



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-71

P3-99-71

П.Гельтенборт¹, Д.Г.Карташов, Е.В.Лычагин,
А.Ю.Музыка, В.В.Несвижевский¹, Г.В.Нехаев,
А.П.Серебров², А.В.Стрелков, Р.Р.Тальдаев²,
А.Г.Харитонов², В.Н.Швецов

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛЫХ ПЕРЕДАЧ ЭНЕРГИИ
ПРИ ХРАНЕНИИ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
(УХН) В ВЕЩЕСТВЕННЫХ ЛОВУШКАХ

Направлено в журнал «Physical Review Letters»

¹Институт Лауэ — Ланжевена, Гренобль, Франция

²Петербургский институт ядерной физики, Гатчина

1999

Гельтенборт П. и др.

Исследование малых передач энергии
при хранении ультрахолодных нейтронов (УХН)
в вещественных ловушках

С использованием гравитационной спектроскопии УХН экспериментально обнаружено, что при длительном выдерживании в сосудах из нержавеющей стали часть хранящихся УХН увеличивают свою кинетическую энергию (максимум вдвое), то есть нагреваются при ударах о поверхность, а другая, меньшая часть УХН, теряют энергию при этих ударах (охлаждаются). На поверхности нержавеющей стали вероятность такого малого нагрева составляет $\sim 10^{-6}$ на удар, а для охлаждения — на порядок меньше. Наблюдаемый на поверхности меди и бериллия эффект малого нагрева выражен значительно меньше.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Перевод авторов

Geltenbort P. et al.

Study of Low Energy Changes of Ultracold Neutrons in Traps

We studied the phenomenon of low energy changes (10^{-7} eV) of ultracold neutrons (UCN) using the method of spectroscopy of UCN in the Earth gravitational field. At stainless steel surface the kinetic energy for some UCN increases (about twice maximally, low energy heating) while that for some other UCN decreases (smaller portion, low energy cooling). The probability for such heating is higher than $\sim 10^{-6}$ per collision and it is at least 10 times higher than that for the cooling. We identified also a low energy heating at copper and beryllium surfaces but with lower probability.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

1. Введение

Недавно был обнаружен новый канал утечки УХН из объемов хранения: приобретение нейтронами дополнительной энергии, сравнимой с начальной энергией УХН, в процессе взаимодействия со стенками объема хранения [1, 2]. Это явление удивительно по причине того, что хранение УХН является глубоко неравновесным процессом — температура, соответствующая кинетической энергии ультрахолодного нейтрона $\sim 10^{-3}\text{K}$, а температура стенок сосуда на несколько порядков выше. При взаимодействии со стенками неупругое рассеяние нейтрона приводит к тому, что нейтрон приобретает энергию порядка тепловой практически со 100% вероятностью. Тепловой нагрев и захват являются основными причинами потерь УХН в объемах хранения. Поиски нагрева нейтронов в другие области энергий были связаны с попыткой объяснить так называемую аномалию хранения УХН — наличие температурно-независимых дополнительных потерь порядка 10^{-5} на удар [3]. Данная работа представляет полученные нами результаты исследования сверхмалых передач энергии при взаимодействии УХН со стенками ловушек. Она является непосредственным продолжением работ [1, 4], выполненных нашей коллаборацией.

2. Установка

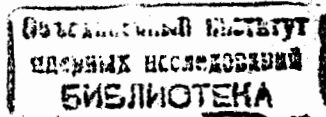
Измерения проводились на реакторе ИЛЛ в Гренобле. Источник УХН — турбина Штайерла [6]. В данной работе используется та же установка, что и в работе [1] с некоторыми изменениями и дополнениями. Для измерения малых передач энергий использован метод гравитационной спектрометрии УХН и возможность удержания не только самих УХН, но и слегка нагретых нейтронов в объеме хранения УХН. Схема установки представлена на рис. 1.

УХН от источника по нейтроноводу из нержавеющей стали (диаметр 75 мм) поступают в гравитационный спектрометр (он же является объемом хранения) (1), где могут запереться входным шибером (2).

Гравитационный спектрометр — вакуумированный до 10^{-5} торр цилиндрический бак диаметром 60 см, высотой ~ 200 см, выполненный из листовой полированной нержавеющей стали (10X14AG15-III¹; граничная энергия ~ 190 нэВ) толщиной 1,5 мм. Лист из такой же стали лежит на нижнем фланце бака, образуя дно объема хранения (в центре листа отверстие 6×7 см² для входа УХН). Дно спектрометра приподнято над уровнем нейтроноводов на высоту ~ 90 см, что позволяет наполнять спектрометр широким спектром УХН, несмотря на то, что подводящий нейтроновод перегороден технологической (отделяющей объем источника УХН от объема установок пользователей) алюминиевой

¹ Химанализ:

C, %	Mn, %	S, %	P, %	Cr, %	Ni, %	N ₂ , %	Ti, %	Cu, %	Si, %
0,08	6,5	0,009	0,035	14,2	0,3	0,2	-	-	0,32



фольгой (3), которая не пропускает нейтроны с энергией, не превосходящей граничную энергию алюминия ($E_{зр. Al} = 52$ нэВ).

Внутри спектрометра вдоль всей его высоты может перемещаться поглотитель УХН (4) — алюминиевый диск с натянутой полиэтиленовой пленкой толщиной ~300 мкм. Если энергия УХН достаточна для подъема в гравитационном поле Земли на высоту поглотителя, то они взаимодействуют с полиэтиленом, который почти не имеет отражающего потенциала и обладает большим сечением неупругого рассеяния, являясь, таким образом, практически идеальным "поглотителем" УХН. В результате взаимодействия с полиэтиленовым поглотителем нейтроны приобретают энергию порядка энергии тепловых нейтронов и покидают спектрометр. Таким образом, через некоторое время после того как спектрометр заполнен нейтронами и входной шибер закрыт, спектр нейтронов внутри спектрометра становится ограниченным сверху величиной $mgh_{погл.}$ (численно $m \cdot g \cdot 1 \text{ см} \approx 1$ нэВ), здесь m — масса нейтрона, g — ускорение свободного падения на поверхности Земли, $h_{погл.}$ — высота поглотителя от дна спектрометра.

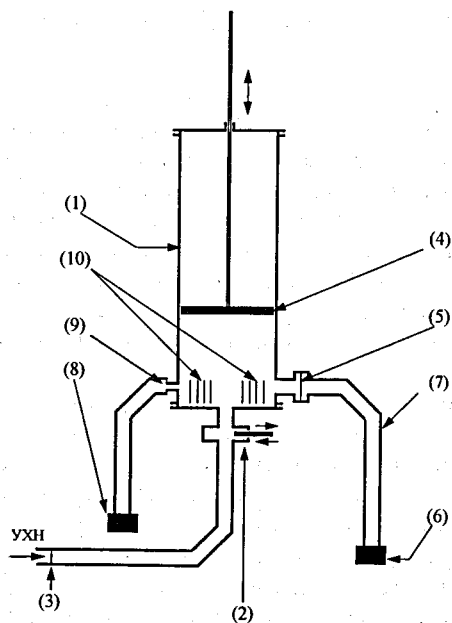


Рис. 1 Схема установки. (1) — гравитационный спектрометр; (2) — входной шибер; (3) — технологическая Al фольга; (4) — полиэтиленовый поглотитель; (5) — тонкая Al фольга (10,5 мкм); (6) — детектор УХН; (7) — изогнутый нейтронный канал; (8) — монитор; (9) — калибровочное отверстие; (10) — образцы

В нижней части спектрометра за коротким выходным патрубком расположена герметичная фольга из алюминия (5) толщиной ~10,5 мкм. Эта фольга герметично отделяет объем хранения от детектора УХН (6). Ось патрубка приподнята на $h_{ок.} = 11$ см над дном объема хранения. Площадь фольги, являющейся частью стенки объема хранения, равна 63 см^2 . Для исключения проникновения УХН в детектор в обход фольги в ее уплотнении предусмотрены полиэтиленовые и кадмиевые кольца.

За фольгой и изогнутым нейтронным каналом (7) (диаметр 88 мм) ниже дна спектрометра на ~1 м установлен детектор УХН типа ДУНя (6) — газоразрядный счетчик с ^3He (давление ~10 торр) и тонким Al входным окном. Электронная эффективность детектора к нейтронам, прошедшим через входное окно (отношение числа зарегистрированных импульсов к числу актов захвата нейтронов ядрами ^3He) ~94%. Изогнутый вниз нейтронный канал обеспечивает возрастание эффективности детектора к УХН, поскольку нейтроны в гравитационном поле Земли приобретают дополнительную энергию, необходимую для преодоления потенциального барьера окошка детектора. Кроме того, такой нейтронный канал позволяет защитить детектор от потока тепловых нейтронов — УХН, нагретых на фольге (5) и стенках спектрометра. Для защиты от тепловых нейтронов изогнутый нейтронный канал и детектор были обернуты борсодержащей резиной толщиной около 1,5 см. В измерениях одновременно использовались два рабочих интервала дискриминации амплитуды импульсов: 1) настройка порогов дискриминации на узкий пик реакции $n + ^3\text{He} \rightarrow t + p$, $Q = 0,764$ МэВ, 2) настройка на широкий диапазон амплитуд, соответствующих $E > 0,15$ МэВ. В первом случае электронная эффективность регистрации УХН около 62%, а фон минимальный — менее 10^{-3} с^{-1} .

Плотность нейтронов в спектрометре контролируется монитором (8) — аналогичным детектором УХН. Из объема хранения нейтроны вытекают через маленькое калибровочное отверстие (9) ~1 см², которое практически не вносит дополнительных потерь УХН.

На дно спектрометра могут помещаться образцы (10) с развитой поверхностью из исследуемых материалов.

3. Схема эксперимента

Схема измерений малого нагрева нейтронов та же, что и в [1].

Нейтроны заполняют спектрометр до равновесной плотности в течение времени t_{fill} . После этого входной шибер закрывается. Поглотитель при наполнении нейтронами устанавливается на такую высоту, чтобы нейтроны с энергией $E < mgh_{погл.}$ (в измерениях $h_{погл.} = 49$ см) не смогли преодолеть потенциал Al фольги (5), то есть $mgh_{погл.} < E_{зр. Al}$. Во время наполнения счет детектора УХН определяется доля нейтронов в спектре с $E > (E_{зр. Al} + mgh_{ок.})$. В основном это нейтроны со скоростями выше 6,5 м/с ($E \geq 220$ нэВ). Поток таких нейтронов из источника значительно превышает поток УХН.

После закрытия входного шибера в первые несколько секунд скорость счета монитора резко падает (чистка спектрометра от нейтронов с энергией $E > mgh_{погл.}$),

а затем спадает пропорционально плотности УХН в спектрометре. Время хранения УХН в спектрометре извлекается фитированием счета монитора после очистки спектра функцией $f(t) = \alpha \exp(-t/\tau_{xp})$ по двум свободным параметрам: α и τ_{xp} , где α определяет начальную плотность УХН, а τ_{xp} — время хранения нейтронов в спектрометре.

Поскольку детектор и объем хранения разделены Al фольгой, обладающей граничной энергией 52 нэВ, в детектор могут попасть только УХН, энергия которых на высоте выходного окна превышает энергию алюминиевого барьера разделительной фольги. Так как $mgh_{погл} < E_{ср, Al}$, то после наполнения спектрометра нейтронами и закрытия входного шибера счет детектора должен быстро спадать к уровню фоновому значению с постоянной времени, соответствующей времени очистки спектра от нейтронов с энергией $E > mgh_{погл}$.

Измерения же показывают, что после быстрого падения скорости счета детектора с постоянной времени, соответствующей времени очистки спектра, остается счет, заметно превышающий фон детектора и спадающий с постоянной времени такой же, как и плотность УХН в спектрометре (Рис. 2, нижняя кривая). После подъема поглотителя за ~12 с (на 80-й секунде с момента закрытия входного шибера) скорость счета детектора возросла в несколько раз (Рис. 2, верхняя кривая). Единственным возможным объяснением данной ситуации является процесс приобретения нейтронами во время хранения дополнительной энергии, позволяющей преодолеть потенциальный барьер алюминиевой фольги. После подъема поглотителя такие нейтроны с энергией, превышающей величину Al барьера, перестав гибнуть в поглотителе, после некоторого количества столкновений со стенками объема хранения стали с большей вероятностью вытекать на детектор.

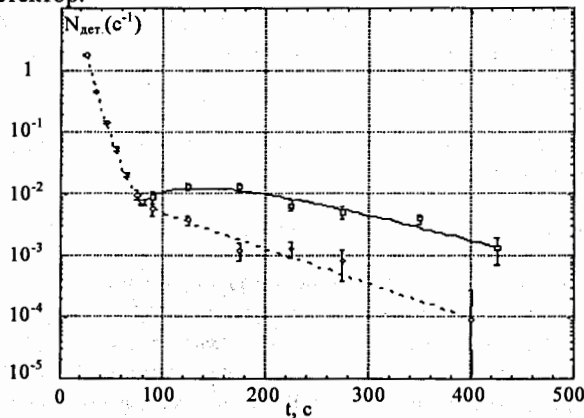


Рис. 2 (по результатам работы [1]). Зависимость счета детектора за Al фольгой 17,8 мкм при неподвижном поглотителе (нижняя кривая) и при подъеме поглотителя на 80-ой секунде (верхняя кривая). Время отсчитывается от начала цикла. Момент $t=0$ — момент закрытия входного шибера

Появление слегка нагретых УХН в сосудах напоминает процесс выпаривания, поэтому в дальнейшем такие нейтроны мы будем называть ВУХН. Спектр ВУХН определяется измерением зависимости количества генерируемых ВУХН от высоты, до которой поднимается поглотитель при неизменной начальной высоте — 49 см.

Исследование аналогичного процесса при взаимодействии с другими веществами возможно при помещении внутрь спектрометра образцов из соответствующего материала и измерении дополнительного потока ВУХН от столкновений УХН с образцом.

Поскольку поток ВУХН от большинства образцов был незаметен на фоне потока от стенок спектрометра, в ряде измерений спектрометр из нержавеющей стали был заменен на медный спектрометр (цилиндрический бак диаметром 20 см, толщиной стенки 4 мм и высотой 180 см), помещенный внутрь нержавеющей спектрометра (рис. 3). Дно медного спектрометра приподнято над уровнем нейтронновода, по которому нейтроны поступают от источника на высоту ~80 см.

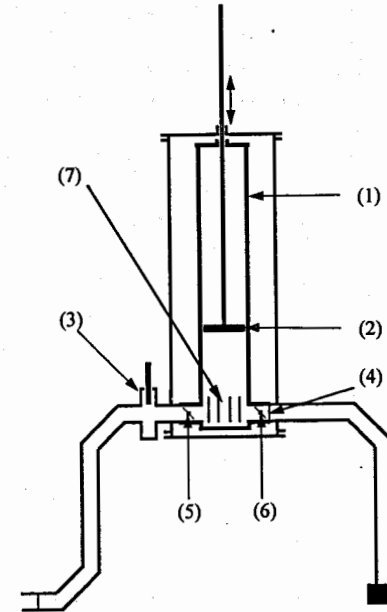


Рис. 3 Медный спектрометр. (1) — медный спектрометр; (2) — титановый или полиэтиленовый поглотитель; (3) — входной шибер; (4) — тонкая (10,5 мкм) разделительная Al фольга; (5) и (6) — входная и выходная медные заслонки соответственно; (7) — образцы

Мониторинг в медном спектрометре проводился либо в отдельном измерении, в котором разделительная Al фольга заменялась диафрагмой с калибровочным отверстием, либо по стандартному движению поворотной заслонки (рис. 3; позиция (б)). Во втором случае используется тот факт, что движение заслонки (б) приводит к разогреву хранящихся УХН. Число нагретых заслонкой УХН при стандартном ее движении пропорционально плотности нейтронов в спектрометре. Часть нагретых нейтронов преодолевают разделительную Al фольгу и регистрируются детектором. Измеряя зависимость счета детектора после покачиваний заслонки от времени выдержки (интервал времени от закрытия входного шибера до покачиваний), можно определить время хранения УХН в спектрометре. (При 20 покачиваниях заслонки в течение 12-13 с время вытекания разогретых нейтронов на детектор ~ 10 с.)

В измерениях с медным спектрометром использовались либо полиэтиленовый поглотитель, либо поглотитель из титана.

Измерение обратного процесса — охлаждения УХН — проводилось в спектрометре из нержавеющей стали. В этих измерениях за входным шибером ко дну спектрометра герметично крепилась, перекрывая входной нейтронный канал, тонкая Al фольга толщиной 10,5 мкм, а на выходе объема хранения вместо разделительной фольги перед изогнутым нейтронным каналом устанавливалась выходной шибер. После того как спектрометр наполняется нейтронами при закрытом выходном шибере и закрывается входной шибер, спектр нейтронов внутри спектрометра ограничен снизу энергией, соответствующей граничной энергии Al, а сверху величиной $mgh_{\text{полн}}$. Если спустя некоторое время опустить поглотитель несколько ниже высоты, соответствующей граничной энергии входной фольги (в измерениях 46 см), то все нейтроны в спектрометре должны погибнуть. Однако если в процессе хранения УХН остывают, то есть появляются нейтроны, энергия которых стала меньше 46 нэВ, то такие нейтроны выживут, так как “не допрыгнут” до поглотителя, и их можно сосчитать, открыв выходной шибер. Варьируя максимальную и минимальную высоты поглотителя, можно оценить, из какой части спектра и в какую энергетическую область охлаждаются нейтроны.

4. Результаты измерений

Нагрев

а) спектрометр из нержавеющей стали

Первые измерения были посвящены повторению результатов работы [1].

Фон детектора УХН был измерен в нескольких сериях в различные периоды эксперимента и составил при работающем реакторе $(8,3 \pm 1,4) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и $(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ для 1-го и 2-го интервалов дискриминации соответственно, а при остановленном реакторе — $(5,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и $(2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Кроме того, в ряде измерений контролировалось фоновое значение, как минимальное значение счета детектора в цикле.

На рис. 4 приведена зависимость плотности потока УХН в момент закрытия шибера от высоты поглотителя в пустом спектрометре из нержавеющей стали.

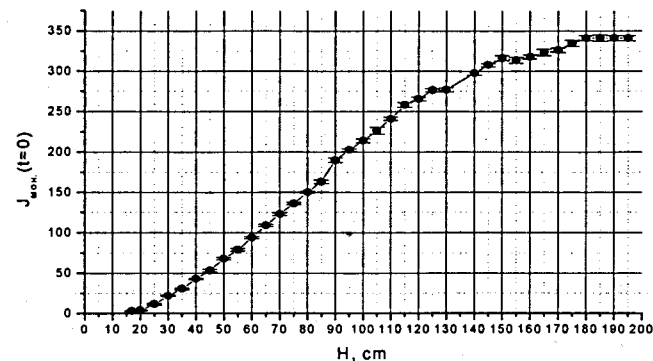


Рис. 4 Интегральный спектр в пустом спектрометре из нержавеющей стали

Плотность потока УХН — значение фиксирующей счет детектора функции $\alpha \exp(-t/\tau_{\text{exp}})$ в момент закрытия входного шибера ($t=0$). Надо заметить, что в данном спектрометре практически не наблюдается спектральной зависимости времени хранения, что возможно для сильно загрязненной поверхности объема хранения. Практически для хранящихся нейтронов любых энергий время хранения составило величину ~ 90 с. Это значение несколько превышает время хранения, полученное в работе [1] (~ 75 с). Во всех измерениях, проведенных с спектрометром из нержавеющей стали, время хранения контролировалось мониторингом детектором в процессе измерений.

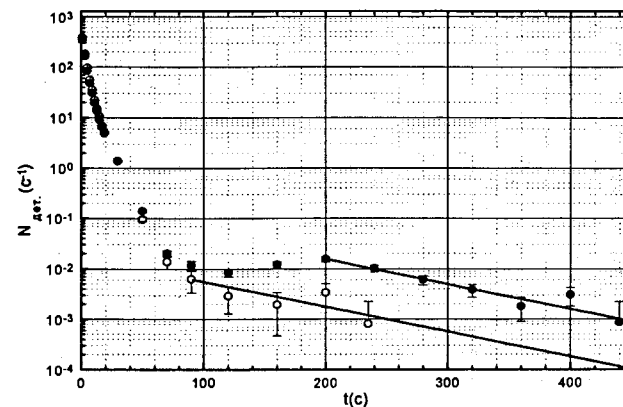


Рис. 5 Зависимость счета детектора за Al фольгой толщиной 10,5 мкм при неподвижном поглотителе (открытые точки) и при подъеме поглотителя на 100-ой секунде после закрытия входного шибера (темные точки). $t=0$ отвечает моменту закрытия входного шибера. Фон детектора вычтен

Как отмечалось в [1], плотность УХН в спектрометре существенно подавлена по сравнению с плотностью в нейтроноводе из-за небольшого времени хранения УХН по сравнению с временем наполнения спектрометра.

Результаты измерений нагрева в пустом спектрометре из нержавеющей стали представлены на рис. 5. Точки — экспериментальные результаты, сплошные линии — счет монитора УХН, нормированный к соответствующим экспериментальным данным для движущегося (верхняя линия) и неподвижного поглотителя (нижняя линия). Из рисунка видно, что подъем поглотителя приводит к увеличению плотности ВУХН в ~10 раз, что отличается от результата [1], где этот фактор составлял ~25. Эта разница может быть вызвана изменением состояния поверхности стенок спектрометра, поскольку время хранения в нашем эксперименте больше, чем в [1]. К тому же статистика этих экспериментов не достаточна, чтобы сделать утверждение об этой существенной разнице.

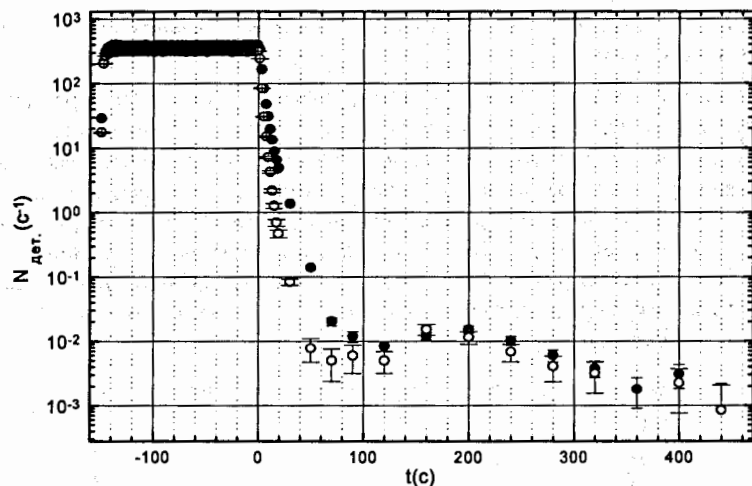


Рис. 6 Зависимость счета детектора за Al фольгой 10,5 мкм в измерениях с подъемом поглотителя на 100-ой секунде. Темные символы — пустой спектрометр из нержавеющей стали. Светлые символы — измерения с образцом из бериллия (1 м²). Фон детектора вычтен

Рис. 6,7,8 представляют зависимости счетов детектора УХН, монитора и отношения этих счетов от времени для двух серий измерений: измерения в пустом спектрометре из нержавеющей стали и измерения с бериллиевым образцом, лежащем на дне спектрометра. Бериллиевый образец — цельнокатаная фольга толщиной 100 мкм и общей площадью 1 м². Первые 100 секунд — наполнение спектрометра. Момент времени $t=0$ — момент закрытия входного шибера. Следующие 100 секунд происходит формирование спектра УХН (очистка от нейтронов с энергией выше высоты поглотителя). На 100-ой секунде начинается подъем поглотителя до высоты ~160 см за время ~12 с. После 400-ой секунды

поглотитель опускается в исходное положение (46 см) — подготовка к очередному циклу измерений.

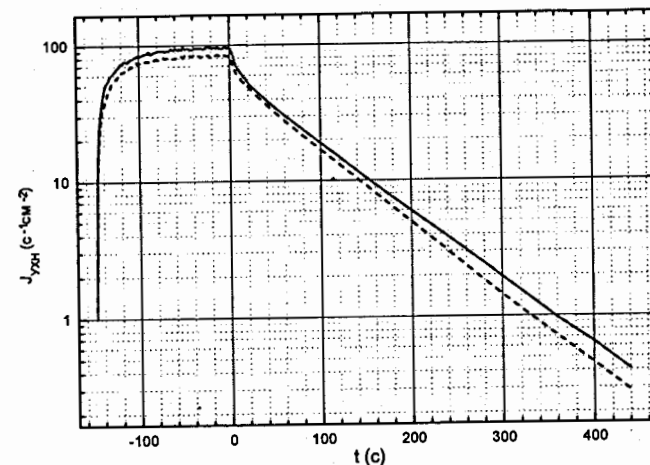


Рис. 7 Счет монитора в измерениях с подъемом поглотителя на 100-ой секунде. Сплошная линия — пустой спектрометр из нержавеющей стали ($\tau_{xp}=88$ с); пунктирная линия — измерения с образцом из бериллия (1 м²) ($\tau_{xp}=81$ с)

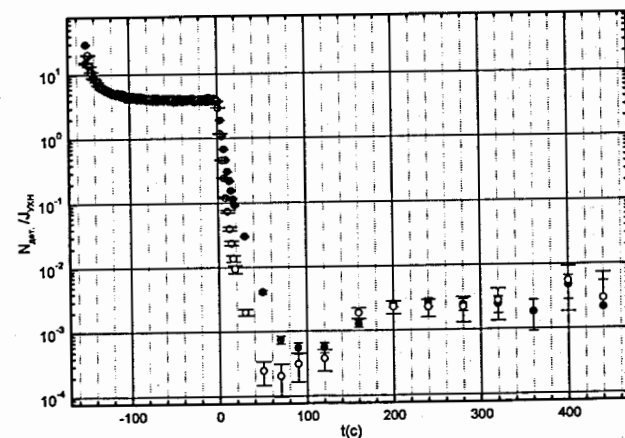


Рис. 8 Отношение счета детектора нейтронов к счету монитора. Темные символы — пустой спектрометр из нержавеющей стали. Светлые символы — измерения с образцом из бериллия (1 м²). Фон детектора вычтен

Из рис. 6-8 видно, что наличие 1 м^2 бериллия существенно уменьшило время очистки, но практически не повлияло на время хранения нейтронов в спектрометре и не привело к увеличению видимого эффекта. Величину видимого эффекта не удалось увеличить, помещая внутрь дополнительные поверхности из графита (напыление толщиной $0,2-0,3 \text{ мкм}$ на фольгу из нержавеющей стали $S = 1,03 \text{ м}^2$, $\tau_{\text{кр.}} = 79 \text{ с}$), железа ($S = 0,12 \text{ м}^2$, $\tau_{\text{кр.}} = 77 \text{ с}$) и меди ($S = 2,1 \text{ м}^2$, $\tau_{\text{кр.}} = 64 \text{ с}$). Для того чтобы избавиться от фона нагретых на стенках спектрометра из нержавеющей стали нейтронов и исследовать наличие эффекта на бериллии, дальнейшие измерения проводились в спектрометре из меди. Медь была выбрана как технологичный материал, легко охлаждаемый и не магнитный, так как одна из версий происхождения эффекта была связана с магнитными свойствами нержавеющей стали.

б) медный спектрометр

Рис. 9 представляет зависимость числа УХН, накапливаемых в медном спектрометре, от высоты поглотителя при снятой алюминиевой фольге (4) на рис. 3. Ограничение спектра хранящихся нейтронов сверху энергией $\sim 170 \text{ нэВ}$ соответствует граничной энергии меди — 168 нэВ .

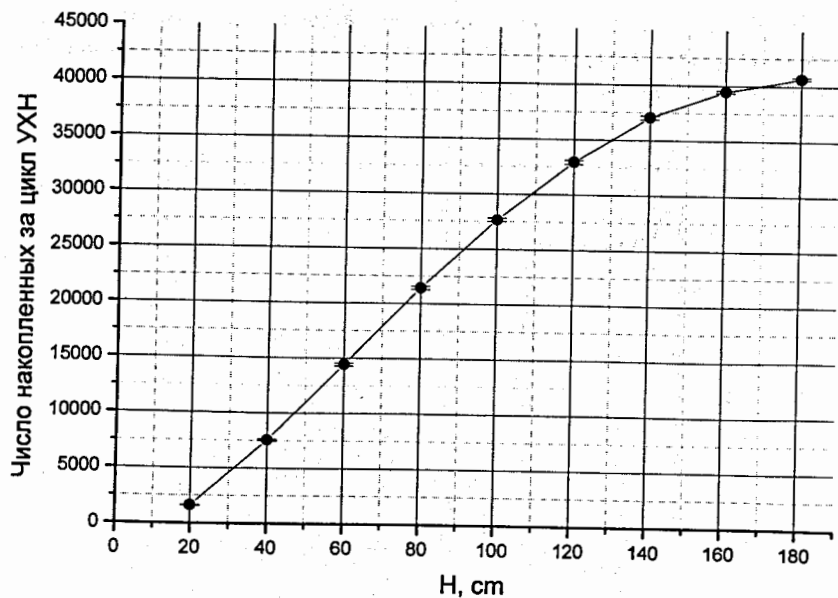


Рис. 9 Спектр УХН, хранящихся в медном спектрометре

Измерение нагрева УХН проводилось в пустом спектрометре, а также при помещении внутрь спектрометра образца из нержавеющей стали — фольга толщиной 150 мкм и площадью $0,16 \text{ м}^2$. Измерения с образцом повторялись после отжига фольги при температуре $800-900^\circ\text{C}$ в вакууме в течение 30 мин . При остывании образца при температуре $\sim 500^\circ\text{C}$ произошла разгерметизация объема обезгаживания до $\sim 1 \text{ торр}$, и дальнейшее охлаждение образца происходило в атмосфере при данном давлении. Обезгаживание образца привело, в частности, к уменьшению его магнитной восприимчивости на три порядка.

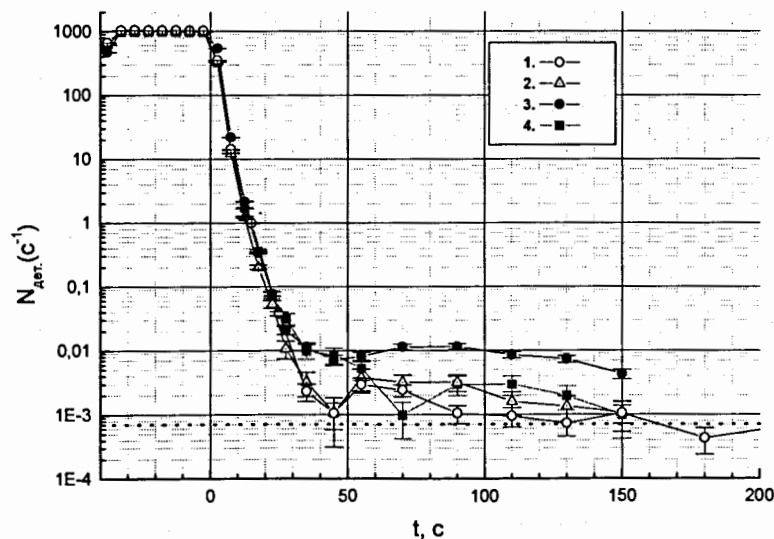


Рис. 10 Зависимость счета детектора нейтронов за разделительной фольгой от времени в пустом медном спектрометре и на образцах из нержавеющей стали в том же спектрометре. 1 — пустой необезгаженный медный спектрометр; 2 и 3 — необезгаженный и обезгаженный образец в том же спектрометре соответственно. 4 — измерения с обезгаженным образцом и неподвижным поглотителем на высоте 46 см . Пунктирная линия — уровень фона детектора. Электронная эффективность регистрации нейтронного сигнала 62%

Результаты соответствующих измерений приведены на рисунке 10 (поглотитель — титан). В течение первых 40 секунд , до момента времени $t=0$, происходит наполнение спектрометра нейтронами при высоте поглотителя от дна спектрометра — 46 см . Момент времени $t=0$ отвечает моменту закрытия входного шибера. Следующие 50 секунд происходит очистка спектра. В момент $t=50 \text{ с}$ происходит поднятие поглотителя.

Времена хранения нейтронов с энергией, не превышающей 46 нэВ , составили для пустого спектрометра $(55,5 \pm 2,3) \text{ с}$, для спектрометра с необезгаженным

образцом из нержавеющей стали ($38,4 \pm 2,4$) с и для спектрометра с обезгаженным образцом ($55,8 \pm 2,6$) с.

Для обезгаженного образца были проведены измерения зависимости числа сосчитанных ВУХН от высоты, на которую поднимается поглотитель — интегральный спектр регистрируемых ВУХН. Спектр представлен на рис. 11. Оценка реального спектра ВУХН затруднена в связи с тем, что мы не знаем зависимости эффективности регистрирующей системы от энергии ВУХН (в частности, вероятности “пролезания” нагретых нейтронов через алюминиевую фольгу в зависимости от их энергии). Достоверный вывод, который можно сделать анализируя спектр, это утверждение, что спектр ВУХН ограничен сверху (энергией ~ 110 нэВ).

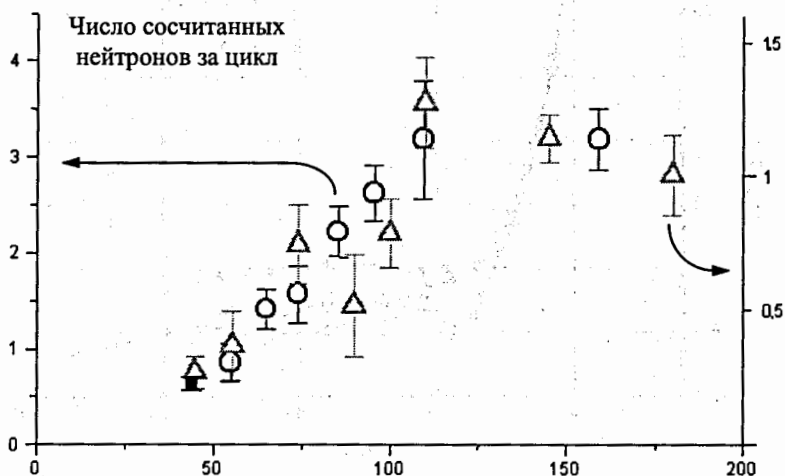


Рис. 11 “Интегральный” спектр ВУХН. Кружки — спектр ВУХН в спектрометре из нержавеющей стали (по работе [1]). Квадрат — измерения с неподвижным поглотителем в спектрометре из нержавеющей стали (по работе [1]). Треугольники — спектр ВУХН, нагревающегося на обезгаженном образце из нержавеющей стали ($0,16 \text{ м}^2$), лежащем в медном спектрометре

Был проведен целый ряд измерений, посвященных обнаружению малого нагрева на бериллии. В качестве образца использовалась цельнокатаная фольга толщиной 100 мкм и общей площадью $\sim 1 \text{ м}^2$, обезгаженная при температуре 300°C в течение суток. Время хранения нейтронов с энергиями менее 49 нэВ в спектрометре с образцом из бериллия — около 55 с. После обезгаживания спектрометра с образцом в течение 6 часов при температуре около 400°C время хранения возросло до 90 с. На рис. 12 приведены результаты измерений с бериллием в обезгаженном спектрометре. Для сравнения приведены результаты измерений в пустом необезгаженном медном спектрометре. К сожалению,

численная оценка эффекта на бериллии невозможна из-за отсутствия “фонового” измерения — генерации ВУХН на стенках обезгаженного медного спектрометра.

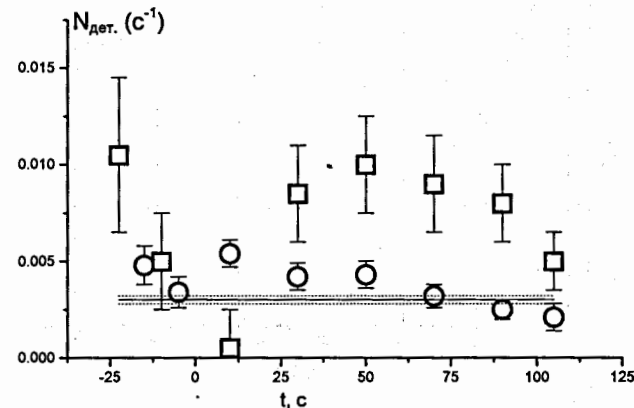


Рис. 12. Зависимость счета детектора УХН за разделительной фольгой от времени. Кружки — пустой необезгаженный медный спектрометр. Квадраты — обезгаженный медный спектрометр с обезгаженным бериллиевым образцом. Горизонтальная линия — уровень фона

Охлаждение

При измерении охлаждения для увеличения числа столкновений УХН с поверхностью внутри спектрометра из нержавеющей стали была помещена фольга из нержавеющей стали толщиной 150 мкм и общей площадью 1 м^2 . Время хранения нейтронов с энергией меньше 49 см, извлеченное из измерений по нагреву, составляет ($76,0 \pm 0,5$) с.

Входная алюминиевая фольга после закрытия входного шибера находится внутри объема хранения УХН и сильно влияет на время хранения нейтронов, которые имеют энергию выше граничной энергии алюминия. На рис. 13 представлена зависимость времени хранения УХН от высоты поглотителя, полученное фитированием счета мониторингового детектора.

На рис. 14 представлены интегральный спектр УХН, при наполнении спектрометра через алюминиевую фольгу, и зависимость числа “остывших” нейтронов от высоты поглотителя, при которой происходило наполнение спектрометра ультрахолодными нейтронами (иными словами, от спектра и числа “родителей” — УХН).

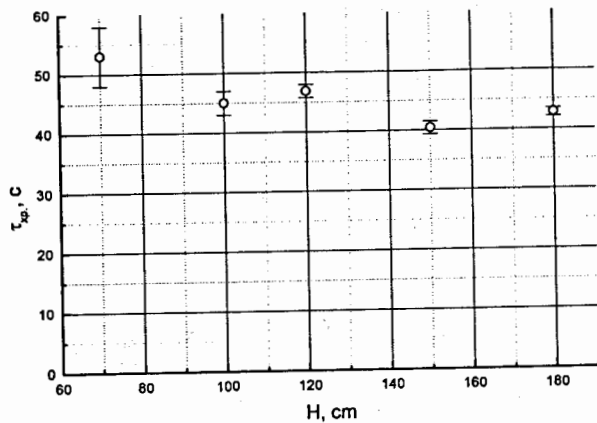


Рис. 13 Время хранения "родителей" (УХН с энергией $E > E_{гр.АВ}$). Входная алюминиевая фольга находится в объеме хранения

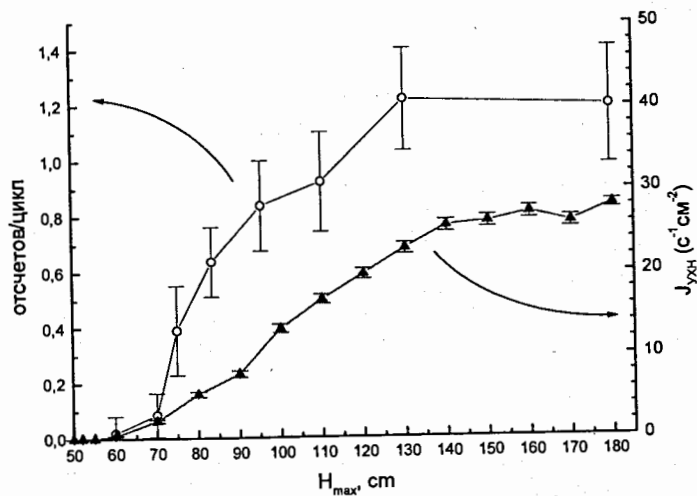


Рис. 14 Спектр УХН при наполнении через алюминиевую фольгу (темные символы, правая ордината) и зависимость числа охлажденных нейтронов (светлые символы, левая ордината, электронная эффективность регистрации нейтронного сигнала 62%) от высоты поглотителя во время наполнения спектрометра

На рис. 15 верхняя кривая — зависимость числа охлажденных нейтронов от минимальной высоты поглотителя (интегральный спектр "остывших" нейтронов), нижняя кривая — результаты фоновых измерений при неподвижном поглотителе.

Рис. 16 — зависимость числа охлажденных за цикл измерений нейтронов от времени наполнения.

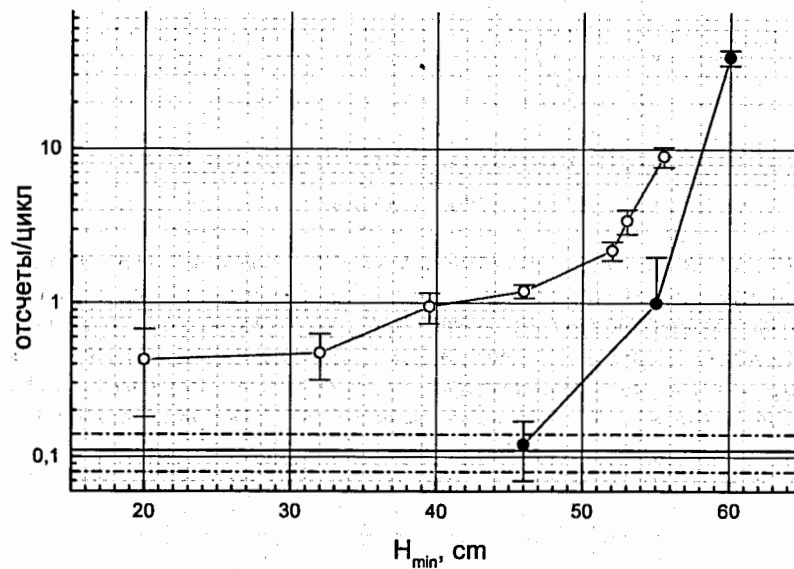


Рис. 15 Количество сосчитанных после открытия выходного шибера нейтронов в зависимости от минимальной высоты поглотителя для движущегося (открытые точки) и неподвижного (темные точки) поглотителя. Сплошная и штрих-пунктирные линии — уровень фона детектора и его погрешность. Электронная эффективность регистрации нейтронного сигнала 62%

Рис. 16 показывает, что плотность охлажденных нейтронов достигает насыщения за время ~150 с, что определяется их временем хранения, значительно превышающим время первоначального наполнения спектрометра УХН в диапазоне энергий 52÷180 нэВ.

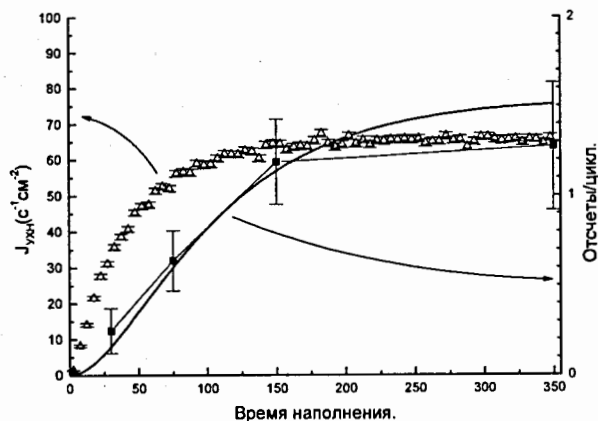


Рис. 16 Квадраты — зависимость числа “остывших” нейтронов от времени наполнения спектрометра. $N_{max}=148$ см, $N_{min}=46$ см. Точка, отвечающая времени наполнения 150 с, измерялась с $N_{max}=179,5$ см. Сплошная кривая — расчет по формуле (11). Электронная эффективность регистрации нейтронного сигнала 62%. Треугольники — счет монитора при наполнении в течение 350 секунд

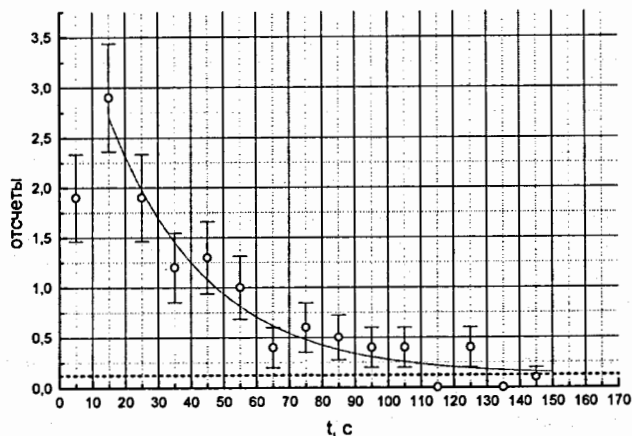


Рис. 17 Кривая “вытекания” охлажденных нейтронов на детектор ($N_{max}=148$ см, $N_{min}=46$ см). Момент времени $t=0$ с — момент открытия выходного шибера. Точки — счет детектора после открытия выходного шибера (за 54 цикла), кривая — фит экспериментальных точек спадающей экспонентой с постоянной времени ~ 35 с. Пунктирная линия — уровень фона детектора

На рис. 17 представлена кривая вытекания охлажденных нейтронов. Кривая, проведенная на рисунке, — результат фитирования экспериментальных точек спадающей экспонентой с постоянной времени ~ 35 с (постоянная времени определяется двумя процессами — попаданием нейтронов в детектор и гибелью в стенках спектрометра). Извлеченное отсюда время вытекания составляет величину ~ 64 с, что значительно превышает время вытекания в отверстие патрубка, рассчитанное из газокINETической модели (~ 30 с). Данное расхождение, видимо, связано с большой диффузией изогнутого нейтронвода

5. Вычисления и обсуждение результатов

Для оценок вероятности нагрева УХН в область энергий ВУХН необходимо знать число ударов УХН о поверхность объема хранения и образца, а также число образовавшихся ВУХН. Все параметры, определяющие данные величины (время хранения УХН и ВУХН в спектрометре, частота ударов о поверхность, эффективность регистрации ВУХН), являются энергетически зависимыми. Поэтому для корректной численной оценки необходимо точное знание начального спектра УХН, его эволюции со временем, спектра ВУХН и спектральной зависимости детектирования УХН. Данная установка нечувствительна к ВУХН, энергия которых превышает граничную энергию Al фольги на 10-15 см. Такие нейтроны плохо проходят через фольгу, так как для них велико надбарьерное отражение и поглощение внутри фольги. Вероятность этих процессов резко возрастает при приближении энергии нейтронов к граничной энергии Al из-за упругого рассеяния на неоднородностях внутри фольги. Кроме того, численные оценки являются сильно зависимыми от модели процесса, который может быть как одноступенчатым, так и представлять собой диффузионное расплывание в пространстве энергии.

а) расчет вероятности нагрева

В силу вышесказанного, мы не можем правильно оценить вероятность нагрева. Вместе с тем, задача по определению нижней границы искомой вероятности может быть решена нами вполне корректно. Исходя из этой задачи и выберем модель, для которой будем производить расчеты. При этом будем полагать, что нагрев происходит за один удар, так как очевидно, что многоступенчатый процесс требует более высокой вероятности передачи энергии.

Усредненная вероятность нагрева для одноступенчатого процесса:

$$P_+ = \frac{N_+}{N_{coll}}, \quad (1)$$

где N_+ — полное число образовавшихся за цикл ВУХН (после поднятия поглотителя), N_{coll} — полное число ударов УХН о поверхность за то же время.

$$N_+ = \frac{N_{det}}{P_w \cdot (1 - P_{Al}) \cdot \epsilon_{det}}, \quad (2)$$

$$N_{coll} = \tau \cdot J_0 \cdot S_{eff}, \quad (3)$$

где N_{det} — количество зарегистрированных ВУХН; ϵ_{det} — эффективность детектора; P_w — парциальная вероятность проникновения ВУХН в Al окно (конкурирующий процесс — гибель в стенках спектрометра или на поверхности образца); P_{Al} — вероятность “погибнуть” в алюминиевой фольге; τ — время хранения (в наших измерениях оно практически не зависело от энергии нейтрона, что возможно для сильно загрязненной поверхности); J_0 — плотность потока УХН у дна спектрометра, измеренная в момент поднятия поглотителя; S_{eff} — “эффективная” площадь поверхности (она может зависеть от энергии нейтрона и вычисляется из интегрирования плотности потока УХН, линейно зависящей от высоты, по всей доступной для УХН поверхности).

Обе вероятности, P_w и $(1-P_{Al})$, в знаменателе (2) растут с увеличением энергии ВУХН, поэтому, оставаясь в рамках поставленной задачи, нужно проводить расчеты с максимальной энергией ВУХН.

Далее, если у нас есть широкий спектр УХН, то выражение (3) можно переписать в виде

$$dN_{coll}(E) = \tau \cdot dJ(E) \cdot S_{eff}(E). \quad (4)$$

Здесь E — энергия УХН. Учитывая, что $dJ/dE \sim E$ (для максвелловского спектра)

и что $\int_0^{E_0} \frac{dJ}{dE} dE = J_0$, получим выражение

$$N_{coll} = \tau \frac{2J_0}{E_0^2} \int_0^{E_0} S_{eff}(E) \cdot E dE. \quad (5)$$

Рассмотрим два крайних случая:

1. S_{eff} не зависит от E (УХН взаимодействуют только с дном спектрометра).

Тогда:

$$N_{coll} = \tau \cdot J_0 \cdot S_{eff};$$

2. $S_{eff} \sim E$ (УХН взаимодействуют только с боковой поверхностью спектрометра). Тогда:

$$N_{coll} = \frac{2}{3} \tau \cdot J_0 \cdot S_{eff}(E_0).$$

Как видно, в первом случае выражение совпадает с выражением для монолинии (3), а во втором отличается на множитель 2/3. В наших измерениях всегда реализуется некий промежуточный случай, так как присутствуют и дно, и боковые стенки спектрометра, а образец располагается на дне. Таким образом, проводя расчеты для максимальных энергий УХН и ВУХН, мы можем только уменьшить искомую вероятность и в любом случае останемся в рамках поставленной задачи — определения нижней границы эффекта.

Максимальная энергия УХН определяется высотой поглотителя: $E_{УХН} = 46$ нэВ для медного спектрометра и 49 нэВ для спектрометра из нержавеющей стали, максимальная энергия ВУХН — из спектра (рис. 11) $E_{ВУХН} \approx 110$ нэВ. Вероятность

P_w рассчитывалась, а P_{Al} оценивалась экспериментально [1] и составила величину $\approx 0,5$.

Расчитанная в рамках этой модели вероятность нагрева P_+ на стенках спектрометра и образцах представлена в таблице.

Таблица.

Оценка нижней границы вероятностей нагрева и охлаждения для различных образцов

Образец	$\langle \mu \rangle \times 10^{-4}$	$P_+ \times 10^{-7}$	$P_- \times 10^{-7}^*$
поверхность спектрометра из нержавеющей стали	$18,3 \pm 0,2$	$5,4 \pm 0,4$	$1,0 \pm 0,1$
поверхность медного спектрометра	$12,7 \pm 0,5$	$0,68 \pm 0,13$	
образец из нержавеющей стали	$6,2 \pm 1,4$	$3,1 \pm 0,6$	
обезгаженный образец из нержавеющей стали	$0,08 \pm 0,87$	$5,6 \pm 0,4$	$1,4 \pm 0,3^{**}$

* Охлаждение измерялось в спектрометре из нержавеющей стали с образцом из нержавеющей стали площадью 1 м^2 .

** Цифра получена в предположении протекания шибера путем вычитания подложки, обусловленной данным протеканием.

Для сравнения “качества” поверхностей в первой колонке таблицы стоит средняя вероятность потерь $\langle \mu \rangle$, также рассчитанная в рамках приведенной выше модели:

$$\langle \mu \rangle = \frac{1}{\tau \cdot \nu}, \quad (6)$$

где τ — время хранения УХН, а ν — средняя частота ударов УХН о стенки спектрометра или образца, рассчитанная для максимальной энергии УХН. Вычисленная таким образом $\langle \mu \rangle$ меньше реальной вероятности потерь, однако в данном случае нас интересуют только сравнительные характеристики различных поверхностей.

На рис. 10 кривые 2 и 4 для необезгаженного и обезгаженного образца нержавеющей стали сильно разошлись. Рассмотрим эту часть более подробно — рис. 18 (на этом рисунке, в отличие от рис. 10, фон детектора вычтен).

Если t_0 — момент поднятия поглотителя, то можно показать, что счет детектора при $t > t_0$ описывается выражением

$$\frac{dN_{det}}{dt} = p_1 \cdot \left(1 - p_2 \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_{det}}\right) \right) \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right), \quad (7)$$

где τ — среднее время хранения нейтронов в спектрометре, τ_{det} — среднее время вытекания ВУХН из спектрометра через фольгу; параметр p_1 зависит от вероятности нагрева P_+ , числа УХН, геометрии бочки и так далее, а p_2 отвечает за

счет при $t = t_0$ и зависит только от отношения парциальных вероятностей проникновения нейтронов в фольгу для случаев с поднятым и опущенным поглотителем (альтернативные процессы — гибель в стенках спектрометра и поглотителя).

Это несколько упрощенный подход даже для монолиний. Например, растущая экспонента не определяется одним τ_{det} , так как до поднятия поглотителя угловое распределение ВУХН сильно отличается от изотропного, а после поднятия становится практически изотропным. Тем не менее, экспериментальные данные хорошо описываются функцией (7). Параметры τ и τ_{det} , в принципе, известны: τ измерялась впрямую, τ_{det} рассчитывалась для спектра зарегистрированных ВУХН (рис. 11).

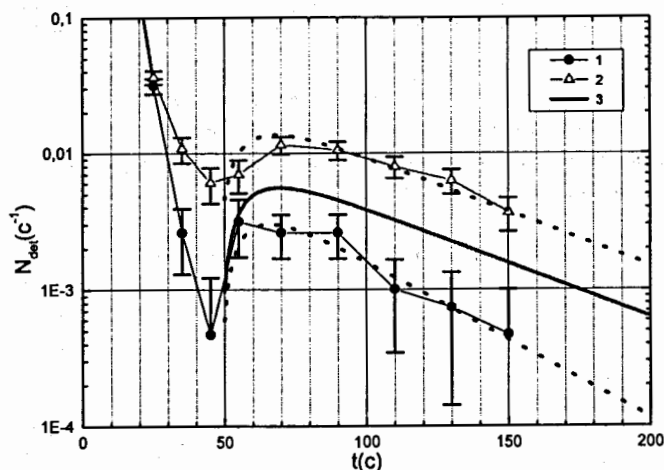


Рис. 18 Зависимость счета нагретых нейтронов детектором УХН за разделительной фольгой от времени в медном спектрометре с обезгаженным образцом из нержавеющей стали (кривая 2) и с необезгаженным образцом (кривая 1). Пунктирные линии — результат фитирования экспериментальных значений функцией (7) Кривая 3 — ожидаемая зависимость после обезгаживания образца в предположении неизменности вероятности нагрева. Электронная эффективность регистрации нейтронного сигнала 62%. Фон детектора вычтен

Результаты фитирования по двум свободным параметрам p_1 и p_2 — пунктирные кривые на рис. 18. Кривая 3 на этом рисунке показывает, как должна была бы пройти кривая 2 по сравнению с кривой 1, если бы вероятность нагрева и спектр ВУХН остались такими же и произошло бы только одно изменение — увеличилось время хранения. Кривая 3 прошла примерно в 2 раза ниже

экспериментальной кривой 2. Объяснения этому могут быть такие: либо увеличилась вероятность нагрева (или стал более жестким спектр ВУХН, что привело к более эффективному проникновению их сквозь алюминиевую фольгу), либо примерно в 10 раз возрос фон детектора.

Возрастание фона возможно, если “протекает” входной шиббер. В самом деле, в первых измерениях с медным спектрометром мы заметили, что входной шиббер иногда не закрывался до конца. Этот дефект был устранен; кроме того, анализ полученных данных противоречит гипотезе о “протекании” шиббера. В частности, распределение числа ВУХН, зарегистрированных за один цикл, отвечает пуассоновскому распределению, что было бы странно при недозакрытии шиббера, так как последний процесс нерегулярный. Однако, поскольку предположение о “протекании” шиббера уменьшает вероятность нагрева P_+ , а нашей задачей является установление нижней границы эффекта, приведем вычисления и для этого гипотетического случая. Встает вопрос, какой уровень фона выбрать в случае недозакрытия шиббера? Конструкция шиббера такова, что он может давать только не увеличивающийся со временем фон. Поэтому максимально возможный фон должен быть равен счёту детектора в момент подъема поглотителя t_0 . В таблице приведены нижние границы для P_+ , вычисленные для обоих случаев.

б) расчет вероятности охлаждения

Примем за нулевой отсчет времени момент закрытия входного шиббера. Тогда при насыщении (время наполнения $t_{fill} \rightarrow \infty$) изменение числа охлажденных нейтронов N_{\downarrow} при $t = 0$ равно

$$\left. \frac{dN_{\downarrow}(0)}{dt} \right|_{t_{fill} \rightarrow \infty} = J_0 S P_- - \frac{N_{\downarrow 0}}{\tau} = 0, \quad (8)$$

где J_0 — равновесная плотность потока УХН, S — площадь облучаемой поверхности (ниже уровня опускания поглотителя), P_- — вероятность охлаждения, $N_{\downarrow 0}$ — равновесное количество охлажденных нейтронов в спектрометре, τ — среднее время хранения охлажденных нейтронов в спектрометре. Откуда:

$$P_- = \frac{N_{\downarrow 0}}{J_0 S \tau}. \quad (9)$$

После закрытия входного шиббера и опускания поглотителя через время t_0 открывается выходной шиббер. Легко получить:

$$N_{\downarrow}(0) = N_{det} \frac{\tau + \tau_{det}}{\tau \epsilon_{det}} \exp\left(\frac{t_0}{\tau}\right), \quad (10)$$

где N_{det} — число зарегистрированных за цикл охлажденных нейтронов, τ_{det} — среднее время вытекания нейтронов на детектор, ϵ_{det} — эффективность детектора.

Также можно показать, что:

$$N_{\downarrow}(0) = N_{\downarrow 0} f(t_{fill}); \quad (11)$$

$$f(t_{fill}) = 1 - \exp\left(-\frac{t_{fill}}{\tau}\right) + \frac{\tau_{fill}}{\tau} \left(\exp\left(-\frac{t_{fill}}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t_{fill}}{\tau}\right) \right)$$

и

$$J(0) = J_0 \varphi(t_{fill}); \quad \varphi(t_{fill}) = 1 - \exp\left(-\frac{t_{fill}}{\tau_1}\right). \quad (12)$$

Здесь $N_{\downarrow}(0)$ и $J(0)$ — соответственно число охлажденных нейтронов и плотность потока УХН в спектрометре в момент закрытия входного шибера; t_{fill} и τ_{fill} — время наполнения и постоянная времени наполнения спектрометра; $\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_{fill}}$.

Таким образом из (9) — (12) получим:

$$P_- = N_{det} \frac{(\tau + \tau_{det}) \varphi(t_{fill})}{J(0) S \varepsilon_{det} \tau^2 f(t_{fill})} \exp\left(\frac{t_0}{\tau}\right). \quad (13)$$

В данном расчете мы не учитывали влияние силы тяжести. Учет ее для конкретной геометрии эксперимента увеличивает P_- менее чем на 10%. Результат вычислений приведен в таблице.

в) расчет вероятности пропускания

Из измерений по охлаждению нейтронов с неподвижным поглотителем (см. рис. 13, нижняя кривая) мы можем извлечь информацию о возможном подбарьерном проникновении УХН сквозь алюминиевую фольгу.

Из данных, полученных мониторным детектором в измерениях по нагреву нейтронов, можно оценить плотность потока нейтронов с энергией меньше $E_{sp, Al}$ на входе в спектрометр. На момент закрытия входного шибера ($t=0$) плотность потока УХН $J(0)$ внутри спектрометра при наполнении без фольги связана с плотностью потока УХН J_{in} на входе в спектрометр соотношением

$$J(0) = J_{in} \frac{\tau_2}{\tau_{0 fill}} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{fill}}{\tau_2}\right) \right). \quad (14)$$

Здесь $\tau_{0 fill}$ — постоянная времени наполнения спектрометра (без фольги на входе) УХН с энергией меньше $E_{sp, Al}$; τ — время хранения; $\frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{\tau_{0 fill}} + \frac{1}{\tau}$.

Количество проникших сквозь алюминиевую фольгу подбарьерных УХН, к моменту закрытия входного шибера находящихся в спектрометре $N(0)$:

$$N(0) = P_{sub} J_{in} S_w \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{fill}}{\tau}\right) \right), \quad (15)$$

где P_{sub} — искомая вероятность подбарьерного прохождения сквозь фольгу; S_w — площадь входного окна, перекрытого алюминиевой фольгой.

Количество зарегистрированных за цикл, проникших сквозь фольгу нейтронов:

$$N_{det} = N(t_0) \frac{\tau}{\tau + \tau_{det}} \exp\left(-\frac{t_0}{\tau}\right), \quad (16)$$

где t_0 — момент открытия выходного шибера, а τ_{det} — постоянная времени вытекания нейтронов из спектрометра на детектор.

Из соотношений (14)-(16) легко получить

$$P_{sub} = \frac{N_{det} (\tau_{det} + \tau) \exp(t_0/\tau)}{S_w J(0) (\tau + \tau_{0 fill}) \tau} \cdot \frac{1 - \exp(-t_{fill}/\tau_2)}{1 - \exp(-t_{fill}/\tau)}. \quad (17)$$

Таким образом, полученная вероятность подбарьерного проникновения нейтронов сквозь алюминиевую фольгу толщиной 10,5 мкм: $P_{sub} = (1,4 \pm 1,6) 10^{-6}$.

6. Заключение

Конечно же, в нашей постановке эксперимента мы не видим непосредственно отдельных актов передачи энергии между нейтроном и веществом (стенками сосуда), как это обычно наблюдают при изучении неупругого рассеяния нейтронов теплового диапазона энергий. Однако кроме неупругого рассеяния УХН мы не видим никаких других серьезных объяснений эффекта появления УХН в энергетических диапазонах, которые предварительно были тщательно вычищены от присутствия таких нейтронов.

Таким образом, в данной работе подтверждены результаты работы [1] — наличие малого нагрева УХН в процессе столкновений с поверхностью нержавеющей стали и, кроме этого, был обнаружен эффект охлаждения УХН — уменьшения кинетической энергии УХН при таких столкновениях.

Энергия нагретых нейтронов (ВУХН) не превышает ~110 нэВ при начальном спектре УХН, ограниченном сверху энергией ~49 нэВ.

Обнаружен тот же эффект нагрева нейтронов и на меди. Величина эффекта на меди почти на порядок меньше, чем на нержавеющей стали.

У нас нет сомнений, что аналогичный эффект имеет место и на бериллии. Однако без дополнительных измерений мы не можем сделать заключение о величине наблюдаемого эффекта.

Скудность экспериментальных данных и необычность наблюдаемого эффекта являются препятствиями для построения теоретических моделей, объясняющих явление. Однако то, что не наблюдается явной зависимости эффекта от чистоты поверхности, с которой взаимодействуют нейтроны, по-видимому, противоречит гипотезе о том, что эффект связан с квазиупругим рассеянием на

водородосодержащих загрязнений. Наблюдаемый эффект, вероятно, не связан и с магнитными свойствами вещества, поскольку он присутствует и у немагнитных веществ — меди и бериллия. Кроме того, величина эффекта для нержавеющей стали заметным образом не изменилась при ее отжиге, а магнитная восприимчивость при этом уменьшилась на три порядка. На немагнитную природу наблюдаемого эффекта указывает и то, что генерация ВУХН заметным образом не изменилась при помещении в объем хранения (спектрометр из нержавеющей стали) пластин из стали — сильного ферромагнетика.

Для того чтобы ответить на вопрос, имеет ли данный эффект отношение к так называемой аномалии хранения УХН, необходимо определить величину эффекта, а не только его нижнюю границу и измерить температурную зависимость эффекта.

Литература

- [1] В.В. Несвижевский, А.В. Стрелков, П. Гельтенборт, П.С. Яйджиев // Препринт ОИЯИ РЗ-98-79; ILL Annual Report 1997, p. 62; ЯФ 1999, т. 62, №5
- [2] S. Arzumanov, L. Bondarenko, S. Chernyavsky et. al. ISIN-6, Dubna, May 13-16, 1998, pp. 108-116
- [3] В.П. Алфименков и др. // Письма в ЖЭТФ, 1992, т. 55, с. 92
- [4] В.Е. Варламов, П. Гельтенборт, В.В. Несвижевский и др. // Письма в ЖЭТФ, т. 66, вып. 5, сс. 317-322
- [5] "Guide to Neutron Research Facilities at The ILL" (The Yellow Book), Grenoble, France — December 1997, p. 74

Рукопись поступила в издательский отдел
19 марта 1999 года.