

Объединенный институт ядерных исследований

На правах рукописи

Дереновская Ольга Юрьевна

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ И
РЕКОНСТРУКЦИИ РАСПАДОВ $J/\psi \rightarrow e^+e^-$
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СВМ

Специальность: 05.13.18 - математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2015

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий
Объединенного института ядерных исследований

*Научный
руководитель:* Иванов Виктор Владимирович,
доктор физико-математических наук,
Лаборатория информационных технологий ОИЯИ,
главный научный сотрудник

*Официальные
оппоненты:* Шукин Николай Васильевич,
доктор физико-математических наук,
доцент,
Национальный исследовательский ядерный
университет “МИФИ”,
профессор

Битюков Сергей Иванович,
доктор физико-математических наук,
доцент,
ФГБУ ГНЦ РФ – Институт физики высоких энергий
НИЦ “Курчатовский институт”,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБУ ГНЦ РФ – Институт теоретической и
экспериментальной физики им. А.И. Аликханова
НИЦ “Курчатовский институт”

Защита состоится “_____” _____ 2015 г. в _____ часов на заседании диссер-
тационного совета Д 720.001.04 в Лаборатории информационных технологий Объеди-
ненного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Адрес сайта, на котором размещена диссертация/автореферат:
http://wwwinfo.jinr.ru/announce_disser.htm

Автореферат разослан “_____” _____ 2015 г.

*Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор*

Иванченко Иосиф Моисеевич

Общая характеристика диссертации

В настоящей работе развиты новые математические методы, алгоритмы и комплексы программ, предназначенные для проведения надежной и быстрой идентификации и реконструкции редких распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, регистрируемых экспериментальной установкой СВМ в условиях доминирующего фона.

Актуальность работы

Детальные экспериментальные измерения распадов чармония (J/ψ и ψ') в плотной и горячей ядерной среде, такой, как кварк-глюонная плазма, могут предоставить новые данные для изучения проблемы восстановления киральной симметрии и объяснения механизма возникновения массы адронов [1]. Исследования процессов, связанных с рождением чармония, выполненные в экспериментах NA50 [2] и RHIC [3] при высоких температурах и низких барионных плотностях, до сих пор не дали четкого объяснения существующим моделям.

В настоящее время в Центре им. Гельмгольца по исследованию тяжелых ионов (Дармштадт, Германия) ведется строительство ускорительного комплекса антипротонов и тяжелых ионов FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research). На этом комплексе планируется проведение экспериментов на установке СВМ (Compressed Baryonic Matter) [4], создаваемой большой международной коллаборацией с активным участием ученых из ОИЯИ [5]. Физическая программа СВМ нацелена на изучение свойств барионной материи в области относительно низких энергий и высоких барионных плотностей, отвечающих ядро-ядерным соударениям при энергии пучка $2 \div 45$ ГэВ/нуклон [4, 6]. Измерения с высокой точностью выходов, функции возбуждения, прямых и эллиптических потоков J/ψ -мезонов, выполненные в указанной области, должны предоставить дополнительную экспериментальную информацию, необходимую для понимания происходящих процессов.

Для регистрации очень редких процессов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ будут использоваться интенсивные потоки частиц падающего пучка (до 10^7 ядро-ядро соударений в секунду). Учитывая высокую множественность вторичных частиц (от 100 до 1000 частиц в результате одного соударения), идентификацию и реконструкцию исследуемых распадов нужно будет проводить в условиях доминирующего адронного (в основном пионного) фона.

Ввиду широты и сложности исследуемых физических процессов, коллаборацией СВМ было принято решение не строить общую для всех задач триггерную систему [7]. Фиксировать времена срабатывания регистрирующей аппаратуры и вырабатывать триггерный сигнал, позволят элементы, встроенные в электронику каждого из детекторов. Потоками экспериментальной информации будет управлять высокоскоростная вычислительная среда, которая будет использоваться для фильтрации информации и формирования событий. Пропускная способность всей вычислительной среды в СВМ принята в качестве определяющего фактора для системы сбора и накопления информации. Такой выбор даст возможность использовать все вычислительные ресурсы установки с максимальной эффективностью и фактически может позволить проводить селекцию сигнальных событий в реальном времени эксперимента.

В связи с вышеизложенным, актуальной и важной задачей для коллаборации СВМ является разработка эффективных математических методов, критериев и алгоритмов, позволяющих надежно и с высокой скоростью осуществлять набор приемлемой статистики распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$. Очевидно, что решение данной задачи невозможно без максимального использования потенциала современных многоядер-

ных процессоров.

Цель работы

Целью настоящей работы является развитие эффективных математических методов, быстрых вычислительных алгоритмов и комплексов программ, предназначенных для надежной регистрации редких распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ с помощью установки СВМ в условиях интенсивного фона.

Научная новизна

1. Развита методика, включающая цепочку математических методов и соответствующих вычислительных алгоритмов для быстрого распознавания и реконструкции редких распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, регистрируемых установкой СВМ в условиях доминирующего адронного фона.
2. В рамках развитого подхода выявлены признаковые переменные, позволяющие максимально подавить фон и надежно выделить сигнал. Разработана процедура для выбора критических границ, разделяющих по указанным переменным области сигнальных и фоновых событий.
3. Выполнен сравнительный анализ эффективности выделения сигнала (по числу отбираемых сигнальных событий и отношению “сигнал/фон”) с помощью двух разных подходов, используемых для идентификации заряженных частиц детектором TRD, – на основе искусственной нейронной сети (ИНС) и модифицированного критерия согласия ω_n^k . Показано, что оба метода обеспечивают практически одинаковую мощность, но при этом критерий ω_n^k , в сравнении с ИНС, обладает рядом преимуществ.
4. На основе критерия согласия ω_n^k разработан быстрый параллельный алгоритм, который можно использовать в режиме реального времени эксперимента для идентификации заряженных частиц, регистрируемых детектором TRD.
5. Проведен анализ производительности всех алгоритмов рассматриваемой цепочки, позволивший оценить возможности ускорения процесса обработки за счет использования высокопроизводительных вычислительных систем на базе многоядерных процессоров.

Практическая ценность

Используя развитую в работе методику и сгенерированные с помощью пакетов GEANT3, UrQMD и PLUTO наборы модельных данных

- показано, что диэлектронная версия установки СВМ позволяет надежно зарегистрировать за приемлемое для эксперимента время достаточно большую статистику распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$,
- подобрана оптимальная (исходя из отношения “сигнал/фон”) толщина мишени.

Показано, что используемые критерии для выделения сигнала и подавления фона с помощью признаковых переменных не приводят к искажению фазового пространства распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$.

Проведенная оценка временных затрат всех вычислительных алгоритмов позволила выявить “слабые” места в цепочке методов (в частности, поиск и реконструкция

треков в TRD), над устранением которых в настоящее время ведутся дополнительные исследования.

Достоверность результатов

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертации, подтверждены применением для моделирования исследуемых физических событий широко известных программ и моделей, таких как GEANT3, UrQMD, PLUTO, а также использованием среды CBMROOT (программное обеспечение коллаборации CBM), разработанной на базе специализированного пакета ROOT. Все разработанные алгоритмы и комплексы программ были протестированы на различных типах соударений.

Представление основных положений и результатов

Основные положения и результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях и совещаниях:

- International Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (ММСР'09, ММСР'13) (Дубна, Россия, 2009, 2013);
- International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'09, NEC'11) (Варна, Болгария, 2009, 2011);
- CBM Collaboration meeting (Дубна, Россия, 2008; Дармштадт, Германия, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014; Мамайя, Румыния, 2010; Дрезден, Германия, 2011);
- Международная молодежная конференция-школа "Современные проблемы прикладной математики и информатики" (МРАМС'2012, МРАМС'2014) (Дубна, Россия, 2012, 2014);
- Конференция "Методы математической физики и математическое моделирование физических процессов" в рамках Научной сессии НИЯУ МИФИ (Москва, Россия, 2013);
- Международная научная конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, Россия, 2010, 2012, 2014);
- Школа-конференция молодых ученых и специалистов ОИЯИ "Алушта-2012", "Алушта-2013" (Алушта, Украина, 2012, 2013);
- Международная конференция "Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education" (Дубна, Россия, 2014).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 26 научных работ, статьи A[1] - A[5] опубликованы в рецензируемых изданиях:

- Письма в журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра" ("Письма в ЭЧАЯ") [A1] - [A3],
- Вестник РУДН, серия "Математика. Информатика. Физика" [A4] - [A5],

материалах международных конференций ([A8], [A11], [A12], [A17], [A20], [A21], [A22], [A25]), а также в виде препринтов и сообщений ОИЯИ ([A7], [A13], [A14], [A23], [A24], [A26]) и GSI ([A6], [A9], [A10], [A15], [A16], [A18], [A19]).

Личный вклад автора

Положения и результаты, представленные в диссертации, получены при определяющем участии соискателя. Программная реализация разработанных методов и алгоритмов выполнена лично соискателем.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы (103 ссылки) и имеет объем 108 страниц.

Содержание работы

Во **Введении** дается описание фазовой диаграммы ядерной материи, обсуждаются признаки образования кварк-глюонной плазмы, кратко излагается история открытия J/ψ -мезона, приводится обзор экспериментов, в которых уже изучалось рождение J/ψ , формулируется исследуемая научная проблема. Кроме того, приводится краткое изложение содержания диссертации по главам, а также список решений и полученных результатов, выносимых на защиту.

В **Главе 1** обсуждается физическая программа эксперимента CBM, приводится описание экспериментальной установки и ее основных элементов, используемых для регистрации J/ψ в диэлектронном канале распада, а также процесс моделирования физических событий. Формулируется постановка решаемой в диссертационной работе задачи, отмечается ее важность и актуальность.

Схема экспериментальной установки CBM, предназначенной для изучения диэлектронных распадов J/ψ , приведена на рис. 1.

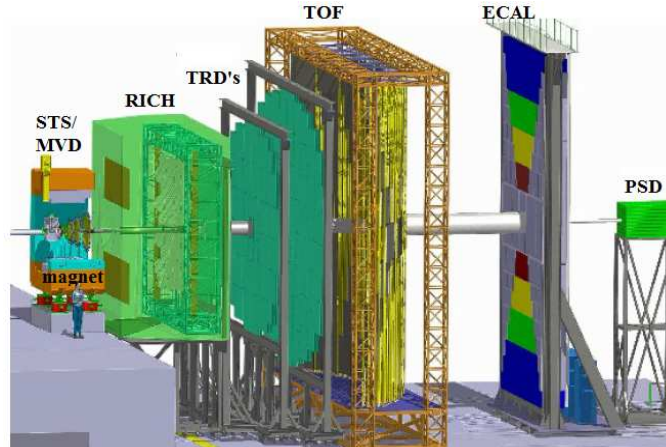


Рис. 1: Схема экспериментальной установки CBM

Непосредственно за мишенью между полюсами сверхпроводящего дипольного магнита располагается система координатных трековых детекторов STS (Silicon Tracking System), состоящая из восьми двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов, и вершинный детектор MVD (Micro-Vertex Detector). Детекторы STS и MVD предназначены для реконструкции траекторий и определения импульсов заряженных частиц, а также для восстановления первичных и вторичных вершин. Система идентификации электронов/позитронов включает детекторы черенковского RICH (Ring Imaging Cherenkov) и переходного TRD (Transition Radiation Detector) излу-

ний¹. TRD также используется для реконструкции траекторий регистрируемых детектором заряженных частиц. Детектор измерения времени пролета частиц TOF (Time-Of-Flight) предназначен для идентификации адронов. Электромагнитный калориметр ECAL (Electromagnetic CALorimeter) служит для идентификации фотонов и электронов. Калориметр PSD (Projectile Spectator Detector) используется для определения центральности соударений и плоскости реакций.

Так как экспериментальная установка CBM находится в стадии разработки, для решения рассматриваемой задачи использовались физические события, смоделированные методом Монте-Карло. Для оценки эффективности регистрации распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ были сгенерированы наборы вторичных частиц, рождающихся, например, в соударениях AuAu при энергии падающего пучка 25 ГэВ/нуклон. Набор “фоновых” частиц моделировался, используя пакет UrQMD, а распад $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ генерировался с помощью пакета PLUTO. Подготовленные таким образом наборы частиц транспортировались через установку CBM, используя средства пакета GEANT3 [8] в среде CBMROOT [9].

Глава 2 посвящена методам выделения и реконструкции распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$. Процедура основана на регистрации продуктов распада J/ψ в подсистемах STS, RICH, TRD и TOF и включает в себя следующие этапы:

- 1) реконструкция траекторий и определение импульсов заряженных частиц, зарегистрированных системой координатных детекторов STS;
- 2) формирование выборок электронов и позитронов, отвечающих одному AuAu соударению, используя информацию с детекторов RICH, TRD и TOF;
- 3) исключение из указанных выборок электронов и позитронов, не удовлетворяющих специальным критериям отбора;
- 4) отбор кандидатов в J/ψ -мезоны и определение их характеристик, используя пакет KFParticle [10];
- 5) подавление комбинаторного фона с помощью дополнительных специальных критериев отбора;
- 6) построение спектра инвариантных масс для отобранных кандидатов в J/ψ -мезоны;
- 7) исследование структуры фона с целью повышения отношения сигнал/фон.

2.1 Реконструкция траекторий и импульсов заряженных частиц с помощью системы STS

С помощью системы STS регистрируются координаты (хиты) мест пересечения частицей координатных плоскостей STS станций [11]. Задача реконструкции треков заключается в поиске хитов, отвечающих траекториям отдельных частиц, и определении характеристик найденных траекторий.

В основу алгоритма распознавания треков положена концепция клеточного автомата (КА) [12]. При этом эффективность восстановления треков, отвечающих частицам от распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, превышает 95% [12].

¹Так как, в нашем случае, задачи идентификации электронов и позитронов идентичны, то далее будем рассматривать только идентификацию электронов.

Процедура определения характеристик найденных траекторий включает аппроксимацию измерений найденных треков с целью уточнения их пространственных параметров и восстановление импульсов заряженных частиц. Она выполняется с помощью итерационного процесса, реализованного на основе фильтра Калмана [13]. Точность восстановления импульса составляет величину порядка 1 %.

2.2 Идентификация заряженных частиц с помощью RICH

Треки заряженных частиц, найденные в STS, экстраполируются в детектор RICH, который используется для идентификации электронов в диапазоне импульсов от 0,5 ГэВ/с до 15 ГэВ/с [14]. При движении заряженной частицы в радиаторе детектора со скоростью, превышающей скорость распространения света в данной среде, образуется черенковское излучение. Оно регистрируется фотодетектором в виде колец.

Поиск колец, определение их центра и радиуса выполняется с помощью разработанного в коллаборации CBM алгоритма распознавания колец (преобразование Хафа и искусственная нейронная сеть) [15]. Отметим, что из-за особенностей конструкции детектора RICH и неизбежных оптических искажений кольца имеют форму эллипса.

После распознавания и реконструкции всех колец, необходимо каждое кольцо “связать” с конкретным треком, найденным в STS. Для этого трек из STS экстраполируется до зеркал RICH и отражается на плоскость фотодетектора. Определенная таким образом точка пересечения треком плоскости фотодетектора используется для связывания трека с одним из колец. При этом для рассматриваемого кольца ищется ближайший к нему трек.

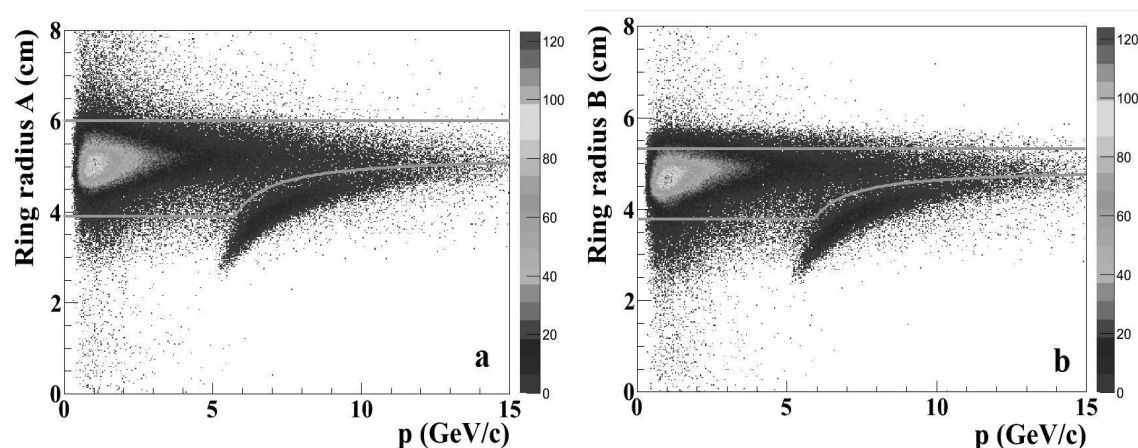


Рис. 2: Зависимости большой (а) и малой (б) полуосей эллипса от импульсов регистрируемых частиц

Для селекции электронов используются зависимости большой и малой полуосей эллипса от импульсов регистрируемых частиц (рис. 2). Все заряженные частицы, давшие одновременно отсчеты в обоих коридорах, отмеченных линиями на рис. 2, идентифицируются RICH как электроны.

2.3 Идентификация электронов и пионов с помощью TRD

Для дальнейшего подавления пионов, оставшихся в анализируемых данных после выделения электронов с помощью RICH, использовался многослойный детектор переходного излучения TRD. Процедура удаления пионов включает в себя несколько этапов: 1) поиск и реконструкция траекторий частиц, зарегистрированных коор-

динатными детекторами TRD, 2) связывание треков, найденных в TRD, с треками, реконструированными системой STS и идентифицированными детектором RICH как электроны, 3) идентификация частиц с учетом потерь энергии только в тех модулях TRD, которые дали вклад в реконструированные треки.

Для поиска и реконструкции треков, регистрируемых TRD, используются метод слежения по треку и фильтр Калмана [16]. В алгоритме слежения по треку при инициализации процедуры поиска треков в качестве начальных приближений используются треки, найденные в детекторе STS. Поэтому трек, найденный в TRD, оказывается однозначно связанным с конкретным STS-треком. Считается, что трек в TRD найден, если он содержит не менее 9 хитов.

С каждым из реконструированных треков ассоциируется набор потерь энергий ($\Delta E_i, i = 1, \dots, n$), оставленных заряженной частицей в $n = 12$ модулях TRD. Используя указанный набор, необходимо решить задачу идентификации частицы, состоящую в определении к какому из распределений (в нашем случае, электронов или пионов) эти потери относятся. Для селекции электронов в детекторе TRD на основе потерь энергии частиц используются два метода многомерного анализа данных: на основе искусственной нейронной сети и критерия согласия ω_n^k [17].

2.4 Идентификация электронов в TRD, используя критерий ω_n^k

Для применения критерия ω_n^k требуется вычислить статистику:

$$\omega_n^k = -\frac{n^{\frac{k}{2}}}{k+1} \sum_{j=1}^n \left\{ \left[\frac{j-1}{n} - \phi(\lambda_j) \right]^{k+1} - \left[\frac{j}{n} - \phi(\lambda_j) \right]^{k+1} \right\}, \quad (1)$$

где k – степень критерия, n – объем выборки, $\phi(\lambda_j)$ – значения функции распределения Ландау от упорядоченной выборки величин λ : $\lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_j \leq \dots \leq \lambda_n$. Переменная λ_i связана с потерей энергии частицей ΔE_i в i -ом радиаторе TRD следующим соотношением:

$$\lambda_i = \frac{\Delta E_i - \Delta E_{mp}^i}{\xi_i} - 0.225, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где ΔE_{mp}^i – наиболее вероятная потеря энергии пионов, а $\xi_i = \frac{1}{4.02}$ FWHM (Full Width on Height Medium – полная ширина на половине высоты) для потерь энергии пионов в i -ом радиаторе TRD.

В работе [17] была предложена модификация критерия ω_n^k , учитывающая особенности распределения потерь энергии электронов/позитронов в радиаторах TRD и позволившая существенно повысить мощность критерия. На рис. 3(а) представлено распределение случайных величин $\tilde{\omega}_6^4$, отвечающих электронам (пунктирная линия) и пионам (сплошная линия), зарегистрированным TRD.

2.5 Идентификация электронов в TRD, используя ИНС

Для идентификации частиц с помощью детектора TRD используется трехслойный перцептрон (МСП), реализованный в среде SVMROOT [18].

Количество нейронов во входном слое ИНС задавалось равным числу хитов в реконструированном (с помощью координатных детекторов TRD) треке. Количество нейронов в скрытом слое задавалось равным 12. При обучении перцептрона принималось, что для пионных событий сигнал на выходном нейроне должен быть равен -1, а для электронных событий – +1.

На рис. 3(б) представлено распределение значений на выходе нейронной сети, из которого видно, что ИНС, также как и модифицированный критерий ω_n^k , позволяет надежно идентифицировать электроны.

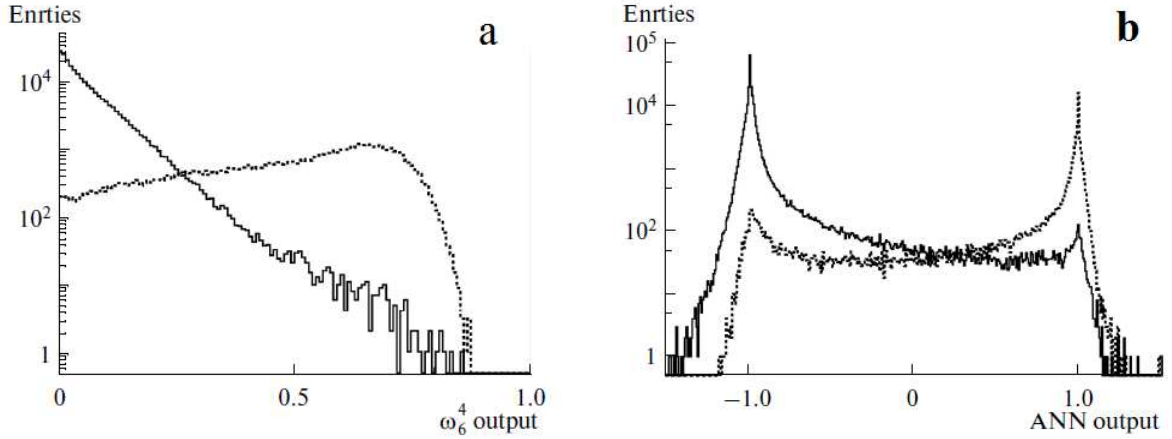


Рис. 3: Распределения случайных величин ω_6^4 (а) и значений сигнала на выходе нейронной сети (б) для пионов (сплошная линия) и электронов (пунктирная линия)

Основные особенности применения ИНС и вытекающие из них ограничения по сравнению с критерием ω_n^k :

1. Для обучения МСП необходимо иметь в своем распоряжении данные, максимально точно воспроизводящие распределения потерь энергии электронов и пионов. Ионизационные потери пионов в веществе хорошо изучены, в то время как потери энергии электронов в радиаторах TRD носят сложный характер, зависящий от конструкции конкретного радиатора. Им отвечает сложная гипотеза, что не позволяет гарантировать корректность результатов, получаемых с помощью МСП. Метод, основанный на критерии согласия ω_n^k , не имеет отмеченного недостатка, т.к. для его применения необходимо знание только параметров распределения ионизационных потерь пионов.
2. Варьирование числа хитов в треках, регистрируемых координатными детекторами TRD (от 9 до 12), приводит к необходимости внесения соответствующих изменений в число нейронов во входном слое МСП. Сети с разным числом нейронов во входном слое нужно обучать на данных, в которых реконструированные треки имеют такое же число хитов. Метод, основанный на критерии согласия ω_n^k , не имеет указанного недостатка, так как без потери в эффективности идентификации электронов для частиц с разным числом хитов на треке можно использовать одну и ту же статистику ω_6^4 .

В заключение заметим, что достижение приемлемого уровня подавления пионов и надежного выделения электронов с помощью МСП возможно только в случае перехода от исходных значений потерь энергии в слоях TRD к “эффективным” переменным (2), характерным для критерия согласия ω_n^k [A7-A9].

2.6 Идентификация электронов/позитронов, используя TOF

В дополнение к RICH и TRD, для селекции электронов/позитронов используется детектор TOF [19]. С его помощью измеряется время t , за которое частица (идентифицированная ранее детекторами RICH и TRD как электрон/позитрон) пролетает расстояние l от мишени до плоскости TOF: зная импульс частицы p , можно вычислить ее массу m .

Для идентификации частицы с помощью TOF используется зависимость квадрата ее массы m^2 от импульса p : смотри рис. 4. В качестве электронов/позитронов принимаются такие частицы, которые дают отсчет ниже показанной на рис. 4 ломаной линии.

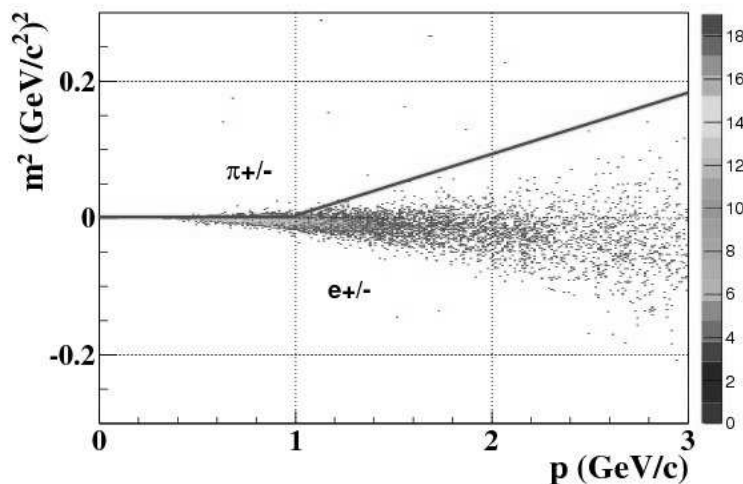


Рис. 4: Зависимость квадрата массы от импульса для частиц, идентифицированных в RICH и TRD как электроны/позитроны

2.7 Формирование кандидатов в J/ψ -мезоны

Для реконструкции J/ψ -мезонов, распадающихся по диэлектронному каналу, используется специализированный пакет KFParticle [10]. Этот пакет предназначен для поиска и реконструкции короткоживущих частиц по продуктам их распада. Путем комбинирования всех идентифицированных с помощью детекторов RICH, TRD и TOF электронов со всеми отобранными позитронами, формируется набор кандидатов в J/ψ -мезоны. При этом рассматриваются только такие дочерние частицы, которые удовлетворяют специальным критериям, описанным ниже.

Глава 3 посвящена разработке эффективных критериев для надежного выделения сигнальных событий и выбору оптимальной толщины мишени. Основное назначение критериев отбора сигнальных событий – максимальное подавление фона при условии минимальной потери сигнальных событий. С этой целью используются специальные переменные (p_t , χ_{prim} , z -координата вершины распада, χ_{geo}^2), относящиеся к частицам, идентифицированным как электроны/позитроны, которые имеют заметно различающееся поведение для сигнальных и фоновых частиц.

Так как рассматриваемые переменные не позволяют с 100 % вероятностью отделить сигнальные частицы от фоновых, то для каждой такой переменной x нужно выбрать свою критическую границу. Для ее определения предлагается использовать две статистики: $F_1(x) = 1 - F_S(x)$ и $F_2(x) = F_{Bg}(x)$, где $F_S(x)$ – величина накопленной вероятности для распределения от переменной x для сигнальных частиц, а $F_{Bg}(x)$ – аналогичная величина для фоновых частиц.

Ниже приводятся используемые критерии отбора в порядке убывания степени их селективности – фактора подавления фона (смотри далее). При этом каждый последующий критерий применяется к выборке, оставшейся после применения предыдущего. На примере прицельного параметра χ_{prim} показано применение процедуры

отбора сигнала с помощью указанных статистик.

3.1 Поперечный импульс

Наиболее мощным критерием для подавления комбинаторного фона служит совместное распределение по поперечным импульсам для e^+e^- пары. Этот кинематический критерий работает особенно хорошо тогда, когда сумма масс дочерних частиц намного меньше массы родительской частицы. При этом подавляющее большинство дочерних частиц имеет большой поперечный импульс. Это как раз наш случай, так как $2m_e \ll m_{J/\psi}$; здесь m_e – масса электрона, а $m_{J/\psi}$ – масса J/ψ -мезона. Если выбрать ограничение на поперечный импульс больше 1 ГэВ/с, то при потере 10 % сигнальных событий фактор подавления фона составит 134.

3.2 Прицельный параметр

В качестве следующей признаковой переменной нами использовался прицельный параметр χ_{prim} , который определяется как расстояние между первичной вершиной и точкой пересечения треков заряженной частицы плоскости мишени при $z = z_{pv}$ (z_{pv} – координата первичной вершины, определяемая экстраполяцией треков всех первичных частиц в область мишени). Параметр χ_{prim} , выраженный в величинах σ (дисперсия соответствующего распределения), позволяет учесть ошибки, связанные с реконструкцией треков с помощью координатных детекторов STS и их экстраполяцией в неоднородном магнитном поле в область мишени.

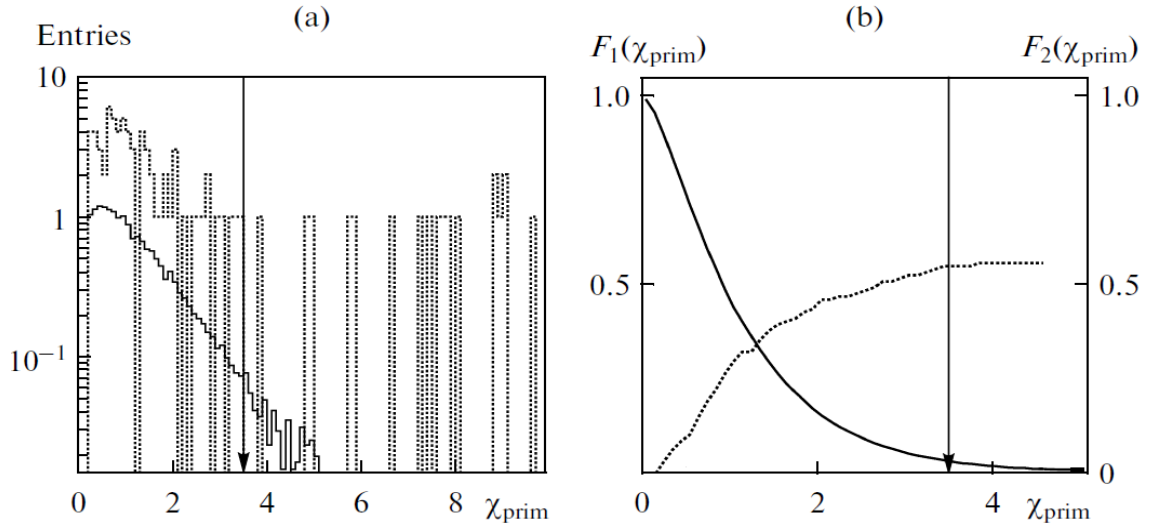


Рис. 5: Распределения сигнальных (сплошная линия) и фоновых (пунктирная линия) частиц в зависимости от величины χ_{prim} (a); зависимости $F_1(\chi_{prim})$ (сплошная линия) и $F_2(\chi_{prim})$ (пунктирная линия) (b)

Распределения сигнальных (сплошная линия) и фоновых (пунктирная линия) частиц в зависимости от величины χ_{prim} приведены на рис. 5(a). Видно, что подавляющая часть сигнальных частиц сосредоточена в области малых χ_{prim} , в то время как фоновые частицы распределяются также в области высоких (<3) значений χ_{prim} .

На рис. 5(b) представлены зависимости $F_1(\chi_{prim})$ и $F_2(\chi_{prim})$, из которых следует, что если выбрать в качестве критической границы $\chi_{prim} = 3,5$, то будет отброшена существенная доля фона при минимальной потере сигнальных частиц. Для указанной критической границы α – вероятность ошибки I-го рода (доля потерянных сигнальных

частиц) составит 5 %, а $\beta = 55\%$ – вероятность ошибки II-го рода (примесь фоновых частиц в допустимой области, т.е. в области сосредоточения сигнальных частиц).

При этом фактор подавления фона Bg_{sup} , равный (для β , выраженной в %) $Bg_{sup} = 100/\beta$, составит 1,8.

3.3 z -координата вершины распада

J/ψ -мезон – это короткоживущая частица со временем жизни $\tau = 21,6 \times 10^{-11}$ см. Поэтому, т.к. она распадается вблизи от первичной вершины, в качестве следующего критерия отбора нами использовалась величина $d_z = z_{J/\psi} - z_{pv}$, где $z_{J/\psi}$ – z -координата реконструированной вершины распада J/ψ -мезона.

Этот критерий применяется к трекам электрон-позитронных пар (оставшихся после критерия “прицельный параметр”), составленных путем перебора всех электронов с каждым позитроном. Если взять в качестве граничного значения $|d_z| < 0,08$ см, то при потере 8 % сигнальных событий фактор подавления фона составит 1,4.

3.4 Минимальное расстояние между треками, образующими e^+e^- пару

В дополнение к приведенным выше критериям, был предложен критерий, основанный на переменной χ_{geo}^2 . Здесь χ_{geo}^2 – это минимальное расстояние, выраженное в единицах σ (дисперсия соответствующего распределения), между треками частиц, образующих e^+e^- пару – кандидата в J/ψ -мезон. Используя значение $\chi_{geo}^2 < 3$, можно дополнительно подавить фон в 1,07 раз при потере 10 % сигнала.

Таким образом, электрон-позитронные пары, отбираемые в качестве кандидатов для J/ψ -мезонов, должны удовлетворять следующим критериям:

- поперечный импульс частиц должен быть больше 1 ГэВ/с;
- частицы испущены из области мишени: прицельный параметр $\chi_{prim} < 3,5$;
- модуль z -координаты восстановленной вершины распада не превышает 0,08 см;
- расстояние между треками, образующими e^-e^+ пару, должно быть минимальным: $\chi_{geo}^2 < 3$.

Кроме того, детальное изучение состава комбинаторного фона показало, что наибольший вклад в него вносит конверсия γ -квантов в материале мишени (толщина мишени составляла 250 мкм). Конверсию можно существенно уменьшить, если использовать мишень толщиной 25 мкм. При использовании тонкой мишени без потерь выхода сигнала комбинаторный фон можно сократить более, чем в 4 раза.

На рис. 6(а) и 6(б) представлены зависимости поперечного импульса от быстроты до и после применения критериев отбора. Из этих рисунков следует, что используемый нами набор критериев не приводит к искажению соответствующего фазового пространства.

В **Главе 4** описана процедура построения спектра инвариантной массы и приводятся результаты апробации разработанной методики селекции и реконструкции J/ψ на pC-, pAu- и AuAu-соударениях при различных энергиях.

Спектр инвариантных масс для отобранных кандидатов в J/ψ -мезоны формировался из суммы двух распределений: а) спектра масс, включающего сигнальные события, б) спектра масс, связанного с комбинаторным фоном.

Процедура построения спектра масс, включающего сигнальные события, состояла в следующем:

- 1) для каждого Au+Au соударения с помощью пакета UrQMD генерировался набор “фоновых” частиц, к которому с помощью пакета PLUTO добавлялась электрон-позитронная пара от распада $J/\psi \rightarrow e^+e^-$;

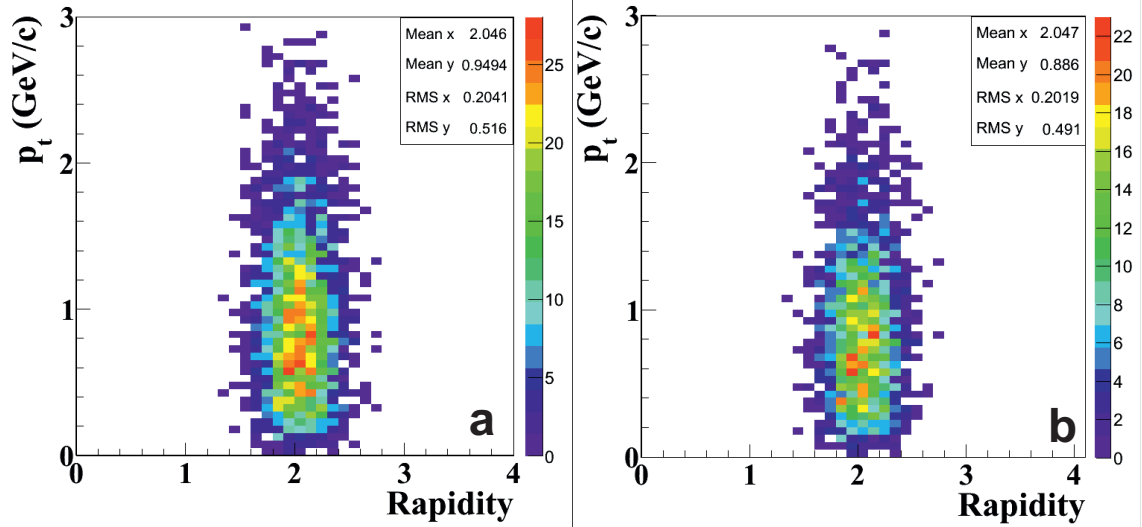


Рис. 6: Диаграмма зависимости поперечного импульса от быстроты для реконструированных J/ψ -мезонов до (a) и после (b) применения критериев отбора

- 2) набор указанных частиц транспортировался через установку CBM с помощью средств пакета GEANT3; при этом, используя детекторы RICH, TRD и TOF, проводилась их идентификация и селекция электронов и позитронов;
- 3) частицы, идентифицированные как электроны и позитроны, использовались для реконструкции J/ψ -мезонов с помощью пакета KFParticle; для того, чтобы уменьшить вклад фона, рассматривались частицы испущенные из области мишени, для которых поперечный импульс превышал 1 ГэВ/с.

Данная процедура позволяет оценить эффективность реконструкции J/ψ , рождающихся в центральных UrQMD событиях (им отвечают ядро-ядерные соударения, в которых параметр соударения сталкивающихся ядер равен нулю). При нормировке пика, отвечающего сигнальным событиям, учитывались вероятность рождения J/ψ $M = 1,92 \times 10^{-5}$ для AuAu-соударений при энергии 25 ГэВ/нуклон (согласно модели HSD [20]), вероятность распада J/ψ по диэлектронному каналу $BR = 6\%$ [21], количество разыгранных центральных соударений $N(i)$ и эффективность Eff регистрации сигнала установкой CBM:

$$N(s) = N(i) \cdot M \cdot BR \cdot Eff.$$

Процедура построения спектра масс, отвечающего комбинаторному фону, отличалась от процедуры, описанной выше, тем, что к набору частиц, генерируемому с помощью пакета UrQMD, не добавлялась электрон-позитронная пара от распада J/ψ -мезона. Кроме того, для получения статистики, сопоставимой с числом отсчетов в сигнальном спектре, использовалась методика комбинирования событий.

На рис. 7 представлены спектры инвариантной массы для кандидатов в J/ψ для случаев, когда при идентификации электронов/позитронов с помощью TRD используется МСП (a) и модифицированный критерий ω_6^4 (b). Приведенные спектры соответствуют 10^{11} центральным соударениям AuAu при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон. Сплошным цветом показан полученный спектр инвариантных масс для сигнальных событий; спектру масс, связанному с комбинаторным фоном, соответствует заштрихованная область на рис. 7. Из рисунков видно, что сигнал от J/ψ -мезонов четко выделяется над комбинаторным фоном: отношение сигнала к фону равняется $\sim 7,5$.

Эффективность регистрации сигнала для обоих рассмотренных случаев составила 13,5%.

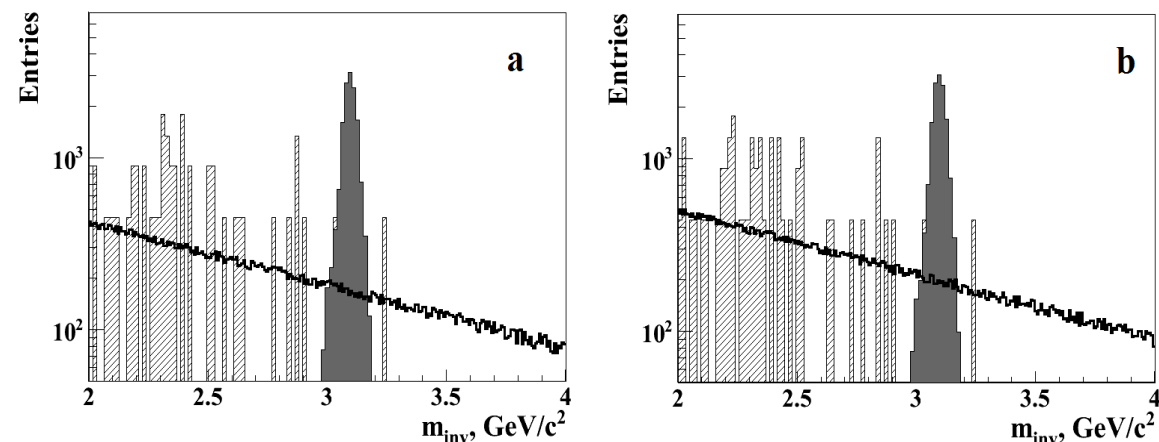


Рис. 7: Реконструированный спектр инвариантной массы для кандидатов в J/ψ в случае, когда при идентификации электронов/позитронов с помощью TRD используется: а) МСП или б) модифицированный критерий ω_6^4

Аналогичные спектры были получены и для pC-, pAu-соударений при энергии 30 ГэВ и AuAu-соударений при энергии 10 ГэВ/нуклон. Результаты представлены в таблице 1. Здесь M – вероятность рождения J/ψ , BR – вероятность распада J/ψ по диэлектронному каналу, Eff – эффективность регистрации сигнала, S/B – отношение сигнала к фону. Здесь же приведено количество J/ψ , которое сможет регистрировать установка СВМ за 1 час работы при частоте соударений 10 МГц.

Тип взаимодействий, энергия	M	BR	Eff	S/B	J/ψ в час
pC, 30 ГэВ	$2,35 \times 10^{-8}$	6%	22%	12	11
pAu, 30 ГэВ	6×10^{-8}	6%	22%	15	27
AuAu, 10 ГэВ/нуклон	$1,74 \times 10^{-7}$	6%	18%	0,18	64
AuAu, 25 ГэВ/нуклон	$1,92 \times 10^{-5}$	6%	13,5%	7,5	5250

Таблица 1: Сводная таблица результатов

Из приведенной таблицы видно, что развитая методика позволяет при различных энергиях набрать за приемлемое для эксперимента время с помощью установки СВМ достаточно большую статистику J/ψ при их распаде по диэлектронному каналу.

Так как регистрацию и реконструкцию событий, связанных с рождением чармония, планируется проводить в режиме реального времени эксперимента, то рассматриваемые методы и алгоритмы должны быть не только эффективными, но и быстрыми. В **Главе 5** проведена оценка временных затрат алгоритмов, используемых для регистрации $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, с учетом их ускорения за счет векторизации программного

кода посредством SIMD-инструкций (Single Instruction Multiple Data) [22] и распараллеливания задач между ядрами процессора, реализованных с помощью программных сред OpenMP [23], OpenCL [24] и библиотеки ТВВ [25].

В качестве примера рассмотрены алгоритмы идентификации электронов/позитронов с помощью детектора TRD. Среднее время работы скалярных версий алгоритмов на основе МСП и критерия ω_n^k составляет, соответственно, 2,4 мкс/трек и 1,7 мкс/трек. Таким образом, алгоритм на основе критерия ω_n^k оказался в 1,4 раза быстрее, чем алгоритм с использованием МСП.

Для ускорения алгоритма ω_n^k вначале была проведена частичная векторизация кода с использованием SIMD-инструкций. За счет оптимизации кода и использования SIMD-инструкций, удалось добиться ускорения алгоритма в 3,5 раза.

Следующий шаг по ускорению алгоритма – это распараллеливание вычислений на многоядерных высокопроизводительных серверах. Для решения данной задачи использовался высокопроизводительный сервер `cuda.jinr.ru` ЛИТ ОИЯИ и программная среда OpenMP (Open Multi-Processing). Сервер `cuda.jinr.ru` оснащен двумя процессорами Intel Xeon X5660, каждый процессор включает 6 физических ядер с частотой 2,8 ГГц, 12 Мбайт кэш-памяти третьего уровня, которая делится между ядрами, и 24 Гбайт оперативной памяти. Одному физическому ядру отвечают два логических ядра, 32 Кбайт кэш-памяти первого уровня и 256 Кбайт второго. За счет применения технологии гиперпоточности на сервере можно одновременно запускать 24 потока.

На рис. 8 представлена зависимость производительности алгоритма идентификации заряженных частиц на основе критерия ω_n^k от числа запущенных потоков. Видно, что эта зависимость носит линейный характер; при этом максимальная производительность составила 31 трек/мкс.

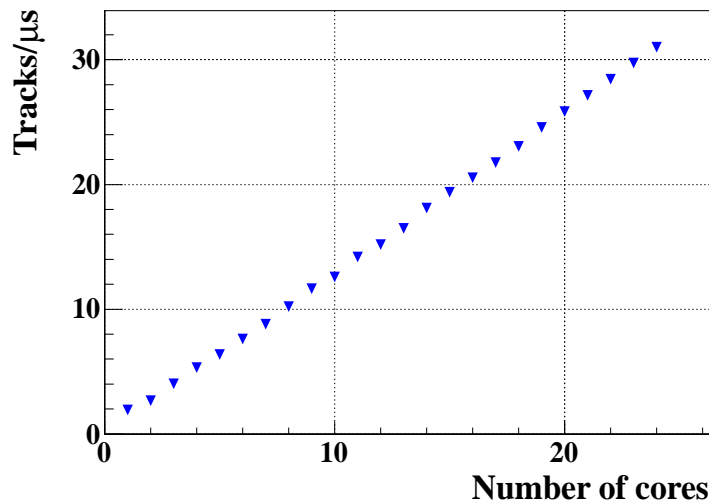


Рис. 8: Зависимость производительности алгоритма идентификации заряженных частиц на основе критерия ω_n^k от числа запущенных потоков

Таким образом, за счет векторизации кода и распараллеливания обработки на многоядерном сервере `cuda.jinr.ru`, по сравнению со скалярной версией алгоритма, удалось ускорить время выполнения алгоритма в 56 раз.

В таблице 2 представлены коэффициенты ускорения всех алгоритмов, используемых для реконструкции $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, полученные за счет векторизации программного кода с помощью SIMD-инструкций.

STS: КА поиск треков	STS: фильтр Калмана	RICH: рек. кольцо	TRD: критерий ω_n^k	пакет KFParticle
2	4	2	3,5	2,5

Таблица 2: Коэффициенты ускорения алгоритмов, полученные за счет векторизации программного кода

Заметим, что имеются определенные резервы на этом пути ускорения вычислений, т.к. некоторые алгоритмы, такие как алгоритм поиска и реконструкции траекторий заряженных частиц с помощью координатных детекторов TRD, вообще не подвергались векторизации, а другие, в частности пакет KFParticle, были векторизованы не полностью. В случае максимально возможной оптимизации и векторизации всех алгоритмов суммарный фактор ускорения вычислений может быть заметно выше.

В таблице 3 приведены средние времена Δt , затрачиваемые разными алгоритмами (в мкс/трек или мкс/кольцо), используемыми для реконструкции распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$. Заметим, что приведенные результаты относятся к SIMD-версиям алгоритмов (исключая алгоритм поиска и реконструкции треков в TRD) и получены с использованием одного логического ядра CPU.

STS: КА поиск треков	STS: фильтр Калмана	RICH: рек. кольцо	TRD: поиск, рек. треков	TRD: кр. ω_n^k	пакет KFParticle
164,5	0,5	49	1390	0,5	9,15

Таблица 3: Средние времена Δt (в мкс/трек или мкс/кольцо), затрачиваемые SIMD-версиями алгоритмов, используемых для реконструкции распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$

Из приведенной таблицы видно, что время, затрачиваемое алгоритмом TRD на поиск и реконструкцию траекторий заряженных частиц, во много раз превышает суммарное всех остальных алгоритмов. Следует отметить, что в настоящее время нами ведется разработка нового алгоритма, основанного на модели клеточного автомата. Ожидается, что скалярная версия этого алгоритма будет существенно более быстрой. Кроме того, проведение векторизации и распараллеливания программного кода позволит добиться дополнительного ускорения нового алгоритма.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту

1. Методика на основе комплекса математических методов и соответствующих вычислительных алгоритмов для быстрого распознавания и реконструкции редких распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, регистрируемых установкой СВМ в условиях доминирующего адронного фона.
2. Система эффективных признаков переменных, обеспечивших максимальное подавление фона и надежное выделение сигнала. Процедура для выбора критических границ, разделяющих по указанным переменным области сигнальных и фоновых событий.
3. Процедура оптимизации геометрии установки СВМ для эффективной регистрации распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, позволившая, в частности, выбрать оптимальную толщину мишени.

4. Быстрый параллельный алгоритм на основе критерия согласия ω_n^k , который можно использовать в режиме реального времени эксперимента для идентификации заряженных частиц, регистрируемых детектором TRD.
5. Результаты оценки производительности всех алгоритмов, позволившие определить возможности по ускорению процесса обработки за счет применения современных высокопроизводительных вычислительных систем, а также выявить “слабые места” в цепочке используемых методов.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

- [A1] Дереновская О.Ю. и Васильев Ю.О.: *Реконструкция J/ψ в диэлектронном канале распада при энергиях SIS100 в эксперименте CBM* // “Письма в ЭЧАЯ”, 2013, Т.10, № 5(182), стр. 694-705.
- [A2] Дереновская О.Ю. и Васильев Ю.О.: *Критерии отбора распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, регистрируемых установкой CBM в AuAu-соударениях при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон* // “Письма в ЭЧАЯ”, Т.10, № 7(184), 2013, стр. 1163-1174.
- [A3] Дереновская О.Ю., Иванов В.В.: *Реконструкция и отбор распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, регистрируемых установкой CBM в AuAu-соударениях при энергии пучка 25 ГэВ/нуклон* // “Письма в ЭЧАЯ”, Т.11, №4 (188), 2014, стр. 862-885.
- [A4] Derenovskaya O.Yu., Ivanov V.V.: *Algorithms for selection of $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ decays registered in the CBM experiment* // Вестник РУДН. Серия “Математика. Информатика. Физика”, №2, 2014. pp. 350-353.
- [A5] Дереновская О.Ю. и Иванов В.В.: *Векторизация и распараллеливание алгоритмов селекции и реконструкции распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ в реальном времени эксперимента CBM* // Вестник РУДН. Серия “Математика. Информатика. Физика”, №4, 2014, стр. 50-67.
- [A6] Denisova (Derenovskaya) O.Yu. et al.: *Study of the electron energy losses in the TRD* // CBM Progress Report 2008, GSI Darmstadt, 2009, p. 82.
- [A7] Derenovskaya O.Yu. et al.: *On electron/pion identification using a multilayer perceptron in the CBM TRD* // Scientific report 2008-2009 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Ivanov, V.V. Korenkov, T.A. Strizh and P.V. Zrelov, JINR 2009-196, Dubna, 2009, p. 51.
- [A8] Derenovskaya O.Yu. et al.: *Methods of e/π identification with the Transition Radiation Detector in the CBM experiment* // Proceedings of the XXII International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2009), Bulgaria, Varna, September 7-14, Издательский отдел ОИЯИ, 2009, pp. 22-29.
- [A9] Derenovskaya O.Yu. et al.: *Methods for e/π identification with the Transition Radiation Detector* // CBM Progress Report 2009, GSI Darmstadt, 2010, p. 82.
- [A10] Derenovskaya O.Yu. et al.: *On a modification of the ω_n^k criterion for e/π identification in the TRD* // CBM Progress Report 2009, GSI Darmstadt, 2010, p. 83.

- [A11] Denisova (Derenovskaya) O.Yu. et al.: *On Electron/Pion Identification Using a Multilayer Perceptron in the CBM TRD* // XXII Int. Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'09), Bulgaria, Varna, September 7-14, 2009: Book of abstracts, Dubna, JINR, 2011, p. 18.
- [A12] Denisova (Derenovskaya) O.Yu. et al.: *Electron/Pion Identification with the Transition Radiation Detector in the CBM Experiment* // Int. Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (MMCP'09), Dubna, July 7-11, 2009: Book of abstracts, Dubna, JINR, 2009, p. 105.
- [A13] Derenovskaya O.Yu. et al.: *Study of the optimal TRD radiator structure for the CBM experiment* // Scientific report 2010-2011 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Ivanov, V.V. Korenkov, T.A. Strizh and P.V. Zrelov, JINR 2011-130, Dubna, 2011, pp. 65-66.
- [A14] Derenovskaya O.Yu., Vassiliev I.O.: *J/ψ reconstruction using KFParticle in the CBM detector at SIS300 energies* // Scientific report 2010-2011 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Ivanov, V.V. Korenkov, T.A. Strizh and P.V. Zrelov, JINR 2011-130, Dubna, 2011, pp. 71-72.
- [A15] Derenovskaya O.Yu., Vassiliev I.O.: *J/ψ detection in p + Au collisions at 30 GeV* // GSI Scientific Report 2011, GSI Darmstadt, 2012, p. 77.
- [A16] Derenovskaya O.Yu., Vassiliev I.O.: *J/ψ → e⁺e⁻ reconstruction in Au+Au collision at SIS300 energies* // GSI Scientific Report 2011, GSI Darmstadt, 2012, p. 78.
- [A17] Derenovskaya O.Yu., Vassiliev I.O.: *J/ψ → e⁺e⁻ reconstruction in Au + Au collision at 25 AGeV in the CBM experiment* // Proceedings of the XXIII International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2011), Bulgaria, Varna, September 12-19, Издательский отдел ОИЯИ, 2011, pp. 107-112.
- [A18] Derenovskaya O.Yu., Ivanov V.V.: *ω_n^k test vs. ANN in the J/ψ selection problem based on the TRD* // CBM Progress Report 2012, GSI Darmstadt, 2013, p. 96.
- [A19] Derenovskaya O.Yu., Vassiliev I.O.: *J/ψ reconstruction in Au+Au collisions at 10 AGeV* // CBM Progress Report 2012, GSI Darmstadt, 2013, p. 107.
- [A20] Дереновская О.Ю.: *Регистрация J/ψ в диэлектронном канале распада в эксперименте CBM* // Тезисы докладов международной молодежной конференции-школы "Современные проблемы прикладной математики и информатики" (МРАМС'2012), Россия, Дубна, 22-27 августа, Издательский отдел ОИЯИ, 2012, стр. 86-90.
- [A21] Derenovskaya O.Yu., Ivanov V.V.: *Algorithms for J/ψ selection registered with CBM setup in Au+Au collisions at 25 AGeV* // Int. Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (MMCP'13), Dubna, July 8-12, 2013: Book of abstracts, Dubna, JINR, 2009, p. 69.
- [A22] Дереновская О.Ю., Васильев Ю.О., Иванов В.В.: *Методика реконструкции J/ψ → e⁺e⁻ в эксперименте CBM* // Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2013, НИЯУ МИФИ, Москва, Россия, 1-6 февраля 2013: Аннотации докладов, Т.3, стр. 128.

- [A23] Дереновская О.Ю., Васильев Ю.О.: *Методика реконструкции $J/\psi \rightarrow e^+ + e^-$ при энергиях SIS100 в эксперименте CBM* // Scientific report 2012-2013 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Korenkov, D.V. Podgajny, T.A. Strizh, P.V. Zrelov, JINR, Dubna, 2014, pp. 71-75.
- [A24] Дереновская О.Ю., Иванов В.В.: *Об идентификации $e^{+/-}$ с помощью детектора переходного излучения при регистрации распадов $J/\psi \rightarrow e^+ + e^-$ в эксперименте CBM* // Scientific report 2012-2013 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Korenkov, D.V. Podgajny, T.A. Strizh, P.V. Zrelov, JINR, Dubna, 2014, pp. 79-83.
- [A25] Дереновская О.Ю., Иванов В.В.: *Параллельные алгоритмы регистрации распадов $J/\psi \rightarrow e^+ + e^-$ в эксперименте CBM* // Int. Conference "Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education" (GRID'14), Dubna, June 30 - July 5, 2014: Book of abstracts, Dubna, JINR, 2014, p. 68.
- [A26] Дереновская О.Ю. и Васильев Ю.О.: *Критерии отбора распадов $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ при энергиях SIS300 в эксперименте CBM* // Scientific report 2012-2013 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Korenkov, D.V. Podgajny, T.A. Strizh, P.V. Zrelov, JINR, Dubna, 2014, pp. 75-78.

Список литературы

- [1] Matsui T. and Satz H.: J/ψ suppression by quark-gluon plasma formation, Phys. Lett. B 178, 416 (1986).
- [2] Alessandro B. et al. (NA50 collaboration): A New measurement of J/ψ suppression in Pb-Pb collisions at 158-GeV per nucleon, Eur. Phys. J. C 39 (2005) 335-345.
- [3] Leitch M.: RHIC results on J/ψ , J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34 (2007) S453.
- [4] Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report, GSI, Darmstadt, 2005 (http://www.gsi.de/onTEAM/dokumente/public/DOC-2005-Feb-447_e.html).
- [5] The CBM Collaboration, Nuclear Physics A 904-905 (2013) 1059c-1062c.
- [6] The CBM Physics Book, editing by B. Friman, P. Senger et al., Lecture Notes in Physics, Vol. 814, 1st Edition, 2011, 960 pages.
- [7] Friese V., The CBM Experiment - a Status Report, Physics of Atomic Nuclei, 2012, Vol. 75, No. 5, pp. 585-588.
- [8] GEANT - Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library, Long Write-up, W5013 (1995).
- [9] Bertini D., Al-Turany M., Koenig I., Uhlig F.: *The FAIR simulation and analysis framework*, Proc. of CHEP'07, Inter. Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics, 2-5 September 2007, Victoria, BC Canada, Journal of Physics: Conference Series, in press.
- [10] Gorbunov S. and Kisel I.: Reconstruction of Decayed Particles Based on the Kalman Filter, CBM-SOFT-note-2007-003, GSI, Darmstadt, 2007.
- [11] Silicon Tracking System(STS). Technical Design Report for the CBM, GSI, Darmstadt, 2012 (<http://www.fair-center.eu/en/for-users/experiments/cbm.html>)
- [12] Kulakov I.S., Baginyan S.A., Kisel P.I., Ivanov V.V.: Performance analysis of cellular automaton algorithm to solve the track-reconstruction problem on a multicore server at the Laboratory of Information Technologies, Joint Institute for Nuclear Research, "Particles and Nuclei, Letters", 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 162-170.
- [13] Зызак М.В., Иванов В.В., Кисель П.И., Аблязимов Т.О.: Метод фильтра Калмана для реконструкции траекторий заряженных частиц в эксперименте СВМ и его параллельная реализация на многоядерном сервере ЛИТ ОИЯИ, Вестник РУДН. Серия "Математика. Информатика. Физика", №2, 2014. pp. 191-196 .
- [14] Ring Imaging Cherenkov (RICH) Detector. Technical Design Report for the CBM, GSI, Darmstadt, 2013, (<http://www.fair-center.eu/en/for-users/experiments/cbm.html>)
- [15] Лебедев С., Ососков Г.: Быстрые алгоритмы распознавания колец и идентификации электронов в детекторе RICH эксперимента СВМ, "Письма в ЭЧАЯ", 2009, Т. 6, 2(151), стр. 260-284.

- [16] Lebedev A. et al. for CBM Collaboration: Track reconstruction algorithms for the CBM experiment at FAIR, CHEP'09, J. Phys.: Conf. Ser. 219 (2010) 032048, doi:10.1088/1742-6596/219/3/032048.
- [17] Акишина Т.П.: Особенности применения критерия ω_n^k к задаче идентификации электронов с помощью детектора переходного излучения в эксперименте CBM, "Письма в ЭЧАЯ", 2012, Т.9, No.(173), стр. 440-462.
- [18] <http://root.cern.ch/root/html/TMultiLayerPerceptron.html>
- [19] Deppner I. et al.: The CBM time-of-flight wall, Nucl.Instrum.Meth. A661 (2012) S121-S124.
- [20] Geiss J., Cassing W. and Greiner C. Strangeness production in the HSD transport approach from SIS to SPS energies, Nucl. Phys. A 644 (1998), Pp. 107-138
- [21] Nakamura K. et al. (Particle Data Group), JP G 37, 075021 (2010) and 2011 partial update for the 2012 edition (URL: <http://pdg.lbl.gov>)
- [22] IA-32 Intel Architecture Optimization Reference Manual. Intel, 2005.
- [23] OpenMP, (<http://openmp.org>).
- [24] OpenCL, (<http://www.khronos.org/opencl>).
- [25] Threading Building Blocks, (<http://threadingbuildingblocks.org>)