

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 71, ВЫПУСК 11
10 ИЮНЯ, 2000

Письма в ЖЭТФ, том 71, вып.11, стр.657 - 662

© 2000г. 10 июня

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО
ПОДБАРЬЕРНОГО ПРОНИКНОВЕНИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ
НЕЙТРОНОВ СКВОЗЬ ГЕРМЕТИЧНЫЕ ФОЛЬГИ

Е.В.Лычагин¹⁾, А.Ю.Музыка, В.В.Несвижевский*, Г.В.Нехаев, А.В.Стрелков

*Объединенный институт ядерных исследований
141980 Дубна, Московская обл., Россия*

** Институт Лауз-Ланжевена, 38042 Гренобль, Франция*

Поступила в редакцию 21 апреля 2000 г.

Измерен верхний предел вероятности проникновения ультрахолодных нейтронов с энергией, не превышающей граничную энергию меди ($E_{lim Cu} = 168$ нэВ) сквозь 15-микронную вакуумно плотную бериллиевую фольгу ($E_{lim Be} = 249$ нэВ), который составил $(-1.2 \pm 1.0) \cdot 10^{-8}$ на удар.

PACS: 03.65.-w; 28.20.-v

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 $0.2 \div 3$ 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

¹⁾ e-mail: lychag@nf.jinr.ru

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 квантовомеханического 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 1 из нержавеющей стали. Нейтроны облучают вакуумно-плотную бериллиевую фольгу 2 толщиной 15 мкм и площадью 63 см², отделяющую входной нейтроновод от объема хранения 3. Входной нейтроновод может перекрываться шибером 4, который исключает попадание медленных нейтронов любых энергий из нейтроновода в установку.

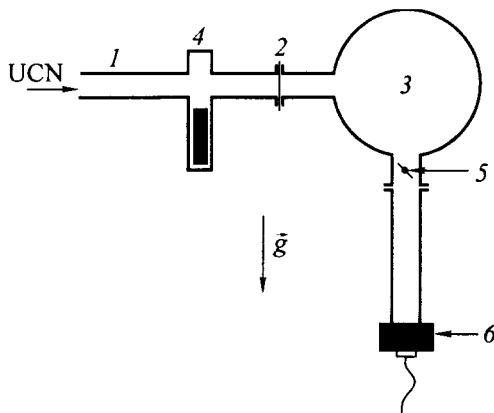


Рис.1. Схема установки: 1 – входной нейтроновод, 2 – бериллиевая фольга, 3 – объем хранения, 4 – шибер, 5 – поворотная заслонка, 6 – детектор УХН

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 ч при температуре 110 – 150 °С.

К выходу из объема хранения, расположенному в нижней части сферы, через нейтроновод, аналогичный входному, подсоединен детектор УХН 6 – газоразрядный счетчик с ³He (давление ~ 10 торр) и тонким (100 мкм) алюминиевым 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 $(8.8 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$ 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 энер-

гия фольги значительно превышает граничную энергию стенок объема хранения ($E_{lim\ Be} = 249$ нэВ, $E_{lim\ Cu} = 168$ нэВ). Зная число накопленных в объеме хранения нейтронов за время Δt , поток нейтронов с энергией, не превышающей $E_{lim\ Cu}$, 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 $\Delta t_{fill} = 40$ с облучает бериллиевую фольгу. Идет накопление нейтронов, возможно, проникающих в объем хранения под потенциальным барьером фольги;

- шибер закрывается, и в течение $\Delta t_{clear} = 10$ с происходит “чистка” объема хранения от нейтронов, энергия которых превышает граничную энергию стенок сосуда (нейтроны с энергией больше $E_{lim\ Cu}$, 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 $\Delta t_{empty} = 15$ 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 $E_{lim\ Cu}$ 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 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 $E_{lim\ Cu}$ 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 с) 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 рис.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 фоль-

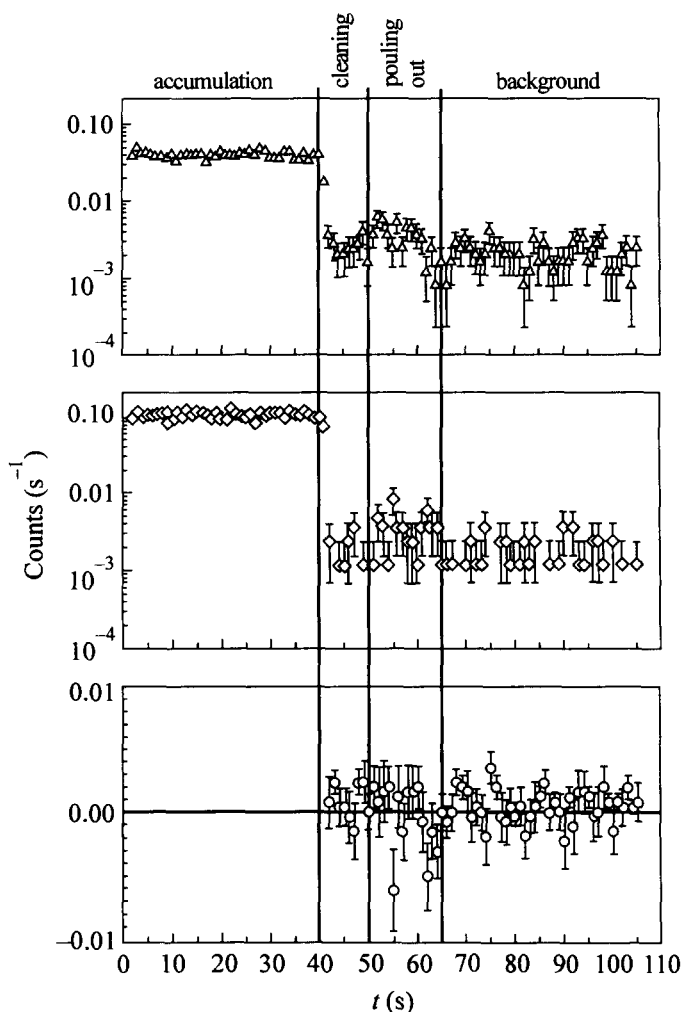


Рис.2. Зависимости скорости счета детектора от времени: треугольники – скорость счета детектора в измерении с 15-микронной бериллиевой фольгой на входе; ромбы – скорость счета детектора в измерении с 15-микронной бериллиевой и 14-микронной медной фольгами на входе; кружки – разность двух измерений (предварительно из каждого вычтен соответствующий фон)

гой; $(1.6 \pm 0.4) \cdot 10^{-2}$ 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_{empty} 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).

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

Во-первых, это процессы проникновения нейтронов с энергией менее $E_{lim\ Cu}$ 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 ($\sim 1.5 \cdot 10^{-14}$ см²), 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 $E_{lim\ Cu}$.

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 может 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.

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 **62**, 832 (1999); препринт ОИЯИ, Р-98-79, Дубна 1998.
5. P.Geltenbort, D.G.Kartashov, A.G.Kharitonov et al., ILL Experimental report №3, 146, 1998.
6. А.Р.Серебров, *Proc. 5-th Int. Semin. Interact. of Neutrons with Nuclei*, Dubna, 1997, JINR publ. p.67.
7. V.K.Ignatovich and M.Utsuro, *Phys. Lett.* **A225**, 195 (1997).
8. V.G.Nosov and A.Frank, *Phys. Rev.* **A55**, 1129 (1997).
9. Yu.A.Alexandrov, *Proc. 7-th Int. Semin. Interact. of Neutrons with Nuclei*, ISIN-7, Dubna, 1999, JINR publ., p.282; to be published in *Hadronic journal* **23** (2000).
10. A.V.Strelkov, V.V.Nesvizhevsky, P.Geltenbort et al., *NIMA* **440**, 695 (2000); *Pis'ma v ZhETF* **70**, 175 (1999); 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, p.108.
12. M.Utsuro and V.K.Ignatovich, *Phys. Lett.* **A246**, 7 (1998).