

# ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.172.4

ПОКОТИЛОВСКИЙ Юрий Наумович

Исследования генерации и взаимодействий ультрахолодных нейтронов

Специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра  
и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Дубна- 2011

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

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук А.Л.Барабанов

доктор физико-математических наук В.И.Лущиков

доктор физико-математических наук,  
профессор В.В.Фёдоров

Ведущая организация Государственный научный центр РФ  
Физико-энергетический Институт  
г.Обнинск Калужской обл.

Защита диссертации состоится "...."..... 2011г. в ... час. на заседании специализированного совета Д720.001.06 по присуждению учёных степеней при Лабораториях нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований по адресу: 141980, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "...."..... 2011г.

Учёный секретарь  
специализированного совета А.Г.Попеко

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность проблемы.* Ультрахолодные нейтроны (УХН, энергия ниже  $\sim 300$  нэВ, скорость ниже  $\sim 7,5$  м/с, длина волны больше  $\sim 400$  Å, эквивалентная температура ниже  $\sim 1$  мК) с их замечательным свойством возможности хранения в замкнутых объёмах в течение длительного времени сейчас являются полезным инструментом в исследовании фундаментальных свойств нейтрона и обещают применения в физике конденсированного состояния вещества. Развитие исследований и экспериментальной техники УХН представляет интересную и важную часть современной фундаментальной физики.

С самого начала исследований обозначились две основные проблемы: чрезвычайно низкая интенсивность потоков УХН и, соответственно, плотностей нейтронов в ловушках и неожиданно большие экспериментальные расхождения величины коэффициента потерь при отражении от стенок с предсказаниями теории. Эти расхождения ещё больше подогрели интерес к проблеме, вызвав появление работ, ставящих под сомнение правильность квантовомеханических расчётов, и стимулировав более детальное теоретическое рассмотрение взаимодействия квантовых волн с веществом и эксперименты по их проверке. Чрезвычайно малая энергия и весьма низкая (особенно на ранних этапах исследований) интенсивность потоков УХН в ряде случаев требовала изобретения и реализации новых оригинальных подходов к решению экспериментальных задач. Исследование свойств УХН и проведение фундаментальных экспериментов требовали поиска наиболее эффективных материалов для замедлителей и разработки методов генерации более высоких потоков УХН, в частности с ориентацией на импульсные источники нейтронов.

*Цель настоящей работы* заключалась в исследовании и разработке актуальных вопросов физики и экспериментальной техники УХН, а именно: в разработке корреляционной времяпролётной спектрометрии УХН и проведении экспериментов по исследованию свойств УХН с её применением – наблюдении металлического отражения нейтронов и проверке квантовомеханической теории взаимодействия УХН с отражающей стенкой, в поиске и реализации эффективных методов генерации УХН на импульсных источниках, в детальном исследовании генерации УХН в замедлителях, в поиске и исследовании наилучших материалов для стенок ловушек УХН, в исследовании деполяризации УХН при их отражении от стенок, в поиске новых применений УХН для постановки фундаментальных экспериментов.

*Научная новизна и практическая ценность работы.* В работе получены следующие новые методические и научные результаты:

Построены времяпролётные спектрометры УХН корреляционного типа с целью увеличения светосилы и отношения эффекта к фону при измерении спектров нейтронов при малой интенсивности и иногда в условиях относительно высокого фона. Проведён детальный анализ особенностей и возможных погрешностей корреляционного метода в применении к УХН. Разработаны и оптимизированы сцинтилляционные нейтронные детекторы для такой спектрометрии. Разработанная спектрометрия применена для наблюдения эффекта металлического отражения нейтронов от поверхности веществ с большим сечением захвата. Предложен и численно промоделирован метод измерения очень малых изменений энергии УХН, основанный на использовании комбинации интерференционных фильтров. Этот метод нашёл в дальнейшем применение в экспериментах. Создан времяпролётный спектрометр с кольцевым координатным детектором для измерения полных и дифференциальных сечений рассеяния очень медленных нейтронов. На этом спектрометре измерены нейтронные сечения в диапазоне длин волн 200-1000 Å для ряда материалов, существенных для физики УХН. Экспериментально проверена квантовомеханическая теория взаимодействия УХН с веществом путём послойного измерения активации подбарьерными нейтронами материала отражающей стенки. Предложены новые методы генерации УХН на импульсных источниках. Метод движущегося конвертера был позже испытан в совместных экспериментах ЛНФ ОИЯИ и Института прикладной физики в г. Сарове. В соответствии с другим методом – нестационарного транспорта по зеркальному нейтроноводу – проведены измерения генерации УХН в твёрдом дейтерии на импульсном реакторе ТРИГА. Предложена постановка экспериментов и всесторонне экспериментально исследована генерация УХН в наиболее перспективных низкотемпературных замедлителях-конвертерах УХН: дейтерии, кислороде и дейтерометане в газообразном, жидком и твёрдом состояниях. Предложены и экспериментально исследованы новые материалы – низкотемпературные фторполимеры – для покрытия стенок ловушек УХН с целью минимизации их потерь при хранении. На основе этих измерений предсказан коэффициент потерь УХН  $2 \times 10^{-6}$ , подтверждённый в дальнейшем в прямых экспериментах, и неплохо согласующийся с расчётами на основе измеренной плотности возбуждений для этих веществ. В дальнейшем на

основе этих исследований было проведено новое измерение времени жизни нейтрона с улучшенной точностью. Разработана методика и измерены спектры квазиупруго и неупруго рассеянных УХН при их подбарьерном отражении от поверхности твёрдых тел. Теоретически рассмотрена деполяризация УХН в ловушках. Предложены и проанализированы различные возможные варианты экспериментального поиска осцилляций нейтрон – зеркальный нейтрон. На основе этих предложений были в дальнейшем проведены первые специальные эксперименты по установлению ограничений на период таких осцилляций.

*На защиту выносятся*

– Создание времяпролётных спектрометров УХН корреляционного типа для измерения спектров нейтронов в условиях низкой интенсивности и иногда относительно высокого фона и разработка и оптимизация сцинтилляционных нейтронных детекторов для такой спектрометрии.

– Предложение и численное моделирование метода измерения очень малых изменений энергии УХН, основанного на использовании комбинации интерференционных фильтров.

– Создание времяпролётного спектрометра с кольцевым координатным детектором для измерения полного и дифференциального сечения рассеяния очень медленных нейтронов.

– Предложение новых методов генерации УХН на импульсных источниках, МСНР-расчёты генерации и первые эксперименты по генерации УХН на импульсном реакторе ТРИГА.

– Предложение новой постановки и проведение экспериментов по исследованию генерации УХН в низкотемпературных замедлителях-конвертерах УХН: дейтерии, кислороде и дейтерометане в газообразном, жидком и твёрдом состояниях.

– Предложение и исследование новых материалов – низкотемпературных фторполимеров – для покрытия стенок ловушек УХН с целью минимизации их потерь при хранении.

– Разработка методики измерения вероятности рассеяния и спектров квазиупруго рассеянных УХН при их подбарьерном отражении от поверхности твёрдых тел.

– Теоретическое рассмотрение деполяризация УХН в ловушках.

– Предложение и анализ возможных вариантов экспериментального поиска осцилляций нейтрон – зеркальный нейтрон.

*Полученные автором результаты:*

– Детальный анализ особенностей и возможных погрешностей корреляционного времяпролётного метода в применении к спектрометрии УХН.

– Наблюдение эффекта металлического отражения нейтронов при их отражении от поверхности веществ с большим сечением захвата.

– Измерение нейтронных сечений в диапазоне длин волн 200-1000 Å для ряда материалов, существенных для физики УХН: Al, Cu, Zr, Si, <sup>6</sup>LiF, тефлон, полиэтилен, фторполимеры.

– Экспериментальная проверка квантовомеханической теории взаимодействия УХН с веществом путём послойного измерения активации подбарьерными нейтронами материала отражающей стенки.

– Расчёты и измерение генерации УХН в твёрдом дейтерии на импульсном реакторе ТРИГА.

– Всестороннее экспериментальное исследование генерации УХН в наиболее перспективных низкотемпературных замедлителях-конвертерах УХН: дейтерии, кислороде и дейтерометане в газообразном, жидком и твёрдом состояниях.

– Экспериментальное исследование новых материалов – низкотемпературных фторполимеров – для покрытия стенок ловушек УХН с целью минимизации их потерь при хранении.

– Измерение спектров квазиупругого рассеяния УХН при их подбарьерном отражении от поверхности твёрдых тел: меди и тефлона.

– Теоретическое рассмотрение деполяризации УХН в ловушках.

– Предложение и анализ различных возможных вариантов экспериментального поиска осцилляций нейтрон – зеркальный нейтрон.

*Апробация работы:* Результаты работы, изложенные в диссертации докладывались на ряде международных конференций и семинарах в различных физических лабораториях мира: на Сессии Отделения ядерной физики АН СССР (1984), 2-й (1999), 3-й (2001), 4-й (2003), 5-й (2005) и 6-й (2007) Международных Конференциях "Ультрахолодные и холодные нейтроны – физика и источники", на Специальном Совещании Зимней Сессии Американского ядерного общества "Физика, безопасность и применение импульсных реакторов"(Вашингтон, ноябрь 1994); на Совещании "Ультрахолодные нейтроны"(Санта Фе, декабрь 1995); на

Международной конференции "Нейтронная оптика", (Куматори, Япония, март 1996); на Специальном Совещании экспертов Европейского спаллейшн источника (ESS) "Эксплуатация новых источников УХН, адаптированных к импульсным спаллейшн-источникам"(Вена, февраль 2002); на семинаре Института физики Университета Гейдельберг (март 2006); на трёх семинарах Института ядерной теории Университета шт. Вашингтон по Программе "Фундаментальная нейтронная физика"(Сиэтл, апрель 2007); на XVI-II Совещании Международной Коллаборации по передовым нейтронным источникам ICANS XVIII (Гуандонг, КНР, апрель 2007); на Международном Совещании по физике частиц с медленными нейтронами (Гренобль, май 2008); на семинаре Института физики Университета г. Майнц (июнь 2008); на Совещании "Специализированные нейтронные пучки на реакторах малой и средней мощности и анти-группировка нейтронов"(Вена, октябрь 2008); на семинарах Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

*Объём и структура диссертации.* Диссертация состоит из введения, 8 глав и заключения, изложена на 221 странице, включая 4 таблицы и 112 рисунков. Список литературы содержит 230 наименований.

## II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *введении* обосновывается актуальность темы, формулируется цель исследования и основные положения, выносимые на защиту. УХН имеют свойство отражаться от поверхности веществ с положительной длиной рассеяния при всех углах падения. Свойство УХН отражаться при всех углах падения с вероятностью близкой к единице означает возможность их хранения в замкнутых объёмах в течение длительного времени, в идеале приближающегося к времени бета-распада нейтрона. В первую очередь именно эта возможность, позволяющая проводить прецизионные эксперименты по исследованию фундаментальных свойств нейтрона и его взаимодействий, стимулировала исследования с УХН. Одна из наиболее интересных и важных проблем в физике УХН состоит в реализации предсказываемых теорией величин коэффициента потерь  $\eta$ :

$$\eta = -\operatorname{Im} U / \operatorname{Re} U, \quad \operatorname{Re} U = E_b, \quad \operatorname{Im} b = -\sigma(\lambda)/2\lambda, \quad (1)$$

где граничная энергия отражающей стенки:

$$E_b = \frac{\hbar^2}{2m} 4\pi \sum N_i b_{coh,i}, \quad (2)$$

$N_i$  – число ядер  $i$ -сорта в единице объёма вещества,  $b_{coh,i}$  – длина когерентного рассеяния нейтрона на связанных ядрах сорта  $i$ ,  $m$  – масса нейтрона,  $\sigma$  – сечение неупругих процессов взаимодействия нейтронов с веществом стенки.

Рассчитанная величина коэффициента потерь  $\eta$  для наиболее интересных для хранения нейтронов веществ, имеющих достаточно большую граничную энергию и малое сечение захвата нейтронов: бериллий, углерод, D<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> и др., может быть очень мала (особенно при низких температурах, когда неупругое рассеяние подавлено) и составляет  $10^{-6} - 10^{-7}$ .

Перспективным может быть и применение УХН в изучении структуры и динамики конденсированного состояния вещества, так как нейтроны с большой длиной волны особенно чувствительны к структурным неоднородностям и к динамике движения крупных молекул и кластеров.

В *первой главе*, посвящённой спектрометрии очень медленных нейтронов, описаны разработанные времяпролётные корреляционные спектрометры с механическими псевдослучайными прерывателями (малый с диаметром диска прерывателя 40 см и большой с диаметром диска 160 см), созданные для увеличения светосилы и отношения эффекта к фону при измерении спектров очень медленных нейтронов.

В корреляционном методе прерыватель в течение периода модуляции пучка  $T$  открывается  $n$  раз вместо одного раза, как в классическом методе пролёта. В результате эффективный поток частиц на детектор увеличивается в  $n$  раз при неизменном фоне. Модуляция пучка частиц псевдослучайным прерывателем производится по закону

$$S(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i g(t - i\Delta T), \quad (3)$$

где  $g(t)$  – модуляция пучка прерывателем с одной щелью,  $N$  – число элементарных интервалов длительностью  $\Delta T$  в периоде последовательности  $T = N \cdot \Delta T$ , и для корреляционного метода  $a_i$  – псевдослучайная бинарная последовательность нулей и единиц.

Если ширина канала временного анализатора  $\Delta\tau$  равна элементарному интервалу  $\Delta T$ , то число нейтронов, зарегистрированных в  $k$ -том канале:

$$z_k = \sum_{i=0}^{N-1} a_{k-i} f_i + u_k, \text{ или, в матричной форме } Z = A \cdot F + U, \quad (4)$$

где  $f_i$  – времяпролётный спектр, соответствующий  $i$ -тому каналу анализатора,  $u_i$  – средний уровень фона в канале,  $Z$  –  $N$ -мерный вектор, элементами



которого являются величины  $z_k$  отсчётов в каналах анализатора,  $F$  и  $U$  – векторы времяпролётного спектра и фона, соответственно,  $A$  – циклическая  $N \times N$  матрица, строки которой получены циклической перестановкой последовательности  $a_i$ . Для обычного прерывателя матрица  $A$  переходит в единичную  $I$ . Из двух последних выражений следует, что времяпролётный спектр (при  $\det A \neq 0$ ):  $F = B(Z - U)$ , где  $B \cdot A = I$ . Таким образом эти соотношения позволяют получать распределение по времени пролёта  $F$  по распределению  $Z$ , зарегистрированному анализатором. Изложен метод и проанализированы особенности корреляционного анализа при псевдослучайной модуляции потока очень медленных нейтронов. Исследованы факторы, влияющие на функцию разрешения, а именно: конечная толщина прерывателя и нестабильный сдвиг фаз между развёрткой анализатора и вращением механического прерывателя, создающего модулирующую последовательность. Изложены результаты компьютерного моделирования работы корреляционного спектрометра.

Представлены результаты разработки и оптимизации специальных сцинтилляционных детекторов УХН, содержащих сцинтилляторы  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  и паратерфенил и радиаторы  ${}^6\text{LiOH}$  и  ${}^6\text{LiF}$ , применяемых в описанных спектрометрах. Описан сцинтилляционный детектор УХН с гофрированным вращающимся сцинтиллятором, не отражающий нейтроны и имеющий эффективность, не зависящую от энергии нейтронов. Изложен метод измерения энергетической зависимости эффективности детекторов УХН и результаты его применения для получения характеристик созданных детекторов.

Представлены результаты тестирования корреляционного спектрометра при измерении прохождения УХН через интерференционные фильтры.

Описана предложенная схема и результаты численного моделирования способа измерения очень малых изменений энергии нейтронов, основанный на применении комбинаций интерференционных фильтров.

Описан времяпролётный спектрометр с вертикальной пролётной базой и горизонтальным кольцевым координатным детектором, предназначенный для измерения полного и дифференциального сечения рассеяния очень медленных нейтронов. Проанализировано влияние гравитации на работу и разрешение такого спектрометра. Представлены результаты измерений полных и дифференциальных сечений в диапазоне длин волн 200-1000 Å для ряда материалов интересных для физики УХН: Al, Cu, Zr, Si,

${}^6\text{LiF}$ , тефлон, полиэтилен, фторполимеры. Из анализа поведения полных и дифференциальных сечений извлечены параметры, характеризующие неоднородность исследованных материалов в терминах величины флуктуаций плотности и корреляционной длины этих флуктуаций.

Во *второй главе* описано применение разработанного спектрометра для наблюдения эффекта металлического отражения нейтронов от поверхности веществ с большим сечением захвата.

Амплитуда отраженной от поверхности раздела нейтронной волны имеет вид

$$r = \frac{p_{n0} - p_n}{p_{n0} + p_n}, \quad (5)$$

где  $p_{n0}$  и  $p_n = (p_{n0}^2 - 2mU)^{1/2}$ , соответственно, нормальные к поверхности раздела компоненты импульса нейтрона в вакууме и веществе и  $m$  – масса нейтрона. Потенциал взаимодействия нейтрона со средой в соответствии с ур. (1) и (2) можно записать

$$U = U' - iU'' = \frac{1}{2m}(p'^2 - ip''^2). \quad (6)$$

Видно, что при чисто мнимой длине рассеяния коэффициент отражения  $R = |r|^2$  отличен от нуля и при  $p_{n0}^2 \ll 2m|U|$   $R \rightarrow 1$ , и в пределе малых энергий увеличение поглощения приводит к увеличению отражения.

Описана установка для измерения коэффициента отражения УХН, позволяющая проводить измерение спектральной зависимости отражения нейтронов от свеженапылённых в вакууме металлических поверхностей. Для измерения спектров использовался большой корреляционный времяпролётный спектрометр.

Для элементов с большим сечением захвата из-за наличия низколежащих резонансов длина рассеяния заметно изменяется даже в диапазоне энергий медленных нейтронов. В этом случае энергетический ход длины рассеяния определяется формулой Брейта-Вигнера:

$$b = b_0 + \sum_j \frac{2\Gamma_{nj}(E - E_j)g_j}{k_j[4(E - E_j)^2 + \Gamma_j^2]} - i \sum_j \frac{\Gamma_{nj}\Gamma_j g_j}{k_j[4(E - E_j)^2 + \Gamma_j^2]}, \quad (7)$$

где  $b_0$  – длина потенциального рассеяния,  $\Gamma_j$  и  $\Gamma_{nj}$  – полная и нейтронная ширины резонанса при энергии  $E_j$ ,  $g_j$  – статистический фактор,  $k_j$  – волновой вектор при энергии  $E_j$ .

Для проверки достоверности данных отработана методика получения зеркально гладкой, но не отражающей нейтроны подложки из смеси изотопов

самария:  $^{152}\text{Sm}_{0,4} -^{nat}\text{Sm}_{0,6}$ , для которой реальная часть потенциала для нейтронов  $U'$  очень мала, а мнимая часть потенциала ещё недостаточно велика для проявления заметного "металлического" отражения:  $b = (0,06 - 0,59i)F$ .

Металлическое отражение, обязанное мнимой части потенциала отражающей стенки, продемонстрировано для изотопа  $^{155}\text{Gd}$ , для которого  $b = (0,67 - 13,04i)F$ .

В *третьей главе* рассмотрены эксперименты по проверке квантовомеханической теории взаимодействия УХН с веществом. Изложена ситуация с проблемой хранения УХН, заключающаяся в сильном расхождении расчётных и экспериментальных коэффициентов потерь УХН при отражении от стенки.

Описана низкофоновая установка для измерения с высокой эффективностью малых бета-активностей и эксперименты по послойному измерению активации медной отражающей стенки подбарьерными нейтронами. Описаны методы определения плотности потока нейтронов в камере облучения: метод чёрного детектора и метод активации фольг из никель-марганцевого сплава с нулевой суммарной амплитудой когерентного рассеяния. Проведено сравнение полученных результатов по активации отражающей стенки с квантовомеханическими расчётами и показано хорошее соответствие с ними на уровне  $10^{-5}$  для величины коэффициента потерь на одно отражение, что в 50 раз меньше, чем измеренный коэффициент потерь для меди.

В *четвёртой главе* излагаются предложенные методы генерации УХН на импульсных источниках нейтронов: метод движущегося конвертера и метод нестационарного транспорта УХН по зеркальному нейтроноводу и захвата ультрахолодных нейтронов в ловушку.

После экспериментов ПИЯФ стало ясно, что перспективным материалом для криогенного конвертера УХН является твёрдый дейтерий. Излагаемая работа имела акцент на импульсной генерации УХН, на измерении сечений генерации в разных конвертерах и на исследовании зависимости сечений генерации от спектра падающих нейтронов и температуры конвертера.

Представлены результаты расчётов потоков тепловых и холодных нейтронов на реакторе ТРИГА МАРК-2 в детальной реалистической геометрии активной зоны реактора, нейтроноводов и холодных замедлителей с помощью программы MCNP и затем, с использованием этих результатов, генерации УХН в дейтерии в однофононном некогерентном приближении с использованием

плотности фононных состояний для твёрдого дейтерия. В частности получено, что при наличии твёрдо-метанового предзамедлителя ожидаемая генерация УХН в дейтериевом конвертере в радиальном канале реактора при штатном 10 МДж импульсе реактора составляет  $3,5 \times 10^5$  УХН/см<sup>3</sup> или  $7 \times 10^7$  УХН в конвертере объёмом 200 см<sup>3</sup>. Описаны результаты измерения тепловыделения в ряде материалов при импульсе реактора и проведено сравнение с расчётами. Описаны первые эксперименты по импульсной генерации УХН в низкотемпературном твёрдом дейтериевом конвертере на касательном канале аperiodического импульсного реактора ТРИГА МАРК-2 Университета г. Майнц и проведено сравнение с расчётом. Исследовано влияние термоциклирования ("отжига") на прозрачность кристаллов дейтерия для УХН.

Описаны новая предложенная постановка экспериментов, установка и детальное исследование генерации УХН в проточном и накопительном режимах в наиболее перспективных криогенных замедлителях: дейтерии, кислороде и дейтерометане в широком диапазоне температур в газообразном, жидком и твёрдом состояниях, проведённое на выведенном пучке холодных нейтронов в Институте Пауля Шерера (PSI). Для дейтерия также измерена генерация УХН на сепарированных по скорости пучках холодных нейтронов, проведено сопоставление данных эксперимента с многофононными расчётами и получено неплохое согласие.

Для всех трёх замедлителей представлены результаты измерений полных сечений для холодных нейтронов при различных температурах и кристаллических фазах.

В *пятой главе* содержится описание предложения новых материалов для покрытия стенок ловушек УХН – низкотемпературных фторполимеров и исследования их свойств. Прецизионное измерение времени жизни нейтрона важно для установления параметров Стандартной модели и уточнения процесса нуклеосинтеза на ранней стадии. Величина необходимых поправок и систематических ошибок при извлечении из данных измерений величины времени жизни методом хранения УХН в замкнутом объёме зависит от величины потерь нейтронов при столкновениях со стенками. Поэтому поиск новых материалов с минимальными потерями и исследование их свойств существенны для продвижения в направлении к более высокой точности экспериментов.

Были исследованы ряд низкотемпературных фторполимеров российского производства, синтезированных в Пермском филиале РНЦ "Прикладная химия" и в Государственном исследовательском институте органической химии и технологии в Москве. Описаны результаты измерений вязкости и сечений рассеяния нейтронов в диапазоне длин волн 1-20 Å в функции температуры от 10 до 300 К. Измерения нейтронных сечений проводились на пучке импульсного реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ. Наиболее интересными и перспективными оказались сложные полифтороксиметилены с общей формулой  $\text{CF}_3\text{O}(\text{CF}_2\text{O})_n(\text{CF}_2\text{CF}_2\text{O})_m(\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{O})_l\text{CF}_3$  с  $n:m:l=65,8:3,1:0,2$  и молекулярным весом 4883, и  $n:m:l=30,3:1,5:0,2$  и молекулярным весом 2354, имеющими температуру потери текучести вблизи -100 С. На основании измерений нейтронных сечений вычислен ожидаемый коэффициент потерь нейтронов –  $\eta = 2 \times 10^{-6}$  при температуре около 160° К, вблизи которой параметр вязкости удобен для удержания полимера на поверхности.

Оценено квазиупругое рассеяние нейтронов на диффузно движущихся крупных молекулах полимера и теоретически рассмотрено рассеяние нейтронов вязкоупругими поверхностными волнами при отражении УХН от поверхности вязкой жидкости и их влияние на потери ультрахолодных нейтронов при хранении. Для случая вязкоупругих поверхностных волн рассмотрение проведено в рамках модели Максвелла вязкой жидкости с использованием динамического структурного фактора для изотропной вязкоупругой среды, определяемого четырьмя параметрами среды: температурой  $T$ , плотностью  $\rho$ , модулем сдвига  $G$  и временем релаксации сдвиговых напряжений  $\tau$ . Вероятность рассеяния нейтрона с начальным волновым вектором  $\vec{k}_0$  и конечной энергией  $E$  определяется интегралом от динамического структурного фактора для изотропной вязкоупругой среды  $S\left(q, \frac{\Delta E}{\hbar}\right)$  по переданному волновому вектору  $q$ :

$$w(\vec{k}_0 \rightarrow E) = \frac{16k_{0\perp}}{(2\pi)^3} \frac{1}{2\hbar} \int S\left(q, \frac{\Delta E}{\hbar}\right) \vec{k}_\perp \cdot q \cdot dq \cdot d\phi. \quad (8)$$

Из расчётов вероятности рассеяния в функции переданной энергии следует, что при отражении УХН может иметь место энергетическое уширение порядка (1-10) нэВ. Кроме возможности количественного сравнения рассчитанных вероятностей с экспериментальными данными удалось извлечь из последних диапазон параметров динамической модели – модуля сдвига  $G$  и времени релаксации сдвиговых напряжений  $\tau$ .

На основе описанных исследований низкотемпературных фторполимеров в дальнейшем был поставлен эксперимент по измерению времени жизни нейтрона путём хранения УХН в ловушках, покрытых исследованным фторполимером. В этих экспериментах удалось достигнуть предсказанного коэффициента потерь  $\eta = 2 \times 10^{-6}$ , так что поправки на потери УХН на стенках составляли лишь (1-2)% от бета-распада нейтрона, что на порядок меньше, чем в предыдущих измерениях времени жизни нейтрона методом хранения УХН в замкнутых объёмах.

На основе измерения спектров возбуждений фторполимеров были вычислены ожидаемые коэффициенты потерь УХН при отражении в функции температуры и сделаны оптимистические заключения о возможности дальнейшего прогресса в направлении уменьшения коэффициента потерь УХН при хранении в область  $\eta \approx 10^{-7}$ .

В *шестой главе* содержится описание методики и измерений спектров квазиупруго рассеянных УХН при их подбарьерном отражении от поверхности твёрдых тел: меди, тефлона и алмазоподобного углерода.

Природа эффекта малых передач энергии, идущих с неожиданно большой вероятностью  $\sim 10^{-6} - 10^{-5}$  при отражении от твёрдых поверхностей не вполне ясна. Рассчитываемая вероятность рассеяния на фонах со столь малыми передачами энергии должна быть много порядков меньше. Предлагались различные механизмы для объяснения столь большой вероятности рассеяния в столь малый нейтронный фазовый объём: диффузионное движение атомов водорода, адсорбированного на поверхности или растворённого в приповерхностном слое, и движение малых слабосвязанных частиц на поверхности.

Описываемый метод спектрометрии квазиупругого рассеяния УХН основан на измерении временных зависимостей скорости счёта нейтронов, вылетающих из камеры хранения УХН, т.е. рассеянных исследуемым образцом, при использовании в качестве поглотителей пластин из монокристаллического кремния и родиевых фольг. В описанных экспериментах по сравнению с прежними работами, где этот эффект изучался с противоречивыми результатами, спектр начальных нейтронов был расширен с 50 нэВ до 150-200 нэВ, диапазон энергии рассеянных детектируемых нейтронов был расширен до возможного максимума – от УХН до тепловых.

Скорость счёта детектора рассеянных нейтронов при наличии поглотителя

между образцом и детектором есть результат интегрирования:

$$N_{absorber}^{exper}(t) = \int \varphi(v, t) \epsilon_{eff}^{av}(v, absorber) dv \quad (9)$$

где  $\varphi(v, t)$  нейтронный поток, а эффективность регистрации детектором нейтронов со скоростью  $v$ , пересекающих чувствительный объём детектора после прохождения сквозь поглотитель равна

$$\epsilon_{eff}(v, \theta, \mathbf{r}, \mathbf{r}', absorber) = e^{-d_{abs}\Sigma_{abs}(v)/\cos\theta} (1 - e^{l_{det}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\Sigma_{det}(v)}), \quad (10)$$

где  $d_{abs}$  – толщина поглотителя,  $\theta$  – угол нейтронной траектории по отношению к нормали плоскости поглотителя,  $\Sigma_{abs}(v)$  – макроскопическое сечение поглотителя для нейтронов со скоростью  $v$ ,  $l_{det}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$  – длина нейтронной траектории внутри объёма детектора, зависящая от координат  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{r}'$  точек входа нейтрона в детектор и выхода из него,  $\Sigma_{det}(v)$  – макроскопическое сечение поглощения нейтрона ядрами  ${}^3\text{He}$  в объёме детектора. Эта эффективность моделировалась методом Монте-Карло в функции скорости нейтрона и толщины поглотителя

$$\epsilon_{eff}^{av}(v, absorber) = \langle \epsilon_{eff}(v, \theta, \mathbf{r}, \mathbf{r}', absorber) \rangle_{trajectories} \quad (11)$$

в результате усреднения по всем траекториям нейтронов, рассеянных образцом и пересекающих объём детектора.

Спектры рассеянных нейтронов  $\varphi(v) = \langle \varphi(v, t) \rangle_{\Delta t}$ , усреднённые по времени для различных временных интервалов  $\Delta t$  хранения нейтронов, извлекались из экспериментальных данных методом наименьших квадратов в различных предположениях о форме этих спектров.

Вероятность рассеяния с малой передачей энергии (полученное как отношение измеренного потока нагретых нейтронов к плотности потока падающих УХН и к площади образца) оказалась равной  $(2 \pm 0.2) \times 10^{-4}$  для тефлона и  $(5 \pm 0.9) \times 10^{-5}$  для медных образцов.

Далее в этой главе рассмотрен возможный эффект проявления диффузии водорода в квазиупругом рассеянии УХН при их отражении от поверхности. Как известно, обычной проблемой для хранения УХН в замкнутых сосудах являются водородсодержащие загрязнения поверхности.

Диффузия водорода в адсорбированном слое или в приповерхностном слое при комнатной температуре может быть значительной с коэффициентом диффузии  $D \simeq 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с и более. Водород, растворённый в металлах, также в ряде случаев имеет большой коэффициент диффузии.

При малых изменениях волнового вектора  $\kappa$  уширение функции рассеяния при одном акте рассеяния (полуширина на полувысоте) равна  $\delta E = \hbar\kappa^2 D$ , и при исходной энергии нейтрона  $\simeq 50$  нэВ и  $D \simeq 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с имеем  $\delta E \simeq 2$  нэВ, а в результате сотен актов рассеяния во время хранения УХН  $\Delta E = \delta E \cdot n^{1/2}$ , уширение спектра может достигать десятков нэВ.

Интегрирование по телесному углу выражения для дважды дифференциального сечения квазиупругого рассеяния в классическом пределе даёт дифференциальное сечение квазиупругого рассеяния в функции переданной энергии  $\epsilon$ :

$$\frac{d\sigma_{qel}}{d\epsilon} = 4\pi b_{inc}^2 \frac{a}{E_0} \ln \left[ \frac{d^2 + b^2 \left( (1+d)^{1/2} + 1 \right)^4}{d^2 + b^2 \left( (1+d)^{1/2} - 1 \right)^4} \right], \quad (12)$$

где  $a = \hbar/(16\pi MD)$ ,  $M$  – масса нейтрона,  $b = 2MD/\hbar$ , и  $d = \epsilon/E_0$ ,  $E_0$  – начальная энергия нейтрона. Результаты вычислений дифференциального сечения и вероятности квазиупругого рассеяния на диффундирующем атоме водорода показали, что при достаточно высоких коэффициентах диффузии этот механизм может давать заметный вклад.

В *седьмой главе* теоретически рассмотрена деполяризация УХН в ловушках, имеющая значение при измерении ЭДМ нейтрона и угловых корреляций при распаде нейтрона с применением ультрахолодных нейтронов.

Очевидно, что деполяризация УХН в ловушках отчасти увеличивает ширину резонансной линии и уменьшает глубину провала в резонансной кривой, ухудшая чувствительность эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона.

Было показано, что вероятность переворота спина нейтрона при отражении от материальной стенки в неоднородном магнитном поле может быть значительной даже если параметр адиабатичности для движения спина в этом поле велик. Это происходит потому, что производная по времени магнитного поля в системе нейтрона претерпевает разрыв в том смысле, что отражение от стенки происходит за время очень малое по сравнению с периодом Ларморовской прецессии.

Пусть нейтральная частица с магнитным моментом движется в неоднородном магнитном поле внутри ловушки, отражаясь от её стенок. Поместим систему координат нейтрона в точке отражения так, что ось  $x$  направлена вдоль магнитной силовой линии. При постоянных  $H_x \neq 0$ ,  $H_y = 0$ ,  $H_z = t\dot{H}$ ,  $\dot{H} > 0$  решая уравнения Шредингера для спинорных компонент

$$\ddot{\phi} + (\omega^2 - ia + a^2 t^2)\phi = 0, \quad \ddot{\chi} + (\omega^2 + ia + a^2 t^2)\chi = 0, \quad (13)$$



где  $\omega = \mu H_x/\hbar$ ,  $a = \mu \dot{H}/\hbar$ ,  $\mu$  – магнитный момент нейтрона, подставляя  $\phi = e^{-z/2}u$ ,  $\chi = e^{-z/2}v$ ,  $z = -iat^2$ , и вводя  $\alpha = \omega^2/4ia$ , получаем выражения для вероятности переворота спина по отношению к направлению магнитного поля:

$$|\phi(+\infty)|^2 \simeq \frac{9}{4}(\xi - \xi')^2 \text{ и } |\phi(+\infty)|^2 \simeq \frac{9}{4}(\xi + \xi')^2, \quad (14)$$

в зависимости от знака изменения во времени компоненты  $H_z(t)$  магнитного поля до и после отражения нейтрона от стенки, и где  $\xi = 1/24|\alpha|$ ,  $\xi' = 1/24|\alpha'|$ .

Численные оценки для конкретных ситуаций дают, что по сравнению с движением нейтрона без отражений, когда вероятность переворота спина экспоненциально мала, при наличии отражений она резко возрастает даже при достаточно высокой степени однородности магнитного поля.

В *восьмой главе* содержится анализ возможных вариантов экспериментального поиска осцилляций нейтрон – зеркальный нейтрон.

Предположение о существовании частиц с обратной асимметрией впервые было высказано в исторической работе Ли и Янга, содержащей гипотезу о нарушении чётности. После наблюдения  $CP$ -нарушения эта идея была вновь возрождена в работе Кобзарева, Окуня и Померанчука. В этой работе было показано, что зеркальные частицы, если они существуют, не могут взаимодействовать с обычными частицами посредством обычного сильного или электромагнитного взаимодействия, но только посредством некоего нового слабого и преимущественно гравитационного взаимодействий. За последующие 40 лет появилось много новых идей в этом направлении. Были высказаны аргументы, что тёмная материя может состоять из зеркальных объектов. Концепция зеркальной материи нашла также развитие в теориях суперструн.

Недавно также было предположено, что быстрые  $n \rightarrow n'$ -осцилляции могут обеспечить эффективный механизм прохождения на очень большие космические расстояния протонов сверхвысоких энергий, выше порога обрезания Грайзена-Зацепина-Кузмина  $5 \times 10^{19}$  эВ. Оказалось, что существующие экспериментальные ограничения на осцилляции  $n \rightarrow n'$  очень слабы так как единственным сигналом такого перехода является исчезновение нейтрона. Специальных экспериментов по поиску такого исчезновения на момент рассмотрения этой проблемы не проводилось.

В работе была рассмотрена ситуация, существующая в вопросе ограничений на осцилляции нейтрон-зеркальный нейтрон, и проанализированы возможные эксперименты по установлению таких ограничений. Рассмотрены подходы на основе регистрации факта исчезновения нейтронов: нейтронный пучковый

эксперимент и эксперимент по хранению УХН в ловушках и рассчитана чувствительность возможных экспериментов. Вскоре после публикации этого рассмотрения и с использованием предложенной здесь схемы постановки экспериментов были проведены измерения с УХН, в которых были установлены новые, более высокие ограничения на время осцилляций нейтрон-зеркальный нейтрон на уровне  $\tau_{osc} > 400$  с (90%).

В *заключении* содержатся основные итоги изложенных в диссертации исследований:

1. С целью увеличения светосилы и отношения эффекта к фону при измерении спектров очень медленных нейтронов разработана времяпролётная спектрометрия УХН корреляционного типа. Сконструированы и построены два времяпролётных спектрометра – малый с диаметром прерывателя 40 см и большой с диаметром прерывателя 160 см. Разработаны и оптимизированы сцинтилляционные детекторы УХН для такой спектрометрии.
2. Построен времяпролётный рефлектометр для УХН с возможностью нанесения многослойных металлических покрытий на отражающую нейтроны поверхность методом испарения в вакууме смесей металлов непосредственно на пучке нейтронов. Разработанная спектрометрия и рефлектометр применены для наблюдения предсказанного ранее эффекта металлического отражения нейтронов при их отражении от поверхности веществ с большим сечением захвата.
3. Предложен и численно промоделирован метод измерения малых изменений энергии ультрахолодных нейтронов, основанный на применении комбинаций интерференционных фильтров. Предложенный метод затем был реализован другой группой и применён для наблюдения и исследования нескольких нейтронно-оптических эффектов.
4. Создан времяпролётный спектрометр с кольцевым координатным детектором для измерения полных и дифференциальных сечений рассеяния очень медленных нейтронов. Проведены измерения нейтронных сечений для ряда материалов (Al, Zr, Cu, Si,  ${}^6\text{LiF}$ , тефлон, полиэтилен, фторполимеры) в диапазоне длин волн 200-1000 Å и из сечений определены параметры неоднородности среды для неоднородных материалов.

5. Экспериментально проверена теория взаимодействия УХН с веществом при их отражении от материальной стенки. Это сделано путём послойного измерения активации подбарьерными нейтронами материала отражающей медной стенки. Показано, что по крайней мере на уровне коэффициента потерь  $10^{-5}$  нет оснований для модификации принятой теории взаимодействия УХН с веществом отражающей стенки.
6. Предложены новые методы генерации УХН на импульсных нейтронных источниках: метод движущегося конвертера и метод нестационарного захвата УХН в ловушку. Проведены подробные расчёты методом Монте-Карло с применением программы MCNP генерации УХН в различных низкотемпературных конвертерах: пара-водород и орто-дейтерий с различными низкотемпературными предзамедлителями: орто-водород, мезитилен, метан. Показано, что при оптимальном выборе комбинации предзамедлитель-конвертер на радиальном канале реактора ТРИГА Марк-2 и при стандартном импульсе реактора с энерговыделением 10 МДж количество рождаемых УХН в дейтериевом конвертере объёмом 200 см<sup>3</sup> приближается к  $10^8$ . Отсюда следует, что при разумных потерях УХН при транспортировке по нейтроноводу и их захвате в ловушку число УХН в ловушке может достигать  $10^7$ , что во много раз превышает достигнутое на лучшем источнике УХН в Институте Лауэ-Ланжевена. Проведены первые эксперименты по импульсной генерации УХН в твёрдодейтериевом замедлителе на импульсном реакторе ТРИГА Марк-2 Университета г. Майнц.
7. Предложена постановка экспериментов и всесторонне экспериментально исследована генерация УХН в наиболее перспективных криогенных замедлителях-конвертерах УХН: дейтерии, кислороде и дейтерометане в газообразном, жидком и твёрдом состояниях. Полученные результаты сопоставлены с детальными расчётами генерации УХН.
8. Предложены и экспериментально исследованы новые материалы – низкотемпературные фторполимеры – для покрытия стенок ловушек УХН с целью минимизации их потерь при хранении. Измерены вязкость и скорость испарения наиболее подходящих фторполимеров в функции температуры. Измерены сечения рассеяния нейтронов на фторполимерах в диапазоне длин волн 1-20 Å и диапазоне температур 10-300 К. Из

данных по сечениям рассеяния для низкотемпературных фторполимеров получены предсказания для ожидаемой величины коэффициента потерь УХН:  $2 \times 10^{-6}$ , подтверждённые позднее в экспериментах по хранению УХН.

9. Разработана методика и измерены спектры квазиупруго рассеянных УХН при их подбарьерном отражении от поверхности твёрдых тел. Метод заключается в измерении кривых пропускания рассеянных УХН через калиброванные поглотители и дальнейшем восстановлении из этих кривых спектров УХН.
10. Теоретически рассмотрена деполяризация УХН в ловушках. Показано, что при определённых условиях – наличии градиента магнитного поля в точке отражения нейтрона от стенки – может иметь место заметная деполяризация при одном ударе даже в условиях высокого параметра адиабатичности для движения спина нейтрона в магнитном поле.
11. Предложены и проанализированы различные возможные варианты экспериментального поиска осцилляций нейтрон – зеркальный нейтрон.

Результаты исследований изложены в **37 публикациях**, из них 1 вошла в годовой отчёт Института ядерной химии Университета Майнц, 4 Сообщения ОИЯИ, 3 доклада опубликованы в материалах конференций и 29 статей в реферируемых журналах:

1. Ю.Н. Покотилковский, "Возможный способ получения ультрахолодных нейтронов на импульсных источниках", Письма в ЖТФ, **6** (1980) 1300-1303.

2. Ю.Н. Покотилковский, А.Д. Стойка, И.Г. Шелкова, "Возможный метод регистрации малых изменений энергии ультрахолодных нейтронов", ПТЭ, №1 (1980) 62-64.

3. M.I. Novopoltsev, Yu.N. Pokotilovski, "Optimization of scintillation detectors of ultracold neutrons", Nucl. Instr. Meth., **171** (1980) 497-502.

4. М.И. Новопольцев, Ю.Н. Покотилковский, "Корреляционный спектрометр ультрахолодных нейтронов, Сообщ. ОИЯИ Р3-81-828, Дубна, 1981.

5. М.И. Новопольцев, Ю.Н. Покотилковский, "Активационные эксперименты с ультрахолодными нейтронами. Измерение коэффициента поглощения

нейтронов при подбарьерном отражении от поверхности меди.", Сообщ. ОИЯИ РЗ-85-843, Дубна, 1985.

6. М.И. Новопольцев, Ю.Н. Покотилловский, "Измерение отражения ультрахолодных нейтронов от поверхности веществ с большим сечением захвата", Сообщ. ОИЯИ РЗ-87-408, Дубна, 1987.

7. В.И. Морозов, М.И. Новопольцев, Ю.Н. Панин, Ю.Н. Покотилловский, Е.В. Рогов, "Измерение отражения ультрахолодных нейтронов от поверхности веществ с большим сечением захвата", Письма в ЖЭТФ, **46** (1987) 301-303.

8. M.I. Novopoltsev, Y.N. Panin, Y.N. Pokotilovkii, E.V. Rogov, V.A. Stepanchikov, and I.G. Shelkova, "Measurement of the Absorption Coefficient for UCN at a Copper Surface", Z. Phys. **B 70** (1988) 199-202.

9. Yu.N. Pokotilovski, "Moving converter as a possible tool for producing ultracold neutrons on pulsed neutron sources", Nucl. Instr. Meth. **A314** (1992) 561-563.

10. Yu.N. Pokotilovski, "Production and storage of ultracold neutrons at pulse neutron sources with low repetition rates", Nucl. Instr. Meth. **A356** (1995) 412-414.

11. Yu.N. Pokotilovski, B.W. Wehring, "Storage of ultracold neutrons and TRI-GA reactor - a marriage made in heaven", Transactions of Amer. Nucl. Soc., Vol. **73**, Winter Meeting of Amer. Nucl.Soc., San Francisco, CA, 29 Oct.-1 Nov. 1995, p. 153-154.

12. G.F. Gareeva, Al.Yu. Muzychka, Yu.N. Pokotilovski, "Monte Carlo simulation of nonstationary transport of ultracold neutrons in horizontal neutron guides and the storage of ultracold neutrons", Nucl. Instr. Meth., **A 369** (1996) 180-185.

13. Y.N. Pokotilovski and A.Yu. Muzychka, "Production and Storage of Ultracold Neutrons at Pulse Neutron Sources with Low Repetition Rates", Journ. Phys. Soc. Japan. **65**, Suppl. A (1996) 255-258.

14. Al.Yu. Muzychka, Yu.N. Pokotilovski, P. Geltenbort, "Search for low-energy upscattering of ultracold neutrons from a Beryllium surface", ЖЭТФ, **115** (1999) 141-148.

15. Yu.N. Pokotilovski, "Possibility for low temperature fluid-wall neutron bottle with very low neutron upscattering losses", Nucl. Instr. Meth., **A425** (1999) 320-321.

16. Yu.N. Pokotilovski, "Quasielastic scattering of ultracold neutrons as a possible reason for their energy spreading during long storage in closed traps", *Europ. Phys. Journ.*, **B8** (1999) 1-4.

17. Yu.N. Pokotilovski, "Quasielastic neutron scattering by diffusive adsorbed hydrogen as a possible reason for ultracold neutrons energy spread during long storage in traps", *Письма в ЖЭТФ*, **69** (1999) 81-86.

18. Yu.N. Pokotilovski, "Interaction of ultracold neutrons with liquid surface modes as a possible reason for neutron energy spread during long storage in fluid wall traps", *Phys. Lett.*, **A255** (1999) 173-177.

19. Yu.N. Pokotilovski, "On the mechanisms of small cooling and heating of ultracold neutrons during storage in traps", *Proc. Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei ISINN-7: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics"* Dubna, 25-28 May 1999, p.137-147.

20. Yu.N. Pokotilovski, "On depolarization of ultracold neutrons in traps", *Письма в ЖЭТФ* **76** (2002) 162-165.

21. Ю.Н. Покотилковский, Г.Ф. Гареева, "Высокоэффективный метод измерения спектров ультрахолодных нейтронов при малых передачах энергии и при низких вероятностях рассеяния", *ПТЭ*, №1, (2003) с.18-23.

22. Yu.N. Pokotilovski, "Investigation of liquid fluoropolymers as possible materials for low temperature liquid wall chambers for ultra cold neutron storage", *ЖЭТФ*, **123** (2003) 203-210.

23. Yu.N. Pokotilovski, M.I. Novopoltsev, P. Geltenbort, Th. Brenner, "Differential neutron spectrometry in the very low neutron energy range. Neutron cross sections for Zr, Al, polyethylene and liquid fluoropolymers", *JINR Commun. E3-2003-138*, Dubna, 2003.

24. Yu.N. Pokotilovski, K. Eberhardt, W. Heil, V. Janzen, J.V. Kratz, V. Tharun, N. Trautmann, N. Whiel, "Calculation of ultracold neutron production at the TRI-GA Mainz reactor", *Inst. fuer Kernchemie, Univers. Mainz, Jahresbericht*, A24 (2004) .

25. Yu.N. Pokotilovski, "UCN anomaly and the possibility for further decreasing neutron losses in traps", *Nucl. Instr. Meth.*, **A554** (2005) 356-362.

26. F. Atchison, D. van der Brandt, M. Daum, P. Fierlinger, P. Hautle, R. Henneck, S. Heule, M. Kasprzak, K. Kirch, P. Konter, A. Michels, A. Pichlmaier, Yu.N. Pokotilovski, H. Wohlmuther, A. Wokaum, "Production of ultracold neutrons from a cold neutron beam on a deuterium target", *Phys. Rev.* **C71** (2005) 054601-054610.

27. Yu.N. Pokotilovski, G.F. Aru, "On the issue of ultracold neutron generation at pulsed neutron sources: Transport of very cold neutrons in the fast heated cold moderators and granular moderators", *Nucl. Instr. Meth.*, **A545** (2005) 355-362.

28. Yu.N. Pokotilovski, "On the experimental search for neutron-mirror neutron oscillations", *Phys. Lett.*, **B 639** (2006) 214-217.

29. Yu.N. Pokotilovski, M.I. Novopoltsev, P. Geltenbort, "Small energy transfer at the UCN reflection from solid surfaces", *Phys. Lett.*, **A 353** (2006) 236-240.

30. F. Atchison, B. Blau, K. Bodek, D. van der Brandt, T. Brys, M. Daum, P. Fierlinger, F. Frei, P. Geltenbort, P. Hautle, R. Henneck, S. Heule, A. Holley, M.Kasprzak, K.Kirch, P.Konter, M. Kuzniak, C.-Y. Liu, C. Morris, A.Pichlmaier, C. Plonka, Yu.N. Pokotilovski, A. Saunders, Y. Shin, D. Tortorella, H. Wohlmuther, A. Young, G. Zsigmond, "Cold neutron energy dependent production of ultracold neutrons in solid deuterium", *Phys. Rev. Lett.*, **99** (2007) 262502.

31. A. Frei, Y. Sobolev, I. Altarev, K. Eberhardt, A. Gschrey, E. Gutschmiedl, R. Hackl, G. Hampel, F.J. Hartmann, W. Heil, J.V. Kratz, Th. Lauer, A. Lizon Aguilar, A.R. Muller, S. Paul, Yu. Pokotilovski, W. Schmid, L. Tassini, D. Tortorella, N. Trautmann, U. Trinks, N.Whiel, "First production of ultracold neutrons with a solid deuterium source at the pulsed reactor TRIGA Mainz", *Eur. Phys. Journ.* **A34** (2007) 119.

32 Yu.N. Pokotilovski, I. Natkaniec, K. Holderna-Natkaniec, "The experimental and calculated density of states and ultracold neutron loss coefficient of perfluorinated oils at low temperature", *Physica B*, **403** (2008) 1942-1948.

33. F. Atchison, B. Blau, K. Bodek, D. van der Brandt, T. Brys, M. Daum, P. Fierlinger, F. Frei, P. Geltenbort, P. Hautle, R. Henneck, S. Heule, A. Holley, M. Kasprzak, K. Kirch, P. Konter, M. Kuzniak, C.-Y. Liu, C. Morris, A. Pichlmaier, C. Plonka, Y. Pokotilovski, A. Saunders, Y. Shin, D. Tortorella, H. Wohlmuther, A. Young, G. Zsigmond, "Measurement of ultracold neutron production and cold neutron transmission for deuterium, oxygen, and heavy methane", *Proc. of the 18-*

*th Meeting of the Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources*, April 25-29, 2007, Dongguan, Guandong, PR China, p.107-113.

34. F. Atchison, B. Blau, K. Bodek, D. van der Brandt, T. Brys, M. Daum, P. Fierlinger, F. Frei, P. Geltenbort, P. Hautle, R. Henneck, S. Heule, A. Holley, M. Kasprzak, K. Kirch, P. Konter, M. Kuzniak, C.-Y. Liu, C. Morris, A. Pichlmaier, C. Plonka, Yu.N. Pokotilovski, A. Saunders, Y. Shin, D. Tortorella, H. Wohlmuther, A. Young, G. Zsigmond, "Investigation of solid D<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and CD<sub>4</sub> for the ultracold neutron production", *Nucl. Instr. Meth.*, **A 611** (2009) 252.

35. Yu.N. Pokotilovski, M.I. Novopoltsev, P. Geltenbort, "A study of the ultracold neutron upscattering at reflection from solid surface", *Eur. Phys. Journ.* **AP 45** (2009) 21202.

36. М.И. Новопольцев, Ю.Н. Покотилловский, "Корреляционная времяпролётная спектрометрия ультрахолодных нейтронов", *ПТЭ*, №5 (2010) с. 19-27.

37. Ю.Н. Покотилловский, М.И. Новопольцев, П. Гельтенборт, Т. Бреннер, "Дифференциальный времяпролётный спектрометр очень медленных нейтронов", *ПТЭ* №1 (2011) с. 20-27.