

СКАЧКОВА

Анна Николаевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАРНОГО
РОЖДЕНИЯ СУПЕРСИММЕТРИЧНЫХ ПАРТНЁРОВ
ТОП-КВАРКОВ НА БУДУЩЕМ МЕЖДУНАРОДНОМ
ЛИНЕЙНОМ КОЛЛАЙДЕРЕ (ILC) И ПРОЦЕССОВ С
РОЖДЕНИЕМ ЛЕПТОННЫХ ПАР НА ПЛАНИРУЕМОМ
УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ FAIR**

Специальность: 01.04.23 - физика высоких энергий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель: **Г.Д. Алексеев**
кандидат физико-математических наук
ЛЯП ОИЯИ, г.Дубна

Официальные оппоненты: **А.П. Чеплаков**
кандидат физико-математических наук
ЛФВЭ ОИЯИ, г.Дубна

А.В. Киселёв
доктор физико-математических наук
ОТФ ИФВЭ, г.Протвино

Ведущая организация: **ФИАН, г.Москва**

Защита диссертации состоится “ _____ ” _____ 2012 г.
в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01
при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино
Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 201 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность темы:

1. Стандартная Модель (СМ) электрослабых взаимодействий, с помощью которой удалось описать много экспериментальных данных, не является законченной теорией. Суперсимметричное расширение СМ рассматривается как наиболее перспективный вариант её развития. В нём предполагается существование суперсимметричных аналогов известных нам кварков, глюонов, лептонов и калибровочных W - и Z - бозонов, но имеющих более тяжёлые массы. В экспериментах, проведённых на таких коллайдерах как LEP, HERA и Tevatron, этих частиц не обнаружено. Сейчас надежды возлагаются на Большой Адронный Коллайдер (БАК или LHC) и будущий электрон-позитронный Международный Линейный Коллайдер (ILC), нацеленный на высокоточный поиск новых частиц, а также на детальное исследование тех частиц, которые будут открыты на LHC. Надо иметь в виду, что из-за огромной энергии сталкивающихся протонных пучков на БАКе, а также наличия непосредственно не участвующих в “жестком” одинарном партон-партонном ($2 \rightarrow 2$) взаимодействии протонных компонент (т.е. так называемых “спектаторных кварков”), равно как и присутствие множественных взаимодействий (“underlying events”), обусловленных “мягкими хромодинамическими взаимодействиями”, и эффекта “наложения (pile-up)” в детекторах сигналов от разных, почти одновременно происходящих событий, характерных при высокой светимости, исследование суперсимметричных частиц будет весьма затруднено большими сопутствующими фонами. В случае же ILC, благодаря точечной природе электронов, т.е. отсутствию конституэнтов у сталкивающихся электронов и позитронов, а также у гамма-квантов (при работе ILC в режиме фотон-фотонного коллайдера, называемого PLC), получаемые сигналы от интересующих нас процессов будут существенно более “чистыми” и, соответственно, легче отделяемыми от фоновых событий. Следует отметить, что среди суперсимметричных партнеров кварков (называемых “скварками”) самыми легкими будут, согласно теории, суперсимметричные партнеры самого тяжёлого топ-кварка, т.е. стоп-кварки (называемые также “скалярными топ-кварками”). В силу этого, при поиске представителей семейства скварков, поиск стоп-кварков будет первоочередной задачей. Принимая во внимание, что коллаборация ILC планирует завершение формирования своих физической и технической программ на начало 2014 года, результаты моделирования процессов с рождением и распадом стоп-кварков являются весьма востребованными.

2. Эксперимент PANDA, включенный в планы будущего ускорительного комплекса FAIR (GSI, Дармштадт), пуск которого намечен на 2016-2017 гг., нацелен на детальное изучение сильных взаимодействий, происходящих при средних энергиях при столкновении высокоинтенсивного антипротонного пучка с протонной мишенью. Исследования, представленные в данной диссертации и основанные на Монте-Карло моделировании процесса образования лептонных пар, были начаты в то время, когда окончательный дизайн детектора PANDA и составляющих его подсистем еще не был выбран и зафиксирован. Полученные в данной работе кинематические распределения мюонов, рождаемых в процессе образования мюонных пар, показали, что предлагаемый ранее проект мюонной станции не позволит зарегистрировать значительную часть сигнальных мюонов и в результате может быть потеряна значительная часть статистики. В силу этого, основываясь на результатах, приведенных в данной работе, коллаборацией PANDA было принято решение о разработке другого варианта дизайна мюонной станции, нежели тот, который был предложен ранее. В результате, изготовление мюонной станции предполагается поручить экспериментальной группе ОИЯИ, инициировавшей исследование, выполненное в выдвигаемой на защиту диссертации.

Кроме этого, проведенное исследование, осуществлённое путём моделирования входящих в список эталонных для эксперимента PANDA процессов с рождением мюонных (а также электронных) пар, может быть использовано, как показано в диссертации, для получения новой информации о структурных функциях протона.

Целью данной диссертации является:

- Изучение возможности обнаружения на ILC скалярных топ-кварков (стоп-кварков), предсказываемых суперсимметричной теорией, и проведение моделирования процессов с их рождением при работе ускорительного комплекса ILC как в опции электрон-позитронных столкновений, так и в режиме фотон-фотонного коллайдера. Разработка методов для: а) отделения сигнальных событий с парным рождением стоп-кварков от фоновых событий и б) определения массы стоп-кварка.
- Изучение возможных распределений кинематических переменных лептонов (электронов, мюонов), образовавшихся в процессе рождения лептонных пар при энергиях, доступных на FAIR. Определение необходимого для регистрации лептонных пар акцептанса мюонной системы, входящей в состав детектора эксперимента PANDA. Разработка критериев для отделения событий с сигнальными

лептонными парами от фоновых событий, обусловленных другими процессами сильных взаимодействий. Обоснование возможности проведения измерения с помощью событий, содержащих лептонные пары, структурных функций протона в области времениподобных значений переданного импульса и определение размеров кинематической области, доступной для измерения.

Практическая ценность работы состоит в том, что:

1. Выполненное моделирование показало, что будущий Международный Линейный Коллайдер (ILC) имеет хорошие возможности для весьма “чистого” выделения сигнала рождения стоп-кварка при условии его существования в промежутке масс, определяемых выбранным каналом распада $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$. На основе смоделированных событий построены распределения кинематических переменных, имеющих струйную природу, которые применены для выработки критериев для отделения сигнальных событий от основного фона, обусловленного распадом топ-кварка по каналу $t \rightarrow bW^\pm$. Получены значения сечений процессов парного рождения стоп-кварков для пяти значений энергии электрон-позитронных пучков $\sqrt{s} = 350, 400, 500, 800, 1000$ ГэВ. Разработан метод определения массы стоп-кварка, при условии, что масса нейтралино будет известна из анализа других процессов.

2. Выполненная работа по моделированию процессов рождения лептонных пар на FAIR при энергии антипротонного пучка $E_{beam} = 14$ ГэВ явилась основой для оптимизации геометрических размеров такой важной части детектора эксперимента PANDA, как мюонная система. Поскольку в эксперименте PANDA эти процессы включены в список эталонных, то информация о полученных распределениях кинематических переменных мюонов и электронов может быть использована в калибровочных целях при проведении других измерений. Показано, что экспериментальные данные, набранные для изучения процессов с рождением лептонных пар, позволят провести измерение структурной функции протона $F(x, Q^2)$ в области времениподобных значений переданного импульса q ($q^2 = (p^{l^+} + p^{l^-})^2 = Q^2 > 0$). В настоящий момент времени эта область существенно менее исследована, чем область пространственноподобных значений переданного импульса q ($q^2 = (p_1^l - p_2^l)^2 = Q^2 < 0$), которая весьма основательно изучена в процессах глубоко-неупругих лептон-нуклонных столкновений $l + p \rightarrow l + X$. Измерение процессов $p\bar{p} \rightarrow l^+l^- + X$ на вполне доступной для эксперимента PANDA большой статистике позволит получить весьма точную информацию о распределении валентных кварков внутри протона (т.к. в антипротоне антикварки играют роль валентных кварков в протоне).

Сделанные оценки показали, что эти измерения позволят покрыть достаточно широкую область по бьеркеновской переменной x : $0.05 < x < 0.70$ при значениях квадрата переданного импульса $Q^2 < 6.2 \text{ ГэВ}^2$. Эта информация может быть использована как внутри коллаборации для интерпретации полученных данных, так и для других экспериментов на FAIR и вне её, а также для теоретических исследований.

В диссертации получены следующие новые результаты:

- Впервые для обеих опций работы ИЛС (e^+e^- и $\gamma\gamma$ - пучки) получены детальные кинематические распределения для объектов, составляющих конечные состояния каскадного распада стоп-кварка по каналу $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0 W^\pm$, на первом этапе которого появляются b-кварк и суперсимметричная частица чарджино, распадающаяся далее на нейтрино и W-бозон. Далее, на третьем этапе, один из W бозонов распадается на пару кварков $W \rightarrow q_i\bar{q}_j$, рождающих адронные струи, а другой W бозон распадается на мюон и нейтрино $W \rightarrow \mu\nu_\mu$. Также осуществлено аналогичное моделирование и построены кинематические распределения для процесса рождения пары топ-кварков, дающего основной фоновый вклад, существенно превышающий вклад сигнальных событий с рождением стоп-кварков.
- Предложен набор глобальных переменных, построенных из полученных кинематических распределений адронных струй и мюонов, демонстрирующих заметное различие между распределениями в процессах с рождением стоп-кварков и топ-кварков. На этой основе разработан ряд критериев для отбора сигнальных событий с использованием значений инвариантной массы всех струй, потерянной массы и общей детектируемой энергии. Эти критерии обеспечивают подавление фона и увеличение отношения числа сигнальных событий к числу фоновых событий с $S/B = 0.07$ до $S/B = 143$ (в случае e^+e^- пучков), и с $S/B = 0.15$ до $S/B = 59$ (в случае разнознаковых поляризаций фотонных пучков), а также с $S/B = 0.22$ до $S/B = 120$ (в случае, когда поляризации фотонных пучков имеют одинаковые знаки), что гарантирует высокий уровень подавления фона.
- Разработан новый метод для определения массы стоп-кварка путём измерения положения правого края пика гистограммы распределения инвариантной массы системы, состоящей из b-струи и двух струй от распада W бозона на

пару кварков. Использование предложенного метода позволяет избавиться от недостатков распространенного метода, основанного на фитировании правого склона гистограммы, определяемого процессом фрагментации кварков в струи.

- Впервые получены путем моделирования распределения для кинематических переменных, таких как энергия, импульс, углы и пр. отдельных лептонов, а также их пар (имеющих непрерывный спектр инвариантной массы или происходящих от распада J/Ψ), рожденных в эталонных событиях антипротон-протонного столкновения при энергии, доступной на FAIR ($E_{c.m.} = 5.3$ ГэВ). Установлена, путём анализа полученных распределений, зависимость величины потери сигнальных событий от выбора угловых размеров мюонной системы детектора PANDA. Полученные результаты моделирования были использованы при проектировании мюонной системы для детектора эксперимента PANDA, что демонстрирует их практическую значимость.

Выполненное моделирование процесса рождения и распада чармония на пару лептонов также имеет важное практическое значение, поскольку оно показало, что области углового покрытия лептонами совпадают в случае обоих эталонных процессов как для случая непрерывного, так и для резонансного (при распаде J/Ψ - резонанса) спектра инвариантных масс лептонных пар (несмотря на сильное различие характерных для них кинематических спектров), что свидетельствует о достаточной универсальности предложенных геометрических параметров мюонной систем детектора.

- Обосновано предложение об измерении в эксперименте PANDA, используя события с рождением лептонных пар с непрерывным спектром их инвариантной массы, структурной функции протона в новой области времениподобных (т.е. положительных) значений квадрата переданного импульса Q^2 , существенно менее изученной по сравнению с пространственноподобной областью. Показано, что структурная функция протона может быть измерена в достаточно широкой кинематической области: $0.05 < x < 0.7$ и $Q^2 < 6.2$ ГэВ².
- Предложен набор критериев с учетом значений энергий, поперечных импульсов, зарядов, вершины рождения, инвариантной массы и изолированности лептонов, для отбора сигнальных событий рождения лептонных пар. Этот набор позволяет минимизировать фоновый вклад как от распадающихся адронов, так и от вклада хромодинамических и "minimum-bias" событий, изначально превышавшего вклад сигнальных событий, соответственно, на пять и семь порядков,

практически до нуля в случае событий рождения мюонных пар, и позволяющий довести отношение сигнала к фону до уровня $S/B = 3.8$ в случае рождения электрон-позитронных пар.

Личный вклад автора. В диссертацию включены положения и результаты, которые получены при определяющем участии соискателя в разработке методов решения поставленных задач. Вся работа по написанию программ для выполнения физического анализа моделируемых процессов и полученных распределений, была выполнена лично автором диссертации.

Апробация работы

1. Работы по исследованию процесса рождения стоп-кварков в условиях ИС были доложены на крупных международных рабочих совещаниях по "Международному Линейному Коллайдеру" (LCWS) в Париже (Франция, 2004), ЕСFA в Вене (Австрия, 2005), IWLC'2010 в Женеве (ЦЕРН, Швейцария, 2010), а также на "Десятой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ" (Дубна, Россия, 2006), научно-методических семинарах рабочей группы по ИС в ДЕЗИ-Цойтен (Германия, 2006, 2007), научном семинаре Лаборатории Ядерных Проблем ОИЯИ (Дубна, Россия, 2008), Балдинском международном семинаре по проблемам физики высоких энергий" (Дубна, Россия, 2008), конференции-сессии Отделения ядерной физики РАН (ИФВЭ, Протвино, Россия, 2008), международном семинаре по физике высоких энергий "Кварки-2008" (Сергиев Посад, Россия, 2008), "Кварки-2010" (Коломна, Россия, 2010), XX международном рабочем совещании по физике высоких энергий и квантовой теории поля "QFTNER'2011" (Сочи, Россия, 2011).

2. Работа по исследованию процесса рождения лептонных пар в условиях эксперимента ПАНДА представлялась автором на пленарных сессиях общих рабочих совещаний коллаборации в Уппсале (Швеция, 2005), Вене (Австрия, 2006), Кракове (Польша, 2008) и секционных заседаниях таких же совещаний в Юлихе (Германия, 2004), GSI (Дармштадт, Германия, 2006), Генуе (Италия, 2007), Дубна (Россия, 2007), Протвино (Россия, 2011), а также на первом российском совещания по физике ПАНДА (ИТЭФ, Москва, 2008). Работа была также представлена и обсуждалась на международной школе-семинаре "The Actual Problems of Microworld Physics" в Гомеле (Беларусь, 2005 и 2007) и XIX-ом Балдинском международном семинаре по проблемам физики высоких энергий (Дубна, Россия, 2008), а также на Молодёжной школе-семинаре "Вклад молодых учёных России в проект FAIR" (ИЦФР, Москва,

2010 и 2011), первой объединённой “Гельмгольц-Росатом” школе для молодых учёных на FAIR (Хиршегг, Австрия, 2011), XIV международной конференции по адронной спектроскопии “Hadron2011” (Мюнхен, Германия, 2011).

3. Работа в целом также была представлена и обсуждалась на семинарах в: Лаборатории Теоретической Физики им.Боголюбова ОИЯИ (Дубна, апрель 2011), ОЭФВЭ НИИЯФ МГУ им. Ломоносова (Москва, апрель 2011).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, из них 3 статьи в рецензируемых журналах [5], [6], [9], входящих в список ВАК, и 6 статей в сборниках трудов конференций [1 - 4], [7 - 8]. Подробный список публикаций приведён в конце автореферата.

Структура и объём диссертации. Работа изложена на 151 страницах печатного текста, состоит из введения, трёх частей и заключения. Она содержит 88 рисунков, 13 таблиц и список литературы, включающий 89 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении (глава 1) сформулированы цель и задачи работы, отражена её актуальность, кратко излагается структура диссертации и её содержание по частям, главам и разделам. Сюда же входит краткое изложение основ Стандартной Модели и её Минимального Суперсимметричного расширения.

В первой и второй частях диссертации изучалась, в рамках Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели (МССМ) и на основе Монте-Карло моделирования с помощью программного пакета PYTHIA6.4 (а также программ CIRCE1 и CIRCE2), возможность обнаружения на будущем ускорительном комплексе ILC предсказываемого МССМ стоп-кварка, скалярного суперсимметричного партнёра топ-кварка (\tilde{t}_1).

Были рассмотрены возможности использования для этой цели двух предполагаемых вариантов ускорителей: электрон-позитронного (см. **Часть I**) и фотон-фотонного (см. **Часть II**) коллайдеров. В обоих вариантах изучался канал распада стоп-кварка по каналу $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0 W^\pm$, с последующим распадом одного W - бозона по лептонному каналу $W^- \rightarrow \mu^- \nu_\mu$, а другого - по адронному $W^+ \rightarrow q_i \bar{q}_j$ (см. рис. 1).

Были выбраны такие параметры МССМ, которые согласуются с имеющимися экспериментальными данными, полученными на LEP и Теватроне, и задают значение

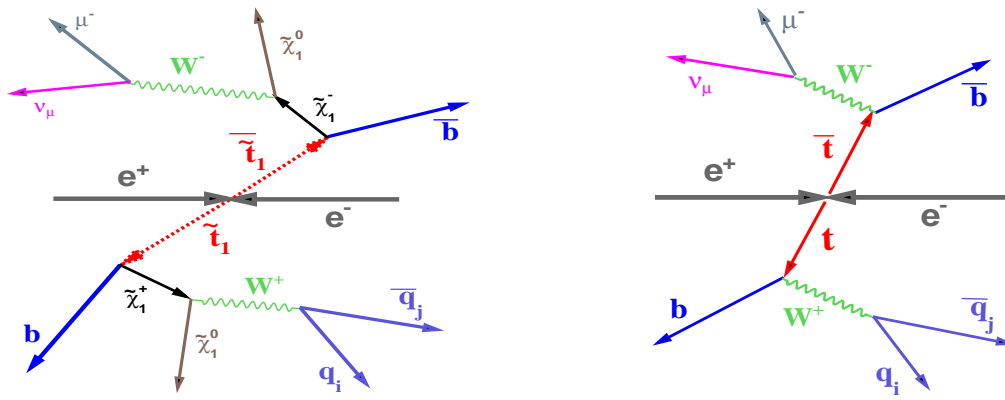


Рис. 1: Слева диаграмма сигнального события (рождение и распад стоп-кварков), справа диаграмма фонового события (рождение и распад топ-кварков).

массы стоп-кварка $M_{\tilde{t}_1} = 167.9$ ГэВ, которое является достаточно близким к массе топ-кварка, что позволяет изучить наиболее трудный вариант задачи о нахождении подходящих критериев отбора, разделяющих сигнальные и фоновые события (среди последних доминирует вклад от топ-кварка).

Часть I (главы 2-6) диссертации содержит результаты *изучения процесса рождения пар скалярных топ-кварков на ИС в электрон-позитронных столкновениях*. Глава 2 имеет вводный характер.

Глава 3 содержит описание распределений, полученных путём моделирования с помощью Монте-Карло генератора физических событий РУТНА6.4 и учета с помощью программы CIRCE1 вклада эффектов взаимодействия пучков при полной энергии $2E_{beam} = \sqrt{s} = 500$ ГэВ. В *разделе 3.1* представлены спектры поперечного импульса и полярного угла стоп-кварков, рожденных в электрон-позитронных столкновениях. *Разделы 3.2 и 3.3* включают в себя полученные распределения кинематических переменных для струй, образовавшихся в результате распада W - бозона на пару кварков, и, соответственно, b -струй, порожденных в процессе распада стоп-кварка $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$. Распределения событий со стоп-кварками детально сравниваются с аналогичными распределениями в событиях основного фонового процесса - рождения пары топ-кварков. В *разделе 3.4* демонстрируются полученные модельные спектры как сигнальных, так и фоновых мюонов, рожденных в распадах адронов в том же самом событии. Предложены критерии для разделения сигнальных мюонов, образующихся в результате распада W - бозона, от фоновых мюонов.

В главе 4 приводится ряд распределений для предлагаемых глобальных переменных. В качестве таковых рассмотрены потерянная энергия, общая наблюдаемая (в детекторе) энергия, скалярная сумма поперечных импульсов всех наблюдаемых частиц в событии, а также инвариантная масса системы, состоящей из всех адронных

струй в конечном состоянии плюс сигнальный мюон от распада W - бозона. Показано, что предлагаемые глобальные переменные могут быть хорошим инструментом для отделения сигнальных событий от фоновых. В *разделе 4.1* дополнительно введены ещё две глобальные переменные - инвариантная масса всех адронных струй в конечном состоянии $M_{inv}(Alljets)$, т.е. модуль векторной суммы 4-х импульса всех N^{jet} струй в событии

$$M_{inv}(Alljets) = \sqrt{(\sum_{n=1}^{N^{jet}} P_{jet}^n)^2} \quad (1)$$

и “потерянная масса” $M_{missing}$

$$M_{missing} = \sqrt{(\sqrt{s} - (\sum_{n=1}^{N^{jet}} E_{jet}^n + E_{\mu}))^2 - (\sum_{n=1}^{N^{jet}} \mathbf{P}_{jet}^n + \mathbf{P}_{\mu})^2}. \quad (2)$$

В *разделе 4.2* предлагаются три ограничительных условия для отбора событий с рождением пар сигнальных стоп-кварков и для подавления вклада от фонового процесса с рождением топ-кварка:

- должно быть по крайней мере две b -струи в событии:

$$N_{b-jets} \geq 2; \quad (3)$$

- инвариантная масса всех струй должна быть менее 160 ГэВ:

$$M_{inv}(Alljets) \leq 160 \text{ GeV}; \quad (4)$$

- инвариантная потерянная масса должна быть более 250 ГэВ:

$$M_{missing} \geq 250 \text{ GeV}. \quad (5)$$

Рисунки 2 и 3 наглядно демонстрируют, что эти две переменные при предложенных ограничениях 4) и 5) весьма эффективно отделяют сигнальные стоп-кварковые события от фоновых топ-кварковых.

В *разделе 4.3* представлены полученные с помощью генератора РУТНІА предсказания для значений сечений в случаях рождения пары стоп-кварков и пары топ-кварков при пяти различных энергиях столкновения электрон-позитронных пучков в интервале $350 < \sqrt{s} < 1000$ ГэВ (см. табл. 1). Там же (см. табл. 2) демонстрируется влияние предложенного набора ограничений на значения сечений процессов рождения пар сигнальных стоп- и фоновых топ-кварков, а также их влияние на ожидаемое количество соответствующих событий при одном и том же фиксированном значении светимости и, соответственно, влияние на значение отношения сигнала к фону.

В результате, при полной энергии $2E_{beam} = \sqrt{s} = 500$ ГэВ, данные критерии отбора улучшают отношение сигнал к фону с $S/B = 0.066$ до $S/B = 143$. На основе этого

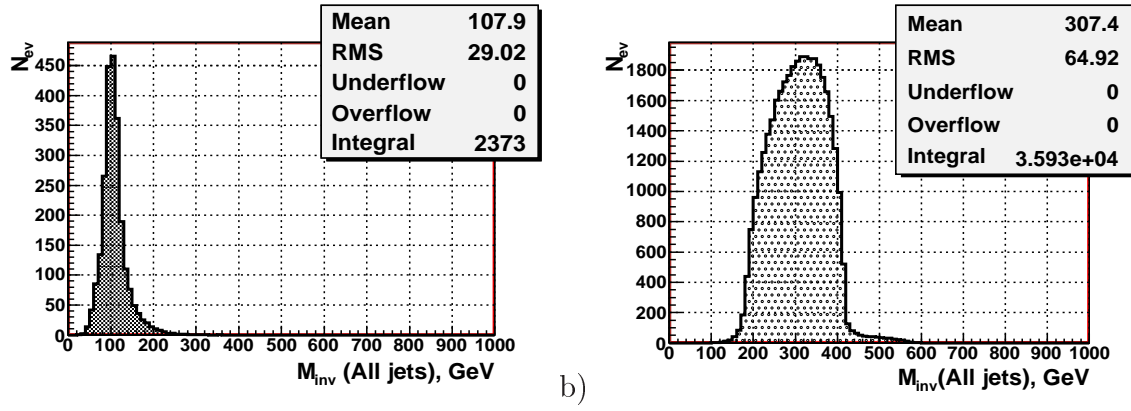


Рис. 2: Распределение количество событий N_{ev} ($L_{int} = 1000 \text{ фб}^{-1}$), относительно восстановленной инвариантной массы всех струй $M_{inv}(Alljets)$. а) Рождение пар стоп-кварков; б) рождение пар топ-кварков.

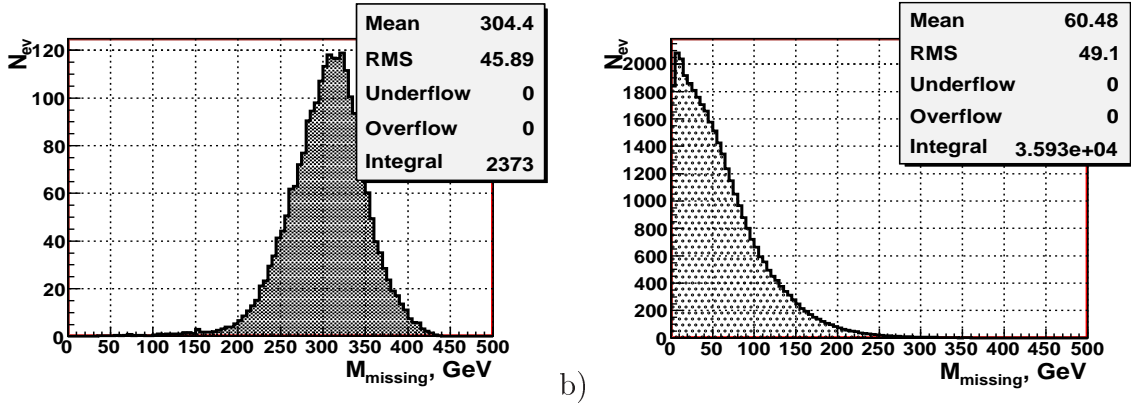


Рис. 3: Распределения количества событий N_{ev} ($L_{int} = 1000 \text{ фб}^{-1}$) относительно переменной потерянной массы. а) Рождение пар стоп-кварков; б) рождение пар топ-кварков.

сделана оценка, что при энергии $\sqrt{s} = 500 \text{ ГэВ}$ и светимости $L_{int} = 1000 \text{ фб}^{-1}$ будет возможность за 2.5 года набрать, с учётом эффективности таггирования b -струй, порядка 1800 сигнальных событий с рождением стоп-кварков при фоне порядка 12 топ-кварковых событий. Из табл. 2 видно также, что измерения при других энергиях в области $400 \leq \sqrt{s} \leq 500 \text{ ГэВ}$ и $500 \leq \sqrt{s} \leq 800 \text{ ГэВ}$, могут позволить существенно увеличить число отобранных сигнальных стоп-кварк событий и, тем самым, осуществить более точное измерение массы скалярного топ-кварка.

Глава 5 содержит описание предложенной автором процедуры восстановления массы скалярного топ-кварка, основанной на анализе распределения инвариантной массы системы, состоящей из одной b -струи и двух струй от распада W -бозона, при условии что известна масса нейтрино.

Глава 6 содержит краткое описание результатов, полученных в первой части.

Таблица 1: Сечения и число событий для стоп-кварк и топ-кварк событий до применения критериев отбора (4.4)–(4.6). Для удобства сравнения, для каждой энергии принято одинаковое значение светимости $L_{int} = 1000 \text{ фб}^{-1}$.

$2E_{beam} = \sqrt{s}$, ГэВ	$\sigma_{stop}^{e^+e^-}$, фб	N_{stop}^{events}	$\sigma_{top}^{e^+e^-}$, фб	N_{top}^{events}	S/B
350	0.23	233	13.76	13750	0.0169
400	1.34	1347	38.79	38740	0.0347
500	2.37	2373	35.94	35950	0.0661
800	1.89	1809	17.36	17359	0.1042
1000	1.42	1265	11.66	11656	0.1085

Таблица 2: То же, что и в табл. 1, но после наложения ограничительных условий (3)–(5).

$2E_{beam} = \sqrt{s}$, ГэВ	$\sigma_{stop}^{e^+e^-}$, фб	N_{stop}^{events}	$\sigma_{top}^{e^+e^-}$, фб	N_{top}^{events}	S/B
350	0.0089	8	$\approx 10^{-5}$	0	Фон = 0
400	0.52	521	$2.32 * 10^{-4}$	0.2	2605
500	1.80	1806	$2.26 * 10^{-2}$	12.6	143
800	0.99	995	$1.08 * 10^{-2}$	10	99
1000	0.41	410	$6.26 * 10^{-3}$	6	69

Часть II (главы 7-12) диссертации посвящена *изучению рождения пар скалярных топ-кварков на ИС в столкновениях поляризованных фотонных пучков*.

В главе 7 дается описание изучаемого процесса рождения стоп-кварков в фотон-фотонных соударениях.

В главе 8 рассматриваются основные характеристики фотонных пучков, такие как импульсный спектр и светимость, а также корреляции энергий фотонов в пучках для случаев разных поляризаций фотонов, принимающих участие в комптоновском рассеянии поляризованных лазерных фотонов на поляризованных электронных пучках. При этом, в отличие от предыдущих глав, рассматривается случай существенно более высокой энергии электронных пучков, а именно, $2E_{beam}^e = \sqrt{s_{ee}} = 1000 \text{ ГэВ}$. Приводятся рассчитанные с помощью программы CIRCE2 оценки ожидаемой светимости и значений сечений для разных комбинаций поляризаций фотонных пучков.

Глава 9 содержит описание полученных с помощью генераторов RUTHIA и CIRCE2 распределений кинематических переменных частиц, фигурирующих в ко-

нечных состояниях рассматриваемых сигнальных ($\gamma\gamma \rightarrow \tilde{t}_1\tilde{t}_1$), а также в фоновых $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$ процессах. В *разделе 9.1* представлены распределения основных кинематических переменных стоп-кварков, рожденных в фотон-фотонных столкновениях при разных комбинациях поляризаций пучков. *Разделы 9.2 и 9.3* включают в себя полученные распределения кинематических переменных для адронных струй, образованных в результате распада W-бозона и, соответственно, для *b*-струй. Распределения сигнальных событий, содержащих стоп-кварки, детально сравниваются с аналогичными распределениями в фоновых событиях рождения пары топ-кварков. Такое сравнение выполнено для разных вариантов поляризаций пучков. В *разделе 9.4* показаны полученные распределения кинематические переменных (энергия и P_T) мюонов в сигнальных событиях при разных поляризациях сталкивающихся фотонных пучков. Там же предложен способ разделения сигнальных мюонов, рождённых от распада W - бозона, и фоновых, берущих начало от распада адронов в том же самом событии.

Глава 10 содержит полученные с помощью программных пакетов PYTHIA и CIRCE2 распределения ряда глобальных переменных, таких как общая потерянная энергия, общая видимая (регистрируемая) энергия, скалярная сумма поперечных импульсов в событии, инвариантная масса всех струй, инвариантная масса всех струй и мюона, а также “потерянная” масса. При этом были рассмотрены случаи разных поляризаций сталкивающихся фотонов. В *разделе 10.1* предлагаются три ограничительных условия, из которых два условия аналогичны условиям **3)** и **4)**, а условие **5)** заменено на ограничение на величину суммарной энергии события, регистрируемой (наблюдаемой) в установке:

- детектируемая энергия $E_{vis-tot}$ должна быть менее 250 ГэВ:

$$E_{vis-tot} \leq 250 \text{ GeV}. \quad (6)$$

В результате показано, что такие три ограничения для случая фотон-фотонных столкновений могут эффективно улучшить отношение сигнала к фону, а именно (при рассчитанных в главе 8 светимостях):

а) в случае ” + −” и “ − +” поляризаций - с $S/B = 0.15$ до $S/B = 59$, с потерей 23.7% сигнальных стоп-кварк событий (с 1903 до 1453), а также уменьшить число фоновых топ-кварк событий с $1.227 \cdot 10^4$ до 24;

б) в случае ” ++” и “ − −” поляризаций - с $S/B = 0.22$ до $S/B = 120$, с потерей 27.6% (с 3233 до 2338) сигнальных стоп-кварк событий, а также добиться уменьшения числа фоновых топ-кварк событий с $1.441 \cdot 10^4$ до 19.

Там же представлены значения эффективностей подавления вклада фоновых топ-кварковых событий, которые можно ожидать в результате последовательного при-

менения таких ограничений при разных поляризациях сталкивающихся фотонных пучков.

В **главе 11** аналогично случаю e^+e^- столкновений (глава 5) рассматривается процедура восстановления массы скалярного топ-кварка, основанная на анализе распределения инвариантной массы системы, составленной из b -струи и двух струй от распада W -бозона, при условии что известна масса нейтралино. Здесь также дается оценка влияния фона от вклада топ-кварковых событий на точность реконструкции массы стоп-кварка.

Глава 12 содержит краткое описание результатов, полученных во второй части.

Часть III (главы 13-18) посвящена *изучению процесса рождения лептонных пар в антипротон-протонных столкновениях $\bar{p}p \rightarrow l^+l^- + X$ при энергии антипротонного пучка $E_{beam} = 14$ ГэВ.*

Глава 13 является введением к третьей части работы. Здесь в *разделе 13.1* приводится схема эксперимента PANDA и краткое описание мюонной системы установки.

Глава 14 посвящена описанию процесса рождения лептонных пар в антипротон-протонных столкновениях при промежуточных энергиях. *Раздел 14.1* включает в себя кинематические распределения, полученные для отдельных лептонов с помощью генератора RUTHIA. Корреляции "Угол-Энергия", "Энергия-Энергия" и "Угол-Угол" между медленными (менее энергетичными) и быстрыми (более энергетичными) лептонами в одной и той же лептонной паре представлены на рис. 4 и рис. 5 вместе с соответствующими распределениями числа событий относительно лептонных энергий и их углов разлёта. Моделирование показало тенденцию, которая является весьма важной для проектирования геометрических размеров мюонной системы: быстрые лептоны летят преимущественно под меньшими углами $\langle \theta_{fast}^l \rangle = 16.5^\circ$ по сравнению с углами медленных лептонов $\langle \theta_{slow}^l \rangle = 38.2^\circ$. Следует отметить, что около 5% событий могут содержать медленные лептоны, которые будут рассеиваться в обратную полусферу, т.е. $\theta_{slow}^l > 90^\circ$.

Эффективность сбора сигнальных событий, содержащих лептонные пары l^+l^- , зависит от угла покрытия мюонной системы и электромагнитного калориметра (ECAL, ЭМК). Графики **b** и **d** рис. 5 содержат угловую корреляцию $\theta_{slow}^l/\theta_{fast}^l$. Результаты их анализа приведены в табл. 3, которая демонстрирует, какая часть сигнальных событий (в %) будет потеряна при задании верхнего предела θ_{cut} (т.е. $\theta_{slow}^l, \theta_{fast}^l \leq \theta_{cut}$) на размер мюонной системы или электромагнитного калориметра. Последняя строка табл. 3 показывает, что даже в случае, когда мюонная система или ЭМК будут

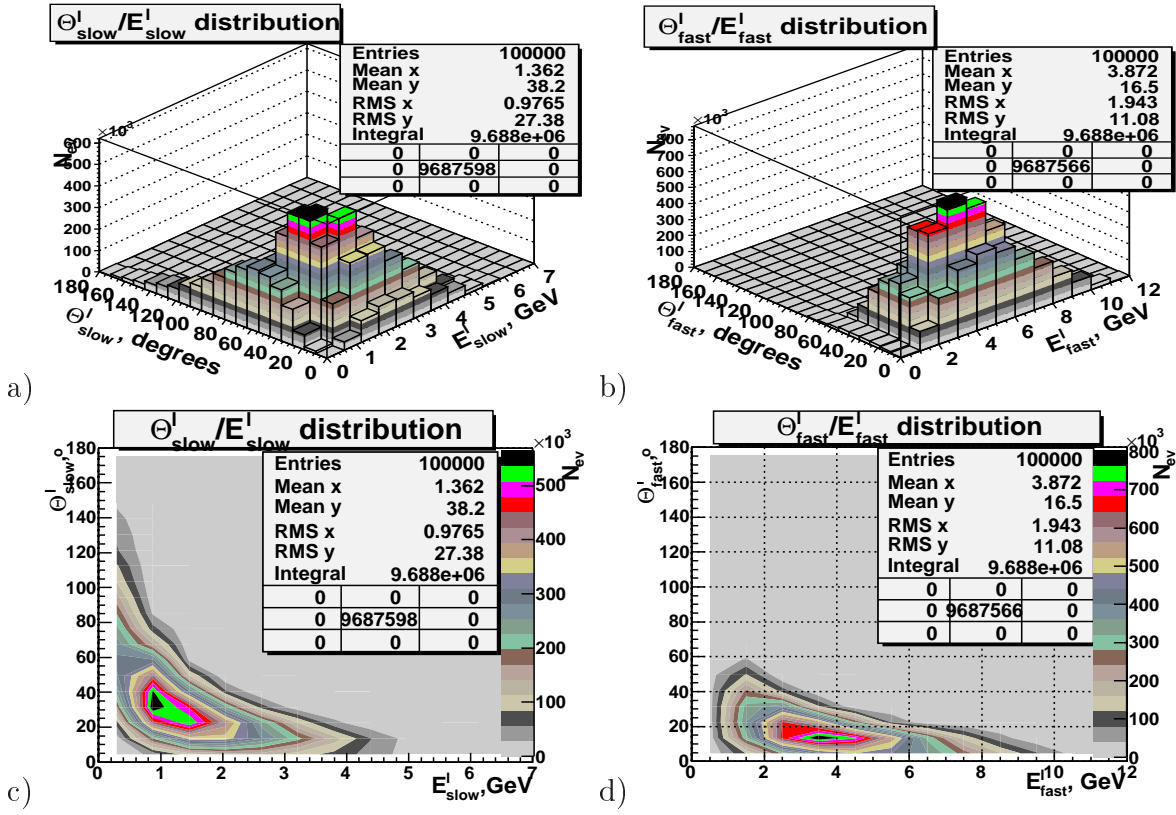


Рис. 4: Корреляции Угол-Энергия. а) и с): $\theta_{slow}^l / E_{slow}^l$ для медленных лептонов, б) и d): $\theta_{fast}^l / E_{fast}^l$ для быстрых лептонов. Графики с и d - проекции трехмерных графиков а и б на $\theta^l - E^l$ плоскость.

Таблица 3: Эффективность ограничения $\theta_{slow}^l, \theta_{fast}^l \leq \theta_{cut}$

$\theta_{slow}^l, \theta_{fast}^l \leq \theta_{cut}, ^0$	Потеря сигнальных событий, %
20	80
40	39
60	17
90	5

покрывать угол до 90° , около 5% событий, содержащих сигнальные пары l^+l^- , будут потеряны. Тем не менее, такое геометрическое ограничение позволяет сохранить около 95% сигнальных событий с электронными и мюонными парами. Как легко заметить из рис. 4 с, ещё лучший отбор сигнальных событий обеспечила бы мюонная система с углом покрытия до 120° . Поэтому мы рассматриваем такой выбор верхнего предела полярного угла предпочтительным для изучения ММТ-ДЯ процесса рождения лептонных пар.

Моделирование с помощью RUTHIA показало, что можно ожидать выхода по-

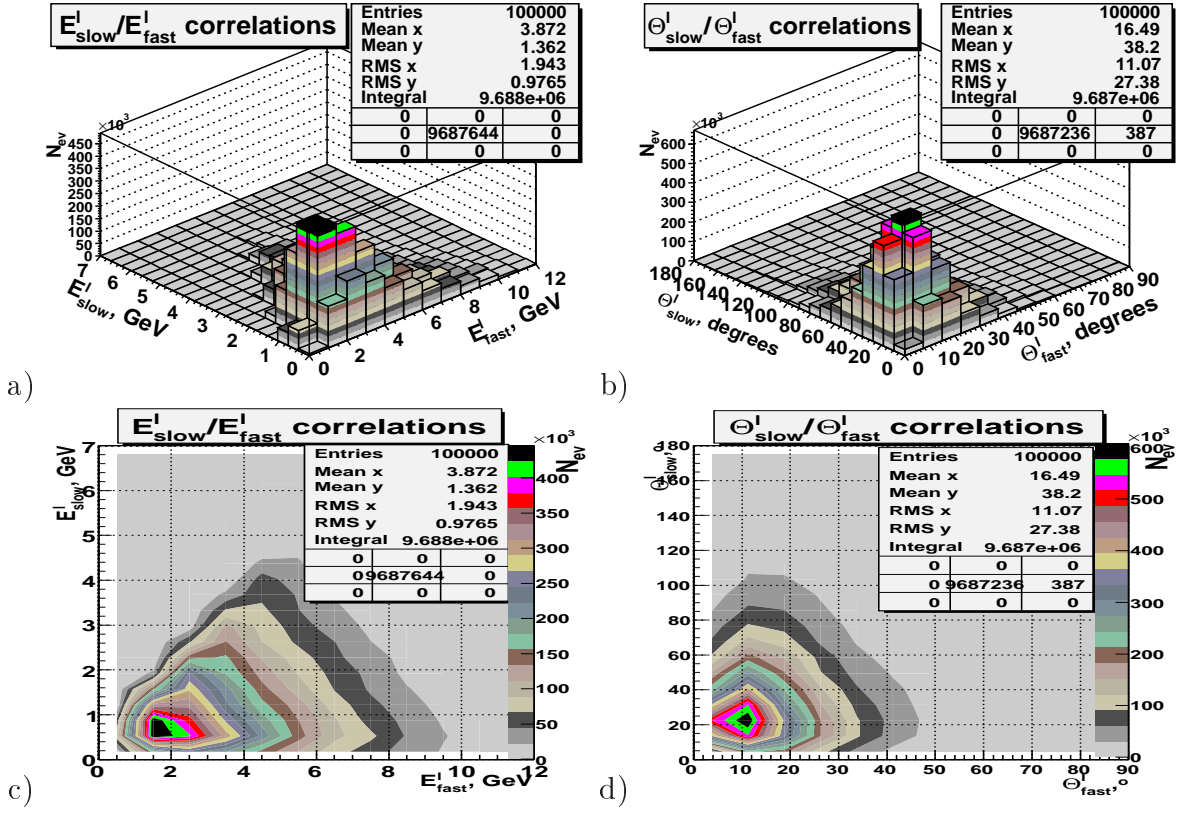


Рис. 5: a) and c): Корреляции Энергия-Энергия E_{slow}^l/E_{fast}^l , b) and d): Корреляции Угол-Угол $\theta_{slow}^l/\theta_{fast}^l$. Рисунок c) и d) являются проекциями трехмерных графиков a) и b) на плоскости $E_{slow}^l - E_{fast}^l$ и $\theta_{slow}^l - \theta_{fast}^l$, соответственно.

рядка $9.7 \cdot 10^6$ дилептонных событий в год при светимости $L = 2 \cdot 10^5 \text{ мб}^{-1}\text{сек}^{-1}$.

Аналогичное изучение было выполнено на основе РУТНИА в *разделе 14.2* для лептонов, которые могут появиться в распаде J/Ψ мезонов, рожденных в эталонном процессе $\bar{p}p \rightarrow J/\Psi + X$. Было показано, что распределения лептонов, рождённых в $J/\Psi \rightarrow l^+l^-$ распаде, хорошо укладываются в те же самые области углов, что и распределения лептонов, рождённых в процессе ММТ-ДЯ $\bar{q}q \rightarrow l^+l^- + X$. Восстановление инвариантной массы лептонной пары может позволить избавиться от фонов без заметной потери сигнальных событий.

Раздел 14.3 содержит полученные распределения по инвариантной массе и некоторым другим физическим параметрам, которые являются характерными для сигнальной лептонной пары как системы в целом. Наиболее интересный среди них - суммарный поперечный импульс лептонной пары, который связан с внутренней поперечной скоростью движения кварков внутри протона. В *разделе 14.4* получена оценка размера кинематической области в плоскости переменных $x - Q^2$, которая может быть доступна для измерения структурной функции протона (в основном

кварковых распределений) в эксперименте PANDA. Эта область определяется следующими границами: $0.05 \leq x \leq 0.7$ и $Q^2 \leq 0.7 \text{ ГэВ}^2$.

В главе 15 представлены результаты изучения проблем, связанных с наличием фоновых лептонов, которые могут рождаться вместе с сигнальной лептонной парой в одном и том же событии в силу наличия мезонных распадов. Особенности сигнальных процессов, содержащих фоновые мюоны и электроны обсуждаются, соответственно, в *разделах 15.1 и 15.2*. В *разделе 15.3* приведен набор условий, основанный на ограничениях лептонов по энергии, поперечному импульсу, знаку заряда и вершине рождения, которые позволяют до определенной степени отделить фоновые лептоны от сигнальных. Эффективность предложенных ограничений приводится там же в виде доли потерянных сигнальных событий (в процентах).

В главе 16 рассматриваются проблемы, связанные с фоновым вкладом, обусловленном “мягкими”, или “минимум-байс” (minimum-bias), процессами, а также “жесткими” хромодинамическими подпроцессами, отличными от $q\bar{q} \rightarrow l^+l^-$. Процессы с фоновыми мюонами и электронами обсуждаются, соответственно, в *разделах 16.1 и 16.2*. В *разделе 16.3* приведен набор ограничительных условий, которые позволяют отделить и существенно подавить вклад фоновых минимум-байс и КХД событий, сечения которых, соответственно, на 7 и 6 порядков выше, чем сечение сигнального процесса с рождением лептонных пар $\sigma_{tot}^{\bar{q}q \rightarrow l^+l^-}$:

- 1.) отбираются события только с двумя лептонами с $E_l \geq 0.2 \text{ ГэВ}$, $PT_l \geq 0.2 \text{ ГэВ}$;
- 2.) заряды этих двух лептонов должны иметь противоположный знак;
- 3.) вершина рождения лептонов лежит в радиусе $R \leq 15 \text{ мм}$ от точки взаимодействия;
- 4.) инвариантная масса лептонной пары ограничена условием $M_{inv}(l^+, l^-) \geq 0.9 \text{ ГэВ}$;
- 5.) отбираются события, в которых выполняется критерий изолированности лептонов: суммарная энергия E_{sum} всех частиц вокруг лептона внутри конуса радиуса $R = \sqrt{\Delta_\varphi^2 + \Delta_\eta^2} = 0.2$ в $\eta - \varphi$ -пространстве должна быть ограничена сверху условием $E_{sum} < 0.5 \text{ ГэВ}$.

Результаты последовательного применения всех пяти ограничений к выборке неупругих $\bar{p}p \rightarrow X$ событий, содержащих minimum-bias и КХД события (включающих также сигнальные события, основанные на аннигиляционном подпроцессе на партонном уровне $q\bar{q} \rightarrow \gamma^* \rightarrow l^+l^-$), приведены в табл. 4. Применение этих ограничений позволило практически полностью избавиться от фонового вклада в случае рождения мюонных пар и добиться отношения сигнала к фону $S/B = 3.8$ в случае рождения

e^+e^- пар ценой потери порядка 22-25 % сигнальных событий.

Таблица 4: Влияние условий ограничений на фоновые события.

N ограничения	S/V для рождения $\mu^+\mu^-$	Эффективность	S/V для рождения e^+e^-	Эффективность
1	$1.41 \cdot 10^{-5}$	0.007	$5.34 \cdot 10^{-4}$	$1.78 \cdot 10^{-4}$
2	$2.12 \cdot 10^{-5}$	0.665	$5.41 \cdot 10^{-4}$	0.98
3	$9.94 \cdot 10^{-5}$	0.002	$5.47 \cdot 10^{-4}$	0.99
4	0.123	0.08	$9.27 \cdot 10^{-2}$	0.006
5	Фон = 0	–	3.8	0.024

В главе 17 изложены предложения по измерению некоторых других важных физических процессов, которые могут быть сделаны путём изучения процессов рождения лептонных пар при энергиях, доступных в эксперименте PANDA.

Глава 18 содержит краткий итог результатов исследования процессов рождения лептонных пар, полученных в третьей части диссертации, и планов для их дальнейшего применения в эксперименте PANDA на ускорительном комплексе FAIR.

В главе 19 суммируются результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *A.Bartl, K.Moenig, W.Majerotto, A.Skachkova, N.Skachkov.* Stop pair production in polarized photon-photon collisions // Proc. of the Intern. Conf. on Linear Colliders (LCWS 2004), April 19-23, 2004. - Paris, 2004. - Vol.II. - P.919.
2. *A.N.Скачкова.* Stop pair production in photon-photon collisions at ILC // Труды десятой науч. конф. молодых ученых и специалистов ОИЯИ. 6-10 февраля 2006. - Дубна: ОИЯИ, 2006. - С.135-138.
3. *A.Bartl, W.Majerotto, K.Mönig, A.N.Skachkova, N.B.Skachkov.* Pair production of scalar top quarks in e^+e^- collisions at ILC // Труды 15-го междунар. семинара по физике высоких энергий "Кварки 2008". Май 23-29, 2008. - Москва, 2010. - Т.1. - С.227-246.

4. *A.Bartl, W.Majerotto, K.Möniq, A.Skachkova, N.Skachkov.* Hadronic jets and search for stop quarks at ILC // Proc. of the XIX Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic nuclear physics & Quantum Chromodynamics". 29 сентября - 4 октября 2008. - Dubna: JINR, 2008. - N°XVI. Vol.1. - Pp.173-181.
5. *A.Bartl, W.Majerotto, K.Möniq, A.N.Skachkova, N.B.Skachkov.* On pair production of Scalar Top Quarks in e^+e^- Collisions at ILC and a Possibility of Their Mass Reconstruction // Письма в ЭЧАЯ. - 2009. - Т.6, N°3 (152). - С.300-311.
6. *A.Bartl, W.Majerotto, K.Möniq, A.N.Skachkova, N.B.Skachkov.* Scalar Top Quarks production in polarized photon-photon collisions at ILC // Письма в ЭЧАЯ. - 2012. - Т.9, N°1 (171). - С.53-76.
7. *A.Skachkova, N.Skachkov.* Lepton pair production at PANDA experiment // Труды междунар. школы-семинара "The Actual Problems of Microworld Physics". 25 июля - 5 августа 2005. - Дубна: ОИЯИ, 2007. - Т.2. - С.114-138.
8. *A.N.Skachkova, N.B.Skachkov.* Lepton pair production in $p\bar{p}$ collisions at intermediate energies // Proc. of the XIX Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic nuclear physics & Quantum Chromodynamics". 29 сентября - 4 октября 2008. - Dubna: JINR, 2008. - N°XVI. Vol.1. - Pp.43-49.
9. *A.N.Skachkova, N.B.Skachkov.* On Lepton Pair Production in Proton-Antiproton Collisions at Intermediate Energies // Письма в ЭЧАЯ. - Т.6, N°4 (153). - 2009. - С.504 -518.