

3-2013-29

На правах рукописи

K-903

КУЛИН
Герман Вячеславович

ДИФРАКЦИЯ УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
НА ДВИЖУЩЕЙСЯ РЕШЕТКЕ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

342 23

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка
Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук ОЯФ ЛНФ
ОИЯИ

А.И. Франк

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук НЭОНИКС
ЛНФ ОИЯИ

А.М. Балагуров

доктор физико-математических наук ПИЯФ РАН

В.В. Воронин

Ведущая организация:

НИЦ «Курчатовский институт»

Защита состоится «___» _____ 2013 г. в «___» часов на заседании
диссертационного совета Д 720.001.06 в Объединённом институте ядерных
исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединённого института
ядерных исследований.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



А.Г. Попеко

Актуальность

Наблюдение дифракции нейтронов на кристаллах [1] в 1936 г. явилось первым прямым свидетельством наличия у нейтрона волновых свойств. Впоследствии нейтронная дифракция превратилась в мощный экспериментальный метод исследования структуры и динамики кристаллов.

В течение еще довольно длительного времени экспериментаторам были доступны лишь тепловые нейтроны с характерной длиной волны порядка нескольких ангстрем. Поэтому наблюдение дифракции нейтронов на макроскопических объектах представляло серьезные трудности и стало возможным лишь в результате существенного прогресса экспериментальной техники. В 1969 г. Шалл впервые наблюдал дифракцию нейтронов на щели [2], а Раух с соавторами - дифракцию на оптической дифракционной решётке [3,4]. Начиная с семидесятых годов прошлого века стало возможным использовать относительно длинноволновые холодные и ультрахолодные нейтроны (УХН), что еще расширило экспериментальные возможности. В работах А. Штайерла [5,6] наблюдалась дифракция УХН на гравированной решётке со специальным профилем, а авторы работ [7,8] использовали в качестве фокусирующего устройства одномерные зонные пластинки - специальным образом рассчитанные дифракционные структуры. В ряде изящных экспериментов наблюдалась дифракция холодных нейтронов на краю поглощающего экрана [9, 10], и на щелях (опыт Юнга с нейтронами) [11].

Все эти эксперименты не только еще раз продемонстрировали справедливость основных предсказаний стационарной квантовой механики, но и привели к созданию нового поколения дифракционных приборов, нейтронных интерферометров Маха-Цендера с дифракционными решетками, нашедших применение в практике нейтронного эксперимента [12,13].

Новые качества приобретает нейтронная оптика в тех случаях, когда параметры соответствующих квантовых задач зависят от времени. Нестационарное воздействие на нейтронную волну позволяет существенным

образом менять все основные ее параметры, а именно: энергию, поляризацию, интенсивность и направление распространения. Изучение нестационарных квантовых явлений не только представляет самостоятельный интерес, но и способствует созданию новых экспериментальных методов и квантовых устройств, классическим примером чему является флиппер Раби [14,15]. Ряд новых идей о применении нестационарных квантовых явлений в нейтронной оптике обсуждался в работах [16-19].

Обращение к нестационарному случаю позволяет иногда взглянуть на хорошо известное оптическое явление с новой стороны, открывая довольно неожиданные его черты. Это вполне относится к случаю дифракции нейтронов на движущейся решетке, которому посвящена настоящая работа. В работе [20] было показано, что в случае движения дифракционной решетки поперек пучка медленных нейтронов она выступает в качестве нестационарного квантового устройства и как таковое существенно изменяет энергетический спектр падающих на нее нейтронов.

К моменту начала настоящей работы эффект квантования энергии при дифракции на движущейся решетке был качественно наблюден [21]. В тоже время результаты, полученные в этом первом эксперименте, не позволяли провести количественное сравнение с теорией, необходимость которого представлялась очевидной. Актуальность настоящей работы усиливалась и появившимися в то время предложениями по применению движущихся решеток в практике нейтронного эксперимента. В частности, обсуждалась возможность создания нейтронного интерферометра с движущимися решетками [22,23]. Предлагалось также использовать эффект нестационарной передачи энергии нейтрону в таком процессе для осуществления фокусировки нейтронов во времени [24].

Цели работы

- Экспериментальное и теоретическое исследование явления энергетического расщепления спектра при дифракции нейтронов на движущейся дифракционной решетке.

- Исследование возможности применения эффекта квантования энергии при дифракции на движущейся решетке для временной фокусировки нейтронов.
- Исследование возможности применения метода дифракции ультрахолодных нейтронов на движущейся решетке для проверки слабого принципа эквивалентности для нейтрона.

Результаты, выносимые на защиту

- Измерены и проанализированы энергетические спектры при дифракции нейтронной волны на движущейся фазовой дифракционной решетке. Получена высокая, порядка 40%, дифракционная эффективность +1 и -1 дифракционных порядков, что очень близко к расчетной величине.
- Впервые осуществлена временная фокусировка нейтронов и тем самым продемонстрирована возможность применения движущейся дифракционной решетки с переменным шагом в качестве «временной линзы».
- Получена высокая, около 30% эффективность временной фокусировки. Показано, что некоторое уменьшение эффективности по сравнению теоретической величиной в 40% связана с технологическими ошибками при изготовлении решетки.
- Продемонстрирована возможность применения метода дифракции ультрахолодных нейтронов на движущейся решетке для эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности нейтрона. Для фактора согласия с принципом эквивалентности γ получено значение $1 - \gamma = (1.8 \pm 2.1) \times 10^{-3}$.

Научная новизна

- Исследовано явление дифракции нейтронов на решетке движущейся поперек направления распространения нейтронной волны. Показано, что в полном соответствии с теорией движущаяся решетка действует как

квантовый модулятор нейтронной волны, что приводит к формированию дискретного энергетического спектра нейтронов. Эти исследования проведены впервые.

- Впервые осуществлен эксперимент по временной фокусировке нейтронов. В качестве временной линзы использовалась аperiodическая дифракционная решетка, движущаяся поперек пучка. В этом опыте эффект квантования энергии при дифракции на движущееся решетке был впервые применен в практике нейтронного эксперимента.
- Продемонстрирована возможность нового подхода к экспериментальной проверке принципа эквивалентности для нейтрона. Точно определенная величина передачи энергии квантовым модулятором – движущейся решеткой сравнивается в этом методе с величиной энергии, приобретаемой нейтроном при падении на известную величину в поле тяжести Земли.
- Осуществлен нейтронный гравитационный эксперимент нового типа, в котором принцип эквивалентности был проверен с относительной погрешностью порядка 2×10^{-3} .

Научная и практическая ценность

- Показано, что явление квантования энергии при дифракции на движущейся решетке правильно описывается существующей теорией. Это позволяет с уверенностью проектировать новые квантовые модуляторы нейтронной волны на основе движущихся структур разнообразных типов
- Продемонстрированная в работе возможность изменения энергии нейтрона на точно заданную величину при дифракции на движущейся структуре может быть использовано в практике нейтронного эксперимента.
- Метод фокусировки нейтронов во времени, осуществимость которого продемонстрирована в работе, позволяет концентрировать нейтронный поток в узком временном интервале, что открывает возможность увеличения плотности ультрахолодных нейтронов в ловушке, находящейся на значительном расстоянии от импульсного источника нейтронов [24].

Авторами работы [25] обсуждалась также возможность применения временной фокусировки для увеличения светосилы нейтронных спектрометров по времени пролета

- Эксперимент по проверке принципа эквивалентности для нейтрона основан на принципах, существенно иных, чем в осуществленных до сих пор опытах, что означает и существенно иные источники методических проблем. В этом и состоит ценность этого нового опыта. Опробованная в работе методика содержит большой потенциал для дальнейшего совершенствования, что позволит в будущем поставить аналогичный эксперимент на новом уровне точности.

Апробация работы

Результаты диссертации докладывались автором на XXXIX ежегодной зимней школе ПИЯФ (14-20 февраля 2005 года, Репино, Россия), на XI научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ (5-9 февраля 2007 года, Дубна), на XII международной конференции «избранные проблемы современной физики» (8-11 июня 2003 года, Дубна), на 3rd European Conference on Neutron Scattering (3-6 сентября 2003 года, Монпелье, Франция), на международных конференциях ISINN-11 (25-28 мая 2003 года, Дубна), ISINN-13 (25-28 мая 2005 года, Дубна), ISINN-15 (16-19 мая 2007 года, Дубна), Deutsche Neutronenstreutagung 2008 (15-17 сентября 2008 года, Гархинг, Германия) и рабочем совещании GRANIT-2010 (14-19 февраля 2010 года, Лез Уш, Франция). Основные результаты вошедшие в диссертацию опубликованы в 6 работах.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав («Дифракция нейтронов на макроскопических объектах», «Нестационарные квантовые эффекты при дифракции на движущейся решетке», «Дифракция нейтронов на движущейся фазовой решетке», «Временная фокусировка нейтронов», «Эффект квантования

энергии нейтронов при дифракции на движущейся решётке и проверка слабого принципа эквивалентности») и заключения.

Содержание диссертации

Во введении обсуждается цель и актуальность данной работы.

В первой главе дается обзор экспериментов по наблюдению дифракции нейтронов на макроскопических объектах, ряд из которых уже упоминался выше при обсуждении актуальности настоящей работы. Наибольшее внимание уделено экспериментам с дифракционными решетками.

Во второй главе приведен обзор работ, посвященным нестационарным процессам в нейтронной оптике. Он начинается с изложения задачи Мошинского об эволюции волнового фронта нейтронной волны после мгновенного извлечения из пучка идеально поглощающей заслонки. Приведено описание как некоторых теоретических работ, так и существующих экспериментов по наблюдению нестационарных квантовых эффектов в нейтронной оптике.

Наиболее подробно приведено изложение работы [20] в которой рассмотрена задача о дифракции нейтронной волны на дифракционной решётке, движущейся поперек направления распространения нейтронной волны. Показано, что при достаточно большой скорости решётки V и малом векторе обратной решётки $2\pi/L$ решение сводится к виду

$$\psi(x, y, t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} C_j e^{i[k_j x + (k_y + q_j)y - \omega_j t]}$$

$$k_j = k \left(1 + j \frac{\Omega}{\omega} \right), \quad \omega_j = \omega + j\Omega$$

$$C_j = \frac{1}{L} \int_0^L \tau(y) e^{-iq_j y} dy$$

Здесь L – период решетки, $q_j = 2\pi j/L$ – вектор обратной решётки, j -целое, определяющее порядок дифракции, $\tau(y)$ – функция пропускания одного элемента являющаяся, вообще говоря, комплексной, $\Omega = 2\pi \frac{V}{L}$ – частота модуляции.

Третья глава посвящена описанию эксперимента по измерению энергетического спектра нейтронов после дифракции на движущейся фазовой решётке и соответствия его теоретическим предсказаниям

Дается подробное описание экспериментальной установки (гравитационного спектрометра с нейтронными интерференционными фильтрами (Рис.1.)) и условий эксперимента осуществленного на пучке ультрахолодных нейтронов (УХН) в ИЛЛ (Гренобль). Основным спектрометрическим элементом прибора являлись нейтронные интерференционные фильтры (НИФ) [26-30]. Вместо линейно движущейся дифракционной решётки использовалась фазовая вращающаяся решётка с радиальными штрихами. На ее периферической области, имевшей форму кольца, методом фотолитографии были приготовлены радиальные канавки (Рис.2). В этом случае частота модуляции определяется следующим образом

$$\Omega = 2\pi \frac{V}{L} = 2\pi \frac{2\pi f R}{\alpha R} = 2\pi f N$$

Здесь α – угловой период, f – частота вращения, R – радиус, N – полное число штрихов.

В поставленном эксперименте измерялась скорость счета детектора как функция положения анализатора по высоте. В случае покоящейся решётки, соответствующая кривая сканирования есть фактически просто свертка спектральных функций монохроматора $f(E_z)$ и анализатора $\eta(E_z)$

$$F_1(z) = \int f(E_z) \eta(E_z - mgz) dE_z,$$

где m – масса нейтрона, g – ускорение свободного падения, а z – расстояние между фильтрами.

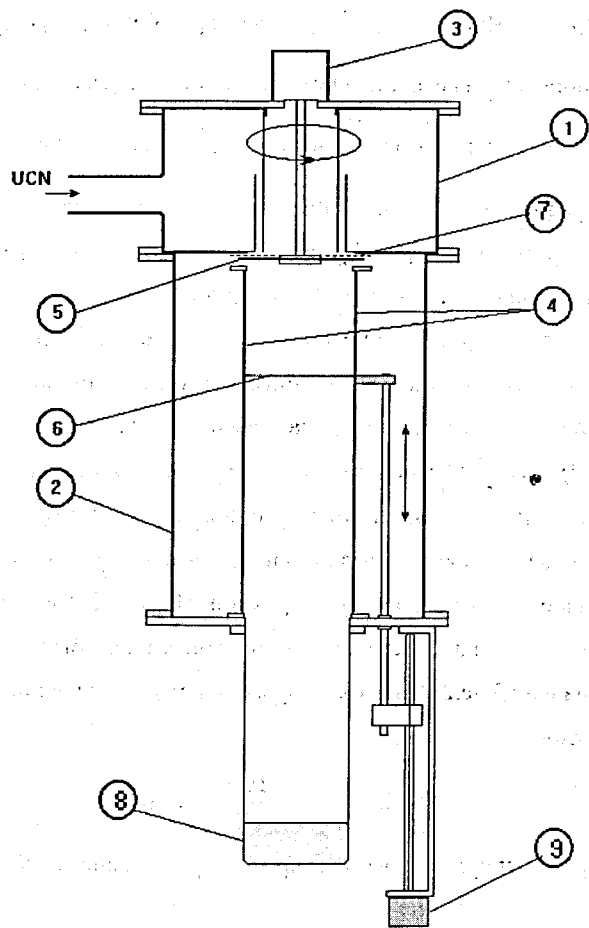


Рис.1. Гравитационный спектрометр с нейтронными интерференционными фильтрами.

1- входная камера, 2 - вакуумная камера, 3- мотор для вращения решетки, 4- зеркальный нейтронвод, 5- вращающаяся решетка, 6 - фильтр-анализатор, 7-фильтр-монохроматор, 8-детектор, 9- шаговый двигатель

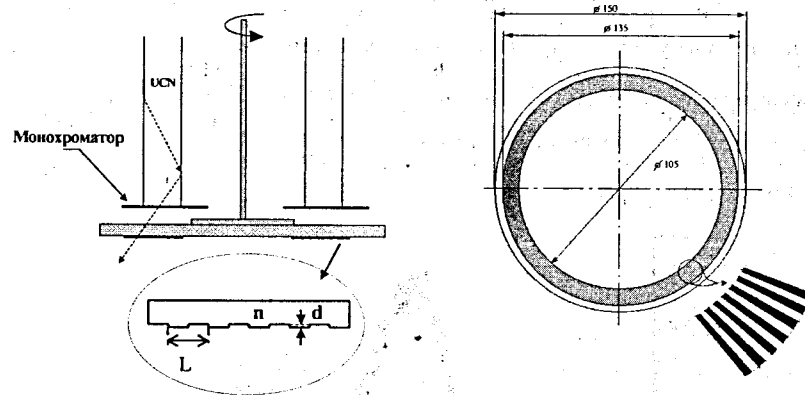


Рис. 2. Вращающаяся фазовая дифракционная решетка с радиальной структурой

В случае вращающейся решетки кривая сканирования изменит свой вид и, в случае узкой спектральной линии монохроматора, будет иметь вид

$$F_2(z) = \sum_j |C_j|^2 F_1\left(z + j \frac{\hbar\Omega}{mg}\right).$$

где F_2 – результирующий спектр, как функция расстояния между двумя нейтронными интерференционными фильтрами, E_z – средняя энергия пропускаемых монохроматором нейтронов.

Для подробного анализа согласия экспериментального спектра с расчетами корректности используемого теоретического подхода, было измерено поведение спектра при разных частотах вращения дифракционной решетки (рис. 3).

В полученных спектрах основной информацией являлись как амплитуды A , так и величина расщепления Δ . Для зависимости расщепления от частоты $\Delta = B \cdot f$ было получено согласие в коэффициенте наклона B на уровне 2% ($B_{\text{exp}} = 0.746 \pm 0.003$ мм·сек, в то время как расчетное значение для этой решетки $B_{\text{th}} = 0.7624$ мм·сек). При частоте вращения 7Гц расщепление спектра мало.

Напротив, при частоте 99 Гц, кривая сканирования представляет собой фактически сумму двух гауссовых кривых с амплитудами $A \cdot |a_1|^2$. Поэтому сравнивая экспериментальные значения величин A при этих двух частотах можно судить о степени соответствия интенсивностей линий первого порядка их теоретическим значениям.

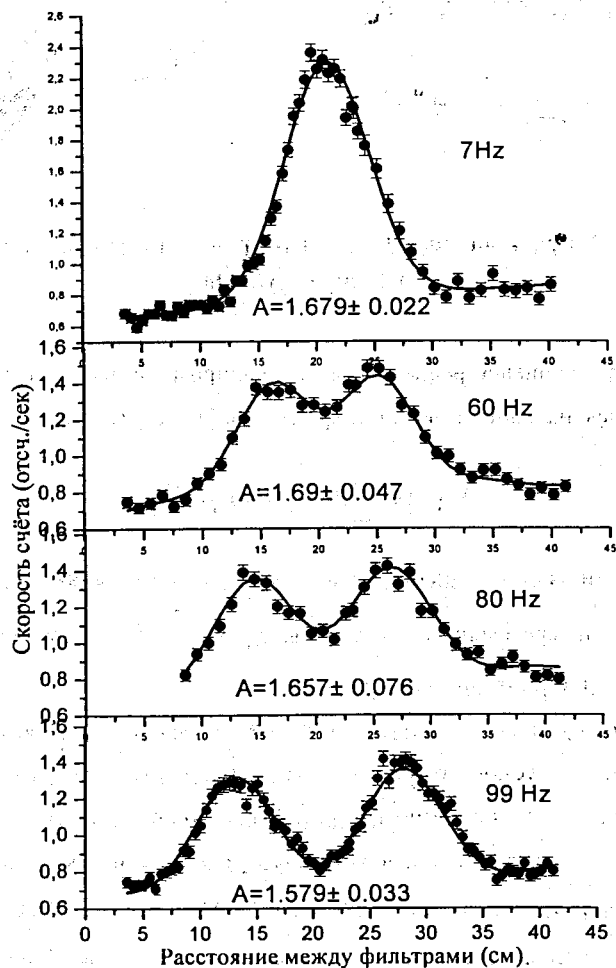


Рис. 3. Скорость счета детектора в зависимости от расстояний между фильтрами, измеренная при разных частотах

Для относительной интенсивности волн первого порядка было получено значение $|a_1|_{\text{exp}}^2 = 0.371$, что близко к расчётному $|a_1|_{\text{th}}^2 = 0.403$. Двухпроцентное расхождение в величине наклона, а также семипроцентный дефицит дифракционной эффективности решётки может быть объяснен некоторой неидеальностью ее профиля.

При анализе дифракции УХН на движущейся дифракционной решётке интенсивность соответствующих порядков вычислялась в предположении, что функция пропускания одного элемента $\tau(y)$ неизменна при приведении решетки в движение. На самом деле, в системе координат решетки нейтроны падают на неё под скользящим углом. Последний определяется как $\alpha \approx \text{tg} \alpha = v_n / V$, где v_n – скорость нейтрона, а V – скорость решётки. Таким образом, истинная функция пропускания для большой скорости нейтрона может значительно отличаться от прямоугольной (см. рис.4). Поэтому движение решетки приводит к появлению краевого эффекта и, как следствие, к возникновению волн с четными порядками дифракции. В условиях описываемого эксперимента крайовой эффект достаточно мал, но в случае больших скоростей движения решётки или уменьшении ее периода роль данного эффекта может стать заметной.

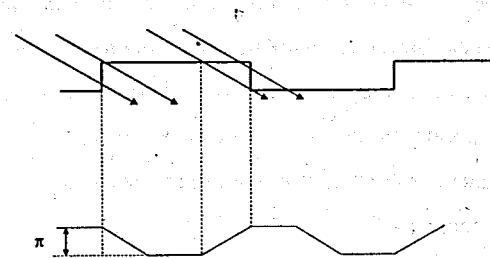


Рис.4. Краевой эффект из-за наклонного падения на фазовую дифракционную решетку. Внизу показано условно изменение фазы прошедшей волны.

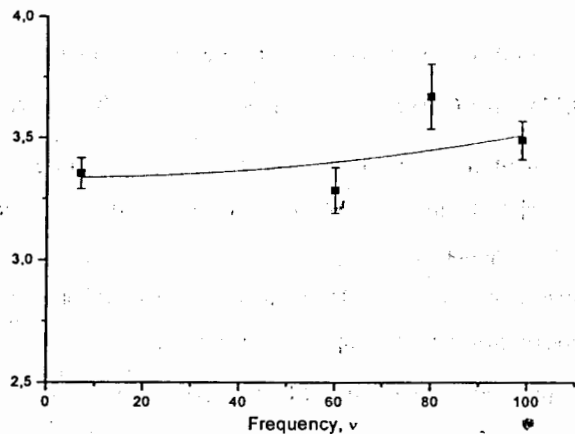


Рис. 5. Дисперсия спектра первого порядка σ , как функция частоты вращения решётки

Отдельный параграф этой главы посвящен проблеме возможной оценки поперечного размера когерентности свободного нейтрона. В оптике известно, что при дифракции плоской волны на решетке с ограниченными размерами ξ результирующие волны характеризуются некоторым угловым распределением с шириной порядка λ/ξ . Такая же ситуация имеет место в том случае, если решетка имеет бесконечную протяженность, но падающая волна ограничена в поперечном размере. В диссертации показано, что при на движущейся решетке ограничение в размере когерентного фронта приводит к уширению не углового, как в обычном случае, а энергетического распределения. Это дополнительное уширение спектра пропорционально скорости решетки. В условиях эксперимента это должно приводить к дисперсии спектральных кривых σ , зависящей от скорости движения решётки V

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \left(\frac{\hbar}{\xi\sqrt{2}}V\right)^2}$$

где σ_0 – ширина спектра, при покоящейся дифракционной решётке, ξ – пространственная дисперсия (гауссово) волнового пакета. Из анализа ширин экспериментальных кривых сканирования, измеренных при разных скоростях решетки (рис. 5) было получено ограничение на величину поперечной длины когерентности $\ell = 2\sqrt{2 \ln(2)}\xi$, $\lambda > 4.7 \times 10^{-3}$ см.

Четвертая глава посвящена эксперименту по временной фокусировке нейтронов. Принцип временной фокусировки, так как он изложен в работе [24] состоит в следующем. Пусть в момент $t=0$ из точки $x=0$ в положительном направлении оси X вылетают нейтроны, скорости которых v распределены в некотором интервале величин. Тогда время их прихода в точку $x=L$, также распределено в некотором интервале значений. Фокусировка во времени означает выполнение условия одновременного прихода нейтронов в эту точку. Для этого необходимо определенным образом воздействовать на скорость нейтрона с помощью некоторого устройства, так называемой «временной линзы», расположенной в точке $x=a$ так, чтобы выполнялось соотношение

$$\frac{a}{v_a} + \frac{b}{v_b} = t_0, \quad a + b = L$$

здесь v_a и v_b – скорости нейтрона до и после «временной линзы» соответственно, L – точка для которой будет выполнено условие временной фокусировки, t_0 – полное время пролета.

Чтобы удовлетворить условию фокусировки, нужно сообщать нейтрону энергию

$$\Delta E(t) = \frac{1}{2} m \left| \frac{b^2}{(t_0 - t)^2} - \frac{a}{t^2} \right|, \quad t = a/v_a$$

Для достижения эффекта фокусировки нейтроны, достигшие линзы за время меньше, чем $t_0 (a/L)$, необходимо замедлить, а пришедшие позднее – ускорить.

Поскольку эксперимент является по-существу время-пролетным, то для его успеха было необходимо обеспечить как условие определенности пролетного пути, так и неизменности продольной (в реальных условиях – вертикальной) компоненты скорости нейтрона за все время его пребывания в приборе. Для решения первой задачи был создан сцинтилляционный детектор УХН, с тонким чувствительным слоем, описание которого приводится в диссертации. Для исследования время - пролетных свойств спектрометра был поставлен ряд контрольных экспериментов как в режиме фурье-спектрометрии, так и в классической постановке.

Для демонстрационного эксперимента был выбран подход с временной фокусировкой стационарного потока изначально монохроматических нейтронов (рис.6), что аналогично пространственной фокусировке параллельных лучей в оптике. При этом в точке детектирования нейтроны оказываются сгруппированными в узком временном интервале, в то время как поступающие в прибор нейтроны имеют равномерное во времени (но статистическое) распределение. В качестве «временной линзы» была выбрана фазовая дифракционная решётка с переменным пространственным периодом.

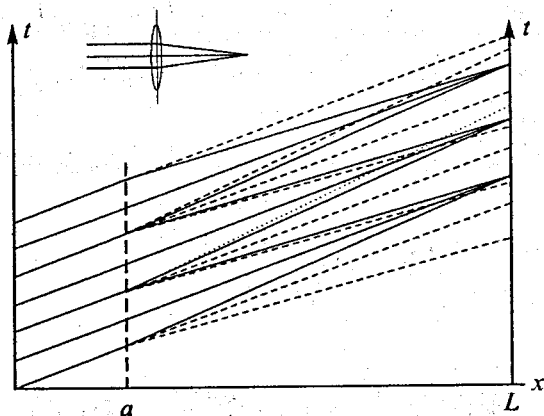


Рис. 6. Случай фокусировки от стационарного источника монохроматических нейтронов

Цикл ее действия определялся временем оборота диска, на котором нанесена дифракционная структура. В течение первой половины периода вращения фокусировались нейтроны, соответствующие порядку ($j = -1$), с энергией $E(t) = \hbar[\omega - \Omega(t)]$, а во второй половине цикла нейтроны с энергией $E(t) = \hbar[\omega + \Omega(t)]$ ($j = +1$). Нейтроны, отвечающие всем остальным порядкам, создавали пьедестал (равномерную подложку). Максимальная эффективность фокусировки должна определяться в таком случае интенсивностью волн первого порядка, что в случае фазовой π -решётки составляет в пределе около 40%.

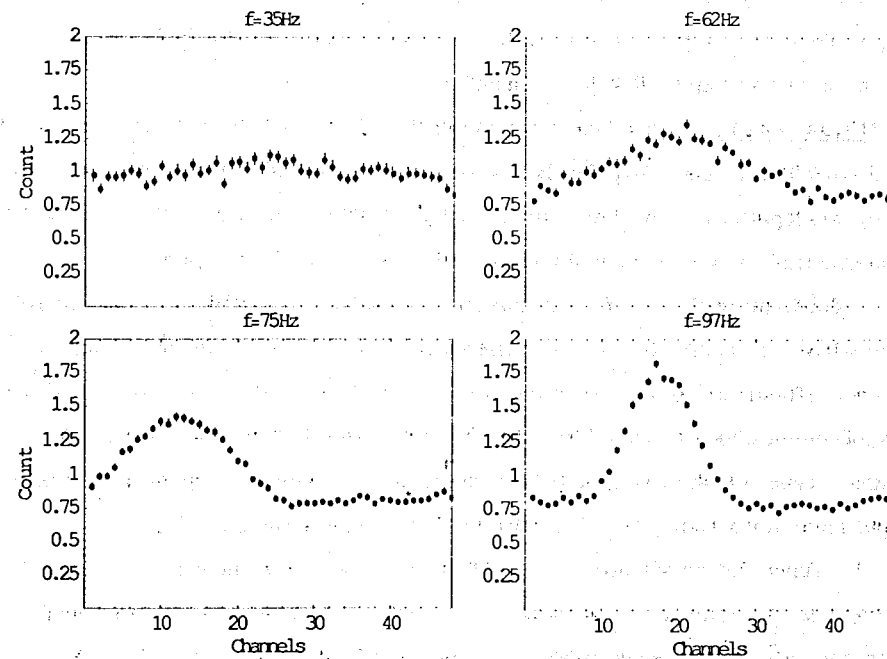


Рис. 7. Распределение моментов прихода нейтронов в детектор на периоде обращения решётки при различных частотах ее вращения.

Были измерены распределения моментов прихода нейтронов в детектор при нескольких частотах вращения решётки (рис. 7). Видно, что с увеличением частоты распределение моментов регистрации становится неравномерным и имеет выраженный пик, свидетельствующий о наличии эффекта фокусировки. Эффективность фокусировки определялась как отношение интеграла под пиком, отсчитанного от уровня пьедестала к полному числу нейтронов за вычетом фона. Максимально достигнутая эффективность фокусировки в эксперименте составила 29% что оказалось ниже расчетной. Электронно-микроскопическое исследование фрагментов решётки показало, что штрихи и канавки, образующие структуру решётки имеют различную ширину, что очевидно является следствием ошибки при ее изготовлении. Расчёты для реальной структуры решётки показали, что эффективность фокусировки должна тогда составлять около 30%, что хорошо согласуется с экспериментальным значением.

Пятая глава посвящена эксперименту по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона. В начале главы сделан небольшой исторический обзор экспериментов по измерению ускорения свободного падения и проверке эквивалентности инерциальной и гравитационной масс для нейтрона.

Необходимость таких экспериментов обусловлена относительно низкой точностью существующих экспериментов так по проверке принципа эквивалентности (ПЭ) для нейтрона, особенно в сравнении с точностью опытов с макроскопическими телами и атомами. Кроме того, в течение уже пятнадцати лет ожидает своего ответа вопрос о реальности расхождения с теорией результатов гравитационного эксперимента с нейтронным интерферометром [31].

Идея эксперимента заключается в сравнении изменения энергии нейтрона при свободном падении в гравитационном поле Земли, с изменением энергии нейтрона $\Delta E = \hbar\Omega$ передаваемой ему при дифракции на ДР. На рисунке 8 представлена схема, поясняющая эту идею.

Пусть начальный энергетический спектр нейтронов формируется монохроматором с узкой линией пропускания $f(E)$ с максимумом пропускания

E_0 . Если ниже монохроматора расположен анализатор с такой же функцией пропускания, то уже при небольших расстояниях h между двумя этими устройствами система в принципе оказывается непрозрачной, поскольку в точке расположения монохроматора нейтрон будет иметь энергию $E_0 + m_g g_n h'$.

Однако если на пути между монохроматором и анализатором дополнительно уменьшить энергию нейтрона на величину $\Delta E = \hbar\Omega$, то найдется положение анализатора, при котором он будет пропускать нейтроны. Функция пропускания такой системы будет иметь вид

$$F(h) = \int f(E) f(E - m_g g_n h + \hbar\Omega) dE$$

Очевидно, что она имеет максимум при расстоянии между фильтрами h_0 , удовлетворяющему условию $m_g g_n h_0 = \hbar\Omega$.

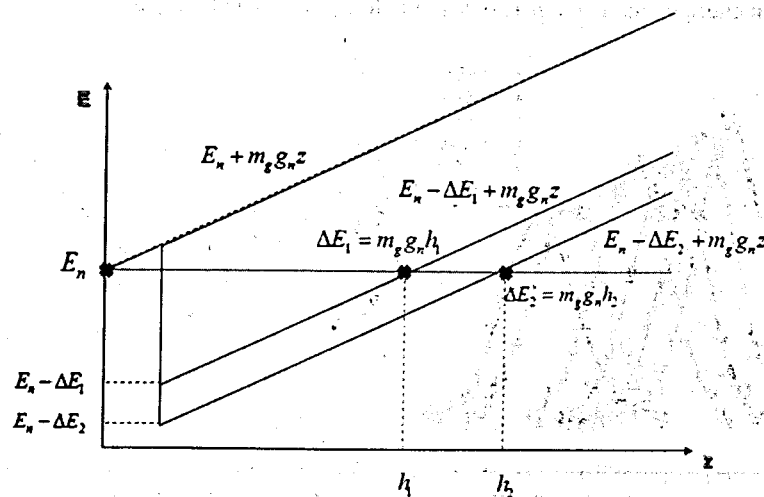


Рис. 8. Идея схема эксперимента по проверке слабого принципа эквивалентности.

В качестве нестационарного устройства удобно использовать вращающуюся решётку. Напомним, что для решётки с радиальными штрихами частота модуляции определяется только полным числом штрихов N и частотой ее вращения f . Число N , может быть известно точно, а частота вращения f определена с высокой точностью.

Для первоначальной монохроматизации нейтронов и анализа спектра после дифракционной решётки использовались интерференционные фильтры с узкой линией пропускания разнесенные по высоте. Положение резонанса пропускания у обоих фильтров было при одной и той же энергии 107 нэВ.

В эксперименте измерялась зависимость скорости счета от положения анализатора при различных частотах вращения решетки, от 45 до 105 оборотов в секунду. Это соответствовало частотам модуляции от 21 до 51 МГц. Полученные кривые аппроксимировались гауссианом. Из полученных параметров аппроксимирующих кривых была построена зависимость положения максимума скорости счета от частоты, имеющая линейный вид $h_0(f) = c + Bf$.

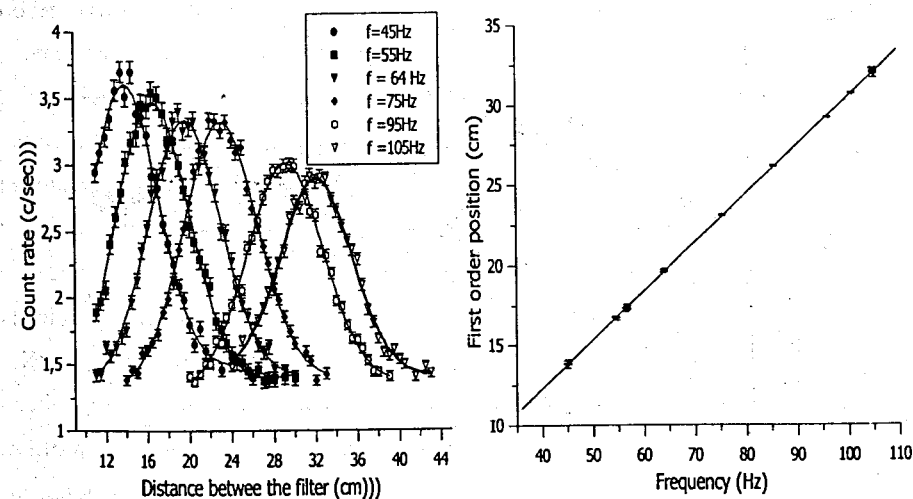


Рис.9. Зависимость скорости счета как расстояние между анализатором и монохроматором (кривые сканирования) (слева), Зависимость положения максимума кривой сканирования от частот (справа)

Отношение экспериментального и теоретического значений коэффициента наклона B характеризует фактор выполнения принципа эквивалентности

$$\gamma = \frac{B_{\text{exp}}}{B_{\text{th}}} = \frac{m_g g_n}{m_i g_{\text{loc}}}, \text{ где } g_{\text{loc}} - \text{местное значение ускорения свободного падения}$$

макроскопических тел, m_i — инерциальная масса нейтрона. В результате для фактора γ было получено значение $1 - \gamma = (1.8 \pm 2.1) \times 10^{-3}$. Таким образом, результаты опыта свидетельствуют, что по крайней мере с указанной точностью нейтрон падает в поле тяжести Земли также как и макроскопическое тело. Этот результат отличается на три стандартных отклонения от результатов работы [31], противоречащих принципу эквивалентности.

Другим важным итогом этой работы является демонстрация того, что метод дифракции ультрахолодных нейтронов на движущейся решётке вполне может быть положен в основу экспериментов по проверке слабого принципа эквивалентности нейтрона. Эксперименты, основанные на этом принципе сейчас ведутся [32].

Основные результаты и выводы диссертации

- Измерены и проанализированы энергетические спектры при дифракции нейтронной волны на движущейся фазовой дифракционной решётке. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теорией. Дифракционная эффективность решетки в ± 1 порядках близка к теоретическому пределу для таких решеток, составляющему 40%.
- Показано, что из анализа энергетических спектров при дифракции нейтронной волны на движущейся дифракционной решётке можно получить ограничения для поперечного размера когерентности нейтронной волны. В поставленном эксперименте она составляла $\lambda > 4.7 \times 10^{-3}$ см.
- Продемонстрирована возможность временной фокусировки нейтронов. В качестве временной линзы использовалась аперриодическая вращающаяся

дифракционная решётка. Эффективность фокусировки составила около 30%. Результатом микроскопического исследования параметров решетки и проведенных на этой основе расчетов является вывод о соответствии этой величины с теорией. Для фазовой π -решётки эффективность фокусировки может достигать 40%.

- Продемонстрирована возможность применения метода дифракции ультрахолодных нейтронов на движущейся решётке для проверки слабого принципа эквивалентности (ПЭ) нейтрона.
- Результаты эксперимента согласуются с представлениями о справедливости ПЭ. Для фактора эквивалентности, характеризующее это согласие получена величина $1 - \gamma = (1.8 \pm 2.1) \times 10^{-3}$. Этот результат отличается на три стандартных отклонения от результатов эксперимента с нейтронным интерферометром, противоречащих принципу эквивалентности

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. A.I. Frank, P. Geltenbort, M. Jentschel, G.V. Kulin, D.V. Kustov, V.G. Nosov, A.N. Strepetov « *New test of the weak equivalence principle for neutrons,* » // NIM A 611, 314 (2009);
2. А.И.Франк, П.Гелтенборт, М.Жентшель, Г.В.Кулин, Д.В.Кустов, В.Г.Носов, А.Н.Стрепетов « *Новый гравитационный эксперимент с ультрахолодными нейтронами,* » // Письма в ЖЭТФ 86, 255 (2007);
3. А.И.Франк, П.Гелтенборт, Г.В.Кулин, Д.В.Кустов, В.Г.Носов, А.Н.Стрепетов « *Дифракция нейтронов на движущейся решётке как нестационарное квантовое явление,* » // Письма в ЖЭТФ 81, 541 (2005);
4. S.N.Balashov, I.V.Bondarenko, A.I.Frank, P.Geltenbort, P.Nøghøj, G.V.Kulin, S.V.Masalovich, V.G.Nosov, A.N.Strepetov « *Diffraction of ultracold neutrons on a moving grating and neutron focusing in time,* » // Physica B 350, 246 (2004);
5. А.И.Франк, П.Гелтенборт, Г.В.Кулин, Д.В.Кустов, В.Г.Носов, А.Н.Стрепетов « *Спектрометрия УХН при дифракции на движущейся решётке,* » // Сообщение ОИЯИ РЗ-2004-207, Дубна (2004);
6. А.И.Франк, П.Гелтенборт, Г.В.Кулин, А.Н.Стрепетов « *Квантовая временная линза для ультрахолодных нейтронов,* » // Письма в ЖЭТФ 78, 224 (2003);

Список литературы:

1. H. Halban, P. Preiswerk, C.R. Ac. Sci., 203 (1936) 73.
2. C.G.Shull, Phys.Rev. 179 (1969) 752.
3. H. Kurz, H.Rauch. Z.Phys., 220 (1969) 419.
4. A.Graf, H.Rauch, T.Stern. Atomkernenergie, 33, (1979) 298.
5. H. Scheckenhofer and A.Steyerl, Phys.Rev.Lett. 39, (1977) 1310.
6. A.Steyerl, W.Drexel, S.S.Malik and E.Gutsmiedl. Physica B 151 (1988) 36.
7. P.D.Kearney, A.G. Klein, G.I.Opat, and R.Gähler, Nature, 287 (1980) 313.
8. A.G.Klein, P.D.Kearney, G.I.Opat, A.Cimmino, R.Gähler. Phys.Rev.Lett. 46 (1981) 959.
9. A.G.Klein and G.I.Opat. Am.J.Phys. 45 (1977) 295.
10. R.Gähler, A.G.Klein, A.Zeilinger. Phys.Rev A23 (1981) 1611.
11. A.Zeilinger, R.Gähler, C.G.Shull, W.Mampe. Rev. Mod. Phys. 60 (1988) 1067.
12. A.I. Ioffe, V.S. Zabiaykin, G.M.Drabkin. Phys.Lett. A111 (1985) 373.
13. M.Gruber, K.Eder, A.Zeilinger, R.Gähler, W.Mampe. Phys.Lett.A140 (1989) 373.
14. I.I. Rabi, Phys.Rev. 51, (1937) 652.
15. I.I. Rabi, J.R Zacharias, S. Milman and R. Kush. Phys.Rev. 53, (1938) 318.
16. А.И.Франк, В.Г.Носов. Ядерная физика, 57, 1029 (1994).
17. J. Felber, R.Gähler, R. Golub. Foundations of Physics, 29, (1999) 381.
18. M. Bleuel, F. Demmel, R. Gähler, et al. Lecture Notes in Physics 601, (2003), 176.
19. А.В.Козлов, А.И.Франк. Ядерная физика, 68, (2005) 1149.
20. A.I.Frank, V.G.Nosov. Phys. Lett. A. 188 (1994) 120.
21. A.I.Frank, L.V.Bondarenko, S.N.Balashov and S.V.Masalovich. ILL Annual Report, (2001) 80; A.I.Frank, S.N.Balashov, I.V.Bondarenko, et al. Physics Letters A 311 (2003) 6.
22. A. Ioffe, Physica B 234, (1997) 1180.

23. A.I.Ioffe. In Neutron Spin Echo Spectroscopy, Ed. by F. Mezei, C. Pappas and T. Gutbertlet, (Springer), p.160;
24. A.I.Frank, R.Gähler. ISINN-4. JINR, E3-96-336, Dubna (1996) 308;
А.И.Франк, Р.Гэйлер. Ядерная Физика, 63 (2000) 605
25. Baumann K., Gähler R., Grigoriev P., and Kats E. I. Time lens for high-resolution neutron time-of-flight spectrometers. Phys.Rev. A, 72 (2005) 043619
26. Frank A.I., Geltenbort P., Jentschel M., Kulin G.V., Kustov D.V., Nosov V.G., Strepetov A.N. Nucl. Instrum. Meth. A. 611 (2009) 314.
27. A.A.Seregin, JETP, 73 (1977) 1634.
28. К.-А. Steinhauser, A. Steyerl, H. Scheckenhofer, S.S. Malik, Phys. Rev. Lett. 44 (1980) 1306.
29. Покотиловский Ю.Н., Стойка А.Д., Шелкова И.Г. ПТЭ. (1980) №1, 62
30. A. Steyerl, W. Drexel, S.S. Malik, E. Gutsmiedle, Physica B. 151, (1988), 36.
31. Littrell K. C., Allman B.E. and Werner S.A. Phys.Rev. A., 56 (1997) 1767.
32. W.A.Hamilton, A.G.Klein, G.I.Opat. Phys.Rev.Lett., 1987. 58. 2770;

Получено 27 марта 2013 г.