

О законе дисперсии нейтронов в ускоряющемся веществе

А. И. Франк¹⁾

Лаборатория нейтронной физики им. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

Поступила в редакцию 29 сентября 2014 г.

В недавних экспериментах с ультрахолодными нейтронами было зафиксировано изменение энергии, возникающее при прохождении нейтронов через преломляющий образец, движущийся с ускорением. Результаты оказались в хорошем соответствии с теоретическими предсказаниями, полученными в предположении о том, что закон дисперсии нейтронных волн в ускоряющемся веществе такой же, как и для покоящегося образца. В настоящем сообщении приводятся некоторые аргументы, свидетельствующие о справедливости указанного выше предположения лишь в случае, когда величина ускорения не превышает некоторого критического значения. Обсуждается возможный экспериментальный подход к проверке этих соображений.

DOI: 10.7868/S0370274X14220020

Как известно, природа показателя преломления связана с интерференцией падающей и рассеянных волн. Для медленных нейтронов рассеяние изотропно, а амплитуда рассеяния в большинстве случаев постоянна (принимается равной $-b$). При этом фаза рассеянной волны отличается от фазы падающей волны на величину $\delta = -kb$, где k – волновое число в вакууме, b – длина рассеяния. Именно сдвиг δ фазы и порождает то, что мы называем преломлением (*рефракцией*). При этом для показателя преломления n справедлива формула Фолди [1, 2]:

$$n^2 = 1 - 4\pi\rho b/k^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность атомных ядер. Взаимодействие нейтронов с веществом может быть также описано с помощью эффективного потенциала

$$U_{\text{eff}} = \frac{2\pi\hbar^2}{m}\rho b, \quad (2)$$

где m – масса нейтрона. Представления (1) и (2) вполне эквивалентны. Поэтому закон дисперсии (1) нередко называют потенциальным.

Справедливость (1) и (2) для случая равномерно движущейся среды не вызывает сомнения, поскольку для существенно нерелятивистских задач, характерных для нейтронной оптики, переход в систему координат, в которой вещество покоится, ведет лишь к изменению фазы волновой функции [3].

В работах [4, 5] предсказывалось, что энергия нейтронов, прошедших через слой вещества, движущегося с ускорением, должна отличаться от первоначальной. Теория основывалась на предположении о

справедливости закона дисперсии (1) в ускоряющейся среде. Изменение энергии действительно было зарегистрировано в экспериментах с ультрахолодными нейтронами (УХН) [6, 7]. Ускорение образца при этом достигало величины 75 м/с^2 , а величина передачи энергии нейтронам составляла доли нэВ и весьма удовлетворительно согласовывалась с расчетом. Следовательно, предположение о справедливости потенциального закона дисперсии в указанных условиях оправдано.

Однако общий вывод о справедливости закона дисперсии в ускоряющейся среде был бы, вероятно, ошибочным. Дело в том, что в теории дисперсии, являющейся, по существу, теорией многократного рассеяния волн, весьма существенно предположение о сферичности интерферирующих рассеянных волн. Вместе с тем в неинерциальной системе координат, связанной с ускоряющимся веществом, представление о сферических волнах неправомерно, что может повлиять на условие их интерференции [8].

Попробуем сделать качественные оценки величины ускорения, при которой следует ожидать существенного отклонения от закона дисперсии (2). Будем рассматривать рассеянные волны на относительно малых расстояниях от ядер-рассеивателей, где их асферичность еще невелика. Поступая аналогично работе [9], посвященной проблемам нейтронной оптики в гравитационном поле Земли, введем “ускорительный” показатель преломления, обусловленный неинерциальностью системы

$$n_W(x) = \sqrt{1 - \frac{mWx}{E}} \approx 1 - \frac{mWx}{2E} \quad (mWx \ll E), \quad (3)$$

¹⁾e-mail: frank@nf.jinr.ru

где W – ускорение вещества, E – энергия нейтрона. Ось x выбрана в направлении, противоположном направлению ускорения. Фаза волны, распространяющейся вдоль оси x , очевидно, есть

$$\phi = kx \left(1 - \frac{mWx}{2E} \right). \quad (4)$$

Таким образом, на расстоянии x от рассеивателя наличие ускорения приводит к изменению фазы на величину

$$\Delta\phi = k \left(\frac{mWx^2}{2E} \right) \quad (5)$$

по сравнению с фазой в инерциальной системе.

Очевидно, что сильных эффектов следует ожидать, когда “ускорительный” сдвиг фазы (5) оказывается порядка сдвига фазы $\delta \cong kb$, являющегося, как отмечалось выше, физической причиной преломления. Положив в (5) $x = a$, где a – межатомное расстояние, можно сформулировать условие применимости обычной теории дисперсии в ускоренной среде в виде

$$\frac{mWa^2}{2E} \ll b, \quad W \ll \frac{2Eb}{ma^2} = W_c. \quad (6)$$

Из (6) видно, что величина критического ускорения пропорциональна энергии нейтронов, а при $W \approx W_c$ параметр асферичности, как и предполагалось, весьма мал: $\varepsilon = b/a \approx 10^{-5}$.

Оценим величину критического ускорения $W_c = 2Eb/ma^2$ для случая ультрахолодных нейтронов. Положив $E = 100$ нэВ, $b \approx 5 \cdot 10^{-13}$ см, $a = 5 \cdot 10^{-8}$ см, получаем $W_c \approx 4 \cdot 10^7$ см/с². Такое ускорение вполне достижимо в лабораторных экспериментах. Более того, эксперимент по наблюдению взаимодействия нейтронов с объектом, движущимся с подобным ускорением, осуществлен достаточно давно [10], хотя и с иными целями, и не с УХН. В нем демонстрировалось угловое расщепление пучка холодных нейтронов при их отражении от зеркала, колеблющегося в пространстве. В одном из измерений амплитуда вибрации составляла 5.3 нм при частоте 2.22 МГц. Максимальное значение ускорения при этом дости-

гало 10^8 см/с². Эксперимент явился прекрасной демонстрацией квантового нестационарного эффекта, состоящего в расщеплении спектра нейтронов при отражении от осциллирующего барьера. Очевидно, его можно также интерпретировать и как свидетельство справедливости модели эффективного потенциала (2) при указанных ускорениях. Этот опыт, однако, несколько не противоречит приведенным выше оценкам (6), так как в нем использовались холодные нейтроны с энергией на три порядка большей, чем у УХН. Поскольку величина W_c пропорциональна энергии нейтронов, очевидно, что ускорение образца в этом опыте было по крайней мере в сто раз меньше критического.

Аналогичный опыт с ультрахолодными нейтронами мог бы дать ответ на важный вопрос о справедливости закона дисперсии нейтронных волн в среде, движущейся с гигантским ускорением.

Автор благодарен Е.И. Кацу, Д.В. Роццупкину, В.А. Бушуеву, Г.В. Кулину и Д. Кустову за полезные обсуждения. Работа поддержана грантом РФФИ # 11-02-00271-а.

1. L. L. Foldy, Phys. Rev. **67**, 107 (1945).
2. M. Lax, Rev. Mod. Phys. **23**, 287 (1951); Phys. Rev. **85**, 621 (1952).
3. M. A. Horne, A. Zeilinger, A. G. Klein, and G. I. Opat, Phys. Rev. A **28**, 1 (1983).
4. F. V. Kowalski, Phys. Lett. A **182**, 335 (1993).
5. В. Г. Носов и А. И. Франк, ЯФ **61**, 686 (1998).
6. А. И. Франк, П. Гелтенборт, М. Жентшель, Д. В. Кустов, Г. В. Кулин, В. Г. Носов, А. Н. Стрепетов, ЯФ **71**, 1686 (2008).
7. А. И. Франк, П. Гелтенборт, М. Ентшель, Д. В. Кустов, Г. В. Кулин, А. Н. Стрепетов, Письма в ЖЭТФ **93**, 403 (2011).
8. А. И. Франк, УФН **179**, 424 (2009).
9. И. М. Франк, А. И. Франк, Письма в ЖЭТФ **28**, 559 (1978).
10. J. Felber, R. Gähler, C. Rauch, and R. Golub, Phys. Rev. **53**, 319 (1996).