Приложение 4.

Форма отчета по Проекту

УТВЕРЖДАЮ

Директор Лаборатории

_____ / _____ /

“____“ _____

202_ г.

ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ
ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения по проекту
1.1. Научное направление
06 -Информационные технологии

1.2. Наименование проекта
Методы вычислительной физики для исследования сложных систем

1.3. Шифр проекта
06-6-1119-2-2024/2026

1.4. Шифр темы
06-6-1119-2014

1.5. Фактический срок реализации проекта

1.6. Руководители проекта
Земляная Е.В.
Чулуунбаатар О.

1.7. Заместители руководителя проекта
Калиновский Ю.Л.
Хведелидзе А.

2. Научный отчет

2.1. Аннотация
Проект нацелен на разработку и применение математических и вычислительных методов для моделирования сложных физических систем, изучаемых в рамках ПТП ОИЯИ и описываемых системами динамических нелинейных, пространственно неодномерных интегральных, интегро-дифференциальных или дифференциальных уравнений, зависящих

от параметров моделей. Эволюция решений таких систем может характеризоваться наличием критических режимов, бифуркаций и фазовых переходов. Математическое моделирование является неотъемлемой частью современных научных исследований и требует адекватной математической постановки задач в рамках изучаемых моделей, адаптации известных или развития новых численных подходов для эффективного учета особенностей исследуемых физических процессов, разработки алгоритмов и комплексов программ для высокопроизводительного моделирования на современных вычислительных системах, включая ресурсы МИВК. Исследования в рамках проекта проводятся в следующих основных направлениях:

I. Разработка методов, алгоритмов и комплексов программ для проведения численных исследований взаимодействий различных типов в сложных системах ядерной, атомной, молекулярной физики и квантовой механики.
II. Моделирование многофакторных процессов в материалах и конденсированных средах под внешними воздействиями.
III. Развитие численных методов и решение задач моделирования при проектировании экспериментальных установок и оптимизации режимов их работы.
IV. Моделирование сложных процессов в плотной ядерной материи, включая модели астрофизики и процессы в экспериментальных установках.
V. Моделирование квантовых систем с применением методов квантовой теории информации и гибридных квантово-классических методов программирования.

В результате исследований, проведенных в 2024–2025гг., были получены новые результаты как по развитию вычислительных методов и программ для исследования сложных физических систем, так и по проведению численного исследования этих систем. Получена новая информация об изучаемых системах, важная для дальнейшего развития математических моделей, теоретических и экспериментальных исследований.

2.2. Развернутый научный отчет

2.2.1. Описание режима работы и функционирования основных систем и оборудования
2.2.2. Описание проведенных экспериментов (для экспериментальных проектов).
2.2.3. Описание проделанной научной работы и полученных результатов.

Результаты работ в рамках проекта отражены более чем в 120 публикациях, включая три монографии и два учебных пособия. Монография [1] посвящена разработанным итерационным методам, алгоритмам и программам для решения систем уравнений различных типов с использованием метода конечных разностей и метода конечных элементов (МКЭ) высокого порядка. Монография [2] посвящена разработанным итерационным методам и алгоритмам решения систем нелинейных уравнений на основе непрерывного аналога метода Ньютона. В монографии [3] дан обзор основных результатов, которые приводят к пониманию двойственной природы химической связи в двухатомной молекуле бериллия в основном состоянии $X^1\Sigma_g^+$. Показано, что на низких колебательных уровнях атомы связаны ковалентной связью, тогда как на более высоких уровнях они взаимодействуют посредством сил Ван дер Ваальса, переходя между формами потенциальной энергии.

Опубликован научный обзор [4] в журнале Natural Science Review по развитию модифицированных итерационных схем на основе непрерывного аналога метода Ньютона – важного инструмента решения ряда задач проекта.

Для описания коллективной квадрупольной модели атомного ядра и расчета ротационно-вибрационных спектров и вероятностей квадрупольных переходов разработана программа GCMFEM решения краевых задач (КЗ) для системы двумерных эллиптических дифференциальных уравнений со смешанными производными [5,6]. Полученные результаты для изотопов ^{190}Os и ^{154}Gd согласуются с экспериментальными данными.

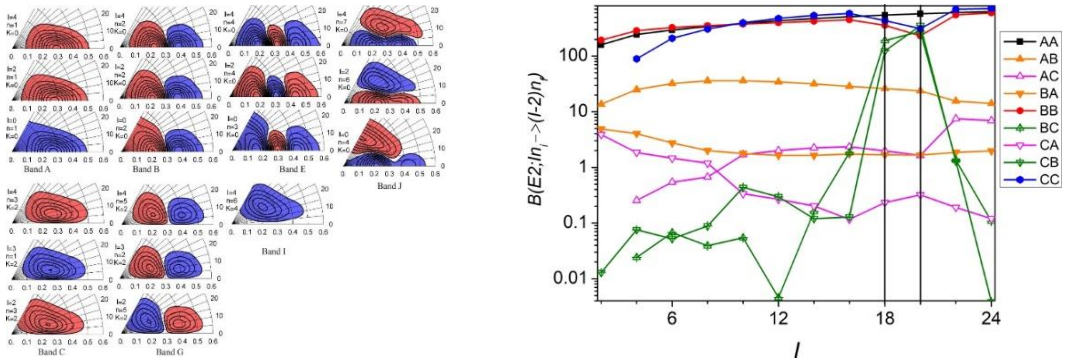


Рис.1. Полученные в [6] компоненты собственных функций коллективной модели атомного ядра ^{154}Gd (слева) и вычисленные квадрупольные переходы B(E2) между полосами A, B и C в ^{154}Gd (справа).

Для решения уравнений в рамках метода связанных каналов с комплексными потенциалами, описывающих ядерные реакции с массивными ядрами, разработаны комплексы программ, реализующие МКЭ высокого порядка. Показано, что МКЭ и метод R-матрицы более стабильны, чем часто используемый модифицированный метод Нумерова, и позволяют включать значительно больше колебательных и вращательных связей. Расчеты реакций ^{48}Ti + ^{208}Pb и ^{51}V + ^{248}Cm (см. Рис 2) показали, что многофононные и высокоспиновые состояния значительно сглаживают распределения барьеров, улучшая согласие с экспериментальными данными [7].

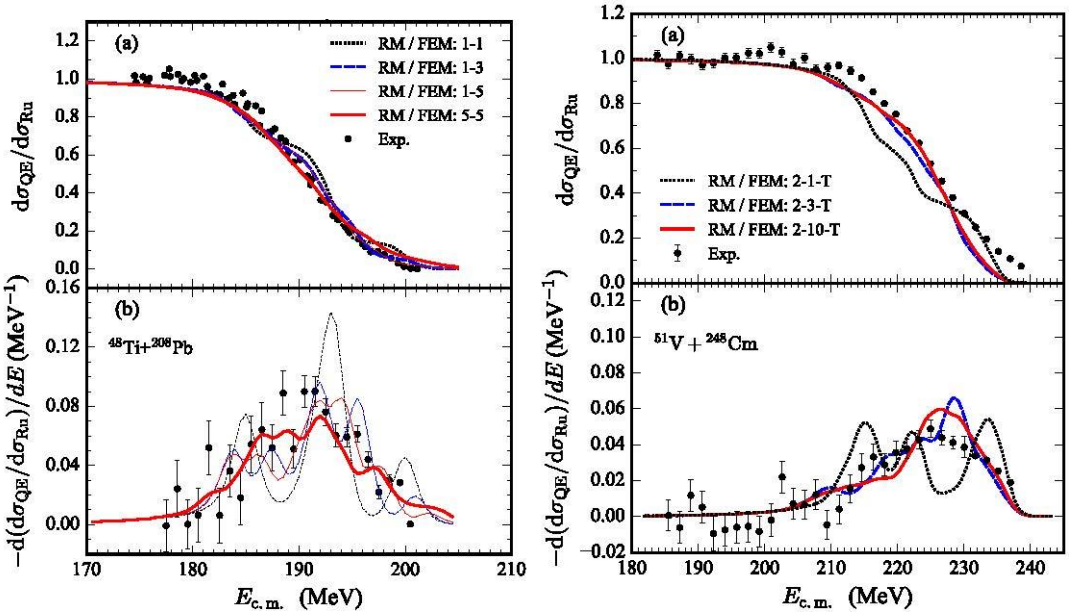


Рис. 2. (а) Рассчитанные в [7] сечения квазиупругого рассеяния под обратным углом относительно сечения Резерфорда для реакций ^{48}Ti + ^{208}Pb (слева) и ^{51}V + ^{248}Cm (справа). (б) Соответствующие распределения барьеров. Экспериментальные данные [S. Mitsuoka, et al., Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 182701 (слева), и M. Tanaka, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 91 (2022) 084201 (справа)] показаны кружками.

Разработаны новые схемы МКЭ третьего и четвертого порядков с многомерными интерполяционными полиномами Эрмита *d*-мерного гиперкуба для решения КЗ для эллиптического уравнения со смешанными частными производными на гиперпараллелепипедальных сетках. Тестовые расчеты КЗ подтверждают заявленный порядок точности разработанных схем МКЭ [8]. На основе комбинации МКЭ и метода секущих разработаны новые алгоритмы решения задач дискретного и непрерывного спектра двух кулоновских центров в вытянутых сфероидальных координатах, включая

нахождение собственных значений энергии, фазовых сдвигов, констант разделения и соответствующих собственных функций [9].

Численное исследование [10] проведенное квазиупругих столкновений атомов водорода с электронами, несущими кинетическую энергию в диапазоне несколько кэВ, установило необходимость расширения теоретической основы до второго борновского приближения (ВБП). Разработаны методы вычисления многомерных сингулярных интегралов, возникающих в ВБП. Предложенные методы позволяют проводить дальнейшие численные исследования столкновений электронов с энергией в несколько кэВ с атомами гелия, для которых уже имеются экспериментальные данные.

В рамках микроскопической модели оптического потенциала проведен анализ данных протон-ядерного рассеяния при энергиях 200-1000 МэВ для разных ядер-мишеней. На этой основе сделаны оценки влияния ядерной среды на амплитуду рассеяния в зависимости от энергии налетающего протона и атомной массы ядра-мишени [11]. В работе [12] разработанный подход обобщен на случай более низких энергий налетающих протонов и на случай рассеяния легких ядер.

В сотрудничестве с ЛЯР и ЛТФ проведено исследование реакции рассеяния $^{7}Li+^{10}B$ и реакции $^{7}Li+^{10}B\rightarrow^{6}Li+^{11}B$ при энергии пучка E_{LAB}=58 МэВ с использованием микроскопической модели оптического потенциала и метода искаженных волн в борновском приближении в сопоставлении с экспериментальными данными, полученными на циклотроне У-400 в ЛЯР. Результаты анализа экспериментальных данных указывают на наличие протон-нейтронного гало в структуре возбужденного состояния $^{6}Li_{0+}$ (3.56 МэВ) [13].

Разработан квантово-химический кластерный метод с целью количественного обоснования эффективных спиновых моделей для различных кристаллических структур магнитных оксидов переходных металлов [14]. Метод применим для широких семейств новых магнитных материалов со сложным химическим составом. Программный пакет TANGELO для симуляции квантовых вычислений дополнен для учета релятивистских поправок к кулоновским взаимодействиям при расчетах химических соединений с участием сверхтяжелых элементов. Вычислительный алгоритм основан на гибридной квантово-классической схеме adapt-VQE и реализован с целью квантово-химического вычисления волновых функций и энергий основного состояния монооксидов тяжелого свинца и сверхтяжелого флеровия.

На основе тензорных сетей развит программный пакет для симуляции квантовых вычислений, который применен к неравновесной квантовой динамике низкоразмерных спиновых моделей. На примере одномерной XXZ спиновой (s=1/2) модели исследовано влияние стохастических полей окружения, нарушающих унитарный характер эволюции спиновой системы. При изменении модельных параметров обменной анизотропии обнаружен кроссовер в динамическом поведении спиновой системы, что находится в согласии с гипотезой динамического фазового перехода [15].

Предложен метод экстраполяции пертурбативных разложений по степеням асимптотически малых параметров на область конечных или бесконечных переменных [16,17]. Экстраполяция осуществляется с помощью автомодельных фактор-аппроксимантов. В ряде случаев метод позволяет точно восстановить искомые функции по их асимптотическим разложениям слабой связи.

Проведено исследование модели атомной оптики с холодными бозонами [18]. Показано, что при охлаждении бозонов в ловушках до температур, при которых атомное облако превращается в Бозе-Эйнштейновский конденсат, могут наблюдаться интерференционные паттерны, интерференционный ток, осцилляции Раби, генерация гармоник, параметрические конверсии и другие эффекты.

Построены регуляризующие корреляционные функции для квантовых статистических систем, состоящих из атомов или молекул и взаимодействующих друг с другом посредством сингулярных неинтегрируемых потенциалов [19]. Метод основан на решении

уравнения рассеяния в виде асимптотических рядов на малых расстояниях, которые могут быть экстраполированы на произвольные пространственные переменные с помощью теории автомодельных приближений. В [20] метод автомодельных приближений применен для экстраполяции суммирования расходящихся вириальных разложений для жидкостей типа жёстких дисков, жидкостей типа жёстких сфер и систем со степенными потенциалами. Показано, что предложенный метод дает более точные результаты по сравнению с другими подходами.

Проведена модернизация процедуры моделирования реакций фрагментации на основе транспортно-статистического подхода в модели BNV-SMM, позволившая сократить время счета и улучшить согласие с экспериментальными данными реакций фрагментации по сравнению с другими известными подходами. На основе транспортно-статистического подхода в сотрудничестве с ЛЯР исследовано отношение выходов изотопов, полученных в реакциях с налетающим ионом ^{18}O при энергии 35 МэВ с тяжелой ^{181}Ta и легкой ^{9}Be мишенями. Показано, что прицельный параметр столкновения ядер играет важную роль в определении изотопных распределений фрагментов, подобных налетающему ядру. Предложен метод ускорения транспортно-статистического расчета, реализован модифицированный подход, позволяющий улучшить согласие расчетов с экспериментальными данными [21,22].

В сотрудничестве с Софийским университетом разработан высокоточный численный метод для поиска новых решений задачи трёх тел с равными массами при условии отсутствия столкновений и наличия центральной симметрии. Метод основан на ньютоновской итерационной схеме, дополненной процедурой сеточного поиска начальных приближений [23].

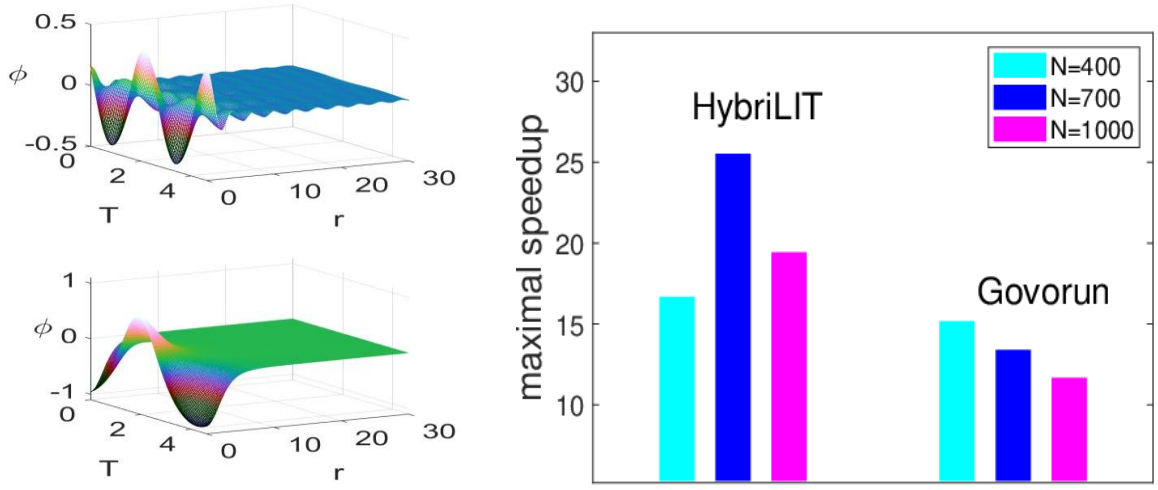


Рис. 3. Слева: полученные в [24] сосуществующие стоячие волны в 3D модели φ^4. Справа: максимально достигаемое за счет реализации параллелизма ускорение на кластере HybriLIT и суперкомпьютере «Говорун» при MATLAB-расчетах множителей Флоке для исследования устойчивости стоячих волн в модели φ^4. Рисунок из [25].

В сотрудничестве с Университетом Кейптауна проведено численное исследование влияния параметров частоты и радиуса на структуру и свойства стоячих волн в шаре конечного радиуса, аппроксимирующих 3D осциллоны в модели φ^4 [24,25]. Для 3D случая найдены сосуществующие типы стоячих волн, исследована их взаимосвязь, а также зависимость энергии и интервалов устойчивости волн от радиуса и частоты. Определен интервал частот, где вариационный метод обеспечивает точное описание (1+1)-мерного осциллона [26].

Проведена модернизация метода моделирования формирования гидратированных электронов в жидкости, позволившая за счет учета кулоновского потенциала расширить

диапазон частот сканирующего лазера, для которых результаты расчетов согласуются с экспериментом [27].

На основе нестационарного уравнения теплопроводности в системе координат, связанной с движущимся фронтом испарения, а также в рамках двух-температурной модели термического пика исследована динамика лазерной абляции материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов [28].

Предложен метод уточненного расчета разброса энергетических потерь в кристаллических решетках при облучении тяжелыми ионами с релятивистскими энергиями, который имеет преимущество в точности по сравнению с существующими подходами в случае облучения высоко-зарядными ионами [29].

Методами молекулярной динамики проведено моделирование взаимодействия бета-амилоидного пептида 25–35 с фосфолипидными мембранами DMPC в присутствии в растворе большого количества ионов K^+ и Cl^-. Полученные результаты позволяют получить информацию о возможных процессах, происходящих при разрушении мембраны в присутствии пептидов [30]. Результаты вошли в обзор[1] работ по совместному с ЛНФ и ЛРБ исследованию методами прикладной ядерной физики и молекулярно-динамического моделирования взаимодействий липидных пептидов, с акцентом на реорганизацию липидных мембран, вызванную пептидом Aβ (25–35) в условиях, имитирующих доклиническую стадию болезни Альцгеймера.

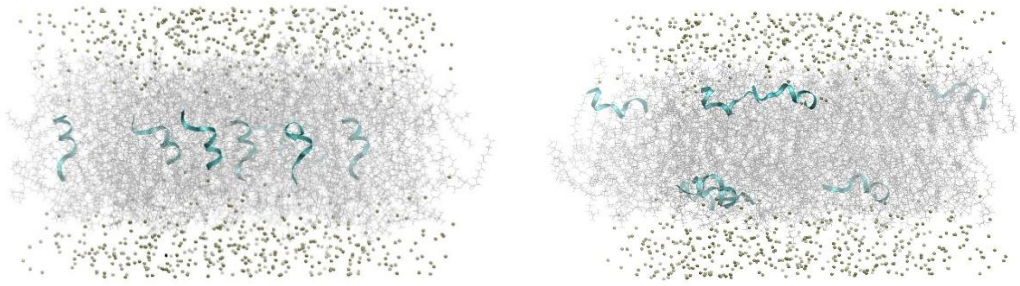


Рис. 4. Локализация пептидов в центре мембраны (слева) и в головных группах бислоя (справа) [30].

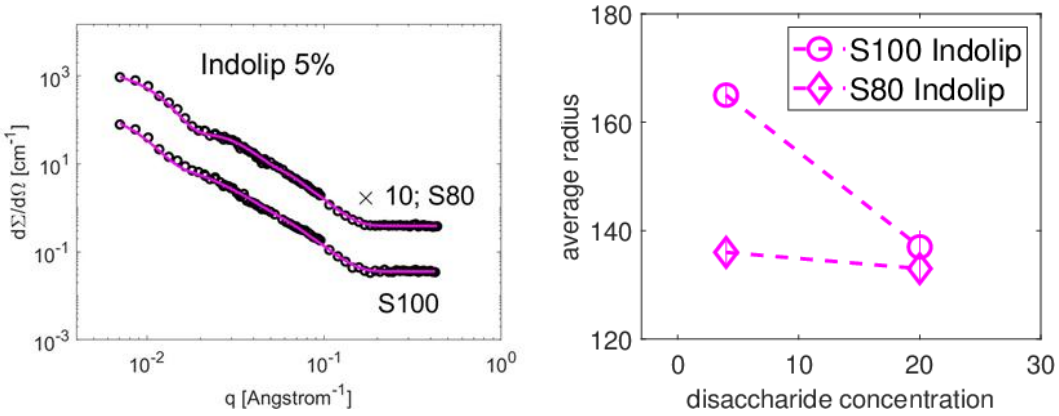


Рис. 5. Слева: экспериментальные и рассчитанные в [31] сечения малоуглового рассеяния нейтронов на образцах S80 и S100 полидисперсных везикулярных систем, приготовленных из 5-процентного раствора индолипа в воде с содержанием фосфатидилхолина 77% (S80) и 94% (S100). Справа: зависимость среднего радиуса везикул в образцах S80 и S100 от концентрации индолипа в воде.

В сотрудничестве с ЛНФ и ИБМХ РАН проведено исследование структуры везикул фосфолипидной транспортной наносистемы и лекарств на ее основе по данным малоуглового рассеяния нейтронов. Показано существенное влияние ряда факторов,

[1] Kurakin S.A., et al. Nat. Sci. Rev. 2025. V. 2. No. 2. article number 100202.

включая наличие примесей и концентрацию раствора, на размеры везикул и их структуру [31]. Разработан веб-интерфейс для онлайн-анализа экспериментальных данных малоуглового рассеяния на базе облачной инфраструктуры ОИЯИ с использованием инструментов пакета ROOT для реализации параллелизма [32,33].

Предложена комбинированная процедура [34] на основе МКЭ, позволяющая снизить вычислительные затраты без потери точности при решении 3D задач магнитостатики со сложной геометрией и с использованием магнитного векторного потенциала.

Исследован численный интегратор обыкновенных дифференциальных уравнений, основанный на комбинации методов квадратизации динамических систем по Аппельроту и дискретизации по Кахану [35]. Проведен анализ обратимых разностных схем (метод Кахана), продемонстрировано их преимущество по сравнению с другими подходами применительно к динамическим системам с квадратичными правыми частями [36].

Разработан метод предобусловленных сопряженных градиентов для решения конечно-элементных систем с аппроксимацией высокого порядка [37], преимуществом которого является отсутствие необходимости хранения 3D разреженной конечно-элементной матрицы, что существенно повышает эффективность параллельных вычислений.

На основе двухмерного и трехмерного моделирования с варьированием расположения токовых обмоток в магнитной системе выполнена оптимизация основных характеристик сверхпроводящего дипольного магнита Нуклотрона. В результате совместных работ с физиками ЛФВЭ и ЛЯП разработана компьютерная модель токовой обмотки на 4.5 кА циклотрона MSC-230 из сверхпроводящего коаксиального кабеля с учетом нового варианта его намотки [38]. Результаты нашли отражение в обзоре[2], посвященном работам в ОИЯИ по созданию сверхпроводящих магнитов для ускорителей заряженных частиц.

Проведено исследование возможности использования искусственного интеллекта для оптимизации и повышения скорости расчетов при моделировании магнитных полей ускорителей [39]. Проанализированы перспективы использования компьютерного зрения и искусственного интеллекта для оптимизации движения пучка с целью оценки необходимости включения этих инструментов в программу CORD, реализующую расчеты по исследованию влияния бетатронных колебаний и фазового движения частиц пучка на магнитное поле циклотрона MSC-230.

Разработан алгоритм расчета многомерных интегралов с особенностями типа «полюс» на основе идентификации и обхода типичных для КХД-моделей особенностей при интегрировании методом Монте-Карло [40].

Сформулированы предпосылки для реализации автоматической адаптивной квадратуры одномерного интеграла Римана, управляемой искусственным интеллектом. Необходимость такого подхода обусловлена возникновением критических ситуаций, приводящих к хрупкости кода, препятствующих получению надежного и быстрого результата, поскольку их обработка находится вне контроля существующих алгоритмов автоматической адаптивной квадратуры [41].

Рассмотрен операторный подход для стохастических систем, в рамках которого основное кинетическое уравнение представляется в форме уравнения Шредингеровского типа с гамильтонианом, зависящим от операторов рождения и уничтожения. Ядро оператора эволюции записывается через функциональный интеграл, для которого предложен метод приближенного вычисления, основанный на разложении по собственным функциям гамильтониана, порождающего функциональный интеграл. Для процесса чистого рождения получены приближенные значения вероятностей нахождения в первом и втором состоянии [42].

Предложена и реализована схема параллельной реализации вычислений для интегрирования трёхмерного нестационарного уравнения Шрёдингера в представлении

[2] Khodzhibagiyan H.G., et al. Nat. Sci. Rev. 2024. V. 1. No. 1. article number 6.

дискретной переменной. Результаты моделирования демонстрируют значительное сокращение времени вычислений для задач с большим числом сеточных узлов [43].

Развита потенциальная модель с нелокальным взаимодействием, в рамках которой сформулирована система уравнений для описания спектра векторных мезонов: вычисление спектра масс, констант взаимодействия, нормировок и выбор подходящих форм-факторов. Используемый в данной нелокальной модели феноменологический выбор вершины векторного мезона будет достаточным для описания свойств тяжелых кваркониев J/ψ (Y): процессов рождения и диссоциации кваркониев при энергиях соударения тяжелых ионов на эксперименте NICA [44,45].

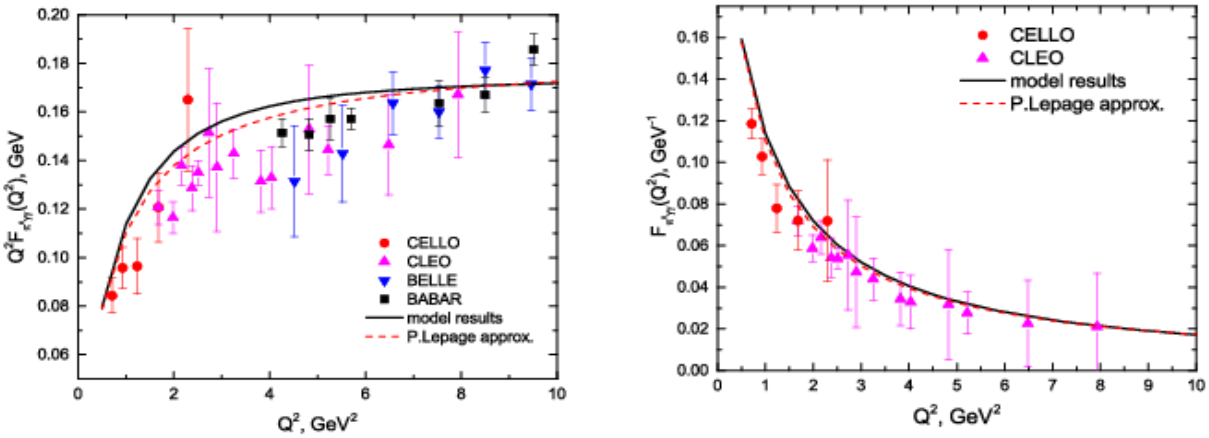


Рис. 6. Рассчитанный в [45] переходный форм-фактор $F_{\pi\gamma}$ как функция пространственно-подобного импульса фотона Q^2 в сравнении с экспериментальными данными.

Исследованы фазовые переходы в низкоразмерных системах заряженных частиц, включая диффузионные и интертипные (IT) сверхпроводники [46,47]. Численное моделирование показало, что в диффузионных многозонных сверхпроводниках IT-область фазовой диаграммы значительно расширяется при различии коэффициентов диффузии зон, что меняет характер взаимодействия вихрей. В результате численного исследования квазикристаллических сверхпроводников обнаружено отсутствие трансляционной симметрии, приводящее к фрактальному распределению конденсата [48,49].

Экосистема для моделирования джозефсоновских структур на базе платформы *Jupyter Book* пополнена материалами для исследования динамики сверхпроводникого квантового интерферометра с двумя джозефсоновскими переходами (СКВИД постоянного тока). Разработана вычислительная схема для построения вольтамперной характеристики СКВИД под действием магнитного поля. Параллельная реализация с использованием библиотеки Numba обеспечила существенное ускорение расчетов [50,51]. Проведено компьютерное моделирование контролируемого переворота намагниченности в цепочке φ_0 переходов, вызванного переменным напряжением. Продемонстрирована возможность управляемого переворота намагниченности [52]. Апробированы возможности применения языка *Julia* для исследования многопараметрической модели точечного φ_0-джозефсоновского перехода типа «сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник» с прямой связью между магнитным моментом и джозефсоновским током. Продемонстрирована эффективность этой технологии для организации параллельных вычислений по идентификации доменов переворота магнитного момента на плоскости параметров модели [53]. Проведено моделирование доменов переворота в модели φ_0-перехода «сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник» со слабой диссипацией в зависимости от параметров, регулирующих действие внешнего тока. Параллельная реализация позволила уменьшить время вычислений до 30 раз [54].

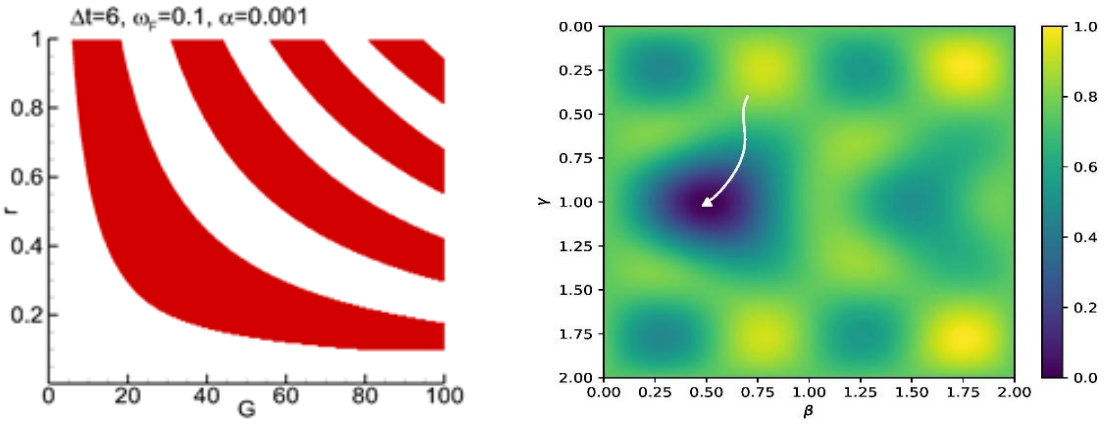


Рис. 7. Слева: пример рассчитанной в [54] структуры расположения доменов переворота магнитного момента на плоскости параметров модели φ_0-перехода «сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник» со слабой диссипацией. Справа: зависимость энергии от значений вариационных параметров в модели Изинга с внешним магнитном полем, рассчитанная на квантовом полигоне [56]. Белой стрелкой показана траектория градиентного спуска.

Проведено моделирование работы алгоритма квантовой аппроксимации для задачи оптимизации (QAOA) на симуляторе квантовых вычислений Cirq квантового полигона HybriLIT ОИЯИ на примере задачи поиска состояния с наименьшей энергией для модели Изинга с магнитным полем. Расчеты показали, что подключение библиотеки cuStateVec существенно повышает эффективность вычислений [55,56,57]. Рассмотрены случаи продольного и поперечного внешнего поля. Гамильтониан модели реализуется с помощью последовательности квантовых вентилей. Работа алгоритма QAOA промоделирована для последовательно усложняющихся решёточных конфигураций с применением библиотек Cirq и qsim при использовании графического процессора, технологии CUDA и библиотеки cuStateVec. Полученные результаты свидетельствуют о предпочтительности безградиентных методов по сравнению с градиентными.

Для конечномерной квантовой системы исследован показатель неклассичности состояния, основанный на определении его удаленности от множества «классических состояний». Показано, что множество классические состояний, задаваемое условием неотрицательности функции Вигнера, сосредоточенны в выпуклом многограннике симплекса собственных значений матрицы плотности состояния [58].

Предложено обобщение метода углов Тэйта – Брайана, являющегося модификацией известного метода углов Эйлера, описывающего вращение ортогонального репера в трехмерном евклидовом пространстве, на случай пространств произвольной конечной размерности. Разработанная система элементарных унитарных вращений позволяет ввести удобную параметризацию грассманианов и параметризацию алгебраически открытых подмножеств классов сопряжения эрмитовых матриц [59].

Предложен метод, повышающий вычислительную эффективность оценки нелокальных характеристик пары кубитов. В рамках этого подхода подмножество сепарабельных двухкубитных состояний ранга 4 описывается как полуалгебраическое многообразие, заданное системой полиномиальных неравенств третьего и четвертого порядка на собственные значения матрицы плотности с коэффициентами полиномов в виде тригонометрических функций, заданных на прямом произведении двух правильных октаэдров [60].

В рамках обобщенной формулировки квантовой механики Стратоновича-Вейля исследован вопрос дихотомии между элементарной и составной природой конечномерной квантовой системы. Показано, как информация о возможной реализации виртуальной

двухуровневой подсистемы кодируется в свойствах функции Вигнера полной четырехуровневой системы [61].

Предложен альтернативный подход к квантовой механике, в котором координата и импульс принимают значения в конечных полях Галуа [62]. Создан программный комплекс, включающий инструменты для работы с полями Галуа, операторами смещения, группами Вейля – Гейзенберга и Клиффорда, а также функциями Вигнера в конечных фазовых пространствах [63].

С целью введения понятия запутанности, основанной на «аберрационной» степени свободы фотонов, проанализирована классическая и квантовомеханическая интерпретация системы Цернике. Показана её эквивалентность осциллятору Хиггса на сфере или псевдосфере [64].

В рамках космологических моделей Bianchi типа-I и FLRW изучено взаимодействие спинорного и электромагнитного полей и их влияние на эволюцию Вселенной. Для модели Bianchi типа-I установлено, что взаимодействие этих полей смягчает ограничения, возникающие из-за ненулевых недиагональных компонент тензора энергии-импульса [65]. В FLRW-геометрии исследована роль нелинейного спинорного поля при различной кривизне, выявлены ограничения на параметры поля и получены численные решения соответствующих уравнений состояния [66]. Предложена и численно исследована обобщённая модель газа Чаплыгина на основе нелинейного спинорного поля, обеспечивающая единое описание тёмной материи и тёмной энергии в сферически-симметричном пространстве-времени FLRW с открытой геометрией. Параметрическая идентификация модели по современным данным демонстрирует ее конкурентоспособность в области поздней Вселенной и приводит к более низкому значению постоянной Хабла [67].

2.2.4. Список основных публикаций авторов ОИЯИ, включая ассоциированный персонал по результатам работы по проекту (список библиографических ссылок).

1. Vandandoo U., Zhanlav T., Chuluunbaatar O., Gusev A., Vinitsky S., Chuluunbaatar G. High-order finite difference and finite-element methods for solving some partial differential equations // Switzerland, Springer Nature. 2024. pp. 114.
2. Zhanlav T., Chuluunbaatar O. New developments of newton-type iterations for solving nonlinear problems // Switzerland, Springer Nature. 2024. pp. 281.
3. Mitin A.V., Gusev A.A., Chuluunbaatar G., Chuluunbaatar O., Vinitsky S.I., Derbov V.L., Luong H.L. Dual nature of chemical bond and vibration-rotation spectrum of the Be_2 molecule in the ground $X_1\Sigma_g^+$ // Chemical and Materials Sciences: Research Findings V. 2. BP Intern. Publishing 2025. pp. 100–133.
4. Zemlyanaya E., Chuluunbaatar O. Computational schemes based on the continuous analogue of Newton's method in the numerical study of complex physical systems at JINR // Nat. Sci. Rev. 2026. V. 3. No. 6. pp. 200605.
5. Batgerel B., Vinitsky S.I., Chuluunbaatar O., Buša J., Jr., Blinkov Yu.A., Gusev A.A., Deveikis A., Chuluunbaatar G., Ulziibayar V. Schemes of finite element method for solving multidimensional boundary value problems // J. Math. Sci. 2024. V. 279. pp. 738–755.
6. Batgerel B., Chuluunbaatar O., Derbov V.L., Gusev A.A., Hai L.L., Deveikis A., Hess P.O., Mardyban E.V., Mardyban M.A., Vinitsky S.I., Wen P. Symbolic-numeric solving boundary value problems: Collective models of atomic nuclei // Lect. Notes Comput. Sci. 2024. V. 14938. pp. 63–81.
7. Wen P.W., Chuluunbaatar O., Descouvemont P., Gusev A.A., Lin C.J., Vinitsky S.I. Role of multi-phonon and high-spin states on the quasi-elastic barrier distributions of massive systems // Phys. Lett. B 2025. V. 863. pp. 139383.
8. Kovalev O.O., Batgerel B., Gusev A.A., Hai L.L., Derbov V.L., Chuluunbaatar O., Vinitsky S.I., Wen P.W. Symbolic-numerical algorithms for solving multidimensional boundary value

problems by finite element method on hypercubes // Lect. Notes Comput. Sci. 2026. V. 16235. pp. 210–222.
9. Luong H.L., Muratova A.I., Kovalev O.O., Gusev A.A., Derbov V.L., Vinitsky S.I. Algorithms for solving two-center coulomb problem // Comput. Math. Math. Phys. 2025. V. 65. pp. 2618–2635.
10. Chuluunbaatar O., Popov Yu.V., Kanaya S., Onitsuka Y., Takahashi M. Electron-hydrogen quasi-elastic scattering at high momentum transfer: Calculations of second Born singular integrals // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 6. pp. 1400–1406.
11. Abdul-Magead I.A.M., Lukyanov V.K., Zemlyanaya E.V., Lukyanov K.V. Analysis of the proton amplitude of scattering on bounded nuclear nucleons based on proton-nucleus scattering data // Int. J. Mod. Phys. E. 2024. V. 33. No. 11. pp. 2441012.
12. Abdulmagead I., Lukyanov K., Lukyanov V., Zemlyanaya E. Nuclear in-medium effects on proton-nucleus and light nucleus-nucleus scattering amplitudes // Interact. 2026. V. 247. article number 86.
13. Zemlyanaya E.V., Lukyanov K.V., Lukyanov V.K., Penionzhkevich Yu.E., Sobolev Yu.G., Stukalov S.S. Microscopic analysis of elastic scattering and transfer reactions in the ^{7}Li+^{10}B collision at a beam energy of 58 MeV // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2025. V. 89. No. 8. pp. 1236–1240.
14. Yushankhai V.Yu., Siurakshina L.A. Variational quantum algorithm for computational problems of quantum chemistry: from UCCSD-VQA to ADAPT-VQA // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 4. pp. 1004–1008.
15. Siurakshina L.A., Yushankhai V.Yu. Nonequilibrium quantum dynamics of a low-dimensional spin system // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22. No. 3. pp. 536–539.
16. Yukalov V.I., Yukalova E.P. Strong-coupling limits induced by weak-coupling expansions // Ann. Phys. 2024. V. 467. pp. 169716.
17. Yukalov V.I., Yukalova E.P. Strong-coupling extrapolation of Gell-Mann-Low functions // Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55. No. 4. pp. 1026–1032.
18. Yukalov V.I., Yukalova E.P. Atom optics with cold bosons // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. V. 88. No. 6. pp. 922–928.
19. Yukalov V.I., Yukalova E.P. Quantum systems of atoms with highly singular interaction potentials // Laser Phys. 2025. V. 35. No. 4. pp. 045501.
20. Yukalov V.I., Yukalova E.P. Self-similar summation of virial expansions // Mol. Phys. 2026. V. 124. No. 6. article number e256302.
21. Mikhailova T.I., Erdemchimeg B., Sereda Yu.M. Target dependence of the isotope distributions in heavy-ion reactions at Fermi energy // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2025. V. 89. No. 8. pp. 1216–1222.
22. Mikhailova T.I., Erdemchimeg B. Modified transport approach for description of fragmentation reactions in heavy-ion collisions // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 6. pp. 1536–1542.
23. Hristov I., Hristova R., Puzynina T., Sharipov Z., Tukhliev Z. Numerical search for three-body periodic free-fall orbits with central symmetry // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2025. V. 51. pp. 109066.
24. Zemlyanaya E., Bogolubskaya A., Bashashin M., Alexeeva N. Numerical study of the φ^4 standing waves in a ball of finite radius // Discrete Contin. Models Appl. Comput. Sci. 2024. V. 32. No. 1. pp. 106–111.
25. Zemlyanaya E.V., Bogolubskaya A.A., Alexeeva N.V., Bashashin M.V. φ^4 oscillons as standing waves in a ball: a numerical study // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 6. pp. 1655–1659.
26. Alexeeva N.V., Barashenkov I.V., Dika A., De Sousa R. The energy-frequency diagram of the (1+1)-dimensional Φ^4 oscillon // J. High Energy Phys. 2024. V. 10. article number 136.
27. Волохова А.В., Земляная Е.В., Лахно В.Д., Рихвицкий В.С., Башашин М.В. Исследование влияния кулоновского потенциала на процесс гидратации электрона в

рамках динамической модели полярона // Материалы ITTMM-2024, Изд. РУДН. 2024. сс. 330–335.
28. Amirkhanov I.V., Sarkhadov I., Tukhliev Z.K., Gafurov H. Simulation of laser ablation of materials within the thermal spike model // J. Surf. Investig.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2024. V. 18. No. 2. pp. 348–353.
29. Kats P.B., Kudravets A.V., Rimashevskaya A.S., Voskresenskaya O.O. Comparative study of some rigorous and approximate methods for calculating the energy loss straggling // Radiat. Phys. Chem. 2024. V. 222. pp. 111860.
30. Kurakin S., Badreeva D., Dushanov E., Shutikov A., Efimov S., Timerova A., Mukhametzyanov T., Murugova T., Ivankov O., Mamatkulov K., Arzumanyan G., Klochkov V., Kučerka N. Arrangement of lipid vesicles and bicelle-like structures formed in the presence of Aβ (25–35) peptide // Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes. 2024. V. 1866. Iss. 1, pp. 184237.
31. Zemlyanaya E., Kiselev M., Chausova V., Tereshkina Yu., Tikhonova E. Analysis of structure of the PhTNS vesicles based on small-angle neutron scattering data obtained at the “Yellow Submarine” spectrometer // Int. J. Mod. Phys. E 2025. https://doi.org/10.1142/S021830132641003X
32. Соловьев А.Г., Соловьева Т.М., Лукьянов К.В., Земляная Е.В. Веб-интерфейс на базе облачной инфраструктуры ОИЯИ для фитирования экспериментальных данных малоуглового рассеяния с использованием инструментов пакета ROOT // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2024. Т. 20. вып. 3. сс. 590–601.
33. Lukyanov K., Soloviev A., Solovjeva T., Zemlyanaya E. A web application for fitting experimental data using JINR cloud infrastructure and ROOT package tools // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 6. pp. 1509–1513.
34. Chervyakov A.M. On finite-element modeling of large-scale magnetization problems with combined magnetic vector and scalar potentials // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21, No. 5. pp. 1074–1083.
35. Malykh M., Ayryan E., Lapshenkova L., Sevastianov L. Difference schemes for differential equations with a polynomial right-hand side, defining birational correspondences // Math. 2024. V. 12. article number 2725.
36. Malykh M.D., Ayryan E.A., Dulatov I.T., Lapshenkova L.O., Sevastianov L.A. Finite difference models of dynamical systems with polynomial right-hand side // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 6. pp. 1520–1523.
37. Yuldasheva M.B., Yuldashev O.I., Novitsky V.V. Modelling magnetic field of a compact electro-magnetic device of experimental setup to study rot-effects in fission of heavy nuclei // Russ. J. Numer. Anal. Math. Model. V. 40. No. 2. pp. 153–167 (2025).
38. Akishin P.G., Vesenkov V.A., Vlasov A.I. et al. Medical superconducting cyclotron MSC-230: Project status // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22. No. 4. pp. 847–851.
39. Karamyshev O.V., Lyapin I.D., Karamysheva T.V., Shuravin M.A. Using artificial intelligence in cyclotron design // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22. No. 4. pp. 690–698.
40. Friesen A.V., Goderidze D., Kalinovsky Yu.L. Calculation of a multidimensional integral with a singularity by dividing the integration domain into subsegments // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 21. No. 4. pp. 782–784.
41. Adam Gh., Adam S. Prerequisites for artificial intelligence driven automatic adaptive quadrature // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 6. pp. 1255–1263.
42. Ayryan E., Buša J., Hnatič M., Lučivjanský T., Malyutin V. Approximate calculation of functional integrals arising from the operator approach // Phys. A: Stat. Mech. Appl. 2025. V. 670. pp. 130616.
43. Ayriyan A.S., Buša J., Jr., Melezhik V.S. Parallelization of computational scheme based on two-dimensional dvr for integrating time-dependent three-dimensional Schrödinger equation // Phys. Part. Nucl. Lett. 2024. V. 22. No. 3. pp. 617–621.

44. Tawfik A.N., Ahmadov A.I., Friesen A., Kalinovsky Yu., Aparin A., Hanafy M. Derivation of meson masses in SU(3) and SU(4) extended linear sigma model at finite temperature // Particles 2025. V. 8. No. 1. article number 9.
45. Friesen A., Kalinovsky Yu., Khmelev A. Mesons in nonlocal model with four-dimensional separable kernel // Eur. Phys. J. A 2026. V. 62. article number 6.
46. Nikonov E.G., Nazmitdinov R.G., Glukhovtsev P.I. Computer studies of a dependence of equilibrium state structure on a number of particles for a two-dimensional system of charged particles confined in a disk potential // Discrete Contin. Models Appl. Comput. Sci. 2024. V. 32. No. 1. pp. 128–36.
47. Nikonov E.G., Nazmitdinov R.G. Glukhovtsev P.I. Manifestation of the hexatic phase in confined two-dimensional systems with circular symmetry // J. Surf. Investig.: X-ray, Synchrotron Neutron Tech. 2024. V. 18. No. 2. pp. 248–254.
48. Marychev P.M., Nikonov E.G., Stolyarov V.S., Vagov A. Crossover between types I and II in diffusive superconductors: perturbative study // Phys. Rev. B 2025. V. 111. pp. 134501.
49. Nikonov E., Chen Y., Doria M., Shanenko A. Hartree-Fock interaction in superconducting condensate fractals // Beilstein J. Nanotechnol. 2025. V. 16. pp. 2177–2182.
50. Rahmonova A., Rahmonov I., Streltsova O., Zuev M. Toolkit in python for simulation of Shapiro step on the current-voltage characteristic of a Josephson junction // Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55. No. 3. pp. 528–531.
51. Rahmonova A., Streltsova O., Rahmonov I., Zuev M. Python-реализация алгоритмов и инструментарий для моделирования динамики сверхпроводникого квантового интерферометра с двумя джозефсоновскими переходами (СКВИД постоянного тока) // Электронная публикация, 2024. http://studhub.jinr.ru:8080/jjbook/DC-SQUID.html
52. Rahmonova A., Streltsova O., Rahmonov I., Zuev M. Simulation of a controllable magnetization reversal in a chain of φ_0 junctions by an alternating voltage pulse // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 6. pp. 1592–1598.
53. Bashashin M.V., Rahmonov I.R., Zemlyanaya E.V. Applicability of the Julia programming language for mass solving of systems of differential equations using the example of the problem of modeling magnetic moment reversal in the φ_0-Josephson junction // Материалы ITTMM-2024, Изд. РУДН. 2024. сс. 393–398.
54. Bashashin M., Zemlyanaya E., Rahmonov I. Simulation of the magnetization reversal effect depending on the current pulse duration within the φ_0 Josephson junction model using MPI and OpenMP parallel computing technique // Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55. No. 3. pp. 498–501.
55. Palii Yu., Bogolubskaya A. Yanovich D. Quantum approximation optimization algorithm for the Ising model in an external magnetic field // Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55. No. 3. pp. 600–602.
56. Palii Yu.G., Bogolubskaya A.A. Yanovich D.A. Simulating QAOA operation using Cirq and qsim quantum frameworks // Discrete Contin. Models Appl. Comput. Sci. 2025. V. 33. No. 4. pp. 440–460.
57. Palii Yu., Belyakov D., Bogolubskaya A., Zuev M., Yanovich D. Simulation of the QAOA algorithm at the JINR quantum testbed // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 4. pp. 1661–1669.
58. Khvedelidze A., Torosyan A. The nonclassicality distance indicator of qudits // Phys. Part. Nucl. 2024. V. 55. No. 3. pp. 591–593.
59. Babich M.V., Bordag L.A., Khvedelidze A.M., Mladenov D.M. On multidimensional analogs of Euler (Tait-Bryan) angles and Grassmannians // Записки научных семинаров ПОМИ. 2025. Т. 543 сс. 43–55.
60. Khvedelidze A., Mladenov D., Torosyan A. Towards parameterizing the entanglement body of a qubit pair // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 6. pp. 1493–1497.
61. Khvedelidze A., Rogozhin I. On the dichotomy between quatrits and pairs of qubits in the Stratonovich-Weyl correspondence // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. No. 4. pp. 1025–1029.

62. Kornyak V.V. Constructive quantum mechanics and calculations with finite groups // Program. Comput. Softw. 2025. V. 51. No 1. pp. 6–16.
63. Корняк В.В. Группы Вейля – Гейзенберга и Клиффорда и квантовая физика // Записки Научных Семинаров ПОМИ. 2025. Т. 543 сс. 126–142.
64. Abgaryan V., Nersessian A., Yeghikyan V. Zernike system revisited: Imaginary gauge and Higgs oscillator // Mod. Phys. Lett. A 2025. V. 41. No. 02n03. pp. 2550222.
65. Saha B. Interacting spinor and electromagnetic fields in cosmology // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2024. Т. 1. № 46. сс. 22–26.
66. Saha B. Maxwell-Dirac system in cosmology // Int. J. Mod. Phys. A. 2024. V. 39. No. 29. pp. 2450117.
67. Goray M., Saha B. Observational constraints on a spinor field generalized Chaplygin gas model in a spherically symmetric FLRW space-time // Eur. Phys. J. C 2025. V. 85. No. 10. article number 1146.

2.2.5. Полный список публикаций (приложение в электронном виде, для журнальных публикаций с указанием импакт-фактора журнала).
2.2.6. Список докладов на международных конференциях и совещаниях (приложение в электронном виде).
2.2.7. Патентная деятельность (при наличии)

2.3. Статус и стадия (TDR, CDR, ongoing project) реализации проекта
(включая процент реализации заявленных этапов по проекту) *(если применимо))*

2.4. Результаты сопутствующей деятельности
2.4.1. Научно-образовательная деятельность. Список защищенных диссертаций.

1. Участник проекта М.В. Башашин 12.09.2025 защитил диссертацию «Численное исследование сверхпроводящих процессов и физических характеристик в многопараметрических моделях джозефсоновских структур» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

2. Подготовлены два учебных пособия:

- Калиновская Л.В., Калиновский Ю.Л. Матрицы и определители // Москва, Инфра-инженерия. 2024. 164 с. В пособии рассматриваются основные понятия, общие приемы и методы работы с матрицами, включая вычисление определителей различных порядков.
- Айриян А.С., Башашин М.В., Земляная Е.В., Стрельцова О.И. Параллельное программирование на основе технологии MPI: учебное пособие. Дубна: Изд. Ун-т «Дубна» 2025. 86 с. Пособие ориентировано на широкий круг лиц, изучающих параллельное программирование для ускорения численного решения вычислительных задач, излагаются основы использования технологии MPI для реализации параллелизма и повышения производительности вычислений.

3. В 2024 и 2025 гг. участники проекта Башашин М.В., Бордаг Л., Буша Я. мл., Гусев А.А., Земляная Е.В., Калиновский А.А., Кокаев Д.А., Лукьянов К.В., Никонов Э.Г., Рахмонова А.Р., Хведелидзе А., Чулуунбаатар О. принимали участие в проводении в ЛИТ ОИЯИ ежегодных Осенних ИТ-школах, целью которых является ознакомление студентов и аспирантов из разных вузов с проводимыми в ОИЯИ исследованиями и их привлечение к научным работам в рамках проекта.

4. Участники проекта ведут преподавательскую деятельность и выступают руководителями бакалаврских и магистерских работ в следующих вузах:

- в Государственном университете «Дубна» (Айриян А.С., Башашин М.В., Волохова А.В.,Гусев А.А., Земляная Е.В., Калиновский Ю.Л., Лукьянов К.В., Никонов Э.Г., Рахмонова А.Р., Стрельцова О.И., Сюракшина Л.А., Чулуунбаатар Г.)
- в Тверском государственном университете (Айрян Э.А., Стрельцова О.И.)
- в Дубненском филиале МГУ (Айриян А.С., Башашин М.В., Земляная Е.В., Калиновский Ю.Л., Лукьянов К.В., Рахмонова А.Р., Стрельцова О.И.)
- в Российском университете дружбы народов имени Патриса Лумумбы (Малых М.Д., Чулуунбаатар Г., Саха Б.)

2.4.2. Полученные гранты (стипендии) ОИЯИ.

Гранты ОИЯИ для молодых ученых и специалистов в 2024 г. – Бадреева Д.Р.
Стипендия им. М.Г. Мещерякова в 2024 г. – Абгарян В., Башашин М.В., Годеридзе Д.
Стипендия им. М.Г. Мещерякова в 2025 г. – Бадреева Д.Р., Хмелев А.В.
Стипендия им. М.Г. Мещерякова в 2026 г. – Годеридзе Д., Рахмонова А.Р.

2.4.3. Награды и премии.

Участники проекта являются соавторами следующих работ, удостоенных Премии ОИЯИ за научно-методические и научно-технические работы

Третья премия ОИЯИ за 2024 г.: «Вычислительные методы и проблемно-ориентированные комплексы программ решения некоторых уравнений в частных производных физических процессов и систем». Авторы: **Гусев А.А., Чулуунбаатар О., Чулуунбаатар Г., Буша Я. мл.**, Виницкий С.И., Жанлав Т., Батгэрэл Б., Улзийбаяр В., Хай Л.Л., Вэнь П.В.

Первая премия ОИЯИ за 2025 г.: «Разработка и создание сверхпроводящих магнитов для коллайдера NICA» Авторы: Никифоров Д.Н., **Акишин П.Г.**, Беспалов Ю.Г., Бычков А.В., Золотых Д.А., Коровкин С.А., Кузнецов Г.Л., Меркурьев А.В., Петров М.В., Свидетелев А.Н.

2024 г.:
Благодарность Минобрнауки РФ – Подгайный Д.В., Чулуунбаатар О.;

2025 г.:
Благодарность Главы г.о. Дубна – Стрельцова О.И.;
Правительственная почетная медаль “Передовой работник науки Монголии” – Гусев А.А.

2.4.4. Иные результаты (экспертная, научно-организационная, научно-популяризационная деятельность).

3. Международное научно-техническое сотрудничество
Фактически участвующие страны, институты и организации

Организация	**Страна**	**Город**	**Участники**	**Тип соглашения**
ННЛА	Армения	Ереван	Ананикян Н., Пилоян А.	совместные работы
ИФ	Азербайджан	Баку	Мирзаев М.Н.	совместные работы
ИМ НАНБ	Беларусь	Минск	Егоров А.Д. Малютин В.Б.	соглашение
SU	Болгария	София	Христов И.Г. Христова Р.Д. Младенов Д.	совместные работы

HCMUE	Вьетнам	Хошимин	Лыонг Л.Х.	совместные работы
GTU	Грузия	Тбилиси	Гиоргадзе Г.	совместные работы
TSU	Грузия	Тбилиси	Гиоргадзе Г. Элашвили А.	совместные работы
CU	Египет	Гиза	Абдул-Магеад И.	совместные работы
CIAE	Китай	Пекин	Линь Ч.Ц. Вэнь П.В.	совместные работы
UNAM	Мексика	Мехико	Гесс П.О.	совместные работы
IMDT MAS	Монголия	Улан-Батор	Батгэрэл Б.	совместные работы
MUST	Монголия	Улан-Батор	Улзийбаяр В.	совместные работы
Коллаборация BM@N	Россия	Дубна	Капишин М.Н.	совместные работы
Коллаборация MPD	Россия	Дубна	Рябов В.Г.	совместные работы
РУДН	Россия	Москва	Бронников К.А. Севастьянов Л.А. Рыбаков Ю.П.	совместные работы
ИМПБ РАН	Россия	Пущино	Лахно В.Д.	совместные работы
СГУ	Россия	Саратов	Дербов В.Л.	совместные работы
UCT	ЮАР	Кейптаун	Алексеева Н.В. Дика А.	совместные работы, грант программы JINR-NRF
IMRAM	Япония	Сендай	Такахаси М. Каная С.	совместные работы

4. План/факт анализ использованных ресурсов: кадровых (в т.ч. ассоциированный персонал), финансовых, информационно-вычислительных, инфраструктурных

4.1. Кадровые ресурсы (фактически на время подачи отчета) (общее количество участников)

№№ п/п	**Категория работника**	**Основной персонал Сумма FTE**	**Ассоциированный персонал Сумма FTE**
1.	научные работники	**40.8 (51 чел.)**	
2.	инженеры	**5.4 (8 чел.)**	
3.	руководители	**0.8 (1 чел.)**	
Итого:		**47.0**	

4.2. Фактическая сметная стоимость проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов				
				2004 г. (фактические расходы)	2005 г. (фактические расходы)	2006 г. (план)		
		Международное сотрудничество (МНТС)	246,8	57,4	99,4	90,0		
		Материалы						
		Оборудование и услуги сторонних организаций	145,1	24,4	17,8	102,9*		
		Пуско-наладочные работы						
		Услуги научно-исследовательских организаций						
		Приобретение программного обеспечения	132,4	30,7	0	101,7*		
		Проектирование/строительство						
		Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)*						
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы						
		– Сумма FTE,						
		– ускорителя/установки,						
		– реактора						
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*						
	Внебюджет (доп. смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

***2026 год с учетом переноса обязательств по договорам 2025 года**

4.3. Другие ресурсы

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)					

5. Заключение

6. Предлагаемые рецензенты:

Поляков С.В., д.ф.м.н., заместитель директора по научной работе Института прикладной математики им. В.М. Келдыша РАН

Руководители темы

_____/_____/

_____/_____/

“____“_____202_г.

Руководители проекта

_____/_____/

_____/_____/

“____“_____202_г.

Экономист Лаборатории

_____/_____/

“____“_____202_ г.