

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ И. М. ФРАНКА

На правах рукописи



Захаров Максим Андреевич

**Численные исследования нестационарных квантовых явлений
в нейтронной оптике**

Специальность 01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
Кандидата физико-математических наук

Дубна – 2021

Работа выполнена в Лаборатории Нейтронной Физики имени И. М. Франка
Объединённого Института Ядерных Исследований.

Научный руководитель – **Франк Александр Ильич,**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник ЛНФ ОИЯИ

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте
Объединённого института ядерных исследований в информационно-
телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:

<https://dissertations.jinr.ru/ru/Dissertations/CalendarThesisDefenses>).

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической
библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Быстрицкий Юрий Михайлович

Общая характеристика диссертации.

Актуальность работы и степень проработанности области исследования.

Известно, что нейтрон является весьма удобным объектом для изучения нестационарных квантовых явлений. Все известные на данный момент нестационарные квантовые эффекты в нейтронной оптике можно условно разделить на две группы. В первую группу входят эффекты, в основе которых лежит амплитудная или фазовая модуляция волны. Вторая группа включает в себя эффекты, возникающие при взаимодействии нейтронной волны с объектом, чьи свойства меняются во времени.

К исследованиям эффектов первой группы можно отнести, например, работы по изучению квантовых эффектов, возникающих в результате временной модуляции нейтронной волны [1 - 5]. В эту же группу входят работы, посвящённые изучению дифракции нейтронов на поверхностной бегущей волне [6, 7], и движущейся поперёк пучка нейтронов дифракционной решётке [8 - 11].

Исследованию эффектов второй группы посвящено значительное число работ, по изучению взаимодействия нейтронов с потенциалом, переменным во времени, (см. например, [12 - 15]). Ко второй группе также можно отнести исследования явления переворота спина в системе переменных полей [16 – 18] и работы по изучению переходов между квантовыми уровнями состояния нейтрона в гравитационном поле Земли [19 – 21].

Несмотря на довольно большое количество исследований, посвящённых этой проблеме, практически ни в одном из них не затрагивался вопрос о соотношении между характерным временем изменения потенциала и временем взаимодействия волны с объектом.

Что касается проблемы отражения нейтронов от осциллирующего потенциала, то в обычных условиях время отражения в таких системах оказывается много меньшим периода осцилляции и едва ли может оказывать сколько-нибудь заметное влияние на состояние отраженного состояния. Однако

можно ожидать, что в общем случае соотношение между временем взаимодействия и периодом осцилляции может быть существенным.

Для исследования этого вопроса разумно обратиться к потенциальным структурам, которые характеризуются временем формирования прошедшего или отражённого состояния много большим, чем время свободного пролёта частицы через область потенциала. Подобным свойством, в частности, обладают такие объекты как нейтронный интерференционный фильтр [22-24], или двухступенчатая потенциальная структура [25, 26].

Эта область нейтронной оптики остаётся слабоизученной, а исследования нестационарных квантовых эффектов в системах с большим временем взаимодействия, несомненно, являются очень актуальными.

Цели и задачи диссертации.

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию нестационарных квантовых эффектов в нейтронной оптике. В их числе взаимодействие нейтронов с ускоряющимися квантовыми объектами, отражение нейтронов от осциллирующей резонансной потенциальной структуры, нестационарная дифракция нейтронов на движущейся решётке. В первых двух задачах время взаимодействия нейтрона и квантового объекта может оказывать значительное влияние на результирующее состояние.

Диссертацию можно условно разделить на две части.

Первая часть посвящена теоретическому анализу взаимодействия нейтронов с различными резонансными потенциальными структурами, движущимися с ускорением. Рассмотрены случаи осциллирующего и равноускоренного движения потенциала.

Во второй части приводится описание созданной автором математической модели эксперимента по изучению дифракции нейтронов на движущейся дифракционной решётки конечной толщины. Кроме того, представлены результаты самого эксперимента и сравнительный анализ результатов моделирования и полученных экспериментальных данных.

В ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Освоена методика численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера, основанная на методе расщепления оператора эволюции. Алгоритм расчёта модернизирован для распределённых вычислений, что позволяет проводить расчёты с большой точностью.
2. С целью демонстрации существования эффекта ускорения в квантовом секторе проведено численное исследование задачи о взаимодействии волнового пакета с различными равноускоренными потенциальными структурами.
3. Проведён теоретический анализ проблемы отражения нейтронов от осциллирующей в пространстве двойной потенциальной ступени, обладающей резонансными свойствами. Расчёты выполнены тремя методами: на основе квазистационарного подхода, решением системы уравнений непрерывности, численным решением нестационарного уравнения Шрёдингера для данной задачи.
4. Проведено численное исследование задачи о прохождении волнового пакета через осциллирующий в пространстве нейтронный интерференционный фильтр.
5. Создан комплекс программ для моделирования эксперимента по измерению спектра нейтронов, прошедших через движущуюся дифракционную решётку.
6. С использованием метода времяпролётной Фурье-спектроскопии проведён эксперимент по изучению нестационарной дифракции нейтронов на движущейся решётке.
7. Проведено сравнение спектров нейтронов, полученных в эксперименте, со спектрами, полученными в результате компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Продемонстрирована справедливость гипотезы существования эффекта ускорения в квантовой механике.

2. Продemonстрировано влияние времени взаимодействия на спектр отражённого состояния при отражении нейтронной волны от осциллирующей в пространстве резонансной потенциальной ступени.
3. Показана возможность использования осциллирующего в пространстве интерференционного фильтра в качестве квантового модулятора прошедшего состояния.
4. Создана численная модель эксперимента по изучению нестационарной теории дифракции нейтронов на движущейся решётке. Результаты моделирования применены к обработке полученных экспериментальных данных.
5. Продemonстрирована возможность влияния глубины канавки дифракционной решётки на соотношение интенсивностей дифракционных порядков.

Личный вклад автора состоит в активном участии в постановке задач, разработке концептуальной части исследования. Автором были выполнены все численные и аналитические расчёты, анализ и обработка полученных результатов. Дискуссии, обсуждение результатов и формирование выводов велись при непосредственном участии автора.

Апробация и достоверность работы.

По теме диссертации опубликовано 5 работ в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК, которые входят в базу данных Scopus и РИНЦ.

1. Maxim Zakharov, Alexander Frank, German Kulin, et al., *New test of the dynamic theory of neutron diffraction by a moving grating*, EPJ Web of Conferences, **177**, 03005 (2018).
2. Г. В. Кулин, А. И. Франк, М. А. Захаров, и др., *Нестационарная дифракция ультрахолодных нейтронов на движущейся решётке и эффективность передачи энергии нейтрону*, ЖЭТФ, **156**, 868 (2019) [G. V. Kulin, A. I. Frank, M. A. Zakharov et al., *Nonstationary Diffraction of Ultracold Neutrons from a Moving*

Grating and Efficiency of Energy Transfer to a Neutron, J. Exp. Theor. Phys., **129**, 806 (2019)].

3. М. А. Захаров, А. И. Франк, Г. В. Кулин, С. В. Горюнов, *Взаимодействие ультрахолодных нейтронов с осциллирующим в пространстве нейтронным интерференционным фильтром*, Поверхность, **1**, 9 (2020) [M. A. Zakharov, A.I. Frank, G. V. Kulin and S. V. Goryunov, *Interaction of Ultracold Neutrons with a Neutron Interference Filter Oscillating in Space*, Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques, **14**, 6 (2020)].
4. М. А. Zakharov, G. V. Kulin, A. I. Frank, *Interaction of a wave packet with potential structures moving with acceleration*, Eur. Phys. J. D, **75**, 47 (2021).
5. М. А. Zakharov, A. I. Frank, G. V. Kulin, *Reflection of neutrons from a resonant potential structure, oscillating in space*, Phys. Lett. A, **420**, 127748 (2021).

Результаты исследований докладывались на научных семинарах отделения ядерной физики лаборатории нейтронной физики имени И.М. Франка Объединённого Института Ядерных Исследований (Дубна), а также на следующих конференциях:

1. European Conference on Neutron Scattering (2015), постерный доклад.
2. International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei ISSIN 24 (2016), устное выступление.
3. International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei ISSIN 25 (2017), постерный доклад.
4. International conference on Neutron Optics (2017), постерный доклад.
5. XXI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (2017), устное выступление.
6. 47-я сессия ПАК по ядерной физике (ОИЯИ, 2018), постерный доклад.
7. Конференция по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС (2018), устное выступление.
8. XXIII международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (2019), устное выступление.

9. International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei ISSIN 27 (2019), устное выступление.
10. European Conference on Neutron Scattering (2019), устное выступление.
11. International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei 28 (2021), устное выступление.
12. Конференция по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС (2021), устное выступление.

Научная и практическая значимость полученных результатов.

Полученные теоретические результаты имеют фундаментальное значение. Большая их часть может быть подтверждена прямым экспериментом. Многие из них могут иметь и практическое применение. Эта возможность обусловлена тем, что результатом нестационарного воздействия на волну является точно известное изменение энергии. В частности, нестационарная дифракция нейтронов на движущейся аперидической решётке, позволяет управлять энергией нейтронов и осуществлять фокусировку нейтронов во времени. Принцип временной фокусировки может послужить основой для создания светосильного источника ультрахолодных нейтронов на импульсных реакторах. Продемонстрированная в эксперименте возможность влиять на интенсивность ненулевых дифракционных порядков путем оптимизации профиля решетки также может иметь большое практическое значение.

Объём и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы.

В первой главе содержится обзор основных работ по изучению нестационарных квантовых эффектов в нейтронной оптике, позволяющий судить о современном состоянии этой области исследований.

Во второй главе приведены результаты численного исследования проблемы взаимодействия волнового пакета с различными равноускоренными квантовыми

объектами, демонстрируется наличие эффекта ускорения для всех рассмотренных задач.

В третьей главе проводится теоретический анализ проблемы отражения волнового пакета от осциллирующей в пространстве резонансной потенциальной ступени. Оценивается влияние времени отражения и факта ускоренного движения потенциала на результирующее состояние. Приводятся результаты численного исследования проблемы взаимодействия волнового пакета с осциллирующим в пространстве интерференционным фильтром.

В четвёртой главе приводится изложение основных принципов динамической теории дифракции на объёмной дифракционной решётке, а также описание эксперимента по изучению нестационарной дифракции нейтронов на движущейся дифракционной решётке. Кроме того, описан комплекс программ численного моделирования этого эксперимента. Приведены результаты сравнения данных эксперимента с результатами численного моделирования.

В заключении суммируются полученные результаты.

Основное содержание диссертации.

В первой главе содержится обзор основных работ по изучению нестационарных квантовых эффектов в нейтронной оптике, позволяющий судить о современном состоянии этой области науки. В основу главы положено описание пяти основных направлений исследования в этой области:

1. Нестационарный переворот спина нейтрона в магнитном поле.
2. Квантовая модуляция пучка нейтронов.
3. Отражение нейтронов от осциллирующего зеркала.
4. Дифракция нейтронов на бегущей волне и движущейся решётке.
5. Переходы между гравитационными уровнями.

Во второй главе приведены результаты численного исследования взаимодействия волнового пакета с различными равноускоренными квантовыми объектами [27]. Кратко изложены результаты предыдущих исследований

проблемы прохождения волны через ускоряющийся образец. Показаны основные этапы развития представлений об этом явлении и представлено новое понимание этой проблемы [28].

Главным фактором, определяющим величину эффекта ускорения, заключающегося в изменении скорости прошедшей через ускоренный образец частицы, является разность времен распространения волны через свободное пространство и через область пространства, в котором имеется образец. При этом природа временной задержки не имеет значения.

Известно, например, что в квантовой механике взаимодействие неизбежно связано с задержкой во времени, описываемой в первом приближении так называемым групповым временем задержки (ГВЗ) [29, 30].

$$\tau = \hbar \frac{d\varphi}{dE}, \quad (1)$$

где φ - фаза амплитуды волны, испытавшей взаимодействие, а E - энергия.

В работе [28] сделано предположение, что частота волны и энергия частицы изменятся в результате ее взаимодействия с любым объектом, движущимся с ускорением. При этом эффект должен линейно зависеть как от величины ускорения объекта, так и времени взаимодействия частицы с ним.

Целью исследования, описанного в главе, является проверка гипотезы о том, что любой ускоряющийся квантовый объект должен менять энергию частицы, взаимодействующей с ним.

В качестве образцов для исследования были выбраны различные одномерные потенциальные структуры, характеризующиеся различными значениями плотности и длины рассеяния для нейтронов. Комбинируя слои вещества с различающимися значениями плотности и длины рассеяния ρb , можно конструировать различные конфигурации одномерных потенциальных структур

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

В качестве ускоряющегося потенциала были рассмотрены потенциальный барьер, потенциальная яма, потенциальная ступень, двойная потенциальная

ступень, обладающая резонансными свойствами, двугорбый потенциальный барьер (нейтронный интерференционный фильтр Фабри-Перо), многобарьерная структура. В качестве метода численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера был выбран метод расщепления оператора эволюции [27].

Начальное состояние было выбрано в виде гауссового волнового пакета

$$\Psi_0(x, k) = \frac{1}{\sqrt[4]{\delta^2 \pi}} \exp(-ik_0 x) \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2\delta^2}\right) \quad (3)$$

где δ - ширина пакета в координатном пространстве, k_0 – волновое число, соответствующее максимуму волнового пакета.

В начальный момент времени волновой пакет был расположен вне потенциальной структуры на расстоянии 3δ . Расчёт эволюции волнового состояния вёлся до тех пор, пока волновой пакет полностью не провзаимодействует с объектом и не отойдёт от него на расстояние не менее 3δ . Энергия и ширина падающего состояния выбиралась для каждой задачи в соответствии с её особенностями.

В расчетах сравнивалась форма волнового пакета после взаимодействия с ускоряющимся объектом с формой начального пакета. Во всех случаях результатом взаимодействия было изменение спектра скоростей. Имел место сдвиг скоростного распределения, в ряде случаев сопровождавшийся уширением спектра. Изменение наиболее вероятной скорости – максимума пакета в скоростном представлении, было пропорционально величине ускорения и меняло знак при изменении направления последнего. Изменение скорости нейтрона по порядку величины соответствовало соотношению, $\Delta V = a\tau$, где V – средняя скорость, τ – групповое время задержки (1), a – ускорение.

Точного выполнения этого условия и не следует ожидать, поскольку из-за большого ускорения свойства системы заметно меняются за время прохождения пакета через область потенциала.

На рисунке 1 представлены основные результаты расчёта. Здесь кривые 1 обозначают начальный скоростной спектр, кривые 2 – спектр прошедшего

состояния для случая, когда ускорение объекта направлено навстречу движению волнового пакета, кривые 3 - спектр прошедшего состояния для случая, когда ускорение объекта сонаправлено движению волнового пакета. На врезках приведены схематично потенциальные структуры исследуемых квантовых объектов.

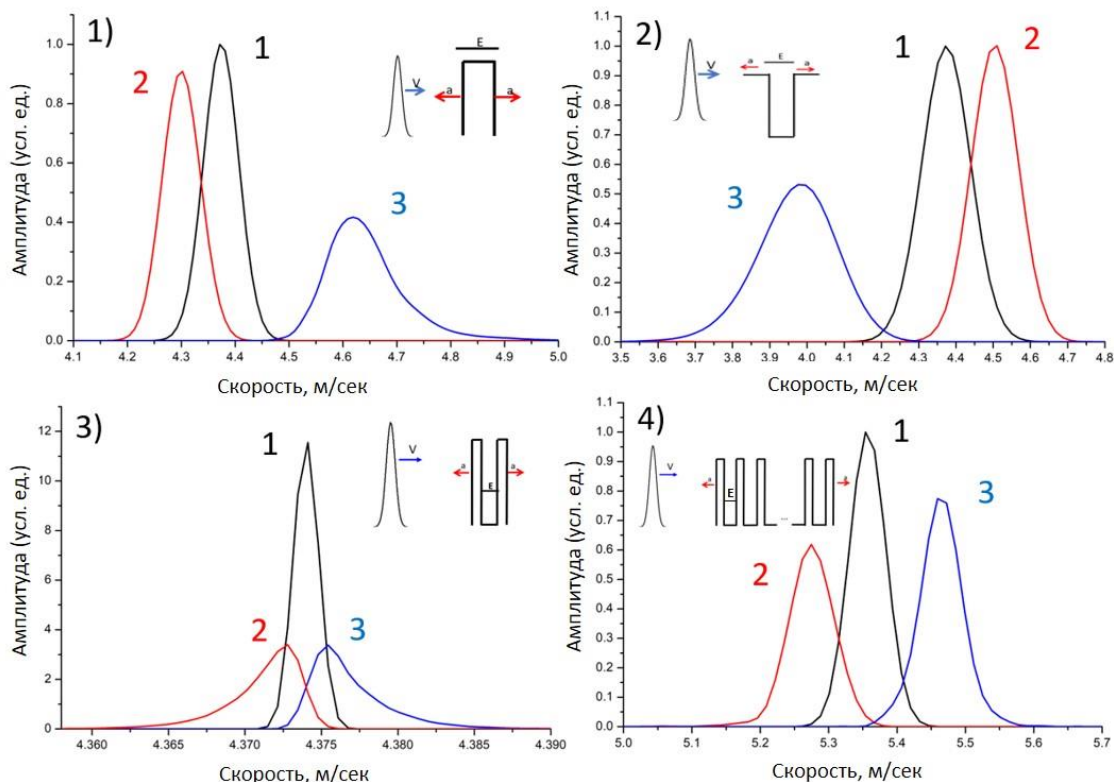


Рис. 1 – Начальный и прошедшие спектры для задачи: 1) прохождение через ускоренный потенциальный барьер, 2) прохождение через ускоренную потенциальную яму, 3) прохождение через ускоренный интерференционный фильтр, 4) прохождение через ускоренную многослойную структуру.

Полученные результаты согласуются с качественным предсказанием [28] об изменении частоты волны и энергии частицы при взаимодействии с ускоряющимся объектом не только в обычной оптике, но и в существенно квантовых явлениях. Это позволяет говорить об универсальном характере эффекта.

В рассмотренных выше задачах все расчеты велись для частицы с параметрами, характерными для ультрахолодных нейтронов. Этот выбор определялся тем, что именно УХН являются наиболее подходящим объектом для

экспериментальной проверки справедливости полученных выше результатов, которые, вообще говоря, далеко выходят за рамки нейтронной оптики и имеют значительно более общее значение.

Третья глава диссертации посвящена теоретическому анализу задач взаимодействия волнового пакета с двумя различными потенциальными структурами. Первой из рассмотренных структур является двойная потенциальная ступень, а исследуемая задача – отражение нейтронной волны от осциллирующей ступени [31]. Подобные структуры характеризуются большим временем формирования отражённого состояния. Свойства таких структур обсуждались ранее в связи с возможностью наблюдения в нейтронной оптике эффекта Гуса-Хенхен [25, 32].

Теоретический анализ проблемы отражения нейтронов от такой структуры был выполнен тремя методами: на основе квазистационарного решения задачи, решением уравнения Шредингера для осциллирующего потенциала на основе уравнений непрерывности [33], и путем численного решения методом расщепления оператора эволюции [27]. Из этих трех методов только последний, подразумевающий пошаговое нахождение решения в последовательные моменты времени, может быть в принципе чувствительным к величине времени отражения. В качестве численных значений параметров в задаче также были взяты величины, характерные для ультрахолодных нейтронов.

Вне резонансных условий решения найденные всеми тремя способами хорошо согласуются между собой и с решением задачи об отражении от обычной потенциальной задачи. При выполнении резонансных условий, при значительном возрастании времени отражения, численный метод дает результат отличный от всех остальных. Отличие заключается в существенном росте интенсивности пика нулевого порядка, соответствующему упругому отражению, за счет подавления пиков более высоких порядков, отвечающих рассеянию с передачей энергии (рисунок 2).

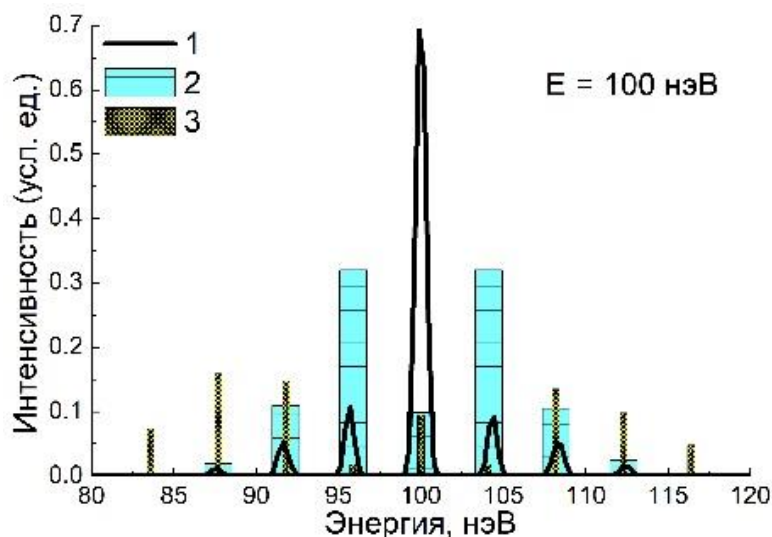


Рис. 2 – Энергетические спектры отражённого состояния, полученные численным расчётом (кривая 1), в приближении малых амплитуд (2), и в квазистационарном приближении (3).

Мы сравнили эти результаты с результатами задачи об отражении волны от аналогичной резонансной структуры неподвижной в пространстве, но с потенциалом, осциллирующим по величине. Это сравнение дает основание заключить, что указанное подавления линий ненулевого порядка в резонансе обусловлено не только соотношением между периодом осцилляции и величиной времени отражения, но также связано с фактом пространственной осцилляции потенциала. Можно предполагать, что определенную роль здесь может играть эффект ускорения [27, 28], величина которого зависит как от ускорения объекта, на котором рассеивается волна, так и от времени взаимодействия.

В качестве второй структуры был мы взяли интерференционный фильтр и исследовали задачу о прохождении волнового пакета через фильтр, осциллирующий в пространстве [34]. Простейший интерференционный фильтр представляет собой комбинацию трёх пленок, характеризующихся различными значениями эффективного потенциала (2). Подобные потенциальные структуры характеризуются квазисвязанным состоянием, обладающим довольно большим временем жизни. Анализ проблемы был проведен путём численного решения уравнения Шрёдингера методом расщепления оператора эволюции.

Частота осцилляций фильтра в расчёте составляла 200 КГц, амплитуда осцилляций выбиралась таким образом, чтобы в фазе максимальной скорости фильтра энергия падающего состояния была вне резонанса.

Начальное состояние имело виде Гауссова волнового пакета (3). В начальный момент времени волновой пакет был расположен вне фильтра на расстоянии 3δ . Расчёт эволюции волнового состояния вёлся до тех пор, пока волновой пакет полностью не выйдет из фильтра и расстояние между фильтром и максимумом прошедшего состояния будет не менее 3δ . Энергия падающего состояния была равна 100 нэВ и совпадала с положением резонанса покоящегося фильтра.

На рисунках 3 и 4 приведены спектры отражённого и прошедшего состояния, на рисунке 5 изображено сравнение зависимости квадрата модуля волновой функции на выходе из фильтра с полуклассическим расчётом.

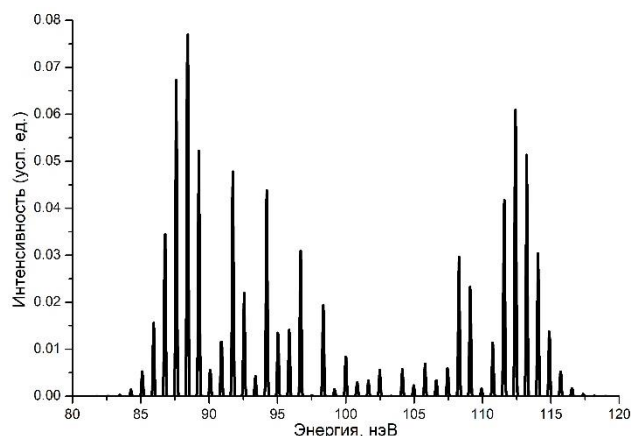


Рис. 3 – Спектр отражённого состояния.

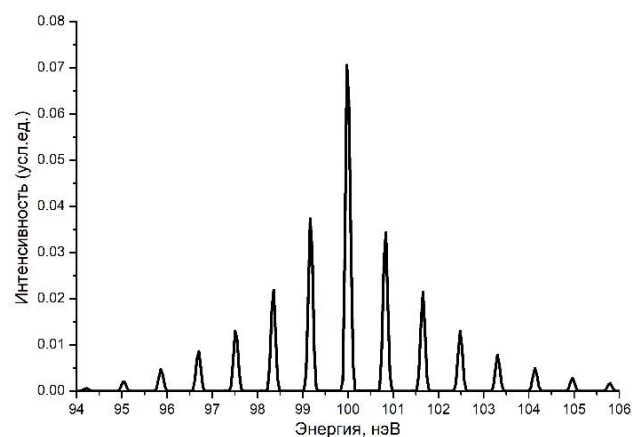


Рис. 4 – Спектр прошедшего состояния.

Спектры прошедшего и отражённого состояний, как это и ожидалось, оказались расщеплёнными. В спектре отражённого состояния наблюдается провал в амплитудах пиков, близких к энергии пропускания. Однако минимум амплитуд слегка смещён в сторону больших энергий. Имеет ли подобное поведение физическую природу или же является результатом систематических погрешностей, сказать сложно.

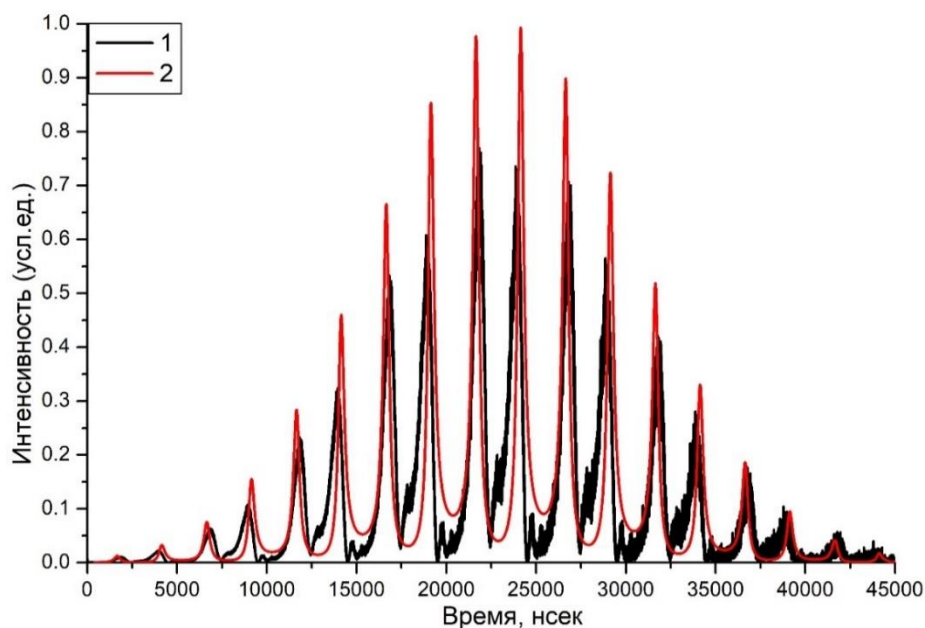


Рис. 5 – сравнение зависимости квадрата модуля волновой функции на выходе из фильтра с полуклассическим расчётом. 1 – квантовый расчёт, 2 – полуклассический расчёт.

Прошедшее состояние, как это видно на рисунке 5 в соответствии с ожиданием оказывается промодулировано по амплитуде. При этом наблюдается достаточно хорошее совпадение результата квантового расчёта с полуклассическими оценками.

Четвёртая глава посвящена расчётно-математической поддержке экспериментального исследования нестационарной дифракции ультрахолодных нейтронов на движущейся решётки [35, 36]. Спектрометрический эксперимент был направлен главным образом на подтверждение возможности влиять на конечный энергетический спектр нейтронов путём изменения параметров профиля дифракционной решётки.

Согласно динамической теории дифракции [10], задача нестационарной дифракции нейтронов решается в системе координат покоя решётки. Тогда уравнение Шрёдингера для данной проблемы запишется следующим образом:

$$\Delta\psi(\mathbf{r}) + [k^2 - \chi(\mathbf{r})]\psi(\mathbf{r}) = 0, \quad (4)$$

где Δ – оператор Лапласа, k – волновое число нейтронов в вакууме, $\chi(\mathbf{r}) = 4\pi N(\mathbf{r})b(\mathbf{r})$, $N(\mathbf{r})$ – плотность ядер, $b(\mathbf{r})$ – длина когерентного рассеяния

нейтронов в среде. Периодическая функция $\chi(x)$ в области решётки $0 \leq z \leq h$ может быть представлена в виде ряда

$$\chi(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \chi_n \exp(ig_n x), \quad (5)$$

где, $g_n = ng_0$, $g_0 = 2\pi/d$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ - целые числа, d – период решётки.

Переход в систему координат покоя решётки позволяет записать волновую функцию нейтронов внутри решётки в виде суммы Блоховских волн с амплитудами $\Psi_m(z)$, зависящими от вертикальной координаты z :

$$\Psi'(x', z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \Psi_m(z) \exp[i(q_{mx}x' + q_{0z}z)], \quad (6)$$

где проекции волновых векторов выражаются в виде:

$$q_{mx} = k_{0x} - k_V + g_m, \quad q_{0z} = (k_{0z}^2 - \chi_0)^{1/2}. \quad (7)$$

Подставляя выражения (5) и (6) в уравнение (4) и приравнивая члены с одинаковыми экспонентами, можно получить бесконечную систему связанных дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\frac{d^2\Psi_m}{dz^2} + 2iq_{0z} \frac{d\Psi_m}{dz} - \alpha_m \Psi_m - \sum_{n \neq 0} \chi_n \Psi_{m-n} = 0, \quad (8)$$

где

$$\alpha_m = g_m [g_m - 2(k_V - k_{0x})]. \quad (9)$$

Решение системы (8) представляет собой достаточно трудоемкую задачу. Ситуация существенно упрощается, если в этой системе пренебречь вторыми производными. Как показано в [10], в условиях, соответствующих реальным экспериментам, такое приближение не приводит к существенным ошибкам. В итоге можно получить следующую систему дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{d\Psi_m}{dz} = -i\gamma_m \Psi_m - i \sum_{n \neq 0} \beta_n \Psi_{m-n}, \quad (10)$$

где $\gamma_m = \alpha_m/2q_{0z}$, $\beta_n = \chi_n/2q_{0z}$. Систему (10) необходимо дополнить граничными условиями: $\Psi_0(z=0) = 1$, $\Psi_{m \neq 0}(z=0) = 0$.

В основе главы лежит описание созданной математической модели эксперимента, проведённого на источнике ультрахолодных нейтронов. В эксперименте в качестве движущейся решётки использовались две радиальные вращающиеся решётки с различным количеством штрихов, глубиной канавок и профилем зуба.

В эксперименте поток УХН подводился к решётке по кольцевому коридору, на выходе из которого установлен монохроматор. В качестве последнего использовался нейтронный интерференционный фильтр [37, 38]. Спектр нейтронов, прошедших через решётку, определялся времяпролётной Фурье-спектрометрией [39].

Спектрометр состоял из Фурье-прерывателя, стеклянного вертикального нейтронотода и детектора, регистрирующего зависимость скорости счёта от времени. Фурье-прерыватель включал в себя статор и ротор, сделанные из титана, толщиной 2 мм, отстоящие друг от друга на расстояние 3 мм. Щель статора, имеющая форму углового сектора, перекрывала часть нейтронотода.

Для анализа полученных в эксперименте данных была создана математическая модель эксперимента, состоящая из двух частей.

В первой части в рамках динамической теории дифракции рассчитывался спектр нейтронов после дифракции на решётке, параметры которой аналогичны той, что использовалась в эксперименте. Для нахождения дифракционного спектра в программе было реализовано численное решение системы уравнений (10) методом Рунге-Кутты четвёртого порядка. В программу закладывались геометрические размеры решётки, число учитываемых порядков дифракции Ξ (число уравнений в системе 10), количество штрихов решётки, параметры материала решётки: атомная плотность и длина когерентного рассеяния для нейтронов, учитывалась форма канавки.

Во второй части методом Монте-Карло моделировался процесс измерения полученного спектра методом обратной времяпролётной Фурье-спектрометрией [36]. В модель закладывалась реалистичная геометрия статора и ротора.

Процесс моделирования эксперимента и сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными проходил по следующей схеме:

- 1) Рассчитывался энергетический спектр, возникающий при дифракции нейтронов с заданным исходным спектром на заданной решетке.
- 2) Производился расчёт Монте-Карло процесса измерения полученного спектра в модели Фурье-спектрометра, который был использован в эксперименте.
 - 2.1) Разыгрывалась начальная энергия нейтрона в соответствии с заданным спектром, а также начальное местоположение в области пропускания статора.
 - 2.2) Разыгрывались положение ротора относительно статора и частота вращения.
 - 2.3) Выполнялась проверка прохождения нейтрона через прерыватель. Если местоположение нейтрона перекрывалось ротором, нейтрон считался поглощённым прерывателем.
 - 2.4) При положительном результате прохождения нейтрона через прерыватель вычислялось время пролета нейтрона от модулятора до детектора.
 - 2.5) Строилась корреляционная функция $\Phi(t)$ пропускания ротора в отрицательном направлении по времени и выполнялась процедура суммирования участка функции $\Phi(t)$ в восстанавливаемый спектр времяпролётный спектр.
- 3) Восстановленный времяпролётный спектр сравнивается со спектром, полученным в эксперименте.

Проведённый эксперимент показал, что в соответствии с теоретическими предсказаниями возможно существенно изменять соотношение между интенсивностями дифракционных порядков путем подходящего выбора глубины профиля. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с расчетами (рисунок 6).

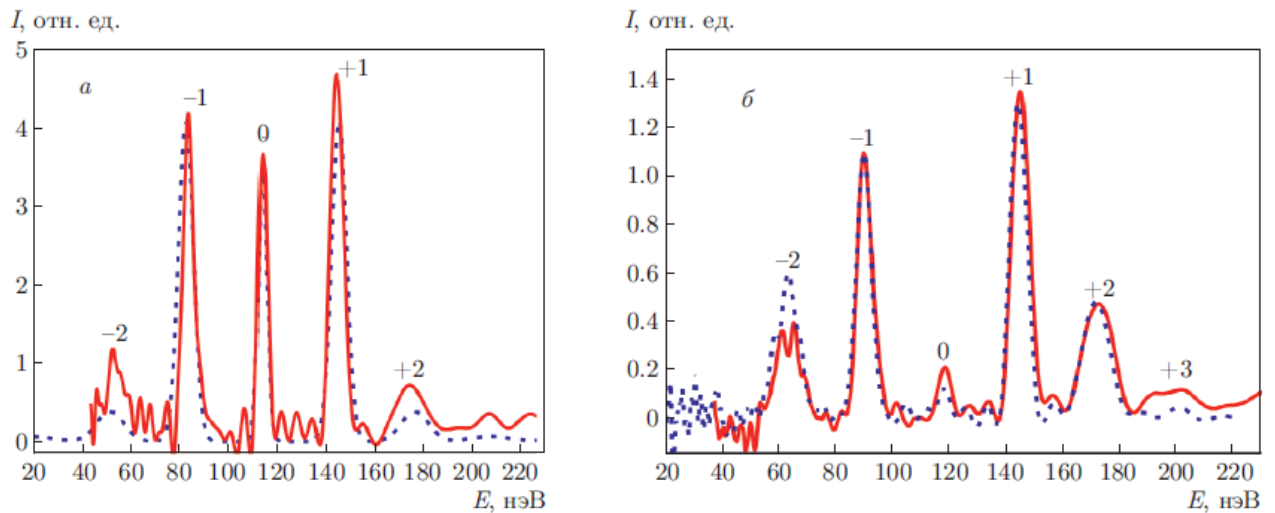


Рис. 6 – Времяпролетные спектры при дифракции УХН на движущихся решетках в сравнении с результатами расчетов. Экспериментальные (красные сплошные линии) и расчетные (синие штриховые линии) показаны для решетки 1 (слева) и 2 (справа).

Этот результат можно рассматривать как достаточно убедительную проверку динамической теории дифракции нейтронов на дифракционных решетках.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, выносимые на защиту:

1. Путём численного исследования ряда задач о взаимодействии волнового пакета с различными ускоряющимися объектами продемонстрировано наличие эффекта ускорения для нейтронов в секторе квантовой механики. В числе исследованных объектов были: потенциальный барьер, потенциальная яма, потенциальная ступень, резонансная потенциальная ступень, интерференционный фильтр, многобарьерная периодическая структура.
2. Продemonстрировано влияние времени взаимодействия на конечное волновое состояние в задаче об отражении нейтронной волны от осциллирующей в пространстве резонансной потенциальной ступени. Оно заключается в существенном росте интенсивности пика нулевого порядка, соответствующему упругому отражению, за счет подавления пиков более высоких порядков, отвечающих рассеянию с передачей энергии.

3. Показано, что подобное поведение спектра обусловлено не соотношением между частотой осцилляции и величиной времени отражения, а связано с фактом пространственной осцилляции потенциала. Сделано предположение, что некоторую роль в данной системе может играть эффект ускорения, величина которого зависит от ускорения объекта, на котором рассеивается волна, и времени взаимодействия.
4. Продемонстрирована возможность использования осциллирующего в пространстве интерференционного фильтра Фабри-Перо в качестве квантового модулятора прошедшей нейтронной волны путём численного исследования проблемы взаимодействия волнового пакета с осциллирующим фильтром.
5. Проведён эксперимент по исследованию нестационарной дифракции ультрахолодных нейтронов на движущейся решётке с целью продемонстрировать возможность влияния на конечный энергетический спектр нейтронов изменением глубины профиля решётки.
6. Создана и успешно применена расчётно-математическая модель такого эксперимента, основанная на расчёте спектра прошедших через решётку нейтронов в рамках динамической теории дифракции и последующем Монте-Карло моделировании процесса измерения полученного спектра методом время-пролётной Фурье-спектрометрии. Расчёты, проведенные на основе этой модели, показали хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Список литературы

- [1] M. Moshinsky, *Diffraction in time*, Phys. Rev., **88**, 625 (1952).
- [2] R. Gähler, R. Golub, *Time dependent neutron optics-quantum mechanical effects on beam chopping and a new type of high-resolution neutron spectrometer*, Z. Phys. B, **56**, 5 (1984).
- [3] J. Felber, G. Muller, R. Gähler, R. Golub, *Time dependent neutron optics. II. Diffraction in space and time*, Physica B, **162**, 191 (1990).
- [4] Th. Hils, J. Felber, R. Gähler, et al., *Matter-wave optics in the time domain: Results of a cold-neutron experiment*, Phys. Rev. A, **58**, 4784 (1998).
- [5] V. G. Nosov, A. I. Frank, *Periodically Modulated Beam and Quasy-Energy of Slow Neutrons*, Journal of Moscow Physical Society, **1**, 1 (1991).
- [6] I. M. Frank, *Possible cause of anomaly in storage time of ultracold neutrons*, JINR communications (in Russian), P4-8851 (1975).
- [7] W. A. Hamilton, A. G. Klein, G. I. Opat, P. A. Timmins, *Neutron diffraction by surface acoustic waves*, Phys. Rev. Lett., **58**, 2770 (1987).
- [8] A. I. Frank, V. G. Nosov, *Neutron diffraction on a moving grating and quasi-energy of cold neutrons*, Phys. Lett. A., **188**, 120 (1994).
- [9] A. I. Frank, S. N. Balashov, I. V. Bondarenko, et al., *Phase modulation of a neutron wave and diffraction of ultracold neutrons on a moving grating*, Phys. Lett. A, **311**, 6 (2003).
- [10] V. A. Bushuev, A. I. Frank, G. V. Kulin, *Dynamic theory of neutron diffraction from a moving grating*, ЖЭТФ, **122**, 32 (2016).
- [11] А. И. Франк, П. Гельтенборт, Г. В. Кулин и др., *Дифракция нейтронов на движущейся решетке как нестационарное квантовое явление*, Письма в ЖЭТФ, **81**, 541 (2005).
- [12] A. S. Gerasimov and M. V. Kazarnovskii, *Possibility of observing nonstationary quantum-mechanical effects by means of ultracold neutrons*, Sov. Phys. ЖЭТФ, **44**, 892 (1976).

- [13] A. I. Frank, D. B. Amandzholova, *Neutron Multiray Reflection*, Ann. N.Y. Acad. Sci., **755**, 858 (1995).
- [14] A. V. Kozlov, A. I. Frank, *Dynamic reflection and refraction of neutrons at the boundaries of matter characterized by a variable magnetic induction*, Phys. At. Nucl., **58**, 1104 (2005).
- [15] J. Felber, R. Gähler, C. Rausch and R. Golub, *Matter waves at a vibrating surface: Transition from quantum-mechanical to classical behavior*, Phys. Rev. A, **53**, 319 (1996).
- [16] Г. М. Драбкин, Р. А. Житников, Получение «сверххолодных» поляризованных нейтронов, ЖЭТФ, **38**, 1013 (1960). G. M. Drabkin and R. A. Zhitnikov, *Production of "Supercold" Polarized Neutrons*, JETP, **11**, 729 (1960).
- [17] E. Krüger, *Acceleration of polarized neutrons by rotating magnetic field*, Nucleonica, **25**, 889 (1980).
- [18] B. Alefeld, G. Badurek, H. Rauch, *Observation of the Neutron Magnetic Resonance Energy Shift*, Z. Phys. B, **41**, 231 (1981).
- [19] V. Luschikov, A. I. Frank, *Quantum effects occurring when ultracold neutrons are stored on a plane*, JETP Letters, **28**, 607 (1978).
- [20] V. V. Nesvizhevsky, et al., *Search for quantum states of the neutron in a gravitational field: gravitational levels*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., Sect. A, **440**, 754 (2000).
- [21] V. V. Nesvizhevsky, et al., *Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field*, Nature, **415**, 297 (2002).
- [22] V. S. Olkhovsky, E. Recami, A. K. Zaichenko, *Resonant and non-resonant tunneling through a double barrier*, Europhys. Lett., **70**, 712 (2005).
- [23] A. I. Frank, S. N. Balashov, I. V. Bondarenko et al., *Resonance tunneling of UCN through the moving interference filter and experimental test of the UCN dispersion law*, JINR Communication. E3-2004-216.
- [24] M. Maaza, D. Hamidi, *Nanostructured Fabry-Perot resonators in neutron optics & tunneling of neutron wave-particles*, Phys. Rep., **514**, 177 (2012).

- [25] V. A. Bushuev, A. I. Frank, *Goos—Hénchen effect in neutron optics and the reflection time of neutron waves*, Physics – Uspekhi, **61**, 952 (2018).
- [26] G. V. Kulin, A. I. Frank, V. A. Bushuev, et al., *On Observation of the Goos—Hénchen Shift of a Neutron Beam*, J. Surf. Invest.: X-Ray, **14**, Suppl.1, pp. S127-S131 (2020).
- [27] M. A. Zakharov, G. V. Kulin, A. I. Frank, *Interaction of a wave packet with potential structures moving with acceleration*, Eur. Phys. J. D, **75**, 47 (2021).
- [28] A. I. Frank, *Interaction of a wave with an accelerating object and the equivalence principle*, Physics-Uspekhi, **63**, 500 (2020).
- [29] D. Bohm, *Quantum Theory* (New York, Prentice-Hall, 1951).
- [30] E. P. Wigner, *Lower limit for the energy Derivative of the scattering phase shift*, Phys. Rev., **98**, 145 (1955).
- [31] M. A. Zakharov, A. I. Frank, G. V. Kulin, *Reflection of neutrons from a resonant potential structure, oscillating in space*, Phys. Lett. A, **420**, 127748 (2021).
- [32] A. I. Frank, *On the Goos-Hénchen effect in neutron optics*, J. Phys. Conf. Ser., **528**, 012029 (2014).
- [33] D. L. Haaving, R. Reifenberger, *Dynamic Transmission and reflection phenomena for time-dependent rectangular potential*, Phys. Rev. B, **26**, 6408 (1982).
- [34] М. А. Захаров, А. И. Франк, Г. В. Кулин, С. В. Горюнов, *Взаимодействие ультрахолодных нейтронов с осциллирующим в пространстве нейтронным интерференционным фильтром*, Поверхность, **1**, 9 (2020) [M. A. Zakharov, A.I. Frank, G. V. Kulin and S. V. Goryunov, *Interaction of Ultracold Neutrons with a Neutron Interference Filter Oscillating in Space*, J. Surf. Invest.: X-Ray, **14**, 6 (2020)].
- [35] Maxim Zakharov, Alexander Frank, German Kulin, at al., *New test of the dynamic theory of neutron diffraction by a moving grating*, EPJ Web of Conferences, **177**, 03005 (2018).
- [36] Г. В. Кулин, А. И. Франк, М. А. Захаров, и др., *Нестационарная дифракция ультрахолодных нейтронов на движущейся решётке и эффективность*

- передачи энергии нейтрону*, ЖЭТФ, **156**, 868 (2019) [G. V. Kulin, A. I. Frank, M. A. Zakharov et al., *Nonstationary Diffraction of Ultracold Neutrons from a Moving Grating and Efficiency of Energy Transfer to a Neutron*, J. Exp. Theor. Phys., **129**, 806 (2019)].
- [37] A. I. Frank, S. V. Balashov, V. I. Bodnarchuk et al., *Neutron multilayers structures for fundamental experiments in UCN optics*, Proc. SPIE, **3767**, 360 (1999).
- [38] I. V. Bondarenko, V. I. Bodnarchuk, S. N. Balashov et al., *Neutron interference filters and fundamental experiments with ultracold neutrons*, Phys. Atom. Nucl., **62**, 721 (1999).
- [39] H. Pöyry, P. Hiismäki, A. Virjo, *Principles of reverse neutron time-of-flight spectrometry with fourier chopper applications*, Nucl. Inst. Meth., **126**, 421 (1975).