

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ  
ФИЗИКИ  
имени Б.И.СТЕПАНОВА

На правах рукописи

ПАНКОВ АЛЕКСАНДР АЛЬБЕРТОВИЧ

ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
В ПРОЦЕССАХ АННИГИЛЯЦИОННОГО РОЖДЕНИЯ  
НОВЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ КАЛИБРОВОЧНЫХ ВОЗОНОВ  
И ТЯЖЕЛЫХ ВЕКТОРНЫХ КВАРКОНИЕВ

(01.04.02 – теоретическая физика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Минск-1994

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Стандартная модель (СМ) сильных и электрослабых взаимодействий элементарных частиц, основанная на калибровочной группе  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ , достигла впечатляющих успехов в описании экспериментальных данных, полученных во всем интервале имеющихся на сегодняшний день энергий. Тем не менее СМ не может претендовать на роль всеобъемлющей теории в силу ряда причин. В частности, она содержит большое число (более десяти) свободных параметров, определяемых лишь экспериментом. С другой стороны, способ объединения сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий в СМ не является удовлетворительным из-за значительного различия масштабов величин содержащихся в ней констант связи, соответствующих трем калибровочным группам симметрии, так и из-за их взаимной независимости (калибровочная проблема). Кроме того, СМ не в состоянии дать ответ на ряд фундаментальных вопросов, связанных, например, с проблемой иерархии масс частиц, числом поколений, природой нарушения пространственной и СР четностей, включением в объединение гравитации и т.п. Все эти причины приводят к необходимости дальнейшей, более глубокой проверки СМ, а также к поискам более общей теории, которая, включая СМ как свою составную часть, устраняла бы присущую модели феноменологичность.

Среди кандидатов, на которые возлагают большие надежды в описании этой фундаментальной картины, выделяется довольно большой класс теорий (суперструнные теории, теории великого объединения), низкоэнергетический предел которых составляют модели с расширенной (по отношению к СМ) калибровочной группой и с элементарной структурой хиггсовского сектора (лево-право симметричные, альтернативные лево-право симметричные,  $E_6$ -модели и др.). Общим для многих из этих моделей является предсказание новых физических явлений на масштабе энергий  $O(1 \text{ ТэВ})$ , в частности, связанных с существованием

дополнительных нейтральных ( $Z'$ ) или заряженных ( $W'^{\pm}$ ) векторных бозонов. Наличие  $Z'$ -бозона должно приводить к характерному отклонению эксперимента от предсказаний СМ во всех процессах, обусловленных нейтральными токами. Следует отметить, что новые нейтральные бозоны могут появляться и во многих других теориях, например в альтернативных, нарушение электрослабой симметрии в которых происходит за счет механизма, отличного от хиггсовского (это модели техницвета, составных  $W$  и  $Z$  бозонов и др.). Поэтому интерпретация возможных отклонений как указание на проявление  $Z'$ -бозона, предсказываемого какой-либо конкретной теорией, требует изучения наиболее широкого класса процессов с его участием.

Переходя к области более высоких энергий и переданных импульсов, мы надеемся обнаружить сигналы новой физики. Несомненно, что коллайдеры следующего поколения обладают огромным потенциалом для "прорыва" в новую физику: открытие новых частиц с массами в сотни ГэВ ( $Z'$ -бозоны, тяжелые нейтрино, лептоны и некоторые другие), новых физических явлений и закономерностей, обусловленных возможной составной природой фундаментальных частиц, новыми типами симметрий и т.п. Однако вполне возможно, что в рассматриваемой области энергий новая физика проявится не прямо, а косвенно, через относительно небольшие отклонения от предсказаний СМ. Это обстоятельство стимулирует прецизионные измерения параметров СМ. Они могут служить указаниями на существование новых частиц или явлений и накладывать ограничения на структуру более общей теории.

В последнее время большое внимание уделяется теоретическому изучению ожидаемых экспериментальных проявлений  $Z'$ -бозона в глубоконеупругих, упругих и квазиупругих нейтрино-нуклонных взаимодействиях, в рассеянии нейтрино на электроны, в глубоконеупругом электрон-нуклонном рассеянии, в процессах  $e^+e^-$ -анигиляции и  $p\bar{p}$ -столкновениях, а также в атомных явлениях, протекающих с несохранением  $P$ -четности. Вопросы экспериментального поиска  $Z'$ -бозона занимают важное место в физических программах исследований на электрон-позитронных

(TRISTAN, SLC, LEP, VLEPP, NLC), адронных (УНК, LHC, SSC) и  $ep$  (HERA) коллайдерах. Так проверка существования дополнительного  $Z'$ -бозона осуществима на  $e^+e^-$  и  $pp$  ( $p\bar{p}$ )-коллайдерах несколькими способами: во-первых, прямым резонансным рождением  $Z'$  и анализом его распада на обычные фермионы; во-вторых, изучением косвенных эффектов виртуального  $Z'$ ; в-третьих, исследованием модификаций взаимодействия слабых нейтральных токов, обусловленных смешиванием стандартного  $Z$ - и дополнительного  $Z'$ -бозонов.

Таким образом, теоретическое исследование эффектов новых калибровочных  $Z'$ -бозонов отвечает существующим потребностям и возможностям эксперимента и является актуальной задачей в современной физике электрослабых взаимодействий при высоких энергиях.

**Целью диссертации** является теоретическое исследование возможных проявлений дополнительных нейтральных калибровочных бозонов посредством измерения эффектов электрослабых взаимодействий в различных процессах  $e^+e^-$ -аннигиляции и адрон-адронных столкновений на действующих и строящихся коллайдерах; изучение особенностей рождения тяжелых векторных кваркониев ( $t\bar{t}$ ,  $b\bar{b}$ ,  $h\bar{h}$ ) в процессах  $e^+e^-$ -аннигиляции и адрон-адронных столкновений вблизи дополнительного  $Z'$  калибровочного бозона.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Выявлена возможность получения сведений о свойствах  $Z'$ -бозонов при энергии  $e^+e^-$ -пучков, меньшей порога рождения стандартного нейтрального калибровочного  $Z$ -бозона, посредством измерения  $\gamma - Z'$ -интерференции в сечениях рассеяния аннигиляционных процессов с лептонными и адронными конечными состояниями, а также в продольной поляризации конечных  $\tau$ -лептонов. Установлены возможности экспериментального обнаружения  $Z - Z'$ -интерференционных эффектов на установке LEP1 в процессах  $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$  и  $e^+e^- \rightarrow$  адроны, проявляющиеся наиболее ярко в

окрестности резонансного пика стандартного  $Z$ -бозона.

2. Рассчитаны  $P$ -нечетные эффекты (поляризационная и зарядово-поляризационная асимметрии, продольная поляризация конечных лептонных состояний) дополнительных  $Z'$ -бозонов в процессе инклюзивного рождения пары лептон-антилептон большой инвариантной массы, а также лептонных пар с большим поперечным импульсом в случае неполяризованных и продольно поляризованных исходных адронных пучков.
3. Установлена целесообразность использования  $C$ -четных и нечетных поляризационных асимметрий для выявления различий в рождении пары новых тяжелых заряженных лептонов (кварков) в процессах  $e^+e^-$ -аннигиляции и адрон-адронных столкновений. Показана перспектива использования поляризационных (продольной и поперечной) асимметрий в качестве основных наблюдаемых для выделения процессов рождения скалярных мюонных и кварковых состояний в  $e^+e^-$ -аннигиляции с учетом вклада дополнительного  $Z'$ -бозона.
4. Выявлены и рассчитаны окологрезонансные интерференционные эффекты в процессе  $e^+e^-$ -аннигиляции с рождением векторных кваркониев  $V_Q = {}^3S_1(Q\bar{Q})$  (состоящих либо из  $t$ -кварков, либо из  $b'$ -кварков четвертого поколения, либо из экзотических изоинглетных  $h$ -кварков с зарядом  $-1/3$ ), вырожденных по массе с дополнительным нейтральным  $Z'$ -бозоном. Выполнен численный анализ основных мод распада векторных кваркониев  $V_Q$ , сечений рассеяния, а также  $P$ - и  $C$ -нечетных асимметрий в процессах  $e^+e^- \rightarrow V_Q \rightarrow \mu^+\mu^-$  и  $e^+e^- \rightarrow V_Q \rightarrow e^+e^-$ . Доказана возможность экспериментального обнаружения эффектов дополнительных слабых нейтральных токов тяжелых  $Q$ -кварков ( $Q = t, b', h$ ) в процессе адрон-адронных соударений с инклюзивным рождением пары лептон-антилептон при близости инвариантной массы пары к массе векторного кваркония  $V_Q$ .
5. Выявлено действие механизма усиления косвенных эффектов

дополнительных нейтральных  $Z'$ -бозонов в процессе аннигиляционного рождения пары  $W^\pm$ -бозонов, проявляющееся в значительном увеличении чувствительности интегрального сечения рассеяния к подобного рода явлениям с ростом энергии. Показано, что действие механизма усиления в процессе  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  распространяется на широкий класс эффектов новой физики (лептонное смешивание, аномальные моменты  $W^\pm$ -бозонов и др.). Рассчитаны эффекты  $Z - Z'$  смешивания, предсказываемые различными моделями с расширенным калибровочным сектором, на линейных коллайдерах с продольно поляризованными  $e^+e^-$ -пучками и энергией  $\sqrt{s} = 0,5 - 1$  ТэВ. Установлено, что благодаря механизму усиления исследование процесса  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  значительно улучшит современные ограничения на параметр  $Z - Z'$  смешивания ( $|\phi| < 10^{-3} - 10^{-5}$  рад) и массу  $Z'$ -бозона ( $M_{Z'} > (2 - 6) \cdot \sqrt{s}$ ). Сравнение потенциальных возможностей процессов  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  и  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  в изучении явлений  $Z - Z'$  смешивания демонстрирует значительное преимущество первого из них над вторым как в нерезонансной, так и в резонансной области энергий.

**Научная новизна.** Постановка задачи и результаты исследований по выдвинутым выше положениям, обобщенные и кратко изложенные в разделе "Основные положения", получены впервые и являются новыми.

**Научная и практическая ценность.** Полученные в работе предсказания для различных эффектов новых нейтральных калибровочных  $Z'$ -бозонов в электрон-позитронной аннигиляции и адронных столкновениях могут служить основой для постановки соответствующих экспериментов как на уже действующих, так и на будущих  $e^+e^-$  и адронных коллайдерах. Сопоставление полученных результатов с данными эксперимента могло бы пролить свет на такие важные вопросы как установление структуры калибровочного сектора расширенных полевых теорий и на выяснение особенностей и динамики взаимодействия  $Z'$ -бозонов с полями материи в области высоких энергий.

Экспериментальное исследование некоторых из предсказываемых эффектов уже ведется на установках TRISTAN и LEP, а полученные результаты по измерению адронного и лептонного сечений рассеяния, в частности, наблюдение небольшого превышения адронного и заметного понижения лептонного сечений над соответствующими наблюдаемыми, предсказываемыми СМ, могут быть интерпретированы как первое проявление эффектов дополнительного  $Z'$ -бозона.

**Апробация работы:** Основные результаты, содержащиеся в диссертации, докладывались на сессиях и конференциях Отделения ядерной физики АН СССР 1983-1991, рабочих совещаниях "Физика на ВЛЭПП" (Протвино 1991-1993), международном лептон-фотонном симпозиуме (Стенфорд, США, 1989), международных школах по физике высоких энергий (Триест, Италия, 1989-1993), международной конференции по спиновой физике (Нагоя, Япония, 1992), международной адриатической конференции по физике высоких энергий (Триест, 1992), международных семинарах "Физика высоких энергий и квантовая теория поля" (Протвино, 1986, 1991), международном рабочем комитете программы "Гиперон" (Дубна, 1987), международных симпозиумах по физике элементарных частиц (Казимеж, Польша, 1990, 1991), научных семинарах теоретических отделов CERN (Женева, 1989), ICTP (Триест, 1989-1993), Национального института ядерной физики (Италия, 1989-1993), Института ядерных исследований (Варшава, Польша, 1989-1992), кафедрах теоретической физики Триестского университета, Гомельского государственного университета, ЛТФ и ЛФВЭ ИФ АН Беларуси, кафедре физики ГПИ.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы статьи в международных и отечественных журналах и сборниках. Основной список опубликованных по диссертации работ приведен ниже.

**Объем и структура диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав, 17-ти параграфов, трех приложений, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего

200 наименований. Общий объем диссертации составляет 34 страницы машинописного текста.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обсуждается актуальность темы, мотивируются основные направления и цель работы, обосновывается научная новизна поставленных задач, коротко перечисляются основные результаты.

Первая глава диссертации посвящена выявлению возможностей исследования эффектов дополнительных нейтральных калибровочных  $Z'$ -бозонов, предсказываемых  $E_6$ -теориями Великого объединения, в процессах  $e^+e^-$ -аннигиляции при энергии исходных пучков, меньшей или равной массе покоя стандартного  $Z$ -бозона. Предсказываемые интерференционные эффекты могут быть обнаружены и детально исследованы на установке TRISTAN и LEP.

В §1 дано феноменологическое описание различных моделей сильных и электрослабых взаимодействий ранга 5 и 6, основанных на группе  $E_6$ , приведен лагранжиан взаимодействия нейтральных токов лептонов и кварков в расширенных моделях; при этом использована единая параметризация констант связи полей материи с дополнительным калибровочным бозоном для всех рассматриваемых моделей. Обсуждаются современные ограничения на свойства новых калибровочных бозонов, в частности, предельные значения для их масс и параметров смешивания  $Z'$  со стандартным  $Z$ -бозоном, вытекающие из данных по нейтральным токам, из экспериментов на  $e^+e^-$ - и  $p\bar{p}$ -коллайдерах и др.

В §2 показано, что при энергии  $e^+e^-$ -пучков, меньшей порога рождения стандартного  $Z$ -бозона ( $\sqrt{s} < M_Z$ ), можно получить ценную информацию о свойствах дополнительных  $Z'$ -бозонов по померенно сечений рассеяния аннигиляционных процессов с лептонными и адронными конечными состояниями, а также



продольной поляризации  $\tau$ -лептонов в реакции  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ . В частности, показано, что при энергиях  $\sqrt{s} = 50 - 60$  ГэВ сечение лептонного процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  может иметь интерференционный провал, вызываемый деструктивной  $\gamma$ - $Z'$ -интерференцией, глубина и энергетические координаты которого зависят от параметров  $Z'$ -бозона причем подобный эффект отсутствует в СМ, а относительный вклад  $Z'$ -бозона в сечение этого процесса достигает максимальной величины ( $|\delta_l| \simeq 9\%$ ) при несколько более высокой энергии,  $\sqrt{s} = 65 - 70$  ГэВ. Установлено, что электрослабая ( $\gamma - Z'$ ,  $Z - Z'$ ) интерференция в сечении процесса  $e^+e^- \rightarrow$  адроны конструктивна и ведет к заметному увеличению сечения в сравнении с предсказанием СМ, однако ее величина не велика, не превышает 6%. Обращается внимание на большую чувствительность величины  $R_h^l$ , представляющую собой отношение адронного сечения к лептонному с учетом вкладов всех промежуточных состояний для обоих процессов, к косвенным (виртуальным) эффектам  $Z'$ -бозона, а также продольной поляризации  $\tau$ -лептона в процессе  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ . В частности, установлено, что относительный вклад  $Z'$ -бозона в величину  $R^l$  в наиболее благоприятной ситуации может достигать 15% при  $\sqrt{s} = 70$  ГэВ, а в продольную поляризацию  $\tau$ -лептона — даже  $\sim 100\%$ . Подчеркивается, что выявление интерференционного минимума в сечении лептонного процесса и одновременное наблюдение превышения адронного сечения над величиной сечения, предсказываемой СМ, а также наблюдение отклонения продольной поляризации  $\tau$ -лептона, имеющего общую природу с двумя предыдущими эффектами, позволит получить косвенные указания на существование  $Z'$ -бозона либо дать дополнительные ограничения на его параметры даже при энергии ниже порога рождения стандартного  $Z$ -бозона.

Следует подчеркнуть, что данное предложение по поиску интерференционных эффектов  $Z'$ -бозона при энергиях, лежащих значительно ниже его полюса  $\sqrt{s} \ll M_{Z'}$ , основывается на общем методе исследования векторных резонансов в дорезонансной области энергии, впервые предложенным И.С.Сацункевичем. В частности, этот метод был выдвинут в

связи с проблемами исследования параметров и свойств узких векторных кваркониевых резонансов ( $J/\psi, \Upsilon$ ).

В §3 выявлены возможности экспериментального обнаружения на установках SLC и LEP эффектов дополнительных  $Z'$ -бозонов в процессах  $e^+e^- \rightarrow f^+f^-$  по измерению продольной поляризации конечных фермионных состояний ( $f = \tau, u, d, \dots$ ), а также в процессе инклюзивного рождения барионов  $e^+ + e^- \rightarrow B + X$  при энергии  $e^+e^-$ -системы, равной или большей порога рождения стандартного  $Z$ -бозона. Показано, что резонансная продольная поляризация при усреднении по углу вылета фермиона определяется только электрослабыми константами связи конечных фермионов и не зависит от параметров исходных  $e^+e^-$ -состояний, а также от масс  $Z$  и  $Z'$ -калибровочных бозонов. Установлено, что измерение дифференциальной продольной поляризации фермионов в  $Z$ -пике и выше его даст сведения об угле смешивания  $Z - Z'$ -состояния, параметре, определяющем конкретную схему нарушения  $E_8$ -симметрии, а также о массе  $Z'$ -бозона.

**Вторая глава** посвящена исследованию  $P$ - и  $C$ -нечетных эффектов, инициируемых дополнительными нейтральными  $Z'$ -бозонами, в инклюзивных процессах адронного рождения лептон-антилептонной пары. Измерение этих эффектов может быть положено в основу экспериментов по детальному исследованию свойств новых нейтральных калибровочных  $Z'$ -бозонов.

В §4 дан детальный анализ и установлены возможности измерения  $P$ -нечетных эффектов  $Z'$ -бозонов в процессе адрон-адронных соударений с инклюзивным рождением пары лептон-антилептон для неполяризованных и продольно поляризованных адронных пучков. Приведены численные оценки поляризационной асимметрии, поляризационной асимметрии вперед-назад и продольной поляризации лептона для различных моделей, описывающих суперструнный  $Z'$ -бозон. Установлено, в частности, что изотропная часть резонансной продольной поляризации в случае, когда инвариантная масса дилептона равна массе  $Z$  или  $Z'$ -бозона, определяется только электрослабыми лептонными константами связи и не зависит от параметров начальных

адронных состояний. Экспериментальное исследование  $P$ -нечетных эффектов (поляризации и асимметрии) предоставит благоприятную возможность для выбора модели, предсказывающей существование  $Z'$ -бозонов со специфическими свойствами.

В рамках пертурбативной квантовой хромодинамики рассчитаны (§5) эффекты, инициируемые дополнительными  $Z'$ -бозонами, в процессе инклюзивного рождения пары лептон-антилептон с большими инвариантными массами и поперечными импульсами при столкновении поляризованных адронов, в частности,  $p_1\bar{p} \rightarrow \gamma, Z, Z' + X \rightarrow l^+l^- + X$ . На основе различных  $E_6$ -моделей приведены количественные оценки поляризационной асимметрии вперед-назад для вылетающего лептона либо антилептона. Эти асимметрии могут быть использованы для получения информации о константах связи нового калибровочного нейтрального  $Z'$ -бозона с заряженными фермионами (лептонами и кварками), дополняющей соответствующую информацию из столкновений неполяризованных частиц.

В третьей главе рассмотрены различные эффекты дополнительных нейтральных калибровочных бозонов  $Z'$  в процессах анигиляционного рождения новых заряженных фермионных и скалярных состояний лептонов и кварков на  $e^+e^-$ - и  $p\bar{p}$ -коллайдерах. Доказана целесообразность использования поляризационной асимметрии вперед-назад для выявления различий в  $e^+e^-$ -анигиляционном рождении пары тяжелых заряженных лептонов и кварков (экзотические состояния из фундаментального представления группы  $E_6$ , либо лептон четвертого поколения, либо их зеркальные партнеры). Подобные различия могут быть также обнаружены в  $C$ -четных и нечетных поляризационных асимметриях для процессов адрон-адронных столкновений с инклюзивным рождением пары новых лептонов.

В §6 показано, что измерение поляризационной асимметрии вперед-назад  $A_p^{F-B}$  в процессе  $e^+ + e^- \rightarrow f + \bar{f}$  дополняет информацию о константах связи нового калибровочного  $Z'$ -бозона с тяжелыми фермионами, которая может быть получена из данных по измерению поляризационной

асимметрии  $A_p$  и асимметрии вперед-назад  $A^{F-B}$ . Установлено, что  $A_p^{F-B}$  обладает очевидным преимуществом в сравнении с этими наблюдаемыми, благодаря возможности извлечения из нее однозначной информации о слабых константах связи тяжелых конечных фермионов и определения типа рожденного фермиона. Установлено, что использование поляризационной асимметрии вперед-назад в процессе  $e^+e^-$ -аннигиляции в пару тяжелых фермионов позволит получить полную информацию об электрослабых константах связи конечных фермионов и тем самым создаст благоприятные условия для наблюдения различий их рождения и точного определения типа конечного состояния. Показано, (§7), что использование для этих целей адронных коллайдеров с поляризованными исходными пучками позволит расширить этот анализ на лептоны с массами, не доступными рождению на действующих или строящихся  $e^+e^-$ -коллайдерах.

В §8 в рамках теорий, представляющих расширение СМ, рассчитан вклад суперструнного дополнительного  $Z'$ -бозона в различные наблюдаемые для процесса аннигиляционного рождения пары скалярных мюонов с поляризованными исходными  $e^+e^-$ -пучками. Получены выражения для поляризационных, продольной  $A_L$  и поперечной  $A_T$ , асимметрий вылета мюона от распада скалярного суперсимметричного мюона с учетом вклада  $Z'$ -бозона. Отмечено, что поведение продольной и поперечной асимметрий существенно отличаются знаком и величиной от соответствующих зависимостей поляризационных наблюдаемых в процессе аннигиляционного рождения пары мюонов. Если продольной асимметрии эта особенность присуща только для реакций с рождением невырожденных конечных скалярных мюонных состояний с противоположными киральностями, то различия в поперечных асимметриях в процессах рождения скалярных и спинорных мюонов не зависят от данного условия. Кроме того, подчеркивается, что продольная и поперечная поляризационные асимметрии чувствительны к выбору модели с нарушенной  $E_6$ -симметрией, описывающей дополнительный  $Z'$ -бозон. Установлено, что  $A_L$  и  $A_T$  являются надежными индикаторами процесса рождения скалярных мюонов

и, вместе с тем, их экспериментальное исследование предоставит ценную информацию о константах связи скалярных частиц с нейтральными калибровочными бозонами и даст возможность для выбора определенного варианта модели с нарушенной  $E_6$ -симметрией.

Выявлена перспектива использования поляризационных продольной и поперечной асимметрий в качестве основных наблюдаемых для выделения процессов рождения скалярных кварковых состояний в  $e^+e^-$ -аннигиляции с учетом вклада суперструнного  $Z'$ -бозона (§8). Отмечено, что поведение продольной и поперечной поляризационных асимметрий существенно отличается знаком и величиной от соответствующих наблюдаемых в процессах рождения обычных кварков. Для продольной асимметрии различие существенно только для невырожденных по массе состояний скалярных кварков с противоположными киральностями. Для поперечной асимметрии это условие не существенно. Кроме того, подчеркивается, что  $\tilde{A}_L$  и  $\tilde{A}_T$  чувствительны к выбору конкретной модели с нарушенной  $E_6$ -симметрией. Таким образом установлено, что экспериментальное исследование продольной и поперечной асимметрий даст ценную информацию о процессе рождения скалярных кварков, и их экспериментальное определение предоставит информацию о величине констант связи скалярных частиц с нейтральными калибровочными бозонами.

**Четвертая глава** посвящена исследованию процесса рождения тяжелых векторных кваркониев  $t\bar{t}$ ,  $b'\bar{b}'$ ,  $h\bar{h}$  вблизи нейтральных калибровочных бозонов в  $e^+e^-$ -аннигиляции и адрон-адронных столкновениях. Особенно акцентируется внимание на проявлении феноменологических следствий в физике  $e^+e^-$ -аннигиляции явления вырождения по массам тяжелых кваркониевых состояний с дополнительным  $Z'$ -бозоном.

Рассчитаны окологрезонансные интерференционные эффекты в процессе  $e^+e^-$ -аннигиляции с рождением тяжелых векторных кваркониевых резонансов  $V_Q = {}^3S_1(Q\bar{Q})$  состоящих либо из  $t$ -кварков (топониц), либо из экзотических изосинглетных  $h$ -кварков с зарядом  $-1/3$ , предсказываемых  $E_6$ -теориями Великого

объединения, или из последовательных  $b'$ -кварков четвертого поколения в случае их сильного вырождения по массе с дополнительным суперструнным  $Z'$ -бозоном. Проанализированы основные моды распада тяжелых кваркониевых систем (§9), полное сечение рассеяния процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  (§10), асимметрия вперед-назад и поляризационная асимметрия (§11) в теориях, предсказывающих существование дополнительных нейтральных калибровочных бозонов, а также выявлено влияние  $Z'$ -бозона на свойства векторных кваркониев. Установлено, что поведение всех наблюдаемых в околорезонансной области энергии существенно зависит от типа конstituентных кварков  $Q$ , а также от выбора конкретной модели, определяющей свойства  $Z'$ -бозона.

В частности, показано, что в случае вырождения по массе  $V_Q$  ( $Q = b', h$ ) и  $Z'$ -резонансов происходит сильный рост ширины распада кваркония, а также резонансное увеличение сечения рассеяния, индуцируемое присутствием диаграмм с обменом  $Z'$ -бозона. При этом полная ширина распада  $V_Q$ -состояния становится сравнимой по величине с разбросом по энергиям в  $e^+e^-$ -пучках. Поэтому даже после усреднения сечения по энергетическому профилю исходных пучков интерференционные эффекты в сечении, вызванные рождением кваркония, будут составлять несколько десятков процентов. В противном случае, т.е. когда  $|M_V - M_{Z'}| \gg \Gamma_{Z'}$ , резонансное усиление сечения рассеяния и ширины распада кваркония отсутствует. Поэтому резонансный сигнал в сечении будет чрезвычайно слабым, в частности, отношение резонансного сечения рождения  $V_Q$ -состояния к фоновому сечению составит лишь несколько процентов. Таким образом, наиболее благоприятная ситуация для обнаружения и изучения свойств векторных кваркониев  $V_Q$  возникает в случае их частичного или полного вырождения по массе с  $Z'$ -бозоном. В то же время показано, что из-за отсутствия векторной связи  $t$ -кварков с дополнительным  $Z'$ -бозоном в  $E_6$ -моделях свойства топония не претерпевают изменений по сравнению с предсказаниями СМ.

В §12 показано, что при существовании кваркония (топония) с массой, близкой массе  $Z^{(\prime)}$ -бозона, исследование свойств

кваркония можно осуществлять по интерференционной картине, возникающей в дифференциальном сечении рассеяния процесса упругой  $e^+e^-$ -аннигиляции. В частности, это существенно облегчило бы определение таких параметров  $Q\bar{Q}$ -системы, как масса и векторная константа связи  $Q$ -кварка с  $Z^{(\prime)}$ -мезоном. Установлено, что при полном вырождении по массам одного из уровней векторного кваркония (например, основного состояния) с  $Z^{(\prime)}$ -бозоном в дифференциальном сечении реакции  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  возникает интерференционная картина, проявляющаяся (как и в  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ) провалом в точке резонанса даже после усреднения по вероятному энергетическому разбросу исходных  $e^+e^-$ -пучков и учета радиационных поправок. Исследована интерференция сильно вырожденных по массе состояний векторного кваркония и нейтрального калибровочного  $Z^{(\prime)}$ -бозона в процессе поляризационного рассеяния Баба. Показано, что измерение поляризационной асимметрии позволит определить электрослабую векторную константу связи  $Q$ -кварка. Проведен анализ энергетического и углового поведения поляризационной асимметрии, а также ее зависимости от массы кваркония. На этой основе определена область кинематических переменных, в которой интерференционные эффекты проявляются наиболее ярко и тем самым имеют реальные шансы быть экспериментально обнаруженными. Обсуждена возможность исследования эффектов слабых нейтральных токов  $Q$ -кварков в процессе упругой  $e^+e^-$ -аннигиляции в случае неполяризованных исходных  $e^+e^-$ -пучков.

Установлено, что все качественные особенности в поведении сечения рассеяния и поляризационной асимметрии, перечисленные в §§10 и 11 для  $Q = t$ , имеют место также в случае вырождения тяжелых векторных кваркониев  $V_Q$  ( $Q = b', h$ ) с дополнительным  $Z^1$ -бозоном.

В §13 исследованы возможности экспериментального обнаружения эффектов дополнительных слабых нейтральных токов тяжелых  $Q$ -кварков ( $Q = t, b', h$ ) в процессе адрон-адронных соударений с инклюзивным рождением пары лептон-антилептон при близости инвариантной массы пары к массе векторного

кваркония  $Q\bar{Q}$ . Показано, что исследование резонансной продольной поляризации лептона в этом процессе может стать полезным средством получения сведений о векторной константе связи  $Q$ -кварка со стандартным и дополнительным  $Z'$ -бозоном. Установлено, что продольная поляризация лептонов не зависит от того или иного способа рождения кваркония и обусловлена лишь интерференцией амплитуд, описывающих электрослабый резонансный распад кваркония. Благодаря этому продольная поляризация лептона чувствительна только к электрослабым константам связи  $Q$ -кварка и конечного лептона  $l$ . Кроме того, резонансная продольная поляризация не модифицируется пертурбативными хромодинамическими поправками за счет испускания глюонов соударяющимися партонами, а также не зависит от типа соударяющихся адронов, от функций распределения начальных партонов в них, от полной или парциальной ширины распада кваркония. На основании этого делается вывод о возможности получения однозначной информации об электрослабых константах связи  $Q$ -кварка в адрон-адронных столкновениях, сравнимой с соответствующей информацией из  $e^+e^-$ -аннигиляции.

В пятой главе всесторонне анализируются возможности исследования  $Z - Z'$  смешивания в рамках различных расширенных моделей ( $E_6$ , лево-право симметричной и альтернативной лево-право симметричной) на  $e^+e^-$  линейных коллайдерах следующего поколения с продольно поляризованными начальными пучками и энергией  $\sqrt{s} \geq 500$  ГэВ в процессе парного рождения  $W^\pm$ , а также сравниваются с соответствующими потенциальными возможностями для процесса рождения пары фермионов  $f\bar{f}$ .

В §14 приводится детальное описание физической природы механизма усиления косвенных эффектов новой физики в процессе  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ . В §15 обсуждаются возможности использования механизма усиления для поиска косвенных эффектов  $Z'$ -бозона в реакции  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  и получения соответствующих ограничений на угол  $Z - Z'$  смешивания и массу  $Z'$  для различных классов расширенных моделей. Особое внимание



акцентируется на роли, которую играет продольная поляризация начальных  $e^+e^-$ -пучков для улучшения ограничений на исследуемые параметры  $Z'$ -бозона. В §16, основываясь на предположении о существовании достаточно легких  $Z'$  для их прямого рождения на  $e^+e^-$  коллайдерах следующего поколения, рассматривается процесс рождения  $W^+W^-$  пар в резонансной области энергий. При этом внимание обращается на эксперименты как в традиционной (резонансной,  $\sqrt{s} = M_{Z'}$ ) области энергий, так и вблизи резонансного пика  $\sqrt{s} \approx M_{Z'} \pm \Gamma_{Z'}/2$ , где открывается возможность установления наиболее жестких границ на область изменения угла  $\phi$ . В §17 анализируются потенциальные возможности процесса  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  для установления ограничений на угол смешивания посредством измерения различных наблюдаемых в пике  $Z'$ -резонанса. Проводится сравнение ограничений на угол  $\phi$ , получаемых из экспериментов в нерезонансной и резонансной областях энергий в процессах  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  и  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$ .

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

В приложении А приводятся формулы для поляризационных дифференциального и интегрального сечений рассеяния процесса  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  с учетом вклада  $Z'$ -бозона.

В приложении В даны точные выражения для констант связи  $Z'$ -бозона с левыми и правыми фермионами в моделях с расширенным калибровочным сектором:  $E_6$ , лево-право симметричная и альтернативная лево-право симметричная.

В приложении С приведены формулы для различных резонансных ( $\sqrt{s} = M_2$ ) наблюдаемых процесса  $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}$  в левейшем приближении по углу смешивания  $\phi$ .

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Резонансная поляризация лептонов в процессах адронного рождения дилептонов.*  
ЯФ. 1985. т.41. вып.2. с.395 - 399.
2. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Упругая электрон-позитронная аннигиляция в области топочия*  
ЯФ. 1985. т.41. вып.4. с.1007 - 1014.
3. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*О продольной поляризации лептонов - продуктов аннигиляционного распада векторного топочия.*  
ЯФ. 1986. т.43. вып.3. с.662 - 665.
4. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Об эффектах слабых нейтральных токов  $t$ -кварков в процессах упругой  $e^+e^-$ -аннигиляции.*  
Известия АН ВССР. сер. физ.-мат. наук. 1986. N4. с.103-106.
5. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Интерференция  $Z^0$ -мезона и векторного топочия в реакции  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ .*  
Проблемы физики высоких энергий и теории поля. Труды IX семинара. Протвино, 7 - 13 июля 1986 г. М. Наука. 1987. с.255 - 259.
6. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Об особенностях интерференции вырожденных  $Z^0$ -мезона и векторного топочия в упругой  $e^+e^-$ -аннигиляции.*  
ЯФ. 1987. т.64. N 12. с. 1724 - 1728.

7. Панков А.А., Савченко Л.Д.  
*О смешивании топония и  $Z^0$ -бозона в процессе упругой  $e^+e^-$ -аннигиляции.*  
Известия вузов. Физика. 1988. N 10. с.38 - 42.
8. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Об особенностях интерференции вырожденных состояний  $Z^0$ -мезона и векторного топония в процессе рассеяния  $BaBa$ .*  
Известия АН БССР. сер. физ.-мат. наук. 1988. N 3. с.54-59.
9. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Смешивание топония и  $Z^0$ -мезона в процессе поляризационного рассеяния  $BaBa$ .*  
ЯФ. 1988. т.47. вып.4. с.1064 - 1068.
10. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*О новой возможности исследования эффектов дополнительных калибровочных  $Z'$ -бозонов в процессе  $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$  на установке TRISTAN.*  
ЯФ. 1988. т.47. вып.5. с.1333 - 1335.
11. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*О  $P$ -нечетных эффектах дополнительных нейтральных  $Z'$ -бозонов в процессе Дрелла-Лиа.*  
Изв. вузов, физика. 1989. N 11. с.117 - 119.
12. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*О  $P$ -нечетных эффектах дополнительных слабых нейтральных токов фермионов в  $e^+e^-$ -аннигиляции.*  
ЯФ. 1989. т.49. N 2. с.512 - 520.
13. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*О  $P$ -нечетных эффектах дополнительных  $Z'$ -бозонов в процессе*

*адронного рождения дилептонов.*

ЯФ. 1989. т.49. N 3. с.771 - 780.

14. Бабич А.А., Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*О поляризационных эффектах суперструнных  $Z'$ -бозонов в аннигиляционных процессах парного рождения новых заряженных фермионов.*  
ЯФ. 1989. т.50. вып. 12. с.1646 - 1654.
15. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Эффекты дополнительных  $Z'$ -бозонов нарушенной  $E_6$ -симметрии в процессах  $e^+e^-$ -аннигиляции и адрон-адронных столкновений.*  
Минск. 1989. 49 с. Препринт Ин-т физики АН БССР; N 540.
16. Pankov A.A., Verzegnassi C.  
*Theoretical speculations on the TRISTAN results at  $\sqrt{s} < 60$  GeV.*  
Phys. Lett. 1989. Vol.B233. N 1,2. P.259 - 262.
17. Панков А.А.  
*Рождение тяжелых векторных кваркниев в  $e^+e^-$ -аннигиляции вблизи дополнительного  $Z'$ -бозона.*  
ЯФ. 1989. т.52. вып.10. с.1069 - 1081.
18. Pankov A.A.  
*Heavy quarkonium production close to neutral gauge  $E_6$  boson in  $e^+e^-$  annihilation.*  
Preprint ICTP: IC/89/313. Trieste, Italy. 1989. 38 P.
19. Pankov A.A., Satsunkevich I.S.  
*On the possibility of studying extra gauge  $Z'$ -boson effects in  $e^+e^- \rightarrow l^+l^-$  at TRISTAN.*  
Nuovo Cimento. 1990. Vol.103A. ser.1. P.1121 - 1130.

20. Pankov A.A., Satsunkevich I.S.  
*Polarized asymmetries of large  $P_t$  leptons at hadron colliders in  $E_8$  theories.*  
 Nuovo Cimento. 1990. Vol.104A. ser.1. P.1389 - 1401.
21. Бабич А.А., Панков А.А.  
*О поляризационных асимметриях дополнительных суперструнных  $Z'$ -бозонов в процессе аннигиляционного рождения пары скалярных лептонов.*  
 ЯФ. 1990. т.52. вып.11. с.1463 - 1472.
22. Панков А.А., Сацункевич И.С.  
*Поляризационные эффекты от дополнительных  $Z'$ -бозонов в процессах адронного рождения дилептонов больших поперечных импульсов.*  
 ЯФ. 1990. т.52. вып.9. с.868 - 875.
23. Бабич А.А., Панков А.А.  
*Об эффектах суперструнных  $Z'$ -бозонов в процессе адронного рождения тяжелых лептонов.*  
 Известия АН БССР. сер.Физ.-мат.наук. 1991.N 2. с.75-80.
24. Бабич А.А., Панков А.А.  
*Дополнительный  $Z'$ -бозон и поляризационные асимметрии в процессе аннигиляционного рождения пары скалярных кварков.*  
 Известия вузов. Физика. 1991. N4. с.101 - 106.
25. Pankov A.A., Satsunkevich I.S.  
*Effects of extra neutral gauge  $Z'$  bosons in  $e^+e^-$  annihilation at  $E_{c.m.} < M_{Z'}$ .*  
 in Proceedings of the 13 Warsaw Symposium on Elementary Particle Physics, Kazimierz, Poland, 28 May - 1 June 1990, Ed.

- Z.Ajduk, S. Pokorski, World Scientific Publ.(1991), P.249-254.
26. Pankov A.A., Raczka R., Satsunkevich I.S.  
*A dependence of perturbative predictions of extended standard model on  $Z - Z'$  mixing and QCD - renormalization scheme parameters.*  
Nuovo Cimento. 1991. Vol.104A. ser.12. P.1697 - 1706.
27. Pankov A.A.  
*On the enhancement mechanism of indirect  $Z'$  boson effects in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  process at the VLEPP collider.*  
in Proc. of First Workshop on Physics at VLEPP, 4-6 June, 1991, Serpukhov, (1991) Vol.1, P.181-189.
28. Pankov A.A., Paver N.  
*Manifestations of heavy extra neutral gauge bosons in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ .*  
Phys. Lett. 1991. Vol.B272. P.425-430.
29. Gerstein S.S., Likhoded A.A., Pankov A.A., Yushchenko O.P.  
*Direct manifestation of the additional isoscalar bosons in  $e^+e^- \rightarrow f^+f^-$  at LEP.*  
Phys. Lett. 1992. Vol.B275. P.169-171.
30. Pankov A.A., Paver N.  
*On the enhancement mechanism of new physics effects in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ .*  
in Proc. of the 14 International Warsaw Meeting on Elementary Particle Physics, Puzzles on the Electroweak Scale, Warsaw, Poland, 27 - 31 May 1991, Eds.: Z.Ajduk, S.Pokorski and A.K. Wroblewski, (1992) P. 423-431.
31. Панков А.А.  
*О механизме усиления эффектов новой физики в процессе  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ .*  
ЯФ. 1992. т.55 с.461-465.

32. Likhoded A.A., Pankov A.A., Yushchenko O.P.  
*Possible effects of additional vector bosons in  $e^+e^- \rightarrow f^+f^-$  at the TRISTAN energies.*  
Int.J.Mod.Phys. 1992. A7 Vol.22. P.1537-1542.
33. S.S. Gerstein, A.A. Likhoded, A.A. Pankov, O.P. Yushchenko  
*Effects of additional isoscalar vector bosons in  $e^+e^- \rightarrow f^+f^-$  processes at the TRISTAN and LEP energies.*  
Z. Phys. 1992. Vol.C56. P.279-286.
34. Pankov A.A., Paver N.  
*Looking for extra neutral gauge boson effects in longitudinally polarized  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ .*  
Phys. Lett. 1992. Vol.B274. P.483-488.
35. Pankov A.A.  
*Signals of new neutral gauge bosons in  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  at VLEPP.*  
in Proc. of Second Workshop on Physics at VLEPP, 2-4 June 1992, Protvino, Moscow (1992), Vol.1, P.95-108.
36. Babich A.A., Pankov A.A., Paver N.  
*Lepton mixing in  $W^+W^-$  pair production with polarized  $e^+e^-$  collisions.*  
Phys. Lett. 1993. Vol.B299. P.351-358.
37. Pankov A.A., Paver N.  
*Probing  $Z - Z'$  mixing at future  $e^+e^-$  colliders.*  
Phys. Rev. 1993. Vol.D48. P.63-77.