



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ДЗ-99-243

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

ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
ПО ИЗУЧЕНИЮ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
ЭНЕРГИИ УХН В ЛОВУШКАХ

Направлено в журнал «Physics Letters B»

*Институт Лауэ — Ланжевена, Гренобль, Франция

1999

Об интерпретации экспериментов по изучению малых изменений энергии УХН в ловушках

Недавно был обнаружен новый удивительный канал потерь ультрахолодных нейтронов (УХН) из ловушек. Мы полагаем, что дополнительные потери УХН связаны с увеличением их энергии (на величину $\sim 10^{-7}$ эВ) при взаимодействии со стенками ловушки. Альтернативной интерпретацией экспериментальных данных явилась гипотеза временного прилипания нейтронов к стенкам ловушки. В данной работе мы показываем, что гипотеза временного прилипания противоречит экспериментальным данным.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

About Interpretation of Experiments on Small Increase in Energy of UCN in Traps

A new surprising escape channel for ultracold neutrons (UCN) in traps was identified recently. We suppose that the additional UCN loss results from rare events of small increase in their energy ($\sim 10^{-7}$ eV). The only clearly pronounced alternative interpretation of our experiments assumes a temporary adhesion of few UCN to trap walls. We show that this hypothesis contradicts to our experimental data.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1999

Введение

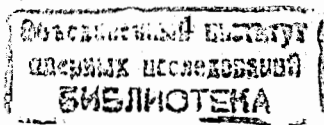
Хранение ультрахолодных нейтронов ($E \sim 10^{-7}$ эВ, $V \sim 5$ м/с) в ловушках является уникальным инструментом фундаментальных физических исследований и особенно привлекательно для экспериментов по измерению времени жизни нейтрона с высокой точностью. Возможность хранения нейтронов в замкнутых объемах обусловлена полным отражением УХН от стенок ловушек. Процесс хранения является при этом существенно неравновесным. Температура стенок ловушки в $\sim 10^5$ раз превышает температуру $\sim 10^{-3}$ К, которая соответствует кинетической энергии УХН. Существует два хорошо известных канала потерь нейтронов из ловушек при их взаимодействии со стенками: захват нейтронов ядрами вещества и неупругое рассеяние нейтронов на ядрах в тепловую область энергий ($E \sim 10^{-1} \div 10^{-2}$ эВ) [1]. Однако оба процесса не смогли объяснить обнаруженных при хранении УХН в сосуде из бериллия дополнительных температурнонезависимых потерь с вероятностью $\sim 10^{-5}$ на удар [2]. Подробный обзор физики УХН и их применения в фундаментальных исследованиях можно найти в [3, 4].

Недавно был обнаружен новый канал потерь УХН из ловушек. Потери по этому каналу обусловлены редкими процессами увеличения энергии нейтронов (на величину $\sim 10^{-7}$ эВ) при взаимодействии со стенками [5, 6, 7]. В результате энергия УХН становится больше граничной энергии стенок ловушки, и нейтроны перестают храниться. Кроме того, наличие процессов малого увеличения энергии УХН приводит к тому, что в спектре нейтронов всегда, даже после эффективной очистки, остается примесь нейтронов с большей энергией, чем энергия, соответствующая границе спектра. Мы называем УХН, которые меняют свою энергию при взаимодействии со стенками ловушки и при этом остаются ультрахолодными (или почти ультрахолодными) — возбужденными ультрахолодными нейтронами (ВУХН). Единственной альтернативной гипотезой, интерпретирующей результаты наших экспериментов, является гипотеза временного прилипания некоторых УХН к шероховатым стенам ловушки [8, 9, 10]. Данная работа посвящена экспериментальной проверке гипотезы прилипания УХН.

Экспериментальная установка

Схема установки представлена на рис.1. Более детальное описание установки и метода можно найти в [5, 6, 11, 12].

УХН от источника поступают по изогнутому нейтронному волноводу в гравитационный спектрометр (он же объем хранения) (1), в котором они могут быть заперты при помощи входных заслонок (2). Гравитационный спектрометр — медный цилиндр диаметром ~ 20 см и высотой ~ 180 см, помещенный в вакуумированный (остаточное давление $\sim 10^{-4}$ торр) цилиндр из нержавеющей стали (диаметр ~ 60 см, высота ~ 200 см).



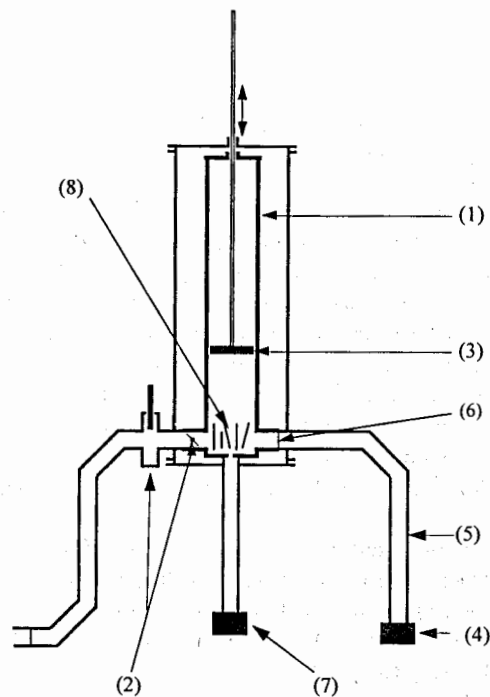


Рис. 1 Схема установки.

1 — гравитационный спектрометр; 2 — входные заслонки; 3 — полиэтиленовый поглотитель; 4 — детектор УХН; 5 — изогнутый нейтроновод; 6 — тонкая разделительная алюминиевая фольга; 7 — мониторный детектор; 8 — образец

Внутри спектрометра помещен поглотитель УХН (3) — полиэтиленовый диск, который может перемещаться вдоль оси спектрометра по всей его длине. Полиэтилен является практически идеальным «поглотителем» УХН в силу того, что он не имеет отражающего потенциала и обладает большим сечением неупругого рассеяния. УХН с энергией $E > mgh_{absor}$. (m — масса нейтрона, g — ускорение свободного падения на поверхности Земли, h — высота поглотителя над дном спектрометра) проникают в поглотитель и, неупруго рассеиваясь в диапазон энергий тепловых нейтронов, покидают ловушку. Характерная для УХН энергия $\sim 10^{-7}$ эВ, примерно соответствует подскоку нейтрона в гравитационном поле Земли на один метр ($mg \cdot 1 \text{ см} \approx 1 \text{ нэВ}$). Таким образом, после того как УХН заполнили спектрометр и закрылись входные заслонки, через некоторое время (время чистки), только небольшая часть УХН в спектрометре имеет энергию $E > mgh_{absor}$.

Детектор УХН (4) — газоразрядный счетчик с ^3He присоединен к спектрометру через изогнутый нейтроновод (5) и отделен от объема хранения разделительной

алюминиевой фольгой (6) толщиной 12,5 мкм (граничная энергия $E_{Al} \approx 52 \text{ см}$). Детектор расположен на ~ 1 м ниже дна спектрометра, что позволяет нейтронам, ускорившись в гравитационном поле, с большей эффективностью преодолевать входное алюминиевое окно детектора. Изогнутость нейтроновода позволяет защитить детектор от тепловых нейтронов, нагреваемых на в разделительной фольге и на поверхности спектрометра. Площадь разделительной фольги, являющейся частью стенки объема хранения, — 63 см^2 . Фольга установлена вертикально так, что ее центр находится на 8 см выше дна спектрометра.

Поток УХН в спектрометре измеряется мониторным детектором (7), аналогичным главному детектору (4). Монитор отделен от объема хранения толстой мембраной с маленькой ($\sim 3 \text{ мм}^2$) дырочкой.

На дно спектрометра помещен образец из бериллиевой фольги (8) с общей площадью поверхности $\sim 1 \text{ м}^2$.

Измерения

Разделительная алюминиевая фольга позволяет детектировать только надбарьерные (для фольги) нейтроны. Нейтроны заполняют ловушку в течение первых сорока секунд (рис. 2) при высоте поглотителя 52 см. Если энергия нейтронов во время хранения не меняется, то после закрытия входных заслонок (40-ая секунда) скорость счета детектора должна быстро падать к фоновому значению (пунктирная кривая на рис. 2). Характерное время этого падения соответствует времени очистки спектрометра от нейтронов с энергией, позволяющей преодолеть разделительную алюминиевую фольгу. Фактически, после быстрого падения, счет детектора остается на уровне, значительно превышающем фоновое значение (штриховая линия на рис. 2). После поднятия поглотителя (в течение ~ 16 секунд, начиная с 95-й секунды), скорость счета возрастает (сплошная линия на рис. 2)¹. Мы полагаем, что единственной разумной интерпретацией экспериментальных данных является утверждение о небольшом увеличении энергии (достаточном для преодоления разделительной фольги (6), но не приводящем к моментальной потере нейтрона) некоторых УХН во время хранения. Нейтроны с энергией $E > E_{Al}$ детектируются с большей вероятностью, когда поглотитель поднят вверх, что и приводит к росту скорости счета при поднятии поглотителя.

Настоящие измерения проводились на той же установке и по той же методике, что и оригинальные измерения [5, 6, 11]. В качестве источника ВУХН исследовался образец из цельнобериллиевой фольги с площадью поверхности $\sim 1 \text{ м}^2$ в медном спектрометре с собственной площадью поверхности $\sim 0,2 \text{ м}^2$.

¹ Детальное обсуждение данного процесса можно найти в [5, 6, 11]

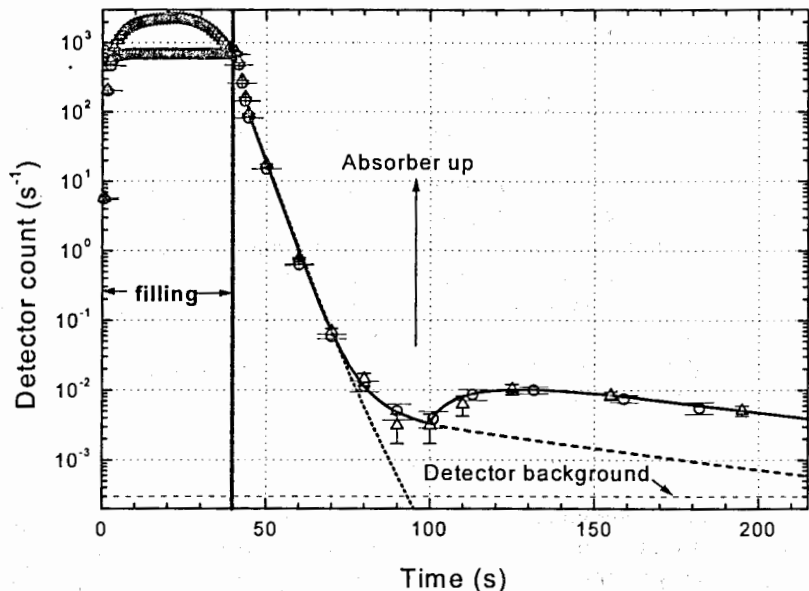


Рис. 2 Временная зависимость счета детектора УХН в логарифмическом масштабе. Кружки соответствуют измерениям с поглотителем, расположенным на высоте 52 см от дна спектрометра во время наполнения, треугольники — на высоте 146 см. Пунктирная кривая — изменение числа надбарьерных нейтронов в начальном спектре. Штриховая линия — счет детектора при неподвижном поглотителе на высоте 52 см. Сплошная кривая — очистка спектра и зависимость скорости счета ВУХН при поднятии поглотителя на 95-й секунде на высоту 146 см.

Как метод проверки гипотезы о прилипании нейтронов к поверхности, использовалось сравнение двух измерений, полученных при различном начальном спектре УХН. Результаты этих измерений представлены на рис. 2 и более детально на рис. 3. Кружки соответствуют измерению с поглотителем, находящимся на высоте 52 см в течение всего времени наполнения спектрометра (0–40 с на рис. 2). Треугольники — измерению, при котором поглотитель первые 20 с находился на высоте 146 см, а затем в течение 16 с опускался до высоты 52 см. Плотность потока надбарьерных (для разделительной фольги) УХН во время наполнения в 2,5 раза выше во втором случае, чем в первом. Коэффициент 2,5 — это отношение количества проникших сквозь алюминиевую фольгу нейтронов и зарегистрированных детектором за все время наполнения для обоих этих случаев. Нужно отметить, что аналогичное отношение, полученное из сравнения

мониторных счетов, равно 3,5. Это отличие, в частности, обусловлено разным расположением разделительной алюминиевой фольги (6 на рис.1) и маленькой дырочки в дне спектрометра, сквозь которую проходят нейтроны, регистрируемые монитором. Однако, не вдаваясь подробно в причины этого отличия, мы будем пользоваться минимальной оценкой.

Данные измерения позволяют сделать заключение об источнике ВУХН.

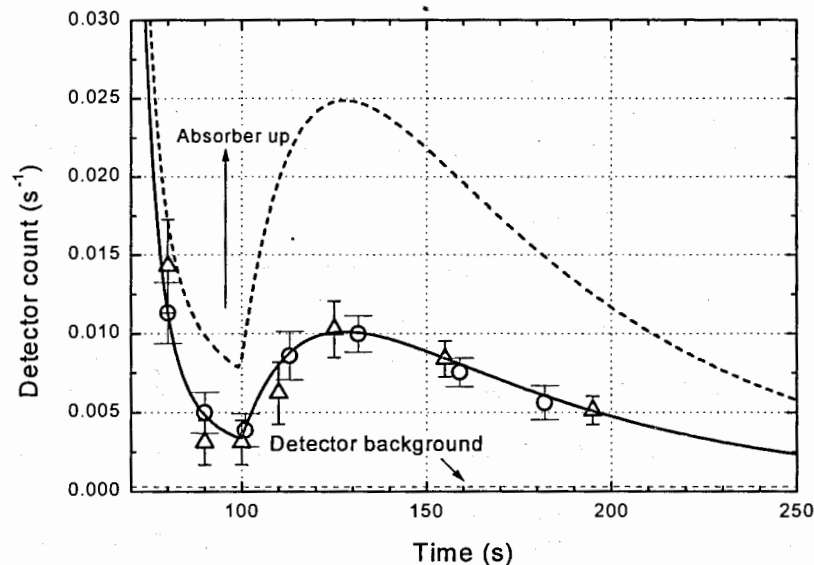


Рис. 3 Временная зависимость скорости счета детектора УХН в линейном масштабе. Кружки соответствуют измерениям с поглотителем, расположенным на высоте 52 см от дна спектрометра во время наполнения, треугольники — на высоте 146 см. Сплошная кривая — прогнозируемая в рамках гипотезы малых передач энергии УХН в ловушках очистка спектра и зависимость скорости счета ВУХН. Штриховая линия — ожидаемая зависимость скорости счета детектора УХН от времени в рамках гипотезы прилипания нейтронов к стенкам. Поглотитель поднимается на 95-й секунде.

Анализ результатов

Оставаясь в рамках гипотезы временного прилипания небольшой части нейтронов к стенкам ловушки, в принципе, можно объяснить постоянно присутствующую примесь надбарьерных нейтронов в ловушке:

- во время наполнения (0÷40 с на рис. 2) нейтроны широкого спектра находятся в ловушке, в том числе и надбарьерные;
- некоторое число надбарьерных нейтронов в этот период времени прилипают к стенкам ловушки;
- после закрытия входных заслонок происходит чистка спектра. Все надбарьерные нейтроны из начального спектра удаляются. Однако некоторые надбарьерные нейтроны все еще живут на стенках ловушки.

Такое явление могло бы имитировать генерацию ВУХН. В этом случае для объяснения экспериментальных данных не требуется реального изменения энергии УХН. Мы не обсуждаем теоретическую возможность временного прилипания нейтронов к поверхности объема хранения, а приводим простые тестовые измерения.

Основные различия гипотез временного прилипания нейтронов и небольшого увеличения энергии нейтронов заключаются в следующем:

- если УХН приобретают дополнительную энергию, то поток ВУХН не должен зависеть от числа надбарьерных нейтронов в начальном спектре УХН. Любая информация об этом теряется во время процедуры очистки спектра;
- если источником ВУХН являются надбарьерные нейтроны, временно прилипшие к поверхности ловушки и со временем слетающие со стенок, имея ту же энергию, что и до прилипания, то поток ВУХН должен быть пропорционален числу надбарьерных нейтронов в начальном спектре УХН.

Измерения показывают, что со статистической точностью выше 10% полное число сосчитанных ВУХН, так же как и временная зависимость скорости счета, не зависят от положения поглотителя во время наполнения спектрометра. В то же время поток надбарьерных нейтронов отличается в ~2,5 раза (рис. 2, 3). Таким образом, поток ВУХН не зависит от числа надбарьерных нейтронов в начальном спектре, но пропорционален плотности УХН внутри объема хранения.

Кроме того, гипотеза временного прилипания УХН к стенкам ловушек позволила бы непротиворечивым способом описать временную эволюцию потока ВУХН только в том случае, если “время жизни” нейтрона, локализованного на стенке, приблизительно равно времени хранения УХН в ловушке. “Время жизни” в таком состоянии определяется суммой вероятности “соскока” нейтрона со стенки и парциальной вероятности погибнуть на стенке. Если бы “время жизни” на стенке отличалось от времени хранения УХН, то и временная зависимость потока ВУХН отличалась бы от измеренной. Она была бы более медленной, если бы “время жизни” было больше времени хранения УХН и более быстрой в обратном случае, поскольку в этом случае “источник” надбарьерных нейтронов быстро исчезает — все прилипшие нейтроны покидают стенки или погибают на них во время

процедуры подготовки спектра, еще до начала измерения потока надбарьерных нейтронов.

Заключение

Природа обсуждаемого явления — неизбежной примеси надбарьерных нейтронов в спектре УХН — до сих пор не ясна. Однако можно с уверенностью заключить, что источником ВУХН является процесс, происходящий на поверхности объема хранения и приводящий к небольшому увеличению энергии УХН. В результате у нейтронов, получивших дополнительную энергию, появляется возможность проникнуть через стенки ловушки, если они достаточно тонкие, или проникнуть в толщу вещества и через хорошо известные каналы нагрева и захвата покинуть ловушку. В настоящей работе показано, что гипотеза временного прилипания нейтронов к стенкам ловушек [8, 9, 10] противоречит экспериментальным данным, которые в то же время хорошо согласуются с гипотезой редкого процесса малого увеличения энергии УХН в ловушке.

Нужно отметить, что данный эксперимент является проверкой существования не только процессов прилипания нейтронов к стенкам, но в принципе любого процесса, при котором возможно наблюдение надбарьерных нейтронов из первоначального спектра.

Эксперимент был проведен на высокопоточном реакторе ИЛЛ (Гренобль, Франция). Авторы признательны персоналу этого института, и особенно ответственным за пучок П. Гельтенборту, Дж. Баттерворту и Т. Бренеру за постоянную и квалифицированную помощь.

Литература

1. A.D.Stoica, A.V.Strelkov and M.Hetzelt, *Z.Phys.B* **29**, p. 349 (1978).
2. V.P.Alfimenkov, V.V.Nesvizhevsky, A.P.Serebrov, A.V.Strelkov, R.R.Tal'daev, A.G.Kharitonov and V.N.Shvetsov, *JETP Lett.* **55**, p. 92-94 (1992).
3. V.K.Ignatovich, in *The physics of ultracold neutrons* (Clarendon press, Oxford, 1990).
4. R.Golub, D.Richardson and S.K.Lamoreaux, in *Ultracold neutrons* (Adam Hilger, Bristol, 1991).
5. V.V.Nesvizhevsky, A.V.Strelkov, P.Geltenbort and P.S.Yaidjiev, *ILL, Annual report* (1997), p.62-64; also *EPJ Applied Physics*, **6**(2), p.151-154 (1999).
6. V.V.Nesvizhevsky, A.V.Strelkov, P.Geltenbort and P.S.Yaidjiev, *JINR, Preprint P3-98-79* (1998); also accepted for publication in *Nuclear Physics*.
7. S.Arzumanov, L.Bondarenko, S.Chernyavsky, A.Fomin, V.Morozov, E.Korobkina, Yu.Panin and P.Geltenbort in *ISINN-6*, 1998, *JINR, Dubna, Russia*, p. 108-116
8. P.Geltenbort, S.S.Malik and A.Steyerl in *Proceedings ISINN-6*, 1998, *Dubna E3-98-202*, p. 74.
9. Th.Brenner, J.Butterworth, P.Geltenbort et al in *Proceedings of Particle physics with slow neutrons*, 22-24 October 1998, *ILL, Grenoble (NIM)*.
10. S.S.Malik, D.Sarkisov, A.Steyerl et al. (*Phys.Lett.B*).
11. A.V.Strelkov, V.V.Nesvizhevsky et al in *Proceedings of Particle physics with slow neutrons*, 22-24 October 1998, *ILL, Grenoble, (NIM)*.
12. P.Geltenbort, A.G.Kharitonov, V.V.Nesvizhevsky, J.M.Pendlebury, K.Schreckenbach, A.P.Serebrov, V.N.Shvetsov, A.V.Strelkov, R.R.Tal'daev, V.E.Varlamov, *ILL, Preprint ILL97GE5051* (1997).

Рукопись поступила в издательский отдел
9 сентября 1999 года.