

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА ДИСПЕРСИИ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

И.В.Бондаренко, С.Н.Балашов*, П.Гелтенборт⁺¹⁾, А.Г.Кляйн^{□1)},
А.В.Красноперов, С.В.Масалович*, В.Г.Носов*, А.И.Франк²⁾, П.Хогхой⁺¹⁾,
А.Чиммино^{□1)}

*Объединенный институт ядерных исследований
141980 Дубна, Московская обл., Россия*

** Российский научный центр "Курчатовский институт"
123182 Москва, Россия*

+ Institut Laue-Langevin, Grenoble, France

□ School of Physics, The University of Melbourne, Melbourne, Australia

Поступила в редакцию 13 апреля 1998 г.

Описывается эксперимент по проверке общепринятого закона дисперсии ультрахолодных нейтронов. Опыт основан на поиске смещения линии резонанса нейтронного интерференционного фильтра при вариации компоненты скорости нейтронов, параллельной поверхности фильтра. Первые результаты свидетельствуют о наличии статистически значимого эффекта. В контрольном опыте имитирующих эффектов не найдено, однако полностью исключить такую возможность пока невозможно.

PACS: 03.75.Be, 24.40.Dg, 78.70.-g

Введение. Хорошо известно, что закон дисперсии медленных нейтронов в веществе с высокой точностью описывается соотношением [1]

$$k^2 = k_0^2 - 4\pi\rho b, \quad (1)$$

где k – волновое число нейтрона в среде, k_0 – волновое число в вакууме, ρ – число ядер в единице объема, b – длина когерентного рассеяния. Такой зависимости соответствует эффективный потенциал

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

где m – масса нейтрона.

Вопрос о степени справедливости соотношений (1), (2) представляет значительный интерес, поскольку они широко используются как в практике нейтронной оптики [2], так и в физике ультрахолодных нейтронов (УХН) [3,4]. "Потенциальный" закон дисперсии (1), вероятно, не вполне точен. В случае тепловых и холодных нейтронов должны существовать малые поправки к нему, обусловленные наличием корреляций в расположении рассеивателей [5,6]. Точность современных экспериментов пока недостаточна для их обнаружения [7]. Вывод уравнения (1) основан на использовании квазипотенциала Ферми [8], хорошо описывающего рассеяние нейтрона на

¹⁾ P.Geltenbort, A.G.Klein, P.Hoghoj, A.Cimmino

²⁾ e-mail: frank@nf.jinr.ru

одиначном ядре в борновском приближении. В работе [9] было показано, что при стремлении длины волны к бесконечности эффективное число ядер, участвующих в когерентном рассеянии волн, возрастает настолько, что становятся значимыми повторные рассеяния на одном и том же ядре. Это закрывает возможность использования точечного квазипотенциала при предельно малых энергиях и ограничивает область применимости закона дисперсии (1). Практически важный вопрос состоит в том, при каких длинах волн небольшие отклонения от потенциального закона дисперсии уже проявляются. В настоящей работе описываются предварительные результаты эксперимента, предназначенного дать ответ на этот вопрос.

Идея эксперимента. Она была предложена в работе [10] и основана на специфических свойствах потенциального закона дисперсии, отмеченных в работах [11, 12]. Пусть нейтронная волна преломляется на границе среды, причем закон дисперсии включает "непотенциальный" поправочный член $\epsilon(k_0^2)$:

$$k^2 = k_0^2 - \chi_0^2 + \epsilon(K_0^2), \quad \chi_0^2 = 4\pi\rho b. \quad (3)$$

Если вещество однородно вдоль своей поверхности, то компонента волнового числа k_{0t} , параллельная плоскости раздела, не меняется при преломлении. Вычитая из обеих частей равенства (3) величину $k_{0t}^2 = k_t^2$, получаем

$$k_{\perp}^2 = k_{0\perp}^2 - \chi_0^2 + \epsilon(k_0^2). \quad (4)$$

Следовательно, наличие непотенциального члена $\epsilon(k_0^2)$ приводит к появлению зависимости нормальной компоненты волнового числа в среде k_{\perp} от величины волнового числа в вакууме k_0 . Целью эксперимента является поиск такой зависимости.

Основным элементом прибора является интерференционный фильтр [13,14] – нейтронный аналог оптического интерферометра Фабри – Перо. В простейшем случае он представляет собой трехслойную структуру, нанесенную на некоторую подложку (рис.1). Плотность длины рассеяния ρb и соответствующий ей эффективный потенциал (2) для внешних слоев больше, чем для внутреннего слоя и подложки. Поэтому потенциальная структура фильтра представляет собой два барьера и яму между ними. При достаточной толщине внутреннего слоя ширина ямы достаточна для образования уровней квазисвязанных состояний. Вблизи этих уровней структура становится проницаемой для подбарьерных нейтронов, а функция пропускания фильтра приобретает существенно резонансный характер.

Ширина резонанса задается проницаемостью внешних слоев, а его положение определяется результатом сшивания волновых функций на границах пленок. Поскольку задача одномерна, все существенные характеристики резонанса определяются только нормальными компонентами действительных или мнимых волновых векторов.

Скорость нейтрона относительно фильтра можно изменять, если последний привести в движение параллельно своей поверхности. Очевидно, что нормальная компонента $K_{0\perp}$ волнового числа падающей волны при этом не меняется. Однако при непотенциальном законе дисперсии (4) движение фильтра приведет к изменению нормальной компоненты волнового числа в среде K_{\perp} и, следовательно, к сдвигу положения резонанса. Такой сдвиг можно зарегистрировать, измеряя энергию $E_n = \frac{\hbar^2}{2m} k_{0\perp}^2$ прошедших через фильтр нейтронов.

Экспериментальная проверка закона дисперсии ультрахолодных нейтронов. Эксперимент был поставлен на источнике УХН Института Лауэ-Ланжевена

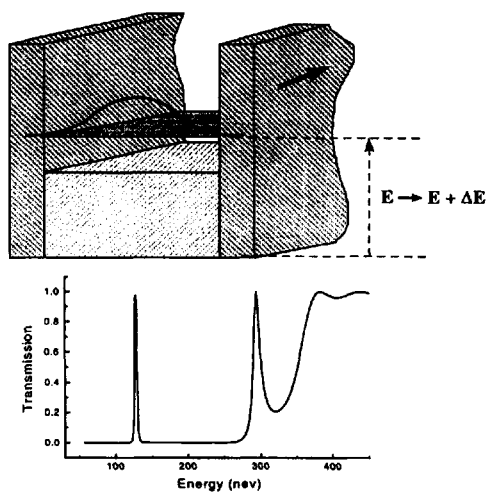


Рис.1. Потенциальная структура интерференционного фильтра и уровни квазисвязанного состояния. При непотенциальном законе дисперсии приведение фильтра в движение вызывает смещение положения резонанса. Внизу показана функция пропускания одного из фильтров, использованного в эксперименте

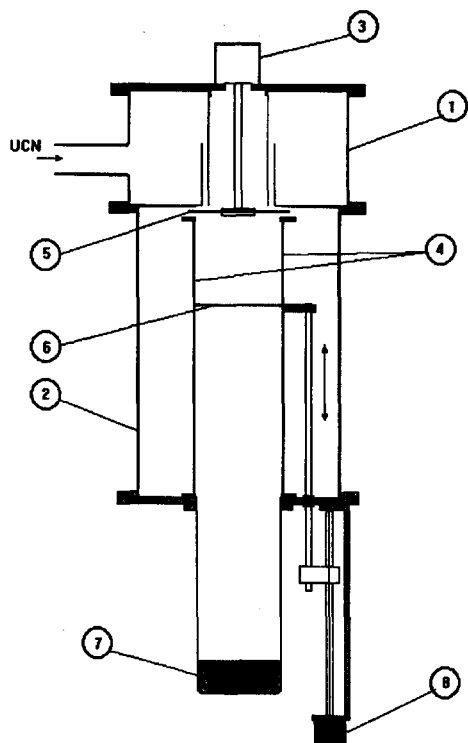


Рис.2. Схема экспериментальной установки: 1 – входная камера, 2 – вакуумная камера, 3 – мотор вращения фильтра, 4 – зеркальный нейтронотвод, 5 – вращающийся фильтр-монокроматор, 6 – фильтр-анализатор, 7 – детектор, 8 – шаговый двигатель

(Гренобль, Франция) [15]. Экспериментальная установка представлена на рис.2. Ультрахолодные нейтроны из подводящего нейтронотода поступают во входную камеру и после ряда отражений попадают в цилиндрический коридор, подводящий их к фильтру – монокроматору диаметром 150 мм. Внутренний и внешний диаметры коридора составляют 110 и 130 мм, соответственно, так что УХН облучают только кольцевую область фильтра. Фильтр можно приводить во вращение вокруг вертикальной оси с помощью мотора. Прошедшие через фильтр УХН, имеющие достаточно узкий спектр энергий с максимумом 107 нэВ и полушириной порядка 4 нэВ, попадают в шестигранный зеркальный нейтронотвод с вертикальными стеклянными стенками высотой 50 см. Двигаясь вдоль нейтронотода в гравитационном поле Земли УХН ускоряются. Изменение энергии составляет 1.026 нэВ/см. Второй фильтр – анализатор с максимумом пропускания около 127 нэВ расположен примерно на 20 см ниже первого. При таком взаимном расположении фильтров нейтроны с начальной энергией 107 нэВ после ускорения в гравитационном поле пропускаются также и вторым фильтром. Положение фильтра-анализатора можно менять по вертикали, что позволяет осуществлять сканирование по энергии и измерять пропускание системы

в достаточно широком диапазоне энергий. Прошедшие через спектрометр нейтроны регистрируются пропорциональным He^3 -детектором.

Интерференционные фильтры приготовлены методом магнитронного распыления на кремниевых подложках диаметром 150 мм и толщиной 0.6 мм. Для приготовления структуры использовалась пара материалов: парамагнитное соединение Ni(N) с высокой плотностью амплитуды рассеяния и сплав Ti/Zr с практически нулевым средним значением ρb .

Для подавления фона использовалась специальная многослойная (более ста слоев) структура, расположенная ниже анализатора. Этот многослойный фильтр (суперокно) пропускает УХН, но эффективно отражает нейтроны с энергиями от 200 до 700 нэВ.

Полученная в эксперименте кривая сканирования имела полуширину порядка 6.6 нэВ. Счет в максимуме составлял 1.4 отс/с при фоне 0.12 отс/с. При вращении фильтра фон увеличивался примерно на 0.02 отс/с, что связано, по-видимому, с рассеянием нейтронов на движущихся межслойных шероховатостях. Кроме того, при вращении фильтра наблюдалось небольшое (2-5%) уменьшение интеграла под кривой сканирования.

Для каждого положения анализатора проводилось многократное измерение скорости счета для покоящегося и вращающегося монохроматора, после чего анализатор перемещался в следующую точку. Линейная скорость области фильтра, через которую проходили УХН, составляла примерно 35 м/с. После завершения сканирования вычислялся сдвиг среднего положения функции пропускания двух фильтров при вращении монохроматора.

$$\delta \langle x \rangle = \frac{\sum_i x_i n'_i}{\sum_i n'_i} - \frac{\sum_i x_i n_i}{\sum_i n_i} \quad (5)$$

где n'_i и n_i – скорости счета в позиции x_i для вращающегося и покоящегося фильтров, соответственно. Данные для сдвига, полученные в отдельных измерениях – сканах, усреднялись по всей серии измерений. Направление вращения периодически менялось. В двух сериях, отличающихся положением суперокна, было проведено соответственно 5 и 12 отдельных измерений.

Измеренное смещение составило -0.100 ± 0.031 см (+) и -0.158 ± 0.046 см (-) для первой серии и -0.060 ± 0.019 см (+) и -0.084 ± 0.025 см (-) для второй. Символами в скобках отмечено два направления вращения. Отрицательный знак смещения соответствует увеличению энергии нейтронов. Усреднение по направлению вращения приводит к значениям -0.118 ± 0.024 см и -0.069 ± 0.014 см для двух серий. Достаточное число измерений, сделанных во второй серии, позволило провести анализ на соответствие отдельных данных нормальному распределению с результатом $\chi^2 = 1.11$ на одну степень свободы.

Чтобы перейти от смещения среднего экспериментальной кривой к величине смещения собственно спектра, необходимо учесть долю фона под кривой сканирования. Таким образом, для величины сдвига энергии было получено: $\Delta E_1 = +0.150 \pm 0.032$ и $\Delta E_2 = +0.090 \pm 0.018$ нэВ, причем при определении фона учтена только статистическая погрешность.

На рис.3 показаны кривые сканирования для второй серии, нормированные на площадь. Фон предварительно был вычтен.

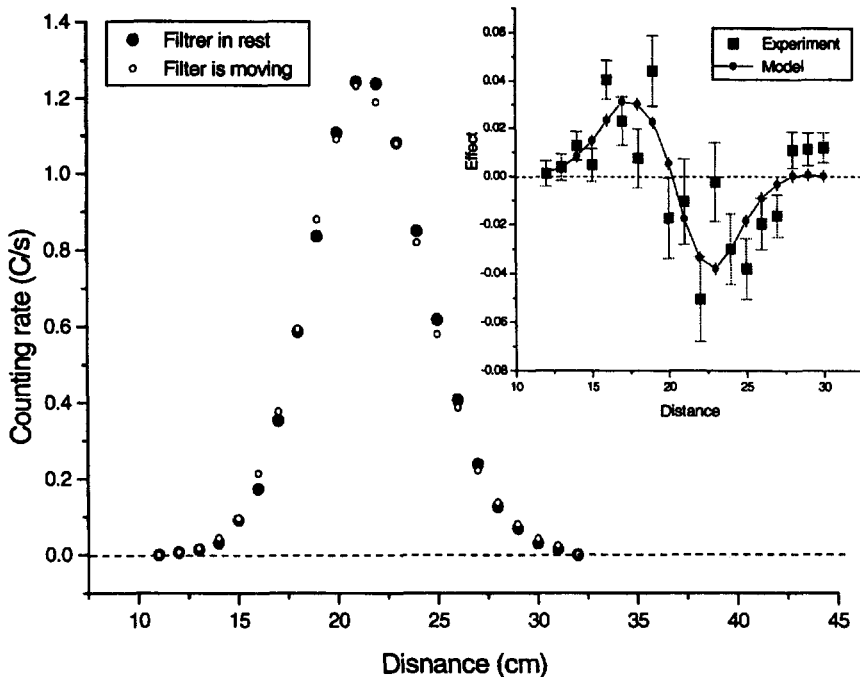


Рис.3. Нормированные кривые сканирования для второй серии. Погрешности не указаны, поскольку на графике они меньше, чем размер точки. На врезке показан ход дифференциального эффекта – разность кривых сканирования

Условия эксперимента для двух серий несколько различались. В первой серии суперокно имело фиксированное положение в нижней части нейтроновода. Во второй – оно было соединено с фильтром-анализатором и при сканировании перемещалось вместе с ним. Последующий анализ показал, что в первом случае было возможно появление небольшого ложного эффекта, связанного с уширением линии при вращении фильтра. Этот эффект был учтен как методическая погрешность. В итоге было получено: эффект сдвига средней энергии нейтрона при приведении фильтра во вращение составил для двух серий: $\Delta E_1 = +0.150 \pm 0.032$ (stat) ± 0.025 (meth) и $\Delta E_2 = +0.090 \pm 0.018$ (stat) нэВ, а в среднем $\Delta E = +0.100 \pm 0.016$ нэВ.

Контрольный эксперимент и ложные эффекты. Для исключения гипотезы о возможном изменении энергии нейтронов при взаимодействии с вращающейся многослойной структурой был поставлен специальный контрольный эксперимент. В этом опыте монохроматор был неподвижен и помещался непосредственно над вращающимся фильтром. Последний был специально приготовлен для контрольного эксперимента. Линия пропускания этого фильтра совпадала с линией пропускания фильтра-монохроматора, но при этом была в два раза шире. Процедура эксперимента и обработки была той же, что в основном опыте. Данные отдельных измерений соответствуют нормальному распределению ($\chi^2 = 1.40$). Изменения энергии при движении фильтра не обнаружено: $\Delta E = +0.009 \pm 0.024$ нэВ. Однако, как показал последующий анализ, в принципе могут существовать ложные эффекты, наличие

которых не закрывается контрольным опытом. Прояснить ситуацию могут только дальнейшие эксперименты.

Возможная интерпретация результата. Интересно оценить величину поправки к закону дисперсии в предположении, что обнаруженный эффект действительно обусловлен сдвигом резонанса. Поскольку величина потенциала внутренней Ti/Zr пленки близка к нулю, естественно ожидать, что эффект обусловлен изменением k_{\perp} во внешних Ni(N) слоях. Из решения квантовой задачи о пропускании фильтра было найдено, что для объяснения наблюдаемого эффекта это изменение должно составлять величину $(\Delta k_{\perp})_{exp} \approx -i \cdot 1.2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ ($\Delta k_{\perp}/k_{\perp} \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$) при приведении фильтра в движение. Это близко к оценкам, следующим из работы [9].

Заключение. В эксперименте по поиску сдвига резонансной линии в интерференционном фильтре, обусловленного движением последнего параллельно своей поверхности, обнаружен эффект, который может быть интерпретирован как изменение энергии нейтронов, прошедших через фильтр. Статистическая достоверность результата достаточно велика. Ложных эффектов, способных объяснить результат, нами не найдено, хотя полностью исключить такую возможность пока не представляется возможным.

Эксперимент выполнен при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-02-16469).

Авторы благодарны Б.Г.Ерозолимовскому за помощь и полезные обсуждения во время эксперимента в Гренобле и А.В.Козлову, прошедшему аналитическое решение задачи о пропускании сложных интерференционных фильтров. Мы благодарны всем коллегам за полезные обсуждения и интерес к работе.

-
1. L.I.Foldy, Phys. Rev. **67**, 107 (1950).
 2. L.Koester, Springer Tracts of Modern Phys. **80**, 1 (1977).
 3. В.К.Игнатович, *Физика ультрахолодных нейтронов*, М.: Наука, 1986.
 4. R.Golub, D.Richardson, and S.K.Lamoreux, Ultra-Cold Neutrons, Adam Hilger, Bristol.
 5. V.F.Sears, Phys. Reports **82**, 1 (1982).
 6. M.Warner and J.E.Gubernatis, Phys. Rev. **B32**, 6347 (1985).
 7. M.Arif, H.Kaiser, S.A.Werner et al., Phys. Rev. **A31**, 1203 (1985).
 8. E.Fermi, Nuvo Cim. **11**, 157 (1934).
 9. V.G.Nosov and A.I.Frank, Phys. Rev. **A55**, 1129 (1997).
 10. А.И.Франк, В.Г.Носов, ЯФ **58**, 453 (1995).
 11. И.М.Франк, УФН **162**, 109 (1991).
 12. V.A.Horn, A.Zeilinger, A.G.Klein, and G.I.Opat, Phys. Rev. **A28**, 1 (1983).
 13. А.А.Серегин, ЖЭТФ **73**, 1634 (1977).
 14. К.-А.Steinhauser, A.Steyerl, H.Scheckenhofer, and S.S.Malik, Phys. Rev. Lett., **44**, 130 (1980).
 15. A.Steyerl, H.Nagel, F.Schriber et al., Phys. Lett. **A116**, 347 (1986).