 показана зависимость потока УХН, падающих на фольгу, от высоты поглотителя в измерениях со спектрометром со стенками из нержавеющей стали, на которые опираются основные выводы настоящей работы. по-

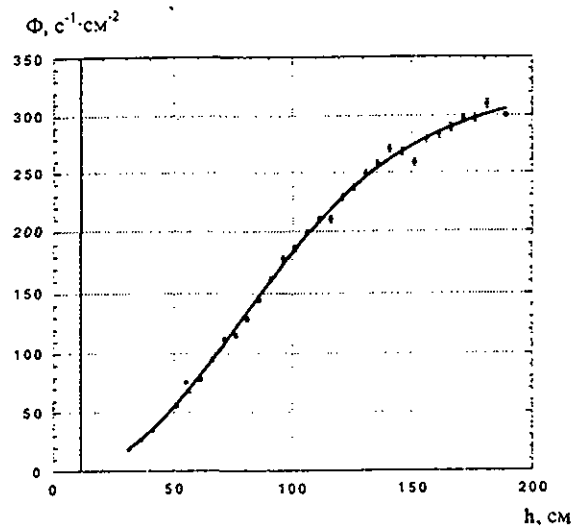


Рис.2. Зависимость  $\Phi$  ( $\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ )-плотности потока УХН на фольге от  $h$ (см)-высоты поглотителя в спектрометре со стенками из нержавеющей стали. Вертикальная линия соответствует высоте середины фольги. Электронная эффективность регистрации нейтронного сигнала равна 62%

лученные в измерениях с перемещением поглотителя во время цикла хранения.

Экспериментальные данные хорошо описываются моделью, предполагающей стандартную плотность УХН на входе в спектрометр  $50 \text{ н/см}^3$  в диапазоне энергий от 0 до граничной энергии нержавеющей стали [8], и существенное ее подавление в спектрометре из-за не очень высокого времени хранения УХН в спектрометре по сравнению с временами его наполнения и вытекания УХН на детектор. Поскольку времена хранения измеряются, то модель не содержит свободных параметров и дает надежные заключения. Небольшие неопределенности свя-

заны с поправками на потери в Al-фольгах и конечную эффективность детектора. Подавление потока УХН по отношению к его величине на входе в зависимости от высоты поглотителя показано на рис.3. Для узкого начального спектра подавление потока из-за потерь в спектрометре меньше, так как времена наполнения малы. Зависимость, показанная на рис.3, отражает трудность общего характера при работе с большими объемами хранения и, соответственно, большими временами их наполнения. Очевидно, существенного увеличения потока в измерениях с полным спектром, а соответственно, и увеличения чувствительности эксперимента, можно достигнуть, улучшив времена хранения УХН в спектрометре. В настоящем эксперименте они слабо зависели от

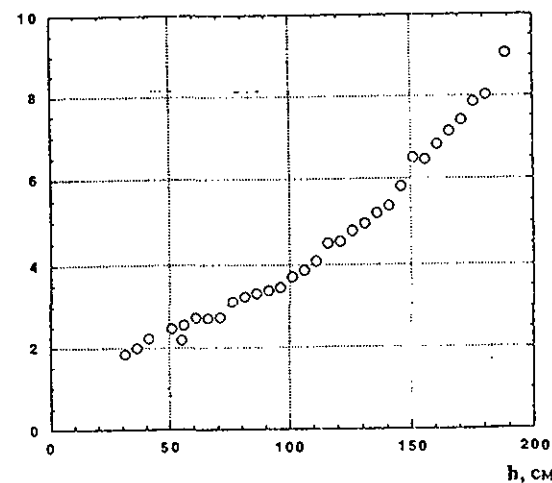


Рис.3. Зависимость от высоты  $h$  (см) фактора подавления плотности потока УХН на фольге в спектрометре (со стенками из нержавеющей стали) по сравнению с потоком на входе в спектрометр в предположении стандартной начальной плотности  $50 \text{ н/см}^3$

высоты поглотителя и менялись от 80 с при опущенном поглотителе до 70 с при максимально поднятом.

Фон измерялся в продолжение всего эксперимента. Использовались две конфигурации нейтронной защиты детектора УХН. В обоих случаях 4 π-защита детектора борной резиной толщиной 1,5 см и настройка порогов дискриминации сигнала детектора на узкий пик делали фон небольшим. Однако в первом режиме, когда изогнутый нейтронный канал с детектором фиксировались на постоянной высоте, нейтронная защита со стороны реактора была усилена борированным полиэтиленом. Во втором режиме защита (без борированного полиэтилена) была смонтирована на поворотном колене нейтронного канала и перемещалась вместе с ним. Заметной разницы в уровне фона в этих двух режимах не ожидалось, так как компонента фона, обусловленная быстрыми нейтронами от реактора, уже сильно подавлена. Тем не менее при обработке данных учитывалось, что они могут различаться. Уровень фона в первом и втором режимах измерения соответственно равен  $(4,98 \pm 0,29) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и  $(5,43 \pm 0,92) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Уровень фона при остановленном реакторе в том же окне дискриминации сигнала с полной защитой (с борированным полиэтиленом) составил  $(2,72 \pm 0,37) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

### 3.2. Зависимость вероятности проникновения от высоты поглотителя

Вероятность проникновения определена как отношение потока проникающих сквозь фольгу нейтронов к потоку УХН, падающих на фольгу, безотносительно к механизму этого проникновения.

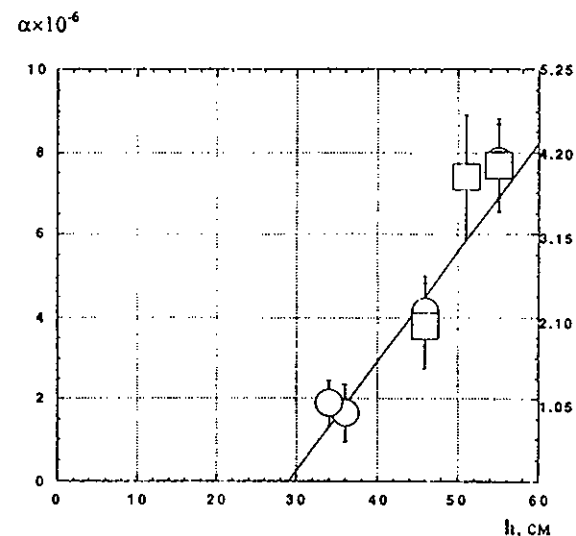


Рис.4. Зависимость α-вероятности проникновения УХН сквозь Al-фольги от h(см)- высоты поглотителя в спектрометре со стенками из нержавеющей стали, покрытыми безводородными вазелином и маслом фомблин.

1. Окружности соответствуют Al-фольге толщиной 11,5 мкм.
2. Квадраты - двум 17,8 мкм Al-фольгам и полиэтиленовому кольцу между ними, не влияющему на поток надграничных нейтронов, но поглощающему подграничные, если им удалось проникнуть сквозь первую Al-фольгу. Для удобства сравнения результатов данные, полученные с двумя фольгами, приведены в другом масштабе (шкала справа), учитывающем дополнительные потери в более толстом слое Al

Вероятности проникновения УХН сквозь фольги при фиксированных высотах поглотителя были измерены для Al-(11,5±0,2 мкм, рис.4, окружности) и Be-(15,0±0,1 мкм, рис.5) образцов, а также для



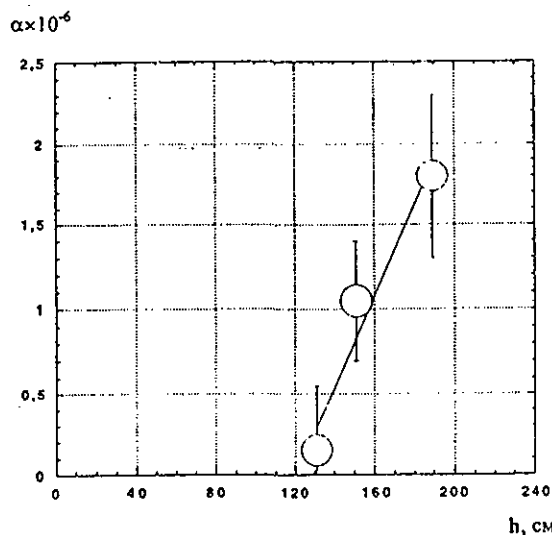


Рис.5. Зависимость  $\alpha$ -вероятности проникновения УХН сквозь Ве-фольгу толщиной 15,0 мкм от  $h$ (см)-высоты поглотителя в спектрометре со стенками из нержавеющей стали

комбинации двух Al-фольг (по  $17,8 \pm 0,3$  мкм) и полиэтиленового кольца между ними (рис.4, квадраты), которая будет описана далее.

Обе зависимости для Al (рис.4) и Ве (рис.5) ведут себя одинаково: 1) вероятность проникновения растет с увеличением начальной энергии УХН; 2) в линейном приближении экспериментальных данных проникновение исчезает, если начальный спектр не содержит нейтронов с энергией выше некоторого "порога".

### 3.3. Энергия проникающих УХН выше граничной энергии фольги или ниже?

Для ответа на этот вопрос было проведено измерение с набором из отстоящих друг от друга на  $\sim 1$  мм двух Al-фольг толщиной

17,8 мкм каждая и 100 мкм полиэтиленовым кольцом между ними с внутренним диаметром 88 мм, установленным так, чтобы полиэтилен не перекрывал области, облучаемой УХН из спектрометра, и, соответственно, не влиял на поток надграничных нейтронов, но поглощал нейтроны с энергией ниже граничной энергии Al, оказавшиеся запертыми между фольгами в случае подбарьерного проникновения УХН сквозь первую Al-фольгу. То есть, проникающий поток исчезнет, если он обусловлен подграничными нейтронами. Если это надграничные нейтроны, то проникающий поток должен уменьшиться соответственно потерям при прохождении сквозь дополнительную толщину Al. Поток уменьшился только вдвое! Измерения зависимости вероятности проникновения от толщины Al-фольги (рис.6) показали, что так и должен упасть поток из-за потерь в дополнительной толще Al. Это означает, что: 1) проникающие нейтроны имеют энергию выше потенциала фольги, 2) их скорость не намного превышает скорость УХН, поскольку они эффективно поглощаются в тонких слоях Al. Энергетическая зависимость вероятности проникновения показана на рис.4 (квадраты). Для удобства графического сравнения этих результатов с измерением проникновения сквозь одинарную фольгу данные с двумя фольгами и полиэтиленовым кольцом приведены в другом масштабе, выбранном так, чтобы обе энергетические зависимости имели одну нормировку. В пределах статистики энергетические зависимости подобны. Аналогичное измерение было проведено с 3-слойной фольгой: (17,8 мкм Al) + (2,5 мкм клея) + (17,8 мкм Al). Тонкий слой водородо-содержащего клея с небольшим потенциалом и большим сечением потерь (в основном неупругого рассеяния и сильно зависящим от скоро-

сти  $\sim 1/v$ ) слабо влияет на надграничные нейтроны, но поглощает подграничные, если они каким-либо образом оказались запертыми в пространстве между Al-фольгами. Результат также подтвердил вывод о том, что проникающие нейтроны - надграничные.

Другой способ измерения энергии после проникновения сквозь фольгу - измерение скорости счета детектора УХН при изменении высоты подъема детектора относительно уровня фольги. Такое измерение было сделано с 15,0 мкм Ве-фольгой при максимально поднятом поглотителе. Как видно из табл.1, проникновение слабо зависит от высоты подъема детектора, что указывает на то, что энергия проникающих нейтронов существенно выше максимальной энергии в начальном спектре.

Таблица 1

Высота детектора относительно центра фольги (см)	Проникающий поток $\cdot 10^{-6}$
-90	$1,8 \pm 0,45$
0	$1,6 \pm 0,25$
115	$1,3 \pm 0,25$

### 3.4. Зависимость вероятности проникновения от толщины фольги

В измерении с двумя 17,8 мкм Al-фольгами и полиэтиленовым кольцом было установлено, что проникающие нейтроны имеют энергию выше потенциала Al. Значит, сам процесс прохождения нейтронов

Таблица 2

Высота поглотителя (см)	Относительное подавление потока в Al-фольгах толщиной 96,6 мкм и 17,8 мкм
68,5	$6,3 \pm 0,6$
81	$4,6 \pm 0,3$
90—110	$2,3 \pm 0,2$

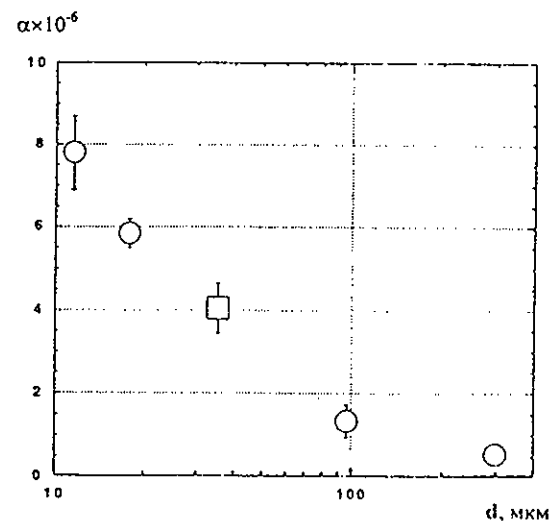


Рис.6. Зависимость  $\alpha$ -вероятности проникновения УХН от  $d$ (мкм)-толщины Al-фольги при высоте поглотителя 55 см. Квадрат соответствует измерению с двумя Al-фольгами толщиной 17,8 мкм и полиэтиленовым кольцом между ними (вклад рефракции нейтронов на границе двух Al-фольг невелик). Спектрометр со стенками из нержавеющей стали, покрытыми безводородными вазелином и маслом фомблин

сквозь фольгу тривиален, а время пребывания нейтрона внутри фольги мало. Загадка же заключается в увеличении энергии части хранящихся УХН. Кроме того, тогда можно, пользуясь зависимостью  $1/v$  сечения захвата и неупругого рассеяния, оценить энергию проникающих нейтронов по зависимости пропускания от толщины фольги, представленной на рис.6. Она оказалась очень малой. Оценка опирается не на расчет, а на измеренные потери УХН известной энергии в использованных фольгах. Поглотитель поднимался на такие высоты, чтобы в спектрометре могли храниться надалюминиевые нейтроны, которые могут пройти фольгу стандартным способом, так как их энергия выше ее потенциала (см. табл.2). И для каждой измеряется зависимость прохождения от толщины фольги. Последняя точка в табл.2 соответствует потоку нейтронов, регистрируемых детектором при открытом шибере (их энергия определена приблизительно).

### 3.5. Динамика спектра УХН при их хранении в спектрометре

В эксперименте возникло противоречие, заключающееся в том, что: 1) в начальном спектре надграничные нейтроны должны быть поглощены, но 2) проникающие нейтроны имеют надграничную энергию.

Такое возможно только при изменении (увеличении) энергии определенной доли хранящихся нейтронов. Однако, если это так, то в измерении с неподвижным поглотителем их регистрация должна быть затруднена потому, что они более эффективно гибнут в поглотителе, чем собираются на детектор. То есть, проникающий сквозь фольгу поток может быть значительно усилен, если после заполнения спектрометра в течение 110 с и последующей очистки спектра от надгранич-

ных нейтронов в течение 80 с (в случае спектрометра со стенками из нержавеющей стали) поглотитель будет отключен, т.е. поднят на высоту, до которой не могут подняться даже УХН с увеличенной энергией. Если спектр при хранении не изменялся бы, то проникающий поток не зависел бы от подъема поглотителя. Гипотеза о рождении надбарьерных нейтронов из хранящихся в ловушке подбарьерных была проверена экспериментально. Действительно, проникающий через фольгу поток нейтронов при подъеме поглотителя на максимальную высоту возрос в 25 раз! Это значит, что в спектре со временем число надграничных (надалюминиевых) нейтронов резко возросло. Можно измерить их спектр, поднимая поглотитель на разную высоту на время хранения УХН в спектрометре (рис.7). Приблизительно до энергии  $(120 \pm 15)$  см число нейтронов, просачивающихся через фольгу, растет с увеличением высоты поглотителя, однако далее их полное число в интегральном спектре не увеличивается, несмотря на далее поднимаемый поглотитель, что указывает на отсутствие в спектре нейтронов с большими энергиями. Рождение надбарьерных нейтронов из хранящихся в ловушке подбарьерных должно привести и к характерному изменению зависимости нейтронного счета от времени. На рис.8 представлены данные, соответствующие усреднению зависимостей от времени нейтронного счета для трех наибольших высот подъема поглотителя при измерении спектра нагретых нейтронов. Действительно, после подъема поглотителя на 80-й секунде счет растет, что соответствует гораздо лучшим временам хранения увеличивших энергию УХН в ловушке при поднятом поглотителе. При этом данные хорошо соответствуют пред-

положению о постоянной вероятности генерации надбарьерных нейтронов из подбарьерных, а время их хранения извлекается из калибровочных измерений с небольшим отверстием.

Аналогичное измерение было сделано со спектрометром, стенки которого покрыты безводородными вазелином и маслом фомблин. Кроме того, в этом случае проводилась дополнительная

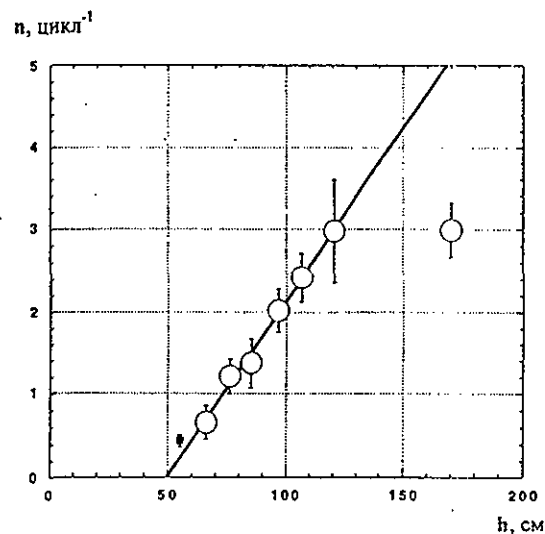


Рис.7. Измерение спектра изменивших энергию УХН. Зависимость n-количества нейтронов, регистрируемых детектором за один цикл измерения, от h(см)-высоты подъема полиэтиленового поглотителя во время хранения УХН в спектрометре. Высота поглотителя при наполнении спектрометра и подготовке спектра всегда 55 см. Время подготовки спектра при закрытом входном клапане 80 с. Спектрометр со стенками из нержавеющей стали. Черный квадрат соответствует измерению с неподвижным поглотителем

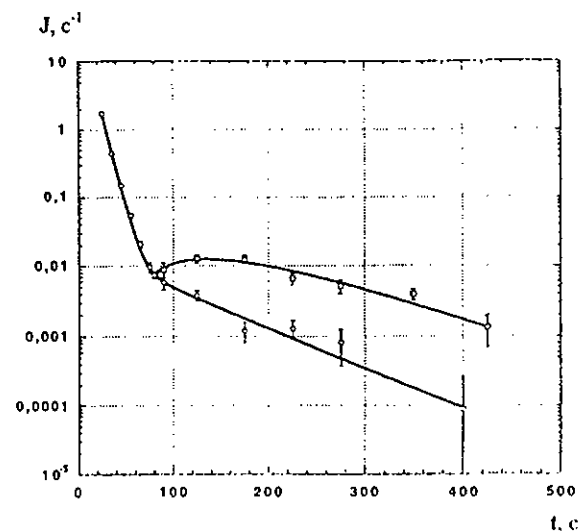


Рис.8. Временные зависимости  $J(\text{с}^{-1})$  - скорости счета нейтронов, регистрируемых детектором в измерении с 17,8 мкм Al-фольгой и спектрометром со стенками из нержавеющей стали. Время подъема поглотителя около 10 с.

1. 0-80 с. Очистка начального спектра от надграницных ("надальюминиевых") нейтронов.

2. После 80 с - нижняя кривая. Поток проникающих нейтронов во время хранения УХН в спектрометре. Сплошная линия - нормированная временная зависимость потока УХН, падающего на фольгу, извлеченная из измерений с калибровочным отверстием.

3. После 80 с - верхняя кривая. Поток нейтронов, проникающих сквозь фольгу, в измерениях с подъемом поглотителя на время удержания УХН. Сплошная линия соответствует гипотезе об увеличении энергии части подбарьерных УХН. Предполагается постоянная вероятность генерации надбарьерных нейтронов, времена хранения извлекаются из калибровочных измерений

проверка самосогласованности результатов: в течение последних 100 с хранения поглотитель (поднятый на предшествующий отрезок времени хранения) был опущен до начальной высоты (до положения поглотителя при заполнении спектрометра и подготовке спектра). Поток проникающих нейтронов упал до величины, соответствующей эксперименту без подъема поглотителя, что и следует ожидать из-за быстрых эффективных потерь, увеличивших энергию УХН в опущенном поглотителе.

#### 4. Анализ возможных ложных эффектов

##### 4.1. Проверка качества очистки начального спектра

Для контроля степени подготовки начального спектра эффект недостаточной его очистки от надграничных нейтронов был усилен: поглотитель устанавливался на такой высоте, что в спектрометре еще заведомо оставались надграничные нейтроны после стандартного времени очистки спектра. Из рис.9 по форме графика видно, что эффект пропускания надграничных нейтронов, пришедших из источника УХН и еще не успевших поглотиться в спектрометре (поглотитель выше 59 см), и наблюдаемое проникновение (поглотитель ниже 59 см) - это два разных процесса. Излом интегральной зависимости потока проникающих нейтронов от высоты поглотителя, т.е. скачок ее производной, означает скачок в дифференциальном спектре УХН. То есть, мы имеем дело не с монотонно спадающим "хвостом" недочищенных надграничных нейтронов, а с каким-то другим процессом, который генерирует нейтроны определенной энергетической группы, четко отделенной от

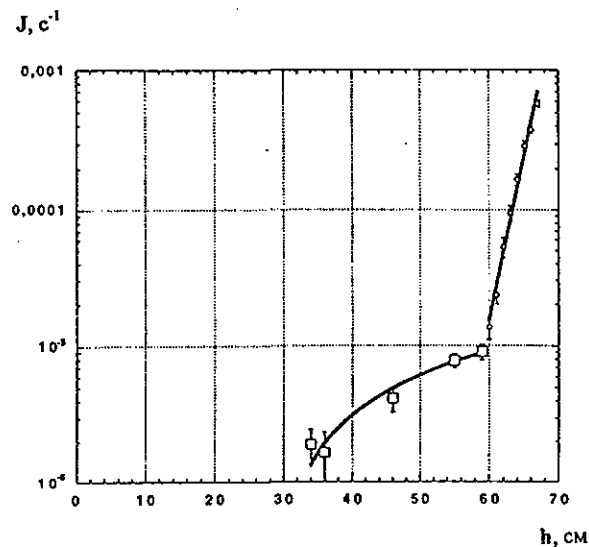


Рис.9. Зависимость регистрируемого потока УХН от  $h$ (см)-высоты полиэтиленового поглотителя. Область выше 59 см соответствует прохождению надграничных нейтронов. Область ниже 59 см - проникновению за счет изменения энергии (сплошная линия - это линейное приближение в логарифмическом масштабе, которое более подробно в линейном масштабе можно рассмотреть на рис.4). Стенки спектрометра покрыты безводородными вазелином и маслом фомблин "хвоста" первоначального спектра нейтронов, запускаемого в спектрометр от источника УХН - турбины Штайерла.

Замедление очистки спектра от надбарьерных нейтронов может быть, в принципе, вызвано высокой вероятностью зеркальных отражений УХН от стенок спектрометра. Однако значительного замедления темпа очистки спектра не наблюдалось ни в измерении, представленном на рис.9, ни во временной зависимости потока надграничных ней-

тронов во время подготовки спектра (рис.8), ни по отличию кривой сбора УХН на детектор от экспоненты в калибровочных измерениях с небольшим отверстием (рис.10). Это позволяет заключить, что влияние зеркальных отражений на процесс очистки спектра от надграничных нейтронов достаточно мало и не сможет объяснить наблюдаемый эффект.

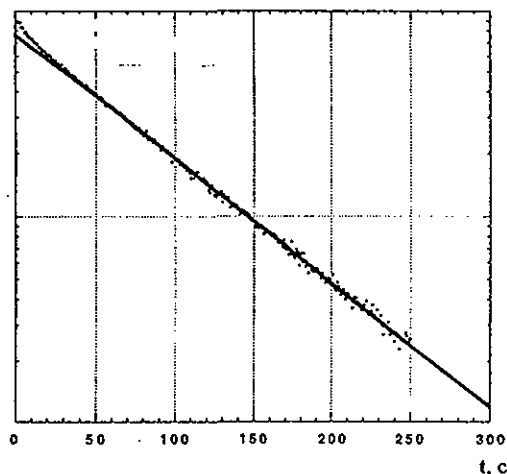


Рис.10. Проверка экспоненциальности зависимости нейтронного потока (в условных единицах) от времени в измерениях с калибровочным отверстием при закрытом входном шибере для спектрометра со стенками из нержавеющей стали

#### 4.2. Проверка отсутствия микроотверстий в фольгах

Даже небольшие микроотверстия в фольгах имитировали бы проникновение УХН. Поэтому качество фольг тщательно контролировалось: 1) по натеканию воздуха; в стандартном измерении с 10 мбар воздуха с одной стороны фольги и вакуумом  $10^{-4}$  мбар с другой ее

стороны определялось натекание воздуха во второй объем при перекрытой его откачке; чувствительность измерения позволила бы обнаружить отверстие  $10^{-10}$  от площади фольги; отверстие не было обнаружено ни в одной из фольг; измерения проводились со всеми образцами до измерений с нейтронами, после измерений и в некоторых случаях между ними; 2) вероятность проникновения хорошо воспроизводилась для различных фольг одинаковой толщины, что маловероятно, если оно объясняется случайными микроотверстиями; 3) нейтроны проникали даже сквозь Al-фольгу толщиной 96 мкм, наличие микроотверстий в которой еще более маловероятно; 4) зависимости вероятности проникновения от начальной энергии УХН и от промежутка времени после закрытия шибера в эксперименте с подъемом поглотителя противоречат гипотезе о микроотверстиях.

#### 4.3. Отсутствие ложного “нагрева” при движении поглотителя

После 80-й секунды поглотитель поднимается от  $h=55$  см на большую высоту. В принципе, возможен ложный эффект, вызванный изменением энергии нейтронов при ударе о движущийся поглотитель. Нейтроны, отражающиеся от удаляющейся нижней поверхности поглотителя (с небольшой вероятностью), могут только уменьшить энергию и поэтому, в принципе, не могут дать ложного эффекта. Из-за существования щели между стенкой спектрометра и диском поглотителя часть УХН попадает в пространство над поглотителем. Эти нейтроны, отражаясь от движущейся им навстречу верхней поверхности алюминиевого диска, получают дополнительную энергию и, в случае последующего попадания в нижний объем спектрометра, смогут затем проник-

нуть сквозь фольгу. Однако: 1) численная оценка показывает, что соответствующий эффект достаточно мал; на диск могут запрыгнуть только нейтроны с энергией более 57 см; измерения зависимости потока надбарьерных нейтронов от времени показывают их отсутствие выше 59 см на 80-й с после начала подъема поглотителя; таким образом, “опасный” диапазон энергий составляет 2 см, от 57 до 59 см, нейтроны из которого “невидимы” в измерениях с неподвижным поглотителем; спектр нейтронов в спектрометре известен (рис.2); доля нейтронов над диском в этом диапазоне в начальном спектре составляет  $\sim 10^{-4}$  от количества подграничных нейтронов; эффективные потери этой части спектра в нижней поверхности поглотителя обедняют ее не менее чем в  $10^3$ - $10^4$  раз; кроме этого, надо учесть и потери на верхней поверхности поглотителя; 2) эта гипотеза противоречит зависимости потока проникающих нейтронов от высоты поглотителя при сканировании спектра нагретых нейтронов (рис.7); 3) предположение о нагреве нейтронов на движущемся поршне-поглотителе не объясняет проникновение при неподвижном поглотителе; 4) предположение о нагреве нейтронов от движущейся поверхности противоречит и зависимости нейтронного счета от времени (рис.8), указывающей на генерацию надбарьерных нейтронов во все время удержания УХН в спектрометре (а подъем поглотителя длился только  $\sim 10$  с).

Однако в последующих измерениях следует показать отсутствие этого ложного эффекта экспериментально, сделав верхнюю поверхность диска тоже поглощающей, например, покрыв ее на 100 % полиэтиленом.

#### 4.4. Проверка отсутствия диффузного размывания спектра при хранении

1). Уровень и спектр случайных вибраций были измерены в предыдущем эксперименте, частично использующем эту же экспериментальную установку [9]. В этой работе было обнаружено, что размывание нейтронного спектра, соответствующее измеренному уровню вибраций, не превышало долей миллиметра, тогда как наблюдаемый эффект в нашей работе соответствовал бы размыванию  $\sim 1$  м. Уровень вибраций в настоящем эксперименте не увеличился во много раз, так как измерение проводилось в аналогичных вибрационных условиях.

2) Размытие спектра при каждом ударе из-за вибраций или другого диффузного процесса противоречило бы наблюдаемому отсутствию зависимости вероятности генерации надбарьерных нейтронов от времени хранения УХН в ловушке, указывающей, что наблюдаемое изменение энергии происходит за один или небольшое количество ударов УХН о стенку ловушки.

#### 5. Величина изменения энергии

Возможно, «пороговые» эффекты в спектральных зависимостях вероятностей проникновения (в линейном приближении экспериментальных данных) носят в нашем эксперименте систематический характер. Проникновение сквозь Al-фольгу прекращается, если начальная энергия УХН менее  $(29 \pm 5)$  см (рис.4). А само проникновение возможно, если конечная энергия больше  $(60 \pm 2)$  см, что соответствует сумме граничной энергии Al и высоты нижнего края фольги (с небольшой поправкой на потери в фольге). Аналогична зависимость (рис.5) для Be-фольги со значениями  $(130 \pm 10)$  см и  $(255 \pm 10)$  см соответственно. А максимальная энергия УХН в конечном спектре

равна  $(120 \pm 15)$  см. Так, получается, что во всех этих случаях граница конечного спектра увеличивших энергию УХН приблизительно равна удвоенной границе начального спектра (рис.11). Спектр энергий в однократном акте «возбуждения» из существующих данных требует специального исследования.

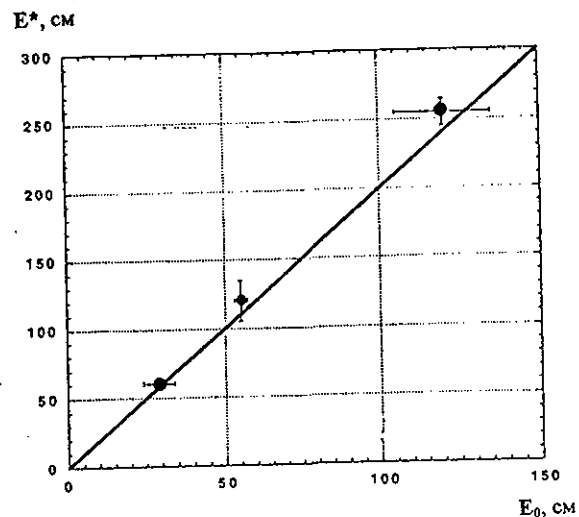


Рис.11. Зависимость  $E^*$ (см)-границы спектра изменивших энергию («возбужденных») УХН от  $E_0$ (см)-границы начального спектра УХН. Сплошная линия соответствует удвоению границы спектра

## 6. Оценка вероятности потерь УХН из-за увеличения их энергии

В стандартных экспериментах с хранением УХН спектр нейтронов в ловушке обрзан соответственно граничной энергии вещества стенки ловушки либо по ее высоте (если верх ловушки отсутствует), или по положению поглотителя. Если учесть наблюдаемый в настоящей работе эффект «возбуждения»- увеличения энергии УХН

то, в любом из этих случаев большая часть увеличивших энергию УХН может покинуть ловушку, соответственно проникнув внутрь стенки, вылетев из нее через верх или погибнув в поглотителе. Вероятность «возбуждения» близка к вероятности потерь, но аккуратный анализ требует детального знания процесса. Приведем лишь оценку вероятности «возбуждения» УХН. Спектры хранящихся УХН в настоящем эксперименте и в работах [10,11], также, как и размеры ловушек, были почти одинаковы, что упрощает сравнение результатов. Вероятность потери УХН в работах [10, 11] равна  $(6,7 \pm 1,0) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . Число нейтронов в ловушке по данным рис.2 приблизительно равно  $1,3 \cdot 10^5 / K_{\text{eff}}$  ( $K_{\text{eff}}$  - эффективность детектора и регистрационного тракта). Поток проникающих нейтронов при неподвижном поглотителе сквозь 17,8 мкм Al-фольгу (усреднение всех данных с безводородным вазелино-фомблиновым покрытием и без него) -  $0,024 / K_{\text{eff}}$  н/с. Усиление потока при максимальном подъеме поглотителя составляет 25 раз. Экстраполяция к нулевой толщине фольги дает дополнительное усиление в 2,1 раза. Парциальная вероятность надбарьерного проникновения УХН в Al-фольгу при поднятом поглотителе равна  $\sim 1 / (4,0 \pm 1,5)$  (вероятность столкновения нейтрона с фольгой под таким углом, что перпендикулярная составляющая его скорости выше граничной скорости фольги, умноженная на квантово-механическую вероятность проникновения сквозь нее; альтернативный процесс - потери в стенках ловушки). Таким образом, вероятность «возбуждения» равна  $(0,024 \pm 0,002) \cdot (25 \pm 2) \cdot (2,1 \pm 0,2) \cdot (4,0 \pm 1,5) / (1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-5} \approx (4,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . В приведенной оценке мы попытались учесть возможные зависимости от спектра «возбужденных» нейтронов, их углового распределения,



вклада увеличения энергии при отражении от фольги (если оно важно). Вероятность наблюдаемого изменения энергии УХН приблизительно равна вероятности аномальных потерь УХН, обнаруженных в работе [10]. Более аккуратное сравнение этих вероятностей возможно в рамках существующих данных, но является предметом отдельного исследования.

Интересно сравнить вероятности проникновения, измеренные с одинаковым начальным спектром УХН, одинаковыми временами наполнения спектрометра и подготовки спектра, с одинаковыми фольгами (Al, 17,8 мкм), но разными покрытиями стенок спектрометра. Для спектрометра со стенками из нержавеющей стали вероятность проникновения равна  $(4,05 \pm 0,60) \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ . Для спектрометра, стенки которого покрыты безводородными вазелином и маслом фомблин,  $(5,85 \pm 0,35) \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ . К сожалению, в пределах статистики нельзя заключить, различаются эти величины или нет. Зависимость величины эффекта от материала стенок ловушки требует дополнительных измерений.

## 7. Выводы

Наблюден дополнительный (к известным захвату и неупругому нагреву на поверхности<sup>\*)</sup>) механизм потерь УХН, хранящихся в ловушке из нержавеющей стали без покрытия ее внутренних поверхностей, а также с их покрытием безводородными вазелином и маслом фомблин. Он заключается в увеличении энергии УХН с вероятностью ~

<sup>\*)</sup> На глубине нормального квантово-механического проникновения УХН в стенку ~ 15 нм (~ 150 Å).

$10^{-5}$  на удар. При этом верхняя граница спектра увеличивших энергию нейтронов оказывается в проведенном измерении приблизительно вдвое выше, чем верхняя граница начального спектра УХН, или изменение энергии более вероятно, но происходит за несколько ударов. Обнаруженный эффект не является обычным неупругим рассеянием УХН на стенках ловушки [12,13], однако в результате увеличения энергии УХН могут гораздо глубже проникнуть внутрь вещества, где они нагреваются или захватываются стандартным способом, а если стенка ловушки тонкая, то возбужденные УХН проходят ее насквозь.

Обнаруженное увеличение энергии УХН полностью объясняет проникновение хранящихся в ловушке УХН сквозь 56 мкм Be-фольгу, измеренное в работе [1].

Интересно проверить в прямом эксперименте, имеет ли отношение настоящее наблюдение к аномальным температурно-независимым потерям УХН [10], имеющим почти ту же вероятность (но обнаруженным при более низких температурах и с другим веществом), или к другим вопросам, появляющимся в физике УХН, начиная с самых первых экспериментов в 1968 году [14,15]. Например, к невозможности получить длительные, предсказанные теоретически, времена хранения УХН в ловушках; к удивительно большому количеству водорода на поверхности, которое требуется для объяснения времен хранения УХН в ловушках при низких температурах (хотя при комнатной температуре именно наличие водорода на поверхности является доминирующей причиной потерь УХН, обнаруженной при измерении нагретых на стенках ловушки нейтронов в работах [12,13] и подтвержденной прямым его наблюдением [16]); к интенсивному нагреву УХН на поверхности целлюлозно-Be-образца [17], но к его отсутствию на поверхности Al-

фольги, покрытой 0,5 мкм Ве [5] и др. Многочисленные противоречия в интерпретации этих экспериментов могли бы быть, в принципе, связаны со сложностью двухступенчатого механизма потерь УХН: сначала увеличивается их энергия - и в результате они более не могут удерживаться в ловушке и входят в стенку - а затем уже исчезают по стандартным парциальным каналам потерь, неупругому нагреву или захвату внутри вещества. При этом последний процесс происходит преимущественно не в приповерхностном слое ~ 150 А, как предполагалось, а в толстом слое вещества (например, десятки и сотни микрон для Al или Ве при комнатной температуре). Непосредственная же регистрация увеличивших энергию УХН всегда затруднена тем, что толщина характерного слоя вещества, в котором происходит их потеря, много меньше, чем толщина стенки ловушки.

Изменение энергии хранящихся УХН важно учитывать в экспериментах. В частности, все измерения времени жизни нейтрона с использованием УХН исходят из предположения о строгом сохранении энергии нейтрона в ловушке, что, как теперь представляется, требует специальной проверки. Однако влияние эффекта увеличения энергии УХН, если оно окажется важным, значительно может быть подавлено экспериментально таким ограничением начального спектра в ловушке, чтобы они и после изменения энергии не достигли бы значения граничной энергии стенки ловушки или ее открытого верха и могли бы в ней удерживаться.

По-видимому, наиболее важным и надежным выводом является следующий: даже при эффективной очистке начального спектра УХН в ловушке от надбарьерных нейтронов в продолжение всего времени

хранения наблюдалось "парение" из нее УХН с энергией заметно выше первоначальной энергии хранящихся УХН. Причиной этого является маловероятное небольшое увеличение энергии УХН при взаимодействии с поверхностью. Механизм этого процесса и спектр энергий «возбужденных» нейтронов требуют дальнейшего экспериментального исследования.

Эксперимент выполнен в рамках программы коллаборации ПИЯФ—ОИЯИ—ИЛЛ: В.Е.Варламов, П.Гельтенборт, В.В.Несвижевский, Дм.М.Пендлебури, А.П.Серебров, А.В.Стрелков, Р.Р.Тальдаев, А.Г.Харитонов, В.Н.Швецов, К.Шрекенбах, П.С.Яйджиев.

Авторы весьма признательны А.Штайерлу за содействие выполнению эксперимента, а также благодарны за помощь в его проведении Д.Берруеру, П.Тома, Х.Юсту и всем нашим коллегам за интерес к работе, полезные обсуждения и моральную поддержку.

## Список литературы

1. Варламов В.Е., Гельтенборг П., Несвижевский В.В., и др. // Препринт ILL 97 GE 5051; Письма в ЖЭТФ. 1997. Т.66. С.317.
2. Ignatovich V.K., Utzuro M. // Phys. Lett. 1997. A225. P.195.
3. Франк И.М., Носов В.Г. // ЯФ. 1995. Т.58. С.453.
4. Серебров А.П. // ISINN-5. Дубна. 14-17 Мая. 1997.
5. Strelkov A.V., Nekhaev G.N., Shvetsov V.N. et al. // ILL research report 3-14-51, 1996.
6. Годовой отчет ILL за 1997 г.
7. Nesvizhevsky V.V. Error assessment for neutron lifetime measurement with MAMBO-2. Preprint ILL-93VVN02S.
8. Guide to neutron research facilities at the ILL. ("The yellow book").
9. Steyerl A, Malik S.S., Geltenbort P. et al. // (to be published).
10. Алфименков В.П., Несвижевский В.В., Серебров А.П. и др.// Письма в ЖЭТФ. 1992. Т.55. С.92.; Препринт ЛИЯФ 1729. 1991.
11. Алфименков В.П., Несвижевский В.В., Серебров А.П. и др.// ЖЭТФ. 1992. Т.102. С.740.
12. Стрелков А.В., Хетцельт М. // ЖЭТФ. 1978. Т.74. С.23.
13. Stoica A.D., Strelkov A.V., Hetzelt M. // Z.Phys. 1978. B29. P.349.
14. Лущиков В.И., Покотиловский Ю.Н., Стрелков А.В., Шапиро Ф.Л. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. С.40.; Препринт ОИЯИ Р-3-4127. 1968.
15. Steyerl A. // Phys.Lett. 1969. 29B. P.33.
16. Lanford W.A., Golub R. // Phys. Rev.Lett. 1977.V39. P.1509.
17. Strelkov A.V., Nekhaev G.N., Shvetsov V.N. et al. // ILL experiment 3-14-52, 1997.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 апреля 1998 года.