

ПРОХОЖДЕНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ
ДВИЖУЩИЙСЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ БАРЬЕР

А. В. Антонов, А. И. Исаков,
В. И. Микеров, А. А. Тихомиров

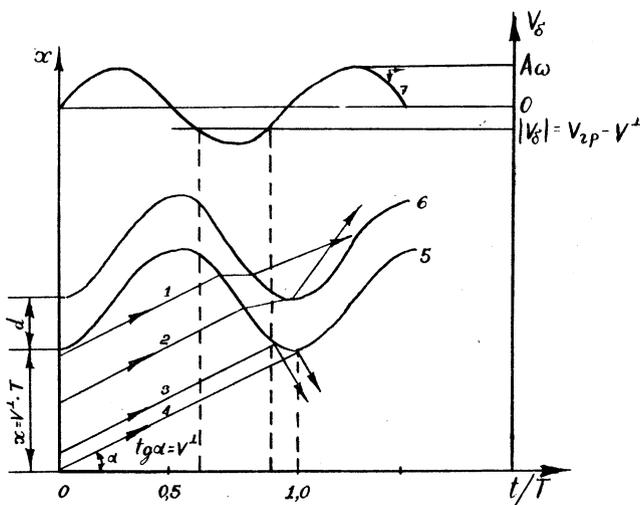
УДК 539.074

Рассматривается задача о прохождении ультра-холодных нейтронов через движущийся потенциальный барьер конечной ширины. Показано, что взаимодействие нейтронов с движущимся барьером может приводить к существенным изменениям характеристик нейтронного потока.

В работе /1/ были рассмотрены основные закономерности отражения холодных нейтронов от движущегося ядерного потенциального барьера. Вопросы, связанные с прохождением нейтронов через движущийся барьер (ядерный или магнитный), также представляют интерес, например, в связи с постановкой таких задач физики ультрахолодных нейтронов, как ввод УХН в полностью герметизированную ловушку, повышение эффективности детекторов УХН. Самостоятельный интерес представляет исследование изменений характеристик нейтронного потока, возникающих при прохождении УХН через движущийся потенциальный барьер конечной ширины. Исследованию некоторых аспектов данной проблемы и посвящена настоящая работа.

Как известно, неподвижный барьер, характеризующийся некоторой граничной скоростью $v_{гр}$, отражает все нейтроны с нормальной составляющей скорости $v^{\perp} < v_{гр}$, вследствие этого спектр прошедших через барьер УХН искажен и обрезан снизу при значении скорости равной $v_{гр}$. Ранее /2/ авторами был предложен метод, позволяющий пропускать через барьер также и нейтроны, обладающие $v^{\perp} < v_{гр}$. Метод заключается в том, что барьер приводят в движение таким образом, чтобы нормальная составляющая скорости относительного движения нейтрона в момент столкновения была выше $v_{гр}$. Очевидно, что такое движение можно создать различными способами. Барьер может, например, двигаться возвратно-поступатель-

но в направлении нейтронного потока. Если барьер создается пластиной, имеющей "волнообразную" форму, движение может осуществляться в плоскости, перпендикулярной направлению потока.



Р и с.1. Графическая иллюстрация решения задачи о прохождении нейтронов через колеблющийся барьер. По оси абсцисс отложено время в единицах периода колебаний барьера (t/T), по оси ординат (слева) - координаты X границ барьера (кривые 5,6) и нейтрона (ломаные 1-4). Ломаные 1-4 показывают соответственно уменьшение скорости нейтронов при прохождении через барьер, увеличение скорости и отражение нейтронов от барьера. Ось ординат, нанесенная справа, относится к кривой 7 и дает зависимость скорости барьера от времени

Рассмотрим особенности взаимодействия УХН с движущимся барьером в случае, когда он движется в направлении нейтронного потока по гармоническому закону. Уравнения движения границ барьера имеют вид (рис.1): $x_1(t) = A(1 - \cos \omega t)$ и $x_2(t) = A(1 - \cos \omega t) + d$ (здесь A - амплитуда колебаний, ω - круговая частота колебаний, d - толщина барьера).

Пусть на барьер падает пучок нейтронов с $v_{\text{вх}}^1 \sim \omega$. За период колебания с барьером провзаимодействуют все нейтроны, заключенные в слое толщиной $v_{\text{вх}}^1 T$ ($T = 2\pi/\omega$). Нейтроны, столкнувшиеся с барьером в те моменты времени, когда $v_{\text{вх}}^1 - \dot{x}(t) < v_{\text{гр}}^1$, отражаются от барьера, остальные — проходят над ним. *) Нормальная составляющая скорости нейтрона, движущегося над барьером v_0^1 , определяется фазой $\omega t'$ колебательного движения в момент столкновения t' . В соответствии с законом преломления [3] можно записать: $v_0^1 = (v_{\text{вх}}^1 - A\omega \sin \omega t') \left[1 - v_{\text{гр}}^2 / (v_{\text{вх}}^1 - A\omega \sin \omega t')^2 \right]^{1/2} + A\omega \sin \omega t'$. При надбарьерном прохождении нейтрон движется в однородном поле (ядерном или магнитном), поэтому ускоренное движение барьера не влияет на величину v_0^1 . Абсолютное значение нормальной составляющей скорости нейтрона, прошедшего барьер, зависит от фазы колебательного движения барьера в момент выхода нейтрона $\omega t''$

$$v_{\text{вх}}^1 = \pm \left[(v_0^1 - A\omega \sin \omega t'')^2 + v_{\text{гр}}^2 \right]^{1/2} + A\omega \sin \omega t''.$$

В общем случае $v_{\text{вх}}^1 \neq v_{\text{вх}}^1$.

Рис. I иллюстрирует взаимодействие нейтронов с движущимся барьером. Ломаные кривые 1-4 есть траектории нейтронов, которые показывают соответственно прохождение нейтронов через барьер с уменьшением скорости, прохождение с увеличением скорости, отражение нейтронов. Волнообразные кривые 5, 6 есть уравнения движения границ барьера, кривая 7 — график изменений скорости границ барьера.

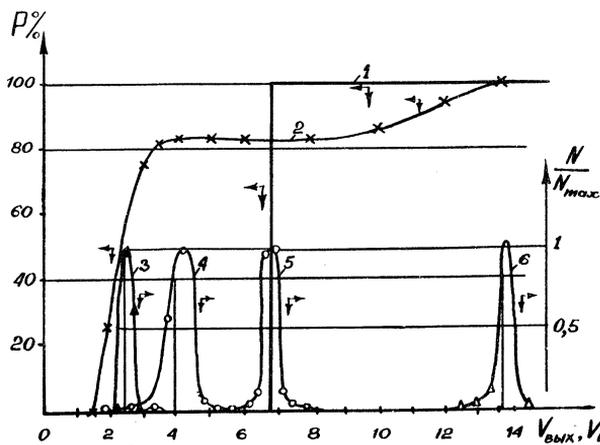
Расчеты для различных значений параметров A , ω , $v_{\text{вх}}^1$, $v_{\text{гр}}^1$, d были выполнены с помощью ЭВМ. Исследовались следующие характеристики:

изменение потока прошедших через барьер нейтронов во времени; зависимость коэффициента пропускания барьером нейтронного потока от $v_{\text{вх}}^1$; уширение моноэнергетической линии нейтронного спектра вследствие прохождения нейтронов через колеблющийся барьер.

*)

Квантовомеханический эффект отражения нейтронов с $v^1 \geq v_{\text{гр}}^1$ не учитывался в виду его несущественности для рассматриваемой задачи.

На рис.2,3 представлены результаты расчета для одного частного случая $\lambda = 10^{-1}$ см, $T = 9,25 \cdot 10^{-4}$ сек, $v_{гр} = 6,8$ м/сек, $d = 10^{-2}$ см. Из рис.2 видно, что движущийся по гармоническому закону барьер



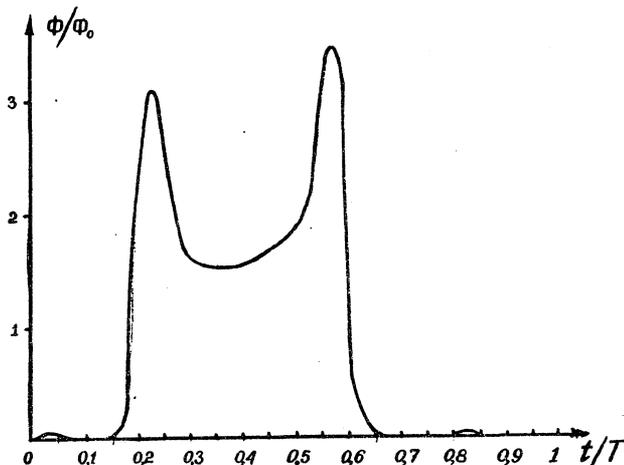
Р и с.2. Зависимость коэффициента пропускания барьера P от нормальной компоненты скорости нейтрона $V_{вх}^{\perp}$: 1 - неподвижный барьер; 2 - движущийся барьер. Зависимость числа N прошедших через барьер нейтронов от нормальной компоненты их скорости за барьером $V_{вх}^{\perp}$ для нейтронов, обладавших перед барьером нормальной компонентой скорости $V_{вх}^{\perp}$: 3- 2,5 м/сек; 4- 4 м/сек; 5- 6,8 м/сек; 6- 13,6 м/сек

ер с высокой эффективностью пропускает не только нейтроны с $V_{вх}^{\perp} > v_{гр}$, но также и нейтроны с $V_{вх}^{\perp}$, значительно меньшей $v_{гр}$. При этом естественно наблюдается некоторое уменьшение коэффициента пропускания нейтронов с $V_{вх}^{\perp} > v_{гр}$. Кривые 3-6 рис.2 показывают, как при прохождении через барьер размывается нормальная компонента скорости нейтрона. Интересной особенностью взаимодействия УН с движущимся барьером является временная модуляция нейтронного

ж)

Кривые 3-6 рисунка 2, а также кривые рисунка 3 представляют собой огибающие полученных при расчете гистограмм.

потока (рис.3); максимальная величина нейтронного потока, прошедшего через барьер, может в несколько раз превышать величину потока падающих нейтронов. Как показали расчеты, это может быть обус-



Р и с.3. Зависимость от времени отношения потока прошедших через барьер нейтронов Φ к потоку падающих на барьер нейтронов Φ_0 (с $v_{вх}^{\perp} = 4$ м/сек) на расстоянии 1 см от барьера

ловлено как нагревом УХН, так и явлением пространственно-временной "фокусировки", когда в некоторую область пространства практически одновременно приходят нейтроны, взаимодействующие с барьером в различные моменты времени (см.рис.1).

Таким образом, взаимодействие нейтронов с движущимся потенциальным барьером конечной ширины может приводить к существенным изменениям характеристик нейтронного потока: ускоряет и замедляет нейтроны, модулирует плотность потока во времени и пространстве. При соответствующих условиях для ввода и вывода УХН из замкнутой ловушки, а также увеличения коэффициента пропускания окошек детекторов УХН для нейтронов с $v^{\perp} < v_{гр}$ может быть использована колеблющаяся пластина. Очевидно, что в этом случае необходимым учет поглощения и неупругого рассеяния УХН в пластине.

В заключение авторы выражают благодарность за полезные обсуждения Н. М. Соболевскому и С. А. Старцеву, а также А. Т. Матачун и Т. Т. Ивановой за расчеты на ЭВМ.

Поступила в редакцию
21 апреля 1976 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. В. Антонов, Д. Е. Вуль, М. В. Казарновский. Письма в ЖЭТФ, 9, № 5, 307 (1969).
2. А. В. Антонов и др. Препринт ФИАН, № 86, 1973 г.
3. И. И. Гуревич, Л. В. Тарасов. Физика нейтронов низких энергий. М., Наука, 1965 г.