

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации

(25 сентября 2002 г.)

25 сентября 2002 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения общей физики и астрономии Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации. На сессии были заслушаны доклады:

1. **Межов-Деглин Л.П.** (Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская обл.). *Физика низких температур в условиях микрогравитации. Итоги семинара CWS-2002.*

2. **Несвижевский В.В.** (Институт Лауэ–Ланжевена, Гренобль, Франция). *Квантовые состояния нейтронов в гравитационном поле и взаимодействие нейтронов с наночастицами.*

3. **Степанов А.В.** (Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург). *О природе радиоионизации звезд поздних спектральных классов.*

Краткие содержания докладов публикуются ниже.

PACS numbers: 07.20.Mc, 07.87.+v, 67.57.-z

### Физика низких температур в условиях микрогравитации. Итоги семинара CWS-2002

Л.П. Межов-Деглин

С 12 по 18 августа 2002 г. в Черноголовке проходил 3-й Международный семинар по физике низких температур в условиях микрогравитации (Chernogolovka Workshop 2002, CWS-2002). По традиции семинар CWS-2002 был включен в список спутелитных конференций и семинаров, посвященных одному из быстро развивающихся направлений в физике низких температур, которые сопутствуют проводимой раз в три года Международной конференции по физике низких температур (в этом году конференция LT-23 проходила в Хиросиме, Япония, 20–27 августа 2002 г.).

В работе семинара приняло участие 120 человек из 10 стран: России, Украины, США, Финляндии, Казахстана, Дании, Франции, Англии, Японии и Грузии. Участники представляли Национальные космические агентства России, Украины, США и Японии, а также

учреждения Академии наук и университеты ряда стран, которые проводят исследования в области физики и техники низких температур и заинтересованы в постановке соответствующих экспериментов на борту космических аппаратов. На семинаре было представлено 72 доклада, тезисы которых опубликованы в сборнике [1]. Труды семинара CWS-2002 планируется опубликовать в специальном выпуске журнала *ФНТ* в середине 2003 г.

На открытии заседаний в выступлениях председателя семинара Ю.А. Осипьяна, возглавляющего Секцию космического материаловедения Совета по космосу РАН, и представителя Росавиакосмоса Ю.Е. Левицкого было отмечено, что за 45 лет, прошедших с момента запуска с полигона Байконур первого искусственного спутника Земли, космическая техника и технология прочно вошли в жизнь современного общества (спутниковые связь и телевидение, метеослужба и навигация, и др.). Использование в космической технике достижений современной науки приводит к расширению области практического применения космических аппаратов, что в свою очередь стимулирует постановку на орбите новых исследований в области фундаментальной науки. Вместе с тем, высокая стоимость космического эксперимента диктует необходимость создания государственной многоступенчатой системы конкурсного отбора, предусматривающей на первом этапе поддержку достаточно широкого круга наземных исследований в качестве базы, необходимой для последующего выбора наиболее значимых и хорошо подготовленных экспериментов на борту космических аппаратов. Все это необходимо учитывать при формировании долгосрочных планов исследований на космических аппаратах.

Следует отметить, что прогресс в космических исследованиях во многом связан с широким внедрением криогенной техники. Известно [2], что криогенные жидкости, в первую очередь жидкие кислород и водород, служат топливными элементами космических двигателей, а охлаждаемые детекторы и электронные устройства позволяют на порядки повысить чувствительность и разрешение контрольно-измерительной аппаратуры и тем самым реализовать преимущества проведения долговременных научных исследований на орбите в условиях, недостижимых в наземных экспериментах. Например, Инфракрасная космическая обсерватория (Infrared

Space Observatory, ISO), которая была выведена на высокоэллиптическую орбиту Европейским космическим агентством (ESA) в 1995 г. и успешно работала до середины 1998 г., базировалась на криостате емкостью 2200 литров, заполненном перед запуском сверхтекучим гелием-II при температуре в 1,8 К. В качестве детекторов на ISO использовали набор охлаждаемых полупроводниковых резисторов, рабочие температуры которых лежали в диапазоне от 1,8 до 10 К. А в современных спектрометрах рентгеновского диапазона предусмотрено использование детекторов, охлаждаемых до 65 мК [2].

В ближайшие два года должно быть завершено формирование многопрофильной Международной космической станции, включающей, в частности, крупногабаритный Российский исследовательский сегмент (РС МКС). Установка на борту МКС в 2005–2007 гг. атомных часов, в которых используются атомы металлов, охлажденные с помощью лазерной методики до температур  $10^{-2}$ – $10^{-3}$  мК, позволит на несколько порядков (с  $10^{-14}$  до  $10^{-17}$ ) повысить относительное разрешение при измерении коротких ( $\sim 1$  с) временных интервалов [3]. Программы фундаментальных научных исследований на борту МКС, а также на возвращаемых космических аппаратах разрабатываются и проводятся под эгидой Росавиакосмоса, национальных космических агентств США, Европейского Союза, Японии, Китая, Канады и других стран. Несомненно, что обсуждение результатов, выполненных на орбите экспериментов и планов постановки новых исследований в широкой аудитории с участием исследователей, специализирующихся в данной конкретной области знаний, и научной молодежи может способствовать повышению эффективности отбора будущих экспериментов и привлечению новых исследователей. Это входило в число основных задач 3-го Международного семинара по физике низких температур в условиях микрогравитации.

Тематику представленных на семинаре докладов можно кратко сформулировать таким образом:

а. Основные направления развития низкотемпературных исследований в космосе; планы постановки новых фундаментальных исследований и создания технической базы, необходимой для проведения низкотемпературных экспериментов на борту МКС.

б. Моделирование процессов теплообмена на границе твердое тело–жидкий гелий в условиях микрогравитации.

в. Нелинейные волны в объеме и на поверхности квантовых жидкостей. Особенности роста гелиевых кристаллов и явления на поверхности твердого гелия.

г. Нанокластерные конденсаты в сверхтекучем гелии.

д. Криослой и криокристаллы.

е. Ультрахолодные атомы и частицы, бозе-эйнштейновская конденсация.

Ниже мы обсудим содержание наиболее интересных для широкой аудитории докладов.

1. Результаты выполненных в последнее десятилетие под эгидой Национального космического агентства США (NASA) космических экспериментов по изучению кинетических явлений в сверхтекучем гелии вблизи точки фазового перехода  $T_\lambda$  жидкости из сверхтекучего в нормальное состояние и планы постановки новых фундаментальных исследований на борту МКС в ближайшем пятилетии подробно обсуждались в докладах

U. Israelsson [3], J. Pensinger [4] и D. Strayer [5]. В 1985, 1992 и 1997 гг. были проведены три серии экспериментов. Удалось, в частности, изучить поведение теплоемкости сверхтекучего He-II в непосредственной близости к  $T_\lambda$  (на расстоянии до  $10^{-9}$  К от точки перехода в равновесных условиях) и, соответственно, уточнить значения параметров (критических индексов), входящих в теорию фазовых переходов второго рода, а также изучить влияние размеров пор на сдвиг точки перехода  $T_\lambda$  в He-II, заполняющем мелкопористый образец. Заметим, что в наземной лаборатории градиент давления в столбе сверхтекучей жидкости высотой в 1 см под действием гравитационного поля Земли приводит к сдвигу  $T_\lambda$  на  $10^{-6}$  К по сравнению с равновесным значением, а при переходе к тонким слоям необходимо учитывать влияние взаимодействия жидкости со стенками, т.е. измерения в условиях микрогравитации позволили продвинуться в недоступную в наземных экспериментах область температур вблизи  $T_\lambda$ . Чтобы обеспечить требуемое высокое разрешение по температуре на уровне  $\sim 1 \times 10^{-10}$  К в качестве термометров использовали образцы из парамагнитной соли, восприимчивость которых измеряли специально изготовленными сверхпроводящими квантовыми интерферометрами (СКВИДами) высокого разрешения. Использование подобной высокоразрешающей аппаратуры в сочетании с накопленным опытом низкотемпературных исследований на орбите позволяет значительно расширить рамки последующих космических экспериментов.

Планы фундаментальных исследований NASA на борту МКС на ближайшее пятилетие включают эксперименты в области физики низких температур и атомной физики, которые должны быть начаты в 2005 г. и продолжены далее в 2007 г., и исследования в области гравитационной физики — начало экспериментов на орбите запланировано на 2007 г. Чтобы обеспечить проведение низкотемпературных и гравитационных исследований на выносном блоке японского исследовательского модуля МКС необходимо смонтировать специальную низкотемпературную установку (the Low-Temperature Microgravity Physics Facility, LTMPF), наземные испытания которой проводятся в настоящее время в Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL). В состав LTMPF входят 180-литровый дюар со сверхтекучим He-II, электронная аппаратура, предназначенная для измерения и контроля температуры, давления, уровня жидкого гелия и т.п. в дюаре, а также для сопряжения с внешними датчиками радиационной обстановки и акселерометрами (первый блок), и два блока контрольно-измерительной аппаратуры, включающей СКВИД-магнитометры для прецизионных измерений показаний магнитных термометров. Эта аппаратура будет использована для проведения одновременно двух независимых экспериментов на двух низкотемпературных вставках, которые устанавливаются внутри дюара на специальных стойках, крепящихся по торцам цилиндрического дюара. Каждая из вставок может быть использована для основного эксперимента и при наличии времени — одного-двух дополнительных экспериментов.

Согласно графику работ научные исследования на LTMPF должны быть начаты во второй половине 2005 г. Дюар заполняется гелием и охлаждается до 1,7 К на Земле незадолго перед запуском. Время работы дюара

на орбите около 4,5 месяцев. Далее установка LTMPF возвращается на Землю. Повторный запуск установки на орбиту планируется провести через 16–22 месяца.

Первые два низкотемпературных эксперимента на МКС будут посвящены изучению неравновесных явлений вблизи точки фазового перехода: а) критические явления вблизи  $T_\lambda$  в He-II (critical dynamics in microgravity, DYNAMX) — определение поведения теплопроводности вблизи границы раздела сверхтекучая жидкость — нормальная жидкость, где существенную роль играют нелинейные явления (минимальные ускорения необходимы для уменьшения вариаций давления вдоль столба жидкости); б) термодинамические измерения вблизи критической точки жидкость–газ в  $^3\text{He}$  (microgravity scaling theory experiment, MISTE) — определение критических индексов в непосредственной близости к критической точке  $T_{cr}$ . Дополнительные эксперименты в этой серии — измерения теплоемкости He-II вблизи  $T_\lambda$  при постоянном тепловом потоке (capacity at constant Q, CQ) и изучение формы кривой сосуществования жидкость–пар вблизи  $T_{cr}$  в  $^3\text{He}$  (coexistence curve experiment, COEX).

Вторая серия экспериментов в области физики низких температур на LTMPF включает: а) исследование граничных явлений в He-II вблизи  $T_\lambda$  (boundary effects near the superfluid transition, BEST) — изучение свойств сверхтекучей жидкости в квазидномерных и трехмерных порах, проверка пригодности динамической теории скейлинга и изучение критических и транспортных явлений в порах; б) эксперименты с высокостабильным сверхпроводящим микроволновым осциллятором (superconducting microwave oscillator, SUMO) — изучение особенностей взаимодействия тел различной массы на малых расстояниях. Результаты этих исследований могут представлять интерес для уточнения современных представлений в специальной и общей теории относительности, а само устройство может быть использовано в дальнейших экспериментах с атомными часами на орбите МКС. Конкурсный отбор наиболее перспективных проектов дополнительных экспериментов будет продолжен.

Рядом с низкотемпературной установкой LTMPF в 2005 г. планируется смонтировать установку для экспериментов с ультрахолодными атомами, охлаждаемыми методом лазерного охлаждения (laser cooled atom physics, LCAP). Приборное сопровождение этой установки будет рассчитано на широкий круг экспериментов и в первую очередь на поддержку длительных (свыше одного года) исследований в области гравитационной физики с помощью высокостабильных атомных часов (primary atomic clock in space, PARCS). Запуск PARCS во второй половине 2005 г. позволит повысить на один-два порядка точность измерений интервалов времени длительностью порядка секунды по сравнению с существующей (ожидаемое разрешение до  $10^{-16}$  с) и начать эксперименты по проверке эйнштейновской гипотезы инвариантности времени путем сравнения рабочей частоты различных часов на разных участках орбиты. В конце 2007 г. на МКС должны быть введены в строй часы с рубидиевыми атомами (rubidium atomic clock experiment, RACE). Предполагается, что это повысит разрешение во времени еще на порядок по сравнению с PARCS и тем самым позволит существенно расширить область применения атомных часов в фундаментальных исследованиях.

В планы NASA входит также создание на борту МКС Лаборатории конденсированного состояния (Condensate Laboratory Aboard the Space Station, CLASS), предназначенной для охлаждения атомов существенно ниже  $10^{-9}$  К и наблюдений бозе-эйнштейновской конденсации (Bose–Einstein condensation, BEC) в растворах атомных газов при пониженной гравитации. Далее, используя охлажденные рубидиевые и цезиевые атомы в качестве тестовых масс, можно попытаться исследовать принцип эквивалентности гравитационной и инертной массы (quantum interferometer test of equivalence, QITE). Конкурс проектов дополнительных экспериментов в области атомной и гравитационной физики с использованием перечисленного выше оборудования будет продолжен в 2003 г.

По сообщению Y. Okuda [6] Японское космическое агентство NASDA также проводит конкурсный отбор заявок на проведение низкотемпературных экспериментов на борту МКС. В список принятых включены следующие проекты: *Studies of non-equilibrium effects near the critical point*, A. Onuki, Kyoto University; *Nonlinear dynamics of the nonequilibrium open system under control of laser*, K. Yoshikawa, Kyoto University; *Basic research on crystal growth and surface physics of quantum crystals under microgravity*, Y. Okuda, Tokyo Institute of Technology; *Instability of shear flow in a liquid near the critical point*, A. Onuki, Osaka Prefecture University; *Variation principle for nonequilibrium reaction-diffusion systems under gravity*, K. Kitahara, International Christian University; *Structure of particulate layer under microgravity*, K. Nakamura, Kyoto University.

Планы исследований в области физики низких температур и криогенной техники на борту Российского сегмента МКС были представлены на семинаре в докладе представителей Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИМАШ) и Росавиакосмоса М.М. Цымбалюка [7] (см. табл. 1) и В.А. Шувалова [8], а также в выступлении представителя Украинского космического агентства С.И. Бондаренко [9]. Отметим сразу, что сроки постановки летных экспериментов на борту РС МКС еще не установлены, обсуждение планов продолжается, поэтому приведенный в таблице список может быть со временем заметно изменен. Например, возможность постановки серии экспериментов, включенных в проекты "Криокомплекс", "Кипение" и "Единство", в которых предполагается довольно большой расход жидкого гелия на орбите, зависит в первую очередь от выбора общей концепции организации низкотемпературных исследований на борту РС МКС.

В проекте "Криокомплекс", содержание которого обсуждалось в докладе [8], для обеспечения возможности длительных измерений на нескольких температурных уровнях предлагается установить вне жилого блока РС три стационарных гелиевых дюара, соединенных с системой перелива жидкого гелия, сбора, хранения и ожижения холодного газа, т.е. фактически предполагается собрать на борту РС МКС автономную криогенную станцию, способную обеспечить проведение на орбите трех различных экспериментов одновременно, включая эксперименты по тепло-массопереносу и динамике образования и движения газовых пузырьков в жидком гелии. Разрабатываемый по инициативе Украинского космического агентства проект "Кипение" [7, 9]

Таблица 1. Планы исследований на борту РС МКС

Наименование эксперимента	Содержание исследований	Предполагаемые участники работ
"Гелий"	Фундаментальные исследования на межфазной поверхности гелия	Московский энергетический институт (МЭИ), Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королева, Российский государственный научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина (РГНИИ ЦПК) и др.
"Волна-ЗМКС"	Исследования в области тепло-массообмена и гидродинамики в баке с криогенной жидкостью	Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, РКК "Энергия", РГНИИ ЦПК
Группа космических экспериментов "Кипение"	Фундаментальные исследования в области физики низких температур, отработки методов и средств эффективного и безопасного выполнения криогенных экспериментов в инфраструктуре РС МКС	ЦНИИ машиностроения, МЭИ, РНЦ "Курчатовский институт", Институт физических проблем РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) и Физико-технический институт низких температур Национальной академии наук Украины
"Единство"	Фундаментальные и прикладные исследования в области физики и техники низких температур	ЦНИИМАШ, Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ) МГУ, РКК "Энергия" и др.
"Криокомплекс"	Реализация концепции единого комплекса криогенного оборудования для проведения одновременно нескольких экспериментов на борту РС МКС	ЦНИИМАШ, МЭИ, РКК "Энергия" и др.
"Солитон"	Фундаментальные исследования нелинейных явлений на поверхности конденсированного водорода	Институт физики твердого тела РАН, РКК "Энергия", РГНИИ ЦПК и др.
"Субмиллиметр"	Фундаментальные астрофизические исследования в недоступном с Земли субмиллиметровом диапазоне электромагнитных волн с использованием криогенного телескопа	Астрокосмический центр ФИАН, РКК "Энергия", РГНИИ ЦПК, международная кооперация
"АМС"	Реализация фундаментальных физических и астрофизических исследований с использованием альфа-магнитного спектрометра со сверхпроводящей магнитной системой	НИИЯФ МГУ, РНЦ "Курчатовский институт", международная кооперация
"БСМК"	Отработка процессов высушивания биопрепаратов с использованием бортового сублимационно-морозильного комплекса (БСМК)	РАО "Биопрепарат", АООТ "Биохиммаш", РКК "Энергия", РГНИИ ЦПК
"Криоконсервация"	Отработка методов и технических средств криогенной консервации биологических препаратов на РС МКС	РКК "Энергия", РГНИИ ЦПК, РАО "Биохиммаш", АООТ "Биопрепарат"
"Кристаллизатор"	Исследования физических процессов кристаллизации белков с использованием криогенных технологических сред	ЦНИИМАШ, Институт кристаллографии РАН
"Полигон-1"	Отработка методов определения загрязнения атмосферы и земной поверхности с использованием криогенных ИК-газоанализаторов	ЦНИИМАШ и др.

предусматривает изучение процессов кипения во вращающемся дюаре с целью исследования особенностей теплопередачи на границе жидкий гелий – твердая стенка в условиях пониженной гравитации при ускорениях на уровне  $(10^{-2} - 10^{-6})g$ .

Проекты "Гелий" и "Волна" объединяет постановка задачи: компьютерное моделирование и экспериментальные исследования процессов тепло- и массообмена в объеме свободно кипящей жидкости (жидкого гелия или азота) и явлений на границе раздела криогенная жидкость – твердая стенка в условиях микрогравитации (механизмы кипения, рост пузырей, особенности теплопередачи в двухфазной системе). Некоторые из этих вопросов обсуждались в докладах А.П. Крюкова [10] и В.И. Полежаева [11]. Экспериментальное их изучение необходимо и для решения практических проблем, возникающих при использовании криогенных жидкостей в космических двигателях и в системах охлаждения бортовой аппаратуры.

В рамках проекта "Солитон" предлагается провести серию статических и динамических исследований явлений на заряженной поверхности жидкого водорода в ячейке конечных размеров. Как было указано в докладе А.А. Левченко [12], в проведенной в Институте физики твердого тела РАН (ИФТТ РАН) серии наземных экспериментов было обнаружено явление реконструкции формы поверхности жидкости: с увеличением внешнего растягивающего электрического поля выше некоторого критического  $E_{cr}$  на исходно плоской, равномерно заряженной поверхности жидкого водорода образуется холм (уединенная стоячая волна), высота которого увеличивается с повышением поля. Из теоретических расчетов следует, что наблюдаемую реконструкцию заряженной плоской поверхности можно описать в терминах теории фазовых переходов второго рода, где роль внешней силы играет не температура, как в обычном рассмотрении, а тянущее электрическое поле. Реконструкция наблюдается в условиях, когда приложенное

электрическое поле компенсирует поле силы тяжести. Переход к измерениям в условиях микрогравитации, где в ячейке конечных размеров существенную роль должно играть взаимодействие жидкости со стенками сосуда, может качественно изменить характер наблюдаемых явлений. На это указывают и результаты контрольных исследований эволюции формы поверхности заряженной пленки жидкого водорода, подвешенной на поверхности верхней пластины горизонтально расположенного плоского конденсатора, в которых электрические и гравитационные силы действуют в одном и том же направлении.

Если в дополнение к постоянному полю приложить переменное электрическое поле, то на поверхности жидкости возникают волны. Лабораторные эксперименты продемонстрировали возможность установления режима слабой волновой турбулентности на поверхности жидкого водорода при достаточно больших уровнях возбуждения. Более того, удалось наблюдать высокочастотный край колмогоровского спектра колебаний, где волновой режим переноса энергии сменяется вязким затуханием. Реконструкция поверхности заметно изменяет вид дисперсионной кривой  $\omega(k)$ , которая описывает зависимость частоты волн, распространяющихся вдоль поверхности жидкого водорода, от их волнового вектора, что в свою очередь должно сильно повлиять на спектр нелинейных волн, возникающих на поверхности жидкости под действием переменной силы. Все это указывает, что постановка экспериментов по изучению нелинейных волн на заряженной поверхности жидкого водорода на борту космической станции может привести к существенному расширению существующих представлений в области физики нелинейных явлений в конденсированных системах, в частности, к пониманию особенностей распространения капиллярных волн на поверхности жидкости в условиях микрогравитации.

Проекты "Субмиллиметр" и "АМС" предполагают широкую международную кооперацию с участием российских и зарубежных ученых, сотрудничающих с ESA и NASA: в первом из них сверхпроводящие приемники излучения и электронная аппаратура будут изготовлены зарубежными учеными, все остальное оборудование и запуск телескопа на орбиту проводятся российской стороной; во втором предполагается, что российская сторона изготовит только сверхпроводящую магнитную систему альфа-спектрометра. Разрабатываемый в РНЦ "Курчатовский институт" вариант устройства магнитной системы был представлен на семинаре в докладе Н.А. Черноплекова.

В проектах, представленных в четырех нижних строках табл. 1, криогенная техника используется для обеспечения требуемых температурных режимов в экспериментах в области биологии и физики Земли.

2. Как видно из предыдущего раздела, тематика докладов, представленных на семинаре CWS-2002, заметно шире списка тем исследований в области физики низких температур, включенных в планы Росавиакосмоса, NASA и других космических агентств на ближайшее пятилетие. К числу перспективных направлений, которые можно было бы рекомендовать включить в список проектов наземных исследований, поддерживаемых национальными космическими агентствами, следует отнести изучение свойств криослоев, образующихся при конденсации исследуемого вещества на холодной подложке, которые обсуждались, например, в

докладах М.А. Стржемечного [13] и А.С. Дробышева [14], и возникшее недавно новое направление — изучение свойств примесных нанокластерных конденсатов (гелей), образующихся при конденсации потока газообразного He с примесью паров исследуемого вещества в сверхтекучем гелии-II (доклады В.В. Хмеленко, Е.А. Попова и Л.П. Межова-Деглина [15–17]). Механизм образования примесных кластеров в холодной гелиевой струе, особенности взаимодействия этих кластеров между собой и с окружающей средой при температурах порядка 1 К, строение и свойства пористых нанокластерных систем (гелей, дисперсионная система (каркас) которых образована примесными кластерами, окруженными слоем отвердевшего He, а дисперсионной средой является жидкий He), влияние гравитационной обстановки на свойства образующихся конденсатов (наземные измерения, эксперименты в условиях микрогравитации) — выяснение ответов на все эти вопросы представляется важным не только для современного материаловедения, составной частью которого является физика конденсированного состояния, но и для астрофизики и космологии (пылевые облака в космосе при температурах порядка 3 К, космический лед и т.п.). Есть основания полагать, что примесные гели в сверхтекучем He-II можно будет использовать для накопления и хранения свободных радикалов (низкотемпературные топливные элементы [15]), а также для накопления и хранения ультрахолодных нейтронов. Достижениям в области физики ультрахолодных нейтронов был посвящен доклад В.В. Несвижевского [18] на закрытии семинара.

Семинар CWS-2002 был организован Институтом физики твердого тела РАН и Секцией "Космическое материаловедение" Совета по космосу РАН при поддержке Минпромнауки РФ, РФФИ и Росавиакосмоса, а также NASA и INTAS (грант 02-MO-263). В рамках семинара был проведен круглый стол участников проектов, поддержанных фондом INTAS в 2001 и 2002 гг. В подготовке и проведении семинара активное участие принимали сотрудники ИФТТ РАН — члены локального комитета М.Ю. Бражников, В.Б. Ефимов, А.М. Кокотин, Г.В. Колмаков, Н.Ф. Лазарева, Е.В. Лебедева, А.А. Левченко, О.И. Левченко, М.К. Макова, Ю.М. Романов, В.Б. Шикин.

## Список литературы

1. *3rd Intern. Chernogolovka Workshop on Low-Temperature Physics in Microgravity Environment (CWS-2002), 12–18 August 2002, Chernogolovka, Russia, Book of Abstracts* (Chernogolovka, 2002)
2. Collaudin B, Rando N *Cryogenics* **40** 797 (2000)
3. Israelsson U E, Lee M C "Use of the International Space Station for fundamental physics research", see Ref. [1], p. 12
4. Pensinger J F et al. "The low-temperature microgravity physics facility", see Ref. [1], p. 15
5. Strayer D M, Paik H J, Moody M V "Short-range inverse-square-law experiment in space", see Ref. [1], p. 16
6. Okuda Y et al. "Manipulation of solid–liquid interface of  $^4\text{He}$  by acoustic radiation pressure", see Ref. [1], p. 23
7. Anfimov N A et al. "Major directions of research on low-temperature physics and engineering on board the Russian segment of the International Space Station", see Ref. [1], p. 11
8. Buskin S V et al. "Technological integration of low-temperature studies at the ISS RS and optimization of experimental equipment", see Ref. [1], p. 14
9. Bondarenko S I et al. "Physical research of microgravity influence on physical phenomena in cryogenic liquids and general-purpose onboard cryogenic facility for realization of this research aboard International Space Station", see Ref. [1], p. 13

10. Dergunov I M et al. "Superfluid helium boiling in the model of porous structure at microgravity", see Ref. [1], p. 20
11. Polezhaev V I, Soboleva E B "Thermal gravity-driven convection of near-critical fluids in enclosures with different heating", see Ref. [1], p. 19; Gorbunov A A, Polezhaev V I "Isoentropic equilibrium stability of the near-critical fluid under zero gravity", see Ref. [1], p. 63
12. Levchenko A A et al. "Capillary turbulence at the charged surface of liquid hydrogen", see Ref. [1], p. 29
13. Strzhemechny M A "Properties of quenched hydrogen-based alloys with lighter elements from diffraction measurements", see Ref. [1], p. 48
14. Drobyshev A et al. "Enthalpy of the hydrogen bonds from measurements made on thin water films", see Ref. [1], p. 50
15. Khmelenko V V, Kiselev S I, Lee D M "ESR investigation of hydrogen and deuterium atoms in impurity-helium solids", see Ref. [1], p. 37
16. Popov E A et al. "Emission spectroscopy of atomic and molecular nitrogen in helium gas jet, bulk liquid He-II, and in impurity-helium solids", see Ref. [1], p. 38
17. Mezhov-Deglin L P, Kokotin A M "Water-helium condensate (gel) in liquid helium", see Ref. [1], p. 39
18. Nesvizhevsky V V et al. "Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field", see Ref. [1], p. 55

PACS numbers: 03.65.Ge, 14.20.-c, 28.20.-v

## Квантовые состояния нейтронов в гравитационном поле и взаимодействие нейтронов с наночастицами

В.В. Несвижевский

### 1. Введение

В докладе представлены результаты наших работ с использованием ультрахолодных нейтронов (УХН), полученные в течение последних нескольких лет на высокопоточном исследовательском реакторе Европейского центра нейтронных исследований Института Лауэ-Ланжевена, Гренобль, Франция. Россия — страна-участница этого международного центра, в котором сегодня проводится большая часть всех исследований по фундаментальной нейтронной физике в мире. С первого эксперимента 1968 г. в Дубне по хранению УХН [1] исследования с УХН динамично развиваются и находят новые применения.

Большой интерес к УХН связан с уникальным свойством достаточно медленных нейтронов — их полным отражением от поверхности, благодаря которому возможно длительное удержание УХН в закрытых сосудах в течение времени, сравнимого со временем их жизни до бета-распада, которое составляет  $\sim 15$  мин. Вероятность потерь УХН в стенках может быть заметно меньше вероятности их бета-распада. Такое длительное удержание позволяет проводить прецизионные или очень чувствительные измерения как свойств нейтронов, так и их взаимодействий с веществом и полями.

Обычно отражение УХН строго упругое, и из-за этого термодинамическое равновесие между ними и ловушкой не успевает установиться. Примером использования этого неравновесного явления служит эксперимент по измерению квантовых состояний нейтрона в потенциальной яме, одна из стенок которой образована гравитационным полем Земли, а вторая — горизонтально расположенной отражающей поверхностью (плоским

зеркалом) [2–4]: энергия вертикального движения нейтронов в нижнем квантовом состоянии в гравитационном поле Земли равна  $\sim 1,4$  пэВ и при термодинамическом равновесии соответствовала бы  $\sim 20$  нК, что много меньше температуры экспериментальной установки в нормальных условиях. Об этом эксперименте и о перспективах его развития рассказано в первой части доклада (раздел 2).

Вероятность нагрева УХН при соударении с поверхностью ловушки все-таки отлична от нуля (и составляет обычно  $10^{-4} - 10^{-5}$  на удар), как было показано в [5] и в последующих экспериментах. Энергия нагретых таким образом нейтронов в ловушке при комнатной температуре обычно порядка энергии тепловых колебаний  $10^{-2} - 10^{-1}$  эВ. Однако недавно мы обнаружили еще один удивительный механизм их потерь, обусловленный их малым нагревом [6–9] — процессом, сопровождающимся средним приращением энергии всего на  $\sim 10^{-7}$  эВ, что на много порядков величины меньше энергии обычного теплового нагрева. Об исследовании природы этого процесса и о перспективах дальнейших исследований в этой области рассказано во второй части доклада (раздел 3).

### 2. Квантовые состояния нейтронов в гравитационном поле

Если поместить материальный объект в достаточно широкую и глубокую для него потенциальную яму, то естественно ожидать, что он будет там находиться в связанных квантовых состояниях независимо от природы этого потенциала. Хорошо известны примеры квантовых состояний материи в электромагнитном и ядерном полях. Так, квантовые состояния электронов в электромагнитном поле отвечают за структуру атомов, а квантовые состояния нуклонов в ядерном поле — за структуру атомных ядер. Квантование уровней энергии необходимо учитывать и, например, при описании движения левитирующих электронов над поверхностью сверхтекучего гелия в прижимающем внешнем электрическом поле. Квантовые состояния материи в гравитационном поле наблюдать гораздо сложнее, потому что оно много слабее электромагнитного и ядерного полей. Для этого следует обеспечить такие экспериментальные условия, при которых все взаимодействия другой природы не мешают измерению. УХН являются таким уникальным объектом, позволяющим провести прямое экспериментальное наблюдение квантовых состояний материи в гравитационном поле: они электрически нейтральны; их собственное время жизни достаточно велико, что позволяет обеспечить необходимое высокое энергетическое разрешение; малая масса нейтронов способствует наблюдению квантовых эффектов, так как приводит к большой неопределенности их положения; взаимодействие нейтронов с зеркалом термодинамически неравновесно, что позволяет проводить эксперименты с УХН, энергия которых на много порядков величины ниже энергии тепловых флуктуаций поверхности зеркала. Очевидно, относительно слабое гравитационное поле Земли может быть использовано в лабораторных условиях для создания только одной из стенок потенциальной ямы. Другой стенкой служит горизонтальное зеркало, которое в масштабе рассматриваемой задачи представляет собой бесконечно резкий и высокий потенциальный барьер, так что его параметры не влияют