

**Методы, алгоритмы и программное обеспечение для
моделирования физических систем, математической обработки
и анализа экспериментальных данных (05-6-1119-2014/2023)**

(Годовой отчет 2023)

Руководители темы: Г. Адам, П. В. Зрелов

Заместители: Я. Буша, О. Чулуунбаатар

Участвующие лаборатории ОИЯИ: ЛИТ, ЛФВЭ, ЛТФ, ЛНФ, ЛЯР, ЛЯП, ЛРБ

Участвующие страны и международные организации:

Армения, Австралия, Азербайджан, Беларусь, Бельгия, Болгария, Бразилия,
Вьетнам, Германия, Грузия, Италия, Казахстан, Канада, Китай, Молдова, Монголия,
Польша, Португалия, Россия, Румыния, Словакия, США, Таджикистан, Франция,
ЦЕРН, Чехия, Швейцария, ЮАР, Япония

Январь 2024

Содержание

Расширенная аннотация	3
1. Математические и вычислительные методы моделирования сложных физических систем	5
1.1. Избранные результаты моделирования магнитного поля	5
1.2. Избранное численное моделирование физических систем и процессов	8
1.2.1. Теоретико-численные исследования плотной адронной материи, связанные с экспериментами на NICA	8
1.2.2. Численное моделирование ядерных систем и процессов	9
1.2.3. Численное моделирование систем конденсированного состояния	11
1.2.4. Численное моделирование кинетических высокоэнергетических процессов в материалах	15
1.2.5. Численное моделирование в радиационной биологии	16
1.2.6. Численное моделирование других систем	17
1.3. Новые способы снижения чрезвычайной сложности внутренних проблем	19
2. Программные комплексы и математические методы для обработки и анализа экспериментальных данных	20
2.1. Инструменты Parallel ROOT (PROOT) для анализа экспериментальных данных	20
2.2. Пакет GEANT4 для единого моделирования крупномасштабных экспериментальных данных	21
2.2.1. Новые перспективы дальнейшего развития пакета GEANT4	21
2.2.2. Использование пакета GEANT4 для обработки данных	22
2.3. Программная поддержка крупномасштабных экспериментов	23
2.3.1. Программная поддержка всех экспериментов ОИЯИ-NICA	23
2.3.2. Программная поддержка ОИЯИ-NICA: эксперимент BM@N	24
2.3.3. Программная поддержка ОИЯИ-NICA: эксперимент MPD	25
2.3.4. Программная поддержка ОИЯИ-NICA: эксперимент SPD	25
2.3.5. Программная поддержка LHC: эксперимент CMS	26
2.3.6. Программная поддержка LHC: эксперимент ATLAS	26
2.3.7. Программная поддержка FAIR: эксперимент PANDA	27
2.4. Вычислительная поддержка проектов ОИЯИ в области радиобиологии	27
2.5. Вычислительная поддержка проектов ОИЯИ по физике конденсированного состояния	27
2.6. Программно-вычислительная поддержка проекта нейтринной физики Байкал–ГВД	29
2.7. Поддержка обработки и анализа данных экспериментальной ядерной физики	29
3. Численные методы, алгоритмы и программы для многоядерных и гибридных архитектур и аналитика больших данных	30
3.1. Экосистема ML/DL/HPC на вычислительной платформе HybriLIT	30
3.2. Разработки на основе Экосистемы ML/DL/HPC	30
3.2.1. Расширенные возможности использования экосистемы ML/DL/HPC на базе JupyterHub	30
3.2.2. Решения для экспериментов ОИЯИ на базе машинного обучения	31
3.3. Реализация эффективных численных методов для трудно решаемых задач на платформах HybriLIT/GOVORUN	32
3.4. Прогресс в аналитике больших данных и искусственном интеллекте	34

4. Методы, алгоритмы и программное обеспечение компьютерной алгебры и	
квантовых вычислений	34
Список литературы	38

Главные достижения темы 1119 ЛИТ им. М.Г. Мещерякова в 2023 г.

Расширенная аннотация

В настоящем отчете «Тема 1119» означает сокращенное название темы исследований ОИЯИ 05-6-1119-2014/2023, *“Методы, алгоритмы и программное обеспечение для моделирования физических систем, математической обработки и анализа экспериментальных данных”*.

Исследования, проведенные в рамках Темы 1119 в течение 2023 г., включают четыре вида деятельности, которые объединяют различные решаемые вопросы:

1. Математические и вычислительные методы моделирования сложных физических систем;
2. Программные комплексы и математические методы обработки и анализа экспериментальных данных;
3. Численные методы, алгоритмы и программное обеспечение для многоядерных и гибридных архитектур и аналитики больших данных;
4. Методы, алгоритмы и программное обеспечение компьютерной алгебры и квантовых вычислений.

Работа, проделанная в рамках темы 1119 в течение 2023 года, характеризовалась фазовым переходом второго порядка, который можно кратко охарактеризовать как изменение без нарушения непрерывности.

Для изменений были две основные причины.

С одной стороны, важной вехой стало планирование комплексной научной деятельности ОИЯИ в целом, определяющее основные направления стратегических научных целей на семилетний период. Завершилась прошедшая семилетка, 2017 – 2023 годы, наступает новая семилетка 2024 – 2030 с новыми вызовами для всего научного сообщества института.

С другой стороны, смена поколений в руководстве MLIT (опять же со значительными чертами преемственности!) неизбежно потребовала переосмысления наиболее эффективных способов совершенствования и формулирования научных процессов в рамках ЛИТ, таких, которые принесли бы максимальную пользу как MLIT, так и ОИЯИ в целом.

Результатом этих целенаправленных усилий, предпринятых на всех инстанциях и уровнях ОИЯИ [1–3], стало решение о преемственности и сохранении краеугольных идей темы 1119 на следующий семилетний период, 2024 – 2030 годы. Однако с необходимыми изменениями: новое тематическое руководство и новая реализация исследовательских усилий в конкретных научных проектах, характеризующихся тесным взаимодействием между членами их команды.

Основные характеристики деятельности, проводимой по теме 1119, были обобщены в четырехлетнем отчете (2020–2023 гг.), представленном на сессиях ПКК по физике конденсированного состояния [1] и физике элементарных частиц [2] в июне 2023 г. соответственно.

Многогранная работа, проведенная в рамках темы 1119, потребовала решения ряда задач, что обусловило своевременность и важность различных достижений.

Первостепенное значение имело проектирование, разработка, внедрение и сопровождение удобной для пользователя вычислительной среды на гетерогенной вычислительной платформе ЛИТ, включающей кластер HybriLIT и суперкомпьютер «Говорун». Весьма необходимый и ценный вклад был внесен в трехмерное моделирование, необходимое для проверки магнитов для будущего объекта NICA, решения на самом высоком уровне конкретных задач в рамках проектов BM@N, MPD и SPD в NICA, разработка программного обеспечения системы обработки данных для проекта «Байкал–ГВД». Разработка программного обеспечения в рамках вклада ОИЯИ для проектов CMS и ATLAS Phase 3 в ЦЕРН суммирует лучшие результаты, полученные в рамках темы 1119 для обработки экспериментальных данных.

Всего за 2023 год сотрудники темы 1119 являются соавторами 153 научных публикаций. Из них 137 научных работ в престижных международных журналах (53 в зарубежных журналах, 84 в российских журналах), а также 5 монографий или вкладов в монографии и 11 публикаций в научных сборниках и периодических изданиях. Соавторство в 81 научных статьях проекта CMS, 6 научных статьях проекта DUNE и 5 научных статьях проекта «Байкал–ГВД» завершает список научных работ, выполненных сотрудниками темы 1119. Презентация 20 пленарных или приглашенных лекций и 9 устных лекций на международных конференциях завершает статистику вклада в развитие ОИЯИ посредством публикаций.

Диссертационный совет ЛИТ (ДС) установил очень высокие стандарты присуждения ученых степеней. В 2023 году ДС присвоил звание кандидата физ.–мат. наук двум молодым сотрудникам темы 1119 (Н.Н. Войтишину и Е.И. Александрову). Двое молодых сотрудников по окончании аспирантуры защитили научные и квалификационные работы (В.В. Папоян, Д.Р. Бадреева).

Значительная часть сотрудников темы 1119 внесла свой вклад в смягчение резкой кривой обучения, связанной с использованием крупномасштабных вычислений. В этом отношении, помимо личной помощи посредством бесед, особенно важными были организация специализированных мероприятий и/или участие в них посредством лекций.

К сожалению, в течение 2023 года не все шло гладко. Игорь Викторович Пузынин скончался 17 июля 2023 года [4]. Это самая тяжелая потеря для всего ОИЯИ, ЛИТ и темы 1119, в частности. Как создатель нового направления «вычислительная физика» в ОИЯИ, И.В. Пузынин на протяжении многих десятилетий вносил неизгладимый вклад в алгоритмическое и программное обеспечение теоретических и экспериментальных исследований, основанных на эффективном использовании современных вычислительных систем и высокоскоростных сетей. Он был инициатором чрезвычайно успешных международных конференций ММСР, регулярно проводимых в течение последних двух десятилетий, со значительным вкладом ученых со всего мира. Память о нем навсегда останется в ЛИТ.

1. Математические и вычислительные методы моделирования сложных физических систем

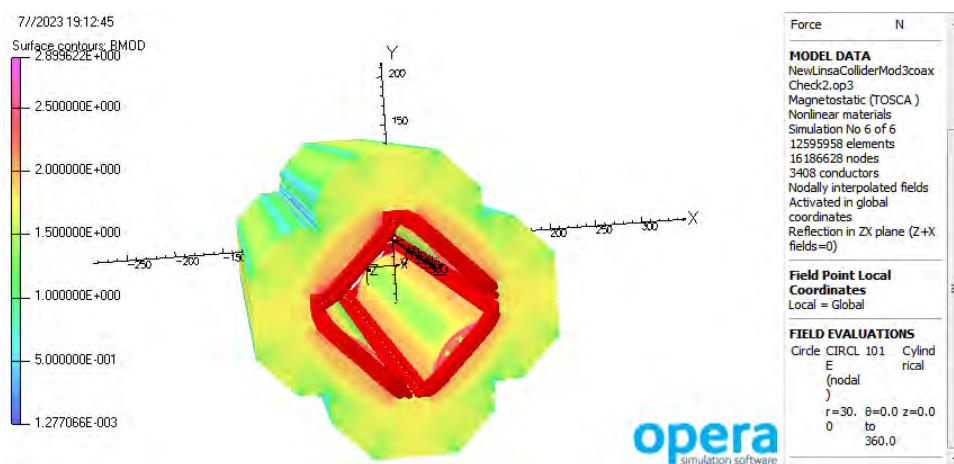
1.1. Избранные результаты моделирования магнитного поля

*Интенсивные текущие исследования включают **трехмерное компьютерное моделирование магнитных систем** в рамках проекта NICA (ОИЯИ) для проверки однородности магнитного поля в рабочих зонах новых физических магнитов; совершенствование средств проектирования новых циклотронов медицинского назначения.*

- **Использование OPERA для трехмерного моделирования магнитных систем для коллайдера NICA**

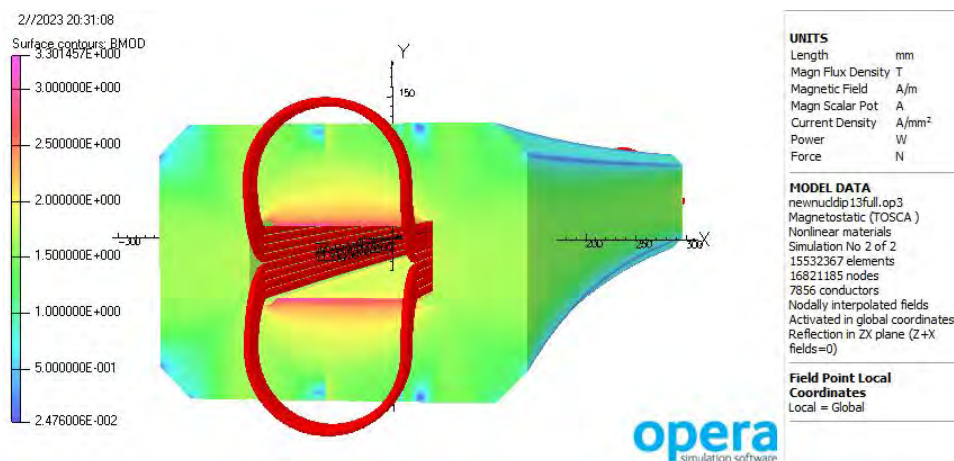
Работа, выполненная П.Г. Акишиным в сотрудничестве с ЛФВЭ в рамках проектов NICA по трехмерному моделированию разных классов магнитов иллюстрируется на рисунках ниже, где показано распределение поля в рабочих зонах магнита.

На основе двухмерного и трехмерного моделирования магнитной системы путем варьирования расположения токовых обмоток проводилась оптимизация характеристик сверхпроводящего трехвиткового квадрупольного магнита коллайдера NICA.



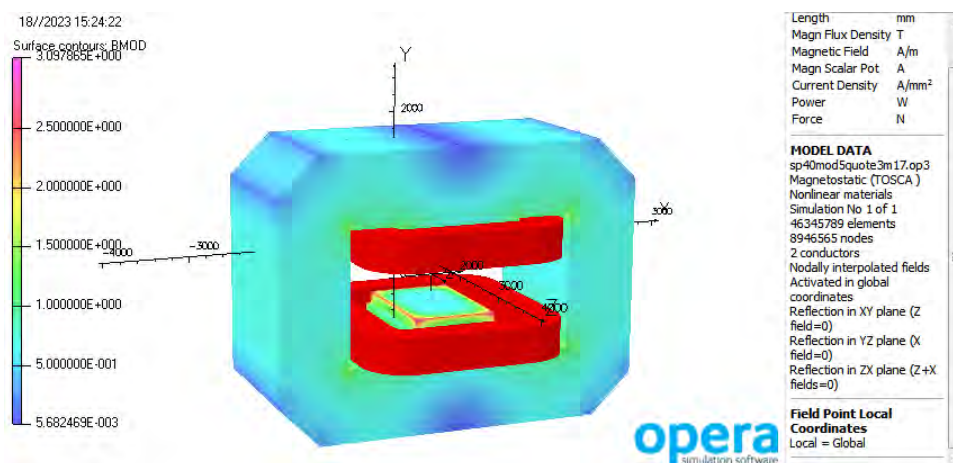
Трехвитковый сверхпроводящий квадрупольный магнит коллайдера NICA

В рамках получения необходимых параметров магнитного поля в рабочей области проводилось трехмерное моделирование сверхпроводящего дипольного магнита Нуклотрона (ОИЯИ).



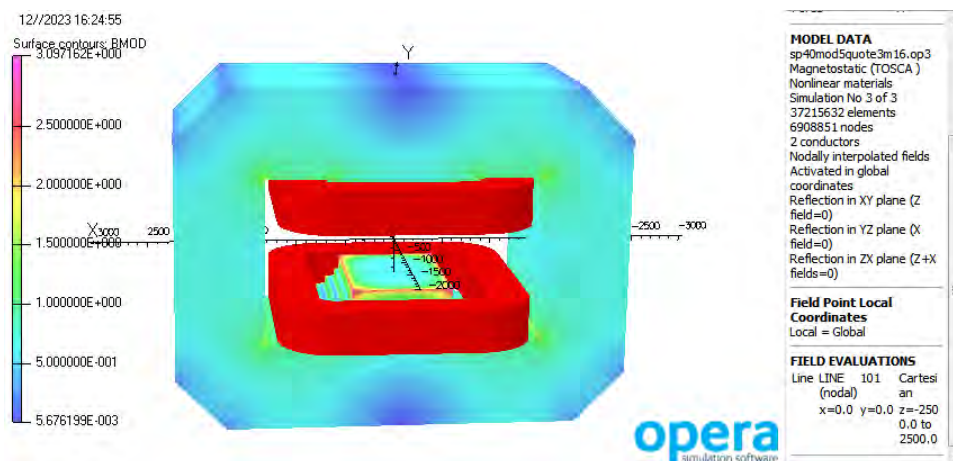
Модель сверхпроводящего дипольного магнита ускорителя NUCLOTRON (ОИЯИ)

Проводилось трехмерное моделирование магнита SP41 эксперимента BM@N (ОИЯИ). Подготовлена карта магнитного поля в рабочей области магнита.



3D модель магнита SP41 эксперимента BM@N (ОИЯИ) в программе Opera

Проводилось трехмерное моделирование магнита SP40 эксперимента HIPER NIS (ОИЯИ). Подготовлена карта магнитного поля в рабочей области магнита.

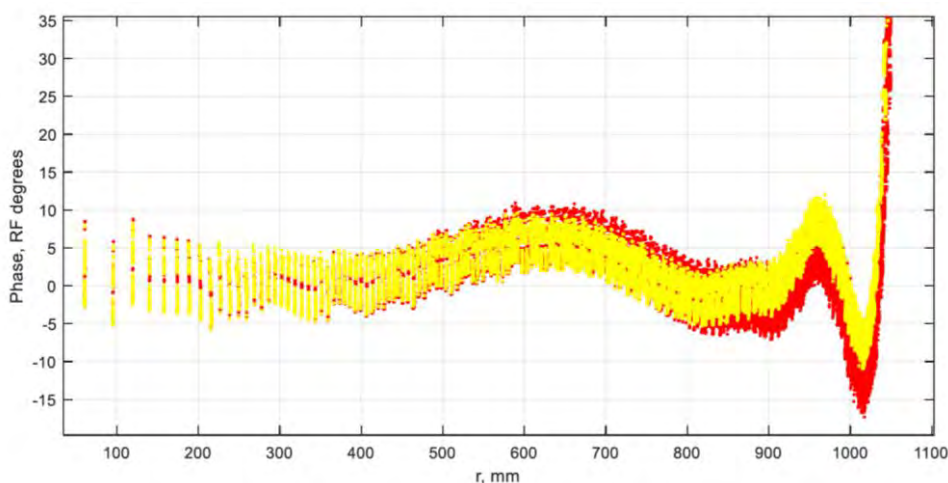


Модель дипольного магнита SP40 эксперимента HIPER NIS (ОИЯИ)

- Для достижения качества расчета, аналогичного конечно-элементному анализу трехмерных задач магнитостатики в терминах магнитного векторного потенциала, но с меньшими вычислительными затратами, предложено использовать для моделирования той же задачи комбинацию магнитного векторного и суммарного скалярного потенциалов. Показано, что смешанная формулировка может обеспечить существенное снижение вычислительных затрат по сравнению с ее векторным аналогом при одинаковой точности обоих методов [5].

- Совершенствование средств проектирования циклотронов медицинского назначения.** Будущий изохронный циклотрон MSC 230, предназначенный для протонной терапии и исследований в области естественных наук, проектируется большой командой ЛЯП. Использование метода проектирования виртуального прототипирования (VP) для достижения этой цели потребовало создания соответствующих вычислительных средств. Была создана платформа на базе программы Matlab, которая инкапсулирует распределенные компоненты VP (такие как программы анализа и трассировки) и предоставляет механизм для их взаимодействия. Помимо CAD (Solidworks) и различных модулей CST Studio, использовались недавно созданные и активно оптимизированные программы CORD (Closed ORbit Dynamics) и динамики пучка. По результатам моделирования

был подготовлен доклад на конференции RUPAC'23. Представлены результаты трассировки пучка протонов от источника ионов до выхода из циклотрона MSC230 [6].



Фазовое движение пучка в процессе ускорения с учетом (желтый цвет) и без учета (красный цвет) магнитного поля ускоряющей системы [6]

1.2. Избранное численное моделирование физических систем и процессов

1.2.1. Теоретико-численные исследования плотной адронной материи, связанные с экспериментами на NICA

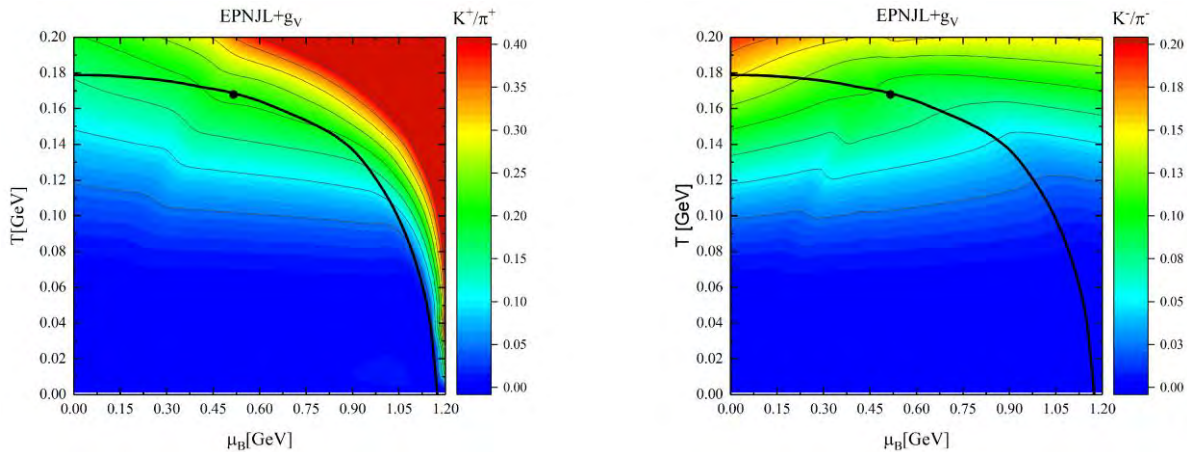
Проведен теоретический и численный анализ имеющихся экспериментальных данных по столкновениям тяжелых ионов в диапазоне энергий коллайдера NICA с акцентом на особенности ядерных взаимодействий в наблюдаемых характеристиках.

- **Сокращение (отмена) сигма-режима в термическом пионном газе** [7]. С помощью подхода Бета-Уленбека к релятивистскому вириальному расширению с фазовыми сдвигами Брейта-Вигнера для π - и σ -мезонных резонансов, проведен анализ и расчет давления взаимодействующего пионного газа.

- **Двухфотонный распад нейтрального пиона при конечной температуре** [8]. Расчет ширины распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ при высоких температурах в рамках модели Намбу – Йона – Лазинио требует вычисления интеграла с сингулярностью вида $1/(x-c)$. Необходимо найти наиболее подходящий метод, который сможет эффективно обойти сингулярность и позволить получить ответ с минимальной ошибкой и высокой скоростью вычислений. В данной работе неадаптивные и адаптивные методы, основанные на квадратурных формулах Гаусса–Кронрода и методе интегрирования Монте-Карло, позволили получить температурное поведение ширины двухфотонного распада пиона.

- **Новые результаты в модели на основе EPNJL** [9]. Обсуждается применимость эффективных моделей к описанию барионов и поведения соотношений странных барионов к пионам. В рамках расширенной модели Намбу – Йона – Лазинио с петлей Полякова (EPNJL) уравнение Бете – Салпетера используется для нахождения масс барионов, которые рассматриваются как дикуарк-кварковое состояние. Обсуждается плавление барионов при конечном химическом потенциале. Указана зависимость температуры деконфайнмента адронов от аромата. Показано, что описание дикуарк-кваркового состояния при конечном химическом потенциале ограничено из-за возникновения бозе-конденсата. Этот эффект

сильно проявляется при описании легких дикварков и барионов. Отношения Λ^0/π^+ и Ξ^-/π^+ демонстрируют резкое поведение как функции переменной T/μ_B , где T и μ_B рассчитаны вдоль линий плавления.



Линии уровня отношений K^+/π^+ и K^-/π^- получены с помощью подхода Бета-Уленбека для модели EPNJL с $g_V=0.6g_S$. Черные линии показывают линии фазового перехода (crossover). Видно, что при смещении вдоль линии фазового перехода от низких температур к высоким траектория демонстрирует быстрый подъем, а затем спад для K^+/π^+ и плавное увеличение для K^-/π^- (Рис. 4 [9])

• Адронные модификации в плотной барионной материи

Было проведено систематическое исследование гибридных уравнений состояния нейтронных звезд (EOS), состоящих из релятивистского функционала плотности для адронной фазы и ковариантной нелокальной модели Намбу – Йона – Лазинио (nINJL) для описания фазы цветной сверхпроводящей кварковой материи [10]. Изменение значений двух свободных параметров, безразмерного вектора (η_D) и сил связи дикварков (η_D) приводит к набору EOS с различной жесткостью и значением плотности деконфайнмента. Благоприятные параметры получены в результате систематического байесовского анализа, для которого в качестве ограничений используются ограничение мультимессенджера на радиус нейтронной звезды в 14 Msun и комбинированное ограничение массы-радиуса для PSR J0740 + 6620 из эксперимента NICER. Кроме того, переход от адронной материи к деконфайнментированной кварковой материи ограничен тем, что происходит выше плотности ядерного насыщения. Гибридные звезды, смоделированные с этими благоприятными параметрами, совместимы с результатами NICER для радиуса нейтронной звезды с самой высокой известной массой, PSR J0740 + 6620. Получен нижний предел максимальной массы гибридных звезд в зависимости от силы векторной связи.

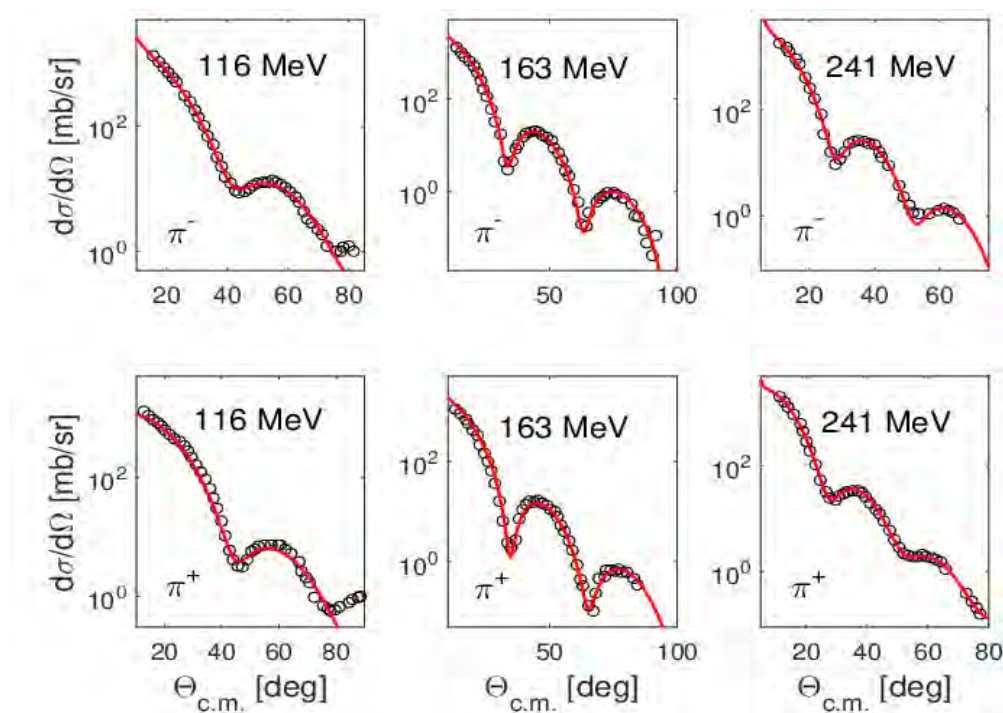
1.2.2. Численное моделирование ядерных систем и процессов

Вклад в мировые приоритеты ОИЯИ в области ядерной физики низких энергий осуществляется в рамках тройственного усилия, способного повысить ценность существующих дополнительных знаний: в ЛЯР – экспериментальные исследования, посвященные созданию и изучению новых сверхтяжелых элементов и экзотических ядер; в ЛТФ – формулирование теоретических моделей и гипотез, способных обеспечить понимание экспериментальных данных и предложить новые направления исследований; в ЛИТ – разработка и внедрение новых высокопроизводительных вычислительных пакетов, способных обеспечить детальные и эффективные математические решения моделируемых процессов. Описание результатов по математическому моделированию ядерных систем и процессов приведено в настоящем разделе. Разработка пакетов,

направленных на обеспечение точных и эффективных решений возникающих математических задач, рассматривается в главе 3.

► **Прорыв, сделанный благодаря эффективной компьютерной реализации** сформулированной модели микроскопического оптического потенциала в коллаборации ЛТФ и ЛИТ, позволил провести детальные численные исследования (на суперкомпьютере «Говорун»), отложенные в течение десятилетий, ранее измеренных процессов нуклон-нуклонного и пион-нуклонного рассеяния.

• **Численный анализ [11] дифференциальных сечений упругого рассеяния** пион-ядерного потенциала. Результаты полученные в 2022 г. для рассеяния $\pi^\pm + {}^{40}\text{Ca}$ при энергиях 116, 163, и 241 МэВ (см. картинку ниже) подтверждают оценки, сделанные на основе предыдущих расчетов влияния ядерной среды на пион-нуклонную амплитуду. Развитый подход обеспечивает адекватное описание экспериментальных данных по пион-ядерному рассеянию в области энергий пионного (3,3)-резонанса.



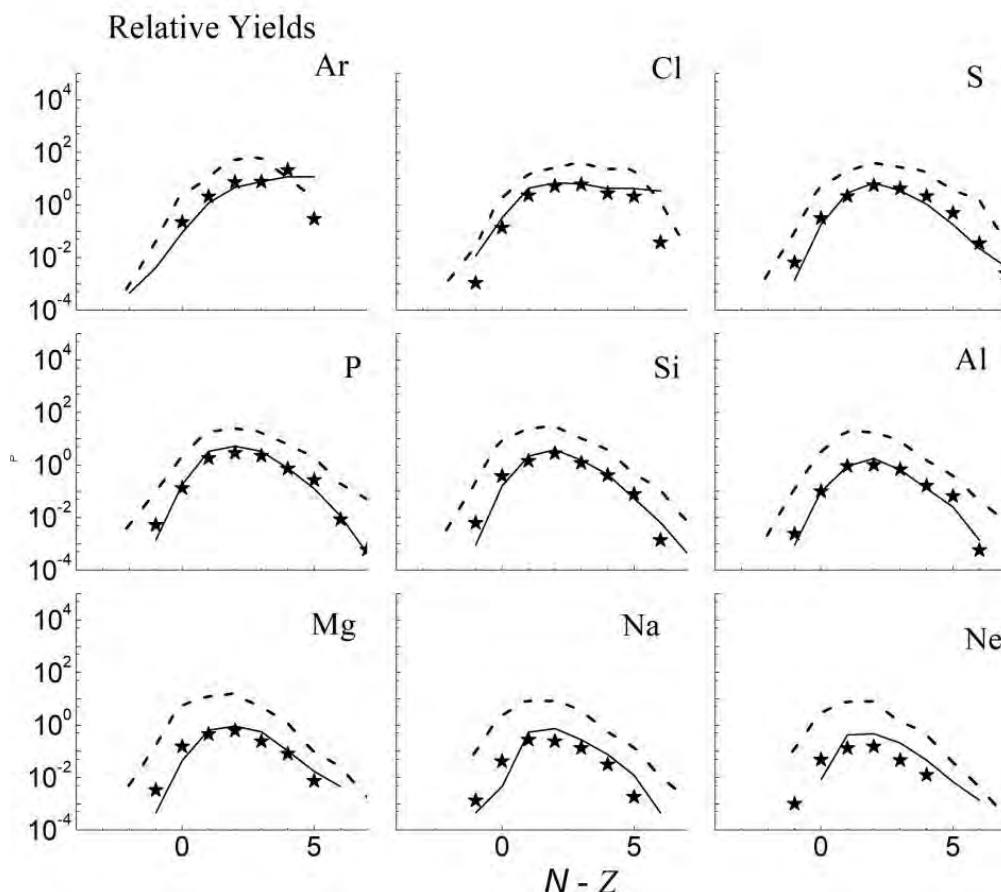
Сравнение [11] сечений упругого рассеяния $\pi^\pm + {}^{40}\text{Ca}$ при энергиях 116, 163 и 241 МэВ, рассчитанного с использованием микроскопической модели оптического потенциала (красные кривые), с экспериментальными данными (кружочки) из [Q. Ingram, et al., Phys. Lett. B **76** (1978) 173]

• **Обзор [12] проведенных исследований по анализу данных пион-ядерного рассеяния** для ряда ядер-мишеней на основе микроскопической модели пион-ядерного потенциала. Показано, что разработанный подход обеспечивает адекватное описание экспериментальных данных по пион-ядерному рассеянию в области энергий пион-нуклонного (3,3)-резонанса и позволяет исследовать влияние ядерной среды на пион-нуклонное рассеяние.

• **Численный анализ [13] дифференциального сечения упругого рассеяния** экзотического ядра ${}^{17}\text{F}$ на ядрах ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{58}\text{Ni}$ и ${}^{208}\text{Pb}$ при 170 МэВ и на ${}^{208}\text{Pb}$ при различных энергиях дает хорошее согласие теоретических результатов с имеющимися экспериментальными данными. Установлен периферический характер рассеяния ${}^{17}\text{F}$.

► **Реакции фрагментации снаряда тяжелыми ионами при энергиях Ферми, реализуемые на установке КОМБАС в ЛЯР**, дают огромные количества изотопов, далекие от долины стабильности. Понимание механизмов образования образующихся в результате нейтронно-богатых или протонно-богатых изотопов представляет собой сложную задачу,

решение которой постепенно формулировалось, в том числе: правильное определение состояний входных ядер, вступающих в столкновение; характеристика динамической эволюции функции плотности сталкивающихся ядер до точки замораживания; расчет энергий возбуждения снарядообразных осколков; понимание процессов девозбуждения фрагментов, связанных с испусканием частиц и излучением. Результаты, полученные в рамках такого статистического подхода к численному моделированию различных этапов решения, опубликованы в [14–18]. Пример полученных результатов, характеризующих выходы изотопов кислорода в литий в реакции ^{18}O (35 МэВ/нуклон) на ^{181}Ta , приведен на рисунке ниже.

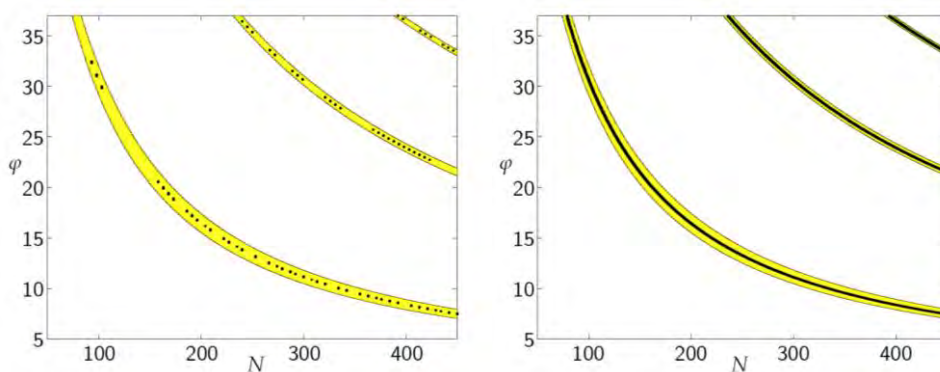


Относительный выход изотопа [16] при столкновениях ^{40}Ar (36.5 АМэВ) + ^9Be (звездочки) в сравнении с расчетами BNV-SMM (сплошные кривые) и предыдущими экспериментальными данными (штриховые кривые). Названия изотопов указаны в правом верхнем углу поддонов

1.2.3. Численное моделирование систем конденсированного состояния

► Численное исследование баллистического транспорта электронов на графене [19].

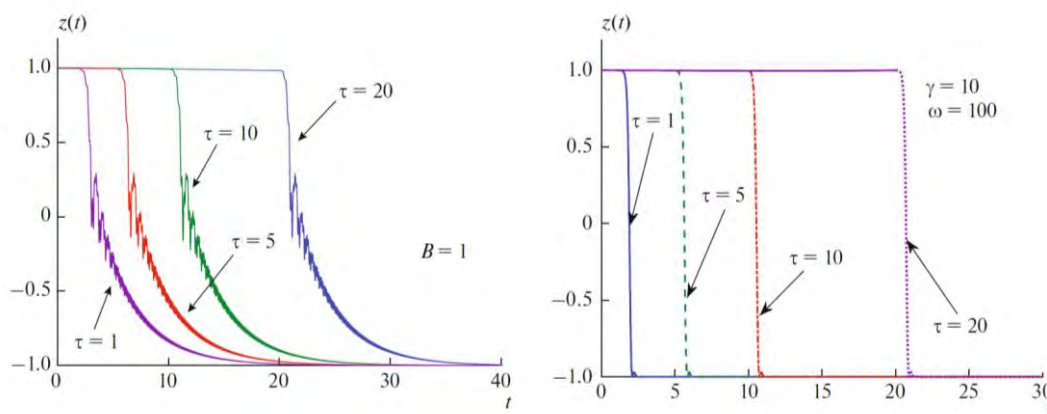
Проанализирован баллистический транспорт электронов на волнистой графеновой системе со спин-орбитальным взаимодействием, индуцированным кривизной. Волнистая система соединена с обеих сторон с двумя плоскими листами графена. Волнистая структура моделируется изогнутыми вверх и вниз поверхностями. Рассмотрено кооперативное влияние N соединенных вместе блоков (сверхрешетки) на прохождение электронов, падающих на сверхрешетку под произвольными углами. Найден набор оптимальных углов и соответствующее количество N единиц, которые приводят к явлению робастного спин-инвертора.



Вероятности инверсии спина $P_N \geq 0.99$ (желтая область) как функция числа модулей $N = 50, \dots, 450$ на сврхрешетке углов $\varphi = 5^\circ, 5.01^\circ, \dots, 37^\circ$, для $R = 12 \text{ \AA}$, при энергиях падающего луча $E = 0.1 \text{ эВ}$ (слева) и $E = 1.0 \text{ эВ}$ (справа) [19]

► Решение динамических явлений в магнитных материалах.

- **Численное моделирование магнитных наноматериалов** [20]. Численное моделирование моделей, описывающих свойства магнитных наноматериалов, которые могут быть использованы для создания устройств обработки и хранения информации, должно учитывать два противоречивых свойства наноматериалов: с одной стороны, способность сохранять намагниченность в замороженном состоянии (сохраняется информация) в течение длительного времени, а с другой стороны, обладать способностью резко менять намагниченность, что необходимо для быстрого стирания памяти и перезаписи новой информации. Предложены и исследованы методы решения этой дилеммы, основанные на создании триггерного резонанса, настройке динамического резонанса и квадратичном эффекте Зеемана.



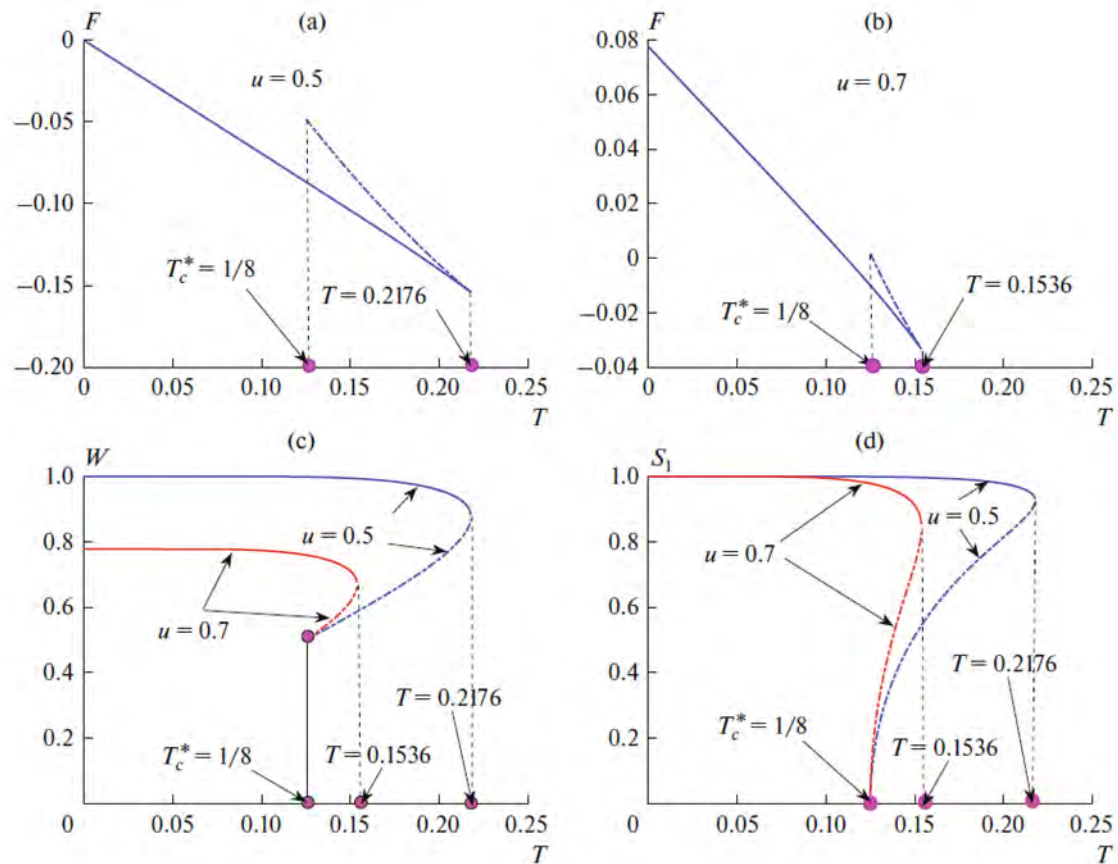
Продольная спиновая поляризация z как функция безразмерного времени t для различных значений параметров материала (маленькие значения – слева; большие значения – справа).

Настройка динамического резонанса начинается при разных временах задержки [20]

► **Моделирование статистических систем, состоящее из нескольких этапов** [21, 22].

- Разработана **микроскопическая статистическая модель сверхтекучего квантового твердого тела** [21], где внутри кристаллической решетки могут существовать области беспорядка, такие как дислокационные сетки или границы зерен. Предполагается, что ядра этих областей беспорядка обладают жидкоподобными свойствами. Если твердое тело состоит из бозе-атомов, то жидкоподобные скопления внутри областей беспорядка могут проявлять бозе-эйнштейновскую конденсацию и, следовательно, сверхтекучесть. Эта микроскопическая статистическая модель дает возможность ответить, какие реальные квантовые кристаллы могут проявлять свойство сверхтекучести, а какие нет.

- **Обзор [22]** рассматривает статистические системы, состоящие из нескольких фаз, перемешанных в пространстве мезоскопического масштаба, и системы, представляющие собой смесь нескольких компонентов микроскопических объектов. Гетерогенные материалы, состоящие из мезоскопических смесей, широко распространены в природе. Представлена общая теория таких мезоскопических смесей, проиллюстрированная несколькими моделями конденсированного состояния. Смесь нескольких компонентов микроскопических объектов иллюстрируется кластеризацией кварк-адронной материи.



Две ветви решений для термодинамического потенциала F как функция безразмерной температуры T для параметров: (a) $u = 0.5$ и (b) $u = 0.7$. Вероятность термодинамической фазы W (c) и параметр порядка S_1 как функция температуры (d). Стабильная ветвь показана сплошной линией, нестабильная — штрихпунктирной линией [21].

► **Численное исследование процессов самоорганизации в сверхпроводниках [23].**

Проведено численное исследование процессов самоорганизации с образованием спонтанных структур в сверхпроводниках в промежуточной смешанной фазе и поиск сигналов сосуществования сверхпроводимости первого и второго типов.

- На основе метода классической молекулярной динамики (МД) проведено численное исследование и поиск сигналов фазовых переходов в квазидвумерных системах заряженных частиц, заблокированных центрально-симметричным потенциалом [24].

► **Динамическая модель полярона. Обзор [25],** подводит итоги численных исследований процесса гидратации электронов на основе динамической поляронной модели.

Проведена оптимизация вычислительной схемы и программного кода для учета влияния кулоновского потенциала. Это привело к хорошему согласию расчетных и экспериментальных данных, которые ранее не удавалось воспроизвести.

► **Решение нелинейных задач математической физики: интегрируемость и**

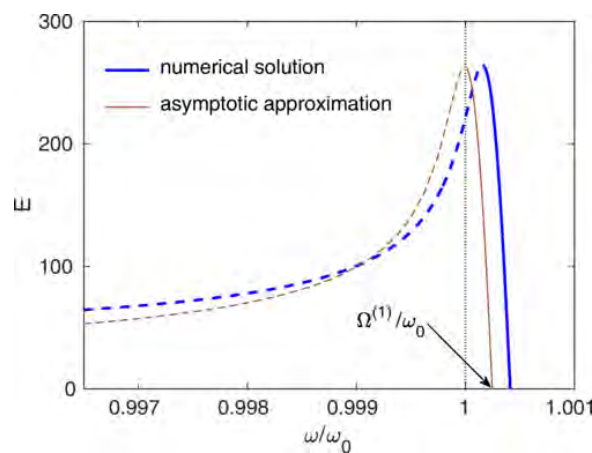
удержание траекторий в симметричных волноводных решетках [26]. Обнаружены

полностью интегрируемые двух-, трех- и четырехмерные ожерелья РТ-симметричных волноводов. Помимо того, что ожерелья являются полностью интегрируемыми гамильтоновыми системами, они характеризуются полным отсутствием сингулярных мод.

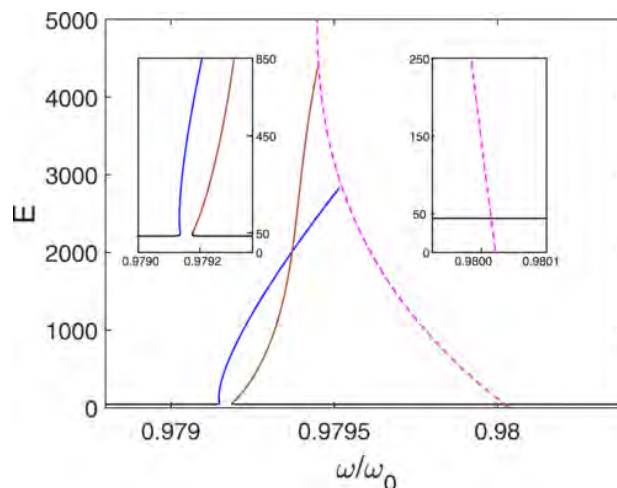
► **Исследования осциллона Клейна-Гордона [27, 28].**

- Понимание пространственно-временной структуры и бифуркации трехмерных релятивистских осциллонов получено путем изучения периодических по времени решений в шаре конечного радиуса. Стоячие волны, связанные с резонансами, рождаются в бифуркациях периода умножения волн Бесселя с более высокими частотами. Диаграмма энергия-частота для достаточно большого шара демонстрирует значительные интервалы устойчивости к сферически-симметричным возмущениям [27].

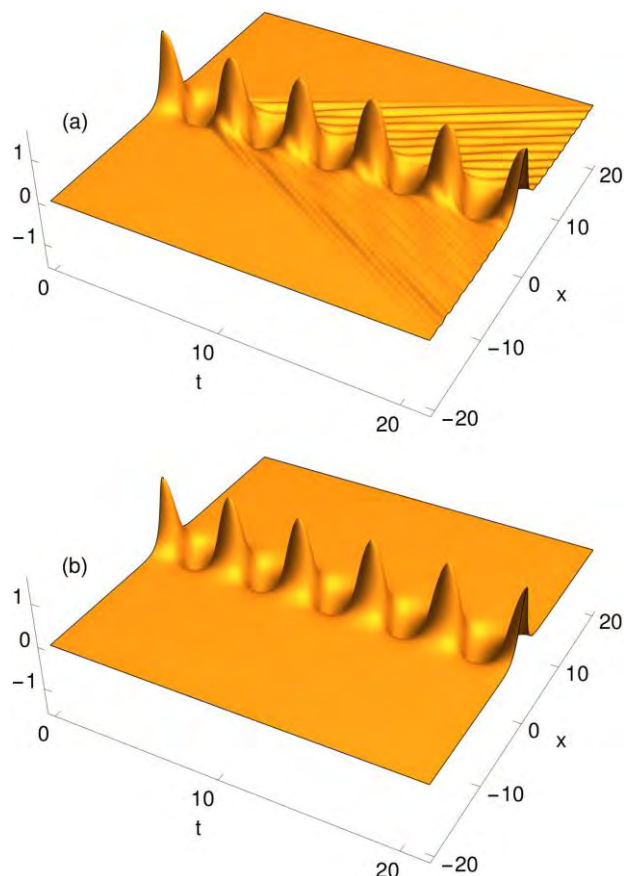
- Предложено многомасштабное вариационное описание осциллонов, свободное от особенностей раздутия стандартного подхода. Помимо определения параметров осциллона, наш подход обнаруживает возникновение его неустойчивости [28].



Зависимость $E(\omega)$ вблизи точки зарождения стоячей волны в шаре с $R=100$. Синяя (толстая) кривая: результат численного продолжения. Коричневая (тонкая) кривая: асимптотическая аппроксимация, использующая $R-1$ как малый параметр. Устойчивые решения отмечены сплошными, неустойчивые – пунктирными линиями. (Рис. 3 [27])



Фрагмент диаграммы $E(\omega)$ в окрестности резонанса 1:2 в шаре с $R=150$. Синяя и коричневая кривые — это два склона «шипа». Пунктирная пурпурная дуга, выходящая из $E=0$ при $\omega=\Omega(114)/2$, представляет собой 1/2 подтона $n=114$ -й волны Бесселя. (То есть точка (ω, E) на этой ветви представляет собой волну Бесселя с частотой 2ω .) Вставки, увеличивающие масштаб нижних участков пика и ветви Бесселя, призваны подчеркнуть разницу в происхождении двух ветвей. (Рис. 7 [27])



Сравнение численных решений осциллятора Косевича-Ковалева (а) с моделью вариационного приближения (б) при том же ω . Видно, что, за исключением отсутствия волн излучения, вариационная картина хорошо соответствует истинному осциллятору (Рис. 3 [28])

1.2.4. Численное моделирование кинетических высокоэнергетических процессов в материалах

Получены результаты моделирования в рамках модели теплового пика процессов абляции в материалах, подвергающихся лазерному излучению.

► Численное моделирование тепловых процессов, происходящих в материалах под действием ультракоротких лазерных импульсов [29, 30].

Численное моделирование процессов абляции в материалах под действием фемтосекундного лазерного излучения получило дальнейшее развитие в рамках модели теплового пика (TSM), описываемой гиперболическими уравнениями теплопроводности (H-TSM). Детальные численные эксперименты, проведенные для полубесконечных материалов [29], явно определили вклады диффузионного и конвективного членов во времена релаксации как электронного газа, так и кристаллической решетки.

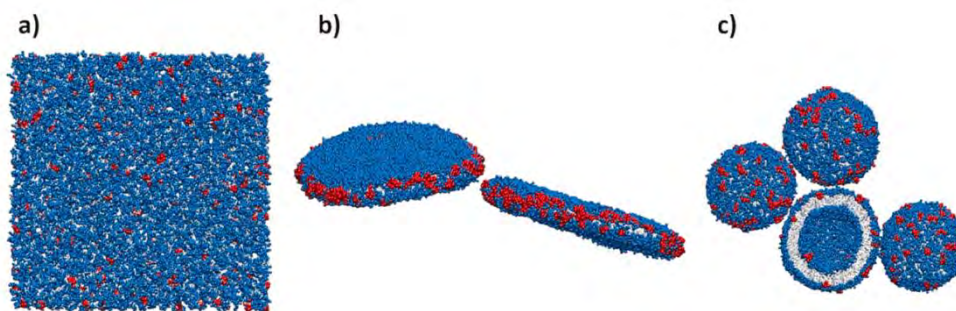
Во втором исследовании [30] модель H-TSM была сформулирована для образцов конечной толщины. В этом случае толщина образца явно входит как в диффузионные, так и в конвективные члены уравнений теплопроводности, а также в исходный член уравнений модели H-TSM и граничные условия задачи. Эффективная скорость конвективного члена определяется через скорость перемещения верхней и нижней границ образца. Детальные численные эксперименты показали характерные зависимости процессов испарения от толщины образца.

1.2.5. Численное моделирование в радиационной биологии

► **Выяснение роли бета-амилоидного пептида (A β) как ключевого фактора болезни Альцгеймера [31, 32].**

- Изменения толщины мембраны и общей структуры мембраны с включением A β _{25–35} или без него были исследованы в широком диапазоне температур. Результаты подтверждают ранее сообщенную независимость морфологических преобразований между бицеллоподобными структурами, присутствующими в гелевой фазе, и небольшими однослойными везикулами, присутствующими в жидкой фазе, от существования заряда в системе [31].

- Дальнейшие исследования [32] прояснили взаимодействие бета-амилоидного пептида 25–35 с фосфолипидными мембранами ДПФХ с точки зрения крупнозернистого подхода, позволяющего рассматривать крупные везикулярные и бицеллоподобные системы, а также влияние пептида на морфологию структур, в том числе на образование везикул и бицелл. Оценены локализация и вторичная структура бета-амилоидного пептида в бицеллоподобной и везикулярной системах. В случае везикулярных систем проведено моделирование изогнутых мембран. Проведено исследование динамических свойств липидных мембран, регулируемых добавлением мелатонина, холестерина и бета-амилоидного пептида, с точки зрения влияния этих добавок на возникновение щели в фононном спектре.

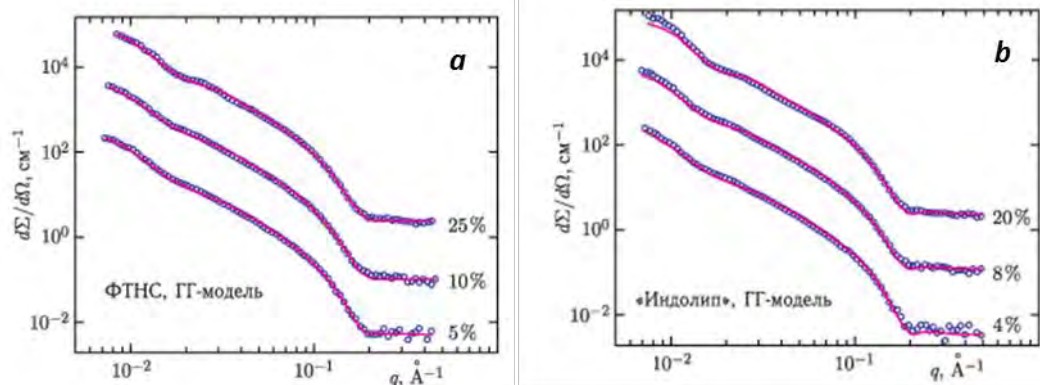


Снимки CG MD: а) исходной случайно распределенной смеси липидов DPPC, пептидов A β (25–35) и молекул воды (не показаны), б) самособирающихся структур BLS ниже T_m после моделирования 10 мкс, в) самоорганизующихся структур собранные структуры внедорожников выше T_m после моделирования в течение 10 мкс, где один из пузырьков изображен с разрезанной по его центральной плоскости дальней частью. Липидные цепи представлены серым цветом, головные группы липидов — синим, а молекулы A β (25–35) — красным. Молекулы воды не показаны для лучшей визуализации [32]

► **Численный анализ в рамках метода разделенного формфактора структуры фосфолипидных мембран везикулярных систем по данным малоуглового нейтронного и рентгеновского рассеяния** является одной из актуальных тем современной нано- и биофизики в связи с многочисленными приложениями этих объектов в медицине, фармакологии и косметологии.

- В рамках метода разделенного формфактора проведен анализ спектров малоуглового рассеяния нейтронов (SANS), измеренных на малоугловом спектрометре ЮМО на полидисперсных популяциях однослойных везикул фосфолипидной транспортной наносистемы (ФТНС) и нанопрепарат Indolip в тяжелой воде в трех концентрациях. Обсуждаются возможности получения информации о структуре нанопрепаратов на основе ФТНС по данным SANS. Основные структурные параметры этих везикулярных систем, полученные при компьютерном анализе спектров SANS, в целом согласуются с соответствующими результатами обработки данных малоуглового рентгеновского

рассеяния (SAXS). В то же время, метод SANS оказывается менее чувствительным по сравнению с SAXS, в части детального учета особенностей строения бислоя оболочки везикул. Работа выполнена совместно с ЛНФ [33].

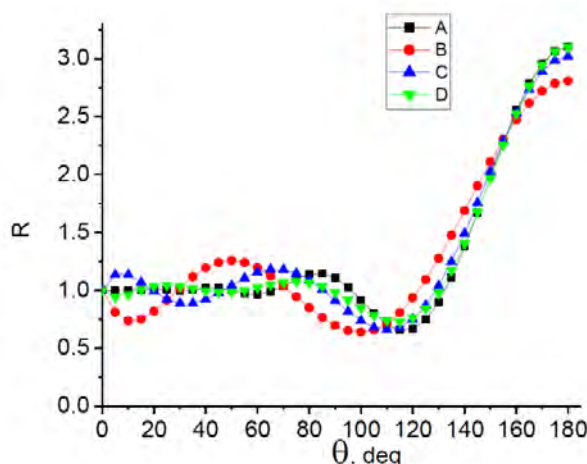


Расчетные и экспериментальные спектры SANS на образцах везикул ФТНС (а) и индолипа (б) в 4, 8, 20% растворах мальтозы. Расчет выполнен с использованием модели гидрофильно-гидрофобного бислоя [33]

- На платформе HybriLIT реализован **программный комплекс, предназначенный для анализа строения везикулярных систем** по модели разделенных формфакторов (SFF-Analysis). Программа обеспечивает упрощенный запрос ресурсов при запуске задачи, веб-мониторинг процесса расчета и визуализацию результатов [33].

1.2.6. Численное моделирование других систем

► **Сравнительное исследование методов расчета потерь энергии** [34]. Некоторые точные и приближенные методы, используемые для расчета поправок к формуле остановки Бете и нормализованного сечения рассеяния Мотта, модифицированы и адаптированы для расчета страгглинга потерь энергии (ELS) релятивистскими тяжелыми ионами в кристаллической решетке. Проведено сравнение результатов, полученных в рамках различных подходов. Показано, что предложенные авторами модификации методов расчета ELS имеют более высокую точность по сравнению с традиционным методом Лицзянь – Цин – Чжэнмина (LQZ). Во всех рассмотренных случаях точность дважды модифицированного метода LQZ (LQZ_{m2}) и трижды модифицированного метода LQZ (LQZ_{m3}) в расчетах ELS выше, чем у обычного метода LQZ (см. рисунок).



Зависимость нормированного сечения Мотта (НМСМ) от угла θ (deg) для $Z = 112$ и $\beta = 0.15$ [A] при численном расчете разными методами: методом LQZ [B], методом LQZ_{m2} [C] и методом LQZ_{m3} [D] [34]

► **Исследование кинетики, механизма и реакционной способности интермедиатов широкого класса окислительно-восстановительных реакций.** Дана характеристика широкому классу окислительно-восстановительных реакций, для которых лимитирующей стадией является окислительно-восстановительный распад промежуточного комплекса. Разработанный подход применен для исследования кинетики, механизма и реакционной способности интермедиатов широкого класса окислительно-восстановительных реакций, включая реакцию окисления церием(IV) щавелевой кислоты (H_2O_x) в сернокислой среде как части колебательной БЖ-реакции, катализируемой ионами церия [35]. Кроме того, изучены термодинамические и кинетические характеристики комплексов церий(IV)–цитрат, образующихся на первой стадии окисления лимонной кислоты церием(IV) [36].

► **Свежие идеи для решения старых проблем** [37].

Определены механизмы оценки наблюдаемого значения космологической постоянной в суперсимметричных моделях при конечных температурах и связь между бозонными и фермионными статистическими суммами.

► **О периодических приближенных решениях задачи трех тел** [38]. Тривиальные хореографии — это специальные периодические решения плоской задачи трёх тел. Использован модифицированный метод Ньютона, основанный на непрерывном аналоге метода Ньютона и высокоточной арифметике для специализированного численного поиска новых тривиальных хореографий. В результате поиска мы рассчитали высокоточную базу данных из 462 таких орбит, включая 397 новых. Начальные условия и периоды всех найденных решений указаны с точностью до 180 правильных десятичных цифр. 108 хореографий линейно стабильны, в том числе 99 новых. Линейная устойчивость проверяется высокоточным вычислением собственных значений матриц монодромии.

► **Обзор численной аппроксимации функциональных интегралов** [39]. Обсуждаются последние результаты в области аппроксимации функциональных интегралов посредством вычислений. Представлен обзор работ, посвященных применению функциональных интегралов в квантовой механике и квантовой теории поля, ядерной физике и в других областях. Приведены полученные авторами методы приближенного расчета функциональных интегралов, порождаемых нерелятивистскими гамильтонианами. Один из методов основан на разложении по собственным функциям гамильтониана. В альтернативном подходе функциональные интегралы решаются с использованием квазиклассического приближения. Представлены методы приближенного вычисления функциональных интегралов, порождаемых релятивистскими гамильтонианами. Это методы, использующие аппроксимацию функциональным полиномом (аналог формул заданной степени точности) и методы, основанные на разложении по собственным функциям гамильтониана, порождающего функциональный интеграл.

► **Новый подход к интегрированию динамических систем** [40]. Теория интегрирования динамических систем Лагутинского была переформулирована для произвольных линейных систем гиперповерхностей. Рассмотрены некоторая динамическая система и некоторая линейная система алгебраических гиперповерхностей и построен пример, показывающий, что гиперповерхности исходной линейной системы и интегральные линии уровня могут не совпадать.

► **Свойства третьего уравнения Власова** [41]. Третье уравнение Власова описывает эволюцию во времени функции распределения в зависимости от координаты, скорости и ускорения. Такое расширение позволяет описывать системы с электромагнитным и

гравитационным излучением, а также строить численные методы с более высокой вычислительной точностью, поскольку содержит дополнительные интегралы движения.

► **Космологические исследования в различных моделях Вселенной** [42, 43, 44]. Роль спинорных полей, характеризующихся неминимальной связью, в эволюции Вселенной изучалась в различных моделях Вселенной

1.3. Новые способы снижения чрезвычайной сложности внутренних проблем

- **Новые символично-численные схемы с использованием метода конечных элементов (МКЭ)** [45]. В Maple и Mathematica реализован алгоритм построения многомерных эрмитовых интерполяционных полиномов (HIP) внутри d -мерного гиперкуба как произведения d частей одномерных HIP степени p' в каждой переменной, которые вычисляются аналитически с использованием предложенных рекуррентных отношений. Кусочно-полиномиальные функции, построенные на основе HIP, имеют непрерывные производные и используются в реализациях метода конечных элементов высокой точности. Эффективность предложенных схем конечных элементов, алгоритмов и программы GCMFEM, реализованных в Maple и Mathematica, демонстрируется путем решения эталонных краевых задач (BVP) для многомерных гармонических и ангармонических осцилляторов, используемых в Геометрической коллективной модели (GCM) атомных ядер. Метод граничных элементов (BVP) для GCM сводится к BVP для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решается программой КАНТБП 5 М, реализованной на языке Maple.

► **Многомасштабные квадратурные алгоритмы адаптированные к проблеме** [46, 47].

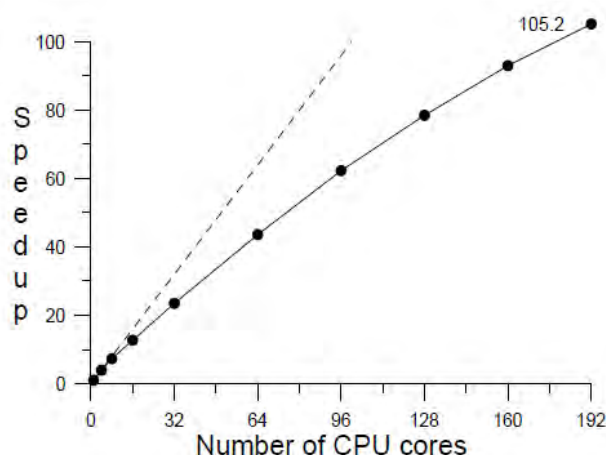
- **Байесовская автоматическая адаптивная квадратура** одномерных интегралов Римана с **двумя правилами** (B2AAQ) критически управляется *априорной* информацией, предоставленной пользователем. Определены условия, обеспечивающие прямой элементарный ввод параметров задачи, которые приводят либо к одному дереву, либо к лесу деревьев решений на подинтервалах [46]. Это обеспечивает повышение устойчивости, надежности и эффективности B2AAQ, а также значительное расширение его области применения по сравнению с пакетом QUADPACK, который является ядром разделов вычислительного интегрирования основных компьютерных библиотек по всему миру.

- Доложены новые алгоритмические разработки [47] для рекурсивных алгоритмов автоматической адаптивной квадратуры одномерных интегралов Римана на основе байесовского вывода (BAAQ) с целью обеспечения устойчивых и надежных автоматических решений на критических этапах пути решения. Во-первых, условие подынтегральной функции на концах корня дерева решений поддиапазона разрешается в рамках байесовского алгоритма предиктора-корректора, что приводит к решениям, характеризующимся уникальностью и надежностью. Во-вторых, новая стратегия разделения поддиапазонов обеспечивает максимально возможную точность результатов при ее потере путем вычитания. Оба типа сообщаемых достижений используют определенные процедуры проверки входных данных.

- **МБЭ-ПК** (Basic Element Method – «Predictor Corrector») пятого полиномиального порядка разработан для численного решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений [48]. Базовыми строительными блоками метода являются соответствующим образом определенные «базовые элементы», в которых используются четырехузловые преобразования, способность которых, как ранее было доказано,

подавлять ошибки и обеспечивать реализацию устойчивых алгоритмов для экспериментальной обработки данных. Продвижение решения на ориентировочную длину шага h происходит посредством определения предиктора, натянутого на два полинома МБЭ пятой степени. Проверка предварительного значения h контролируется ключевым параметром K ($0 < K < 1$). Эмпирически было показано, что новый МБЭ-ПК стабилен вплоть до чрезвычайно малых размеров шага h . Эта особенность делает его пригодным для решения сложных задач.

- **Вычисления с множественной точностью путем распараллеливания метода рядов Тейлора [49].** Гибридная стратегия MPI + OpenMP была реализована и протестирована на парадигматической модели системы Лоренца. На конфигурации со 192 ядрами ЦП вычисление 2800-го порядка, с 3510 десятичными цифрами, длилось ~148 часов, с коэффициентом ускорения около 105 (см. рисунок ниже).



2. Программные комплексы и математические методы для обработки и анализа экспериментальных данных

Проектирование, разработка, внедрение и сопровождение модулей объектно-ориентированных специализированных научных библиотек представляют наш вклад в решение исследований, проводимых ОИЯИ на экспериментальных установках.

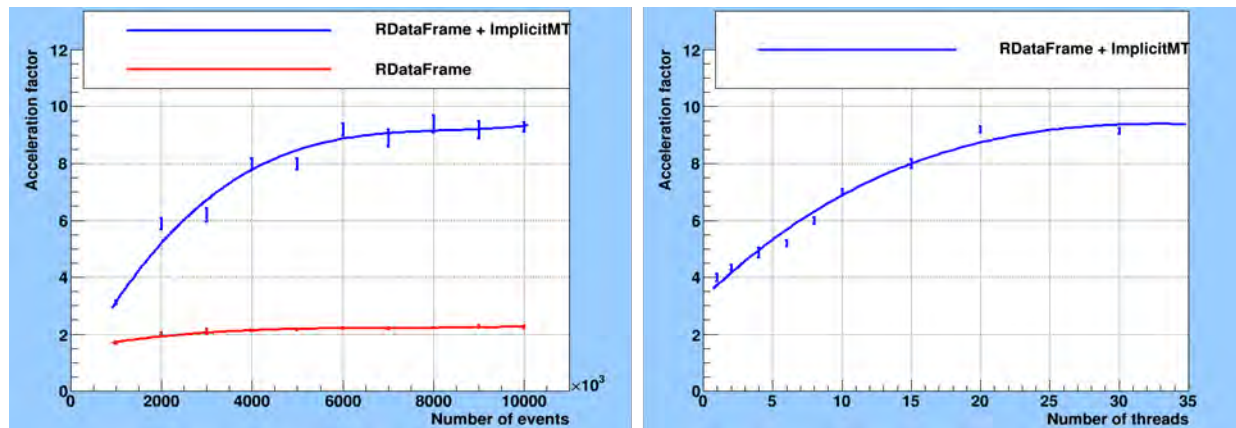
2.1. Инструменты Parallel ROOT (PROOT) для анализа экспериментальных данных

Параллельный пакет ROOT (PROOT) – это модернизированный пакет CERN ROOT объектно-ориентированных (ОО) программ и библиотек, адаптированный к многоядерным и многопроцессорным аппаратным средствам CPU и GPU, которые доминируют в ландшафте существующих высокопроизводительных вычислений (HPC).

Хотя PROOT стал основным инструментом для анализа, визуализации и хранения экспериментальных данных, собранных в экспериментах по физике высоких энергий (HEP) (например, FAIRROOT и CBMROOT в GSI, BMNROOT и MPDROOT в экспериментах NICA), в рамках текущей темы 1119 был сформулирован вопрос, можно ли пакет PROOT использовать и в других физических экспериментах. Исследования Т. Соловьевой и А. Соловьева дали утвердительный ответ: PROOT может быть эффективным инструментом анализа для таких разных экспериментов, как Байкал–ГВД или малоугловое рассеяние на спектрометре ЮМО на установке ИБР-2.

Два вида результатов, представленных на конференции «Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2023», Санкт-Петербург, 28–30 марта 2023 г., указывают на положительный ответ.

Доказана возможность значительного ускорения обработки данных как по количеству обрабатываемых событий, так и по количеству потоков, определяемых PROOT [50] (см. рисунок ниже) (см. также [89]).



PROOT performance improvement. Left: Dependence of the acceleration coefficient on the number of events; Right: Ibid., on the number of threads [50]

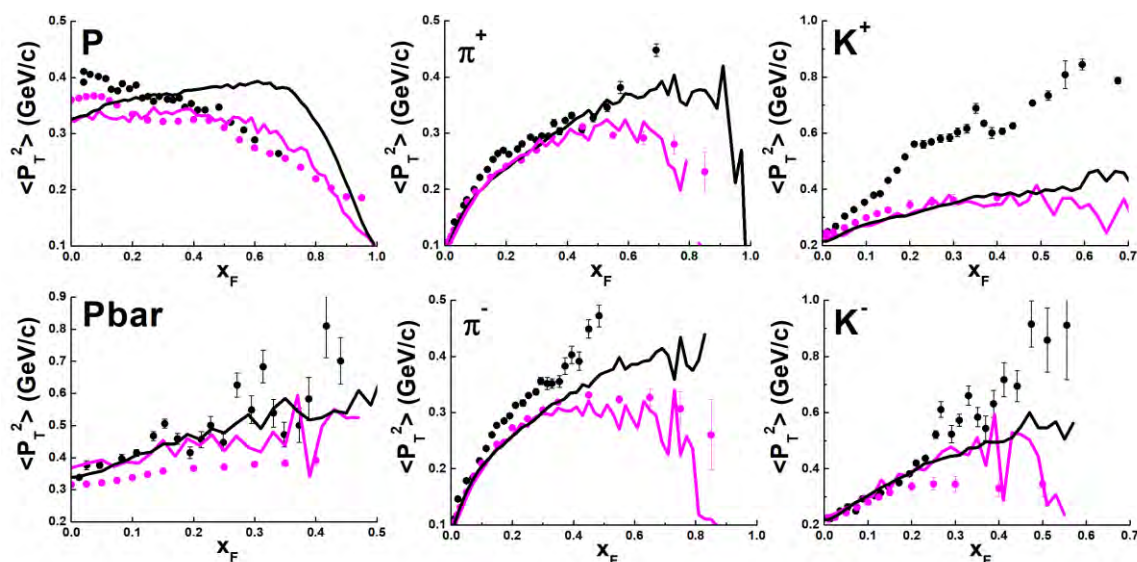
2.2. Пакет GEANT4 для единого моделирования крупномасштабных экспериментальных данных

2.2.1. Новые перспективы дальнейшего развития пакета GEANT4 [51]. Geant4, ведущий набор инструментов для моделирования детекторов, используемый в физике высоких энергий, использует набор физических моделей для моделирования взаимодействия частиц с веществом в широком диапазоне энергий. Эти модели, особенно адронные, во многом полагаются на непосредственно измеренные сечения и инклюзивные характеристики и используют физически мотивированные параметры. Однако они обычно направлены на охват широкого спектра возможных задач моделирования и не всегда могут быть оптимизированы для конкретного процесса или данного материала. Коллаборация Geant4 недавно сделала многие параметры моделей доступными через интерфейс конфигурации. Это открывает возможность подогнать смоделированные распределения к тонким целевым экспериментальным наборам данных и извлечь оптимальные значения параметров модели и связанных с ними неопределенностей. Такие усилия в настоящее время предпринимаются коллаборацией Geant4 с целью предложить альтернативные наборы параметров модели, также известные как «настройки», для определенных приложений. Эти усилия впоследствии должны привести к более точным оценкам систематических ошибок в физических измерениях, учитывая роль моделирования детектора в выполнении физических измерений. Результаты исследования представлены, чтобы проиллюстрировать, как можно оптимизировать параметры модели Geant4 с помощью методов подгонки, чтобы улучшить согласие между Geant4 и экспериментальными данными.

2.2.2. Использование пакета GEANT4 для обработки данных

► Общие перспективы будущего Geant4 [52, 53].

- Предложен **новый метод** [52] исследования двухчастичных корреляций поперечного импульса (ПТ) в мягких адронных взаимодействиях. Показано, что модели Монте-Карло: PYTHIA 6 и Geant4 FTF (FRITIOF) дают разные предсказания корреляций в протон-протонных взаимодействиях. Корреляции связаны с механизмом рождения частиц Швингера. Эти корреляции могут быть изучены в текущих и будущих экспериментах в области физики высоких энергий, в частности, на ионном коллайдере на базе нуклотрона (NICA).



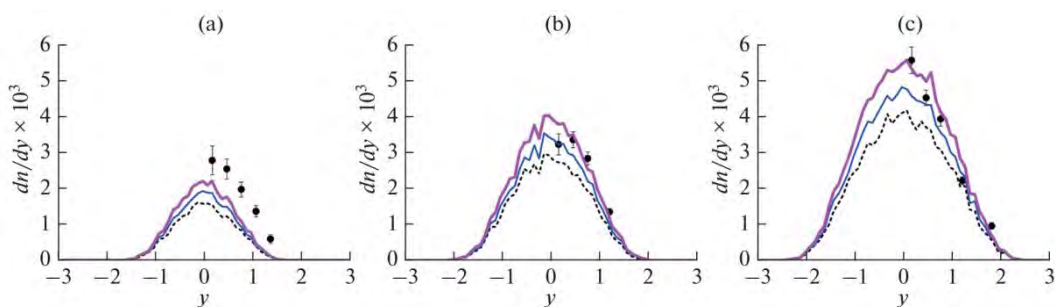
Среднее P_T^2 для $\pi^\pm$, $K^\pm$, протона и антипротона как функция x_F . Точки представляют экспериментальные данные без систематических ошибок при $P_{lab} = 158$ (пурпурные точки) и 400 ГэВ/с (черные точки). Пурпурные и черные кривые – расчеты модели Geant4 FTF при $P_{lab} = 158$ и 400 ГэВ/с, соответственно (Рис. 2 [52])

• О будущем использовании пакета Geant4 в экспериментах Future Circular Collider [53].

Ожидается, что очарованные частицы будут в больших количествах производиться на Круговом коллайдере будущего (FCC). Из-за относительно большого времени жизни частиц необходимо будет учитывать их взаимодействие с окружающими материалами и материалами детектора. Для удовлетворения этих требований рождение очарованных частиц в мягких взаимодействиях изучается с использованием моделей QGS и FTF пакета Geant4. Детали этих исследований рассмотрены в данной работе.

► Описания моделей последних данных коллаборации NA61/SHINE [54, 55].

- Рассмотрены последние данные коллаборации NA61/SHINE о рождении Ξ^- и анти- Ξ^+ гиперонов в pp -взаимодействиях при $P_{lab} = 40-158$ ГэВ/с и инклюзивных распределениях K^0 и ϕ -мезонов. Как было показано в более ранних экспериментальных работах, модели Монте-Карло EPOS 1.99, UrQMD 3.4 и Pythia 6 не могут адекватно описывать данные. В данной работе выходы частиц анализируются с использованием модели Geant4 FTF и получено хорошее описание экспериментальных данных.



Распределения быстроты, dn/dy , ϕ -мезонов для трех импульсов пучка (40, 80 и 158 ГэВ/с, (a), (b) и (c) соответственно). Точки представляют данные измеренные коллаборацией NA61/SHINE только со статистическими ошибками. Предсказания модели Geant4 FTF с $P_{\text{Vec}} = 0.5, 0.6$ и 0.7 (только для ϕ -мезонов) показаны пунктирной линией, тонкой и толстой сплошной линиями соответственно [54]

- Показано [55], что модель FTF (FRITIOF), используемая в инструментальном наборе Geant4 для моделирования адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий при высоких энергиях, хорошо описывает данные коллаборации NA61/SHINE по распределениям π^- -мезонов во взаимодействиях $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ с центральностью 0–5% при $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5,2, 6,1, 7,6$ и $8,8$ ГэВ. При более высоких энергиях $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 11,9$ и $16,8$ ГэВ модель занижает экспериментальные данные. Это рассматривается как указание на образование кварк-глюонной плазмы при более высоких энергиях в центральных столкновениях легких и промежуточных ядер, чем в столкновениях тяжелых ядер ($\sqrt{s_{\text{NN}}} \sim 6$ ГэВ). На данный момент моделирование жесткого партон-партонного рассеяния и образования кварк-глюонной плазмы не включено в модель Geant4 FTF.

► Анализ данных и моделирование эксперимента ТАЙГА [56–61].

Фон от космических протонов был смоделирован для упрощенной модели детектора OLVE-HERO с помощью Geant4. Оценены энергетические пороги для различных космических частиц.

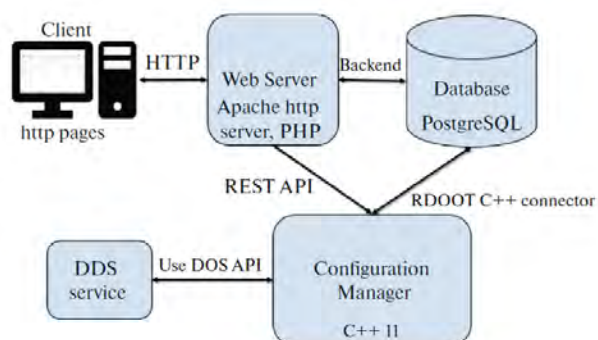
Модель машинного обучения на основе многослойного перцептрона была обучена и протестирована для задачи разделения адронов и гамма-лучей в эксперименте TAIGA.

2.3. Программная поддержка крупномасштабных экспериментов

2.3.1. Программная поддержка всех экспериментов ОИЯИ-NICA

В то время, как внутренние группы ЛФВЭ выполняют основную часть разработки программного обеспечения, вовлечение сотрудников ЛИТ по теме 1119 в этот процесс позволило очень быстро и на очень высоком уровне решить ряд задач, которые подробно описаны ниже.

► Configuration Information System (CIS) [62, 63] следует из реализованной Configuration



Database, неотъемлемой части комплекса информационных систем, разработанных для экспериментов проекта NICA. Он предоставляет информацию о конфигурации для сбора данных и других систем онлайн-обработки, активируя те настройки оборудования, которые необходимы в текущем сеансе эксперимента. Кроме того, система запускает

описанные программные задачи в необходимой последовательности и позволяет управлять ими во время сеансов, включая передачу сообщений между задачами и обновление некоторых свойств. Показанная здесь архитектура информационной системы конфигурирования была реализована с использованием модели клиент-сервер, где сервер обеспечивает взаимодействие с базой данных конфигурации, а клиент разработан как веб-приложение для просмотра и редактирования параметров конфигурации пользователями.

2.3.2. Программная поддержка ОИЯИ-NICA: эксперимент BM@N

► Отрывки проделанной работы и результаты опубликованные в 2023 году:

- Для каждого детектора установки BM@N (GEM, DCH, STS, CSC, Silicon Detector) были выполнены **специальные расчеты методом Монте-Карло** с интенсивными вычислениями и **реалистичное моделирование** [64]. В то же время экспериментальная установка «Барионная материя на Нуклотроне» (BM@N) завершает настройку для исследования взаимодействия пучков релятивистских тяжелых ионов с неподвижными мишенями. Одной из важнейших экспериментальных задач физической программы BM@N является определение уравнения состояния барионной материи высокой плотности. Эта задача может быть решена путем измерения (мульти)странных функций возбуждения гиперонов, т.е. выходов гиперонов при разных энергиях, и коллективных потоков адронов. В данной статье представлены результаты моделирования Монте-Карло работы детектора BM@N для изучения образования странностей во взаимодействиях тяжелых ионов.

- **Моделирование трекового детектора на основе трехкаскадных камер GEM** [65]. Рассмотрены этапы и аспекты моделирования формирования сигнальных откликов детектора на основе трехкаскадного газового электронного умножителя (GEM), используемого в трековой системе эксперимента BM@N для планирования первого физического сеанса в 2022 году. Описана процедура проведения расчета карты электростатического поля в газовой среде камеры GEM, а также текущие параметры, необходимые для детального моделирования с помощью соответствующих программных средств.

- **Процедура реконструкции для координатных детекторов настройки SRC** на BM@N была разработана как для смоделированных, так и для экспериментальных данных, измеренных в 2018 году. Многопроволочные пропорциональные камеры и кремниевые детекторы были расположены перед анализирующим магнитом в SRC на установке BM@N. Разработанные алгоритмы были добавлены в официальное программное обеспечение. Результаты реконструкции сравнивались с моделированием. Оценены и проанализированы основные характеристики координатных детекторов перед анализирующим магнитом [66].

- Представлены **первые физические результаты эксперимента BM@N** на комплексе Нуклотрон/NICA по образованию π^+ - и K^+ -мезонов при взаимодействии пучка аргона с неподвижными мишенями из C, Al, Cu, Sn и Pb при энергии 3,2 ГэВ. Измерены распределения по поперечному импульсу, спектры быстрот и множественности π^+ - и K^+ -мезонов. Результаты сравниваются с предсказаниями теоретических моделей и с другими измерениями при более низких энергиях [67].

- **Состояние различных разработок программного обеспечения было представлено на специализированных встречах коллаборации BM@N** [68–70].

2.3.3. Программная поддержка ОИЯИ-NICA: эксперимент MPD

► **Современная основа анализа для эксперимента MPD в NICA [71].** Последние достижения были представлены на 25-м Международном Балдинском семинаре 18 – 23 сентября 2023 г. Они включают в себя: онлайн-визуализацию эксперимента MPD; автономное программное обеспечение; MPDRot Framework; обновление кодовой базы; механизм контроля качества; лабораторию данных MPD; диагностику и быстрое развитие.

2.3.4. Программная поддержка ОИЯИ-NICA: эксперимент SPD

► **Разработка специализированной вычислительной системы и промежуточного комплекса: SPD OnLine Filter.** Эта фундаментальная задача для успешной реализации эксперимента SPD находится в стадии активной разработки. Доклады были сделаны, в том числе, на 10-й Международной конференции ГРИД'2023. На научном семинаре ЛИТ 20.12.2023 Данила Олейник выступил с развернутым докладом по этой теме [72]. Определена общая архитектура программного комплекса, включающая три основные системы: систему управления процессами обработки данных, систему управления данными и систему управления нагрузкой. Каждая из систем реализована как набор проблемно-ориентированных микросервисов. Было проведено первичное прототипирование каждой из систем, определены интерфейсы как между микросервисами, так и между подсистемами. Определены основные требования к аппаратной инфраструктуре вычислительного комплекса.

► **Распределенная среда хранения и вычисления для эксперимента SPD.** Эта фундаментальная задача для успешной реализации эксперимента SPD находится в стадии активной разработки. Доклады были сделаны, в том числе, на 10-й Международной конференции ГРИД'2023. На научном семинаре ЛИТ 20.12.2023 Артем Петросян выступил с развернутым докладом по этой теме [73]. Строящаяся на коллайдере NICA установка SPD будет генерировать большие потоки данных, которые после первичной фильтрации необходимо будет хранить и обрабатывать. Учитывая ожидаемый объем этих данных, для организации хранения и обработки предполагается использовать как ресурсы ОИЯИ, так и внешние ресурсы, предоставленные участниками коллаборации. В отчете представлено состояние работ по организации распределенной среды хранения и обработки данных эксперимента SPD.

► **Решение сложных вопросов анализа данных в эксперименте SPD NICA.** Следующие четыре ссылки [74–77], подготовленные под руководством проф. Г.А. Ососкова затрагивают несколько тем, которые, как ожидается, будут иметь решающее значение для успеха эксперимента SPD.

- **Эффективное устранение проблем с фильтрацией ложных треков [74].** Представлены методы распараллеливания алгоритма для повышения эффективности восстановления событий в экспериментах с детектором спиновой физики (SPD) на ионном коллайдере на базе нуклотрона (NICA). Проблема устранения ложных треков в процессе обнаружения траекторий частиц остается важнейшей задачей в преодолении узких мест в производительности при обработке данных коллайдера, генерируемых в больших объемах и в быстром темпе. В этой статье мы предлагаем и показываем быстрые параллельные методы устранения ложных треков, основанные на введенном критерии порогового подхода на основе кластеризации с метрикой качества соответствия хи-квадрат. Предлагаемая стратегия обеспечивает хороший компромисс между эффективностью реконструкции путей и скоростью выполнения на современных современных многоядерных компьютерах. Чтобы облегчить это, устанавливается эталон качества реконструкции с использованием среднеквадратичной (rms) ошибки спиральной и полиномиальной

аппроксимации наборов данных, определенных нейронной сетью в качестве последующего кандидата на трек. Выбор правильного теста позволяет нам поддерживать показатели полноты и точности распознавания треков нейронной сети на уровне, удовлетворительном для физиков, даже несмотря на то, что эти показатели неизбежно будут снижаться по мере увеличения шума данных. Более того, за счет распараллеливания алгоритма удалось повысить скорость обработки всего программного конвейера в 6 раз, достигнув скорости 2000 событий в секунду даже при обработке чрезвычайно зашумленных входных данных.

- Представлено применение модели TrackNET к смоделированным данным трекера SPD и предварительным результатам исследования производительности [75].

2.3.5. Программная поддержка LHC: эксперимент CMS

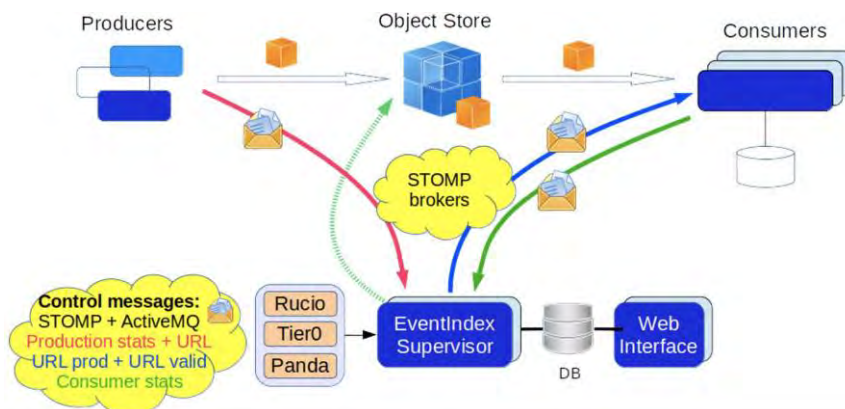
- ▶ Орывки проделанной работы и результаты опубликованы в 2023 году
- ▶ Новая физика, вытекающая из экспериментальных данных CMS [78–81].

Смысл результатов эксперимента CMS, проведенного на БАКе, в котором ученые ОИЯИ играют ключевую роль, далеко не исчерпывается прямым анализом исходных данных. Следующие четыре статьи исследуют новые перспективы новой физики.

2.3.6. Программная поддержка LHC: эксперимент ATLAS

Разработки ведутся в рамках трех проектов ATLAS, которые будут активны до 2024 года.

- Задачи, решенные в 2023 году в рамках эксперимента ATLAS, включали [82]:
 - В соответствии с новыми требованиями модифицирован алгоритм запуска сервера, отредактированы конфигурационные файлы, связанные с ресурсами, в соответствии с последними версиями конфигурационных компонентов, а также внесены изменения в использование механизма daq-токена по результатам тестирования на испытательном стенде.
 - Проект CREST (ATLAS Condition Database) – новые типы данных были преобразованы в CREST, были внесены изменения в алгоритм для работы с новыми версиями сервера CREST. Проект CREST — это новая реализация базы данных условий с поддержкой REST API и JSON для эксперимента ATLAS. Этот проект позволяет упростить структуру данных об условиях и оптимизировать доступ к данным. Для разработки CREST требуется не только клиентская библиотека C++ (CrestApi), но и различные инструменты для тестирования программного обеспечения и проверки данных. Клиент командной строки реализует быстрый доступ к сохраненным данным. Набор утилит использовался для создания сброса данных из CREST в файловую систему и тестирования клиентской библиотеки и сервера CREST на фиктивных данных. В настоящее время программное обеспечение CREST тестируется с использованием данных реальных условий, преобразованных с помощью конвертера COOL в CREST. Код Athena (программная среда обработки событий ATLAS) был модифицирован для работы с новым источником данных условий [83].
 - Проект ATLAS Event Index
 - Продолжено участие в проекте ATLAS EventIndex, проведены работы по улучшению сервиса Event Pickup, расширены типы принимаемых на обработку событий, уменьшено число ситуаций, требующих вмешательства экспертов.



Архитектура системы сбора данных EventIndex на базе Object Store [82]

2.3.7. Программная поддержка FAIR: эксперимент PANDA

- Сигнатуры Гиперонов в эксперименте PANDA на FAIR [84].

2.4. Вычислительная поддержка проектов ОИЯИ в области радиобиологии

Совместная группа ЛИТ-ЛРБ (руководитель О.И. Стрельцова) разработала и внедрила выделенную информационную систему (ИС) поверх экосистемы ML/DL/HPC, разработанной в рамках Темы 1119, на платформе HybriLIT (раздел 3.1).

► Создание информационно-вычислительной системы для проекта BIOHLIT включало:

Разработку прототипа веб-сервиса поведенческого теста «Водный лабиринт Морриса», предназначенного для формирования набора данных для задачи классификации траекторий лабораторных животных.

Разработку алгоритма отслеживания лабораторных животных в поведенческом тесте «Водный лабиринт Морриса» на основе методов компьютерного зрения.

Получение предварительных результатов по классификации траекторий на основе сверточной нейронной сети, которые показали необходимость как расширения обучающей выборки, так и представления траекторий с характерными метками.

Разработку прототипа веб-сервиса для поведенческого теста «Открытое поле», функционал которого позволяет решить задачу слежения за лабораторным животным, построить тепловую карту, подсчитать пройденные сектора и предоставить пользователю сводную аналитику.

2.5. Вычислительная поддержка проектов ОИЯИ по физике конденсированного состояния

Основная часть экспериментальных исследований по физике конденсированного состояния в ОИЯИ основана на зондировании образцов на специализированных детекторных системах медленными нейтронами реактора ИБР-2 (ЛНФ). ИТ-поддержка ученых ЛИТ распространяется на наиболее востребованный детектор ИБР-2: ЮМО.

Недавняя модернизация ЮМО, заключающаяся в добавлении системы позиционно-чувствительных датчиков, повлекла за собой резкое увеличение ИТ-поддержки

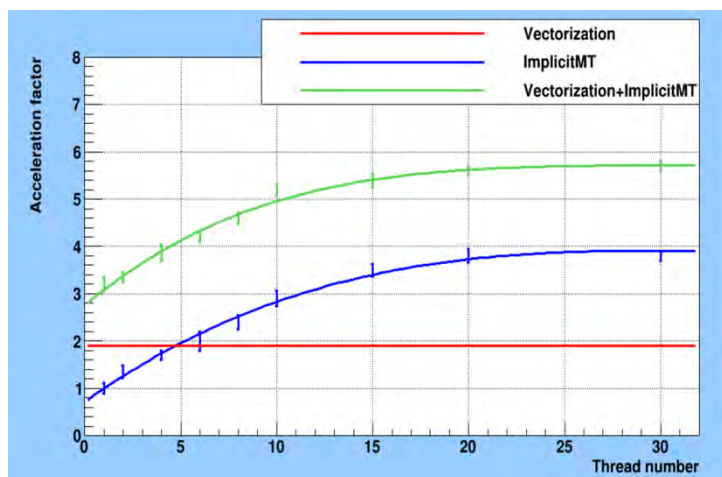
исследований А. Соловьевым и Т. Соловьевой, которые разработали и внедрили концептуально новые ИТ-решения.

► **Модернизация программного обеспечения для фитирования данных спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов ЮМО на ИБР-2** осуществляется путем разработки веб-приложения.

• **FITTER_WEB** [FITTER_WEB](http://www.info.jinr.ru/programs/jinrlib/fitter_web/indexe.html) (http://www.info.jinr.ru/programs/jinrlib/fitter_web/indexe.html) Программа для аппроксимации данных, полученных на малоугловом спектрометре рассеяния нейтронов, реализованная в виде веб-приложения. Версия 2.0 [Дата внедрения 08. 12. 2023; Авторы: А.Г. Соловьев, Т.М. Соловьева]. Приложение FITTER_WEB доступно по адресу <http://fitter.jinr.ru>.

Программа FITTER_WEB предназначена для согласования экспериментальных данных с выбранной теоретической многопараметрической функцией. Программа использует JSROOT — графическую и ROOT-систему ввода-вывода, написанную на JavaScript, и HttpServer. Особенностью программы FITTER_WEB является подгонка с использованием функции разрешения. Она реализует теоретические модели SANS, в которых форма частиц аппроксимируется простыми геометрическими телами — шарами, эллипсоидами, цилиндрами, призмами. Учитывается, что молекулы одного образца полимера имеют разные молекулярные массы и размеры, то есть представляют собой полидисперсную систему.

- Первая работа, в которой сообщается об использовании FITTER_WEB — [85].
- Вторая статья, посвященная новому использованию FITTER_WEB — [86]. Обсуждаемый вариант позволяет отдельно оценить полидисперсность и разрешение. Включение полидисперсности является важным достижением в онлайн-анализе данных. Векторизация функций и неявная многопоточность пакета PROOT увеличивают скорость обработки данных до 5,5 раз.



Зависимость коэффициента ускорения от количества потоков [86]

► **Программное моделирование данных конденсированного состояния** [87]. В данной работе дифракция нейтронов проводилась времяпролетным методом на исследовательском реакторе ИБР-2М. Полученные данные были уточнены с помощью пакета FULLPROF Rietveld. Результаты отличаются от результатов, полученных методом дифракции рентгеновских лучей.

2.6. Программно-вычислительная поддержка проекта нейтринной физики Байкал–ГВД

Данные, накопленные в ходе эксперимента Байкал–ГВД, охватывают широкий спектр информации, требующей интенсивной компьютерной обработки: оценки положения компонентов подводного детектора объема кубический километр, испытывающих дрейф и изменение пространственной ориентации. О прогрессе, достигнутом в течение 2023 года, сообщалось в [88–92].

- Впервые о наблюдении диффузного потока космических нейтрино на нейтринном телескопе Байкал-ГВД сообщалось в [88]. По каскадным событиям, собранным Байкал-ГВД в 2018–2021 гг., наблюдается значительное превышение событий над ожидаемым атмосферным фоном. Это превышение согласуется с диффузным потоком космических нейтрино высокой энергии, наблюдаемым IceCube.

- Представлен анализ наблюдаемой тройки событий-кандидатов нейтрино в плоскости Галактики с акцентом на его потенциальную связь с определенными галактическими источниками. Обсуждается совпадение каскадов с несколькими яркими и пылающими блазарами [89].

- Мюоны образуются в результате обмена W-бозонами при взаимодействии мюонных и частичных тау-нейтрино вблизи телескопа Байкал-ГВД. Затем мюоны распространяются на большие расстояния в воде озера. Реконструкция их траектории позволяет получить наиболее точную оценку направления нейтрино на телескопах этого типа. Угловое разрешение может достигать $0,5^\circ$ для довольно длинных мюонных треков. Обсуждается современное состояние дел в анализе трековых событий на Байкале-ГВД [90].

- С 2020 года Байкал-ГВД отслеживает оповещения телескопа IceCube об обнаружении нейтрино с энергией более 100 ТэВ. Представлены результаты поиска совпадений между событиями Байкал-ГВД и нейтринными оповещениями IceCube с сентября 2020 по апрель 2022 года [91].

- Были идентифицированы события от мюонных нейтрино, поток которых соответствует ожиданию потока атмосферных нейтрино. Были проанализированы данные, полученные в ходе тревог телескопов ANTARES и IceCube. Получены события-кандидаты для нейтрино высоких энергий астрофизического происхождения [92].

2.7. Поддержка обработки и анализа данных экспериментальной ядерной физики

Собранные на установках ЛЯР данные о низкоэнергетических ядерных процессах (рождение и характеристика сверхтяжелых ядер, столкновения экзотических ядер с протонами и ядрами, фрагментация ядер и т. д.) требуют, как правило, разработки новых теоретических моделей. Большая часть прогресса в разработке новых математических моделей, посвященных этой цели, вместе с иллюстрацией охвата конкретных экспериментальных процессов была представлена в разделе 1.2.2. настоящего доклада. Описание функций, связанных с конкретной реализацией кода для высокопроизводительных вычислений на платформе HybriLIT, приведено в разделе 3.1.

► Надежные статистические выводы при низкой статистике и неполном наблюдении

- Обзор некоторых особенностей обнаружения сильной отдачи [93]. Обсуждаются результаты первых лучевых испытаний системы регистрации в фокальной плоскости

дубненского газонаполненного сепаратора отдачи-2 (DGFRS-2), принимающего пучки циклотрона DC-280 ЛЯР.

3. Численные методы, алгоритмы и программы для многоядерных и гибридных архитектур и аналитика больших данных

3.1. Экосистема ML/DL/HPC на вычислительной платформе HybriLIT

В рамках проекта ЛИТ «Многофункциональный информационно-вычислительный комплекс (МИВК)», гетерогенная вычислительная платформа (ГВП) HybriLIT, в состав которой входят учебно-тестовый полигон HybriLIT и суперкомпьютер «Говорун», <http://hlit.iinr.ru>, представляет собой основные аппаратные средства, обеспечивающие реализацию передового программного обеспечения для численного решения вновь разрабатываемых математических методов и алгоритмов в ОИЯИ и, в частности, по теме 1119. Проектирование, разработка, внедрение и сопровождение на HybriLIT HPC удобной для пользователя окружающей среды является фундаментальной задачей, решение которой поэтапно решается и уточняется в рамках темы 1119 выделенным коллективом (руководители Д.В. Подгайный, О.И. Стрельцова).

В течение 2023 года продолжалась разработка платформы гетерогенных вычислений HybriLIT. Была расширена экосистема ML/DL/HPC, развернут полигон квантовых вычислений на платформе Jupyter, оказана поддержка пользователям платформы и обновлено программное обеспечение. Экосистема ML/DL/HPC сейчас активно используется для задач машинного и глубокого обучения. При этом накопленные инструменты и библиотеки могут более широко использоваться для научных исследований, включая: численные вычисления, параллельные вычисления на CPU и GPU, визуализацию результатов, сопровождая их необходимыми формулами и пояснениями.

Разработки шли по трем основным направлениям: компонент HPClab; вычислительная составляющая; образовательная составляющая. Более раннее описание статуса HybriLIT было сделано в [94], а самое последнее дано в [95].

3.2. Разработки на основе Экосистемы ML/DL/HPC

3.2.1. Расширенные возможности использования экосистемы ML/DL/HPC на базе JupyterHub

► **Онлайн-организация расчетов и научной визуализации** привела к возникновению экосистемы для моделирования динамики джозефсоновского перехода под воздействием внешнего излучения с использованием Python в книжной среде Jupyter. Разработаны алгоритмы расчета вольт-амперной характеристики джозефсоновского перехода под воздействием внешнего излучения и расчета зависимости ширины ступеньки Шапиро от амплитуды. С помощью библиотеки Joblib был реализован параллельный алгоритм для рассматриваемой задачи и проанализирована эффективность параллельных вычислений. Реализация доступна онлайн [96].

► **Исследование динамики намагниченности в джозефсоновском Φ_0 -переходе на основе Jupyter Book** [97]. Методика разработки программных модулей, позволяющих не только проводить расчеты, но и визуализировать результаты исследования и сопровождать их необходимыми формулами и пояснениями (см. рисунок ниже).

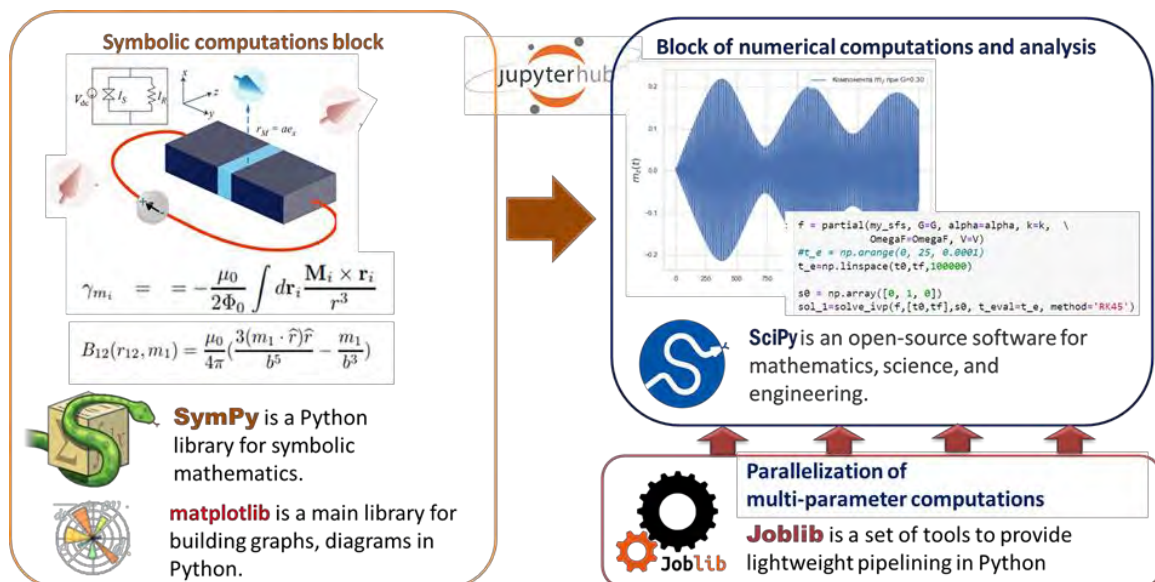


Схема программных модулей для исследования систем с джозефсоновскими переходами [97]

- Рассмотрено **численное решение на основе Python** расчета вольт-амперных характеристик для модели стека с длинным джозефсоновским переходом (LJ) с индуктивной и емкостной связью [98]. С вычислительной точки зрения задача сводится к численному решению начально-краевой задачи для системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных для различных интенсивностей электрического тока. Исследование основано на экосистеме ML/DL/HPC гетерогенной платформы HybriLIT.

- О вычислительной среде для математического моделирования сверхпроводящих наноструктур сообщалось в [99].

3.2.2. Решения для экспериментов ОИЯИ на базе машинного обучения

► **Машинное обучение на высокопроизводительных вычислительных инфраструктурах в ОИЯИ**

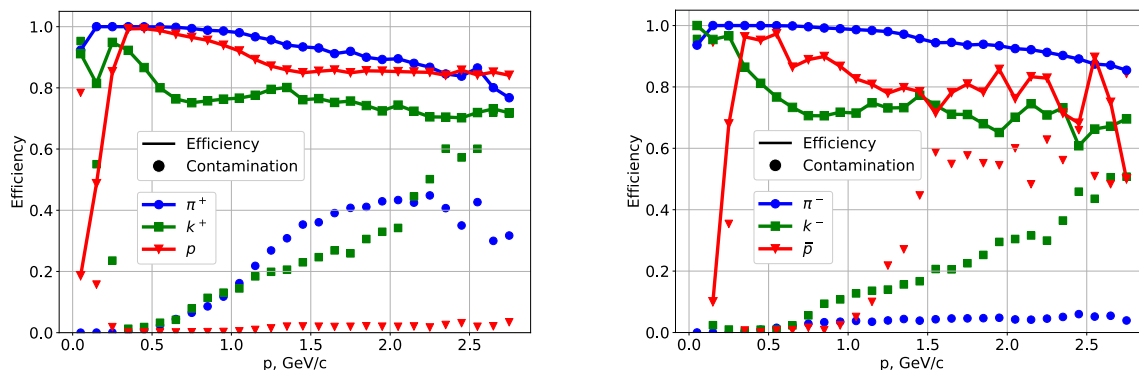
- Реконструкция событий в детекторах GEM** [100].

Для решения задачи реконструкции траекторий заряженных частиц в трекингвых детекторах разработаны два алгоритма нейронных сетей на основе архитектур глубокого обучения для распознавания треков в пиксельных и ленточных детекторах частиц. Это TrackNETv3 для локального (дорожка за треком) и RDGraphNet для глобального (все треки в событии) отслеживания. Эти алгоритмы были протестированы с использованием трекера GEM эксперимента BM@N в ОИЯИ (Дубна) и цилиндрического внутреннего трекера GEM эксперимента BESIII в ИФВЭ CAS (Пекин). Модель RDGraphNet, основанная на обратном направленном графике, показала обнадеживающие результаты: полнота 95% и точность поиска следов 74%. Модель TrackNETv3 продемонстрировала точность отзыва 95% и 76%. Этот результат может быть улучшен после дальнейшей оптимизации модели.

- Идентификация частиц в эксперименте MPD на основе CatBoost** [101].

В эксперименте MPD в NICA были проведены первые испытания приложения машинного обучения с использованием повышения градиента на деревьях решений, не обращающих внимания на идентификацию частиц. Категориальное повышение (CatBoost) использовало реализацию градиентного повышения на деревьях решений. Идентификация частиц основана на информации, предоставляемой камерой временной проекции (TPC) и времяпролетными субдетекторами (TOF). Три различных набора данных измерений Монте-Карло из TPC и TOF были смоделированы и использованы в процессе обучения и

тестирования классификаторов CatBoost. Было проведено сравнение с методом п-сигма, который в настоящее время используется в программном обеспечении MPD. Градиентное усиление показывает лучшую эффективность при малых и больших значениях импульса ($p < 0,7$ ГэВ/с и $p > 1,5$ ГэВ/с). Это продемонстрировало, что методы машинного обучения хорошо подходят для решения проблемы идентификации частиц в эксперименте MPD.



Эффективность и засоренность классификатора на основе библиотеки CatBoost (справа для частиц, слева для античастиц) [101]

- Продолжены совместные исследования с ЛНФ в рамках международной программы UNECE ICP Vegetation по мониторингу и прогнозированию процессов загрязнения воздуха в Европе и Азии с внедрением данных дистанционного зондирования Земли совместно с методами машинного обучения для прогнозирования загрязнения воздуха тяжелыми металлами. Средняя точность моделей превысила 89%. Построены модели загрязнения алюминием, железом и сурьмой в центральном регионе России [102].

- Искусственный интеллект для решения задач сельского хозяйства [103]. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, мировое производство продуктов питания должно увеличиться на 70 процентов к 2050 году, чтобы прокормить растущее население. Однако за последнее десятилетие численность сельскохозяйственной рабочей силы в ЕС сократилась на 35%, а 54% сельскохозяйственных компаний назвали нехватку кадров своей главной проблемой. Эти факторы, среди прочего, привели к повышенному интересу к передовым технологиям в сельском хозяйстве, таким как Интернет вещей, датчики, роботы, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), цифровизация и искусственный интеллект (ИИ). Искусственный интеллект и машинное обучение оказались полезными для многих задач сельского хозяйства, включая обнаружение проблем, мониторинг состояния сельскохозяйственных культур, прогнозирование урожайности, прогнозирование цен, составление карт урожайности, оптимизацию использования пестицидов и удобрений. В настоящем мини-обзоре рассмотрены научные достижения по основным направлениям агротехнологий. Будут выделены успешные коммерческие компании, как на российском, так и на международном рынке, эффективно применившие данные технологии. Кроме того, представлен краткий обзор различных подходов к искусственному интеллекту и представлен наш непосредственный опыт в этой области.

3.3. Реализация эффективных численных методов для трудно решаемых задач на платформах HybriLIT/GOVORUN

- Моделирование однократной ионизации гелия протонами [104]. Параболический квазиштурмианский подход, недавно предложенный для расчета ионизирующих столкновений ион-атом, адаптирован и применен здесь к однократной ионизации гелия,

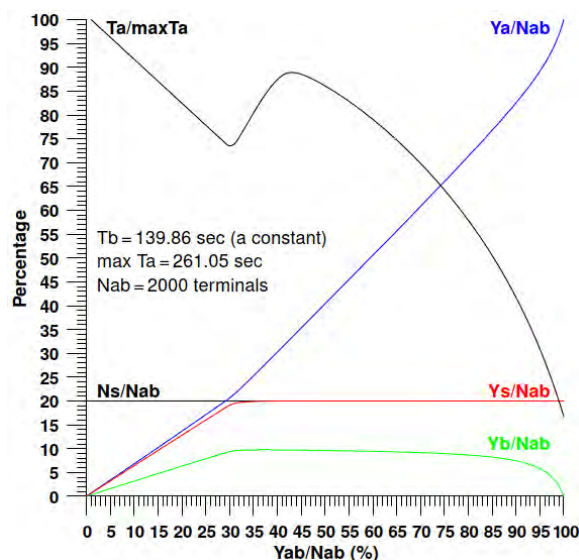
вызванной ударом протона промежуточной энергии. В рамках метода амплитуда ионизации представляется как сумма произведений базисных амплитуд, связанных с асимптотическим поведением континуальных состояний двух невзаимодействующих водородных подсистем (e^- , He^+) и (p^+ , He^+). p - e -взаимодействие рассматривается как возмущение в уравнении типа Липпмана–Швингера (LS) для системы трех тел (e^- , He^+ , p^+). Это уравнение ЛС решается численно с использованием сепарабельных разложений для протон-электронного потенциала. Исследовано поведение сходимости разложения амплитуды перехода по мере увеличения числа членов в представлении p - e -взаимодействия и обнаружено, что для некоторых кинематических режимов сходимость плохая. Эта трудность, отсутствующая при воздействии более высоких энергий протонов, решается путем изменения импульса вспомогательной плоской волны протона, введенной в базисную функцию. Рассчитаны полностью дифференциальные сечения и сопоставлены с экспериментальными данными для протонов с энергией 75 кэВ и результатами, полученными с помощью модели ЗС.

► **MAPLE-алгоритм решения задачи рассеяния [105]**. Представлен оригинальный алгоритм в системе MAPLE решения задачи рассеяния в одноканальном приближении метода связанных каналов оптической модели (ОМ), описываемой обыкновенным дифференциальным уравнением (ОДУ) второго порядка с комплекснозначным потенциалом. и регулярные граничные условия. Комплексный потенциал состоит из известной действительной части, представляющей собой сумму ядерного потенциала, кулоновского потенциала и центробежного потенциала, и мнимой части, представляющей собой произведение неизвестной константы связи $g(E)$, зависящей от энергии столкновения E пары ионов и производной действительной части известного ядерного потенциала по независимой переменной ОДУ.

► **Высокопроизводительные расчеты физических наблюдаемых в спинтронике [106]**. Периодическая структура доменов перемангничивания (MR) исследована в рамках модели ϕ_0 -перехода сверхпроводник–ферромагнетик–сверхпроводник. Модель описывается задачей Коши для системы нелинейных обыкновенных уравнений, которая решается численно с помощью двухшагового метода Гаусса–Лежандра. Разработаны две версии параллельной реализации на основе технологий MPI и OpenMP. Эффективность обоих вариантов подтверждена тестовыми расчетами. Исследовано влияние частоты ферромагнитного резонанса на конфигурацию доменов MR. Расчеты выполнены на платформе HybriLIT Многофункционального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ.

► **Оценка роста ошибки округлений выполнена для задач Коши в равномерной метрике l_1 [107]**. Тщательно исследуются конкретные задачи Коши, в том числе расчеты IVC для длинных джозефсоновских переходов. Теоретические результаты устанавливают ограниченность накоплений ошибок округления в равномерной метрике. Расчеты, выполненные на СК «Говорун» в ЛИТ с использованием системы REDUCE, позволяют провести эмпирическую проверку этих результатов.

► **Оценка качества обслуживания FIFO телекоммуникационной системы [108]**. В настоящей статье, возникшей в сотрудничестве с болгарскими коллегами, предлагается метод решения системы уравнений относительно некоторых динамических параметров с целью моделирования качества обслуживания в общей телекоммуникационной системе, включая пользователей и систему массового обслуживания FIFO (первым пришел — первым ушел).



Средняя продолжительность занятия А-терминала (T_a), трафик на А-терминалах (Y_a) и В-терминалах (Y_b), а также трафика коммутационной системы (Y_s) для сети с очередями с $N_{ab} = 2000$ терминалов и $N_s = 400$ коммутационных линий (20% of N_{ab}) [108]

3.4. Прогресс в аналитике больших данных и искусственном интеллекте

- **Простой журнальный консультант для научных статей** [109]. Представлен прототип рекомендательной системы для эффективного управления научной информацией в эпоху больших данных. Используя метаданные и фильтрацию ключевых слов, система призвана помочь исследователям выбрать наиболее подходящий журнал для публикации путем анализа таких факторов, как количество цитирований и даты публикации. Составлен тематический список наиболее значимых научных источников. Прототип использует алгоритмы машинного обучения для выдачи точных и персонализированных журнальных рекомендаций, улучшая поиск научной информации и повышая влияние исследователя в научном сообществе за счет публикации статей в наиболее актуальных журналах.

- **Результаты разработки методов сравнения программ высшего образования и потребностей рынка труда** [110, 111]. Методика разработана авторами в рамках внедрения аналитической платформы для автоматизированного мониторинга рынка труда и интеллектуального анализа кадров по специальностям вуза. Для анализа использовались тексты названий, уровней развития и показателей достижения ИТ-профильной компетентности, а также векторные языковые модели с различной архитектурой и обучающими текстовыми телами. Результаты взаимно сопоставлены и показана устойчивость методов соответствия образовательных компетенций потребностям рынка труда.

4. Методы, алгоритмы и программное обеспечение компьютерной алгебры и квантовых вычислений

► Решение трудных задач компьютерной алгебры

- **Методы вычисления однопетлевых фейнмановских интегралов** [112]. Предложенный метод функциональной редукции фейнмановских интегралов используется для вычисления однопетлевых интегралов, соответствующих диаграммам с четырьмя

внешними линиями. Рассмотрены интегралы, возникающие из амплитуд рассеяния света на свету, расщепления фотона во внешнем поле и рассеяния Дельбрюка. Для мастер-интегралов в d -размерах представлены новые аналитические результаты. При $d = 4$ эти интегралы задаются компактными выражениями в терминах логарифмов и дилогарифмов.

► Решения задач, связанных с квантовой информацией

- **Конструктивные модели описания конечных квантовых систем** [113].

Математическая формулировка принципа дополнительности Бора приводит к концепциям взаимно несмещенных базисов в гильбертовых пространствах и дополнительных квантовых наблюдаемых. Рассмотрены алгебраические структуры, связанные с этими понятиями, и их приложения к конструктивной квантовой механике. Кратко обсуждены некоторые компьютерно-алгебраические подходы к рассматриваемым задачам и предложен алгоритм решения одной из них.

- **Конструктивные версии квантовой механики** [114]. Стандартная формулировка квантовой механики по своей сути неконструктивна, поскольку основана на непрерывных унитарных группах и числовых полях $\mathbb{R}$ и $\mathbb{C}$. Этот описательный недостаток не позволяет изучить некоторые тонкие детали строения квантовых систем и иногда приводит к артефактам. Современные проблемы квантовой физики и квантовой информатики требуют детального анализа «тонкой структуры» квантовых систем, который невозможно провести традиционными приближенными методами квантовой механики. Мы рассматриваем модификацию квантовой механики, основанную на перестановочных представлениях конечных групп в гильбертовых пространствах над круговыми полями.

- **Описание эволюции конечных квантовых систем группами перестановок** [115].

Рассматриваются конструктивные подходы к квантовой теории: квантовая механика, основанная на перестановочных представлениях конечных групп, и квантовая механика конечного фазового пространства Вейля–Швингера. Мы показываем, что оба подхода приводят к выводу, что на глубоком уровне квантовая эволюция основана на перестановках конечных множеств.

- **Расширение аксиом Стратоновича-Вейля в квантовой механике** [116]. Статистическая модель квантовой механики основана на отображении операторов в гильбертовом пространстве и функций в фазовом пространстве. Это отображение может быть реализовано с помощью оператора, который удовлетворяет физически мотивированным аксиомам Стратоновича-Вейля. Приводятся аргументы в пользу некоторого расширения аксиом при условии наличия априорных знаний о сложной природе квантовой системы.

- **Взаимосвязь классичности/квантовости и симметрии состояний** [117].

В рамках фазовой формулировки конечномерных квантовых систем указана взаимосвязь между классичностью/квантовостью и симметрией состояний. Приводится аргументация, что квантовые состояния, упорядоченные по своей «симметрии», проявляют также упорядоченность по своей «классичности» таким образом, который можно описать так: чем большей симметрией обладают квантовые состояния, тем более классическими они являются.

- **Неравновесные бозе-системы захваченных атомов и их свойства** [118].

В обзоре представлены методы генерации нелинейных когерентных возбуждений в сильно неравновесных бозе-конденсированных системах захваченных атомов и их свойства. Конденсаты Бозе – Эйнштейна в неосновном состоянии представлены нелинейными когерентными модами. Подчеркнуто принципиальное отличие нелинейных когерентных мод от линейных коллективных возбуждений. Описаны методы генерации нелинейных режимов и свойства последних. Обсуждается интерферометрия материи-волны

с когерентными модами, включая такие эффекты, как интерференционные картины, внутренний джозефсоновский ток, осцилляции Раби, полосы Рамсея, генерация гармоник и параметрическое преобразование. Показано, что динамический переход между режимами синхронизации и разблокировки мод аналогичен фазовому переходу. Рассмотрены сжатие и перепутывание атомов в решетке конденсированных атомных облаков с когерентными модами. Неравновесные состояния захваченных бозе-конденсированных систем, начиная со слабонеравновесного состояния, вихревого состояния, вихревой турбулентности, капельной или зерновой турбулентности и волновой турбулентности, классифицируются с помощью эффективных чисел Френеля и Маха. Описан обратный сценарий Киббла–Зурека. Сообщается о методе формирования направленных пучков атомных лазеров.

► **Два типа решений искусственного интеллекта [119].** Рассмотрена динамика принятия аффективных решений для интеллектуальной сети, состоящей из агентов с разными типами памяти: долговременной и кратковременной. Рассмотрение основано на вероятностной теории аффективного решения, которая учитывает рациональную полезность альтернатив, а также эмоциональную привлекательность альтернатив. Целью данной статьи является сравнение двух многошаговых алгоритмов работы интеллектуальной сети: одного, основанного на дискретной динамике, и другого, основанного на непрерывной динамике. С помощью численного анализа показано, что в зависимости от параметров сети характерные вероятности для непрерывных и дискретных операций могут проявлять как близкое, так и кардинально различное поведение. Таким образом, в зависимости от того, какой алгоритм используется: дискретный или непрерывный, теоретические предсказания могут существенно различаться, что не позволяет однозначно описать практические задачи. Этот вывод важен для понимания того, какой из алгоритмов более подходит для корректного анализа задач принятия решений. Приводится обсуждение, показывающее, что дискретная операция представляется более реалистичной для описания интеллектуальных сетей, а также аффективного искусственного интеллекта.

► **Квантовое интеллектуальное управление и робототехника:**

Группа, работающая над этим вопросом, является, пожалуй, наиболее опытной в ЛИТ. Ниже приведены примеры результатов, опубликованных в 2023 году (некоторые из них будут опубликованы в 2024 году).

- На конкретных примерах из робототехники и самоорганизующихся квантовых регуляторов, встроенных в бортовые системы управления, показана эффективность и преимущество применения интеллектуальных систем управления, использующих мягкие и квантовые вычисления [120]. Квантовые мягкие вычисления и квантовый нечёткий вывод реализованы на классическом процессоре и промоделированы на суперкомпьютере «Говорун».
- Разработана технология извлечения знаний из физически регистрируемого сигнала обучения с применением генетического алгоритма, позволяющая формировать объективные базы знаний нечётких регуляторов интеллектуальной системы управления. Проведено сравнение разных типов моделей управления на основе системы TANGO. Представлен метод выбора оптимальных траекторий изменения коэффициентов усиления гибридного ПИД-регулятора. Показана эффективность применения сквозных информационных технологий на основе мягких вычислений в задачах интеллектуального управления [121].

- Получены и представлены результаты внедрения информационной технологии проектирования встраиваемых интеллектуальных систем управления на основе нечёткой логики, нейронных сетей, генетических и квантовых алгоритмов применительно к задаче стабилизации давления азота в криогенной системе испытательного стенда фабрики магнитов ЛФВЭ ОИЯИ. Представлено описание действующей системы управления со встроенным квантовым регулятором, реализующим координационное управление. На примере режима заправки азота рассмотрена структура разработанной интеллектуальной системы управления на основе технологий квантовых и мягких вычислений. Эффективность работы системы продемонстрирована экспериментально [122].

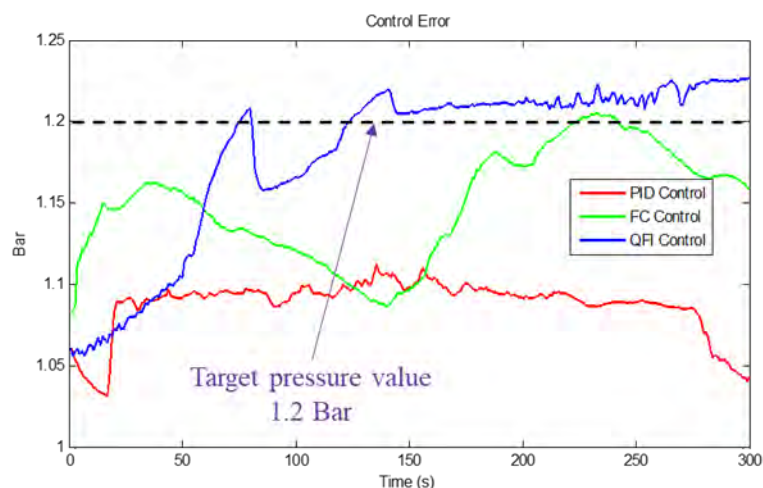
- Показана принципиальная возможность реализации 30-кубитного квантового нечёткого вывода на симуляторе с классической архитектурой. Представлена квантовая схема и приведены результаты работы квантового интеллектуального регулятора управляющего потоком азота в криогенной системе измерительного плеча бустера ускорительного комплекса NICA [123].

- В обзорной статье [124] рассмотрены основы описания и физической интерпретации квантовых процессов для ИТ-специалистов, разработчиков систем управления и робототехники, основанные на понятиях классической стохастической механики и теории случайных процессов, вводятся дополнительные понятия и их формализованное описание.

- Рассмотрена информационная технология проектирования робастной интеллектуальной системы управления на базе квантового нечеткого вывода [125]. Применение разработанной методологии проектирования основано на квантовой самоорганизации неточных баз знаний нечетких регуляторов. Проведено сравнение результатов математического моделирования и физического эксперимента на примере автономного робота в виде системы «перевернутый маятник – движущаяся каретка».

- Конструкция вентиля квантово-нечеткого вывода обеспечивает готовые программируемые алгоритмические решения для встроенных в плату систем управления. Показана возможность применения нейроинтерфейса на базе когнитивного шлема с квантово-нечетким контроллером для управления транспортными средствами [126].

► **Управление давлением и расходом жидкого азота сверхпроводящих магнитов криогенной системы ускорительного комплекса NICA** было достигнуто в рамках недавно разработанной аппаратно-программной платформы на основе квантово-нечетких контроллеров, встроенных в контур обратной связи управления. Квантовый контроллер продемонстрировал самую высокую скорость достижения целевого значения, низкое перерегулирование и точность достижения цели управления по сравнению с другими типами контроллеров (синяя кривая на рисунке ниже). Производительность и эффективность разработанной интеллектуальной системы дистанционного управления технологическим процессом охлаждения сверхпроводящего магнита обеспечили гарантированное достижение зоны стабильной сверхпроводимости при экономии расхода азота более 50% [127].



Управление процессом достижения заданного уровня давления азота разными типами регуляторов в режиме охлаждения (синяя кривая – квантовый регулятор, зеленая – нечеткий регулятор, красная – PID-регулятор) [127]

Список литературы

- [1] 57th meeting of the PAC for Condensed Matter Physics (15-June 16, 2023) · JINR (Indico) <https://indico.jinr.ru/event/3755/>
Details of proposal at: **04.11 Written Proposals**
PAC Recommendation:
https://www.jinr.ru/wp-content/uploads/Advisory_Bodies/PAC/CMP/57/57_PAC_CMP_eng.pdf (p. 6)
https://www.jinr.ru/wp-content/uploads/Advisory_Bodies/PAC/CMP/57/57_PAC_CMP_rus.pdf (с. 6)
- [2] 58th meeting of the PAC for Particle Physics (June 21-22, 2023) <https://indico.jinr.ru/event/3750/>
Details of proposal at: **08.1.MPE**; Oral presentation: **8.1.** S. Shmatov (Slides)
PAC Recommendation:
https://www.jinr.ru/wp-content/uploads/Advisory_Bodies/PAC/PP/58/58_PAC_PP_eng.pdf (p. 7)
https://www.jinr.ru/wp-content/uploads/Advisory_Bodies/PAC/PP/58/58_PAC_PP_rus.pdf (с. 8)
- [3] 134th session of the JINR Scientific Council, 21–22 Sept. 2023, <https://indico.jinr.ru/event/3935/>
https://www.jinr.ru/wp-content/uploads/Advisory_Bodies/SC/SC134/134SC_Resolution_eng.pdf (pp.7-8, 12)
https://www.jinr.ru/wp-content/uploads/Advisory_Bodies/SC/SC134/134SC_Resolution_rus.pdf (с. 8, 13)
- [4] I.V.Puzynin (24.04.1938–17.07.2023) <https://www.jinr.ru/posts/igor-victorovich-puzynin-condolences/>
И.В.Пузынин (24.04.1938–17.07.2023) <https://www.jinr.ru/posts/igor-viktorovich-puzynin-stroki-soboleznovaniya/>
- [5] A. Chervyakov, *On the use of mixed potential formulation for finite-element analysis of large-scale magnetization problems with large memory demand*, arXiv:2307.12308 [physics.comp-ph] 14 pp. (2023) <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.12308>
- [6] Г.А. Карамышева, С.В. Гурский, О.В. Карамышев, Т.В. Карамышева, Д.В. Попов, В.А. Малинин, И.Д. Ляпин, *Динамика пучка в изохронном циклотроне для медико-биологических исследований MSC230*, Материалы конференции XXVIII Международная конференция Российская конференция по ускорителям заряженных частиц (RuPAC'23) 11–15 сентября 2023 г. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск 2023, pp. 14–18, <https://indico.inp.nsk.su/event/114/attachments/1617/2468/RuPAC-23-Materials.pdf>
- [7] D. Blaschke, A. Friesen, Yu. Kalinovsky, *Cancellation of the Sigma Mode in the Thermal Pion Gas by Quark Pauli Blocking*, *Symmetry*, **15** (3), 711, 1–11 (2023).
<https://doi.org/10.3390/sym15030711> <https://www.mdpi.com/2073-8994/15/3/711>

- [8] A.V. Friesen, D. Goderidze, Yu.L. Kalinovsky, Application of Adaptive and Non-Adaptive Integration Methods to the Two-Photon Decay of a Neutral Pion at Finite Temperature, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **20**, 6, 1483–1487 (2023)
- [9] A.V. Friesen, Yu.L. Kalinovsky, Diquarks and Λ^0/π^+ , Ξ^-/π^+ ratios in the framework of the EPNJL model. *Particles*, **6**(4), 876–885 (2023) <https://doi.org/10.3390/particles6040056>
- [10] M. Shahrbafe, S. Antić, A. Ayriyan, D. Blaschke, and A. G. Grunfeld, Constraining free parameters of a color superconducting nonlocal Nambu–Jona-Lasinio model using Bayesian analysis of neutron stars mass and radius measurements, *Phys. Rev. D* **107**, 054011 (2023). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.054011>
- [11] V.K. Lukyanov, E.V. Zemlyanaya, K.V. Lukyanov, I. Abdul-Magead, *Analysis of Pion-Nucleus Scattering Data within Microscopic Model of Optical Potential*, AIP Proceedings, in print (2023)
- [12] В.К. Лукьянов, Е.В. Земляная, К.В. Лукьянов, И. Абдул-Магед Теоретический анализ пион-ядерного рассеяния при энергиях в области пион-нуклонного (3,3)-резонанса, ЭЧАЯ, **Т.54**, вып.4, 2023, 863–897; V.K. Lukyanov, E.V. Zemlyanaya, K.V. Lukyanov, I. Abdul-Magead, *Theoretical Analysis of Pion–Nucleus Scattering at Energies of the (3,3) Pion–Nucleon Resonance*, *Phys. Part. Nuclei* **54**, 734–755 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063779623040238>
- [13] M.K. Gaidarov, K.V. Lukyanov, E.V. Zemlyanaya, V.K. Lukyanov, D.N. Kadrev, A.N. Antonov, *Microscopic analysis of elastic scattering of one-proton halo nucleus ^{17}F on different mass targets*, *Physics of Particles and Nuclei* **54**, 3, 500–505 (2023).
- [14] T.I. Mikhailova, B. Erdemchimeg, M. Di Toro, H.H. Wolter, *Characteristics of heavy-ion fragmentation reactions at Fermi energies*, *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei (PEPAN)* **54**(3), pp. 510–516 (2023).
- [15] Т.И. Михайлова, Б. Эрдэмчимэг, Ю.М. Середа, *Скоростные распределения вперед летящих фрагментов в столкновениях тяжелых ионов при энергиях, близких к энергии Ферми*, ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. **78**(1), 2310301, 8 pp. (2023).
- [16] T.I. Mikhailova, B. Erdemchimeg, S.A. Klygin, G.A. Kononenko, Yu.M. Sereda, A.N. Vorontsov, *Velocity and Isotope Distributions of Projectile-Like Fragments in Reaction ^{40}Ar (36.5 A MeV)/ ^9Be* , *Physics of Atomic Nuclei* **86**(4), 458–464 (2023).
- [17] T.I. Mikhailova, B. Erdemchimeg, *Modeling of Heavy-Ion Fragmentation Reactions in Transport-Statistical Approach*, report to Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of High-Tech Systems 2023 (ITTMM-2023, Moscow, April 17–21, 2023).
- [18] B. Erdemchimeg, S. A. Klygin, G. A. Kononenko, T. I. Mikhailova, Yu. M. Sereda, A. N. Vorontzov, *Some Regularities in the Forward Angle Yields of Isotopes with $8 < Z < 20$ in the Reaction of ^{40}Ar (36.5 A MeV) with ^9Be* , *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **87**, 1232–1237 (2023), <https://doi.org/10.3103/S1062873823702854>
- [19] J. Busa, M. Pudlak, R. Nazmitdinov, *Rippled Graphene as an Ideal Spin Inverter*, *Symmetry*, **15**(8), 15081593(1–14) (2023) <https://www.mdpi.com/2073-8994/15/8/1593>
- [20] V.I. Yukalov and E.P. Yukalova, *Regulating spin dynamics in magnetic nanomaterials*, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, **20**(5), 1138–1141 (2023) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477123050746>
- [21] V.I. Yukalov, E.P. Yukalova, *Statistical model of a superfluid solid*, *Physics Letters A* **457**, 128559-9 (2023).
- [22] V.I. Yukalov, E.P. Yukalova, *Models of mixed matter*, *PEPAN* **54**, 1–68 (2023).
- [23] A. Vagov, E.G. Nikonov, *Tracing Vortex Clustering in a Superconductor by the Magnetic Flux Distribution*, *The Journal of Physical Chemistry LETTERS*, **14**(15), 3743–3748 (2023)
- [24] E.G. Nikonov, R.G. Nazmitdinov, P.I. Glukhovtsev, *On the Equilibrium Configurations of Charged Ions in Planar Systems with Circular Symmetry*, *Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques*, **17**(1), 235–239 (2023) Russian Text, published in *Poverkhnost'*, 2023, No. 2, 71–76.

- [25] В.Д. Лахно, И.В. Амирханов, А.В. Волохова, Е.В. Земляная, И.В. Пузынин, Т.П. Пузынина, В.С. Рихвицкий, М.В. Башашин, *Динамическая модель полярона для исследования процесса гидратации электрона*, ЭЧАЯ, **54**, 5, 1076–1105 (2023).
- V.D. Lakhno, I.V. Amirkhanov, A.V. Volokhova, E.V. Zemlyanaya, I.V. Puzynin, T.P. Puzynina, V.S. Rikhvitskii, M.V. Bashashin, *Dynamic Model of the Polaron for Studying Electron Hydration*, Phys. Part. Nuclei **54**, 869–883 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1063779623050167>
- [26] I.V. Barashenkov, F. Smuts, A. Chernyavsky, *Integrability and trajectory confinement in-symmetric waveguide arrays*, J. Phys. A: Math. Theor., **56**, 165701(19) (2023) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1751-8121/acc3ce/meta>
- [27] N.V. Alexeeva, I.V. Barashenkov, A.A. Bogolubskaya, E.V. Zemlyanaya, *Understanding oscillons: standing waves in a ball*, Phys. Rev. D, **107**, 7, 076023(13) (2023) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.076023>
- [28] I.V. Barashenkov, N.V. Alexeeva, *Variational formalism for the Klein-Gordon oscillon*, Phys Rev D, **108**, 9, 096022 (11), (2023) doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.096022>
- [29] И.В. Амирханов, И. Сархадов, З.К. Тухлиев, Моделирование тепловых процессов, возникающих в материалах под действием лазерных импульсов, в рамках гиперболической модели термического пика, JINR Preprint P11-2022-31 (2022), in print J. Surf. Investig. (2023).
- [30] И.В. Амирханов, И. Сархадов, З.К. Тухлиев, Х. Гафуров, Численное исследование влияния конечной толщины образца на лазерную абляцию материалов, JINR Preprint P11-2022-32 (2022), in print Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования (2023).
- [31] O. Ivankov, D.R. Badreeva, E.V. Ermakova, T. Kondela, T.N. Murugova, N. Kučerka, *Anionic lipids modulate little the reorganization effect of amyloid-beta peptides on membranes*, Gen. Physiol. Biophys. **42**, 59–66 (2023), Doi: https://doi.org/10.4149/gpb_2022052
- [32] S. Kurakin, D. Badreeva, E. Dushanov, A. Shutikov, S. Efimov, A. Timerova, N. Kučerka, *Arrangement of lipid vesicles and bicelle-like structures formed in the presence of A β (25–35) peptide*, Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes, **1866**(1), 184237 (2024) <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2023.184237>
- [33] М.А. Киселев, Е.В. Земляная, Е.И. Жабицкая, М.В. Башашин, А.И. Иванов, *Исследование возможностей анализа везикулярной структуры нанолекарств на основе ФТНС по данным малоуглового рассеяния нейтронов*, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **1**, 3–8 (2023). English translation: M.A. Kiselev, E.V. Zemlyanaya, E.I. Zhabitskaya, M.V. Bashashin, O.I. Ivankov, *Investigation of the Possibilities of Analyzing the Vesicular Structure of PTNS-Based Nanodrugs Using Small-Angle Neutron Scattering Data*, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques **17**, 1, 1–6 (2023), <https://doi.org/10.1134/S102745102.3010111>
- [34] P.B. Kats, A.V. Kudravets, A.S. Rymasheuskaya, O.O. Voskresenskaya, *Comparative Study of the Energy-Loss Straggling Calculation Methods*, Radiation Physics and Chemistry, 2023 (submitted); a preliminary version is available at <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.12558> (nucl-th)
- [35] O.O. Voskresenskaya, N.A. Skorik, *Kinetics, Mechanism, and Reactivity of Intermediates of the Cerium (IV)-Oxalate Reaction in a Sulphate Medium*, Kinetics and Catalysis, **64**(6), 729–740 (2023) Russian Text 2023, published in Kinetika i Kataliz, **64**(6), 697–709 (2023).
- [36] O.O. Voskresenskaya, N.A. Skorik, *Thermodynamics of the Formation of Intermediate Complexes in the Oxidation of Citric Acid by Cerium (IV) and Kinetics of Their Intramolecular Redox Decomposition*, Russian Journal of Physical Chemistry A, **97**(4), 663–671 (2023) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036024423040325>
- [37] N. Makhaldiani, *New Physics, p-Adic Nature of the Vacuum Energy, and Cosmological Constant*, Physics of Particles and Nuclei, **54**(6), 1053–1055 (2023) <https://doi.org/10.1134/S1063779623060199>

- [38] I. Hristov, R. Hristova, I. Puzynin, T. Puzynina, Z. Sharipov, Z. Tukhliev, *A Database of High Precision Trivial Choreographies for the Planar Three-Body Problem*, LNCS **13858**, 171–180 (2023), https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-32412-3_15
- [39] E. Ayryan, M. Hnatic, J. Honkonen, and V. Malyutin, Approximate Calculation of Functional Integrals Generated by Nonrelativistic and Relativistic Hamiltonians, *Symmetry*, **15**, 1785, Review, 1–39 (2023) <https://doi.org/10.3390/sym15091785>
- [40] E.A. Ayryan, M.M. Gambaryan, M.D. Malykh, L.A. Sevastyanov, *On Trajectories of Dynamic Systems Lying on Hypersurfaces of Linear Systems*, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, **20**, 183–187 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1547477123020097>
- [41] E.E. Perepelkin, B.I. Sadovnikov, N.G. Inozemtseva, I.I. Aleksandrov, R.V. Polyakova, and V.A. Panacik, *The Properties of the Third Vlasov Equation*, *Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei*, **54**(3), 683–710 (2023) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063779623030279>
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063779623030279>
- [42] B. Saha, *Spinor field in Bianchi type-II universe*, *Romanian Journ. Phys.*, **68**(1–2), p. 101 (18 pages) (2023)
- [43] B. Saha, *Spinor field in FLRW cosmology*, *Universe*, **9**(5), p. 243 (12 pages) (2023)
- [44] B. Saha, *Coordinate transformation and energy-momentum tensor of spinor field*, In *Proceedings of LIX All Russia Conference on Problems in Dynamics, Particle Physics, Plasma Physics and Optoelectronics*, Moscow, RUDN University, 22–26 May 2023, pp. 39–42 (2023) [23 1988 физика частиц.pdf](https://arxiv.org/abs/231988)
- [45] A.A. Gusev, G. Chuluunbaatar, O. Chuluunbaatar, S.I. Vinitzky, Yu.A. Blinkov, A. Deveikis, P.O. Hess, L.L. Hai, *Hermite interpolation polynomials on parallelepipeds and FEM applications*, *Mathematics in Computer Science* **17**, Article number: 18, 1–15 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11786-023-00568-5>
- [46] Gh. Adam, S. Adam, *A priori Knowledge Driven Input to Bayesian Two-Rule Automatic Adaptive Quadrature*, Invited lecture at TIM 22 Physics Conference, AIP Conf. Proceedings, in print (2023).
- [47] Gh. Adam and S. Adam, *The Pivotal Role of Input Validation for Robust and Reliable Bayesian Automatic Adaptive Quadrature*, 2023 International Conference on Advanced Scientific Computing – ICASC 2023 IEEE Catalog Number CFP23MWZ-ART, IEEE, ICASC58845, pp. 1–6 (2023) <https://doi.org/10.1109/ICASC58845.2023.10328030>
- [48] N.D. Dikusar, *Numerical solution of the Cauchy problem based on the basic element method*, *Mathematical Models and Computer Simulations*, **15**(6), 1024–1036 (2023) (English version); Н.Д. Дикусар, *Численное решение задачи Коши на основе метода базисных элементов*, *Матем. Моделирование* **35**(5), pp. 87–103 (2023) (Русский).
- [49] I. Hristov, R. Hristova, S. Dimova, P. Arnyanov, N. Shegunov, I. Puzynin, T. Puzynina, Z. Sharipov, Z. Tukhliev, *Parallelizing multiple precision Taylor series method for integrating the Lorenz system*, In: I. Georgiev, H. Kostadinov, E. Lilkova (eds), *Advanced Computing in Industrial Mathematics*, BGSIAM 2020, *Studies in Computational Intelligence* **1076**, 56–66 (2023), https://doi.org/10.1007/978-3-031-20951-2_6
- [50] T.M. Solovjeva, A.G. Soloviev, *Data analysis with parallel tools of ROOT*, Communication at the Conference Parallel Computational Technologies (PCT) 2023, March 28–30, 2023, ITMO Univ., St.-Petersburg, Russia.
- [51] K. Genser, Soon Yung Jun, A. Ribon, V. Uzhinsky, Ju. Yarba, *Optimizing Geant4 Hadronic Models*, e-Print: arXiv: 2309.12407 [hep-ex], <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.12407>
Contribution to: 26th International Conference on Computing in High Energy & Nuclear Physics (CHEP 2023) (Sep 21, 2023), <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2309/2309.12407.pdf>

- [52] A. Galoyan, A. Ribon, V. Uzhinsky, *Towards Study of Two-Particle P_T Correlations in Hadronic Interactions at NICA*, MDPI Physics **5**(3), 823–831 (2023) <https://doi.org/10.3390/physics5030052> Physics | Free Full-Text | Towards Study of Two-Particle P_T Correlations in Hadronic Interactions at NICA (mdpi.com) <https://www.mdpi.com/2624-8174/5/3/52>
- [53] A. S. Galoyan, V. M. Grichine, A. Ribon, and V. V. Uzhinsky, (on behalf of the Geant4 Hadronic Working Group), *Modeling the Production of Charmed Particles in the Geant4 Software*, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., **87**(8), 1143–1146 (2023) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873823702994> ; Russian text published in Izv. Ross. Akad. Nauk Ser. Fiz., **87**(8), 1125–1129 (2023)
- [54] V.V. Uzhinsky, A.S. Galoyan (on behalf of the Geant4 Hadronic Working Group), *Geant4 FTF Model Description of the NA61/SHINE Collaboration Data on Strange Particle Production in pp-Interactions*, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **87**(8), 1151–1154 (2023) <https://doi.org/10.3103/S106287382370301X> Russian Text published in Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Fizicheskaya, 2023, Vol. 87, No. 8, 1135–1138.
- [55] A. Galoyan, A. Ribon, V. Uzhinsky (on behalf of the Geant4 hadronic physics working group), *Geant4 FTF Model Description of the Latest Data by the NA61/SHINE Collaboration on $^{40}\text{Ar} + ^{45}\text{Sc}$ Interactions*, Physics of Particles and Nuclei, **54**(4), 647–650 (2023); Russian text published in Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, **54**(4), 803–809 (2023) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063779623040159>
- [56] I. Satyshev in TAIGA collaboration, *Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays According to the Data of the TAIGA Astrophysical Complex*, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, **87**(7), 1043–1045 (<https://doi.org/10.3103/S1062873823702362>)
- [57] I. Satyshev in TAIGA collaboration, *Main Results from the TUNKA-GRANDE Experiment*, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, **87**(7), 893–899 (<https://doi.org/10.3103/S1062873823702799>)
- [58] I. Satyshev in TAIGA collaboration, *Energy Spectrum of Gamma Rays from the Crab Nebula, According to Data from the TAIGA Astrophysical Complex*, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023, **87**(7), 904–909 (<https://doi.org/10.3103/S1062873823702738>)
- [59] I. Satyshev in TAIGA collaboration, *Detection of TeV Emission from the Crab Nebula Using the First Two IACTs in TAIGA in Stereo Mode of Observation*, Physics of Atomic Nuclei, 2023, **86**(4), pp. 483–488, (<https://doi.org/10.1134/S1063778823040385>)
- [60] I. Satyshev in TAIGA collaboration, *Scintillation Experiment on the Study of Cosmic Rays and Gamma Fluxes in the Tunka Valley*, Physics of Atomic Nuclei., 2023, **86**(4), 478–482 (<https://doi.org/10.1134/S1063778823040221>)
- [61] I. Satyshev in TAIGA collaboration, *The TAIGA – a Hybrid Detector Complex in Tunka Valley for Astroparticle Physics, Cosmic Ray Physics and Gamma-Ray Astronomy*, Phys. Atom. Nucl. **86**(4) (2023), 471–477 (<https://doi.org/10.1134/S1063778823040051>)
- [62] E. Alexandrov, I. Alexandrov, A. Chebotov, K. Gertsenberger, I. Filozova, D. Priakhina, G. Shestakova, *Configuration Information System for online processing and data monitoring in the NICA experiments*, Journal of Physics: Conference Series **2438**, 012019 (2023), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2438/1/012019>
- [63] E. Alexandrov, I. Alexandrov, A. Chebotov, A. Degtyarev, I. Filozova, K. Gertsenberger, P. Klimai, A. Yakovlev, *Implementation of the Event Metadata System for physics analysis in the NICA experiments*, Journal of Physics: Conference Series **2438**, 012046 (2023), <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2438/1/012046>
- [64] D. Baranov, M. Kapishin, P. Senger, V. Vasendina, A. Zinchenko, *A Monte Carlo Simulation of the BM@N Detector Performance for Strangeness Production Studies in Heavy-Ion Interactions*, Physics of Particles and Nuclei, **54**(4), 651–655, (2023)

[65] D. Baranov, *Modeling a Track Detector Based on the Three-Stage GEM Chambers for the First Physics Session of the BM@N Experiment*, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, **87**(8), pp. 1162–1165 (2023) <https://doi.org/10.3103/S1062873823703033> ; Russian Text published in Izv. Ross. Akademii Nauk, Seriya Fizicheskaya, **87**(8), 1146–1150 (2023)

[66] V. Lenivenko, V. Palichik, and M. Patsyuk, *Reconstruction of Simulated and Experimental Data in Coordinate Detector Systems of SRC Experimental Setup at BM@N*, Physics of Particles and Nuclei Letters, **20**(6), 1403–1408 (2023) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477123060237>

[67] BM@N Collaboration [J.J. Musulmanbekov, I.N. Alexandrov, E.I. Alexandrov, N.N. Voitishin, O.I. Streltsova, D. Podgainsky, D. Baranov, M. Zuev, I.S. Pelevanyuk, I.A. Filozova, et.al.], *Production of π^+ and K^+ mesons in argon-nucleus interactions at 3.2 AGeV*, JHEP, **07**, 174 (27 pp.) (2023) [https://doi.org/10.1007/JHEP07\(2023\)174](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2023)174) [https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP07\(2023\)174](https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP07(2023)174)

[68] E.P. Akishina, E.I. Alexandrov, I.N. Alexandrov, A.I. Chebotov, I.A. Filozova, K.V. Gertsenberger, V.V. Ivanov, *Current status of the Geometry Database for the BM@N experiment*, <https://indico.jinr.ru/event/3531/contributions/20563/attachments/15427/26143/10colabration.pdf> (2023)

[69] E. Alexandrov, I. Alexandrov, A. Chebotov, I. Filozova, K. Gertsenberger, D. Priakhina, G. Shestakova, A. Yakovlev, *Development of the Online Configuration System for the Next BM@N Run*, *10th Collaboration Meeting of the BM@N Experiment at the NICA Facility, St Petersburg, 14-19 May, 2023* (2023)

[70] D. Baranov, *Status: Configuration of the tracking detector for RUN 8*, 10th Collaboration Meeting of the BM@N Experiment at the NICA Facility May 14–19, 2023 https://lit.jinr.ru/sites/lit.jinr.ru/files/pdf/BARANOV_presentation_BmnColl10th.pdf

[71] J. Busa Jr, A. Bychkov S. Hnatic, A. Krylov, V. Krylov, O. Rogachevsky, *MPD Data Lab: Towards the Modern Data Analysis Framework for the MPD Experiment*, presentation at the 25th International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems “Relativistic Nuclear Physics & Quantum Chromodynamics”, <https://indico.jinr.ru/event/3694/contributions/22453/attachments/16793/28612/NewDevelopmentsInMPDDataAnalysisFramework.pdf>

Accepted for publication in Proceedings of the 25th International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems “Relativistic Nuclear Physics & Quantum Chromodynamics”, PEPAN (2023)

[72] D. Oleynik, *SPD Online filter. Система первичной обработки данных эксперимента SPD*, Scientific Seminar MLIT, 20.12.2023, <https://indico.jinr.ru/event/4240/>

[73] A. Petrosyan, *Distributed Storage and Computing Environment for the SPD Experiment*, Scientific Seminar MLIT, 20.12.2023, <https://indico.jinr.ru/event/4240/>

[74] G. Amirkhanova, M. Mansurova, G. Ososkov, N. Burtebayev, A. Shomanov, M. Kunelbayev, *Algorithm for Enhancing Event Reconstruction Efficiency by Addressing False Track Filtering Issues in the SPD NICA Experiment*, Algorithms, **16**, 312, 1–19 (2023). <https://doi.org/10.3390/a16070312>

[75] D. Rusov, P. Goncharov, A. Zhemchugov, G. Ososkov, *Deep Tracking for the SPD Experiment*, Phys. Part. Nuclei Lett. **20**, 1180–1182 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1547477123050655> Available online at: <https://doi.org/10.1134/S1547477123050655> [Deep Tracking for the SPD Experiment \(springer.com\)](https://www.springer.com)

[76] M. Borisov, G. Ososkov, *Deep Learning Applications for Traffic Sign Detection and Classification*, Phys. Part. Nuclei Lett., **20**(5), 1279–1282 (2023)

[77] A. Nikolskaya, P. Goncharov, G. Ososkov, D. Rusov, D. Starikov, *Point Cloud Transformer for elementary particle signals segmentation*, Presentation at Grid2023 Conference, <https://indico.jinr.ru/event/3505/contributions/21751/>, in print to Phys. Part. Nuclei Lett., 2023

[78] V. V. Shalaev and S. V. Shmatov, *Physics of the Standard Model in the CMS Experiment at the LHC*, Physics of Particles and Nuclei, **54**(3), 425–428 (2023) Russian Text 2023, published in Fizika Elementarnykh Chastits i Atomnogo Yadra, 2023, Vol. 54, No. 3.

[79] И.Н. Горбунов, В.В. Шалаев, С.В. Шматов, *Оценка влияния эффектов высших порядков КХД на значения угловых поляризационных коэффициентов в процессе Дрелла-Яна в условиях LHC, ЭЧАЯ*, Принято к публикации в журнале ЭЧАЯ Статья, 2023

[80] K. Slizhevskiy, M. Savina, S. Shmatov, *Search for Dark Matter Produced in Association with a Leptonically Decaying Z Boson with the CMS Experiment at the LHC*, Ядерная Физика, 1063-7788(eng), принято к публикации в ЯФ, №6 (2023)

[81] A. A. Hayrapetyan, M. V. Savina, S. V. Shmatov, and A. R. Tumasyan, *Search for Dark Matter Produced in Association with the Standard Model Higgs Boson in pp Collisions at 13 TeV in the CMS (LHC) Experiment*, ЭЧАЯ, **55**(1), pp. 132-136, (2024)

[82] D. Barberis, I. Aleksandrov, E. Alexandrov, Z. Baranowski, L. Canali, E. Cherepanova, G. Dimitrov, A. Favareto, A.F. Casani, E.J. Gallas, C.G. Montoro, S. Gonzalez de la Hoz, J. Hrivnac, A. Iakovlev, A. Kazymov, M. Mineev, F. Prokoshin, G. Rybkin, J. Salt, J. Sanchez, R. Sorokoletov, R. Toebicke, P. Vasileva, M. Villaplana Perez, R. Yuan, *The ATLAS EventIndex: a BigData catalogue for all ATLAS experiment events*, Computing and Software for Big Science **7**, 2 (2023),

<https://arxiv.org/pdf/2211.08293.pdf>; <https://doi.org/10.1007/s41781-023-00096-8> [All authors contributed to the development of the EventIndex software and system operations.]

[83] M. Mineev, A. Formica, N. Ozturk, S. Roe, V. Tsulaia, M. Vogel, E. Alexandrov, *Evolution of the ATLAS CREST conditions DB project*, ATLAS Collaboration [10th International Conference "Distributed Computing and Grid Technologies in Science and Education"](#), Dubna, 3–7 Jul 2023, Imprint 21 Sep 2023 – 5 pp. [Evolution of the ATLAS CREST conditions DB project - CERN Document Server](#) (2023)

[84] V.V. Uzhinsky in PANDA Collaboration, *Hyperon signatures in the PANDA experiment at FAIR*, e-Print: 2304.11977 [nucl-ex], (Apr 24, 2023) (2023)

[85] А. Г. Соловьев, Т. М. Соловьева, А. И. Куклин, М. Балашою, *Разработка веб-приложения для фитирования данных спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов*. In: Parallel Computing Technologies (PaVT'2023), Chelyabinsk, SUSU Publishing Center, 206–214, (2023). Available at: [Paper](#) (in Russian)

[86] A. G. Soloviev, T. M. Solovjeva, M. Balaşoiu, A. I. Kuklin, *Development of a Web Application for Fitting the Data of a Small-Angle Neutron Scattering Spectrometer*, Communication at the Conference Parallel Computational Technologies (PCT) 2023, March 28–30, 2023, ITMO Univ., St.-Petersburg, Russia.

[87] D. Neov, A.I. Beskrovnyi, A.S. Abiyev, D.M. Mirzayeva, E. Demir, A.H. Valizade, T.T. Hlatshwayo, T.T. Thabethe, O.A. Samedov, R.N. Mehdiyeva, K. Hasanov, Z.A. Sharipov, A.S. Doroskevich, F. Mamedov, *Effects of helium ion irradiation on Tungsten-based composites: neutron diffraction; as a real-time diffractometer*, Advanced Physical Research, **5**(2), 95–102 (2023)

https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/92685/Neov_Effects_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[88] A.G. Solovjev in Baikal-GVD Collaboration, *Diffuse neutrino flux measurements with the Baikal-GVD neutrino telescope*, Phys. Rev. D, **107**(4), 042005 (8 pp.) (2023) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.107.042005>

[89] A.G. Solovjev in Baikal-GVD Collaboration, *Search for directional associations between baikal gigaton volume detector neutrino-induced cascades and high-energy astrophysical sources*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **526**(1), 942–951 (2023) <https://doi.org/10.1093/mnras/stad2641>

- [90] A.G. Solovjev in Baikal-GVD Collaboration, *Results from Reconstructing a Neutrino in the Track Channel at the Deep-Water BAIKAL-GVD Telescope*, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **87**(7), 925–928 (2023) <https://doi.org/10.3103/S1062873823702726>
- [91] A.G. Solovjev in Baikal-GVD Collaboration, *Tracking IceCube Neutrino Alerts with the Deep-Water BAIKAL-GVD Telescope*, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **87**(7), 922–924 (2023) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873823702714>
<https://link.springer.com/article/10.3103/S1062873823702714>
- [92] A.G. Solovjev in Baikal-GVD Collaboration, *Status of the Baikal-GVD Neutrino Telescope and Main Results*, Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **87**(7), 1059–1062, (2023) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873823702817>
- [93] Yu.S. Tsyganov, D. Ibadullayev, A.N. Polyakov, A.A. Voinov, M.V. Shumeiko, V.A. Shubin, V.B. Zlokazov, D.A. Kuznetsov, *Review of some specific features of the detecting of heavy recoils*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.13344>
- [94] М. Зуев, *Суперкомпьютер «Говорун» для задач ОИЯИ*, доклад на внеочередной семинар ОМУС, March 22, 2023, <https://disk.jinr.ru/index.php/s/PB9trmtdXK3M9jx>
- [95] O.I. Streltsova, *HybriLIT platform as an ecosystem for performing computations and elaborating new IT solution*, Scientific Seminar MLIT, 19.12.2023, <https://indico.jinr.ru/event/4224/>
- [96] I.R. Rahmonov, A.R. Rahmonova, O.I. Streltsova, M.I. Zuev, *Python-инструментарий для моделирования динамики джозефсоновского перехода под воздействием внешнего излучения*, (22 pp.) [Python-инструментарий для моделирования динамики джозефсоновского перехода под воздействием внешнего излучения — HLIT Jupyter book \(jinr.ru\) http://studhub.jinr.ru:8080/jibook/Part01.html](http://studhub.jinr.ru:8080/jibook/Part01.html) (2023)
- [97] A.R. Rahmonova, A.S. Vorontsov, A.V. Nechaevskiy, I.R. Rahmonov, M.V. Bashashin, M.I. Zuev, O.I. Streltsova, Y.A. Butenko, *Welcome to HLIT Jupyter Book* (in Russian), <http://studhub.jinr.ru:8080/books/intro.html> Electronic publication: [Семинар: инструментарий на Python для решения научных и прикладных задач](#)
- [98] М.В. Башашин, Е.В. Земляная, А.В. Волохова, *Практический анализ возможностей инструментария Python для ресурсоёмких вычислений на примере задачи расчёта вольтамперных характеристик в системе длинных джозефсоновских переходов*. Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (Москва, РУДН, 17–21 апреля 2023 г.) — Москва: РУДН, 2023, сс. 167–170
- [99] A.V. Nechaevskiy, O.I. Streltsova, K.V. Kulikov, M.V. Bashashin, Yu.A. Butenko, M.I. Zuev, *Development of a computational environment for mathematical modeling of superconducting nanostructures with a magnet*, Computer Research and Modeling, **15**(5), 1349–1358 (Russian) (2023). DOI: <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2023-15-5-1349-1358>
URL: <http://crm-en.ics.org.ru/journal/article/3398/>
- [100] O. Bakina, D. Baranov, I. Denisenko, P. Goncharov, A. Nechaevskiy, Yu. Nefedov, A. Nikolskaya, G. Ososkov, D. Rusov, E. Shchavalev, S. S. Sun, L. L. Wang, Y. Zhang, A. Zhemchugov, *Deep learning for track recognition in pixel and strip-based particle detectors*, Journal of Instrumentation, **17**, no. 12, p. 12023, (December 28, 2022)
[Deep learning for track recognition in pixel and strip-based particle detectors - IOPscience https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/12/P12023/pdf](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/17/12/P12023/pdf)
- [101] V. Papoyan, A. Aparin, A. Ayriyan, H. Grigorian, A. Korobitsin, and A. Mudrokh, *Machine Learning Application for Particle Identification in MPD*, Physics of atomic nuclei, **86**(5), 869–873 (2023) <https://doi.org/10.1134/S1063778823050332>
- [102] A. Uzhinskiy, K. Vergel, *Central Russia heavy metal contamination model based on satellite imagery and machine learning*, Computer Optics **47**, 1, 137–151 (2023), DOI: <https://www.doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1149>

- [103] A. Uzhinskiy, *Advanced Technologies and Artificial Intelligence in Agriculture*, AppliedMath, 3, 799–813 (2023). <https://www.mdpi.com/2673-9909/3/4/43/pdf?version=1698808280>
- [104] A.S. Zaytsev, D.S. Zaytseva, S.A. Zaytsev, L.U. Ancarani, O. Chuluunbaatar, K.A. Kouzakov, Yu.V. Popov, *Single ionization of helium by protons of various energies in the parabolic quasi-sturmians approach*, Atoms **11**, 124–1–15 (2023). <https://doi.org/10.3390/atoms11100124>
- [105] A.A. Gusev, O. Chuluunbaatar, V.L. Derbov, R.G. Nazmitdinov, S.I. Vinitisky, P.W. Wen, C.J. Lin, H. M. Jia, L. L. Hai, *Symbolic-Numerical Algorithm for Solving the Problem of Heavy Ion Collisions in an Optical Model with a Complex Potential*, in: Boulier, F., England, M., Kotsireas, I., Sadykov, T.M., Vorozhtsov, E.V. (eds) Computer Algebra in Scientific Computing. CASC 2023. Lecture Notes in Computer Science, LNCS **14139**, 128–140 (2023) Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41724-5_7
- [106] M. Bashashin, E. Zemlyanaya, I. Rahmonov, *Parallel simulation of the magnetic moment reversal within the φ_0 -Josephson junction model*, Physics of Particles and Nuclei Letters, **20**, No. 5, 1157–1160 (2023)
- [107] М.И. Зуев, С.И. Сердюкова, *Численный метод оценки скорости роста ошибок округления в равномерной метрике*, ЖВМ и МФ, **63**(9), 1438–1445 (2023) <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=vychmat&y=2023&v=63&n=9&a=VychMat2308017Zuev>
- [108] J. Busa Sr., V. Andonov, S. Poryazov, E. Saranova, *Numerical solution of a system of equations arising in telecommunication system modeling*, Mathematical Modeling, **7**(3), 80–82 (2023)
- [109] M. Balakin, S. Belov, P. Zrelov, *Simple journal adviser for scientific articles*, Physics of Particles and Nuclei Letters, (Accepted 2023)
- [110] S.D. Belov, P.V. Zrelov, A.V. Ilina, V.V. Korenkov, V.A. Tarabrin, *Use of neural network language models to study the demand for professional competencies of higher education in the labor market*, System analysis in science and education, **2023**(3), 13–25 (in Russian). Available from: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/585>
- [111] S. Belov, A. Ilina, V. Korenkov, V. Tarabrin, P. Zrelov, *Exploring the relevance of educational skillset in the labor market through natural language processing techniques*, PEPAN, accepted (2023)
- [112] O.V. Tarasov, *Calculation of One-Loop Integrals for Four-Photon Amplitudes by Functional Reduction Method*, Phys. Part. Nucl. Lett., **20**(3), 287–291 (2023) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477123030676>
- [113] V.V. Kornyak, *Complementarity in Finite Quantum Mechanics and Computer-Aided Computations of Complementary Observables*, Programming and Computer Software, **49**, No. 5, pp. 423–432 (2023). Russian Text in Programmirovaniye, **49**(5), 59–69 (2023).
- [114] V.V. Kornyak, *Constructive Versions of Quantum Mechanics*, Polynomial Computer Algebra 2023 April 17-22, 2023, Euler International Mathematical Institute, St. Petersburg, Russia, <https://pca-pdmi.ru/2023/files/9/KornyakSlidesSPB2023.pdf> ; Vladimir Kornyak. "Constructive Versions of Quantum Mechanics" (youtube.com) <https://www.youtube.com/watch?v=2WTmi803OGw>
- [115] В.В. Корняк, *Описание эволюции конечномерных квантовых систем группами перестановок*, Записки научных семинаров ПОМИ, **528**, 134–152 (2023)
- [116] A. Khvedelidze, *Generalizing Stratonovich–Weyl Axioms for Composite Systems*, Physics of Particles and Nuclei Letters, **54**, no. 6, 1025–1028 (2023)
- [117] A. Khvedelidze, A. Torosyan, *On the hierarchy of classicality and symmetry of quantum states*, Published in Записки научных семинаров ПОМИ, **528**, 238–260 (2023)
- [118] V.I. Yukalov, E.P. Yukalova and V.S. Bagnato, *Trapped Bose-Einstein condensates with nonlinear coherent modes*, Laser Physics, **33**, 123001(1–29), Review (2023) <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1555-6611/ad04c1/pdf>

- [119] V.I. Yukalov and E.P. Yukalova, *Discrete versus continuous algorithms in dynamics of affective decision making*, Algorithms **16**, 416–421 (2023) <https://doi.org/10.3390/a16090416>
- [120] P.V. Zrelov, D.P. Zrelova, M.S. Katulin, V.V. Korenkov, A.G. Reshetnikov, S.V. Ulyanov, *Quantum IT-engineering in the tasks of intelligent control of physical systems*, ЭЧАЯ, to be published in “PEPAN” in 2024
- [121] Yu.G. Besspalov, P.V. Zrelov, M.S. Katulin, D.V. Neapolitanskiy, A.G. Reshetnikov, S.V. Ulyanov, *Formation of knowledge bases of fuzzy regulators based on the physical training signal of a nitrogen cryogenic plant using a genetic algorithm*, ЭЧАЯ, to be published in “PEPAN” in 2024
- [122] P.V. Zrelov, D.N. Nikiforov, A.G. Reshetnikov, S.V. Ulyanov, *Quantum intelligent control of nitrogen pressure in a cryogenic facility of magnet plant test bench*, ЭЧАЯ, to be published in “PEPAN”, in 2024
- [123] P.V. Zrelov, O.V. Ivantsova, M.S. Katulin, A.G. Reshetnikov, N.V. Ryabov, S.V. Ulyanov, *Simulation of the quantum fuzzy inference of the intelligent control system for cooling the current leads of the booster of the NICA accelerator complex*, ЭЧАЯ, to be published in “PEPAN” in 2024
- [124] Д.П. Зрелова, О.Ю. Тятюшкина, С.В. Ульянов, *Физические основы квантовых сквозных ИТ в Индустрии 5.0 / 6.0 и интеллектуальном когнитивном управлении: стохастическая механика, информационная геометрия, квантовая информационная физика / термодинамика, Системный анализ в науке и образовании*, **1**, 95–141 (2023) <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/565>
- [125] С.В. Ульянов, А.Г. Решетников, Д.П. Зрелова, *ИТ прикладных квантовых мягких вычислений: программно-аппаратная платформа робастных интеллектуальных контроллеров в робототехнике*, Современные информационные технологии и ИТ-образование, **19**(2), (2023) Available at: <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/931>
- [126] A. A. Shevchenko (Mamaeva), A. V. Schevchenko, S. V. Ulyanov, D. P. Zrelova, *Cognitive robust control system based on quantum fuzzy inference algorithm in unconventional intelligent robotics*, Нечеткие системы и мягкие вычисления, **18**(1), 28–46 (2023) <https://doi.org/10.26456/fssc93> <http://mi.mathnet.ru/fssc93>
- [127] А.В. Бутенко, П.В. Зрелов, В.В. Кореньков, С.А. Костромин, Д.Н. Никифоров, А.Г. Решетников, С.В. Семашко, Г.В. Трубников, С.В. Ульянов, *Интеллектуальная система дистанционного управления давлением и расходом жидкого азота в криогенной системе сверхпроводящих магнитов: программно-аппаратная платформа*, Письма в ЭЧАЯ **20**, 2(247), 183–199 (2023); English Text published in Physics of Particles and Nuclei Letters, **20**(2), 172–182 (2023)