

# Групповое время задержки и время отражения нейтронной волны

А. И. Франк<sup>1,\*</sup>, В. А. Бушуев<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская обл., 141980

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119991

\*frank@jinr.ru, \*\*vabushuev@yandex.ru

Понятие «групповое время отражения» (ГВЗ) успешно используется для описания многих нейтронно-оптических проблем, что способствовало представлению о том, что ГВЗ является также и универсальной мерой времени отражения. Однако недавно было показано, что в некоторых случаях это представление ведет к серьезным противоречиям, и в частности приводит к нефизически малому времени отражения вне области ПВО. В докладе предлагается вероятное объяснение этого парадокса и обсуждаются возможные подходы к определению времени формирования отраженной волны вне области ПВО.

## Введение

В настоящем докладе мы продолжаем начатое в [1] обсуждение проблемы связи физического времени отражения волны с так называемым групповым временем задержки (ГВЗ). Последнее является приближенной мерой задержки волнового пакета при его взаимодействии с потенциальной структурой [2, 3]. Использование понятия ГВЗ в нейтронной оптике весьма продуктивно. Вместе с тем представление об однозначной связи между ГВЗ и между глубиной формирования отраженной волны приводит к существенным противоречиям, что особенно наглядно проявляется при рассмотрении отражения в области выше порога полного внешнего отражения (ПВО). Ниже мы предлагаем вероятное объяснение этого противоречия. В заключение приводится кажущаяся нам реалистической оценка времени отражения нейтронов выше порога ПВО и предлагается подход к ее экспериментальной проверке.

## ГВЗ при отражении нейтронной волны

Не ставя здесь целью перечисление многочисленных примеров использования понятия ГВЗ в нейтронной оптике, ограничимся здесь только вопросом об отражении. В этом случае понятие ГВЗ естественным образом возникает из анализа временных соотношений между падающим на поверхность  $A_m(t)$  и отраженным  $A_R(t)$  импульсами (волновыми пакетами). Легко показать (см., например, [4]), что амплитуда  $A_R(t)$  описывается соотношением

$$A_R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\omega) A_m(\Omega) e^{-i\Omega t} d\Omega \approx |R(\omega_0)| A_m(t - \tau), \quad (1)$$

где  $\tau = d\varphi/d\omega$  – ГВЗ;  $\varphi$  – фаза амплитудного коэффициента отражения  $R$ ;  $\Omega = \omega - \omega_0$ ,  $\omega_0$  – центральная частота падающего излучения со спектром  $A_m(\Omega)$ . Предполагается, что функция  $R(\omega)$  слабо меняется в пределах спектра  $A_m(\Omega)$ .

## Случай полного отражения

В случае отражения от полубесконечной среды для амплитуды отраженной волны имеем

$$R(\omega) = (k_z - q_z) / (k_z + q_z), \quad (2)$$

где  $k_z$  и  $q_z$  – нормальные к поверхности компоненты волновых векторов соответственно в вакууме и в сре-

де. Здесь предполагается, что справедлив потенциальный закон дисперсии  $q^2 = k^2 - 4\pi Nb$ , где  $N$  – плотность ядер,  $b = b' - ib''$  – комплексная длина рассеяния нейтронов на ядрах среды. В случае ПВО, когда  $k_z < k_b = \sqrt{4\pi Nb'}$ ,

$$\tau = \frac{2m}{\hbar k_z \sqrt{k_b^2 - k_z^2}} \quad (k < k_b), \quad (3)$$

где  $m$  – масса нейтрона.

Имеется два знаковых обстоятельства, способствующих появлению представления о справедливости ГВЗ как физической меры времени отражения, тесно связанной с областью формирования отраженной волны. Прежде всего, величина (3) совпадает с интуитивной оценкой времени отражения  $\delta t = 2L/V$ , где  $L$  – глубина проникновения волны в среду, а  $V$  – скорость. Эта оценка связана с распространенным представлением о том, что при ПВО волна сначала проникает в среду на некоторую глубину  $L$ , а затем возвра-

щается в вакуум, на что ей требуется некоторое время (см., например, [4]). Положив для глубины проникновения величину длины затухания волны в среде  $L_z = 1/\text{Im}(q_z)$ , немедленно получаем  $\delta t = \tau$ . Поэтому кажется вполне естественным придать величине  $l = V_z \tau$  смысл длины формирования отраженной волны. Однако, как отмечалось в [1], причины такого совпадения совершенно не понятны, так как в полубесконечной однородной среде отсутствует обратная волна  $\sim \exp(-iq_z z)$ .

Второе важное обстоятельство связано с известным эффектом Гуса – Хенхен, который заключается в продольном смещении отраженного волнового пучка при его наклонном падении на поверхность среды. Величина этого смещения  $\zeta = \tau V_x$  в точности равна произведению компоненты скорости частицы, параллельной поверхности, на ГВЗ, что также соответствует представлению о том, что понятие ГВЗ при отражении является хорошей физической мерой времени отражения. Однако и тут имеется обстоятельство, препятствующее представлению о связи ГВЗ с временем и глубиной формирования отраженной волны [1].

## Отражение выше порога ПВО

При вычислении величины ГВЗ при отражении выше порога ПВО удобно воспользоваться принятым

в нейтронной оптике представлением об эффективном потенциале среды  $U = (2\pi\hbar^2/m)Nb$ . В этом случае

$$\tau \simeq \hbar\eta \frac{U}{4E^2}, \quad (4)$$

где  $E = (\hbar^2/2m)k_z^2$ ,  $\eta = (b^*/b')$ . Положив  $E \approx 2U$  и приняв во внимание, что типичное значение величины  $\eta \approx 10^{-4}$ , получим оценку  $\tau \approx 10^{-14}$  с. Предположение о связи  $\tau$  с глубиной формирования отраженной волны вида  $l \approx \tau V$  приводит к нефизическому результату  $l \approx 10^{-13}$  м.

### Связь ГВЗ со скоростью в вакууме

Кажущаяся парадоксальной связь длины затухания, ГВЗ и скорости  $l = V_z \tau$  имеет, видимо, вполне ясное объяснение. Оно содержится в работах, посвященных эффекту Гуса – Хенхен, и в том числе в обзоре [4]. Известно, что явление ПВО приводит к накоплению в приповерхностной области некоторого избыточного потока, являющегося суммой потока затухающей волны в среде, и потока, связанного с интерференцией падающей и отраженной волн. Плотность этого потока есть  $\Delta J = 2\hbar k_x / (m\sqrt{k_b^2 - k_z^2})$ . С избытком потока связан, очевидно, и избыток плотности нейтронов  $n = \Delta J/V_x = 2l$ , для накопления которого требуется время  $\delta t$ . Его можно считать альтернативным определением времени отражения. Разделив  $n$  на нормальную компоненту плотности потока  $V_z$ , получаем для времени отражения величину  $\delta t = \tau$ . Таким образом, скорость  $V_z$ , возникшая при этих вычислениях, связана не с вакуумной скоростью нейтрона в среде, как можно было подумать, а с квантово-механической плотностью потока.

### ГВЗ и область формирования когерентных волн

Аномально малая величина ГВЗ при надпороговом отражении заставляет усомниться в правомерности отождествления его со временем отражения, если под последним понимать время, за которое формируется отраженная и преломленная волны. Такое сомнение, по-видимому, вполне оправданно. Дело в том, что квантово-механическое понятие ГВЗ применимо лишь к случаю строго определенной области действия потенциала. В оптических задачах также строго должны быть заданы зависящие от координат свойства среды. В этих условиях ГВЗ дает правильный, хотя и приближенный ответ на смещение максимума волнового пакета, и рассмотренный выше случай надпорогового отражения не является здесь исключением. Однако не следует ожидать, что можно таким образом получить данные о области формирования отраженной и преломленной волн, являющихся результатом интерференции сферических волн от элементарных рассеивателей. В нейтронной оптике

такowymi являются ядра. Для решения этой задачи необходим, по-видимому, какой-то микроскопический подход.

### Отражение выше порога ПВО в первом борновском приближении

Возможным методом анализа физики отражения нейтронов выше порога ПВО может быть первое борновское приближение [5]. Полагая, что превышение над порогом значительное, для волновой функции отраженной волны находим:

$$\Psi_1(\mathbf{r}) = \frac{ik_b^2 e^{ik_x r}}{2k_z} \int_0^\infty e^{-iQz} dz, \quad (5)$$

где переданный импульс  $Q = 2k_z$  характеризует глубину затухания этой волны в веществе  $L = Q^{-1}$ . Результатом интегрирования (5) является очевидное соотношение  $\Psi_1(\mathbf{r}) = R e^{ik_x r}$ , где амплитуда волны  $R = k_b^2 / 4k_z^2$  в точности совпадает с коэффициентом Френеля при достаточном превышении над порогом. Естественно считать, что рост амплитуды волны в веществе по мере приближения к границе и есть демонстрация ее формирования на длине  $L = Q^{-1}$ . Что касается времени отражения  $\tau$ , то для его оценки снова можно принять величину порядка  $L/V_z$ . Основанием для использования здесь величины  $V_z$  является не сопоставление со скоростью волны в веществе, а то обстоятельство, что сферические волны, являющиеся результатом рассеяния падающей волны, характеризуются волновым числом падающей волны. Численно  $\tau \approx 10^{-9}$  с.

Возможности экспериментальной оценки времени надпорогового отражения ограничиваются, по-видимому, наблюдением нестационарного эффекта

расщепления спектра при отражении от поверхности, колеблющейся с высокой частотой. Такое расщепление возможно только в случае, если период колебания превышает время формирования отраженной волны. Наилучшая современная оценка  $\tau \leq 10^{-9}$  с следует из наблюдения нестационарной дифракции нейтронов на поверхностной акустической волне [6].

### Литература

1. В. А. Бушуев, А. И. Франк // Нанопластика и наноэлектроника: матер. XXIII междунар. симпоз. 2019. Т. 1. С. 434–435.
2. D. Bohm // Quantum Theory. New York : Prentice-Hall, 1951.
3. E. P. Wigner // Phys. Rev. 1955. V. 98. P. 145–147.
4. В. А. Бушуев, А. И. Франк // УФН. 2018. Т. 188. С. 1049–1062.
5. В. А. Бушуев, А. И. Франк // Современная рентгеновская оптика – 2023: Труды школы молодых ученых. 2023. С. 12–17. <http://modern.xray-optics.ru>.
6. Г. В. Кулин, А. И. Франк, Н. В. Реброва и др. // Нанопластика и наноэлектроника: матер. XXVII междунар. симпоз. 2023. С. 860.