

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Дусаев Ренат Рамильевич

**Программный комплекс
для физической реконструкции и анализа событий
в экспериментах с триггерной системой**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный Исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Любовицкий Валерий Ефимович

доктор физ.-мат. наук, профессор, ФГАО ВО НИ ТПУ, профессор отделения математики и математической физики Инженерной школы ядерных технологий

Официальные оппоненты:

Иванченко Владимир Николаевич

доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории анализа данных физики высоких энергий Физического факультета ФГАО ВО НИ ТГУ

Ладыгин Владимир Петрович

доктор физико-математических наук, начальник Отделения №2 Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ.

Защита состоится «24» декабря 2025 в 15.00 на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.01 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, Томск, пр. Ленина 43, 122 ауд.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.01
доктор физико-математических наук

A stylized handwritten signature in blue ink, consisting of a large loop and a trailing flourish.

Е.Б. Кашкаров

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последние десятилетия значительное внимание уделяется экспериментам, направленным на поиск слабовзаимодействующих частиц, чья природа выходит за рамки Стандартной модели. Как правило, такие исследования требуют либо достаточно высоких энергий, либо накопления большой статистики измерений в среднем энергетическом диапазоне. В последнем случае широко применяются экспериментальные установки с герметичным сбросом пучка, в которых первичные частицы поглощаются массивной мишенью, а поиск редких событий производится на основе большой статистики наблюдений. В такой процедуре решающее значение имеют точность реконструкции физических величин и надёжность оценки фоновых процессов.

Средства автоматизации эксперимента, во многом обеспечивающие требуемые точность и надёжность, разрабатываются в условиях высокой динамики требований и ограниченного жизненного цикла. После завершения исследовательской программы они, как правило, утрачивают практическую ценность как целостное решение, тогда как отдельные компоненты остаются пригодными для повторного использования. Последнее обстоятельство требует целенаправленной стратегии разработки программного обеспечения, предполагающей переносимость и интеграцию этих средств. Такая стратегия опирается на ограниченный набор особенностей, выбираемых на этапе проектирования информационных систем с учётом специфики предметной области. Например, использование триггерной системы предполагает статистическую независимость физических событий.

Объектом исследования являются методы и программные средства организации вычислительных процессов в задачах реконструкции и анализа данных физических экспериментов. Предметом исследования являются архитектурные и алгоритмические принципы построения вычислительных процедур реконструкции и анализа событий эксперимента NA64¹, направленного на поиск новых слабовзаимодействующих частиц, из которых в работе рассматриваются лёгкий аксион-подобный бозон a [1] и т.н. тёмный фотон A' [2; 3].

Степень разработанности темы. В работах, посвящённых программному обеспечению для научных исследований в целом и автоматизации физических экспериментов в частности, часто подчёркиваются отличия от классических моделей разработки, требующие глубокого погружения в предметную область и ограничивающие применимость стандартных подходов к проектированию программного обеспечения принятых в индустрии. Несмотря на значительные усилия по созданию общих решений и программных сред,

¹Эксперимент назван по внутренней номенклатуре CERN: «North Area № 64»

определяющих степень разработанности темы исследования, специфика экспериментальной физики, связанная с уникальностью конкретной установки, зачастую не позволяет полагаться на классические каскадные подходы. В результате исследовательские группы реализуют решения, исходя из текущих потребностей, действуя в рамках гибких методологий разработки и формируя собственную программную базу, привязанную к локальным задачам. Экспертным сообществом отмечается, что это нередко приводит к дублированию функциональности и затрудняет долговременное сопровождение. В результате такой избыточной специализации перенос и внедрение уже разработанных программ в новые задачи оказываются зачастую менее оправданными, чем их повторная реализация. Тем не менее такой подход остаётся преобладающим и описывается как общеупотребимая практика, предполагающая индуктивный переход от ситуативных решений к более общим системам.

Целью данной работы является разработка программного комплекса для экспериментальной физики частиц, обеспечивающего сопровождение эксперимента на различных этапах его жизненного цикла, включая моделирование, набор данных, калибровку детекторов, реконструкцию и анализ событий.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Разработать спецификацию программной архитектуры, обеспечивающую основные задачи автоматизации физического эксперимента в рамках архитектурных ограничений, присущих экспериментам с логическим триггером;
2. Реализовать архитектуру в виде обобщённых программ и алгоритмов, не подразумевающих специфику конкретного эксперимента;
3. Валидировать предложенные обобщённые решения, применив их для синтеза программ, решающих конкретные задачи реконструкции и анализа событий NA64;
4. Разработать и интегрировать в существующее специализированное программное окружение генератор событий для моделирования отклика установки на сигнальные события;
5. Разработать и интегрировать систему генерации динамических машин состояния для выбора гипотез в задачах оптимизации, часто возникающих в рамках реконструкции физического события;
6. Верифицировать предложенные реализации, применив к различным этапам жизненного цикла эксперимента, включая Монте-Карло моделирование, сопровождение набора данных, калибровку детекторов, реконструкцию событий и анализ.

При разработке и апробации программного комплекса необходимо учитывать и, где это возможно, внедрять существующую алгоритмическую базу.

Научная новизна:

1. Впервые для программных средств сопровождения физического эксперимента обосновано применение статического полиморфизма на основе объектных моделей при синтезе программной архитектуры для последовательной обработки событий.
2. Впервые предложена эффективная алгоритмическая реализация генератора событий для симуляции рождения тёмного фотона в приближении спектра эквивалентных фотонов Вайцеккера-Вильямса.
3. Впервые установлены верхние пределы на фундаментальные характеристики аксион-подобного бозона — массу m_a и константу взаимодействия с парой фотонов $g_{a\gamma\gamma}$ в реакции $e^- + Z \rightarrow e^- + Z + a$ (рассеяние электронов на ядре с зарядом Z) для уровня статистической значимости $\alpha = 0,1$.

Практическая значимость предложенных решений:

- Разработано специализированное программное окружение для решения ключевых задач реконструкции событий в экспериментах физики высоких энергий, включая обработку данных трековых детекторов и калориметров;
- Архитектурные инварианты и реализованные механизмы расширения программного комплекса нацелены на разработку в рамках коротких циклов и допускают упрощённую интеграцию с другими экспериментами, построенными на триггерной логике (включая общие конфигурации системы калориметров, трековые подсистемы, системы сбора данных), снижая затраты на сопровождение и повторное использование программного кода и, таким образом, отвечая основным задачам автоматизации физического эксперимента;
- Метод параметрической реконструкции сигналов калориметров, опирающийся на применение конкурирующих гипотез о пространственном распределении энерговыделения в событии, повышает численную устойчивость алгоритмов реконструкции физических величин, включающих временные и амплитудные характеристики, при разных частотах дискретизации и геометриях сэмплирующих калориметров;
- Генератор случайных величин на основе аналитических сечений предназначен для получения численных оценок выхода сигнального процесса в сценариях поиска слабовзаимодействующих частиц. Применение мажорирующих функций обеспечивает более высокое принципиальное быстродействие генератора по сравнению с общими методами во всей кинематической области продуктов реакции.

Методология и методы исследования. С учётом сложившихся в науке практик создания компьютерных программ прикладного уровня целесообразно рассмотреть некоторые подходы промышленной инженерии программного обеспечения, учитывающие специфику предметной области и направленные на инкрементную модель разработки. Таким требованиям вполне отвечают т. н. гибкие (англ. *Agile*) методологии разработки, многие из которых ставят приоритетом обеспечение высокой доступности решений в рамках кратковременных циклов разработки.

На уровне конкретных технических средств необходимо учесть требования, предъявляемые не только к длительности цикла разработки, но и к быстродействию самих программ. Последнее условие значительно сужает круг доступных выразительных средств, заставляя разработчиков прибегать к сравнительно низкоуровневым решениям, в рамках которых недостаток выразительности компенсируется за счёт высокой идиоматизации (метапрограммирование, шаблоны, предметно-специфичные языки) и инкапсуляции оптимизированных решений в рамках упрощённого программного интерфейса.

Апробация реализованных технических решений осуществляется в рамках конкретного эксперимента, чья постановка имеет глубокое методическое обоснование. Она относится к семейству экспериментов с герметичным сбросом пучка. Методика измерений включает поиск редких событий по сигнатуре недостающей энергии, а также регистрацию энерговыделения за массивным поглотителем. Статистическая интерпретация наблюдений формулируется с использованием метода CLs, последовательно изложенного как в частотной, так и в байесовской интерпретациях вероятности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В рамках требований модульности, переносимости, логической изолированности и производительности компонент программного обеспечения, предполагающих инкрементную модель разработки, среди известных поведенческих шаблонов проектирования конвейерный шаблон проектирования, выраженный в парадигме обобщённого программирования и параметризуемый типом статистически независимых событий, наилучшим образом отвечает организации компьютерных программ, предназначенных для физической реконструкции и анализа событий.
2. Для сегментированного гетерогенного калориметра, набранного из слоёв свинца и полиметилметакрилата (1,5 мм и 1,55 мм), с поперечным размером ячеек, сопоставимым с радиусом Мольера ($38,2$ мм и $R_M = 18$ мм), метод наименьших квадратов, опирающийся на апостериорную оценку свёртки профиля пучка и электромагнитного ливня, уточняемую итеративно, обладает достаточной численной устойчивостью для

сходимости в рамках рекурсивной процедуры калибровки, обеспечивая энергетическое разрешение на уровне проектных значений (5 ГэВ без учёта эффектов координатной неоднородности) и линейность не хуже $k = 1,002 \pm 0,023$.

3. Для реакции $e^- + Z \rightarrow e^- + Z + a$ в эксперименте с герметичным сбросом пучка на свинцовой мишени не обнаружено статистически значимых событий (при уровне значимости $\alpha = 0,1$) образования аксион-подобных частиц в диапазоне масс m_a от 10 МэВ до 100 МэВ и константы взаимодействия $g_{a\gamma\gamma}$ от 2×10^{-4} до 10^{-2} .

Личный вклад. Проектирование и реализация всех изложенных в работе программ, за исключением описанных в разделе «Существующие программные решения», выполнены автором самостоятельно.

Алгоритмическая и программная реализация генератора A' , лежащая в основе [1; 3; 4], выполнена автором на основе существующих оценок сечения, в то время как тестирование генератора выполнялось с соавторами.

Обобщённая реализация алгоритма поиска треков выполнена автором на основе существующего описания алгоритма, с собственными дополнениями. Тестирование и подстройка параметров выполнялись в сотрудничестве с участниками коллаборации NA64.

Автором предложен и реализован метод реконструкции сигналов сэмплирующих аналого-цифровых преобразователей на основе подгонки функции отклика в конечной временной области, в формализме элементов обобщённого поведения для отбора конкурирующих гипотез, а также метод калибровки электромагнитного калориметра на основе метода наименьших квадратов, дополненного апостериорными оценками свёртки профиля ливня и профиля пучка. Экспериментальная проверка алгоритма калибровки, настройка алгоритма реконструкции сигналов и подбор параметров реконструкции трека выполнялись в сотрудничестве с участниками коллаборации NA64.

Личный вклад автора в анализ данных по поиску аксион-подобных частиц, опубликованный в [1; 2], состоит в статистическом обосновании критерия отбора фоновых событий, моделировании и выделении исключённой области отсутствия сигнала на основе анализа, выполненного участниками коллаборации NA64.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных изданиях, 4 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Апробация работы. Основные результаты исследований работы представлены на следующих конференциях:

1. Дусаев, Р. Универсальная объектная модель для систем численных математических расчётов [Текст] // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов IX Международной конференции студентов и молодых ученых. — Томск : ТПУ, 04.2012. — С. 709—711. — URL: http://conf-prfn.org/Arch/Proceedings_2012.pdf.
2. Дусаев, Р. Software Infrastructure for Fast Data Analysis in NA64 Experiment [Постерный доклад] // Международная конференция-школа «Проблемы обработки, анализа и управления Большими Данными в распределённой гетерогенной компьютерной среде для высокоинтенсивных областей науки и бизнес приложений» — Томск : ТПУ, Декабрь, 2016.

Достоверность физических результатов обеспечена применением статистически обоснованных методов экспериментальной физики, включая метод выделения исключённой области на основе консервативных верхних пределов и слепой метод анализа. Предложенные методические рекомендации валидированы практически на актуальных задачах эксперимента NA64.

Содержание работы

Во введении излагается актуальность объекта исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена разработке спецификаций, предложению и обоснованию архитектурных решений, обеспечивающих варианты использования программного комплекса.

В разделе 1.1 описываются релевантные методологии разработки программного обеспечения, излагаются основные требования к ним, обосновываются черты гибридного подхода. Уточняется основная терминология, используемая в работе далее: виды полиморфизма, точка расширения, архитектурные инварианты, использование шаблонов C++ для реализации статического полиморфизма.

В соответствии с предложенной методологией в разделе 1.2 фиксируется специфика предметной области, включающая логический триггер и модель события, а в разделе 1.3 кратко излагаются основные этапы жизненного цикла эксперимента с точки зрения программного обеспечения, включающие сценарии использования, сведённые в иерархию, в основу которой положены этапы анализа, сопровождения набора данных и калибровки детекторов. Такие аспекты

системы, как модульность, детерминированность вычислений и изолированность компонент, постулируются в качестве инвариантных свойств предлагаемой системы. Аргументируется необходимость выведения модели события и номенклатуры детекторов в точки расширения.

Раздел 1.4 завершает выведение основных архитектурных ограничений и предлагает использование шаблонов проектирования «конвейер», «издатель–подписчик» и «фабрика» в качестве механизма, обеспечивающего инвариантные свойства программного комплекса, а также выделяет основные качества коллекций дочерних элементов в рамках объектной модели события. Раздел 1.5 перечисляет существующие программные решения — общие окружения и инфраструктуры, а также ряд популярных инструментов прикладного уровня. Глава завершается разделом 1.6, содержащим итоговые спецификации для организации программного комплекса.

Вторая глава посвящена описанию эксперимента NA64 с целью получения предварительных численных оценок и сведению обобщённых реализаций к конкретным программам (инстанцированию шаблонов). Раздел 2.1 описывает процессы рождения a и A' в рамках феноменологической модели, основанной на эффективных лагранжианах. На основе приближения спектра эквивалентных фотонов получено дифференциальное сечение, описывающее рождение A' в реакции $e^- + Z \rightarrow e^- + A' + Z$:

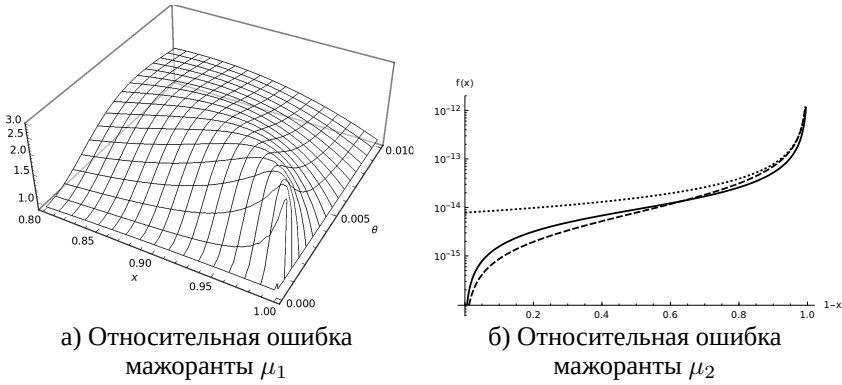
$$\frac{1}{E_0^2} \frac{d\sigma_{2 \rightarrow 3}}{dx d\cos\theta_{A'}} \propto \beta_{A'}^2 \left[\frac{1-x+x^2/2}{U^2} + \frac{(1-x)^2 m_{A'}^2}{U^4} \left(m_{A'}^2 - \frac{Ux}{1-x} \right) \right],$$

где $x = E_0/E_{A'}$ — энергия A' относительно энергии налетающего лептона E_0 , $\theta_{A'}$ — угол рассеяния A' , $\beta = \sqrt{1 - m_{A'}^2/E_0^2}$ и $U = (E_0\theta_{A'})^2 x + m_{A'}^2(1-x)/x + m_e^2 x$, m_e — масса электрона. Для данного дифференциального сечения вводятся следующие мажоранты:

$$\begin{aligned} \mu_1(x, \theta) &= x^3 \theta [E_0^2 \theta^2 x^2 + m_{A'}^2(1-x) + m_e^2 x^2]^{-2}, \\ \mu_2(x) &= [2E_0^2 (m_{A'}^2(1-x) + m_e^2 x)]^{-1}, \end{aligned}$$

используемое далее в методе обратной функции для построения эффективного генератора псевдослучайных чисел с соответствующим угловым и энергетическим распределением A' . Относительные ошибки мажорирующих функций изображены на рисунке 1.

Приводятся приближённые оценки выхода сигнальных процессов для A' . Показано, что при реалистичных параметрах мишени и распадной базы регистрируемое число событий достигает нескольких десятков в области масс до сотен МэВ при константе связи порядка 10^{-4} . Описана аналогичная процедура для аксион-подобной частицы a [1; 2].



Сплошная линия соответствует интегральной характеристике $\int \mu_1$, короткая штрихованная линия соответствует μ_2 , длинная штрихованная линия соответствует численному интегралу $d\sigma/dx$.

Рисунок 1 — Относительная ошибка мажорирующих функций с точностью до нормировочных констант.

Постулируя, что a является псевдоскалярной частицей, можно построить феноменологический лагранжиан, описывающий её свободное движение и взаимодействие с электромагнитным полем:

$$\mathcal{L}_{F+a} = -\frac{1}{4} g_{a\gamma\gamma} a F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu} + \frac{1}{2} \partial^\mu a \partial_\mu a - \frac{1}{2} m_a^2 a^2,$$

где $F^{\mu\nu}$ и $\tilde{F}_{\mu\nu} = \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\lambda\rho} F^{\lambda\rho}$ — тензор и дуальный тензор электромагнитного поля, $g_{a\gamma\gamma}$ — константа связи, а m_a — масса аксион-подобной частицы.

Ввиду малости сечений в реакциях образования рассмотренных гипотетических частиц экспериментальная проверка соответствующих теоретических предсказаний может осуществляться либо с использованием сверхвысоких энергий взаимодействующих частиц (сотни ТэВ), практически недоступных в настоящее время на ускорителях, либо путём накопления большой статистики прецизионных измерений неупругих взаимодействий в среднем энергетическом диапазоне (десятки и сотни ГэВ), подобных изображённым на рисунке 2. В таких экспериментах решающее значение имеют оценка абсолютных сечений фоновых процессов и точность реконструкции физических величин в смысле энергетического и временного разрешения.

Раздел 2.2 содержит краткое концептуальное описание эксперимента NA64 в постановке с активным сбросом пучка и описывает общую номенклатуру экспериментальных данных, имеющую значение для специализации обобщённых реализаций программного комплекса. Эксперимент использует постановку

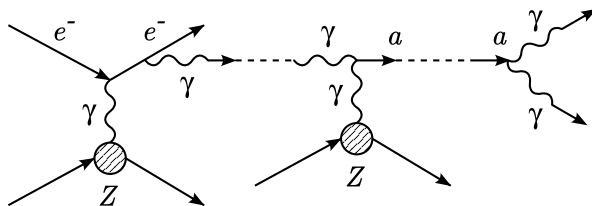


Рисунок 2 — Рождение и аннигиляция аксион-подобных частиц

«*active beam dump*», в рамках которой массивная мишень сама является детектором.

Экспериментальная установка для поиска A' по недостающей энергии в упрощённом виде изображена на рисунке 3. Установка состоит из двух гетерогенных (сэмплирующих) калориметров — электромагнитного ECAL, играющего роль активной мишени, и адронного калориметра HCAL. Установка снабжена системой мечения частиц, состоящей из двухплечевого спектрометра на основе газовых микроструктурных трековых детекторов T1-T4, измеряющих отклонение электронов в поле магнита. Триггерная система в простейшем случае состоит из телескопа быстрых сцинтилляционных счётчиков S1, S2, S3. Вето-детектор V1 и мюонный счётчик MU1 включаются в триггер в режиме антисовпадений для исключения гало пучка и подавления мюонного фона.

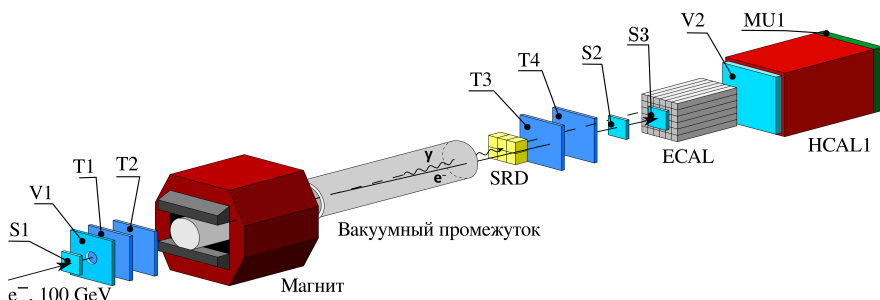


Рисунок 3 — Размещение детекторов установки NA64 в постановке для обнаружения невидимых частиц

Поиск по недостающей энергии (в т. н. невидимых каналах, или невидимых модах) заключается в регистрации таких событий, когда в обоих калориметрах отсутствует существенная часть энергии иницирующей частицы (несколько десятков ГэВ), что соответствует образованию высокоэнергетической частицы, покидающей установку без взаимодействия. Поиск видимых каналов регистрирует сигнальную сигнатуру таких событий, когда в электромагнитном калориметре и первом модуле адронного калориметра отсутствует существенная

доля энергии (от десятка ГэВ), которая выделяется в модулях ниже по пучку. Для статистически обоснованных заключений относительно чувствительности установки в рамках обоих каналов необходима тщательная оценка фоновых событий и верификация на основе известных процессов Стандартной модели.

Раздел 2.3 описывает основную номенклатуру детекторов, также являющуюся важным параметром в специализации обобщённых реализаций. Приводятся описания основных логических единиц триггерной системы: пучковых счётчиков, электромагнитного калориметра (сэмплирующий калориметр свинец–полиметилметакрилат, 42 радиационных длины X_0), адронного калориметра (железо–полиметилметакрилат, 30 длин ядерного взаимодействия λ_n), вето-детектора, микроструктурных детекторов высокого разрешения на основе газового усиления, детекторов на основе тонкостенных дрейфовых трубок. Даётся краткое описание системы мечения первичных частиц, организованной на основе магнитного спектрометра и детектора синхротронного излучения. В перечне технических параметров детектора особое значение имеет номенклатура считывающей электроники, во многом определяющая элементы объектной модели события.

Раздел 2.4 описывает сэмплирующие аналого-цифровые преобразователи, применяемые для считывания сигналов с фотоэлектронных умножителей и некоторых трековых детекторов: описывается проблема разрешения множественных сигналов от близких по времени событий, проблема отыскания динамического уровня нулевого сигнала с учётом чересстрочности. Описываются результаты симуляции входных каскадов аналоговой электроники преобразователей сигнала и основные модели параметризации импульсов.

Раздел 2.5 содержит описание общей идеи метода CL_s , применяемого для консервативной оценки чувствительности эксперимента. В частности, на примере счётной статистики метод позволяет строить исключённые области в пространстве параметров сигнального процесса для заданного уровня статистической значимости.

Глава завершается разделом 2.6, подводющим итог в виде описания функционального назначения элементов установки, выделения общих и частных задач, соотносящихся с систематизированными в предыдущей главе вариантами использования.

Третья глава посвящена описанию реализации программного комплекса и важным физическим результатам, полученным с применением описанных в работе методов.

В разделе 3.1 перечисляются основные варианты использования, часто возникающие в приложениях для обработки экспериментальных данных. На основе выделенной иерархии вариантов использования показано, как типовые

задачи (например, численная минимизация с условным ветвлением и сопоставлением гипотез) формализуются через конечный набор элементов обобщённого поведения, из которых строятся динамические машины состояний. Такой подход предоставляет единый способ выражения алгоритмов для выбора среди конкурирующих гипотез и допускает декомпозицию сложных моделей при реконструкции треков частиц и перекрывающихся во времени сигналов. Описываются предметно-специфичные искусственные языки для различных прикладных задач, включающих запросы к модели события и работу с калибровочными данными.

Описана выводимая модель с рефлексией и адресацией атрибутов, позволяющая строить обобщённые независимые обработчики, осуществляющие гистограммирование и фильтрацию потоковых данных. Идентификаторы атрибутов имеют нотацию, близкую к C++. Описываются детали реализации, включающие контейнеры на числовых ключах, обеспечивающих логарифмическое время доступа, и пользовательские стратегии работы с памятью, позволяющие улучшить локальность данных в памяти.

Описывается реализация слоя абстракций для источников данных (см. рисунок 4) и соответствующих обработчиков, выполненная в рамках конвейерного шаблона проектирования. Так, например, класс `AbstractDataSource`,

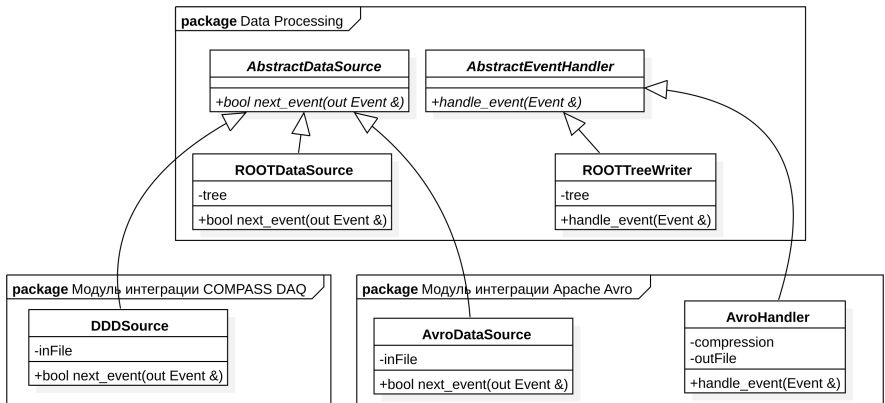


Рисунок 4 — Диаграмма классов, реализующих различные форматы хранения событий

фиксирующий контракт обобщённого источника данных, может быть реализован посредством различных конкретных кодировщиков (на рисунке — класс `AvroDataSource`, реализующий чтение и декодирование), протоколов доступа и специфичных обработчиков (на рисунке — класс `AvroHandler`, реализующий вывод), основывающихся на рекурсивном развёртывании топологии данных

объектной модели события. Посредством использования статического полиморфизма в этой точке расширения минимизируются усилия на сопровождение и обеспечивается высокое быстродействие синтезированного программного кода. В то же время публикация интерфейса допускает неавтоматизированную реализацию сопровождаемых модулей, как показано классом `DDSource`.

На рисунке 5 показаны основные классы, реализующие конвейерный шаблон проектирования: класс `Pipeline` агрегирует коллекцию экземпляров подкласса `AbstractHandler`, являющегося основной точкой расширения. По-

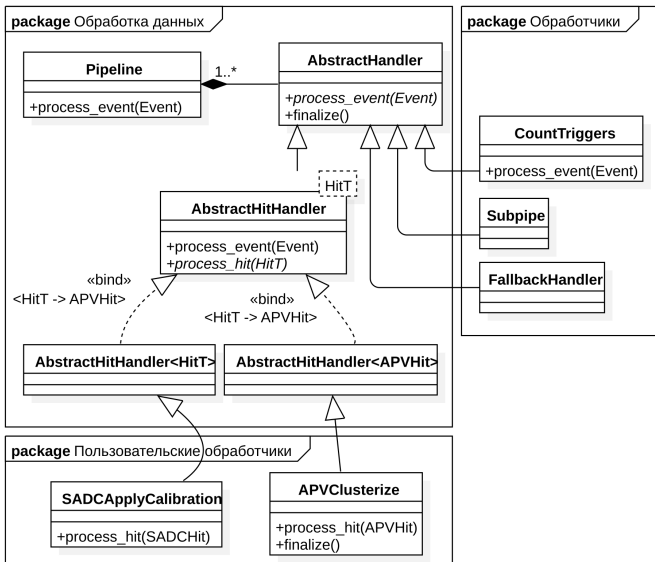


Рисунок 5 — Диаграмма классов синтезированной архитектуры с модулем обобщённых обработчиков и пользовательским модулем

средством этого базового класса, на основе динамического полиморфизма, осуществляется спецификация поведения пользовательскими классами. Класс `Pipeline` и обобщённые обработчики, реализующие элементы бизнес-логики конвейерного шаблона, такие, как `FallbackHandler`, осуществляющий перебор вариантов в случае ошибки, или `Subpipe`, реализующий встраиваемый конвейер обработки с мультиплексированием параметров, составляют набор общих классов, агностичных к предметной специфике (деталям конкретного эксперимента). В то же время на основе объектной модели события, посредством статического полиморфизма, пользовательский код может специфицировать обработчики для отдельных коллекций и типов внутри объектной модели события. Посредством

такого сочетания статического и динамического полиморфизмов реализуются архитектурные инварианты, установленные в первой главе.

Раздел 3.2 посвящён реконструкции сигналов. В частности, для описанной ранее задачи разделения откликов от перекрывающихся во времени событий излагается алгоритм реконструкции, включающий поиск амплитудных импульсов на основе конечно-разностной аппроксимации производных, подгонку аналитической модели, сопоставление результатов и отбор наиболее правдоподобной гипотезы, реализованных как элементы обобщённого поведения в рамках динамических машин конечных состояний. Результат работы алгоритма для важного практического случая разрешения вклада от калибровочного мюона изображён на рисунке 6.

В качестве физического результата указывается увеличение эффективности идентификации димюонных событий ($\gamma \rightarrow \mu^+ \mu^-$), играющих роль эталонного процесса при определении чувствительности эксперимента NA64.

Изложена идея реализации алгоритмов выделения зарядовых кластеров в микроструктурных детекторах, а также реконструкции координатных изохронных поверхностей на основе измерений газовых тонкостенных дрейфовых трубок. Оба алгоритма реализуются в рамках независимых модулей-обработчиков системы в рамках конвейерного шаблона.

Раздел 3.3 посвящён описанию процедур калибровки детекторов. Для распространённого случая калибровки детекторов на основе априорной информации описана утилита, осуществляющая подгонку параметров аналитических функций к наблюдаемым спектрам в рамках декларативных спецификаций.

Для калибровки электромагнитного калориметра предлагается процедура, использующая свойства линейной зависимости и алгебраической связанности

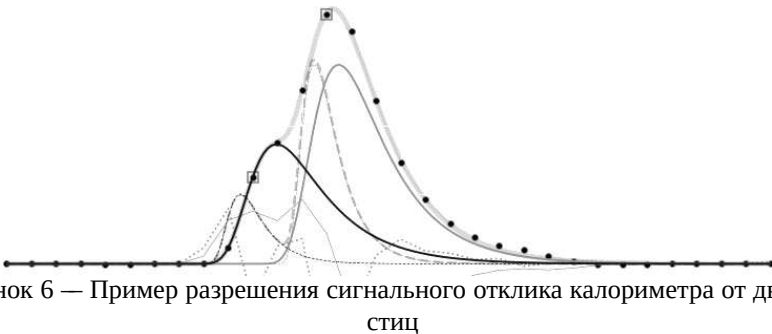


Рисунок 6 — Пример разрешения сигнального отклика калориметра от двух частиц

□ — вершины импульсов, найденные алгоритмом предварительного выделения пиков; — начальные условия; — — вклады отдельных импульсов; — — полный результат подгонки функций

энерговыведения ливня в ячейках сегментированного калориметра. Метод состоит в решении переопределённой системы линейных уравнений $E_0 - \sum_{kl} \tilde{E}_{kl} = \sum_{ij} C_{ij} A_{ij}$, образованной вектором неизвестных калибровочных коэффициентов C_{ij} , массивом амплитудных измерений ячеек калориметра A_{ij} и оценки суммарного энерговыведения $E_0 - \sum_{kl} \tilde{E}_{kl}$, где E_0 — энергия иницирующей частицы и $\tilde{E}_{kl}$ — апостериорная оценка энерговыведения электромагнитного ливня, либо дополняющая вектор-столбец неизвестных, либо уточняемая итеративно. Численное решение переопределённой системы линейных уравнений производится на основе метода сингулярного разложения. В качестве доказательства пригодности метода приводится оценка линейности отклика электромагнитного калориметра. Рассмотрены факторы, влияющие на загромождение разрешения калориметра: зависимость от интенсивности и координатная неоднородность. Приводятся количественные оценки $\tilde{E}_{kl}$.

Раздел 3.4 излагает реконструкцию физических событий в контексте обобщённых решений программного комплекса, заключающуюся в совмещении информации от калориметров и трековых детекторов.

Восстановление треков в физическом эксперименте необходимо для определения энергии и идентификации типа частиц. Важной особенностью экспериментов на фиксированной мишени, упрощающей рассмотрение треков частиц, является допущение о прямолинейности истинных траекторий частиц в отсутствие магнитного поля и плотного вещества. В NA64 трекер представляет собой двухплечевой спектрометр, составленный из нескольких газовых детекторов, расположенных по оси пучка с прямолинейными участками траектории до и после магнита, расположенными перед массивным электромагнитным калориметром.

В разделе предложена обобщённая реализация алгоритма для предварительного поиска треков — задачи отбора таких комбинаций пространственных объектов, соответствующих отдельным измерениям детекторов, которые с заданной степенью правдоподобия могут образовывать трек частицы. Описан известный алгоритм с авторскими дополнениями, приводятся примеры его работы, способствующие улучшению пространственного разрешения детекторов и эффективности отбора треков. Модуль поиска треков реализован в виде элемента обобщённого поведения динамических машин конечных состояний.

Описаны различные алгоритмы подгонки треков. В качестве верификации предложенного подхода приводятся результаты реконструкции треков частиц для алгоритмов, использующих различные стратегии выбора гипотез трека.

Валидация подсистемы реконструкции треков основывается на приведённых в разделе количественных оценках качества выравнивания детекторов, их эффективности и статистики невязок χ^2 .

Раздел 3.5 посвящён оценкам статистической мощности критерия идентификации типа ливня в адронном калориметре и вычислению исключённой области при анализе каналов рождения лёгких аксион-подобных частиц. С использованием описанного в работе инструментария выполняется обработка результатов моделирования фоновых событий и вычисляется исключённая параметрическая область.

Теоретический метод феноменологических лагранжианов даёт следующее предсказание для ширины распада аксион-подобной частицы: $\Gamma_a = g_{a\gamma\gamma}^2 m_a^3 / 64\pi$, что соответствует средней длине пробега в несколько метров в диапазоне масс в десятки и сотни ГэВ и значениях константы связи $g_{a\gamma\gamma} \simeq 10^{-5}$. Геометрические параметры NA64 могут позволять проверку существования гипотетических частиц в следующих диапазонах массы и константы связи $10 \text{ ГэВ} \lesssim m_a \lesssim 100 \text{ ГэВ}$ и $10^{-4} \lesssim g_{a\gamma\gamma} \lesssim 10^{-1}$ при условии подавления сопутствующего фона.

Эффективным способом отличить адрон от лептонной пары или сверхжёсткого γ -кванта (в том числе рождённого распадом $a \rightarrow \gamma\gamma$ на рисунке 2), слабо зависящим от энергии иницирующей частицы, является ограничение на значение относительной доли энерговыделения в периферийных ячейках адронного калориметра R , сформулированное в виде условия на отношение $R = (E_{H\text{CAL}} - E_{H\text{CAL},C}) / E_{H\text{CAL}} < R_{th}$, где $E_{H\text{CAL}}$ — полная энергия в адронном калориметре, $E_{H\text{CAL},C}$ — энергия в центральной ячейке, а порог R_{th} фиксируется на основе требуемой статистической значимости. Чтобы оценить мощность такого критерия, можно использовать оценки на основе моделирования.

На рисунке 7 приведены графики относительного энерговыделения в периферийных ячейках R для различных типов иницирующей частицы. В моделировании использовался параллельный радиально-симметричный пучок частиц с нормальным координатным распределением со среднеквадратичным отклонением $\sigma_{x,y} = 50 \text{ мм}$. Из рисунка следует, что вероятность периферийного энерговыделения у γ -квантов (в области $R \lesssim 10^{-1}$) как минимум на порядок меньше таковой у нейтральных адронов при достаточно малой относительной неопределённости. При этом видно, что отношение долей R достаточно слабо меняется с энергией.

Для критерия $R < R_{th}$ нулевой гипотезы, отвечающей адронному ливню, кривая, отражающая зависимость ошибок первого и второго рода, приведена на рисунке 8. На графике отмечена рабочая точка $R_{th}^{(MC)} = 0,04$ выбранная для уровня статистической значимости $\alpha = 5 \cdot 10^{-3}$, отвечая мощности критерия $\beta_{R,0} = 0,994$. Для отрицательных пионов мощность несколько ниже ($\beta_{R,\pi^-} = 0,972$) за счёт чуть большей доли компактных ливней.

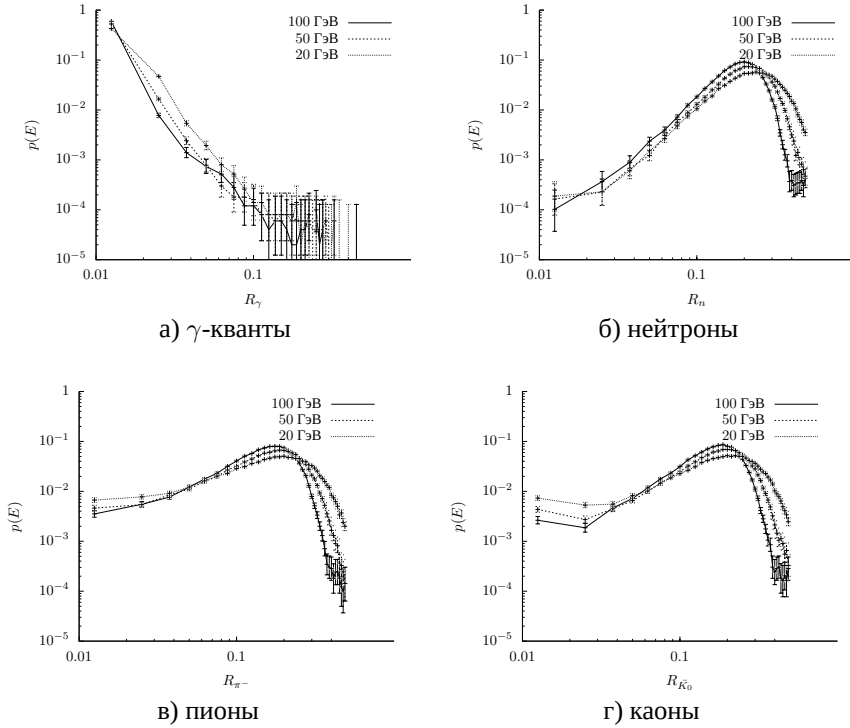


Рисунок 7 — Плотности вероятности относительной доли энергосвечения R для различных энергий и типов частиц согласно моделированию

Методика определения исключённой области опирается на оценки фона с учётом реальных данных и оценку систематических ошибок посредством мешающих параметров. Это позволяет учитывать статистическое влияние условий, зависящих от конкретного сеанса, с применением пакетного счёта для вычисления ожидаемого уровня превышения сигнала над фоном. Иллюстрация работы такого алгоритма показана на рисунке 9 и состоит в итеративной процедуре вычисления ожидаемого сигнального выхода в точках параметрического пространства с последующим уточнением.

Процедура начинается с задания грубой сетки параметров ($m_{a,g_{a\gamma\gamma}}$) и ограничения доверительного предела α . В узлах сетки производится вычисление ожидаемого сигнального выхода и статистики, определяемой на основе функций правдоподобия, учитывающей систематическую ошибку в конкретной параметрической области. После вычисления всех узлов сетки находятся пары узлов a, b , в которых $CL_s^{(a)} < \alpha$ и $CL_s^{(b)} > \alpha$. На основе найденного контура пересечения

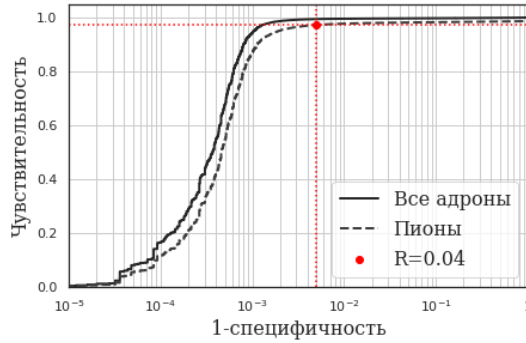
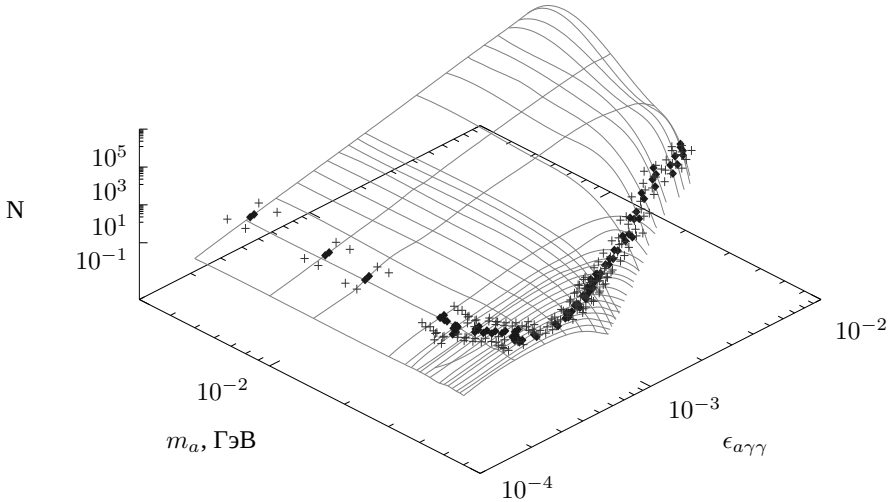


Рисунок 8 — ROC-кривая для критерия $R < R_{th}$, применяемого для разделения адронных и электромагнитных ливней в адронном калориметре

двух поверхностей строится сетка для следующей итерации. Процедура повторяется до сходимости с заданной точностью.

Раздел 3.6 завершает третью главу обсуждением основных методических результатов и перспектив развития описанных прикладных решений.



Линиями показана сетка первой итерации, аппроксимированная кривыми Безье. Значком «+» обозначены узлы сетки на второй итерации, значок «◆» отвечает узлам на третьей итерации

Рисунок 9 — Иллюстрация работы алгоритма для оценки чувствительности эксперимента

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

Разработана и обоснована архитектура программного комплекса, предназначенного для реконструкции и анализа событий в рамках задач, возникающих в физическом эксперименте с триггерной системой. Предложенный комплекс реализует ограниченный набор архитектурных инвариантов: модульность, потоковая обработка, наличие объектной модели события, детерминированность и идемпотентность вычислений. Сведение этих принципов в программную архитектуру и их обобщённая реализация являются оригинальным техническим решением, при помощи которого в рамках рассмотренной гибридной методологии разработки в работе на конкретных примерах обеспечен полный цикл сопровождения эксперимента — показаны этапы моделирования, реконструкции, анализа и обработки данных. В частности:

1. Разработана и внедрена технология программного синтеза конвейера обработки данных, выполненного в соответствии с выявленными начальными спецификациями, обеспеченного калибровочной информацией и оснащённого набором встраиваемых искусственных языков, позволяющего проводить реконструкцию и анализ экспериментальных событий, включая этапы калибровки и сопровождения набора данных, что подтверждено совокупностью приведённых в работе физических результатов;
2. Генератор модельных событий для процесса фотообразования частицы A' (тёмный фотон) на основе функций мажорирующих аналитические сечения позволяет моделировать класс реакций образования гипотетических частиц на тяжёлых ядрах, связанных со Стандартной моделью электромагнитным взаимодействием;
3. Метод калибровки герметичных детекторов, построенный на основе свёртки профиля пучка и профиля ливня, не нуждается в априорных оценках и позволяет проводить автокалибровку детектора из первых принципов во время набора данных, что подтверждается оценками линейности отклика электромагнитного калориметра, определяя перспективы параметрической реконструкции сигналов калориметров, опирающейся на применение конкурирующих гипотез о пространственном распределении энергосвечения в событии при разных частотах дискретизации и геометриях сэмплирующих калориметров;
4. Реализованная подсистема генерации машин конечных состояний для решения задач оптимизации позволяет динамически обуславливать различные сценарии отбора гипотез. В частности, обобщённая реализация алгоритма отыскания треков позволяет снизить комбинаторный фон, а алгоритм подгонки функции отклика сигналов с сэмплирующих

амплитудно-цифровых преобразователей позволяет восстанавливать сигналы с использованием конкурирующих гипотез априорной формы импульса (частично компенсируя ограничения на частоту Найквиста).

Решения этих задач в рамках предложенного обобщающего подхода подтверждают, что выявленная иерархия вариантов использования задаёт архитектуру программного комплекса, отвечающего общим задачам сопровождения физического эксперимента, что соответствует основной цели работы.

Публикации автора по теме диссертации

1. **R. R. Dusaev**, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov. Photoproduction of axionlike particles in the NA64 experiment [Текст] // Phys. Rev. D. — 2020. — Т. 102, вып. 5, № 055018. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.102.055018>. — (Scopus, WoS).
2. Search for Axionlike and Scalar Particles with the NA64 Experiment [Текст] / D. Banerjee, J. Bernhard, V. E. Burtsev, A. G. Chumakov, D. Cooke, P. Crivelli, E. Depero, A. V. Dermenev, S. V. Donskov, **R. R. Dusaev**, T. Enik, N. Charitonidis, A. Feshchenko, V. N. Frolov, A. Gardikiotis, S. G. Gerassimov, S. N. Gninenko, M. Hösigen, M. Jeckel, V. A. Kachanov, A. E. Karneyeu, G. Kekelidze, B. Ketzer, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, V. N. Kolosov, I. V. Konorov, S. G. Kovalenko, V. A. Kramarenko, L. V. Kravchuk, N. V. Krasnikov, S. V. Kuleshov, V. E. Lyubovitskij, V. Lysan, V. A. Matveev, Y. V. Mikhailov, L. Molina Bueno, D. V. Peshekhonov, V. A. Polyakov, B. Radics, R. Rojas, A. Rubbia, V. D. Samoylenko, H. Sieber, D. Shchukin, V. O. Tikhomirov, I. Tlisova, D. A. Tlisov, A. N. Toropin, A. Y. Trifonov, B. I. Vasilishin, G. Vasquez Arenas, P. V. Volkov, V. Y. Volkov, P. Ulloa // Phys. Rev. Lett. — 2020. — Т. 125, вып. 8, № 081801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.125.081801>. — (Scopus, WoS).
3. Fully Geant4 compatible package for the simulation of Dark Matter in fixed target experiments [Текст] / M. Bondi, A. Celentano, **R. R. Dusaev**, D. Kirpichnikov, M. Kirsanov, N. Krasnikov, L. Marsicano, D. Shchukin // Computer Physics Communications. — 2021. — Т. 269, № 108129. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465521002411>. — (Scopus, WoS).
4. Development of the fully Geant4 compatible package for the simulation of Dark Matter in fixed target experiments [Текст] / B. Banto Oberhauser, P. Bisio, A. Celentano, E. Depero, **R. R. Dusaev**, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, N. V. Krasnikov, A. Marini, L. Marsicano, L. Molina-Bueno, M. Mongillo, D. Shchukin, H. Sieber, I. V. Voronchikhin // Computer Physics Communications. — 2024. — Т. 300, № 109199. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001046552400122X>. — (Scopus, WoS).

Дусаев Ренат Рамильевич

Программный комплекс для физической реконструкции и анализа событий в
экспериментах с триггерной системой

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____