

НЕСВИЖЕВСКИЙ Валерий Викторович

На правах рукописи
УДК 000.000

**Гравитационно связанные
квантовые состояния нейтронов**

Специальность: 01.04.16
Физика атомного ядра и элементарных частиц

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена в Институте Лауэ-Ланжевена

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

Данилян Геворг Вардкесович

Институт теоретической и экспериментальной физики

доктор физико-математических наук, академик РАН

Рубаков Валерий Анатольевич

Институт ядерных исследований РАН

доктор физико-математических наук

Самсонов Владимир Михайлович

Петербургский институт ядерной физики

Ведущая организация:

Объединённый институт ядерных исследований,

г. Дубна, Московской области

Защита состоится «_____» _____ 2007 г. в _____ час. _____ мин.

на заседании диссертационного совета Д 520.009.03 при Российском научном центре «Курчатовский институт» по адресу: 123182 Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, РНЦ «Курчатовский институт».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РНЦ «Курчатовский институт».

Автореферат разослан «_____» _____ 2007 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

А.Л.Барабанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования гравитационно-связанных квантовых состояний нейтронов определялась, с одной стороны, тем, что до проведения представленных в этой диссертации экспериментов квантовые состояния материи в гравитационном поле никогда не были наблюдаемы экспериментально. С другой стороны, накопленные за прошедшие десятилетия знания и технологии в области физики ультрахолодных нейтронов (*УХН*) позволяли сделать прорыв в несколько порядков величины в чувствительности и энергетическом разрешении прецизионной гравитационной спектроскопии *УХН*. Наконец, такое увеличение энергетического разрешения и чувствительности, а также сам факт использования гравитационно связанных квантовых состояний нейтронов, были чрезвычайно востребованы, поскольку открывали уникальные возможности для широкого круга экспериментальных исследований в различных областях физики, от свойств фундаментальных полей и взаимодействий или основ квантовой механики систем с гравитационной связью, до физики поверхности и методических применений.

Основная цель диссертации состоит в разработке и создании однокомпонентного гравитационного спектрометра *УХН* рекордного энергетического разрешения, достаточного для наблюдения гравитационно-связанных квантовых состояний нейтронов; в измерении параметров такого спектрометра; в разработке и анализе методов экспериментального наблюдения гравитационно связанных квантовых состояний нейтронов при помощи этого спектрометра; в наблюдении и изучении гравитационно связанных квантовых состояний; в анализе и устранении возможных систематических эффектов в этих экспериментах; в экспериментальном и теоретическом анализе возможности дальнейшего увеличения чувствительности и энергетического разрешения гравитационной спектроскопии, а также в точности измерения параметров гравитационно связанных квантовых состояний нейтронов; наконец, в анализе возможностей применения спектрометра и самого рассматриваемого явления в различных областях физики.

Научная новизна диссертации состоит в создании гравитационного спектрометра *УХН*, способного производить измерения в ранее недоступной для эксперимента области энергий; в первом экспериментальном измерении

квантовых состояний материи (нейтронов) в гравитационном поле; в первом измерении туннелирования нейтронов сквозь гравитационный потенциальный барьер; в создании позиционно-чувствительных детекторов *УХН* рекордного пространственного разрешения; в обосновании возможности осуществления резонансных переходов между гравитационно-связанными квантовыми состояниями нейтронов; в обосновании возможности создания зеркальных нейтроноводов *УХН*; в предложении ряда экспериментальных методов, основанных на использовании созданного гравитационного спектрометра и самого явления квантовых состояний нейтронов в гравитационном поле.

Практическая ценность работы состоит в разработке ряда методов, применимых к широкому кругу физических задач. Так, на основе работ, представленных в диссертации, в Institute Laue-Langevin, Grenoble, France, сооружается гравитационный спектрометр *УХН* следующего поколения *GRANIT*, предназначенный как для прецизионных исследований гравитационно связанных квантовых состояний нейтронов, так и для прикладных работ с использованием прецизионной нейтронной однокомпонентной спектрометрии. Гравитационный спектрометр, аналогичный представленному в этой диссертации, создаётся также в University of Heidelberg, Germany.

Позиционно-чувствительные нейтронные детекторы высокого пространственного разрешения нашли применение и будут использованы в дальнейшем в Institute Laue-Langevin, Grenoble, France, в качестве стандартного метода для user- программы в области физики твёрдого тела и физики поверхности.

Зеркальные нейтроноводы *УХН* будут использованы, в частности, при создании твёрдо-дейтериевого источника *УХН* в Гренобле, разрабатываемого совместными усилиями Institute Laue-Langevin и Laboratoire de la Physique Sub-Atomic et Cosmologie, Grenoble, France.

Метод извлечения *УХН* в квантовых состояниях по полупрозрачной горизонтальной щели, позволяющий селективное извлечение нейтронов из ${}^4\text{He}$ источников *УХН*, будет использован в источнике *УХН*, разрабатываемом совместными усилиями University of Munich, Germany и Institute Laue-Langevin, Grenoble, France.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Создан однокомпонентный гравитационный спектрометр нейтронов рекордной чувствительности и энергетического разрешения. Типичный диапазон начальных энергий, соответствующих вертикальному движению нейтронов в спектрометре, составляет $10^{-12} - 10^{-10}$ эВ (1–100 пэВ), а энергетическое разрешение $10^{-14} - 10^{-13}$ эВ (10–100 фэВ). Эти величины следует сравнивать с типичными параметрами гравитационных спектрометров полной энергии УХН, использующих хранение УХН в ловушках (диапазон начальных энергий $10^{-8} - 10^{-7}$ эВ, и энергетическое разрешение $10^{-9} - 10^{-8}$ эВ), а также с типичными параметрами гравитационных однокомпонентных спектрометров УХН (начальные энергии $\sim 10^{-7}$ эВ, а энергетическое разрешение $10^{-10} - 10^{-8}$ эВ).

2. Предложены и разработаны интегральный и дифференциальный методы обнаружения и исследования гравитационно связанных квантовых состояний нейтронов, а также метод резонансных переходов между квантовыми состояниями для прецизионного измерения энергий квантовых состояний. Первый метод заключается в сканировании нейтронной плотности по высоте с использованием рассеивателя с макроскопически плоской и микроскопически шероховатой поверхностью, с характерной амплитудой шероховатостей один или несколько микрометров. Второй способ заключается в прямом измерении зависимости нейтронной плотности от высоты при помощи позиционно-чувствительных детекторов. Третий способ заключается во введении гармонического возмущения в систему и последующего измерения изменения заселённости квантовых состояний в зависимости от частоты возмущения.

3. Впервые экспериментально обнаружены гравитационно связанные квантовые состояния нейтронов при помощи разработанного спектрометра в интегральном режиме измерения. Эксперимент заключался в измерении их пропускания сквозь узкий горизонтальный зазор между зеркалом снизу и рассеивателем над ним. Первый эксперимент позволил ясно обнаружить нижнее квантовое состояние в этой системе. Позже, с улучшенными разрешением спектрометра по высоте (энергии) и бóльшей статистикой, были измерены

характерные высоты основного и первого возбуждённого квантового состояний. Полученные в эксперименте значения $z_1^{\text{exp}} = 12.2 \pm 1.8_{\text{syst}} \pm 0.7_{\text{stat}} \text{ мкм}$ и $z_2^{\text{exp}} = 21.6 \pm 2.2_{\text{syst}} \pm 0.7_{\text{stat}} \text{ мкм}$ согласуются с ожидаемыми величинами $z_1^{qc} = 13.7 \text{ мкм}$ и $z_2^{qc} = 24.0 \text{ мкм}$. Многочисленные контрольные эксперименты позволили исключить наличие систематических эффектов, способных повлиять на интерпретацию полученных результатов. Эти эксперименты явились первым наблюдением квантовых состояний материи в гравитационном поле и, тем самым, доказали универсальность квантового поведения материи в фундаментальных полях различной природы.

4. Предложены и разработаны специально для этой задачи позиционно-чувствительные детекторы *УХН* рекордного пространственного разрешения $\sim 1 - 2 \text{ мкм}$, позволяющие прямое измерение пространственного распределения плотности в стоячей нейтронной волне при помощи так называемого дифференциального метода. Дифференциальный метод гораздо точнее статистически, чем интегральный метод; более того, он позволяет избежать влияния рассеивателя, используемого в интегральном методе, неизбежно искажающего изучаемые квантовые состояния; конечная точность поправок на эти возмущения и ограничивает, по сути дела, достижимую точность измерения параметров квантовых состояний. Продемонстрирована возможность использования дифференциального метода.

5. Показано, что процесс потери нейтронов из квантового состояния в рассеивателе может быть очень точно описан с использованием модели их туннелирования сквозь гравитационный барьер, разделяющий диапазон классически разрешённых высот и высоту рассеивателя. Аналогичное явление туннелирования нейтронов под гравитационный барьер наблюдается в эксперименте с позиционно-чувствительными детекторами в проточном режиме. Представленные в настоящей диссертации измерения явились первым наблюдением туннелирования материальной частицы сквозь гравитационный барьер.

6. Показано, что явление квантовых состояний нейтронов в гравитационном поле можно использовать для разнообразных исследований и применений в

фундаментальной и прикладной физике. *Апиори* это очень чистая система, в которой как энергии квантовых состояний, так и волновые функции определяются только взаимодействием нейтронов с гравитационным полем. Так, этот эксперимент может представлять интерес для ограничений на дополнительные короткодействующие взаимодействия; для поиска аксиона – гипотетической частицы, нарушающей сильным образом CP-инвариантность; для проверки электрической нейтральности нейтрона; для изучения основ квантовой механики, как, например, для явления «revivals» в гравитационном поле; для проверки различных расширений квантовой механики, в частности из-за дополнительного логарифмического члена в уравнении Шредингера в определённом классе моделей; для ограничений на фундаментальную потерю квантовой когерентности в системах с гравитационным взаимодействием; извлечения УХН из ${}^4\text{He}$ источников без потери плотности УХН в источнике, для создания нейтронно-плотных клапанов ловушек УХН, или для транспортировки нейтронов без потерь по зеркальным нейтроноводам.

Апробация диссертации. Результаты диссертации *докладывались* на следующих коллоквиумах, конференциях и семинарах: семинар ILL, Grenoble, France (1996); семинар ОИЯИ, Дубна (1996); коллоквиум ЛНИ/ОИЯИ, Дубна (1996); workshop on Particle Physics with Slow Neutrons, Grenoble, France (1998); workshop ISINN-8, Dubna, Russia (2000); Millenium Symposium, Grenoble, France (2001); Sandanski-2 Meeting, Sandanski, Bulgary (2001); семинар Saclay/IN2P3, France (2002); семинар Orsay/CSNSM, France (2002); семинар ISN, Grenoble, France (2002); 3rd Workshop on Low Temperature Physics in Microgravity Environment, Chernogolovka, Russia (2002); коллоквиум Fermi Laboratory, Batavia, USA (2002); семинар ИТЭФ, Москва (2002); семинар ЛФВЭ/ОИЯИ, Дубна (2002); семинар ПИЯФ, Гатчина (2002); Научная сессия Отделения Физики РАН, ФИАН, Москва (2002); семинар ФЭИ, Петербург (2002); коллоквиум Fermi Institute, University of Chicago, USA (2003); коллоквиум Argonne National Laboratory, USA (2003); семинар ITP, Lausanne, Switzeland (2003); семинар College de France, Paris (2003); 3rd European Conference on Neutron Scattering, Montpellier, France (2003); коллоквиум Los Alamos National Laboratory (2003); семинар California Institute of Technology, Los Angeles (2003); workshop ISINN-11, Dubna, Russia (2003); семинар Technical University of Munich, Germany (2003); семинар Lyon Observatory, France (2003); семинар ILL, Grenoble, France (2003); коллоквиум Cornell University, USA (2003); коллоквиум Rochester University, USA

(2003); коллоквиум Syracuse University, USA (2003); семинар Rhode Island University, USA (2003); семинар ИЯИ, Москва (2003); Научная сессия Отделения Физики РАН, ФИАИ, Москва (2003); семинар ПИЯФ, Гатчина (2003); Journées de Prospective de la Colle sur Loup, la Colle sur Loup, France (2004); конференция Precision Measurements with Slow Neutrons, Washington, USA (2004); workshop ILL/IN2P3/DAPHNIA, Grenoble, France (2004); workshop ISINN-12, Dubna, Russia (2004); workshop QUARKS-2004, Pushkin Hills, Russia (2004); workshop JDN-12, Praz-sur-Arly, France (2004); семинар IPN, Orsay, France (2004); семинар IPN, Saclay, France (2004); семинар Laboratoire Kastler Brossel, Paris, France (2004); семинар PSI, Villigen, Switzerland (2004); workshop PANIC-2005, USA (2005); коллоквиум CERN (2005); workshop ISINN-13, Dubna, Russia (2005); workshop QED-2005, Les Houches, France (2005); workshop TPNP, Columbia, USA (2005); семинар Technical University of Munich, Germany (2006); семинар University of Mainz, Germany (2006); семинар University of Heidelberg, Germany (2006); семинар DAPHNIA, Saclay, France (2006); семинар PSI, Switzerland (2006); workshop XLI Recontres de Moriond – 2006, La Thuile, Italy (2006); семинар GANIL-LPC, Caen, France (2006); семинар ILL, Grenoble, France (2006); семинар University of Geneva, Switzerland (2006); workshop CEWQO-2006, Vienna, Austria (2006); workshop QUARKS-2006, Repino, Russia (2006); workshop ISINN-14, Dubna, Russia (2006); workshop ESA, Arcetri/Firenze, Italy. Результаты, представленные в диссертации, были *награждены* как: лучшая работа в мире в 2002 году по физике Hendrik de Waard Lecture (Groningen); в 2002 году как 3^{ая} работа в мире по физике Академией Наук Китая; лучшая работа ОИЯИ (Дубна) в 2003 году.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объём диссертации – 168 страниц. Она содержит 35 рисунков, 2 таблицы и библиографический список литературы, включающий 179 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** представлено изучаемое физическое явление гравитационно связанных квантовых состояний нейтронов, а также способы и особенности его наблюдения; дано известное из литературы теоретическое описание простейшего случая невозмущённых квантовых состояний нейтронов над зеркалом; кратко представлены наиболее важные для предмета диссертации свойства *УХН*; обоснована актуальность темы, сформулирована цель и показана новизна материала, представленного к защите.

Гравитационно связанные квантовые состояния возникают в потенциальной яме, образованной гравитационным полем Земли (верхняя её стенка) и горизонтальным зеркалом (нижняя её стенка). Классическим аналогом этого явления является упругое отражение нейтронов от идеального горизонтального зеркала в гравитационном поле, с последующим многократным возвратом на поверхность зеркала по параболическим траекториям. Условие перехода от квантового поведения нейтронов к классическому в такой системе определяется соотношением между шириной квантового состояния (обратное время жизни нейтрона в квантовом состоянии) и разницей энергии этого квантового состояния и ближайшего соседнего. Нижние квантовые состояния могут быть разрешены экспериментально при определённых условиях, в то время как нейтроны больших энергий (скоростей) образуют сплошной классический континуум.

В **первой главе** представлены принцип действия и основные параметры созданной экспериментальной установки, а также методы наблюдения и исследования гравитационно связанных квантовых состояний. Экспериментальная установка – это однокомпонентный гравитационный спектрометр *УХН* очень высокого разрешения. Простейшая принципиальная схема измерения показана на рисунке 1. Высота зазора между зеркалом и рассеивателем может быть изменена и точно измерена. Поверхность рассеивателя макроскопически плоская, но микроскопически шероховатая, с размером шероховатостей порядка одного или нескольких микрометров. В классическом приближении можно представить, что этот рассеиватель устраняет нейтроны с вертикальной составляющей скорости, достаточной для подъёма в гравитационном поле до высоты рассеивателя. В точном квантово-механическом описании требуется учесть туннелирование нейтронов сквозь гравитационный барьер между классически разрешённой высотой для нейтронов и высотой рассеивателя. Элементы шероховатости поверхности рассеивателя приводят к

диффузному (незеркальному) отражению нейтронов и, следовательно, к перемешиванию вертикальной и горизонтальной компонент его скорости. Так как горизонтальная компонента скорости нейтронов в нашем эксперименте намного превышает их вертикальную составляющую, такое перемешивание приводит к многократным последовательным ударам нейтронов о рассеиватель, и в результате к быстрой потере таких рассеянных нейтронов.

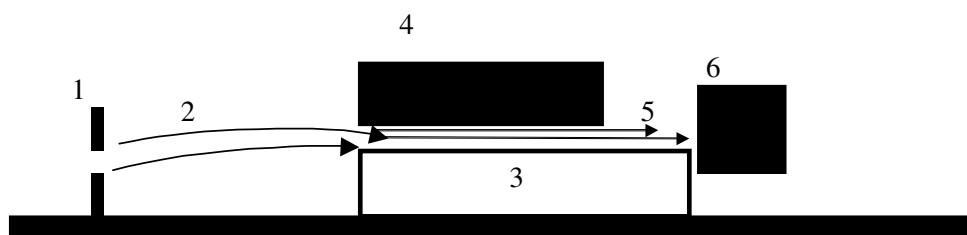


Рисунок 1. Упрощённая схема эксперимента. Слева направо: вертикальные жирные линии показывают верхнюю и нижнюю пластины входного коллиматора (1); сплошные стрелки соответствуют классическим траекториям нейтронов (2) между входным коллиматором и входом зазора между зеркалом (3, незакрашенный прямоугольник снизу) и рассеивателем (4, чёрный прямоугольник сверху). Пунктирные горизонтальные стрелки иллюстрируют квантовое движение нейтронов (5) над зеркалом, а чёрный квадрат – нейтронный детектор (6).

Длина отражающего нижнего зеркала, над которым движутся нейтроны, определяется из соотношения неопределённостей энергии-времени $\Delta E \cdot \Delta \tau \approx \hbar$ что, казалось бы, удивительно для экспериментальной установки макроскопического масштаба (в удобных нам единицах измерения постоянная Планка равна $\hbar = 6.6 \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{сек}$). Дело в том, что наблюдение квантовых состояний возможно только при условии, что разница энергий соседних уровней ($\Delta E_n = E_{n+1} - E_n \sim 1/n^{1/3}$) больше (лучше – много больше) ширины этих уровней δE_n . Величины энергии уровней E_n определяются только фундаментальными константами (масса нейтрона m и постоянная Планка \hbar), а также ускорением свободного падения g в гравитационном поле и номером уровня n . С возрастанием порядкового номера n разница энергий ΔE_n соседних уровней уменьшается до тех пор, пока уровни не сольются в классический

континиум. Очевидно, измерение нижних квантовых состояний проще и гораздо удобнее с методической точки зрения. Ширина же квантового состояния определяется его временем жизни в этом состоянии, или, в случае отсутствия переходов между квантовыми состояниями, временем пролёта нейтрона над зеркалом. Таким образом, длина нижнего зеркала задаётся минимальным необходимым временем наблюдения нейтрона в квантовом состоянии и для нижних состояний должна удовлетворять условию $\Delta\tau \gg 0.5\text{мсек}$. В различных наших экспериментах средняя величина горизонтальной компоненты скорости нейтронов была равна 10м/сек или 5м/сек , что означает, что минимальная длина зеркала должна составлять порядка 10см .

Вертикальный масштаб задачи, с другой стороны, определяется соотношением неопределённостей скорость-координата $\Delta V_z \cdot \Delta z \cong \hbar / m$. Дело в том, что чем меньше вертикальная компонента скорости нейтрона, тем больше длина волны нейтрона, соответствующая этой компоненте скорости. Однако, классическая высота, на которую может подняться нейтрон в гравитационном поле, не может быть меньше, чем квантово-механическая неопределённость его координаты, то есть меньше его длины волны. В упрощённом представлении именно это условие определяет нижнее связанное состояние нейтрона в гравитационном поле Земли. Неопределённость высоты в этом случае составляет $\sim 15\text{мкм}$, а неопределённость вертикальной скорости $\sim 1.5\text{см/сек}$.

Первый, так называемый интегральный проточный метод исследования гравитационно связанных квантовых состояний заключается в измерении нейтронного потока сквозь узкий зазор Δz между горизонтально расположенным зеркалом и рассеивателем/поглотителем над ним, при помощи которого измеряется зависимость вероятности обнаружения нейтрона от высоты над зеркалом. Если рассеиватель находится гораздо выше, чем точка поворота соответствующего квантового состояния $\Delta z \gg z_n$, то нейтроны проходят такой зазор без значительных потерь. Если зазор уменьшается, нейтронная волновая функция $\psi_n(z)$ начинает проникать в рассеиватель и вероятность потери нейтронов возрастает. Если высота зазора меньше, чем характерный размер нейтронной волновой функции в нижнем квантовом состоянии z_1 , то такой зазор заведомо непрозрачен для нейтронов. На достаточно больших высотах Δz зависимость потока проникающих нейтронов от высоты, при условии однородного заполнения нейтронами фазового пространства, должна стремиться

к классической зависимости $N_{QM}(\Delta z) \rightarrow N_{CL}(\Delta z) \sim (\Delta z)^{1.5}$ и ступенчатая зависимость по мере увеличения номера квантового состояния должна размыться, т.е. превратиться в плавную. С другой стороны, если мы установим сверху второе зеркало (вместо рассеивателя), то зависимость потока проникающих в зазор нейтронов от размера зазора должна превратиться в $N_{test}(\Delta z) \sim \Delta z$. Это, в некотором смысле, соответствовало бы пределу очень «плохого» рассеивателя.

Для адекватного анализа результатов эксперимента рассматривается теоретическая модель туннелирования нейтронов сквозь гравитационный потенциальный барьер, разделяющий классически разрешённую для нейтронов область и рассеиватель, при помощи которого анализируется спектр энергий $УХН$, соответствующий их вертикальному движению. Именно это проникновение является фактором, определяющим пространственное разрешение нашего спектрометра в режиме сканирования нейтронной плотности рассеивателем, поскольку проникаемость гравитационного барьера для нейтронов из классически разрешённой области до высоты рассеивателя является плавной, а не бесконечно резкой, функцией высоты рассеивателя.

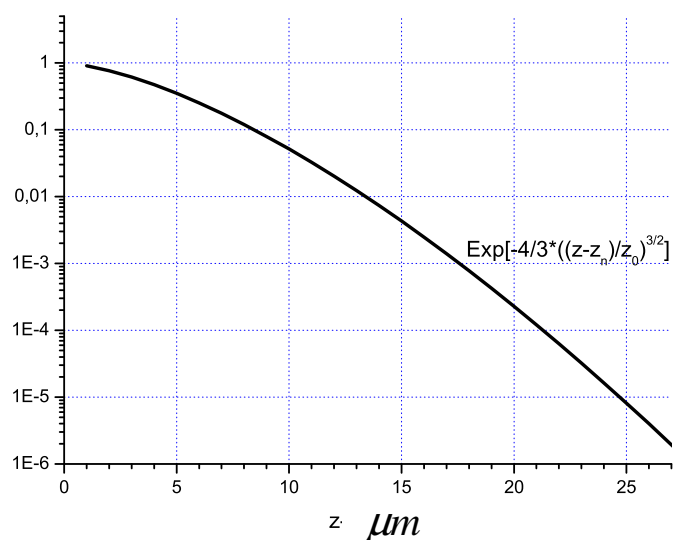


Рисунок 2. Зависимость вероятности туннелирования нейтрона сквозь гравитационный барьер от высоты над точкой поворота (одинаковая для всех квантовых состояний).

Пренебрегая возмущением волновых функций нейтронов в квантовых состояниях рассеивателем, а также факторами, слабо зависящими от ξ , можно оценить вероятность $P_n^{tunnel}(\Delta z)$ туннелирования нейтрона в n^{om} квантовом состоянии в рассеиватель $\Delta z > z_n$ как

$$P_n^{tunnel}(\Delta z) = \int_{\Delta z}^{\infty} |\psi_n(z)|^2 \cdot dz \approx \exp\left(-\frac{4}{3} \cdot \xi_n^{\frac{3}{2}}\right), \text{ где } \xi_n = \frac{\Delta z - z_n}{z_0}, \text{ а } \Delta z > z_n. \text{ По}$$

анalogии с α -распадом ядер вероятность потери нейтронов из n^{o2o} квантового состояния можно оценить как произведение частоты «столкновений» нейтронов с гравитационным барьером ω_n на вероятность туннелирования нейтронов в рассеиватель. Тогда поток проникающих нейтронов равен

$$F(\Delta z, V_{hor}) = \sum_n F_n(\Delta z, V_{hor}) = F_0 \cdot \sum_n \left(\beta_n \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \frac{L}{V_{hor}} \cdot \sqrt[3]{\frac{m \cdot \pi^2 \cdot g^2}{3 \cdot \hbar \cdot \left(n - \frac{1}{4}\right)}} \cdot \begin{cases} \exp\left(-\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{\Delta z - z_n}{z_0}\right)^{\frac{3}{2}}\right), \Delta z > z_n \\ 1, \Delta z \leq z_n \end{cases} \right) \right)$$

где β_n – заселённость n^{o2o} квантового состояния, F_0 – нормировочный коэффициент, V_{hor} – горизонтальная компонента скорости нейтронов в направлении вдоль пучка нейтронов, α – коэффициент, отвечающий за конечную эффективность рассеивателя, а L – длина зазора.

Второй, более деликатный, так называемый дифференциальный метод наблюдения и изучения квантовых состояний основан на применении специально разработанных для этой задачи позиционно-чувствительных детекторов нейтронов очень высокого пространственного разрешения. Прямое измерение пространственного распределения плотности в стоячей нейтронной волне над зеркалом предпочтительно по сравнению с его сканированием при помощи рассеивателя, устанавливаемого на разной высоте. Первый метод – дифференциальный, так как он позволяет одновременное измерение вероятности

обнаружения нейтрона на всех высотах, представляющих интерес. Второй метод – интегральный, потому что информация о вероятности обнаружения нейтрона на данной высоте получается методом вычитания значений нейтронного потока, измеренного при двух близких по величине значениях высоты рассеивателя. Ясно, что дифференциальный метод гораздо более чувствителен, чем интегральный и поэтому позволяет набрать желаемую статистическую точность за гораздо более короткий промежуток времени. Более того, рассеиватель, используемый в интегральном методе, неизбежно искажает измеряемые квантовые состояния, деформируя их собственные волновые функции и сдвигая собственные значения энергии. Конечная точность учёта этих деформаций приводит к систематическим неопределённостям и, в конце концов, ограничивает достижимую точность измерения параметров квантовых состояний.

Для прямого измерения пространственного распределения плотности нейтронов в квантовых состояниях были разработаны позиционно-чувствительные пластиковые трековые детекторы (CR39) с тонким урановым покрытием ($^{235}\text{UF}_4$), показанные на рисунке 3, а также методы работы с ними.

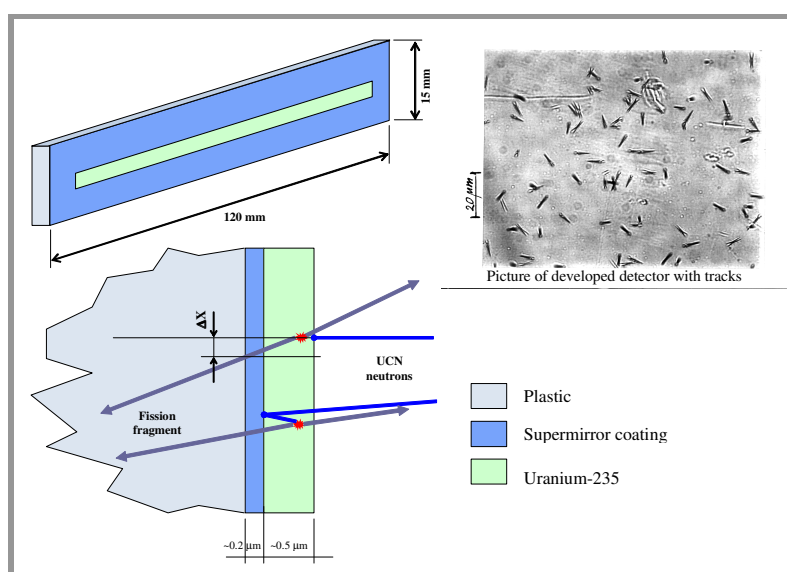


Рисунок 3. Позиционно-чувствительные пластиковые трековые нейтронные детекторы (CR39) с тонким урановым покрытием ($^{235}\text{UF}_4$). Размер чувствительного уранового слоя детектора составлял $5\text{ мм} \times 100\text{ мм}$; размер пластиковой пластины – $15\text{ мм} \times 120\text{ мм}$. Характерная толщина уранового слоя равна 0.5 мкм . На рисунке справа сверху показано

изображение поверхности детектора после его химического проявления, полученное при помощи оптического микроскопа.

Треки, созданные вхождением в пластик детектора дочерних ядер, испущенных при индуцированном нейтронами делении ядер ^{235}U , увеличиваются до диаметра $\sim 1\text{мкм}$ посредством химического проявления в растворе щёлочи. Проявленный детектор размером несколько сантиметров сканируется при помощи оптического микроскопа с точностью позиционирования $\sim 1\text{мкм}$. Сложная многоступенчатая система контроля перемещений, деформации формы детектора при химических процедурах и других манипуляциях с детектором, а также калибровка формы детектора при помощи интенсивного «белого» нейтронного пучка позволяют обеспечить требуемую точность. Чувствительный слой ^{235}U достаточно тонок ($< 1\text{мкм}$), так что координаты вхождения нейтрона в урановый слой почти совпадают с координатами вхождения дочернего ядра в пластик. С другой стороны, чувствительный слой достаточно толст для того, чтобы обеспечить большую эффективность регистрации УХН ($\sim 30\%$).

Основные экспериментальные результаты представлены *во второй главе* диссертации. Первый из представленных экспериментов был проведён с использованием интегрального проточного метода. Он позволил нам впервые обнаружить дискретное поведение потока нейтронов над зеркалом, и тем самым сделать заключение о существовании гравитационно связанных квантовых состояний нейтронов, соответствующих их вертикальному движению в зазоре. Поскольку целью этого эксперимента являлось наблюдение самого рассматриваемого явления, особое внимание было уделено наблюдению наиболее характерного свойства такой системы – непрозрачности зазора между зеркалом и рассеивателем для нейтронов, если её размер не превышает характерного пространственного размера нижнего квантового состояния z_1 , а также проверке и устранению возможных систематических эффектов в этом эксперименте. Так, были подробно изучены: степень однородности заполнения нейтронами фазового пространства в падающем нейтронном пучке, правильность выделения горизонтальных компонент скорости нейтронов при помощи входного коллиматора, всевозможные коррелированные и некоррелированные источники фона нейтронного детектора, степень зеркальности отражения нейтронов от

зеркала, плоскостность зеркала и рассеивателя, эффективность рассеивателя/поглотителя, воспроизводимость экспериментальных результатов, влияние диффракции нейтронов на входном угле нижнего зеркала, правильность и точность измерения величины зазора Δz между зеркалом и рассеивателем и т.д. Были проведены многочисленные контрольные эксперименты. В частности, фон при выключенном реакторе был очень мал и равен $(1.3 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{сек}^{-1}$ и $(4.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-3} \text{сек}^{-1}$ соответственно для двух использованных окон дискриминации амплитуды сигнала детектора; последовательным устранением всех известных источников фона при включённом реакторе удалось уменьшить фон детектора до того же уровня. Асимптотическое поведение счёта детектора при больших величинах зазора Δz хорошо соответствовало классической зависимости $N_{CL}(\Delta z)$. В контрольном эксперименте с рассеивателем снизу и зеркалом сверху пропускание зазора упало во много раз, что и следовало ожидать. Зависимость потока нейтронов от размера зазора не зависела от горизонтальной компоненты скорости нейтронов в пределах точности эксперимента. В итоге, можно было сделать вывод, что зазор между нижним зеркалом и рассеивателем при высотах рассеивателя $< 15 \text{ мкм}$ непрозрачен для нейтронов из-за явления квантования состояний нейтронов в гравитационном поле над зеркалом.

Наблюдение более высоких квантовых состояний является более трудной экспериментальной задачей, чем измерение нижнего квантового состояния: для того чтобы обнаружить нейтронный поток, показывающий, что нижнее квантовое состояние заселено, следует сравнить почти нулевой счёт детектора (низкий уровень фона) с заметно более высоким счётом. А для того чтобы разрешить более высоко лежащие квантовые состояния, следует сравнить два ненулевых близких по значению нейтронных потока. Кроме того, первая ступенька в зависимости нейтронного потока от высоты рассеивателя – самая большая, причём размер ступеньки быстро уменьшается с ростом номера квантового состояния. Поэтому даже если бы экспериментальное разрешение ступенек было бы одинаково для всех уровней, экспериментальное разделение двух соседних квантовых состояний было бы затруднено для более высоких состояний. Однако, как разница энергий между соседними уровнями, так и экспериментальная точность падают с ростом номера уровня. Трудности в наблюдении высоких квантовых состояний можно разделить на две части. Первая связана с качеством самой экспериментальной установки (например, с

точностью выставления рассеивателя, со свойствами нейтронного пучка и т.д.), что может быть в принципе улучшено. Вторая следует из ограничений, накладываемых квантовой механикой (уничтожение нейтронов рассеивателем определяется перекрытием относительно гладкой нейтронной волновой функции в квантовом состоянии с профилем рассеивателя), которые не могут быть существенно улучшены при использовании описанной экспериментальной установки и метода измерения.

Второй эксперимент использовал аналогичный метод измерения, но параметры спектрометра были существенно улучшены (точность и надёжность выставления высоты рассеивателя повышена за счёт использования ёмкостного метода измерения величины зазора между зеркалом и рассеивателем настолько, что соответствующие неопределённости стали пренебрежимы по отношению к ограничениям, накладываемым квантовой механикой), статистика эксперимента значительно увеличена (за счёт оптимизация транспорта *УХН* перед входом в экспериментальную установку и за счёт более эффективного использования пучкового времени благодаря полной автоматизации эксперимента), а возможные систематические эффекты анализировались в деталях экспериментально и теоретически.

Во втором эксперименте средняя амплитуда шероховатости рассеивателя была меньше, чем в первом эксперименте, поэтому эффективность рассеивателя стала меньше; но и теоретические неопределённости в определении его эффективной высоты тоже стали меньше, что в итоге позволило уменьшить суммарную погрешность определения параметров квантовых состояний. Эффективность рассеивателя и степень зеркальности отражения нейтронов от нижнего зеркала детально изучались при помощи отражения нейтронов, а также не-нейтронными методами анализа поверхности (рассеяние рентгеновских лучей, оптическая интерферометрия, микроскоп атомных сил). Прямые нейтронные измерения показали, что вероятность незеркального отражения нейтронов от нижнего зеркала была, как и ожидалось, заведомо ниже чем $(1.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$ (в самых консервативных предположениях о процедуре измерения), что совершенно достаточно для проведённого эксперимента. С другой стороны, хотя мы и рассчитывали прежде всего на рассеивающие свойства рассеивателя/поглотителя, а не на большое сечение захвата нейтронов материалом покрытия рассеивателя/поглотителя (анти-отражающий слой *Ti – Zr – Gd* в пропорции 54% – 11% – 35% толщиной 0.2 мкм, который

обычно применяется при производстве поляризаторов холодных нейтронов), тем не менее результат измерения эффективности уничтожения нейтронов с его помощью оказался, на первый взгляд, парадоксальным. Гладкое зеркало с таким покрытием обеспечивало вероятность потерь равную только $\sim 3.5\%$, то есть было скорее «зеркалом», чем «поглотителем». Разгадка заключалась в том, что нейтроны очень эффективно отражались как от небольшого остаточного вещественного потенциала такого покрытия, так и от его огромной мнимой части. Контрольный эксперимент показал, что эффективность рассеивателя с отражающим покрытием с хорошей точностью совпадает с эффективностью рассеивателя с поглощающим покрытием. Таким образом, принцип действия рассеивателя/поглотителя – это очень эффективное перемешивание большой горизонтальной компоненты скорости нейтронов с малой вертикальной компонентой скорости при рассеянии нейтрона на его шероховатой поверхности, с последующей потерей нейтронов по тому или иному каналу потерь. Среди дополнительных контрольных экспериментов следует отметить измерение малого сдвига зависимости проникающего в зазор нейтронного потока от высоты зазора при изменении средней величины горизонтальной компоненты скорости нейтронов вдоль оси нейтронного пучка. Измеренная величина совпала в пределах экспериментальной точности с теоретическим её ожиданием, посчитанным в модели туннелирования нейтронов сквозь гравитационный барьер.

Наша установка является прецизионным однокомпонентным гравитационным нейтронным спектрометром. Проанализированы факторы, определяющие его пространственное разрешение в режиме сканирования нейтронной плотности рассеивателем. 1) Такие фундаментальные факторы, как конечная проницаемость гравитационного потенциального барьера отделяющего классически разрешённую высоту от высоты рассеивателя. Другими словами, это конечная резкость асимптотического убывания с высотой функции Эйри, описывающей нейтронные квантовые состояния. Кроме того, разрешение ограничено конечным временем наблюдения нейтрона в спектрометре; 2) Неточности модели взаимодействия нейтронов с рассеивателем, в частности из-за деформации волновых функций рассеивателем; 3) Такие методические ограничения, как неопределённости в абсолютном позиционировании рассеивателя или конечная ширина спектра горизонтальных компонент скорости нейтронов.

Окончательный результат этого эксперимента показан на рисунке 4. Квантово-механическая зависимость, полученная в рамках модели туннелирования нейтронов сквозь гравитационный барьер, фитирует экспериментальные данные со значением $\chi^2 = 0.9$. В пределах статистической погрешности модель хорошо описывает экспериментальные данные. Заселённость нижнего квантового состояния ($\beta_1 \approx 0.7$) ниже, чем заселённости других квантовых состояний. Первая и вторая характерные высоты z_1 и z_2 равны соответственно $z_1^{\text{exp}} = 12.2 \pm 0.7_{\text{stat}} \pm 1.8_{\text{syst}} \text{ мкм}$ и $z_2^{\text{exp}} = 21.6 \pm 0.7_{\text{stat}} \pm 2.2_{\text{syst}} \text{ мкм}$, что не противоречит ожидаемым величинам (12): $z_1^{\text{qc}} = 13.7 \text{ мкм}$ и $z_2^{\text{qc}} = 24.0 \text{ мкм}$ в пределах точности эксперимента 25%. Таким образом, этот эксперимент подтвердил наличие самого явления, а также позволил идентифицировать первое «возбуждённое» квантовое состояние.

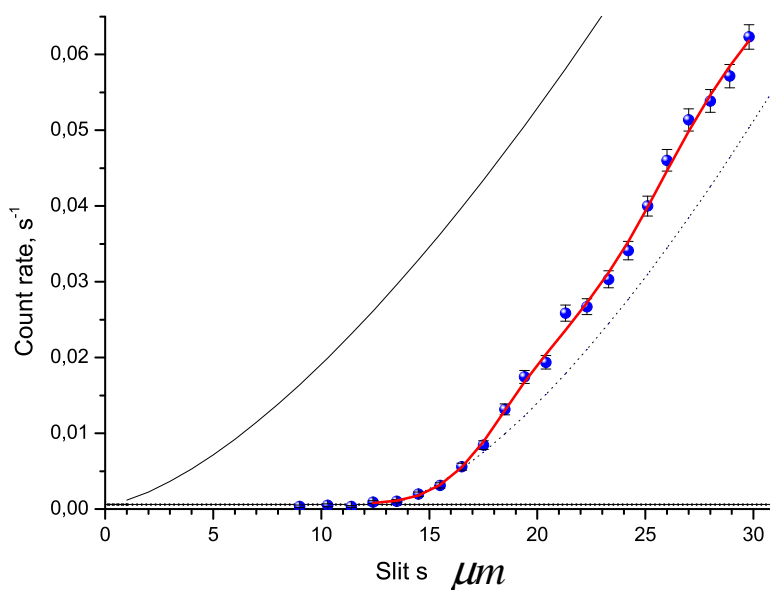


Рисунок 4. Зависимость потока нейтронов сквозь зазор между зеркалом и рассеивателем от его высоты. Кружки показывают суммарные результаты, полученные с рассеивателями с медным и анти-отражающим $Ti - Zr - Gd$ покрытиями. Сплошная линия слева – классическое ожидание $N_{CL}(\Delta z)$, нормированное так, что оно описывает экспериментальные данные в пределе больших размеров зазора. Пунктирная линия иллюстрирует упрощённую квантово-механическую зависимость $N_{QM.0}(\Delta z)$, предполагающую только одно нижнее квантовое состояние и асимптотическое классическое

поведение $N_{CL}(\Delta z)$ для больших величин зазора. Горизонтальные линии указывают фон детектора и соответствующий коридор погрешностей. Средняя величина горизонтальной компоненты скорости нейтрона в направлении вдоль оси нейтронного пучка равна 4.9 м/сек . Сплошная кривая справа аппроксимирует экспериментальные данные квантово-механической зависимостью в модели туннелирования нейтронов сквозь гравитационный барьер, в которой характерные высоты первого и второго квантового состояний z_1 и z_2 , заселённость нижнего квантового состояния, нормировочная константа, а также эффективность рассеивателя – свободные параметры.

Наконец, эксперименты со специально предложенными и разработанными для этой задачи позиционно-чувствительными детекторами *УХН* рекордного пространственного разрешения $1-2 \text{ мкм}$ показали возможность наблюдения гравитационно-связанных квантовых состояний нейтронов также и с использованием дифференциального метода. Результат одного из измерений показан на рисунке 5. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями позволяет заключить, что измеренное распределение вероятности обнаружения нейтрона над зеркалом во всём диапазоне величин Δz хорошо соответствует теоретическому ожиданию. Пространственное разрешение детектора может быть оценено, например, используя самый крутой участок измеренной зависимости около нулевого значения высоты, разрешение приблизительно равно $\sim 1.5 \text{ мкм}$.

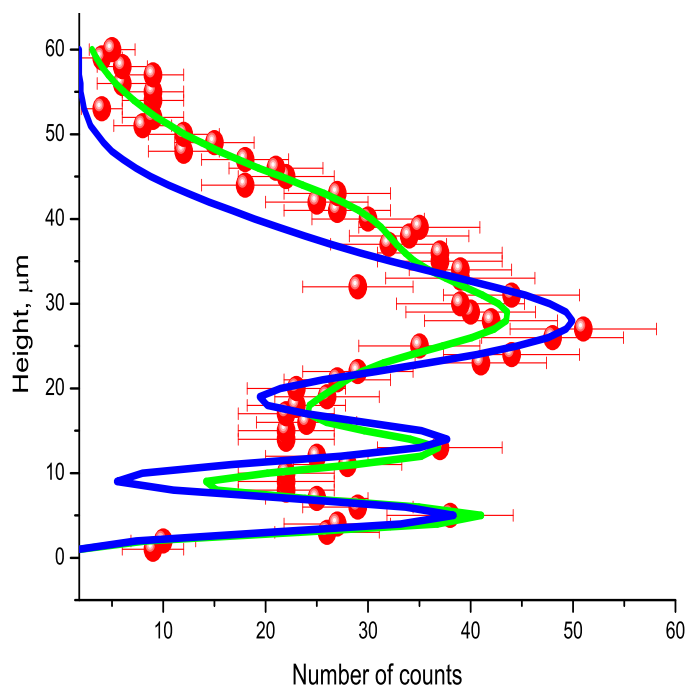


Рисунок 5. Распределение пространственной плотности нейтронов в гравитационном поле над зеркалом измерено при помощи позиционно-чувствительного детектора. Кружки соответствуют экспериментальным результатам. Сплошная линия указывает теоретическую зависимость, в предположении (1) идеального рассеивателя; и при отсутствии паразитных переходов между квантовыми состояниями (2). Пунктирная линия соответствует реалистическому случаю конечной эффективности рассеивателя. Использованы точные волновые функции квантовых состояний и свободные значения заселённости квантовых состояний, фитированные из экспериментальных данных. Интерференцией между квантовыми состояниями пренебрегается. Фон детектора постоянен в диапазоне от -3мм до $+3\text{мм}$ выше и ниже показанной на рисунке части детектора.

Перспективы увеличения точности рассмотрены в *третьей главе*. Особое внимание уделено возможности экспериментального измерения резонансных переходов между гравитационно связанными квантовыми состояниями нейтронов, что может кардинально увеличить точность при использовании создаваемого в настоящее время гравитационного спектрометра следующего поколения *GRANIT* (включён в перспективную программу *MILLENIUM ИЛЛ* с соответствующим финансированием, а также поддержан агентством *ANR* – Agence Nationale de la Recherche, France). Принципиальным параметром, определяющим возможность экспериментов такого рода является время хранения нейтронов в квантовых состояниях. Прецизионные измерения требуют, конечно, существенного улучшения двух взаимосвязанных параметров: энергетического

разрешения и статистической точности. Как следует из соотношения неопределённостей энергии – времени $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$, для повышения энергетического разрешения требуется существенно увеличить время хранения нейтронов в квантовых состояниях. В принципе, энергетическое разрешение не может быть лучше чем $\sim 10^{-18}$ эВ, что можно было бы достигнуть, если бы только время наблюдения увеличилось до величины, сравнимой со временем жизни нейтрона до его β -распада ~ 15 мин. Для этого «пролётной» методики уже недостаточно, потребуется запереть УХН в квантовую ловушку – ящик с идеально горизонтальным дном и вертикальными боковыми стенками, показанный схематически на рисунке 6.

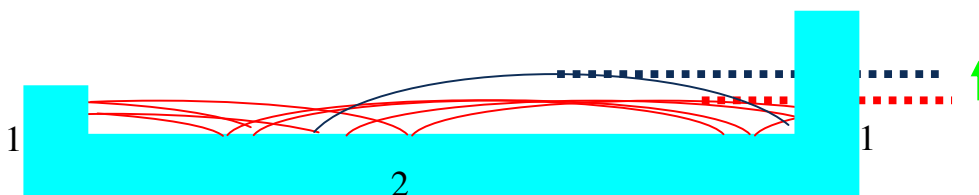


Рисунок 6. Квантовая ловушка УХН: (1) – вертикальные и (2) – горизонтальная стенки ловушки. Сплошными линиями схематически показаны траектории нейтронов в ловушке, а горизонтальными пунктирными линиями – уровни энергии нейтронов в этой ловушке.

Время хранения нейтронов в квантовых состояниях зависит от степени зеркальности отражения УХН от зеркал, которая и была измерена для одного из наиболее вероятных материалов для изготовления ловушки УХН: полированного монокристаллического сапфира. В итоге было показано, что высокая степень зеркальности отражения нейтронов от зеркал вплоть до значений $\sim 99.8\%$ достижима в реалистических экспериментальных условиях.

Квантовые же переходы могут быть индуцированы различными типами взаимодействий: сильным ядерным взаимодействием (за счёт механических осцилляций нижнего зеркала с частотой, соответствующей разнице энергий между квантовыми состояниями); магнитным полем (используется магнитный момент нейтрона), и, возможно, даже гравитационным взаимодействием (за счёт осцилляции тестовой массы вблизи экспериментальной установки). Одновременное использование двух методов возбуждения квантового перехода (например, интенсивный магнитный переход плюс слабый переход за счёт

гравитационного поля) и наблюдение интерференции между амплитудами этих переходов значительно увеличивают чувствительность к наблюдению более слабого из переходов. Если бы у нейтрона был небольшой ненулевой электрический заряд, то переходы между квантовыми состояниями можно было вызвать осцилляцией электрического поля – такой метод может быть использован для улучшения верхнего предела на оценку электрической нейтральности нейтрона.

Область применения гравитационно связанных состояний нейтронов и методов, развитых в рамках этой исследовательской программы, быстро развивается и охватывает широкий диапазон направлений. Поэтому обзор, представленный в *четвёртой главе* настоящей работы, отражает лишь круг интересов и компетенции автора и не претендует на полноту. Так, рассмотрена возможность применения этого явления в физике элементарных частиц для поиска спин-независимых и спин-зависимых дополнительных фундаментальных короткодействующих взаимодействий, экзотических частиц, для экспериментальной проверки электрической нейтральности нейтрона; для измерения интерференции квантовых состояний в гравитационном поле; для проверки расширений квантовой механики, связанных с взаимодействием квантовой системы с гравитационным полем; представлены такие методические применения гравитационно связанных квантовых состояний нейтронов и самого спектрометра, как исследование поверхностных плёнок; создание квантового нейтронно-плотного клапана, в частности, для экспериментов по измерению времени жизни нейтрона, эффективная транспортировка нейтронов, в частности селективное по углу извлечение нейтронов из источников *УХН* и из ловушек без существенной потери плотности *УХН* в ловушках.

В **заключении** сформулированы основные результаты и утверждения, выносимые на защиту.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Nesvizhevsky V.V., Börner H.G., Petoukhov A.K., Abele H., Bäbлер S., Rueß F.J., Stöferle Th., Westphal A., Gagarski A.M., Petrov G.A., Strelkov A.V., “Quantum states of neutrons in the Earth’s gravitational field”, *Nature* 2002, **415**, 297.

2. Nesvizhevsky V.V., Börner H.G., Gagarski A.M., Petoukhov A.K., Petrov G.A., Abele H., Bäbлер S., Divkovic G., Rueß F.J., Stöferle Th., Westphal A., Strelkov A.V., Protasov K.V., Voronin A.Yu., “Measurement of quantum states of neutrons in the Earth’s gravitational field”, *Phys. Rev D* 2003, **67**, 102002-1.

3. Nesvizhevsky V.V., Petoukhov A.K., Börner H.G., Protasov K.V., Voronin A.Yu., Westphal A., Bäbлер S., Abele H., Gagarski A.M., “Reply to Comment on Measurement of quantum states of neutrons in the Earth’s gravitational field”, *Phys. Rev. D* 2003, **68**, 108702.

4. Nesvizhevsky V.V., Petoukhov A.K., Börner H.G., Baranova T.A., Gagarski A.M., Petrov G.A., Protasov K.V., Voronin A.Yu., Bäbлер S., Abele H., Westphal A., Lucovac L., “Study of the neutron quantum states in the gravity field”, *Eur. Phys. J. C* 2005, **40**, 479.

5. Nesvizhevsky V.V., Börner H.G., Gagarski A.M., Petrov G.A., Petoukhov A.K., Abele H., Bäbлер S., Stöferle Th., Soloviev S.M., “Search for quantum states of neutrons in gravitational field”, *NIM A* 2000, **440**, 754.

6. Несвижевский В.В., “Квантовые состояния нейтронов в гравитационном поле и взаимодействие нейтронов с наночастицами”, *УФН* 2003, **146**, 102; Nesvizhevsky V.V., “Quantum states of neutrons in a gravitational field and the interaction of neutrons with nanoparticles”, *Phys. Usp.* 2003, **46**(1), 93.

7. Несвижевский В.В., “Исследование квантовых состояний нейтронов в гравитационном поле Земли над зеркалом”, *УФН* 2003, **147**, 569; Nesvizhevsky V.V., “Investigation of quantum neutron states in the terrestrial gravitational field above a mirror”, *Phys. Usp.* 2004, **47**, 515.

8. Nesvizhevsky V.V., “On experimental observation of quantum states of neutrons in gravitational field”, *ILL- 96NE14T*, 1996.

9. Nesvizhevsky V.V., Börner H.G., Petoukhov A.K., Gagarski A.M., Petrov G.A., Lukovac L., Abele H., Wahrwold S., Bäßler S., Reader S. Kuzmina T.M., Schrauwen J., Tischenko V.M., Protasov K.V., Voronin A.Yu., “Quantum fall in the gravitational field”, *ILL Annual Report* 2004.

10. Nesvizhevsky V.V., Petukhov A.K., Börner H.G., Baranova T.A., Gagarski A.M., Petrov G.A., Protasov K.V., Voronin A.Y., Bäßler S., Abele H., Westphal A., Lucovac L., “Investigation of the neutron quantum states in the earth’s gravitational field”, *Journ. Research NIST* 2005, **110**(3), 263.

11. Nesvizhevsky V.V., Protasov K.V. “Quantum states of neutrons in the earth’s gravitational field: state of the art, applications, perspectives”, In *Trends in Quantum Gravity Research* (65-107, 2006, NOVA, New York).

12. Voronin A.Yu., Abele H., Bäßler S., Nesvizhevsky V.V., Petoukhov A.K., Protasov K.V., Westphal A., “Quantum motion of a neutron in a waveguide in the gravitational field”, *Phys. Rev. D* 2006, **73**, 044029.

13. Meyerovich A.E., Nesvizhevsky V.V., “Gravitational quantum states of neutrons in a rough waveguide”, *Phys. Rev. A*, 2006, **73**(6), 063616(1).

14. Nesvizhevsky V.V., ”Constraints for quasi-elastic neutron reflections in the range $dE \sim 10^{-12}$ - 10^{-9} eV”, *Int. J. Mod. Phys. D* 2005, **14**(3-4), 511.

15. Nesvizhevsky V.V., Protasov K.V., “Constraints on non-Newtonian gravity from the experiment on neutron quantum states in the earth’s gravitational field”, *Class. Quant. Grav.* 2004, **21**, 4557.

16. Nesvizhevsky V.V., Protasov K.V., “Reply to Comment on Constraints on non-Newtonian gravity from the experiment on neutron quantum states in the earth’s gravitational field”, *Class. Quant. Grav.* 2006, **23**(1-2), 6081.

17. Nesvizhevsky V.V., Protasov K.V., “Constraints on non-Newtonian gravity from the experiment on neutron quantum states in the earth’s gravitational field”, *Journ. Research NIST* 2005, **110**(3), 269.

18. Nesvizhevsky V.V., “Polished sapphire for ultracold neutron guides”, *NIM A* 2006, **557**(2), 576.

19. Nesvizhevsky V.V., *European patent application FB16384* on «Ultra cold neutron guide» (2005).

20. Lambrecht A., Nesvizhevsky V.V., Onofrio R., Renaux S., “Development of a high-sensitivity torsion balance for the study of the Casimir force in the 1-10 micrometre range”, *Class. Quant. Grav.* 2005, **22**(24), 5397.