

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Битюкова С.И. о диссертационной работе Дереновской Ольги Юрьевны “Методы и алгоритмы распознавания и реконструкции распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в эксперименте СВМ”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа Ольги Юрьевны Дереновской посвящена разработке и развитию эффективных математических методов и быстрых вычислительных алгоритмов для надежной регистрации  $J/\psi$ -мезонов в диэлектронном канале распада и применению программных средств, построенных на основе разработанной методики, в задачах оптимизации создаваемой в центре им. Гельмгольца под Дармштадтом (Германия) установки СВМ (Compressed Baryonic Matter) и в задачах планирования будущих экспериментальных исследований на данной установке.

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время ведется строительство международного ускорительного комплекса антипротонов и тяжелых ионов FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research). На этом комплексе планируется проведение ряда экспериментов с участием ученых из ОИЯИ. Экспериментальные исследования на установке СВМ нацелены на изучение новых свойств ядерной материи, проявляющихся в ядро-ядерных соударениях при энергии пучка 2-45 ГэВ/нуклон. Главной задачей физической программы проекта СВМ является исследование очарованных частиц ( $J/\psi$ -мезонов), рождающихся в столкновениях тяжелых ионов. Это исследование базируется на результатах регистрации, идентификации и реконструкции распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ . Для регистрации этих процессов будут использоваться интенсивные потоки падающего пучка (до  $10^7$  ядро-ядерных столкновений в секунду). В результате каждого такого соударения рождаются от 100 до 1000 вторичных заряженных частиц, летящих вперед в небольшом телесном угле. Поэтому надежную идентификацию и реконструкцию редких сигнальных событий нужно будет проводить в условиях интенсивного фона, что накладывает жесткие временные ограничения на обработку и анализ регистрируемых событий. Все это обуславливает актуальность диссертационной работы Дереновской О.Ю.

### Оценка содержания диссертационной работы

Диссертационная работа О.Ю. Дереновской имеет общий объем 108 страниц, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 103 наименований.

*Во введении* приводится обзор текущего состояния исследований ядерной материи, образующейся в ядро-ядерных соударениях при высоких энергиях, определяется место эксперимента CBM в этих исследованиях, анализируются возможные признаки образования кварк-глюонной плазмы, в том числе связанные с рождением  $J/\psi$ -мезонов.

*В первой главе* обсуждается физическая программа эксперимента CBM, приводится структура экспериментальной установки, обсуждается назначение основных ее элементов, предназначенных для регистрации распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ , формулируется постановка задачи, решение которой является целью диссертационной работы.

*Во второй главе* детально описана методика, включающая комплекс математических методов и соответствующих вычислительных алгоритмов, предназначенных для отбора из всей совокупности заряженных частиц, регистрируемых детекторами установки CBM, электронов и позитронов. С помощью рассматриваемых алгоритмов вначале проводится восстановление траекторий и импульсов заряженных частиц, а затем их идентификация. Надежная идентификация электронов/позитронов в условиях доминирующего адронного (в основном от заряженных пионов) фона является ключевой проблемой в рассматриваемой задаче. Для ее решения используется информация с детекторов черенковского RICH и переходного TRD излучений, а также измерения времени пролета TOF. Так как детектор TRD вносит определяющий вклад в эту процедуру, автором проведен сравнительный анализ двух разных методов идентификации заряженных частиц, регистрируемых данным детектором. Показано, что метод на основе искусственной нейронной сети, используемый в настоящее время в эксперименте CBM для решения поставленной задачи, имеет ряд существенных ограничений. В качестве альтернативы предложен метод на основе непараметрического критерия согласия  $W_{\chi^2}^k$ . Проведенный в четвертой главе анализ также показал, что оба подхода дают близкие результаты по выходу  $J/\psi$ -мезонов и отношению “сигнал/фон”. Учитывая простую программную реализацию алгоритма критерия  $W_{\chi^2}^k$ , предлагается использовать его для отбора  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в реальном времени эксперимента.

В выборке электронов и позитронов, сформированной с помощью указанной методики, наряду с частицами от распада  $J/\psi$ -мезона присутствует заметная доля частиц от различных сопутствующих процессов, в том числе и примесь от заряженных пионов, идентифицированных ошибочно как электроны или позитроны. В этой связи, отобранные частицы подвергаются дополнительной фильтрации с помощью специальных критериев, предназначенных для эффективного отбора сигнальных событий и последующего подавления фона. Эти критерии основаны на так называемых признаковых переменных, которые учитывают характерные особенности сигнальных событий, отличающие их от случайного фона. Описанию специальных критериев отбора сигнальных событий

посвящена *третья глава*. Здесь же предложена процедура выбора критических границ для рассматриваемых переменных. Показано, что разработанная система критериев отбора не приводит к искажению фазового пространства событий  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ , позволяя подавить случайный фон и надежно выделить сигнал. Совместное использование развитой во второй главе методики и специальных критериев отбора позволило выбрать оптимальную толщину мишени, в результате чего без потери сигнальных событий удалось практически в 4 раза уменьшить комбинаторный фон.

*В четвертой главе* подробно описана процедура построения спектров инвариантной массы  $J/\psi$ -мезонов, выделенных и реконструированных с помощью описанных в работе методики и критериев отбора. Показано, что установка СВМ позволяет в широком диапазоне энергий (от 10 до 30 ГэВ/нуклон) и для различных типов соударений (в частности, таких, как p+C, p+Au и Au+Au) набирать достаточно большую статистику событий  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  за разумное время работы ускорителя.

Принимая во внимание тот факт, что отбор и реконструкцию процессов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  планируется проводить в реальном времени эксперимента, *в пятой главе* выполнен анализ производительности используемых в настоящей работе вычислительных алгоритмов. Для ускорения всех алгоритмов использовались два подхода: векторизация программного кода посредством SIMD-инструкций и проведение параллельных вычислений на высокопроизводительных гибридных серверах. На примере распараллеливания скалярной версии алгоритма для идентификации электронов/позитронов с помощью детектора TRD на основе критерия  $w_{\pi}^k$  показано, что используя указанные технологии на современных многоядерных процессорах можно почти на два порядка повысить производительность алгоритма. В результате выполненных исследований также определены “слабые” места в цепочке используемых методов и намечены основные направления для дальнейшего ускорения процесса обработки.

*В заключение* подводятся итоги выполненных исследований, отмечается научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Отмечается личный вклад соискателя.

#### Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

В диссертации подробно описаны все этапы предлагаемой автором методики реконструкции распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в установке СВМ, начиная с задач идентификации регистрируемых частиц, определения критериев отбора нужных распадов, восстановления инвариантных масс вплоть до задач векторизации и распараллеливания алгоритмов регистрации и реконструкции событий. Изложены как используемые известные методы и алгоритмы, так и методы и алгоритмы разработанные или усовершенствованные автором диссертации. Во многих случаях дан сравнительный анализ результатов, полученных разными методами.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на многих международных и российских конференциях и совещаниях, а также используются коллаборацией СВМ при планировании экспериментальных исследований, что подтверждает обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе.

#### Оценка достоверности и новизны результатов работы

Полученные О.Ю. Дереновской результаты согласуются с результатами исследований, проводимыми в рамках коллаборации СВМ. При этом производительность разработанного автором комплекса математических методов и соответствующих вычислительных алгоритмов для реконструкции процессов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в установке СВМ значительно превосходит существующие аналоги.

Результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных журналах.

#### Общая оценка работы

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, написана грамотно и аккуратно оформлена. Выводы и заключения достаточно обоснованы и не вызывают сомнений. Следует отметить наличие практических аспектов выполненной диссертантом работы. Например, процедура оптимизации геометрии установки СВМ позволила выбрать оптимальную толщину мишени.

При этом имеется ряд замечаний и вопросов по изложению материала:

- 1) В тексте автореферата на стр.3 "Исследования ... до сих пор не дали четкого объяснения существующим моделям". Обычно модели дают объяснения результатам. Здесь, наверное, было бы лучше сказать "Результаты исследований ... не могут быть объяснены существующими моделями".
- 2) В тексте диссертации не обошлось без опечаток (стр. 10, 23, 36 и 59).
- 3) На стр.8 ширина распада "91,0+/-3,2 кэВ", правильнее "92,9+/-2,8 кэВ".
- 4) В составе установки СВМ упоминается калориметр ECAL. Однако он не упоминается при описании алгоритмов идентификации электронов и позитронов. Он не участвует в реконструкции электронов и позитронов?

#### Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы, содержащей ряд важных результатов в методических исследованиях, связанных с постановкой физического эксперимента и имеющих большую практическую ценность. Результаты диссертации могут быть использованы в других экспериментах.

Рассмотренная диссертация является законченной научно-исследовательской работой. Она выполнена лично автором и характеризуется высоким научным уровнем. Работы, вошедшие в диссертацию, являются достоверными и оригинальными.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Тема диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Считаю, что диссертация “Методы и алгоритмы распознавания и реконструкции распадов  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  в эксперименте СВМ” отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Ольга Юрьевна Дереновская, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник ФГБУ ГНЦ РФ ИФВЭ  
НИЦ «Курчатовский институт»  
« 03 » апреля 2015 г.

С.И. Битюков

Подпись доктора физико-математических наук ведущего научного сотрудника  
ФГБУ ГНЦ РФ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» Битюкова С.И.  
удостоверяю:

Ученый секретарь ФГБУ ГНЦ РФ ИФВЭ  
НИЦ «Курчатовский институт»

Н.Н. Прокопенко

« 03 » апреля 2015 г.