

О НОВОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО НАКОПЛЕНИЯ УХН В ЛОВУШКЕ

*А. И. Франк*¹, *Г. В. Кулин*², *М. А. Захаров*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрена концепция источника ультрахолодных нейтронов (УХН), основанная на замедлении очень холодных нейтронов (ОХН) локальным замедляющим устройством. В качестве последнего предлагается использовать градиентный спин-флиппер. Показано, что в этом случае поток ОХН, которые после замедления конвертируются в УХН, имеет импульсную структуру. При этом длительность нейтронных сгустков (банчей) может быть существенно меньше периода их повторения. Соответственно, плотность нейтронного потока в сгустке будет существенно превосходить среднюю величину. Это открывает возможность импульсного наполнения ловушки УХН без предварительной временной фокусировки.

The paper considers the concept of an ultracold neutron (UCN) source based on the deceleration of very cold neutrons (VCNs) by a local decelerating device. As the latter, it is proposed to use a gradient spin flipper. It is shown that in this case, the flux of VCNs, which after deceleration are converted into the UCNs, has a pulse structure. In this case, the duration of neutron bunches can be significantly less than their repetition period. Accordingly, the density of the neutron flux in the bunch will significantly exceed the average value. This opens up the possibility of pulse filling of the UCN trap, without preliminary time focusing.

PACS: 29.25.Dz; 03.75.Be

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ультрахолодные нейтроны (УХН) впервые наблюдались группой Шапиро в эксперименте, поставленном на импульсном реакторе мощностью всего 6 кВт [1, 2]. Вероятно, именно тогда появилось понимание важности того обстоятельства, что импульсная плотность УХН, генерируемая источником периодического действия, может существенно превышать среднюю величину. Возник вопрос, как воспользоваться этим обстоятельством. Возможное решение этой проблемы вскоре было предложено в работе [3]. Оно заключается в том, чтобы наполнять ловушку с УХН только во время импульса и эффективно изолировать ее все остальное время. В идеальном случае, когда потери отсутствуют, плотность УХН в ловушке будет соответствовать импульсной плотности нейтронов, которая может на несколько порядков превосходить среднюю по времени.

К сожалению, эта идея до сих пор не осуществлена, хотя проблема использования именно импульсной, а не средней плотности УХН стала еще более актуальной

¹E-mail: frank@jinr.ru

²E-mail: kulin@jinr.ru

в связи с созданием новых импульсных источников нейтронов. В Дубне в течение многих десятков лет успешно работает импульсный реактор ИБР-2 — ИБР-2М [4, 5] со средней мощностью 1,5–2 МВт и импульсной плотностью потока нейтронов порядка 10^{16} см⁻² · с⁻¹. Ведется проектирование нового реактора «Нептун» [6, 7] с существенно большей плотностью импульсного потока. Близко к завершению и сооружение импульсного Европейского нейтронного источника (ESS) [8].

Практическому осуществлению идеи импульсного наполнения ловушки мешает то обстоятельство, что на практике она оказывается удаленной от замедлителя из-за наличия биологической защиты. При этом возникает необходимость в появлении транспортного нейтронновода длиной несколько метров, питающего ловушку. Размещение изолирующего клапана вблизи замедлителя — источника УХН — приводит к тому, что нейтронновод становится частью этой ловушки. Из-за малого поперечного размера нейтронновода частота соударений нейтронов о его стенки достаточно велика, что сильно снижает время хранения УХН в системе ловушка–нейтронновод и заметно уменьшает плотность нейтронов, накопленных в ловушке. Размещение же клапана у входа в ловушку, удаленную от источника на несколько метров, полезно только в случае источников с малой частотой повторения [9–11]. Для источников с частотой повторения несколько герц разброс времен пролета УХН от источника до ловушки будет превышать интервалы между импульсами, а наличие клапана у входа в ловушку не имеет смысла.

Для решения проблемы импульсного наполнения удаленной ловушки предлагалось использовать специальное устройство — временную линзу, которое дозированно меняет энергию нейтронов по мере их прихода в эту линзу [12, 13]. Такое устройство позволяет восстановить импульсную структуру нейтронного пучка непосредственно перед входом в ловушку. Важным является вопрос о способе изменения энергии нейтрона по заданному временному закону. В связи с этим в работах [12, 13] предлагалось обратиться к квантовым нестационарным явлениям. В числе последних рассматривались фазовая модуляция нейтронной волны, поперек направления распространения которой движется фазовая дифракционная решетка, и резонансный переворот спина нейтрона в магнитном поле.

Позже нестационарная дифракция УХН на движущейся решетке наблюдалась в эксперименте [14], а спустя некоторое время в исследовании с движущейся решеткой был продемонстрирован и эффект фокусировки во времени [15, 16]. Возможность временной фокусировки, основанной на резонансном перевороте спина нейтрона, также нашла свое экспериментальное подтверждение [17, 18].

Концепция источника УХН на импульсном реакторе периодического действия, основанная на применении временной линзы с импульсным накоплением ловушки УХН, рассматривалась в недавней работе [19]. Близкий подход предложен в работе [20], в которой предлагалось фокусировать очень холодные нейтроны (ОХН) со скоростями порядка 50 м/с и последующим их замедлением в убегающей ловушке. Такой метод замедления был предложен в работе [21], но на практике пока не применялся.

Извлечение нейтронов с большими, чем у УХН, скоростями из замедлителя-конвертера обеспечивает лучшие условия транспортировки нейтронов и позволяет применять более эффективный конвертер. В источнике УХН Института им. Лауэ–Ланжевена [22] нейтроны замедляются путем их подъема на высоту несколько метров с последующим доплеровским «охлаждением» при отражении от убегающего зер-

кала. Замедление нейтронов в поле силы тяжести Земли при транспортировке их в вертикальном нейтронноводе также успешно использовалось в источниках УХН на реакторе ВВР-М ПИЯФ [23]. Однако в случае импульсной генерации нейтронов замедление ОХН может приводить к некоторым новым и важным следствиям, которые будут обсуждаться в данной работе.

ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ИСТОЧНИКОМ, С ПОМОЩЬЮ ЛОКАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Будем рассматривать источник УХН, в котором в течение относительно короткого времени происходит импульсная генерация ОХН и последующая их транспортировка по зеркальному нейтронноводу.

Пусть для замедления нейтронов используется устройство, назначением которого является получение УХН, энергия которых после замедления достаточно мала для того, чтобы их можно было хранить в материальной ловушке. Назовем это устройство деселератором, чтобы избежать широко употребляемого в нейтронной физике термина «замедлитель». В отличие от случая, рассмотренного в работе [20], будем полагать, что замедление нейтронов деселератором происходит на относительно коротком участке их транспорта, в непосредственной близости к ловушке.

Для того чтобы полученные в результате замедления нейтроны могли храниться в ловушке, их полная скорость V не должна превышать граничной скорости вещества ловушки $V < V_b = \sqrt{2U/m}$, где U — эффективный потенциал стенок ловушки.

Поскольку, прежде чем попасть в ловушку, нейтроны должны пройти заметный путь в нейтронноводе, который мы полагаем зеркальным, поперечная скорость нейтронов v_{\perp} , нормальная к поверхности стенок последнего, ограничена величиной граничной энергии стенок нейтронновода E_{gd} так, что $v_{\perp} < \sqrt{2E_{gd}/m}$. Получив ограничение для полной и поперечной скорости нейтронов, способных храниться в ловушке, тем самым мы получили ограничение для продольной скорости таких нейтронов, направленной вдоль оси нейтронновода z :

$$v_{z \text{ fin}} < \sqrt{V_b^2 - v_{\perp}^2}. \quad (1)$$

Деселератор, формирующий поток нейтронов непосредственно перед их поступлением в ловушку, меняет энергию нейтронов на некоторую величину E_D . Если он сконструирован правильно, то это изменение кинетической энергии обусловлено преимущественно изменением продольной скорости нейтронов.

Интересуясь в дальнейшем только распределением продольной скорости нейтронов и связанной с ней кинетической энергией, ниже будем опускать индекс z у интересующих нас величин. Тогда энергия нейтронов, поступающих в ловушку и способных в ней храниться, находится в интервале от 0 до $E_{\text{fin}} = mv_{\text{fin}}^2/2$. До замедления энергия этих нейтронов должна была быть в интервале $E_D < E < E_D + E_{\text{fin}}$. При достаточно большом значении энергии E_D диапазон энергии нейтронов, которые после замедления могут быть удержаны ловушкой, может быть намного меньше, чем сама энергия: $\delta E \approx E_{\text{fin}} \ll E_D$. Но это означает, что разброс времен пролета δt от импульсного источника до деселератора и, соответственно, до ловушки у интересующих нас «полезных» нейтронов не только мал, но и может быть намного меньше самого времени

пролета $t = L/V$, где L — длина транспортного нейтронновода:

$$\frac{\delta t}{t} = \frac{\delta V}{V} \simeq \frac{\delta E}{2E} \simeq \frac{E_{\text{fin}}}{2E_D} \ll 1. \quad (2)$$

При благоприятных условиях δt может быть также значительно меньше периода повторения импульсов реактора T . В этом случае поток полезных нейтронов, которые после замедления будут конвертированы в УХН, будет иметь импульсную структуру, хотя во время транспорта в нейтронноводе длительность импульсов неизбежно увеличится из-за дисперсии скоростей δV .

Теперь рассмотрим вопрос о потоках УХН, поступающих от конвертера в ловушку. Очевидно, что процесс замедления деселератором никоим образом не воздействует на число нейтронов и, следовательно, сам деселератор не меняет поток нейтронов с соответствующей проекцией спина. Поэтому, забывая пока о поляризации и полагая, что пропускание нейтроннопроводов для нейтронов с указанным выше распределением скоростей идеально, сравним поток УХН Φ_{1z} , который поступил бы в ловушку непосредственно от источника, с потоком «полезных» нейтронов Φ_{2z} , поступающих от источника в деселератор и только потом в ловушку. Считая, что распределение по «нормальным» скоростям v_{\perp} в обоих случаях одинаково, будем по-прежнему опускать индекс z , интересуясь лишь компонентами скоростей, направленных вдоль пучка, и соответствующими потоками.

Поток Φ_1 несут нейтроны со скоростями, находящимися в диапазоне от 0 до v_{fin} , а поток Φ_2 — со скоростями от $V_1 = \sqrt{2E_D/m}$ до $V_2 = \sqrt{2(E_D + E_{\text{fin}})/m}$. Поскольку энергия УХН очень мала, то для распределения потока по скорости в максвелловском распределении в источнике справедливо линейное приближение $d\Phi(V) = nV dV$, где n — плотность нейтронов. Тогда для обоих потоков имеем

$$\Phi_1 = m \int_0^{\sqrt{2E_{\text{fin}}/m}} V dV, \quad \Phi_2 = n \int_{\sqrt{2E_D/m}}^{\sqrt{2(E_D + E_{\text{fin}})/m}} V dV. \quad (3)$$

Легко видеть, что $\Phi_1 = \Phi_2$.

Таким образом, нейтроны, поступающие в ловушку непосредственно от источника и полученные путем конвертации из ОХН в УХН, несут одинаковый поток, но имеют существенно различную временную и пространственную структуру. В первом случае дисперсия времен пролета δt намного больше периода повторения импульсов T . При этом импульсная структура практически исчезает и в ловушку поступает по сути равномерный поток, которому соответствует среднее значение плотности нейтронов. Во втором случае, когда длительность сгустка значительно меньше периода повторения импульсов ($\delta t/T \ll 1$), длина сгустков меньше расстояния между ними. Соответственно, плотность нейтронов в сгустке превышает среднюю величину $G = T/\delta t$.

АДИАБАТИЧЕСКИЙ СПИН-ФЛИППЕР ДЛЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Сделаем теперь некоторые оценки. Для определенности в качестве деселератора рассмотрим спин-флиппер, в котором переворот спина происходит под действием переменного высокочастотного поля, направленного перпендикулярно большому по-

стоянному полю. В качестве такового можно использовать так называемый адиабатический, или градиентный, спин-флиппер [24–26]. При прохождении спин-флиппера энергия нейтронов меняется на величину $E_D = 2\mu B$, где μ — магнитный момент нейтрона, а B — величина постоянного магнитного поля, и при благоприятных условиях это изменение энергии обусловлено преимущественно изменением продольной скорости нейтронов.

Изменение энергии при перевороте спина в таком спин-флиппере было продемонстрировано в работе [27], а возможность создания спин-флиппера с постоянным полем порядка 1 Тл была продемонстрирована в работах [17, 18]. Нет оснований сомневаться, что возможно создание спин-флиппера с магнитным полем порядка 15–20 Тл, достижимым в современных сверхпроводящих системах.

Для конечной скорости v_{fin} примем значение 3 м/с, чтобы полная скорость в круглом нейтроноводе с граничной энергией 5,7 м/с не превышала величины 6,5 м/с. Этой скорости соответствует энергия порядка 50 нэВ. Для магнитного поля B , в котором происходит переворот спина, примем значение 20 Тл.

При перевороте спина в таком поле энергия меняется на величину $E_D = 2,4 \times 10^3$ нэВ. Стало быть, разброс энергий нейтронов, продольная скорость которых после замедления не будет превышать 3 м/с, должен быть порядка 50 нэВ, в то время как сама энергия будет несколько большей, чем E_D . Этой энергии соответствует скорость 21 м/с.

Из формулы (2) следует оценка

$$\frac{\delta t}{t} \approx 0,01. \quad (4)$$

Приняв для грубой оценки длину нейтроновода $L \approx 10$ м, получим для времени пролета и его дисперсии значения $t = 0,48$ с и $\delta t \approx 5$ мс. Последнее значение определяет длительность банча «полезных» нейтронов на входе во флиппер-замедлитель. Эта длительность может быть значительно меньше периода повторения импульсов источника T . В частности, для реактора ИБР-2 $T = 200$ мс.

В то же время при непосредственном транспорте нейтронов от источника в ловушку разброс времен пролета равен порядка самого этого времени $\delta t \approx L/v_{\text{fin}} \approx 3$ с, что на порядок больше периода повторения T . И плотность нейтронов, достигающих ловушку, в этом случае соответствует средней величине. Напомним, что при равенстве потоков, следующем из (3), сжатие сгустка нейтронов путем локального их замедления означает увеличение плотности нейтронов, пропорциональное величине G .

Выше мы полагали, что время замедления в спин-флиппере одинаково для всех нейтронов. Очевидно, что это не так. Процесс замедления нейтронов в спин-флиппере обусловлен торможением нейтронов в нарастающем магнитном поле при входе в него, а затем, после переворота спина, — таким же замедлением в спадающем поле при выходе из спин-флиппера. Эти две стадии дополняются некоторым временем пролета в слабонеоднородном поле собственно спин-флиппера. Время замедления и его дисперсия определяются конструкцией спин-флиппера и диапазоном начальных и конечных скоростей нейтронов. Это должно быть принято во внимание при его конструировании. Грубые оценки, основанные на предположении о постоянстве ускорения нейтронов на участке неоднородного магнитного поля l , приводят к величине дисперсии времен замедления $\delta t_{\text{flip}} \approx 2lV_2/V_1^2 \approx 10$ –15 мс, где V_1 и V_2 — скорости

нейтронов до и после замедления. Эта величина может быть уменьшена, если исключить из рассмотрения нейтроны с самыми малыми скоростями, что приведет к весьма незначительной потере потока нейтронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что, замедляя нейтроны, генерируемые импульсным источником, с помощью локального устройства можно получить заметный выигрыш в импульсной плотности УХН и без временной фокусировки. Вопрос о сочетании этих двух подходов, частично затронутый в работе [20], требует, вероятно, дополнительного анализа.

Авторы приносят благодарность Е. В. Лычагину, О. В. Карамышеву, С. В. Мионову, А. Ю. Музычке и М. С. Новикову за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луциков В. И., Покотиловский Ю. Н., Стрелков А. В., Шапиро Ф. Л. Наблюдение ультрахолодных нейтронов // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9, вып. 1. С. 40.
2. Стрелков А. В. История открытия ультрахолодных нейтронов // Шапиро Ф. Л. Собр. тр. Нейтронные исследования. Изд. 2-е, доп. М.: Наука, 2015. С. 362.
3. Шапиро Ф. Л. О накоплении нейтронов // ЭЧАЯ. 1972. Т. 2, вып. 4. С. 975.
4. Ананьев В. Д., Блохинцев Д. И., Булкин Ю. М., Бунин Б. Н., Воробьев Е. Д., Доллежалъ Н. А., Луциков В. И., Останевич Ю. М., Смирнов В. С., Франк И. М., Хрястов Н. А., Шабалин Е. П., Шарапов Э. И., Язвицкий Ю. С. ИБР-2 — импульсный реактор периодического действия для нейтронных исследований // ПТЭ. 1977. № 5. С. 17;
Ананьев В. Д., Блохинцев Д. И., Булкин Ю. М., Бунин Б. Н., Воробьев Е. Д., Доллежалъ Н. А., Луциков В. И., Останевич Ю. М., Смирнов В. С., Франк И. М., Хрястов Н. А., Шабалин Е. П., Шарапов Э. И., Язвицкий Ю. С. ИБР-2 — импульсный реактор периодического действия для нейтронных исследований // Франк И. М. Науч. тр. М.: Наука, 2018. Т. 2. С. 387.
5. Аксенов В. Л. Пульсирующие ядерные реакторы в нейтронной физике // УФН. 2009. Т. 179. С. 434.
6. Лопаткин Д. В., Третьяков И. Т., Романова Н. В., Горячих Д. В., Кокорин Н. Д., Попов В. Е., Мороко В. И., Кравцова О. А., Аксенов В. Л., Куликов С. Д., Рязнин М. В., Швецов В. Н., Шабалин Е. П. Концепция нового высокопоточного импульсного источника нейтронов периодического действия на основе нептуния // АЭ. 2020. Т. 129. С. 226.
7. Аксенов В. Л., Рязнин М. В., Шабалин Е. П. Исследовательские реакторы ОИЯИ: взгляд в будущее // ЭЧАЯ. 2021. Т. 52. С. 1349.
8. Garoby R. et al. The European Spallation Source Design // Phys. Scripta. 2018. V. 93. P. 014001.
9. Anghel A., Atchison F., Blau B., van den Brandt B., Daum M., Doelling R., Dubs M., Duperrex P.-A., Fuchs A., George D., Gültl L., Hautle P., Heidenreich G., Heinrich F., Henneck R., Heule S., Hofmann Th., Joray St., Kasprzak M., Kirch K. The PSI Ultra-Cold Neutron Source // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 611. P. 272.
10. Saunders A., Makela M., Bagdasarova Yu., Back H. O., Boissevain J., Broussard L. J., Bowles T. J., Carr R., Currie S. A., Filippone B., Garcia A., Geltenbort P., Hickerson K. P., Hill R. E., Hoagland J., Hoedl S., Holley A. T., Hogan G., Ito T. M., Lamoreaux S., Chen-Yu Liu, Liu J., Mammei R. R., Martin J., Melconian D., Mendenhall M. P., Morris C. L., Mortensen R. N., Pattie R. W., Jr., Pitt M., Plaster B., Ramsey J., Rios R., Sallaska A., Seestrom S. J., Sharapov E. I., Sjue S., Sondheim W. E., Teasdale W., Young A. R.,

- Vorn Dick B., Vogelaar R. B., Wang Z., Yanping Xu. Performance of the Los Alamos National Laboratory Spallation-Driven Solid-Deuterium Ultra Cold Neutron Source // *Rev. Sci. Instrum.* 2013. V. 84. P.013304.
11. Karch J., Sobolev Yu., Beck M. et al. Performance of the Solid Deuterium Ultra-Cold Neutron Source at the Pulsed Reactor TRIGA Mainz // *Eur. Phys. J. A.* 2014. V. 50. P. 78.
 12. Frank A. I., Gähler R. Neutron Time Focusing // *Proc. of ISINN-4. Dubna, 1996.* P. 308.
 13. Frank A. I., Gähler R. Time Focusing of Neutrons // *Phys. At. Nucl.* 2000. V. 63. P. 545.
 14. Frank A. I., Balashov S. N., Bondarenko I. V., Geltenbort P., Hoghoj P., Masalovich S. V., Nosov V. G. Phase Modulation of a Neutron Wave and Diffraction of Ultracold Neutrons on a Moving Grating // *Phys. Lett. A.* 2003. V. 311. P. 6.
 15. Франк А.И., Гелтенборт П., Кулин Г.В., Стрепетов А.Н. Квантовая временная линза для ультрахолодных нейтронов // *Письма в ЖЭТФ.* 2003. Т. 78, вып. 4. С. 224;
Frank A. I., Geltenbort P., Kulin G. V., Strepetov A. N. A Quantum Time Lens for Ultracold Neutrons // *JETP Lett.* 2003. V. 78, Iss. 4. P. 224.
 16. Balashov S. N., Bondarenko I. V., Frank A. I., Geltenbort P., Hoghoj P., Kulin G. V., Masalovich S. V., Nosov V. G., Strepetov A. N. Diffraction of Ultracold Neutrons on a Moving Grating and Neutron Focusing in Time // *Physica B.* 2004. V. 350. P. 246.
 17. Arimoto Y., Gertenbort P., Imajo S., Iwashita Y., Kitaguchi M., Seki Y., Shimizu H. M., Yoshioka T. Demonstration of Focusing by a Neutron Accelerator // *Phys. Rev. A.* 2012. V. 86. P. 023843.
 18. Imajo S., Iwashita Y., Mishima K., Kitaguchi M., Shimizu H. M., Ino T., Yamashita S., Hirota K., Goto F., Fuwa Y., Katayama R. Ultracold Neutron Time Focusing Experiment and Performance Evaluation of an Improved UCN Rebuncher at J-PARC/MLF // *Proc. of JPS Conf., Tsukuba, Japan, 2021.* P. 011091.
 19. Франк А.И., Кулин Г.В., Реброва Н.В., Захаров М.А. О возможности создания источника УХН на импульсном реакторе периодического действия // *ЭЧАЯ.* 2022. Т. 53. С. 64.
 20. Несвижевский В.В., Сидорин А.О. Получение ультрахолодных нейтронов в убегающей замедляющейся ловушке // *Письма в ЭЧАЯ.* 2022. Т. 19, №2(241). С. 111.
 21. Summhammer J., Niel L., Rauch H. Focusing of Pulsed Neutrons by Traveling Magnetic Potentials // *Z. Phys. B: Condens. Matter.* 1986. V. 62. P. 269.
 22. Steyerl A., Nagel H., Schreiber F.-X. et al. A New Source of Cold and Ultracold Neutrons // *Phys. Lett. A.* 1986. V. 116. P. 347.
 23. Алтарев И.С. и др. Поиск электрического дипольного момента // *Письма в ЖЭТФ.* 1986. Т. 44. С. 269;
Altarev I. S. et al. Search for an Electric Dipole Moment of the Neutron // *JETP Lett.* 1986. V. 44. P. 344.
 24. Егоров А.И., Лобашев В.М., Назаренко В.А., Порсев Г.Д., Серебров А.П. Получение, хранение и поляризация ультрахолодных нейтронов // *ЯФ.* 1974. Т. 19, №2. С. 300;
Egorov A. I., Lobashov V. M., Nazarenko V. A., Porsev G. D., Serebrov A. P. Production, Storage, and Polarization of Ultracold Neutrons // *Sov. J. Nucl. Phys.* 1974. V. 19, No. 2. P. 147.
 25. Luschikov V. I., Taran Yu. V. On the Calculation of the Neutron Adiabatic Spin-Flipper // *Nucl. Instr. Meth.* 1984. V. 228. P. 159.
 26. Grigoriev S. V., Okorokov A. I., Runov V. V. Peculiarities of the Construction and Application of a Broadband Adiabatic Flipper of Cold Neutrons // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1997. V. 384. P. 451.
 27. Weinfurter H., Badurek G., Rauch H. et al. Inelastic Action of a Gradient Radio-Frequency Neutron Spin Flipper // *Z. Phys. B: Condens. Matter.* 1988. V. 72. P. 195.