

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

**Объединенная научная сессия
Отделения физических наук Российской академии наук
и Объединенного физического общества Российской Федерации**

(29 октября 2003 г.)

29 октября 2003 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Стрелков А.В.** (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл.). *Хранение нейтронов.*

2. **Несвижевский В.В.** (Институт Лауэ–Ланжевена, Гренобль, Франция). *Исследование квантовых состояний нейтронов в гравитационном поле Земли над зеркалом.*

Краткое содержание докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 03.75.Be, 14.20.Dh, 28.20.-v

Хранение нейтронов

А.В. Стрелков

Если хранение локализованных в некотором объеме заряженных частиц не вызывает особых затруднений, то для нейтронов, лишенных электрического заряда, сама возможность практической реализации такой ловушки была отвергнута Э. Резерфордом в 1920 г. — задолго до открытия нейтрона. Предсказывая существование нейтрона, он писал: "... электрон может быть связан с Н-ядром намного сильнее, образуя нечто вроде нейтрального дублета. Такой атом обладал бы весьма своеобразными свойствами. Его внешнее поле было бы практически равно нулю, ... и такие атомы невозможно было бы сохранять в герметически закрытом сосуде" [1]. Создание нейтронной ловушки привлекает исследователей возможностью (по сравнению с однократным пролетом нейтрона через экспериментальный объем) подольше наблюдать за нейтроном в ловушке, что дает существенное увеличение точности и чувствительности экспериментов по изучению взаимодействия нейтронов с полем и веществом.

Почти половина окружающего нас вещества состоит из нейтронов, содержащихся в ядрах атомов, однако в свободном виде нейтроны существуют только в промежутки времени между вылетом нейтрона из ядра (в результате той или иной ядерной реакции) и поглоще-

нием нейтрона в веществе. Вылетевшие из источника (реактора или ускорителя) 1 (рис. 1) быстрые нейтроны, сталкиваясь с ядрами замедлителя, понижают свою энергию до энергии тепловых колебаний ядер замедлителя. Таким образом, сам замедлитель 2 уже является в некотором роде нейтронной ловушкой для тепловых нейтронов, однако время удержания нейтрона даже в малозахватных замедлителях не превышает $\sim 0,1$ с. С распределением по скоростям, близким к максвелловскому, тепловые нейтроны покидают замедлитель, причем наиболее медленные нейтроны из этого распределения при попадании в сосуд 3, после срабатывания запирающей задвижки, могут удерживаться как разреженный газ в сосуде, испытывая многократные столкновения с его стенками.

О такой возможности удержания очень медленных нейтронов в 1950-е годы высказывались Я.Б. Зельдович, А.И. Алиханов, А.И. Ахиезер, И.Я. Померанчук, Э.Л. Андроникашвили, однако только в 1959 г. Зельдович, подытожив эти мнения, опубликовал об этом краткую статью [2]. Он обратил внимание на то, что медленные нейтроны испытывая полное внутреннее отражение при скользящем падении нейтрона на поверхность большинства веществ, при достаточно малой скорости вообще не могут проникнуть в такое вещество даже при нормальном падении. Таким образом, открывалась возможность практической реализации длительного хранения нейтронов, запертых в полостях из слабо поглощающих нейтроны веществ (бериллий, графит, и т.д.), откуда они могут исчезать только по мере их распада с периодом около 12 мин.

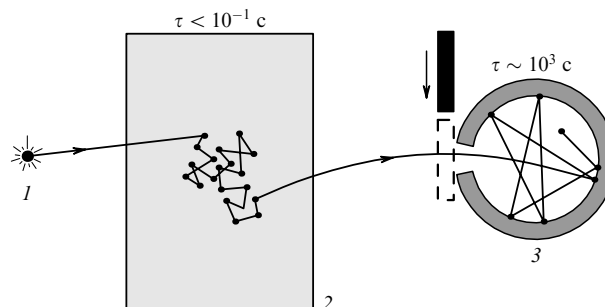


Рис. 1.

Оптический потенциал, который объясняет отражение нейтронов от поверхности, Ферми ввел еще в 1934 г. для описания смещения оптических спектральных линий атомов в зависимости от давления в газообразном источнике света [3]. Впоследствии он применил этот метод для объяснения полного отражения нейтронов от поверхности. С появлением в начале 1940-х годов атомных реакторов — мощных источников нейтронов — Ферми, направляя пучки тепловых нейтронов под малыми углами к поверхности и измеряя величину максимально возможной нормальной компоненты (зависящей только от оптического потенциала вещества), впервые определил значения амплитуд рассеяния нейтронов для целого ряда элементов. В принципе, тогда же Ферми мог бы и реализовать нейтронную ловушку из обычных веществ. Почему он этого не сделал, остается загадкой. По свидетельству Б.М. Понтекорво [4], Ферми в разговорах с ним часто мечтал о "нейтронной бутылке", но в противовес этому мнению Ферми даже в 1950 г. не допускал самой возможности создания таких "бутылок", говоря, что "...не существует, к сожалению, сосудов, способных удерживать нейтроны..." [5].

Через год после публикации Зельдовича В.В. Владимирский [6] предложил удерживать медленные нейтроны в магнитных бутылках, используя наличие у нейтрона магнитного момента. Помимо этого, в его обстоятельной статье в качестве развития идеи Зельдовича была предложена идея конвертора (внутреннего замедлителя) с оценкой эффективности его действия, предлагались вакуумные каналы для транспортировки нейтронов, были приведены оценки влияния гравитации и вибраций стенок на хранение нейтронов в ловушках. В этой же статье впервые появился термин "ультрахолодные нейтроны" (УХН), т.е. такие нейтроны, которые обладают способностью удерживаться в ловушках. Термин УХН объясняется тем, что примерно такой же энергией обладают молекулы газа при $T \sim 10^{-3}$ К.

Отражающий нейтроны потенциал стенки ловушки определяется средним значением (по объему вещества стенки сосуда) реального потенциала нейтрон-ядерного взаимодействия, вместо которого для медленных нейтронов можно использовать квазипотенциал Ферми:

$$U(\mathbf{r}) = \frac{h^2}{2\pi m} b\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0),$$

где h — постоянная Планка, m — масса нейтрона, $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$ — дельта-функция (\mathbf{r}_0 — радиус-вектор ядра), а b — когерентная длина рассеяния нейтрона на связанном ядре, определяемая из экспериментов по измерению сечения рассеяния нейтронов на данных ядрах: $\sigma_{\text{расс}} = 4\pi b^2$. УХН обладают сравнительно большой длиной волны де Бройля (~ 500 Å), намного превышающей межатомные расстояния (~ 2 Å), поэтому квазипотенциал Ферми, усредненный по объему, представляет собой эффективный потенциал стенки:

$$U_{\text{эфф}} = \frac{h^2}{2\pi m} bN.$$

Здесь N — число ядер с длиной рассеяния b в единице объема.

Такое же выражение для эффективного потенциала следует из точного решения уравнения Шрёдингера в

теории многократного рассеяния волн, где за основу берется только амплитуда рассеяния на отдельном ядре, независимо от того, каким потенциалом порождена эта амплитуда. Для большинства ядер $b > 0$, и $U_{\text{эфф}}$ тоже положителен для веществ из таких ядер. Чтобы проникнуть из вакуума в вещество, нейтроны должны преодолеть на границе отталкивающее действие вещества, а если кинетическая энергия нейтрона меньше $U_{\text{эфф}}$, то нейтроны вообще не могут войти в вещество при любых углах падения. Такое отталкивающее действие материальной стенки ловушки на нейтроны вызвано только сильным взаимодействием нейтрона с ядром, которое имеет масштаб ~ 10 МэВ. Однако из-за короткодействия ядерных сил и малого объема ядер, величина $U_{\text{эфф}}$ (играющая роль работы выхода при переходе нейтрона из вакуума в вещество) оказывается очень малой ($\sim 10^{-7}$ эВ). Эффективный потенциал имеет сравнительно небольшой разброс значений для разных веществ (в пределах одного порядка величины), поскольку сечение рассеяния нейтронов на ядрах и расстояние между атомами от вещества к веществу меняются не очень сильно ($\sigma_{\text{расс}} \sim 3-10$ б, $d \sim 2$ Å). Кинетическая энергия нейтрона, соответствующая $U_{\text{эфф}}$, называется граничной энергией УХН ($E_{\text{гр}}$) для данной стенки. УХН с $E \lesssim 10^{-7}$ эВ имеют скорость $v \lesssim 5$ м с $^{-1}$, длину волны $\lambda \gtrsim 500$ Å и эффективную температуру $T \lesssim 10^{-3}$ К. При отражении от стенки УХН проникает в нее на очень малую глубину:

$$X = \frac{h}{\sqrt{2mU_{\text{эфф}}}} \approx 150 \text{ Å}.$$

Находясь внутри материала стенки, УХН могут либо погибнуть за счет захвата УХН на ядрах, либо ускориться (и выйти из диапазона УХН), приобретя энергию от тепловых колебаний ядер (неупругое рассеяние). Возникающие при этих процессах потери УХН описываются добавлением к эффективному потенциалу достаточно малой мнимой части, которая выражается безразмерным параметром

$$\eta = -\frac{\text{Im } U_{\text{эфф}}}{\text{Re } U_{\text{эфф}}} = -\frac{\text{Im } b}{\text{Re } b}.$$

В силу оптической теоремы

$$\text{Im } b = -\frac{m}{2h} \sigma_{\text{полн}} v,$$

где $\sigma_{\text{полн}}$ — полное сечение взаимодействия нейтрона с веществом. При малых скоростях доминирующим процессом является захват и неупругое рассеяние, которые следуют закону $1/v$, поэтому параметр η не зависит от скорости УХН и для большинства веществ составляет $\sim 10^{-4} - 10^{-5}$. При однократном столкновении УХН со стенкой вероятность потери УХН составляет $\mu = \eta v/v_{\text{гр}}$. Таким образом, до своего исчезновения (из-за захвата или нагрева) УХН в сосуде может испытывать более 10^5 столкновений, что соответствует времени хранения $\sim 2 \times 10^3$ с в ловушке с размерами ~ 10 см.

Эффективный потенциал стенки сосуда "не ощущает" дискретности среды. Не влияет на него и постоянное тепловое движение ядер, поскольку эти хаотические движения атомов (ядер) усредняются по поверхности с размером λ^2 , определяемой длиной волны УХН. Такого

усреднения не происходит при регулярном поступательном движении атомов на поверхности стенки (длинно-волновые фононы, акустические колебания и движение стенки как целого), что может сильно изменить коэффициент отражения УХН от поверхности и тем самым уменьшить их время хранения. Поэтому УХН, хранящиеся в сосуде, могут последовательно испытывать множество упругих отражений от стенок сосуда и в случае, когда кинетическая энергия ядер стенок сосуда при нормальной температуре ($\sim 10^{-2}$ эВ) намного превышает кинетическую энергию хранящихся УХН ($\sim 10^{-7}$ эВ). Таким образом, хранящийся газ нейтронов с $T \sim 10^{-3}$ К достаточно хорошо "теплоизолирован" от стенок сосуда, которые имеют температуру ~ 300 К, а сам процесс хранения представляет собой глубоко неравновесный процесс. В конечном счете УХН должны принять температуру стенок сосуда, однако время такой релаксации в некоторых случаях намного превышает время до β -распада нейтрона, которым и будет определяться время хранения УХН в ловушке.

Следует отметить, что в 1966 г. Л. Фолди [7], независимо от Зельдовича, предложил бутылку для нейтронов со стенками из жидкого гелия, однако он допускал только равновесное хранение, при котором температура хранящихся нейтронов не превышала бы температуру стенок ($\sim 10^{-4}$ К). С момента публикации статьи Зельдовича шли годы, а никто так и не решился поставить эксперимент по хранению нейтронов. К феномену нейтронной бутылки физики сначала относились как к экзотической, забавной, трудновыполнимой и бесполезной игрушке. Пессимизма в этом деле добавили и авторы обстоятельного труда по медленным нейтронам И.И. Гуревич и Л.В. Тарасов [8], которые заявили, что УХН "вряд ли будут использованы в эксперименте" по причине их исключительно малой доли в максвелловском спектре тепловых нейтронов от реактора. В таком спектре плотность потока УХН с энергией от 0 до $E_{\text{гр}}$ составляет

$$\Phi_{\text{УХН}} = \frac{1}{8} \Phi_{\text{T}} \left(\frac{E_{\text{гр}}}{kT} \right)^2,$$

где Φ_{T} — плотность полного потока тепловых нейтронов из замедлителя, T — температура нейтронного газа в замедлителе. Можно существенно повысить долю УХН в спектре при использовании охлаждаемых замедлителей, но только до некоторого предела, после которого температура нейтронов (из-за захвата и конечных размеров замедлителя) перестает уменьшаться, несмотря на дальнейшее понижение температуры замедлителя. При $T = 300$ К, $E_{\text{гр}} = 1,7 \times 10^{-7}$ эВ (для меди), $\Phi_{\text{УХН}} \approx 6 \times 10^{-12} \Phi_{\text{T}}$. Для реактора с $\Phi_{\text{T}} \sim 10^{14}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ плотность потока УХН составит ~ 600 см $^{-2}$ с $^{-1}$, а их объемная плотность около замедлителя $\rho \approx 16 \Phi_{\text{УХН}}/3v \approx 0,5$ см $^{-3}$. Конечно, эта плотность в некоторой мере будет потеряна при транспортировке УХН по нейтроноводу от активной зоны реактора до ловушки нейтронов, но она вполне достаточна для постановки эксперимента. Справедливости ради здесь стоит отметить работу [9] мюнхенской школы Майера – Лейбница, в которой для вывода очень холодных нейтронов с E_{n} до $\sim 4 \times 10^{-4}$ эВ из активной зоны реактора был применен вертикальный, слегка изогнутый медный вакуумированный нейтроновод, по которому в принципе вполне можно было бы наполнить бутылку нейтронами, однако

у авторов этой работы были другие цели. Забегая вперед, скажем, что только 10 лет спустя на модернизированном варианте этого нейтроновода удалось реализовать бутылку нейтронов [10].

Первый эксперимент, в котором наблюдалось удержание УХН посредством многократного столкновения УХН со стенкой сосуда, был выполнен в Дубне в 1968 г. под руководством Ф.Л. Шапиро [11]. Этому предшествовало предложение Шапиро [12] использовать УХН для постановки фундаментального эксперимента по поиску постоянного электрического дипольного момента нейтрона (ЭДМ), что позволило бы проверить нарушение Т-инвариантности, которое незадолго до этого было обнаружено в некоторых распадах нейтральных К-мезонов. Несколько позже, независимо от Шапиро, такое же предложение высказал Д.А. Киржниц на семинаре в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Сначала Шапиро для поиска ЭДМ нейтрона предложил использовать ловушку для тепловых нейтронов в виде системы монокристаллов, в которой нейтроны, благодаря брэгговскому отражению, двигались бы по замкнутым траекториям. Такая ловушка для нейтронов была реализована только в 1990 г. в Лаборатории Резерфорда – Эплтона (Великобритания). Среднее количество отражений нейтрона от зеркал составило $\sim 10^3$, а время удержания нейтронов не превысило $\sim 0,17$ с [13].

Прошло более тридцати лет с первого эксперимента по хранению УХН, в котором плотность УХН в сосуде составляла всего $\sim 10^{-5}$ см $^{-3}$. За это время в исследованиях с УХН были вовлечены более десятка отечественных и зарубежных институтов с обширной географией: Дубна, Москва (4 института), Гатчина, Алма-Ата, Димитровград, Лыткарино, Саров, а также Германия, Канада, Великобритания, Франция и США. Для получения УХН были использованы самые различные исследовательские реакторы, от университетского реактора с $W = 0,5$ МВт до высокопоточного реактора СМ-2 с $W = 100$ МВт, а также сильноточные протонные ускорители. Усилиями ряда групп была исследована специфика генерации, транспортировки, спектроскопии, хранения и детектирования УХН. Максимально достигнутая плотность УХН в сосуде на сей день составляет $\sim 10^2$ см $^{-3}$, а время удержания УХН в сосудах доведено до $\sim 10^3$ с, что целиком лимитируется только β -распадом нейтрона [14]. В настоящее время все простые демонстрационные эксперименты на несложных мало-мощных источниках УХН уже выполнены, а для более серьезных исследований требуются очень интенсивные пучки УХН для получения моноэнергетических нейтронов и для получения достаточной статистической точности в измерениях тонких эффектов. Интенсивные источники УХН базируются на высокопоточных реакторах. Они имеют довольно сложное криогенное обеспечение для далеко не безопасных жидководородных замедлителей и снабжены высокотехнологичными зеркальными нейтроноводами для эффективного вывода УХН из реактора. На сей день лучшим является источник УХН на высокопоточном реакторе Института Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ) в Гренобле (Франция). Одновременно готовятся к пуску источники УХН на новом реакторе в Мюнхене (Германия) и на протонном ускорителе в Институте Пауля Шеррера (Швейцария), создатели которых предполагают получить потоки УХН, намного превосходящие потоки от гренобльского реактора.

Установки для хранения УХН обычно располагают вблизи реактора. Газ УХН от активной зоны реактора, расширяясь в свободное пространство, по трубам-нейтроноводам попадает в сосуд для хранения УХН. Основные потери УХН при их транспортировке происходят при ударах УХН о стенку нейтроновода, поэтому очень важно минимизировать количество столкновений УХН о стенки, используя нейтроноводы с высокой степенью зеркальности стенок. Для этого шероховатость стенок нейтроновода должна быть гораздо меньше длины волны УХН ($\sim 500 \text{ \AA}$). В отличие от классических зеркальных нейтроноводов для тепловых и холодных нейтронов, где любое незеркальное отражение приводит к потере нейтрона, УХН после незеркального отражения остается в объеме нейтроновода, форма которого может иметь резкие изгибы и сужения. Однако незеркальные отражения существенно затрудняют прохождение УХН по нейтроноводам. Даже в лучших нейтроноводах потери УХН при транспортировке от активной зоны реактора до нейтронной бутылки довольно значительны. Чтобы избежать потерь УХН в нейтроноводах, в работе [15] был применен метод транспортировки УХН в перемещаемых герметичных сосудах от активной зоны импульсного реактора на расстояния более 10 м. Импульсный поток тепловых нейтронов от импульсного реактора на несколько порядков превышает тепловые потоки от стационарных реакторов, а так как поток УХН пропорционален потоку тепловых нейтронов, то за время срабатывания реактора из его замедлителя должны отходить сгустки УХН с высокой плотностью, намного превышающей плотности УХН от стационарных реакторов [16]. Полученная таким образом плотность УХН оказалась $\sim 25 \text{ см}^{-3}$, что намного меньше расчетной, поэтому необходимы дополнительные исследования такого метода выведения УХН.

В большинстве экспериментов важно знать распределение УХН по скоростям и изменение спектра этих скоростей за время хранения. Наиболее удобным для этой цели является гравитационный спектрометр УХН. Нейтрон с кинетической энергией вертикальной компоненты скорости v , поднимаясь вверх и работая против силы тяжести, может подняться на высоту $h = v^2/2g$ (численно высота подъема в сантиметрах почти точно равна энергии нейтрона, выраженной в наноэлектронвольтах: $1h [\text{см}] = 0,98E [\text{нэВ}]$). Если на пути УХН перед ловушкой поставить непроницаемый для них барьер высотой h , то можно полностью исключить попадание в ловушку нейтронов с энергией меньше mgh , а если в спектрометре на высоте H предусмотреть и поглотитель УХН, то ловушка будет заполнена только нейтронами с энергиями, лежащими в диапазоне $\Delta E = mg(H - h)$. В работе [17] описан гравитационный спектрометр с достигнутым разрешением $\sim 0,5 \text{ нэВ}$.

Для регистрации УХН годится любой метод детектирования нейтронов. Однако наличие поверхностного потенциала $U_{\text{эфф}}$ у вещества детектора приводит к отражению УХН от поверхности детектора, внутрь которого нейтрон проникает только на глубину $\sim 150 \text{ \AA}$, что явно недостаточно для поглощения УХН при одном ударе. Если предварительно ускорить УХН до энергии, превышающей $U_{\text{эфф}}$ детектора, то можно добиться практически 100 %-ной вероятности детектирования УХН. Для этой цели чаще всего применяют гравитационное ускорение УХН, установив детектор на некото-

рой высоте ($\sim 0,5 \text{ м}$) ниже уровня выходного отверстия из ловушки УХН.

Если с момента первого опыта по наблюдению УХН до середины 1970-х годов изучалось поведение УХН и совершенствовались методы работы с ними, то в дальнейшем УХН превратились в инструмент для ряда фундаментальных исследований. Сначала в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ) в Гатчине, потом в ИЛЛ в Гренобле были начаты эксперименты по поиску ЭДМ нейтрона. Измерение ЭДМ сводится к определению очень малой энергии взаимодействия с известным электрическим полем, накладываемым на нейтрон. Так как погрешности измерения энергии обратно пропорциональны времени измерения, то переход от пучкового эксперимента (время измерения $\sim 10^{-2} \text{ с}$) к эксперименту с УХН с удержанием $\sim 10^2 \text{ с}$, приводит к увеличению чувствительности на четыре порядка, не говоря уже о подавлении некоторых систематических погрешностей, лимитирующих возможности пучкового эксперимента. На сегодня в экспериментах гатчинской и гренобльской групп ЭДМ нейтрона так и не обнаружен, а верхняя допустимая граница его существования понижена до $(1,0 \pm 3,6) \times 10^{-26} e \text{ см}$ [18]. Таким образом, несмотря на настойчивые поиски, до настоящего времени ни в каких элементарных процессах, кроме распадов K_0 -мезонов, нарушений временной обратимости пока не обнаружено. Это обстоятельство вызвало новые предложения постановки эксперимента с удержанием УХН по поиску ЭДМ [19].

Если в экспериментах по поиску ЭДМ время удержания нейтрона в ловушке не превышает $\tau \sim 200 \text{ с}$ и является вполне достаточным для таких экспериментов, то для измерения времени жизни свободного нейтрона требуются ловушки УХН с гораздо большими временами удержания. Методика хранения УХН позволила существенно улучшить точность определения времени жизни нейтрона до распада по сравнению с существовавшими ранее результатами измерения этой величины на пучках тепловых нейтронов. Казалось бы, такой опыт с УХН очень прост: наполнив бутылку УХН, надо только снять экспоненциальную зависимость плотности УХН в бутылке от времени. Однако падение плотности УХН в бутылке определяется не только радиоактивностью нейтрона, но и некоторыми потерями УХН в стенках бутылки. В бутылках, хорошо хранящих УХН, потери УХН в стенках не превышают $\sim 2-3 \%$ от потерь УХН из-за распада нейтрона. Несмотря на относительную малость потерь УХН в стенках ловушки, эти потери надо довольно точно учитывать в прецизионных измерениях времени жизни УХН до β -распада. На сей день существуют результаты трех экспериментальных групп (ИЛЛ, РНЦ "Курчатовский институт" и ПИЯФ, Гатчина, совместно с Объединенным институтом ядерных исследований, Дубна) по определению времени жизни нейтрона, которые в своих работах имеют различия в методике учета поглощения УХН в стенках. Во всех трех экспериментах достигнутая точность более или менее одинакова и составляет $\sim 0,4 \%$ от полученного в этих опытах среднего времени жизни нейтрона: $\tau_\beta = (885,9 \pm 1,7) \text{ с}$ [20]. Этот результат на две стандартные ошибки отличается от усредненного τ_β , полученного из пучковых экспериментов: $\tau_\beta = (894,2 \pm 4,2) \text{ с}$ [20].

К настоящему времени пока не предложена постановка эксперимента с УХН по поиску заряда у нейтрона,

которая выгодно отличалась бы от пучкового (нейтронно-оптического) варианта постановки такого эксперимента, поскольку измеряемые смещения траектории или набеги фаз в электрическом поле автоматически "замазываются" при хаотическом движении газа УХН в ловушках.

Первые эксперименты по хранению УХН показали сравнительно малое время удержания, что связано с большим поглощением УХН в стенках. Попытки принципиально избавиться от таких потерь были предприняты в магнитных ловушках, где УХН вообще "не видят" вещества стенок, а полное отражение от стенок происходит из-за отталкивания магнитного момента нейтрона μ от градиента магнитного поля B на стенке: $E_{\text{УХН}} = mv^2/2 = \pm\mu B$. В первой реализованной гравимагнитной бутылке УХН была продемонстрирована принципиальная возможность такого метода удержания, когда снизу нейтроны отражаются от магнитного поля, а сверху — от гравитационного поля Земли. Однако время хранения УХН в такой бутылке составило ~ 35 с и не превысило время хранения, достигнутое в то время в бутылках из какого-либо материала [21]. Ловушка несколько больших размеров, созданная по такой же схеме, тоже не оправдала ожиданий. Время хранения УХН в ней не превысило ~ 300 с и было еще очень далеко от времени распада нейтрона [22]. Сверхпроводящая тороидальная магнитная ловушка для хранения нейтронов (с несколькими большими скоростями, чем скорости УХН) показала время хранения ~ 900 с, но только на некоторых орбитах, доля которых была очень незначительна в общем потоке удерживаемых в ловушке нейтронов, для которого время хранения было намного меньше [23]. После неудачных опытов с громоздкими гравимагнитными ловушками приятной неожиданностью в последнее время стал результат гатчинской группы, которая получила время хранения ~ 900 с в простой маленькой ловушке, собранной из мощных постоянных магнитов.

Перспективными являются и прикладные исследования с хранением УХН, особенно в области физики поверхности. УХН хорошо "видят" только атомы на поверхности, так как они всю свою жизнь проводят в полете в вакууме между отражениями (где они не поглощаются) и в поверхностном слое вещества толщиной ~ 150 Å. В настоящее время проведены эксперименты по элементному анализу поверхности с использованием реакций (n, α) и (n, γ) , по изучению динамики тепловых колебаний поверхностных атомов с возможностью сканирования по глубине вещества в диапазоне от 0 до 300 Å. Интересна и уникальная возможность изучения возбуждений в сверхтекучих пленках ^4He по неупругому рассеянию (нагреву) УХН на этих пленках.

Начиная с первых экспериментов, все наблюдения показывают то, что время удержания УХН намного меньше теоретического значения. Максимально достижимое число последовательных ударов УХН о стенку ловушки из бериллия оказалось в 100 раз (а для стенки ловушки из твердого кислорода в 1000 раз) меньше расчетного. Природа этого расхождения до сих пор до конца не понята [24]. Вероятно, аномальные потери УХН связаны с недавно наблюдавшимся процессом квазиупругого рассеяния УХН на стенках ловушек из разных материалов с вероятностью $\sim 10^{-7}$ на один удар, при котором энергия УХН увеличивается почти вдвое [25, 26]. С вероятностью, на порядок меньшей, наблюдались

и процессы дальнейшего охлаждения УХН на стенке, температура которой (300 К) на шесть порядков больше температуры, соответствующей энергии УХН (10^{-3} К). Такие процессы в принципе не запрещены, но их интенсивность оказалась на 5–6 порядков больше. Опытным путем показано, что наблюдаемое явление вызвано неупругим рассеянием УХН на слабо связанных с поверхностью очень маленьких частицах с атомной массой $\sim 10^7$, находящихся в состоянии теплового движения, соответствующего температуре стенки. Такие наночастицы можно разглядеть способами современной микроскопии, однако пока не видно других методик, кроме УХН, способных исследовать динамику поверхностных наночастиц.

Список литературы

1. Rutherford E *Proc. R. Soc. London Ser. A* **97** 395 (1920); Резерфорд Э *Избранные научные труды. Строение атома и искусственное превращение элементов* (Под ред. Г И Флерова) (М.: Наука, 1972) с. 312
2. Зельдович Я Б *ЖЭТФ* **36** 1952 (1959)
3. Ферми Э *Научные труды* Т. 1 (М.: Наука, 1971) с. 611
4. Антонов А В и др. *Письма в ЖЭТФ* **24** 387 (1976)
5. Ферми Э *Лекции по атомной физике* (М.: ИЛ, 1952) с. 92
6. Владимирский В В *ЖЭТФ* **39** 1062 (1960)
7. Foldy L L, in *Preludes in Theoretical Physics, in Honor of V F Weisskopf* (Eds A de-Shalit, H Feshbach, L van Hove) (Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1966) p. 205
8. Гуревич И И, Тарасов Л В *Физика нейтронов низких энергий* (М.: Наука, 1965) с. 287
9. Christ J, Springer T *Nukleonik* **4** 23 (1962)
10. Steyerl A, Trüstedt W-D *Z. Phys.* **267** 379 (1974)
11. Лушиков В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **9** 40 (1969)
12. Шапиро Ф Л *УФН* **95** 145 (1968)
13. Schuster M, Carlile C J, Rauch H Z. *Phys. B* **85** 49 (1991)
14. Golub R, Lamoreaux S K *Ultra-Cold Neutrons* (Bristol: Adam Hilger, 1991) p. 55
15. Багрянов Б В и др. *ЯФ* **62** 844 (1999)
16. Шапиро Ф Л *ЭЧАЯ* **2** 975 (1972)
17. Malik S S et al. *Phys. Lett. A* **260** 328 (1999)
18. Harris P G et al. *Phys. Rev. Lett.* **82** 904 (1999)
19. Golub R, Lamoreaux S K *Phys. Rep.* **237** 1 (1994)
20. Мостовой Ю А, Мухин К Н, Патаракин О О *УФН* **166** 987 (1996)
21. Косвинцев Ю Ю, Кушнир Ю А, Морозов В И *Письма в ЖЭТФ* **23** 135 (1976)
22. Абов Ю Г и др. *ЯФ* **38** 122 (1983)
23. Kügler K-J et al. *Nucl. Instrum. Meth. A* **228** 240 (1985)
24. Алфименков В П и др. *Письма в ЖЭТФ* **55** 92 (1992)
25. Несвижевский В В *ЯФ* **65** 426 (2002); Лычагин Е В и др. *ЯФ* **65** 2052 (2002)
26. Бондаренко Л Н и др. *ЯФ* **65** 13 (2002)

PACS numbers: 03.65.Ta, 03.75.Be, **28.20.** – v

Исследование квантовых состояний нейтронов в гравитационном поле Земли над зеркалом

В.В. Несвижевский

1. Введение

Квантовая механика предполагает, что элементарная частица или любой другой материальный объект находится в связанных квантовых состояниях в достаточно глубокой потенциальной яме независимо от природы