

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ НЕЙТРОНА В ПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ СРЕДЕ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ДИСПЕРСИИ ДЛЯ УХН

А. И. Франк, Г. В. Кулин, М. А. Захаров

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для проверки справедливости потенциального закона дисперсии ультрахолодных нейтронов в среде предлагается измерять временную задержку, возникающую при прохождении нейтронов через преломляющий образец.

To check the validity of the potential law of dispersion of chemical substances in the medium, it is proposed to measure the time delay that occurs when neutrons pass through the refracting sample.

PACS: 03.75.Be; 61.05.fm

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в оптике показателем преломления называют отношение

$$n = k/k_0, \quad (1)$$

где k_0 — волновое число падающей волны; k — волновое число в среде. Для нейтронных волн понятие коэффициента преломления было введено в научный оборот Э. Ферми в 1940-х гг. Позже работы Фолди [1] и Лэкса [2] привели к пониманию того, что понятие показателя преломления может быть введено для любых волн и сред, если последние содержат центры, способные эти волны рассеивать. В случае нейтронных волн связь волновых чисел в среде и вакууме с хорошей точностью определяется соотношением

$$k^2 = k_0^2 - 4\pi\rho b, \quad (2)$$

где ρ — объемная плотность ядер, являющихся в этом случае элементарными рассеивателями; b — комплексная длина когерентного рассеяния. Из формулы (2) следует, что в случае $b = \text{const}$ взаимодействие медленных нейтронов с веществом можно описать путем введения эффективного потенциала

$$U = \frac{2\pi\hbar^2}{m} \rho b, \quad (3)$$

характеризующего вещество.

Лэкс [2] получил общее выражение для волнового числа в среде, справедливое как для света, так и для нейтронов:

$$k_1^2 = k_0^2 + 4\pi\rho C f_0, \quad (4)$$

где f_0 — амплитуда рассеяния вперед, которую для медленных нейтронов можно принять равной длине рассеяния, взятой с обратным знаком, $f_0 = -b$. В случае нейтронных волн коэффициент C , учитывающий отличие поля, действующего на рассеиватель, от поля, падающего на среду, равен единице. Известно, что в оптике связь между волновым числом в среде k и частотой называют законом дисперсии, поэтому в случае нейтронных волн уравнение, связывающее волновое число нейтронной волны с величиной k_0 или k_0^2 , мы также будем называть законом дисперсии. Очевидная эквивалентность соотношений (2) и (3) в случае $b = \text{const}$ позволяет называть закон дисперсии (2) потенциальным.

Вопрос о степени справедливости потенциального закона дисперсии вызывает значительный интерес, поскольку он широко используется как в практике нейтронной оптики, так и в физике ультрахолодных нейтронов (УХН).

По-видимому, впервые его справедливость была поставлена под вопрос И. М. Франком [3], предположившим, что и для нейтронов коэффициент C может быть не в точности равным единице. Тогда присутствие даже очень маленькой мнимой части коэффициента C может привести к вполне заметному изменению коэффициента поглощения нейтронов в среде. В последующих теоретических работах [4, 5] было показано, что для медленных нейтронов формула (2) является всего лишь хорошим приближением закона дисперсии, а истинная зависимость k (k_0) имеет более сложный характер. Впрочем, различия достаточно малы, а соответствующие поправки сами зависят от k_0 .

Вопрос о справедливости потенциального закона дисперсии стал еще более сложным, когда в работах [6, 7] были приведены аргументы о несправедливости потенциального закона дисперсии при предельно малых значениях волнового числа. Согласно этим работам условием применимости (2), (3) является соотношение

$$k_0 > 4\pi\rho b a = \zeta, \quad (5)$$

где a — межатомное расстояние. Для нейтронов с волновыми числами, меньшими ζ , имеющими скорость порядка 10 см/с или менее, было предложено название «сверхмедленные нейтроны» (СМН). Если это предсказание справедливо, то естественно предположить, что и в области УХН могут иметься малые отклонения от (2), (3), являющиеся предвестниками сильного их нарушения при дальнейшем уменьшении скорости нейтронов.

1. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ЗАКОНА ДИСПЕРСИИ УХН

Возможная стратегия поиска поправок к потенциальному закону дисперсии может быть основана на специфических свойствах последнего. По-видимому, И. М. Франк впервые показал, что если справедлив закон дисперсии (2), то он же справедлив и

для компоненты волнового числа, нормальной к поверхности вещества [3]:

$$k_{\perp}^2 = k_{0\perp}^2 - 4\pi\rho b. \quad (6)$$

Отсюда следует, что в случае потенциального закона дисперсии нормальная компонента волнового вектора в среде k_{\perp} зависит только от нормальной компоненты волнового вектора в вакууме. Для любого иного вида закона дисперсии это несправедливо. Поэтому если при неизменной величине $k_{0\perp}$ в эксперименте обнаруживается зависимость нормальной компоненты волнового вектора в среде k_{\perp} от компоненты $k_{0\parallel}$, параллельной границе вещества, то это должно свидетельствовать об отклонении от потенциального закона дисперсии. Иная формулировка этого утверждения содержится в работе [8].

Такая зависимость может быть обнаружена в экспериментах с нейтронными интерферометрами, которые оперируют с тепловыми нейтронами. В частности, в эксперименте [9] в одно из плеч нейтронного интерферометра был помещен кварцевый диск, который можно было вращать вокруг оси, параллельной волновому вектору падающей волны. При приведении диска во вращение фаза волны, прошедшей через диск, оставалась неизменной, что демонстрировало независимость k_{\perp} от $k_{0\parallel}$. Однако точность этого эксперимента была недостаточной для обнаружения поправок, предсказываемых теорией. Впрочем, сам принцип такого эксперимента впоследствии был продемонстрирован в аналогичном эксперименте, в котором вещество диска содержало ядра самария. В силу резонансного поведения амплитуды когерентного рассеяния самария закон дисперсии в этом случае нельзя полагать потенциальным, и фаза волны, прошедшей через диск, менялась при приведении диска во вращение.

Отсутствие для УХН интерферометров с разделенными пучками заставило искать иной подход к этой проблеме. В работе [6] предлагалось использовать устройство, являющееся аналогом оптического интерферометра Фабри–Перо. При подходящем выборе параметров такое устройство характеризуется узкой линией пропускания нейтронов, положение которой определяется нормальными компонентами волновых векторов в веществе интерферометра. Предлагалось изготовить такой интерферометр на поверхности кремниевого диска, прозрачного для УХН, и так же, как и в работах [9, 10], направить нейтроны перпендикулярно к его поверхности. Можно показать, что в отсутствие поправок к потенциальному закону дисперсии энергетическое положение линии пропускания не должно зависеть от того, вращается ли диск или нет. В противном случае она должна зависеть от скорости вращения диска. Такой эксперимент был поставлен в работе [11], и смещение линии пропускания при вращении диска в самом деле наблюдалось. Однако позже выяснилось, что сдвиг линии резонансного туннелирования при вращении интерферометра Фабри–Перо может быть связан с иным явлением, никак не относящимся к справедливости потенциального закона дисперсии [12, 13]. Таким образом, выяснилось, что использование интерферометра Фабри–Перо для этих целей невозможно. Позже был поставлен более простой эксперимент, в котором измерялось пропускание УХН через кремниевый диск, который также можно было вращать [14]. Изменение пропускания диска не было замечено, однако это не могло служить однозначным свидетельством о справедливости потенциального закона дисперсии, поскольку пропускание образца зависит от двух параметров, а именно от действительной и мнимой частей эффективного потенциала (3) образца. Следовательно, анализ результатов такого опыта неизбежно

сопряжен с необходимостью делать предположения о связи этих двух параметров и их зависимости от величины полного волнового числа нейтронов. Поэтому следует, к сожалению, заключить, что вопрос степени справедливости потенциального закона дисперсии для УХН сохраняет свою актуальность.

2. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ НЕЙТРОНОВ В ВЕЩЕСТВЕ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА ДИСПЕРСИИ УХН

По-видимому, наиболее прямой способ проверки справедливости потенциального закона дисперсии УХН состоит в измерении скорости нейтрона в преломляющем веществе. Одна из возможностей такого измерения состоит в регистрации фазы ларморовской прецессии спина нейтрона, прошедшего через преломляющий образец [15]. Такой эксперимент был поставлен с холодными нейтронами [16], и величина фазового сдвига, обусловленного преломлением, хорошо соответствовала расчету. Однако следует отметить, что в этом эксперименте измеряется не скорость нейтрона в веществе, а показатель преломления.

Дело в том, что, строго говоря, нейтрон в среде является не истинной частицей, а квазичастицей, характеризующейся некоторой эффективной массой $m^* = 2mkF'$, где m — истинная масса, а функция F определяет закон дисперсии $k = F(k_0^2)$. Из определений волнового числа в среде $k = m^*v/h$ и показателя преломления (1) следует, что скорость нейтрона в среде есть

$$v = \frac{\hbar k}{m^*} = \frac{m}{m^*} nV, \quad (7)$$

где V — скорость нейтрона в вакууме. Из выражения (7) следует, что кажущееся очевидным соотношение $v = nV$ справедливо лишь в случае $m = m^*$, что, как показано в работе [17], имеет место лишь в случае потенциального закона дисперсии.

Легко показать, что для нейтрона, прошедшего через преломляющий образец толщиной L , фаза прецессии не зависит от вида закона дисперсии и во всех случаях определяется формулой

$$\Delta\varphi = \omega_L \frac{1-n}{n} \frac{L}{V}, \quad (8)$$

где ω_L — ларморовская частота.

Это важное обстоятельство отнюдь не компрометирует такого рода эксперимент. Напротив, очевидно, что измерение показателя преломления УХН и его зависимости от полного волнового числа представляет значительный интерес, хотя и сопряжено с большими трудностями. По-видимому, единственная возможность поставить такой эксперимент состоит в создании спин-эхо спектрометра для УХН. Такая возможность обсуждалась много лет назад [16], но осталась неосуществленной.

Более простой экспериментальный подход состоит в прямом измерении времени пролета нейтроном преломляющего образца $\tau = L/v$ или временной задержки $\Delta\tau = L(V-v)/(Vv)$. Такой времяпролетный эксперимент можно поставить и с вращающимся образцом, как это, например, схематически показано на рисунке.

В этом случае опыт может быть чувствителен к виду поправок к потенциальному закону дисперсии. Приняв

$$k^2 = k_0^2 - 4\pi\rho b + \varepsilon(k_0^2), \quad (9)$$

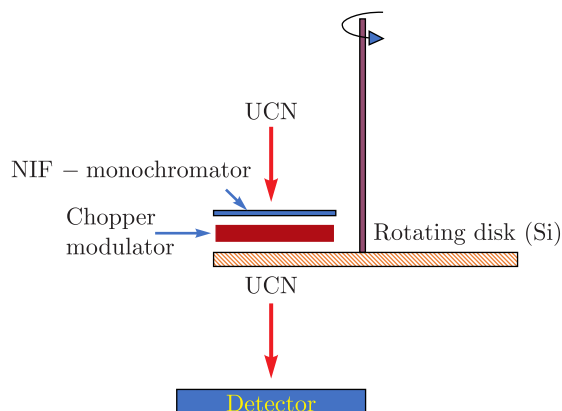


Схема предлагаемого эксперимента

с учетом вышесказанного легко получить, что

$$\tau = \frac{mL}{\hbar nk_0} \left(1 + \frac{d\varepsilon}{dk_0^2} \right). \quad (10)$$

Легко видеть, что эксперимент по измерению времени пролета нейтрона через преломляющий образец чувствителен к наличию поправок к потенциальному закону дисперсии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Foldy L. L.* // *Phys. Rev.* 1945. V. 67. P. 107.
2. *Lax M.* // *Rev. Mod. Phys.* 1951. V. 23. P. 287;
Lax M. // *Phys. Rev.* 1952. V. 85. P. 621.
3. *Frank I. M.* // *Sov. Phys. Usp.* 1991. V. 34. P. 988.
4. *Sears V. F.* // *Phys. Rep.* 1982. V. 82. P. 1.
5. *Warner M., Gubernatis J. E.* // *Phys. Rev. B.* 1985. V. 32. P. 6347.
6. *Frank A. I., Nosov V. G.* // *Phys. At. Nucl.* 1995. V. 58. P. 402.
7. *Nosov V. G., Frank A. I.* // *Phys. Rev. A.* 1997. V. 55. P. 1129.
8. *Klein A. G., Werner S. A.* // *Rep. Prog. Phys.* 1983. V. 46. P. 259.
9. *Arif M., Kaiser H., Werner S. A. et al.* // *Phys. Rev. A.* 1985. V. 31. P. 1203.
10. *Arif M., Kaiser H., Clothier R. et al.* // *Physica B.* 1988. V. 151. P. 63.
11. *Bondarenko I. V., Krasnoperov A. V., Frank A. I. et al.* // *JETP Lett.* 1998. V. 67. P. 786.
12. *Frank A. I., Balashov S. V., Bodnarchuk V. I. et al.* // *Proc. SPIE.* 1999. V. 3767. P. 360.
13. *Frank A. I., Balashov S. N., Bondarenko I. V. et al.* *JINR Commun.* E3-2004-216. Dubna, 2004.
14. *Kulin G. V., Strepetov A. N., Frank A. I. et al.* // *Phys. Lett. A.* 2014. V. 378. P. 2553.
15. *Baryshevskii V. G., Cherepitsa S. V., Frank A. I.* // *Phys. Lett. A.* 1991. V. 153. P. 299.
16. *Frank A. I., Anderson I., Bondarenko I. V. et al.* // *Phys. At. Nucl.* 2002. V. 65. P. 2009.
17. *Frank A. I.* // *Phys. Usp.* 2018. V. 61. P. 900.

Получено 4 июня 2024 г.