

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P3-2000-70

Е.В.Лычагин, А.Ю.Музыка, В.В.Несвижевский*,
Г.В.Нехаев, А.В.Стрелков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА
ВОЗМОЖНОГО ПОДБАРЬЕРНОГО
ПРОНИКНОВЕНИЯ УХН
СКВОЗЬ ГЕРМЕТИЧНЫЕ ФОЛЬГИ

Направлено в «Письма в ЖЭТФ»

*Институт Лауэ — Ланжевена, Гренобль, Франция

2000

Исследование аномалии в хранении ультрахолодных нейтронов (УХН) в замкнутых сосудах (большое несоответствие между расчетным и экспериментальным временами хранения [1]) в настоящее время превратилось в не менее интересную проблему, чем даже само предполагаемое использование долгого удержания УХН для ряда фундаментальных экспериментов. При исследовании аномалии в хранении УХН был проделан ряд экспериментов для выяснения путей утечки УХН из сосудов. В принципе, одним из предполагаемых каналов утечки УХН могло бы быть подбарьерное проникновение УХН сквозь или в стенки сосуда. В эксперименте [2] наблюдаемое прохождение УХН сквозь бериллиевую фольгу оказалось результатом частичного разогрева хранящихся УХН [3, 4] и, таким образом, обычным надбарьерным прохождением УХН сквозь фольгу.

В более позднем эксперименте [5] наблюдалось просачивание УХН сквозь напыленные слои бериллия, циркония и сплава никель-молибден толщиной 0,2÷3 мкм, что могло бы быть объяснено присутствием микропор в напыленных слоях. Установить наличие таких технологических несовершенств методом простой проверки слоев на вакуумную плотность было невозможно, поскольку слои напылялись на подложку из алюминия. К тому же в этом эксперименте постоянно присутствовал принципиально неубираемый фон от ультрахолодных нейтронов, немного увеличивающих свою энергию в процессе хранения (см. [3, 4]), который ограничивал чувствительность использовавшегося метода к вероятности проникновения на удар о поверхность слоя на уровне $\sim 10^{-6}$.

Появились в последнее время и некоторые теоретические работы [6-9], предсказывающие проникновение УХН сквозь потенциальный барьер, во много раз превышающее величину квантово-механического туннельного эффекта.

Для внесения ясности в вопрос проникновения УХН сквозь стенки (по крайней мере, для определения роли этого процесса в аномалии хранения УХН) был выполнен эксперимент, в котором точность определения верхней границы подбарьерного пропускания тонкой фольги улучшена на два порядка.

1. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Ультрахолодные нейтроны от источника поступают к установке по нейтроноводу из нержавеющей стали (1). Нейтроны облучают вакуумно-плотную бериллиевую фольгу (2) толщиной 15 мкм и площадью 63 см², отделяющую входной нейтронотвод от объема хранения (3). Входной нейтронотвод может перекрываться шибером (4), который исключает попадание медленных нейтронов любых энергий из нейтронотвода в установку.

Объем хранения — сфера из меди диаметром 39 см, на выходе из которой расположена медная поворотная заслонка (5), служащая для запираения УХН внутри объема. Сфера откачивается до остаточного давления газа $\sim 10^{-3}$ мбар. Объем хранения обезгаживался в течение 6 часов при температуре 110-150°C.

К выходу из объема хранения, расположенному в нижней части сферы, через нейтронпровод, аналогичный входному, подсоединен детектор УХН (6) — газоразрядный счетчик с ^3He (давление ~ 10 торр) и тонким (100 мкм) алюми-

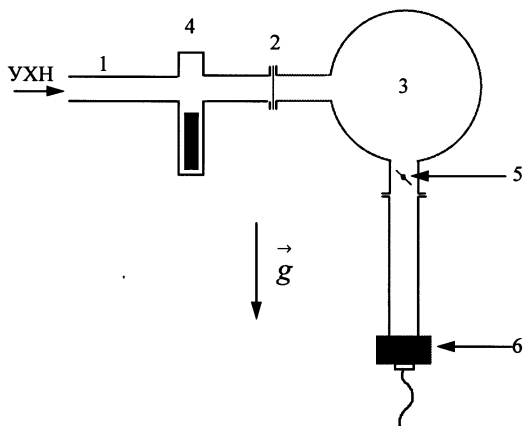


Рис.1. Схема установки:

1 — входной нейтронпровод; 2 — бериллиевая фольга; 3 — объем хранения; 4 — шибер; 5 — поворотная заслонка; 6 — детектор УХН

ниевым окном. Детектор находится на ~ 60 см ниже дна объема хранения и окружен нейтронной защитой из кадмия и борсодержащей резины. Электронная эффективность детектора к нейтронам — 80%, а фон при закрытом шибере: $(8,8 \pm 0,6) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Во время измерений работа детектора контролировалась по амплитудному анализатору.

2. Идея постановки эксперимента заключается в том, чтобы проникающие каким-либо образом под потенциальным барьером фольги нейтроны могли бы накапливаться в объеме хранения. Надбарьерные для бериллиевой фольги нейтроны, легко проникающие через фольгу, накапливаться не могут, поскольку граничная энергия фольги значительно превышает граничную энергию стенок объема хранения ($E_{\text{lim Be}}=249 \text{ нэВ}$, $E_{\text{lim Cu}}=168 \text{ нэВ}$). Зная число накопленных в объеме хранения нейтронов за время Δt , поток нейтронов с энергией, не превышающей $E_{\text{lim Cu}}$, на поверхность входной фольги за это же время Δt , время хранения нейтронов в сосуде, а также времена наполнения и вытекания, можно определить вероятность подбарьерного проникновения УХН сквозь фольгу за один удар.

Процедура измерения состоит из циклически повторяющейся последовательности:

- открывается шибер (выходная заслонка закрыта), и поток УХН в течение $\Delta t_{\text{fill}}=40 \text{ с}$ облучает бериллиевую фольгу. Идет накопление нейтронов,

возможно, проникающих в объем хранения под потенциальным барьером фольги;

- шибер закрывается, и в течение $\Delta t_{\text{clear}}=10$ с происходит “чистка” объема хранения от нейтронов, энергия которых превышает граничную энергию стенок сосуда (нейтроны с энергией больше $E_{\text{lim Cu}}$, проникнувшие в объем, могут несколько раз удариться о стенки прежде чем покинут объем хранения);
- открывается выходная заслонка и накопленные нейтроны, если они есть, вытекают из объема хранения в детектор за время $\Delta t_{\text{sliv}}=15$ с;
- заслонка закрывается и следующие 40 с считается фон детектора.

Контрольным измерением является аналогичное измерение, в котором позади бериллиевой фольги устанавливается 14-микронная медная фольга. Эта фольга уменьшает вероятность проникновения подбарьерных для меди нейтронов в объем хранения на много порядков, но практически не влияет на высокоэнергетичные нейтроны, а значит и на любые процессы, ведущие к систематической ошибке, с ними связанные. Возможность разностного измерения позволяет избежать этих ошибок.

Для определения потока УХН с энергией меньше $E_{\text{lim Cu}}$ на бериллиевую фольгу вход и выход объема хранения меняются местами, а вместо фольги (теперь уже на выходе) устанавливается толстая медная мембрана с небольшим отверстием известной площади ($0,21 \text{ см}^2$), через которое ведется мониторинг плотности УХН внутри объема хранения. По изменению скорости счета детектора во время наполнения можно определить постоянную наполнения объема хранения τ_{fill} , а после закрытия шибера и заслонки — постоянную времени хранения τ_{stor} . Определив плотность нейтронов в объеме хранения в момент закрытия входной заслонки (5 УХН/см^2), экстраполируя кривую хранения к соответствующему моменту времени t и зная τ_{fill} и τ_{stor} , можно определить поток нейтронов с энергиями меньше $E_{\text{lim Cu}}$ на входе в установку. Время вытекания хранящихся нейтронов определялось в отдельном измерении (без мембраны на выходе).

3. На рис. 2 представлены полученные зависимости скорости счета детектора во время цикла как в измерении с бериллиевой фольгой, так и в измерении с одновременной постановкой бериллиевой и медной фольг. Различие в потоках “надбериллиевых” нейтронов, проникающих в детектор, во время наполнения (первые 40 секунд) обусловлено тем, что во втором измерении щель в выходной заслонке была увеличена. Это увеличение носило технический характер и никак не повлияло на измерения. Ниже на рисунке 2 приведена разность этих двух измерений (предварительно из каждого вычтен соответствующий фон).

Число накапливаемых за цикл нейтронов в измерениях с фольгой на входе составило:

- $(1,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$ нейтрона/цикл в измерениях с одной бериллиевой фольгой;
- $(1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-2}$ нейтрона/цикл в измерениях с двумя фольгами, бериллиевой и медной.

Из разницы между этими измерениями с учетом потерь накопленных нейтронов во время Δt_{clear} и Δt_{sliv} вычисляется вероятность подбарьерного проникновения, которая составила $(-1,2 \pm 1,0) \cdot 10^{-8}$ на удар о поверхность бериллиевой фольги для

нейтронов с энергией в диапазоне $\sim(40\div 160)$ нэВ (нижняя граница обусловлена свойствами источника УХН).

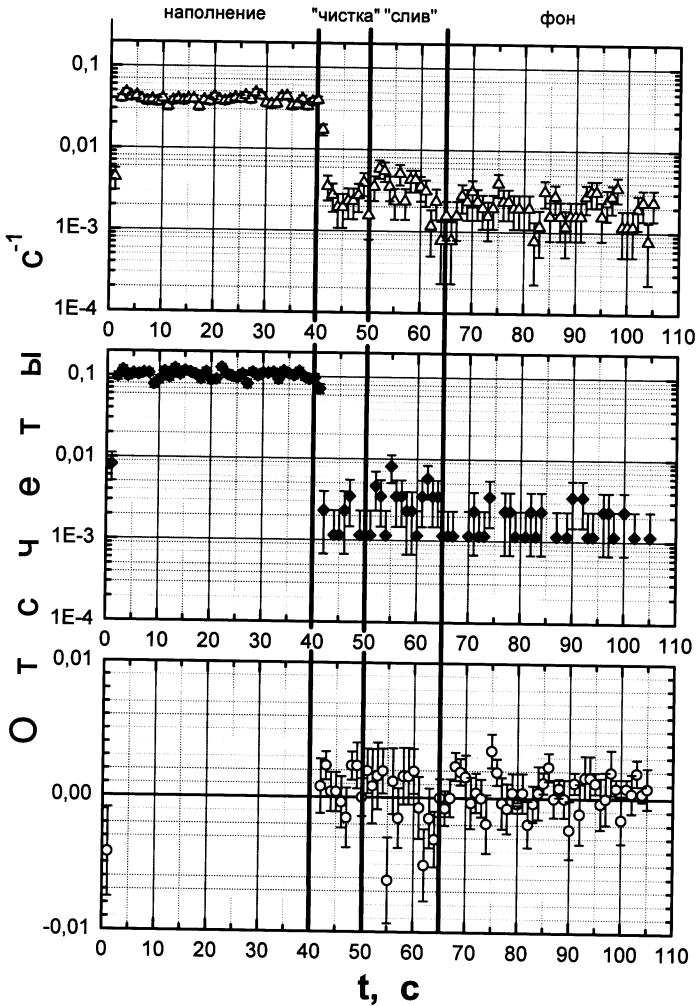


Рис. 2

Треугольники — скорость счета детектора в измерении с 15-микронной бериллиевой фольгой на входе; ромбы — скорость счета детектора в измерении с 15-микронной бериллиевой и 14-микронной медной фольгами на входе; кружки — разность двух измерений (предварительно из каждого вычтен соответствующий фон)

4. Существует ряд процессов, приводящих к методическим погрешностям, в данной постановке эксперимента.

Во-первых, это процессы проникновения нейтронов с энергией менее $E_{\text{lim Cu}}$ в объем хранения, минуя потенциальный барьер фольги, как через микроотверстия в самой фольге, так и в обход фольги. В эксперименте герметичность фольги проверялась при помощи гелиевого течеискателя. Получено ограничение на возможную площадь отверстий ($\sim 1,5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$), что полностью исключает прямой проход через микроотверстия. Принципиально не исключена возможность проникновения нейтрона в обход фольги через тефлоновые уплотнения и воздушный промежуток.

Во-вторых, к систематическому увеличению счета накапливаемых нейтронов должен вести недавно обнаруженный процесс охлаждения УХН [10,11]. Нейтроны, с энергией больше граничной энергии бериллиевой фольги, легко проникающие сквозь нее, могут уменьшить свою энергию при выходе из фольги или при ударе о противоположную стенку объема хранения до энергий, не превышающих $E_{\text{lim Cu}}$.

Открытие и закрытие шибера в установке происходит с заметным ударным воздействием на установку. Кроме того, в реальных измерениях после фольги на входе в объем хранения стояла поворотная заслонка, аналогичная выходной, которая открывалась только на время наполнения. Охлаждение надбарьерных нейтронов при взаимодействии со стенками объема хранения во время удара шибера или при взаимодействии с достаточно быстро двигающейся заслонкой могут также быть источником систематической погрешности.

Все перечисленные методические эффекты (кроме тех, которые связаны с микроотверстиями в фольге, площадь которых оценена экспериментально) компенсируются в нашем эксперименте, поскольку вероятность проникновения определяется из разности двух измерений: с одной бериллиевой фольгой и с двумя фольгами на входе — бериллиевой и медной. Кроме того, специально проведенные измерения с медленно вращающейся заслонкой дали результат $(1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$ нейтрона/цикл, что совпадает в рамках статистики с измерениями, в которых заслонка двигалась быстро.

5. Используемая в работе методика представляется наиболее чувствительной к подбарьерному проникновению УХН сквозь тонкие пленки. Прямое, а не разностное измерение после устранения описанных выше методических погрешностей эксперимента позволит увеличить точность более чем на порядок при прочих равных условиях. Дальнейшее увеличение точности измерений в данной постановке возможно при использовании большей поверхности фольги, “освещаемой” нейтронами, увеличении времени хранения нейтронов, уменьшении фона детектора и использовании большего потока УХН. Для изучения проникновения нейтронов с энергиями, вплотную примыкающими к границе потенциального барьера, можно использовать описанную выше методику на установке типа гравитационного спектрометра, описанного в [10].

Полученное нами ограничение на вероятность прямого проникновения сквозь барьер $(-1,2 \pm 1,0) \cdot 10^{-8}$ значительно меньше вероятности аномальных потерь на бериллии ($\sim 10^{-5}$ на удар).

Гипотезы, объясняющие аномально большие потери при хранении УХН на бериллии подбарьерным прохождением, как правило, ничего не говорят о судьбе нейтрона, кинетическая энергия которого меньше высоты потенциального барьера, но все же оказавшегося в области под барьером. В связи с тем, что время жизни нейтрона под барьером может быть много меньше времени проникновения, отсутствие пропускания фольг оставляет возможность различным теоретическим гипотезам. В настоящее время на холодных нейтронах продолжают предприниматься попытки измерения вероятности аномального подбарьерного проникновения внутрь (а не сквозь) барьера [12], однако достигнутая на сегодняшний день точность эксперимента находится на уровне 10^{-4} .

Работа выполнена на реакторе ILL (Гренобль, Франция), инструмент PF2. Авторы признательны П. Гельтенборту, Т. Бреннеру и обслуживающему персоналу за квалифицированную помощь.

Литература

1. В. П. Алфименков, В. В. Несвижевский, А. П. Серебров и др.// Письма в ЖЭТФ, 55, 92 (1992).
2. В. Е. Варламов, П. Гельтенборт, В. В. Несвижевский и др.// Письма в ЖЭТФ, 66, 317 (1997).
3. V. V. Nesvizhevsky, P. Geltenbort, A. V. Strelkov et al.// ILL Annual Report 97.
4. В. В. Несвижевский, А. В. Стрелков, П. Гельтенборт и др.// ЯФ, 1999, Т. 62, №5, с. 832-843; препринт ОИЯИ, Р-98-79, Дубна 1998.
5. P. Geltenbort, D. G. Kartashov, A. G. Kharitonov et al.// ILL Experimental report, № 3-14-66, 1998.
6. A. P. Serebrov// Proc. 5-th Int. Semin. Interact. of Neutrons with Nuclei, Dubna, 1997, JINR publ. pp 67-70.
7. V. K. Ignatovich, M. Utsuro// Phys. Lett. A 225 (1997) 195-202.
8. V. G. Nosov, A. Frank// Phys. Rev. A vol. 55 №2, 1997, p. 1129-1139.
9. Yu. A. Alexandrov// Proc. 7-th Int. Semin. Interact. of Neutrons with Nuclei, (ISIN-7), Dubna, 1999, JINR publ. pp 282-286.
10. A. V. Strelkov, V. V. Nesvizhevsky, P. Geltenbort et al.// NIMA 440, pp.695-703; Pis'ma v ZhETF, vol.70, iss.3, pp.175-180; препринт ОИЯИ Р-3-99-71, Дубна 1999.
11. S. Arzumanov, L. Bondarenko, S. Chernyavsky et. al.// Proc. 6-th Int. Semin. Interact. of Neutrons with Nuclei (ISIN-6), Dubna, May 13-16, 1998, pp. 108-116.
12. Utsuro, V. K. Ignatovich // Phys. Lett. A 246 (1998) 7-15.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 марта 2000 года.

Лычагин Е.В. и др.

P3-2000-70

Экспериментальная оценка возможного подбарьерного проникновения УХН сквозь герметичные фольги

Измерен верхний предел вероятности ультрахолодных нейтронов с энергией, не превышающей граничную энергию меди ($E_{\text{lim Cu}} = 168$ нэВ) сквозь 15-микронную вакуумно-плотную бериллиевую фольгу ($E_{\text{lim Be}} = 249$ нэВ), который составил $(-1,2 \pm 1,0) \cdot 10^{-8}$ на удар.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Lychagin E.V. et al.

P3-2000-70

Experimental Limit for Hypothetical Sub-Barrier Penetration of UCN Through Vacuum-Tight Foils

The sub-barrier penetration probability of ultracold neutrons through 15 μm thick vacuum-tight beryllium foil (limiting energy for beryllium — $E_{\text{lim Be}} = 249$ neV) have been measured in special experiment. The probability was found to be $(-1.2 \pm 1.0) \cdot 10^{-8}$ per collision for neutrons with energy under 160 neV.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 14.04.2000
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 0,81
Тираж 300. Заказ 51980. Цена 98 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области