

**Суммарный объем заполненной формы не должен превышать 20 страниц (вместе с таблицами).**

**Приложение 3.**

*Форма открытия (продления) Проекта /  
Подпроекта КИП*

**УТВЕРЖДАЮ**

**Директор Института**

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ г.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ  
ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КРУПНОГО ИНФРАСТРУКТУРНОГО ПРОЕКТА  
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ**

- 1. Общие сведения о проекте / подпроекте крупного инфраструктурного проекта (далее КИП)**
  - 1.1. Шифр темы / КИП (для продлеваемых проектов) 01-3-1137-2019/2023**
  - 1.2. Шифр проекта / подпроекта КИП (для продлеваемых проектов и подпроектов)**
  - 1.3. Лаборатория** теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова
  - 1.4. Научное направление** Теоретическая физика
  - 1.5. Наименование проекта / подпроекта КИП**
  - 1.6. Руководитель(и) проекта / подпроекта КИП** А.М. Поволоцкий
  - 1.7. Заместитель(и) руководителя проекта / подпроекта КИП (научный руководитель проекта/ подпроекта КИП)**

**2. Научное обоснование и организационная структура**

**2.1. Аннотация**

Непертурбативные исследования крупномасштабных систем со многими взаимодействующими степенями свободы составляют важную часть современной теоретической физики, к которой в последнее десятилетие растет интерес исследователей. Последние достижения в этом направлении основаны на построении и исследовании точно решаемых моделей равновесной и неравновесной статистической физики, квантовой механики и связанных с ними квантовых теорий поля. С использованием концепций скейлинга и универсальности, результаты, полученные на основе точных решений, могут быть распространены на обширные классы физических явлений, далеко выходящих за рамки таких систем. Точная решаемость моделей

физических систем обеспечивается их особой математической структурой, называемой интегрируемостью. Модели с такой структурой являются основным предметом исследований в рамках текущего проекта.

Проект направлен на дальнейшее исследование точно решаемых моделей статистической физики, квантовой механики и квантовых теорий поля, что потребует разработки новых теоретических инструментов, основанных на теории интегрируемых систем, и открытия новых математических структур, стоящих за точной решаемостью. Основными целями проекта являются получение точных результатов об универсальных законах во взаимодействующих системах частиц со стохастической динамикой и моделях случайного роста фронтов, моделях равновесной статистической физики, включая просачивание, полимеры и другие двумерные решеточные модели и квантовые спиновые цепочки, изучение известных и построение новых типов специальных функций, играющих роль строительных блоков в теории интегрируемых систем и вычислениях статистических сумм (суперконформных индексов), изучение известных и построение новых алгебраических структур, стоящих за концепцией интегрируемости.

## **2.2. Научное обоснование** (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски)

Основной **целью** проекта является построение и изучение математических моделей статистической физики сложных систем и связанных с ними моделей квантовой механики и квантовой теории поля с акцентом на концепции и структуры теории интегрируемых систем, а также разработка математических инструментов, лежащих в основе этой теории, включая теорию специальных функций и теорию представлений квантовых матричных алгебр и групп кос.

В последнее время был достигнут значительный прогресс в понимании природы предельных форм, универсальных флуктуаций и корреляций в моделях равновесной и неравновесной статистической физики. Среди равновесных моделей изучаются упаковки димеров и полимеров на решетках, полимеры в случайных средах, вершинные и спиновые модели, где предметом изучения является, например, предельная макроскопическая форма границ между различными термодинамическими фазами, а также ее случайные флуктуации и корреляции между ее частями. В неравновесном контексте аналогичные вопросы изучаются на примерах стохастических моделей неравновесных решеточных газов или транспортных потоков, таких как асимметричный процесс с запретами, а также различных поверхностей раздела, движущихся под действием случайных сил, где макроскопическое описание дается в терминах решений уравнений гидродинамического типа, и случайных флуктуаций, характеризуемых универсальными статистическими законами, специфичными для обширных классов универсальности, объединяющих множество природных явлений, ярким примером которых является класс универсальности Кардара-Паризи-Жанга.

Успехи, достигнутые в этих направлениях, были обусловлены новыми приложениями теории интегрируемых систем к получению точных результатов о различных моделях со многими степенями свободы. Используя концепции универсальности и скейлинга, эти результаты часто можно распространить на целый класс универсальности природных явлений. Прогресс стал возможен благодаря построению новых интегрируемых моделей неравновесных стохастических систем, систем равновесной статистической физики и квантовых систем, разработке новых методов точных решений этих моделей и открытию новых математических структур, стоящих за интегрируемостью, таких как новые классы специальных функций и новые решения уравнения Янга-Бакстера и соотношения кос, появляющиеся в теории представлений квантовых матричных алгебр и групп кос. Команда, участвовавшая в проекте, получила множество передовых результатов в этих направлениях. **Актуальность и научная новизна** планируемых результатов соответствуют современным тенденциям в области точных

решений систем со многими степенями свободы и основаны на богатом опыте команды в теории интегрируемых систем и ее приложениях, а также в теории специальных функций и теории квантовых групп.

**Методы, подходы и техники,** которые будут использоваться в проекте, будут расширять и обобщать существующие методы теории интегрируемых систем, такие как координатно-алгебраический и функциональный анзац Бете, квантовый метод обратной задачи рассеяния, методы функциональных соотношений и теории разностных уравнений, методы интегрируемой вероятности, такие как теория детерминантных и пфаффианных точечных процессов, марковской двойственности и т.д. Эти методы в значительной степени основаны на математическом ядре, базирующемся на теории представлений и теории специальных функций, которое будет развиваться в рамках проекта.

### **Обзор конкретных тем исследования и ожидаемых результатов**

Различные реакционно-диффузионные модели взаимодействующих частиц на одномерной решетке будут изучаться с использованием марковских двойственностей. Богатыми наборами марковских двойственностей обладают взаимодействующие системы частиц, стохастические генераторы которых содержатся в представлениях бесконечной алгебры Гекке. Примерами являются модели аннигилирующих частиц, модели с аннигиляцией и коалесценцией, модели выборщиков и др. Существование таких двойственностей позволяет вычислять полные наборы корреляционных функций, характеризующих эволюцию бесконечных конфигураций частиц с учетом реакционно-диффузионной динамики. Отталкиваясь от представлений алгебры Гекке, планируется классификация систем частиц с одним и многими типами частиц, допускающих различные типы марковских двойственностей, и полное описание их динамики. Кроме того, новые стохастические модели взаимодействующих решетчатых путей на двумерных решетках могут быть построены на основе тех же алгебраических структур с использованием процедуры бакстеризации. Эти модели описывают статистику решетчатых путей или частиц с дискретной временной динамикой, что позволяет включать новые типы взаимодействия по сравнению с моделями с непрерывным временем, изученными ранее. Планируется построение и полное точное решение таких моделей с использованием методов марковской двойственности.

Одной из главных задач теории фазовых переходов является анализ универсального скейлингового поведения больших систем в критических точках. Известно, что критичность в бесконечной системе проявляется в универсальных критических показателях и скейлинговых функциях, определяющих корреляции в системе. В то же время отличительной чертой критического поведения в ограниченной системе являются универсальные конечно-размерные поправки к предельным значениям, принимаемым наблюдаемыми в критической точке в бесконечной системе, которые, предположительно, определяются конформными аномалиями. Кроме того, предполагается, что коэффициенты асимптотического разложения наблюдаемых в двумерных системах в критической точке будут отражать операторное содержание соответствующих конформных теорий поля, которые гипотетически описывают критические точки в двумерных системах. Таким образом, расчеты граничных эффектов на решетке дают прямую проверку предсказаний конформной теории поля. В рамках проекта планируется решить несколько связанных с этим проблем. Это вычисление точных плотностей кластеров и их асимптотических разложений в моделях просачивания, а также плотностей петель в связанных с ними моделями плотно упакованных петель на решетках с различными граничными условиями, что оказывается возможным, благодаря связи этих задач с шестивершинной моделью разрешимой с помощью метода анзаца Бете, построение асимптотических разложений термодинамических величин, характеризующих поведение на решетках конечного размера свободно-фермионных моделей, таких как димеры, модель Изинга и модели остовных деревьев с различной геометрией при различных граничных условиях.

Также планируется изучение граничного поведения нелокальных корреляционных функций в моделях плотных полимеров и остовных деревьев, а также описание предельных форм и универсальных флуктуаций конфигураций полимеров в этих моделях.

Также планируются приложения излучавшихся моделей полимеров и квантовых спиновых цепей к задачам из смежных областей квантовой механики и биофизики. Среди них исследования «запутанных состояний» и магнитных свойств сложных квантовых спиновых систем, имеющих отношение к задачам квантовых вычислений. Кроме того, планируется применение модели ротора-маршрутизатора (эйлеровых блужданий) для изучения динамики разрывов двухцепочечной ДНК.

Важной частью запланированных исследований является разработка математических структур, стоящих за интегрируемостью. В частности, эллиптические бета-интегралы и эллиптические гипергеометрические функции, которые были открыты в ЛТФ и являются вершиной теории специальных функций математической физики, содержащие большинство известных специальных функций в качестве частных предельных случаев, обеспечивают наиболее глубокую математическую основу для теории интегрируемых систем. Исследование, запланированное в рамках проекта, включает в себя дальнейшее изучение свойств этих функций и их различных предельных форм. В частности, это поиск приложений этих функций в квантовой теории поля, квантовой и статистической механике и в теории солитонов, построение сложных гипергеометрических функций на корневых системах в представлении Меллина-Барнса и изучение их связи с двумерными конформными теориями поля, нахождение обобщенных модулярных преобразований для эллиптических гипергеометрических интегралов и описание их следствий для суперконформных индексов (статистических сумм) четырехмерных суперсимметричных теорий поля. Также планируются обобщения полученных результатов для случаев разреженных гипергеометрических функций различных типов и описание соответствующих физических систем, а также исследование связей между солитонными решениями интегрируемых уравнений, решетчатым кулоновским газом, нелокальными цепочками Изинга и ансамблями случайных матриц.

Последний блок запланированного исследования посвящен изучению алгебраических структур, лежащих в основе интегрируемости, и их использованию для создания новых интегрируемых систем, которые могли бы быть полезны в различных приложениях. В частности, будет продолжено исследование семейства квантовых матричных алгебр. Это семейство алгебр было открыто в контексте метода квантового метода обратной задачи рассеяния в конце 1980-х годов. Они нашли различные применения в теории интегрируемых систем, квантовой механике и теории поля, статистической физике и теории случайных процессов. Изучение математических структур и теории представлений этих алгебр привело к развитию новых разделов современной математики: теории квантовых групп (квазитреугольных алгебр Хопфа), теории инвариантов связей/узлов и связанных с ними инвариантов трехмерных многообразий.

В рамках проекта планируется обобщить теорему Гамильтона-Кэли на случай квантовых матричных алгебр ортогонального типа и изучить подалгебры спектральных значений ортогональных квантовых матриц. Структурная теория специального семейства квантовых матричных алгебр - алгебр уравнений отражения - будет использована для построения аналога разложения Гаусса в этих алгебрах, что, в свою очередь, позволит развить теорию представлений этих алгебр. Будут продолжены исследования R-матричных представлений группы кос.

Также планируется изучить серию R-матричных решений соотношения кос, которые позволяют моделировать стохастические реакционно-диффузионные процессы, и изучить возможность построения новых инвариантов зацеплений/узлов с использованием новой серии R-матриц.

**2.3. Предполагаемый срок выполнения 2028**

**2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ**

### 2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК

Вычислительные ресурсы	Распределение по годам				
	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Хранение данных (ТБ) - EOS - Ленты					
Tier 1 (ядро-час)					
Tier 2 (ядро-час)					
СК «Говорун» (ядро-час) - CPU - GPU					
Облака (CPU ядер)					

### 2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
НИУ ВШЭ	Россия	Москва	Гриценко В.А.	Обмен визитами
НИУ ВШЭ	Россия	Москва	Кротков Д.И.	Совместные работы
НИУ ВШЭ	Россия	Москва	Уваров Ф.В.	Обмен визитами
НИУ ВШЭ	Россия	Москва	Горбунов В.Г.	Обмен визитами
НИУ ВШЭ	Россия	Москва	Хорошкин С.М.	Обмен визитами
ПОМИ РАН	Россия	С.-Петербург	Деркачев С.Э.	Совместные работы
ПОМИ РАН	Россия	С.-Петербург	Мудров А.И.	Обмен визитами
ПОМИ РАН	Россия	С.-Петербург	Быцко А.Г.	Обмен визитами
ИФВЭ	Россия	Протвино	Сапонов П.А.	Совместные работы
ИФВЭ	Россия	Протвино	Разумов А.В.	Обмен визитами
ЕрФИ	Армения	Ереван	Апресян Е.	Совместные работы
ЕрФИ	Армения	Ереван	Измаилян Н.Ш.	Совместные работы
ЕрФИ	Армения	Ереван	Ананикян Н.С.	Совместные работы
ЕГУ	Армения	Ереван	Морозов В.Ф.	Совместные работы
ЕГУ	Армения	Ереван	Мамасакхлисов Е.Ш.	Совместные работы
Институт механики БАН	Болгария	София	Бънзарова Н.	Совместные работы
Институт	Болгария	София	Пешева Н.	Совместные работы

механики БАН				
Центр математических исследований UdeM	Канада	Монреаль	Луценко И.М,	Совместные работы
Caltech	США	Пасадена	Райнс Э.М.	Совместные работы
Университет Уперталя	Германия	Уперталь	Боос Г.	Обмен визитами
Экс-Марсельский Университет	Франция	Марсель	Огиевецкий О.	Совместные работы
Университет Анжера	Франция	Анжер	Рубцов В.	Обмен визитами
Университет Уорвика	Великобритания	Уорвик	Заборонский О.	Совместные работы
Университет Сиднея	Австралия	Сидней	Молев А.	Обмен визитами
Австралийский национальный университет	Австралия	Канберра	Мангазеев В.	Обмен визитами

**2.6. Организации-соисполнители** (те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)

### 3. Кадровое обеспечение

#### 3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал, сумма FTE	Ассоциированный персонал, сумма FTE
1.	научные работники	6.5	
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	служащие		
5.	рабочие		
	<b>Итого:</b>	<b>6.5</b>	

### 3.2. Доступные кадровые ресурсы

#### 3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	ФИО	Подразделение	Должность	Сумма FTE
1.	научные работники	В.И. Иноземцев	ЛТФ	внс	1.0
2.	научные работники	В.В. Папоян	ЛТФ	снс	1.0
3.	научные работники	А.М. Поволоцкий	ЛТФ	снс	1.0
4.	научные работники	П.Н. Пятов	ЛТФ	внс	0.5
5.	научные работники	В.П. Спиридонов	ЛТФ	начальник сектора	1.0
6.	научные работники	Г.Ю. Шитов	ЛТФ	снс	1.0
	<b>Итого:</b>				<b>5.5</b>

#### 3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ

№№ п/п	Категория работников	Организация-партнер	Сумма FTE
1.	научные работники		
2.	инженеры		
3.	специалисты		
4.	рабочие		
	<b>Итого:</b>		

### 4. Финансовое обеспечение

Финансирование проекта будет осуществляться через тему «Теория сложных систем и перспективных материалов»

Руководитель проекта / подпроекта КИП \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Дата представления проекта / подпроекта КИП в ДНОД \_\_\_\_\_

Дата решения НТС Лаборатории 13.04.2023, номер документа 14

Год начала проекта / подпроекта КИП 2024

## ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

ШИФР ТЕМЫ / КИП

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА КИП

СОГЛАСОВАНО

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
ИНСТИТУТА

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ / КИП

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА /  
ПОДПРОЕКТА КИП

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ

\_\_\_\_\_

ПОДПИСЬ

\_\_\_\_\_

ФИО

\_\_\_\_\_

ДАТА

