

УДК 53.07

СУПЕРЗЕРКАЛО ДЛЯ АНТИНЕЙТРОНОВ

© 2022 г. Ю. В. Никитенко^{а, *}, А. Е. Суханов^б

^аЛаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ, Дубна, 141980 Россия

^бМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

*e-mail: nikiten@nfjinr.ru

Поступила в редакцию 11.10.2021 г.

После доработки 01.12.2021 г.

Принята к публикации 17.12.2021 г.

Определение вероятности трансформации нейтрона в антинейтрон является предметом исследований в течение пяти десятилетий. Для повышения светосилы в экспериментах по измерению вероятности данного процесса было предложено использовать нейтроновод, увеличивающий телесный угол видимости источника нейтронов. Для увеличения диапазона значений волнового вектора нейтронов и антинейтронов предлагается использовать нейтроновод с суперзеркальным покрытием. В настоящей работе выполнен расчет многослойной структуры, в которой расширен диапазон значений волнового вектора. Структура представляет собой суперзеркало, в котором слои состоят из изотопов вольфрама и бария.

Ключевые слова: антинейтрон, слоистая структура, отражение.

DOI: 10.31857/S1028096022070147

ВВЕДЕНИЕ

Нейтроны широко и эффективно используются в исследованиях в ядерной физике и физике конденсированных сред. Они находят применение и при решении фундаментальных проблем физики элементарных частиц и космологии [1–8]. Исследование, в частности, нейтрон-антинейтронных осцилляций [1–3] может пролить свет на такие вопросы, как механизм нарушения барионного числа, причины нарушения универсальности барион–антибарион, механизм генерации масс нейтрино и другие проблемы. Определение вероятности преобразования нейтрона в антинейтрон или установление ее границы является предметом исследований в течение нескольких десятилетий [1–3, 9, 10]. Недавно [10] было предложено для решения этой задачи использовать нейтроновод [11], в котором реализуется отражение антинейтронов от его стенок. Для вывода антинейтронов из накопителя можно использовать нейтроновод, отражающий антинейтроны в широком интервале значений волнового вектора. Известное решение для обеспечения большого диапазона угла скольжения (большого интервала длин волнового вектора) в случае нейтронов состоит в использовании суперзеркала [12, 13]. Суперзеркало является многослойной структурой, отражающей нейтроны в диапазоне выше критического значения волнового вектора, являющегося границей полного отражения. Суперзеркало

состоит из сплошного слоя и следующих за ним периодических структур с уменьшающимся по глубине периодом. В настоящей работе выполнен расчет параметров слоистой структуры, обеспечивающей увеличение отражения антинейтронов в заданном диапазоне модулей волнового вектора.

РАСЧЕТ СТРУКТУРЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В случае нейтронов условия определения оптимальных параметров структуры формулируются так: коэффициент отражения от структуры R_{str} превышает коэффициент отражения от сплошной среды R_{med} , а их разность максимальна во всем необходимом диапазоне значений волнового вектора $k = 0 - k_{max}$, ($k_{max} > k_v$), где $k_v = 2(\pi N b_v)^{1/2}$, N – плотность ядер, b_v – реальная часть длины упругого когерентного рассеяния нейтрона ядром. В случае антинейтронов первое условие выполнить невозможно. Это связано с тем, что мнимая часть потенциала взаимодействия антинейтрона со средой, определяемая вероятностью его аннигиляции с веществом, на три порядка превышает соответствующую часть потенциала для нейтрона. В этой связи для определения параметров структуры было использовано соотношение

$$\int (R_{str} - R_{med}) dk / k_{max} \rightarrow \max. \quad (1)$$

Далее при расчетах надо принять во внимание тот факт, что в случае распространения нейтрона–антинейтрона в течение некоторого времени и их многократного отражения от материальных стенок нейтроновода вероятность трансформации нейтрона в антинейтрон пропорциональна квадрату времени (квазисвободный режим распространения) до достижения ее критического значения, определяемого величиной магнитного поля и разностью $\Delta\varphi$ фаз φ_n и φ_a комплексных амплитуд отражения нейтрона и антинейтрона:

$$n(\varphi_n - \varphi_a) \leq \pi/2, \quad (2)$$

где n – число отражений.

Как следует из (2), для достижения наибольшего числа отражений необходимо стремиться к минимальной разности фаз $\Delta\varphi = \varphi_n - \varphi_a$ при одном отражении. Для фазы отражения в случае $k_w < (k_v^2 - k_0^2)^{1/2}$, где k_0 – перпендикулярная компонента волнового вектора в вакууме, $k_w = 2(\pi N b_w)^{1/2}$, b_w – мнимая часть длины упругого когерентного рассеяния нейтрона ядром, получаем:

$$\varphi \approx -\arctg \left\{ 2k_{z0}^{-1} (k_v^2 - k_0^2)^{1/2} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - k_w^4 / 4 (k_v^2 - k_0^2)^2 \right] \right\}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что для создания условия $\Delta\varphi \approx 0$ в первом приближении значения k_v для нейтрона и антинейтрона должны быть равны [8]. Это можно сделать путем приравнивания реальной части потенциала нейтрона для смеси из изотопов элемента к потенциалу антинейтрона для элемента. В целях обеспечения максимального отражения от структуры для пары элементов, составляющих число периодических структур, брали максимальную разность реальных частей длин рассеяния. Для минимального поглощения антинейтронов в структуре мнимые части длин рассеяния выбирали минимальными. В результате в качестве пары элементов, удовлетворяющей всем выше обозначенным требованиям, были определены вольфрам и барий.

Реальная часть длины рассеяния антинейтрона обусловлена атомным номером A ; она одинаковая для изотопов элемента и равна $b_R = 1.54A^{1/3}$ [10]. Мнимая же часть длины рассеяния антинейтрона одинакова для всех элементов и составляет $b_{A1} = 1$ фм [10]. Для вольфрама реальная длина рассеяния антинейтрона $b_{AR}(W) = 6.47$ фм, для бария $b_{ARd}(Ba) = 5.9$ фм. В случае нейтрона такую же реальную амплитуду $b_{NR}(W) = b_{AR}(W)$ имеет вольфрамовая смесь $^{nat}W(38.5\%) + ^{184}W(61.5\%)$, реальную амплитуду $b_{NR}(Ba) = b_{AR}(Ba)$ – бариевая смесь $^{nat}Ba(52.8\%) + ^{137}Ba(47.2\%)$. В случае нейтрона мнимая длина рассеяния для вольфрамо-

вой смеси $b_{NI}(W) = 3.48 \times 10^{-4} b_{NR}(W)$, для бариевой смеси – $b_{NI}(Ba) = 1.07 \times 10^{-4} b_{NR}(Ba)$. Потенциал взаимодействия $U = V - iW$ рассчитывают по известным соотношениям: $V = \hbar^2(4\pi Nb)/(2m)$, $W = \hbar^2 4\pi N(k\sigma/4\pi)/(2m)$, где N – плотность атомов, m – масса нейтрона, σ – сечение взаимодействия нейтрона с ядром, \hbar – постоянная Планка.

В результате расчетов определена структура, состоящая из поверхностного слоя вольфрама толщиной $d1(W) = 42$ нм и следующих за ним четырех периодических структур с числом бислоев и периодом соответственно: 4 и 28, 8 и 20, 33 и 16, 48 и 12 нм. Формула структуры (далее структура W/Ba): $W(42 \text{ нм})/4 \times (Ba(16 \text{ нм})W(12 \text{ нм}))/8 \times (Ba(11.5 \text{ нм})W(8.5 \text{ нм}))/33 \times (Ba(8.5 \text{ нм})W(7.5 \text{ нм}))/48 \times (Ba(6 \text{ нм})W(6 \text{ нм}))/Ba$.

Общая толщина периодических структур следующая: 112, 160, 528 и 576 нм. Уменьшение периода и увеличение толщины периодических структур по глубине структуры являются признаками ее суперзеркальности. Эти признаки отражают следующую закономерность: нейтроны с большим значением волнового вектора слабее поглощаются, проходят большее расстояние от поверхности вглубь структуры и отражаются от периодической структуры с меньшим периодом.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости коэффициента отражения антинейтрона и нейтрона соответственно от среды из вольфрама (кривая 1) и от оптимальной для антинейтрона структуры W/Ba (кривая 2). Из сравнения данных рис. 1 и 2 видно, что во всем диапазоне значений волнового вектора зависимости коэффициента отражения для антинейтрона проходят ниже зависимостей для нейтрона. В случае антинейтрона (рис. 1) коэффициент отражения от структуры меньше коэффициента отражения от среды вольфрама в диапазоне $0 - k_v$ ($k_v = 0.0714 \text{ нм}^{-1}$) и больше в диапазоне $k_v - 3k_v = 0.0714 - 0.25 \text{ нм}^{-1}$.

В табл. 1 приведены средний коэффициент отражения антинейтрона от структуры $R_a = \int R_{st} dk / \int dk$ и отношение средних коэффициентов отражения антинейтрона от структуры и среды $R_{rel} = R_a / R_m$, где $R_m = \int R_{med} dk / \int dk$ в интервалах значений волнового вектора $k_{min} - k_{max} \equiv 0 - k_v, k_v - 2k_v, 2k_v - 3k_v, 0 - 2k_v$ и $0 - 3k_v$. Как следует из таблицы, в удвоенном интервале $0 - 2k_v$, по сравнению с интервалом $0 - k_v$ (при нулевой мнимой длине рассеяния это интервал полного отражения), коэффициент отражения возрастает на 60%, в утроенном интервале $0 - 3k_v$ – на 9%.

На рис. 3 представлена фаза отражения антинейтрона от среды вольфрама (кривая 1) и от структуры (кривая 2). Видно, что в диапазоне $0 - k_v$ зависимости практически совпадают. В диапазоне $k_v - 3k_v$ фаза амплитуды отражения анти-

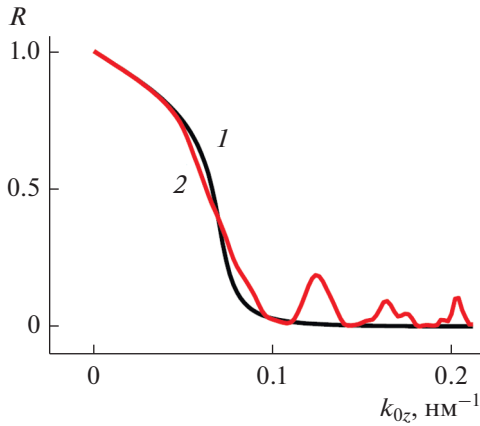


Рис. 1. Коэффициент отражения антинейтрона от среды из вольфрама $^{nat}\text{W}_{0.385} + ^{184}\text{W}_{0.615}$ (1) и от структуры W/Ba (2).

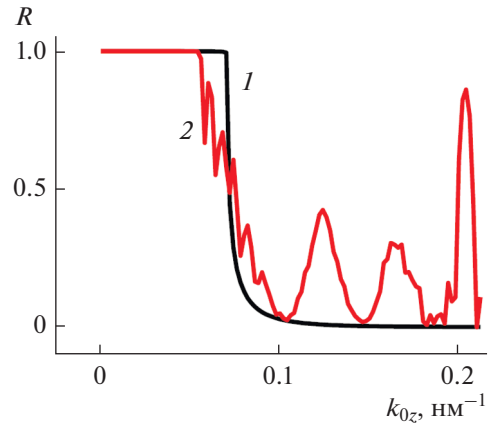


Рис. 2. Коэффициент отражения нейтрона от среды из вольфрама $^{nat}\text{W}_{0.385} + ^{184}\text{W}_{0.615}$ (1) и от структуры W/Ba (2).

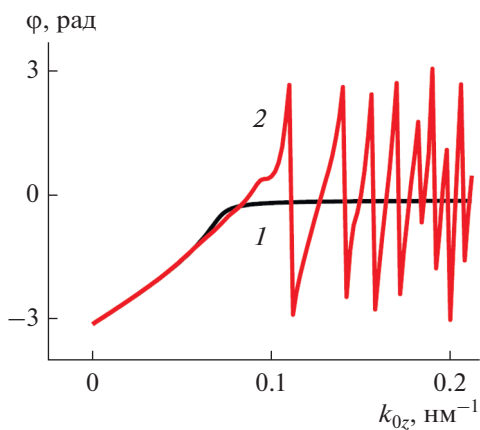


Рис. 3. Фаза амплитуды отражения антинейтрона от среды из вольфрама W (1) и от слоистой структуры W/Ba (2).

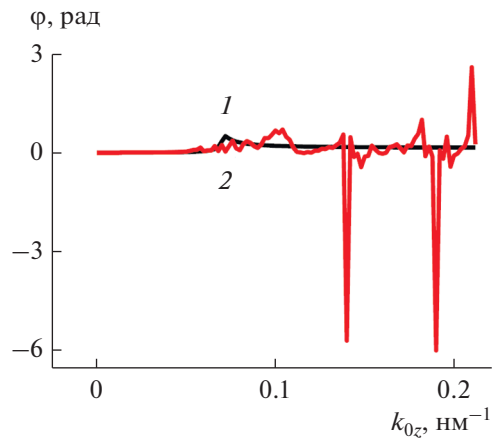


Рис. 4. Разность фаз амплитуд отражения антинейтрона и нейтрона в случае среды из вольфрама (1) и слоистой структуры W/Ba (2).

нейтрона от среды равна нулю, а фаза амплитуды отражения от структуры осциллирует в диапазоне $[-\pi, +\pi]$. На рис. 4 приведена разность фаз амплитуд отражения антинейтрона и нейтрона в случае среды вольфрама (кривая 1) и структуры W/Ba (кривая 2). Видно, что в среде разность достигает 0.5 рад при значениях k в окрестности k_v , а далее с увеличением k стремится к нулю. В случае структуры разность фаз осциллирует с амплитудой 1 рад. В результате, когда коэффициент поглощения порядка 0.1 ($k = k_v - 3k_v$), реализуется когерентность между нейтроном и антинейтроном.

Зависимость 2 на рис. 4 носит осциллирующий характер со среднеквадратичным значением разности фаз $\delta_{\Delta\phi} = 0.87$, что для обеспечения квазисвободного режима распространения нейтрона–антинейтрона допускает три–четыре отражения. Чтобы уменьшить значение $\delta_{\Delta\phi}$, следует пригото-

вить волнистую поверхность. Нейтрон–антинейтрон в этом случае будет отражаться при различных углах скольжения, усредняя таким образом разность фаз и уменьшая ее среднеквадратичное значение.

Таблица 1. Коэффициенты отражения антинейтрона R_a и R_{rel} в интервале значений волнового вектора $k_{min} - k_{max}$

$k_{min} - k_{max}$	R_a	R_{rel}
$0 - k_v$	0.79	0.98
$k_v - 2k_v$	0.12	2.2
$2k_v - 3k_v$	0.032	15
$0 - 2k_v$	0.45	1.6
$0 - 3k_v$	0.31	1.09

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для отражения антинейтронов предложена многослойная структура из вольфрама и бария, для которой, по сравнению со сплошной средой, расширен диапазон значений волнового вектора. В этом диапазоне отражение антинейтрона возрастает. Коэффициент отражения антинейтронов от структуры увеличен на 60% в удвоенном интервале и на 9% в утроенном интервале по сравнению с интервалом от нуля до критического значения волнового вектора. Структура может быть использована в качестве покрытия стенок нейтронвода в эксперименте по определению времени осцилляций “нейтрон–антинейтрон”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kazarnovskii M.V., Kuz'min V.A., Chetyrkin K.G., Shaposhnikov M.E. // ZETP Lett. 1980. V. 32. № 1. P. 88.
2. Chetyrkin K.G., Kazarnovskii M.V., Kuz'min V.A., Shaposhnikov M.E. // Phys. Lett. B. 1981. V. 99. № 4. P. 358.
3. Baldo-Ceolin M., Benetti P., Bitter T. et al. // Phys. Lett. B. 1990. V. 236. № 1. P. 95.
4. Окунь Л.Б. // УФН. 2007. Т. 177. № 4. 397.
5. Serebrov A.P., Aleksandrov E.B., Dovator N.A., Dmitriev S.P., Fomin A.K., Geltenbort P., Kharitonov A.G., Krasnoschekova I.A., Lasakov M.S., Murashkon A.N., Shmelev G.E., Varlamov V.E., Vassiljev A.V., Zherebtsov O.M., Zimmer O. // Phys. Lett. B. 2008. V. 663. P. 181.
6. Bereziani Z., Matthew F., Kamyshkov Yu., Rybolt B., Varriano L. // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. P. 035039.
7. Себров А.П. // УФН. 2019. Т. 189. № 6. С. 635.
8. Ezhov V.F., Andreev A.Z., Ban G., Bazarov B.A., Geltenbort P., Glushkov A.G., Knyazkov V.A., Kovrizhnykh N.A., Krygin G.B., Naviliat-Cuncic O., Ryabov V.L. // ZETP Lett. 2018. V. 107. № 11. P. 707.
9. Theoraine C. // Nucl. Phys. News. 2015. V. 25. P. 13.
10. Nesvizhevsky V.V., Gudkov V., Protasov K.V., Snow W.M., Voronin A.Yu. // EPJ Web Conf. 2018. V. 191. P. 01005.
11. Maier-Leibnitz H. // J. Nucl. En. 1963. V. 17. P. 217.
12. Hayter J.B., Mook H.A. // J. Appl. Crystallogr. 1989. V. 22. P. 35.
13. Scharpf O. // Physica B. 1991. V. 174. P. 514.

Supermirror for Antineutrons

Yu. V. Nikitenko^{1, *}, A. E. Sukhanov²

¹Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: nikiten@nf.jinr.ru

Determining the probability of the neutron–antineutron transformation has been the subject of research for five decades. To increase the luminosity in experiments to measure the probability of this process, it has been proposed to use a neutron guide that increases the solid angle of the neutron source visibility. To increase the range of values of the wave vector of neutrons and antineutrons, it is proposed to use a neutron guide with a supermirror coating. In this work, we have simulated a multilayer structure in which the range of wave vector values is extended. The structure is a supermirror in which the layers consist of tungsten and barium isotopes.

Keywords: antineutron, layered structure, reflection.