



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

На правах рукописи

2004–17

Ющенко Олег Петрович

**ИССЛЕДОВАНИЯ K_{l3} -РАСПАДОВ
НА УСТАНОВКЕ ИСТРА+,
ПОИСК АНОМАЛЬНЫХ РАСПАДОВ
КАЛИБРОВОЧНЫХ БОЗОНОВ
НА УСТАНОВКЕ DELPHI**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 2004

УДК 539.1.07

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Научный консультант – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН РФ В.Ф. Образцов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.В. Киселев (ИФВЭ, Протвино), доктор физико-математических наук Ю.Г. Куденко (ИЯИ, Москва), доктор физико-математических наук А.И. Голутвин (ИТЭФ, Москва).

Ведущая организация – Лаборатория ядерных проблем, ОИЯИ (г. Дубна).

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2004 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 “_____” _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2004

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Квантовая хромодинамика (КХД) является сегодня общепризнанной теорией сильных взаимодействий. Благодаря свойству асимптотической свободы, теория может быть успешно применена на малых расстояниях. Соответствующие предсказания, описывающие широкий спектр процессов, происходящих с большими переданными импульсами, получили замечательные экспериментальные подтверждения.

В низкоэнергетической области растущая константа связи и ассоциированный с этим конфайнмент кварков и глюонов делают анализ динамики КХД в терминах фундаментальных полей теории (кварков и глюонов) весьма сложным. Более естественным подходом является описание низкоэнергетической динамики и связанных состояний в терминах асимптотических состояний адронного спектра. Но богатство и разнообразие последнего делают и эту задачу трудновыполнимой во всей области масс известных адронных состояний.

При достаточно низких энергиях, тем не менее, достигается значительное упрощение динамики сильных взаимодействий. Ниже области первых широких резонансов ($E < M_\rho$) адронный спектр содержит только октет псевдоскалярных мезонов (π , K , η), взаи-

действия которых могут быть описаны, исходя из рассмотрения глобальных калибровочно-симметричных свойств.

Киральная пертурбативная теория (ChPT) представляет собой систематический метод анализа низкоэнергетической структуры Стандартной модели в терминах асимптотических адронных состояний и кварковых токов. Киральная теория позволяет определить низкоэнергетическое поведение функций Грина, построенных из кварковых токов, таких как электромагнитные формфакторы мезонов и амплитуды мезон-мезонного рассеяния. Особое значение приобретают исследования распадов мезонов, поскольку измерения амплитуд мезон-мезонного рассеяния возможны только при t -канальных обменах, что приводит к малому сечению и, соответственно, к небольшой статистике.

Полулептонные распады каонов представляют собой замечательный инструмент, позволяющий исследовать предсказания киральной пертурбативной теории. Матричные элементы этих распадов могут быть вычислены при этом как коммутаторы токов, поскольку импульсы внешних частиц малы по сравнению с массой W -бозона, что приводит к факторизации амплитуд на адронную и слабую составляющие.

Прямые предсказания киральной теории для адронного тока состоят в вычислениях векторных (для K_{e3} - и $K_{\mu 3}$ -распадов) и скалярного (для $K_{\mu 3}$ -распада) формфакторов.

В течение длительного времени (до 2000 г.) вычисления в киральной теории базировались на лагранжиане порядка $O(p^4)$, приводящем к линейной зависимости формфакторов распада от переданного импульса. В последние годы появились вычисления в порядке $O(p^6)$ киральной теории, приводящие к существенной модификации наших представлений о поведении формфакторов распадов.

Главным следствием вычислений в высоких порядках является предсказание о нелинейности векторного и скалярного формфакторов. Если обратиться к экспериментальной ситуации в изучении K_{l3} -распадов, то мы должны констатировать, что имеющиеся экспериментальные данные не только не позволяют установить или опровергнуть предсказания киральной теории в порядке $O(p^6)$, но и

обнаруживают противоречия как с вычислениями в более низком порядке, так и между результатами отдельных экспериментов. С другой стороны, следует отметить, что значения формфакторов должны подчиняться достаточно строгим соотношениям алгебры токов.

Таким образом, высокостатистическое исследование формфакторов в K_{l3} -распадах является сегодня совершенно актуальной задачей, поскольку должно, с одной стороны, установить корректность вычислений в высоких порядках киральной пертурбативной теории, а, с другой, — устранить существующие разногласия в результатах отдельных экспериментов.

Обнаружение t -кварка на коллайдере FNAL открыло новые возможности для экспериментального поиска явлений за пределами Стандартной модели. Поиск редких распадов t -кварка является одним из направлений таких исследований. Особый интерес среди редких распадов представляют процессы с изменением аромата (FCNC-распады):

$$t \rightarrow \gamma(g, Z) + c(u).$$

Данный распад, предлагавшийся для поиска на коллайдере FNAL, запрещен на древесном уровне Стандартной модели благодаря механизму GIM. Малый вклад в FCNC процессы возникает на однопетлевом уровне за счет СКМ-смешивания, однако величина соответствующих ширин распада остается далеко за пределами измерений:

$$\text{Br}(t \rightarrow (\gamma, g, Z) + c(u)) < 10^{-10}. \quad (1)$$

Тем не менее, многие расширенные версии Стандартной модели предсказывают существенное увеличение соответствующих каналов. В суперсимметричных моделях и моделях с несколькими дублетами Хиггса предсказывается появление процессов с изменением аромата уже на древесном уровне. Некоторые специфические модели приводят к измеримым значениям FCNC-процессов.

Теоретическое рассмотрение процессов с изменением аромата базируется на модельных лагранжианах, связывающих кварковый ток с фотоном и Z -бозоном, что соответствует наличию двух вершинных

функций и, следовательно, двух независимых констант связи. Однако исследования, проведенные на установках CDF (FNAL) и ZEUS (HERA), позволяют установить лишь достаточно слабые ограничения на константы связи модельного лагранжиана.

В эксперименте на адронном коллайдере (CDF) серьезной проблемой является адронный КХД-фон, который даже при высокой светимости не позволяет надежно выделять сигнал. Эксперимент на *ep*-коллайдере (ZEUS) позволяет установить ограничение только на константу связи с фотоном, оставляя связь с Z -бозоном не фиксированной.

В такой ситуации нетривиальным результатом явилось то наблюдение, что данный процесс может быть исследован в непрямом канале, который доступен на энергиях LEP за счет распада s -канального фотона или Z -бозона на ароматово-несимметричную кварковую пару с чувствительностью, превосходящей эксперименты CDF и ZEUS.

Таким образом, представляются весьма важными исследования процессов с изменением аромата на коллайдере LEP в фоновых условиях, значительно более лучших, чем на адронных и лептон-адронных коллайдерах, с целью получения лучших ограничений на параметры модельного лагранжиана, что, в свою очередь, может позволить существенно ограничить класс моделей, приводящих к FCNC-процессам.

Стандартная модель (SM) электрослабых взаимодействий представляет основной базис теории физики частиц. До сих пор не было обнаружено значимых отклонений от предсказаний SM. Исследования с высокой статистикой на электрон-позитронных коллайдерах (PETRA-DESY, TRISTAN-KEK, SLC-SLAC и LEP-CERN) позволили измерить существенные параметры теории, такие как масса и ширина Z -бозона и угол Вайнберга в перенормировочной схеме на массовой поверхности с высокой точностью.

Увеличение энергии коллайдера LEP выше порога рождения WW - и ZZ -пар калибровочных бозонов открыло новый этап в исследовании предсказаний Стандартной модели, связанный с изучением не только свойств W -бозона (масса и ширина), но и взаимодействий в секторе калибровочных бозонов. Речь идет об изучении

трехбозонных вершин $WW\gamma$ и WWZ , которые существуют на древесном уровне СМ, и поиске вершин ZZZ , $ZZ\gamma$ и $Z\gamma\gamma$, которые отсутствуют в СМ, но их наличие будет указывать на новую физику. Доступными для изучения оказываются и четырехбозонные вершины ($WWZZ$, $WWZ\gamma$ и $WW\gamma\gamma$).

Стандартная модель, базируясь на калибровочной группе $SU(2)_L \times U(1)_Y$, реализована в так называемом “минимальном варианте”, где соответствующие вершинные функции (в частности, трехбозонные вершины) представлены операторами минимальных размерностей (до $dim = 4$), возникающими при разложении кинетического члена лагранжиана Янга–Миллса в терминах полевых операторов.

Однако в современной технике операторного формализма легко установить, что симметричные свойства Стандартной модели не накладывают каких-либо ограничений на размерность операторов, входящих в лагранжиан взаимодействия. Единственное условие, которое должно выполняться, состоит в сохранении локальной $SU(2)_L \times U(1)_Y$ -инвариантности.

Следовательно, можно добавить в стандартный лагранжиан дополнительные операторы более высоких размерностей, которые сохраняют калибровочную инвариантность. Любые такие операторы приведут к возникновению новых вершин в бозонном секторе, записанных в терминах полей Янга–Миллса W и B . Переход к физическим полям A , Z и W^\pm приведет к вершинам в терминах физических полей. При этом мы можем быть уверены, что амплитуды, полученные с помощью таких вершин, будут обладать правильным поведением в пределе $s \rightarrow \infty$ и не нарушат перенормировочных свойств теории.

С другой стороны, любое расширение калибровочной группы немедленно приводит к появлению дополнительных членов в трехбозонных вершинах даже на уровне операторов низших размерностей.

Таким образом, мы можем утверждать, что исследование структуры трехбозонных вершин и поиск аномальных (связанных с операторами высоких размерностей) членов в этих вершинах, с одной стороны, позволяют установить структуру лагранжиана взаимодействия в калибровочном секторе Стандартной модели, и, с другой

стороны, являются мощным инструментом для поиска проявлений физических эффектов, возникающих в расширенных версиях СМ. При этом техника операторного формализма редуцирует вершинные функции, возникающие в моделях с расширенной калибровочной группой, к наборам базисных полевых операторов со все более увеличивающейся размерностью.

Обнаружение отклонений в структуре трехбозонных вершин от минимальной версии Стандартной модели, наблюдение вкладов вершин в нейтральном секторе, которые отсутствуют на древесном уровне минимальной СМ, будет являться определяющим указанием на физику за пределами СМ. С другой стороны, установление жестких ограничений на аномальные вклады будет сужать класс расширенных моделей, определяя дальнейшие теоретические поиски в этом направлении.

Цель, методы и основные задачи исследования:

1. Разработка и создание систем реконструкции и Монте-Карло установки ИСТРА+.
2. Измерение формфакторов в распаде $K^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \pi^0$ на статистике, существенно превышающей мировую, и проверка предсказаний киральной пертурбативной теории в порядке $O(p^6)$.
3. Измерение векторного и скалярного формфакторов в распаде $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \pi^0$, и проверка гипотезы $e - \mu$ универсальности.
4. Поиск взаимодействий, выходящих за рамки стандартной V-A теории в полуплептонных распадах каонов.
5. Поиск одиночного рождения t -кварка, индуцированного распадами калибровочных бозонов с изменением аромата, в эксперименте DELPHI на коллайдере LEP, и получение ограничений на параметры модельного лагранжиана.
6. Поиск аномальных вкладов в трехбозонные вершины в заряженном и нейтральном секторах.

Научная новизна диссертации

В работе получены следующие новые результаты:

- Разработана и создана система реконструкции и Монте-Карло установки ИСТРА+, позволяющая с высокой эффективностью, скоростью и точностью проводить реконструкцию и анализ распадов каонов.
- На статистике, во много раз превышающей мировую, проведен анализ векторного и скалярного формфакторов в полулептонных распадах каонов. Параметры формфакторов определены с лучшей на сегодня точностью. Проведена проверка $e - \mu$ универсальности в полулептонных распадах.
- Впервые обнаружена и измерена квадратичная нелинейность в векторном формфакторе, находящаяся в хорошем согласии с предсказаниями киральной пертурбативной теории в порядке $O(p^6)$.
- Получены ограничения на аномальные вклады в амплитуды полулептонных распадов каонов.
- В рамках моделей распадов калибровочных бозонов с изменением аромата проведены численные расчеты одиночного рождения t -кварка на энергиях коллайдера LEP и показана перспективность исследования подобных процессов с целью обнаружения процессов с изменением аромата, либо установления более сильных ограничений на параметры модельного лагранжиана.
- Проведен поиск одиночного рождения t -кварка в эксперименте DELPHI на коллайдере LEP, и получены новые ограничения на параметры модельного лагранжиана, значительно улучшающие результаты экспериментов ZEUS и CDF.
- Разработаны методы расчета многочастичных диаграмм с использованием техники спиральных амплитуд, и создан пакет программ для анализа процессов с аномальными трехбозонными вершинами.
- Проведены экспериментальные исследования различных конечных состояний в сигнатурах, соответствующих процессам с аномальными трехбозонными константами в эксперименте DELPHI на коллайдере LEP. Получены ограничения на аномальные трехбозонные константы в заряженном и нейтральном секторах.

- Впервые получены ограничения на аномальные константы в нейтральном секторе в общем виде, без условия массовой поверхности для калибровочных бозонов в конечном состоянии.

Научная и практическая ценность работы

Полученные результаты измерения параметров векторного фактора полулептонных распадов каонов и обнаружение статистически значимой квадратичной нелинейности подтверждают вычисления в высоких порядках киральной пертурбативной теории. Это показывает важность учета высоких порядков теории и устраняет противоречия между имеющимися измерениями параметров факторов и вычислениями в порядке $O(p^4)$. Полученные ограничения на аномальные тензорный и скалярный вклады в амплитуду распада позволяют существенно ограничить параметры некоторых расширений Стандартной модели.

Практическую ценность представляет созданная система реконструкции и Монте-Карло установки ИСТРА+. Данная система является прототипом для программ реконструкции строящейся установки ОКА (ИФВЭ), которая также ориентирована на изучение распадов каонов и исследования на которой должны существенно углубить наше понимание киральной динамики и физики редких распадов.

Проведенные исследования процессов с изменением аромата явились сильным стимулирующим фактором для всех коллабораций коллайдера LEP по поиску процесса одиночного рождения t -кварка. Экспериментальные исследования данного процесса значительно улучшают ограничения параметров модельного лагранжиана.

Представляет практическую ценность и пакет программ для расчета многофермионных процессов с учетом вкладов аномальных трехбозонных вершин. Данный пакет в течение последних лет является базисным инструментом для анализа соответствующих амплитуд и получения ограничений на аномальные трехбозонные вершины в эксперименте DELPHI. Разработанная техника может быть успешно применена для расчета процессов на проектируемых линейных e^+e^- -коллайдерах и кварковых амплитуд на коллайдере LHC.

Экспериментальное изучение процессов в сигнатурах, соответствующих вкладам трехбозонных вершин, позволило существенно улучшить ограничения на аномальные константы, что подтверждает правильность нашего понимания структуры калибровочного сектора Стандартной модели.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработка и создание систем реконструкции и Монте-Карло установки ИСТРА+.
2. Исследование распада $K^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \pi^0$, измерение параметров векторного формфактора и обнаружение квадратичной нелинейности.
3. Исследование распада $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \pi^0$, измерение параметров векторного и скалярного формфакторов и проверка $e - \mu$ универсальности.
4. Исследование аномальных вкладов в амплитуды полуплептоновых распадов каонов.
5. Исследование возможности измерения параметров модельного лагранжиана для процессов с изменением аромата в диапазоне энергий LEP.
6. Экспериментальные ограничения на параметры модельного лагранжиана для процессов с изменением аромата, полученные в лептонном и адронном каналах распада W -бозона на установке DELPHI коллайдера LEP.
7. Техника и программная реализация методов расчета спиральных амплитуд для многофермионных конечных состояний с учетом вкладов аномальных трехбозонных вершин.
8. Экспериментальные исследования конечных состояний в сигнатурах, соответствующих рождению нейтральных калибровочных бозонов, и получение ограничений на параметры аномальных трехбозонных вершин.
9. Экспериментальные исследования конечных состояний в сигнатурах, соответствующих рождению заряженных калибровочных бозонов и одиночному рождению W -бозона, и получение ограничений на параметры аномальных трехбозонных вершин.

Апробация работы и публикации

Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались на многих международных конференциях, совещаниях и семинарах, в том числе на:

Рочестерских конференциях в 2002 г. (Амстердам, Голландия), 2000 г. (Осака, Япония) и 1998 г. (Ванкувер, Канада); Еврофизических конференциях в 2003 г. (Аахен, Германия); 2001 г. (Будапешт, Венгрия) и 1999 г. (Тампере, Финляндия); конференции “Beyond the Desert” (Оулу, Финляндия) в 2002 г., 11-ой Ломоносовской конференции (МГУ, Москва, Россия) в 2003 г., Лептон-фотонной конференции (Рим, Италия) в 2001 г., сессиях отделения ядерной физики Российской академии наук.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-19].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения (глава 1), 7 глав и заключения (глава 9). Объем диссертации составляет 199 страниц, включая 89 рисунков и 25 таблиц. Список литературы включает в себя 197 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении (Глава 1)** раскрывается актуальность научных проблем, изучению которых посвящена диссертация. Изложены цель и методы исследования, научная новизна и практическая ценность работы, представлены положения, выносимые на защиту, а также кратко описана структура диссертации и апробация работы.

В **Главе 2** дан обзор современного состояния расчетов в рамках киральной пертурбативной теории. Последовательно рассмотрены основные положения киральной теории и эффективные лагранжианы в низшем и next-to-leading порядках. Обсуждаются следствия киральной модели для мезонных формфакторов в низших порядках, включая предельные теоремы, следующие из методов алгебры токов и связывающие параметры формфакторов K_{13} -распадов.

Показано, что киральный лагранжиан в порядке $O(p^2)$ приводит к постоянным векторным формфакторам, в то время как следующий порядок ($O(p^4)$) генерит q^2 -зависимость:

$$F_V^{\phi^\pm}(q^2) = 1 + \frac{1}{6}\langle r^2 \rangle_V^{\phi^\pm} q^2 + \dots, \quad F_V^{\phi^0}(q^2) = \frac{1}{6}\langle r^2 \rangle_V^{\phi^0} q^2 + \dots \quad (2)$$

Показано, что теорема Сирлина, связывающая электромагнитные формфакторы мезонов (2) с векторными формфакторами

$$f_+^{K\pi} = \frac{1}{2} \left\{ F_V^\pi(t) + F_V^{K^+}(t) \right\} + F_V^{K^0}(t), \quad (3)$$

позволяет получить численные оценки параметров для формфактора $f_+^{K\pi}$, который возникает в адронном матричном элементе K_{I3} распада:

$$\langle \pi | \bar{s} \gamma^{\mu u} u | K \rangle = C_{K\pi} \left[(P_K + P_\pi)^\mu f_+^{K\pi}(t) + (P_K - P_\pi)^\mu f_-^{K\pi}(t) \right], \quad (4)$$

где $t \equiv (P_K - P_\pi)^2$, $C_{K+\pi^0} = 1/\sqrt{2}$, $C_{K^0\pi^-} = 1$.

С помощью стандартного представления

$$f_+(t) = f_+(0) \cdot \left(1 + \lambda_+ \frac{t}{M_\pi^2} \right), \quad (5)$$

где

$$\lambda_+ = \frac{1}{6} M_\pi^2 \langle r^2 \rangle_V^{K\pi} = \frac{1}{6} M_\pi^2 \langle r^2 \rangle_V^\pi + (\text{петлевые вклады}), \quad (6)$$

можно получить $\lambda_+ = 0.031$, используя значение зарядового радиуса π -мезона, измеренного с высокой точностью.

Как и для векторного, линейное представление может быть введено и для скалярного формфактора. При этом теорема Дашена-Вайнштейна связывает соответствующий наклон с отношением мезонных констант F_K и F_π и приводит к численному значению

$$\lambda_0 = \frac{1}{6} M_\pi^2 \langle r^2 \rangle_S^{K\pi} = 0.017 \pm 0.004. \quad (7)$$

Показано, что эта оценка хорошо согласуется со значением, получаемым из теоремы Каллана-Треймана: $\lambda_0 = 0.019$.

В заключении данной главы обсуждаются предсказания, полученные в порядке $O(p^6)$ киральной пертурбативной теории. Указывается, что вычисления в высшем порядке приводят к появлению квадратичных нелинейностей как в векторном, так и в скалярном формфакторах. Отмечается, что параметры наклонов являются модельно-зависимыми, и соответствующие параметры лагранжиана не могут быть надежно зафиксированы из других низкоэнергетических данных. Приводятся численные оценки на параметры наклонов.

Глава 3 посвящена феноменологии K_{l3} -распадов, влиянию радиационных поправок и обзору современного состояния экспериментальных исследований векторных и скалярных формфакторов и аномальных вкладов в амплитуды распада.

Детально рассмотрены представления амплитуды распада со стандартными и аномальными вкладами и кинематика распада. Обсуждается поведение векторного и аномальных вкладов на Далитц-плоте, показывается доминирование аномальных амплитуд на границах фазового объема.

При рассмотрении радиационных поправок приводятся численные оценки их величины для распада K_{e3} и отмечается, что максимальные поправки наблюдаются на границах фазового объема в областях, соответствующих аномальному тензорному вкладу.

Обсуждаются основные экспериментальные результаты в распадах K_{e3} и $K_{\mu 3}$. Отмечаются определенные противоречия в результатах различных экспериментов, особенно при измерении скалярного формфактора.

В **Главе 4** приводится детальное описание систем реконструкции и Монте-Карло установки ИСТРА+. Приводится общая характеристика установки с описанием отдельных элементов и триггерного условия.

Установка ИСТРА+ расположена на отрицательном пучке 4А ускорителя У-70 с максимальной интенсивностью 10^7 частиц/импульс. Установка спроектирована для исследования распа-

дов пучковых частиц с импульсами в диапазоне 15–25 ГэВ. При сравнительно высоких энергиях пучка установка является практически герметичной, позволяя регистрировать продукты распадов в 4π -геометрии (в системе покоя пучковой частицы). При этом в поперечном направлении она достаточно компактна (~ 1 м).

Пучковая трековая система состоит из магнита с интегралом поля ≈ 0.5 Тм и быстрых пропорциональных камер. Камеры имеют шаг сигнальных проволок 1.1 мм, рабочую площадь 140×130 мм², сигнал имеет временную привязку.

Вакуумированный распадный объем окружают 8 колец, состоящих из 8 блоков свинцового стекла каждое и предназначенных для регистрации фотонов низкой энергии, излучаемых под большими углами. Данная охранная система дополняется электромагнитным калориметром из свинцового стекла, который имеет отверстие в центральной части для прохождения пучковых частиц и продуктов распада и служит также для обеспечения герметичности установки.

Основная трековая система состоит из спектрометрического магнита с апертурой $\approx 2 \times 1$ м² и интегралом поля ≈ 1.0 Тм, пропорциональных камер с шагом сигнальных проволок 2 мм, широкозачерненных дрейфовых камер с шагом 4 см, дрейфовых камер с шагом 1 см и четырех двойных плоскостей дрейфовых трубок диаметром 2 см.

Электромагнитный калориметр, изготовленный из свинцового стекла, состоит из 576 ячеек размером 5.2×5.2 см и длиной $\approx 15 X_0$. Такая длина электромагнитного калориметра недостаточна для полного развития ливней от фотонов и электронов больших энергий. Начиная с $E_{\gamma,e} > 12$ ГэВ, становятся заметными утечки из калориметра, и стандартные методы реконструкции ливней, основанные на суммировании энерговыделения в ячейках, дают заметное отклонение от линейности. В связи с этим был развит метод, основанный на фитировании “образов” ливней, который автоматически учитывает утечки и дает линейную зависимость E_{rec} vs. E_{inp} во всем рабочем диапазоне установки.

Система реконструкции установки ИСТРА+ состоит из системы on-line мониторинга, позволяющей наряду с оперативным контролем качества данных проводить калибровку трековых детекторов,

систем реконструкции пучкового и вторичных треков и процедур реконструкции ливней в электромагнитном калориметре.

Обсуждаются алгоритмы калибровки и геометрической привязки элементов детектора. Детально описываются алгоритмы реконструкции пучкового и вторичных треков. Малая заряженная множественность конечного состояния позволяет применять алгоритмы полного перебора, которые характеризуются высокой эффективностью.

На **рис. 1** приведены распределения, характеризующие точность реконструкции импульса вторичного трека. Можно отметить несмещенность оценки импульса и стабильность реконструкции его величины во всем рабочем диапазоне энергий трековой системы.

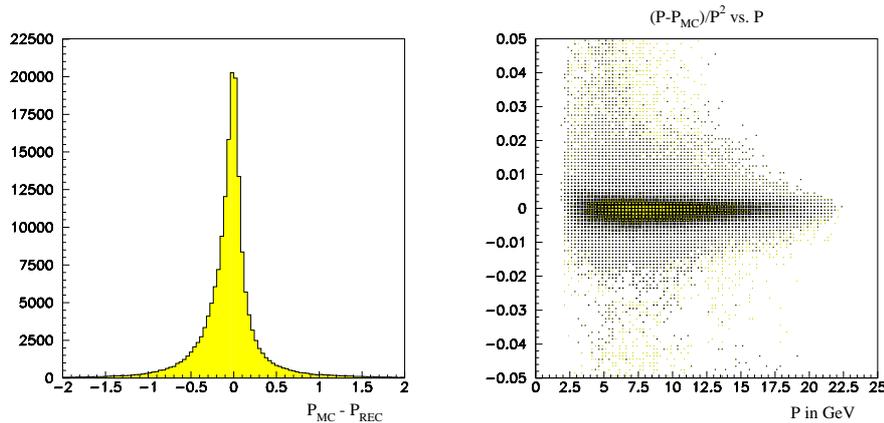


Рис. 1. Абсолютная разница между реконструированным и точным значениями импульса (левый рисунок). Относительная точность восстановления импульса (правый рисунок).

Реконструкция импульса производится на этапе вершинного фита, осуществляющего восстановление координат вершины распада. При этом фите производится совместный анализ хитов в пучковой и распадной частях установки при условии наличия общей вершины.

Координатная точность реконструкции вершины распада приведена на **рис. 2**. Подробно рассматривается алгоритм реконструкции ливней в электромагнитном калориметре. Данный метод позволяет

эффективно реконструировать перекрывающиеся ливни в калориметре ограниченной длины.

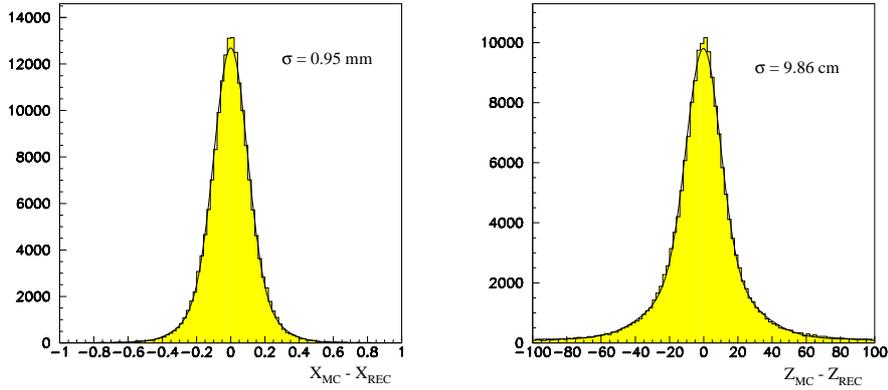


Рис. 2. Распределения отклонений реконструированного положения вершины распада от точного значения для X - и Z -координат.

Для реконструкции электромагнитного калориметра на установке ИСТРА+ использовался метод восстановления ливней по интерполируемым образам, сгенеренным с помощью программ Монте-Карло.

На большой статистике Монте-Карло были получены усредненные энергосыделения в каждой из ячеек матрицы 3×3 для энергий фотонов в диапазоне $1 \div 25$ ГэВ с шагом 1 ГэВ и для фиксированных координат входа фотона в ячейку с шагом 4 мм по обеим координатам. Для каждой точки входа фотона и для каждой энергии были получены 9 чисел, отражающих образ энергосыделения в матрице 3×3 . Общее количество сгенеренных образов было 4394.

Для каждой ячейки в матрице 3×3 зависимость энергосыделения от энергии исходного фотона аппроксимировалась полиномом 4-й степени. Набор полученных функций (1521) и составляет, в конечном итоге, банк образов энергосыделения в калориметре.

В процедуре фитирования осуществляется наложение банка образов на текущий кластер. При этом функции, описывающие энергосыделение в конкретной ячейке матрицы, корректируются с учетом

относительных калибровочных коэффициентов реального калориметра.

Параметрами фита кластера являются его энергия (E_γ) и точка входа фотона (X_γ и Y_γ). На каждом шаге минимизации осуществляется интерполяция коэффициентов функций, описывающих энергетическую зависимость для текущих значений X_γ и Y_γ по двумерной таблице исходных коэффициентов в пространстве $X-Y$. Полученные интерполированные коэффициенты определяют энерговыделение в каждой из 9 ячеек матрицы 3×3 для текущих значений параметров фотона. При этом очевидно, что если определенная ячейка принадлежит сразу двум (или более) локальным кластерам, то необходимо просто просуммировать энергии, вносимые независимыми образами.

Таким образом происходит одновременное фитирование ячеек кластера, независимо от того, какое количество локальных кластеров было в нем реконструировано.

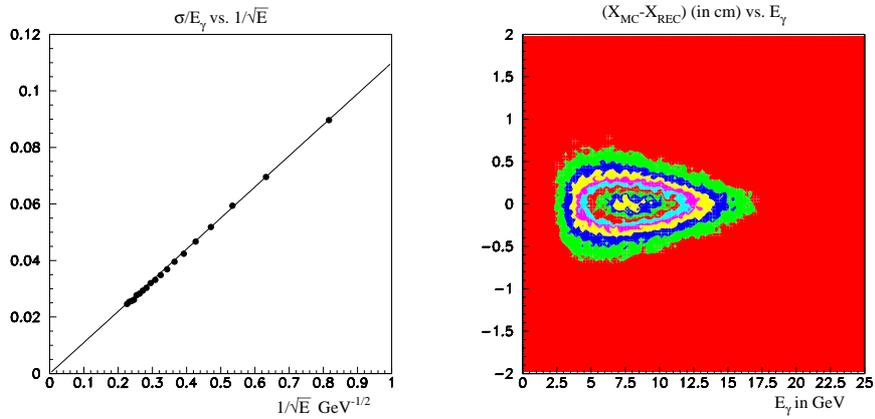


Рис. 3. Энергетическое и координатное разрешения процедуры реконструкции электромагнитного калориметра.

На рис. 3 приведены энергетическое и пространственное разрешения процедуры реконструкции фотонов в калориметре. Энергети-

ческое разрешение характеризуется зависимостью

$$\frac{\sigma}{E_\gamma} = \left(0.3 \oplus \frac{11.2}{\sqrt{E_\gamma}} \right) \%. \quad (8)$$

Пространственное разрешение уже для фотонов с энергиями ~ 5 ГэВ составляет ~ 2 мм и выходит на плато ~ 1.5 мм, начиная с $E_\gamma > 8$ ГэВ. Разрешение может быть существенно улучшено при использовании более мелкого шага пространственной решетки (например, 1 мм вместо используемой величины 4 мм). Однако ширина π^0 определяется, главным образом, энергетическим разрешением, и достигнутая координатная точность является совершенно достаточной.

В заключении данной главы описывается система Монте-Карло установки.

Основные черты программы Монте-Карло можно сформулировать следующим образом:

1. Геометрическое описание камер и элементов установки детализировано до максимально возможного уровня.
 - камеры описаны до уровня отдельных проволок и до элементов конструкций, таких как элементы крепления проволок;
 - там, где это было возможно, использовались оригинальные чертежи детекторов для максимально точного описания.
2. Материал камер описан точно, включая компоненты газовых смесей, используемых в камерах.
3. При пропагации частиц через установку были включены все механизмы взаимодействия, предусмотренные в пакете GEANT:
 - все частицы могли распадаться, и осуществлялась полная пропагация всех продуктов распада;
 - были включены все механизмы электромагнитных и адронных взаимодействий, и все вторичные частицы, рожденные в таких взаимодействиях на веществе в канале, проагировались до полной остановки или распада.
4. Были выбраны низкие электромагнитные и адронные пороги, что обеспечивало адекватное описание развития ливней.

5. При прохождении заряженных частиц через газовый объем камер включался механизм рождения δ -электронов с низким порогом, и они пропагировались до полной остановки. Это позволяло адекватно отобразить отклик пропорциональных камер с малым шагом.
6. Детальное описание развития электромагнитного каскада в калориметре и процесса сбора сигнала:
 - при разыгрывании электромагнитного каскада в калориметре включался механизм рождения черенковских фотонов;
 - они пропагировались в свинцовом стекле с учетом его дисперсионных и оптических свойств до попадания на фотокатод ФЭУ;
 - реакция фотокатода разыгрывалась с учетом квантовой эффективности как функции длины волны падающего фотона.

Глава 5 посвящена анализу K_{l3} -распадов на установке ИСТРА+. Обсуждаются методы идентификации электронов и мюонов в установке ИСТРА+.

Идентификация электронов основана на анализе отношения E/P для треков, ассоциированных с ливнями в электромагнитном калориметре. Эффективность процедуры идентификации составляет 73% вклад пионов $\sim 15\%$. Для идентификации мюонов используется как информация о продольном развитии ливня в адронном калориметре, так и полное энерговыделение. Исследование эффективности и чистоты процедуры идентификации осуществлялось на реальных данных в распадах $K^- \rightarrow \mu^- \nu$ и $K^- \rightarrow \pi^- \pi^0$. Эффективность реконструкции составила 88%, вероятность идентификации пиона как мюона — 0.03.

Далее обсуждаются методы анализа данных. Подробно описывается метод весовых функций, который:

- При адекватных описании установки и процедуре Монте-Карло
 - автоматически учитывает миграцию событий по Далитц-плоту;

- не требует поправок на эффективность реконструкции, отбора и аксептанс установки;
- позволяет точно учитывать радиационные поправки.
- Позволяет использовать всю информацию о распределении событий по Далитц-плоту.
- Позволяет исследовать наличие аномальных вкладов в амплитуду распада.
- Легко обобщается на полиномиальные аппроксимации зависимости формфакторов от переданного импульса.

Описывается метод выделения конечного состояния $\mu^- \nu \pi^0$. После стадии предварительного отбора, которая выделяет конечные состояния с идентифицированными мюоном и π^0 , кардинальное подавление фона достигается при использовании угловых переменных после кинематического фита.

На **рис. 4** приведено распределение угла между мюоном и π^0 в системе покоя распадающегося каона после кинематического фита. Наблюдается ярко выраженный пик фоновых процессов при малых значениях косинуса угла. Отбор по этой переменной позволяет практически полностью подавить фон (вклад фоновых процессов оценен на уровне $< 0.3\%$), и общее количество отобранных событий составляет 537 К.

Как и в распаде $K_{\mu 3}$, отбор событий $K_{e 3}$ основан на анализе угловой переменной. После предварительного отбора и кинематического фита угол между пучковым треком и системой трек $+\pi^0$ является оптимальной переменной для выделения данного распада (**рис. 5**). Вклад фона оценивается на уровне 2.1%, и общее количество отобранных событий составляет 919 К.

Процедура получения параметров формфакторов $K_{l 3}$ -распадов состоит в фитировании весовыми функциями бинированных распределений событий на Далитц-плоте (40x40 бин для $K_{\mu 3}$ и 100 x 100 бин для $K_{e 3}$ -распадов соответственно). Качество фита составляет $\chi^2/\text{ndf} = 1.008$ для $K_{\mu 3}$ и $\chi^2/\text{ndf} = 0.97$ для $K_{e 3}$. Качество описания данных может быть оценено из **рис. 6 и 7**.

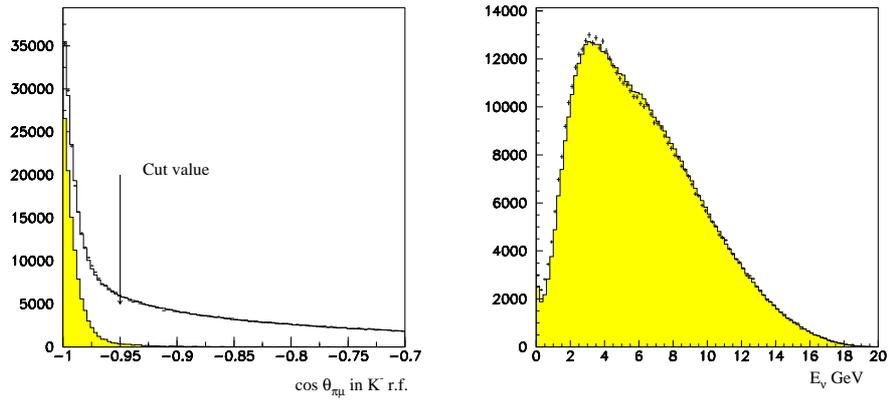


Рис. 4. Угол между треком и импульсом π^0 в системе покоя каона. Недостающая энергия после процедуры отбора.

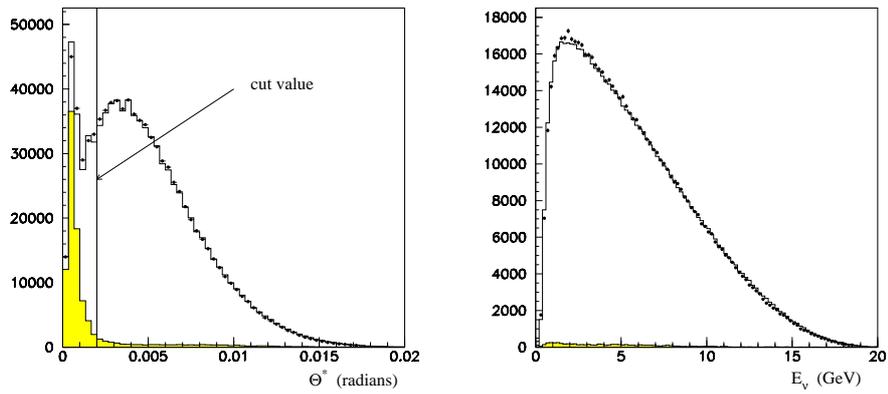


Рис. 5. Угол между пучковым треком и импульсом системы трек + π^0 . Недостающая энергия после процедуры отбора.

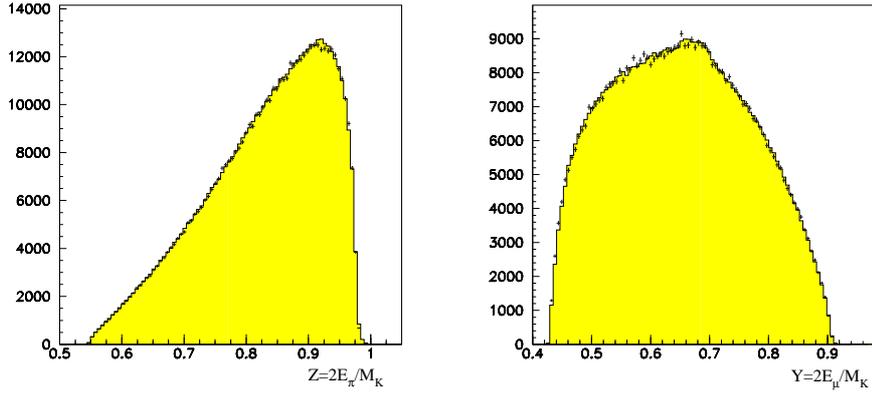


Рис. 6. Качество описания данных в процессе $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$.

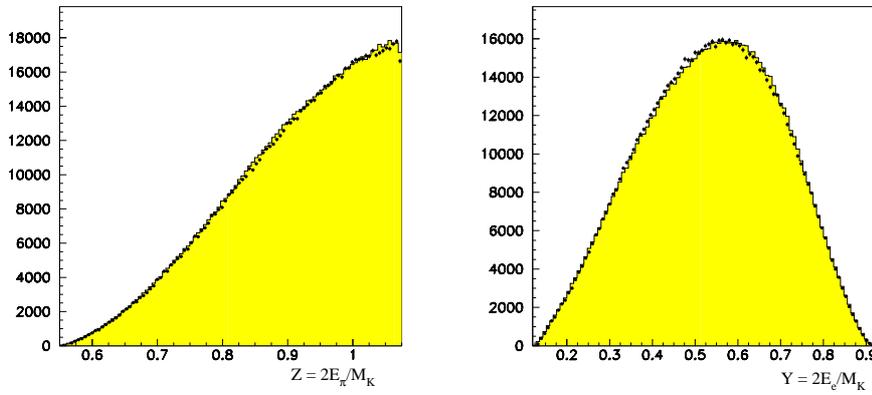


Рис. 7. Качество описания данных в процессе $K^- \rightarrow e^- \nu \pi^0$.

Отмечаются статистически значимая квадратичная нелинейность в векторном формфакторе распада K_{e3} и отсутствие аномальных вкладов. Суммарные результаты приведены в табл. 1. Констатируются совпадение среднего линейного наклона векторных формфакторов в обоих каналах распада, что подтверждает гипотезу $e - \mu$ -универсальности, согласованность нелинейных вкладов, а также вы-

сокая точность определения наклона скалярного формфактора и отсутствие аномальных вкладов. Показано, что нелинейность не может быть описана аномальным скалярным вкладом.

Таблица 1. Результаты анализа K_{l3} -распадов.

	K_{e3}	$K_{\mu3}$
λ_+	$0.02774 \pm 0.00047 \pm 0.00032$	$0.0277 \pm 0.0013 \pm 0.0009$
λ'_+	$0.00084 \pm 0.00027 \pm 0.00031$	0.001 ± 0.001
λ_0		$0.0183 \pm 0.0011 \pm 0.0006$
$f_T/f_+(0)$	$-0.012 \pm 0.021 \pm 0.011$	$-0.0007 \pm 0.0071 \pm 0.002$
$f_S/f_+(0)$	$-0.0037^{+0.0066}_{-0.0056} \pm 0.0041$	$0.0017 \pm 0.0014 \pm 0.0009$

Завершается глава анализом систематических ошибок и формулировкой результатов.

В **Главе 6** рассмотрены теоретические аспекты распада Z -бозона на ароматово-несимметричную пару кварков. Приводятся численные оценки сечения, обсуждаются дифференциальные распределения и кинематические характеристики адронных струй в конечном состоянии.

На **рис. 8** приведены энергии адронов в конечном состоянии для FCNC-процесса вблизи порога. Наблюдается надежное кинематическое разделение сигнального и фонового процесса.

Приводится краткое описание установки DELPHI и основных аспектов реконструкции данных, существенных для анализа процессов с изменением аромата и аномальными бозонными константами.

Подробно описываются процедуры анализа адронного и полулептонного конечных состояний и методы поиска FCNC-процессов. Описываются процедуры предварительного отбора и метод построения дискриминирующей переменной. Данный метод основан на выборе переменных, распределения которых для сигнальных событий и для фона заметно отличаются, и их интерпретации как плотности распределения вероятностей (PDF) для сигнала и фона соответственно.

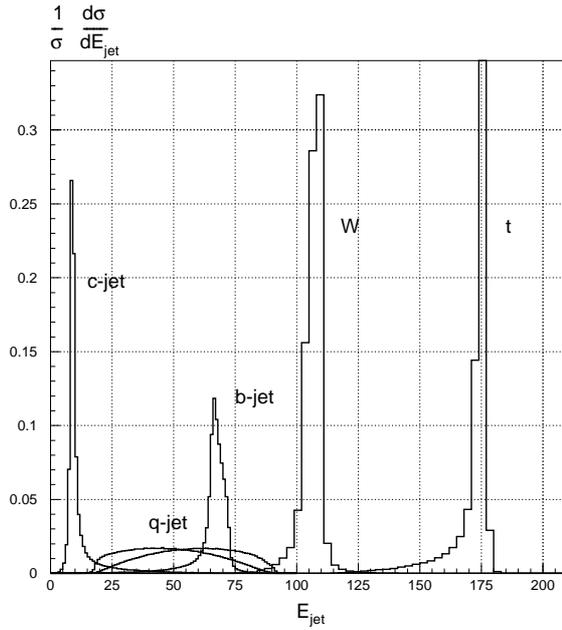


Рис. 8. Энергетические спектры частиц. Кривые с индексом “q-jet” соответствуют струям, возникающим при парном рождении W -бозонов.

Для каждого события два набора плотностей — в соответствии с сигнальными и фоновыми PDF. Перемножая плотности в каждом наборе, мы получаем соответственно кумулятивные плотности вероятностей (функции правдоподобия) для интерпретации данного события как сигнального и фонового. Дискриминирующая переменная строится как логарифм отношения кумулятивных плотностей вероятности.

Подробно обсуждаются переменные, используемые при построении дискриминирующих переменных для обоих конечных состояний. Анализируются различные источники систематических ошибок. Показывается, что основной вклад в систематику связан с величиной массы t -кварка. Результаты формулируются в виде ограничения на параметры модельного лагранжиана как функция массы t -кварка (рис. 9).

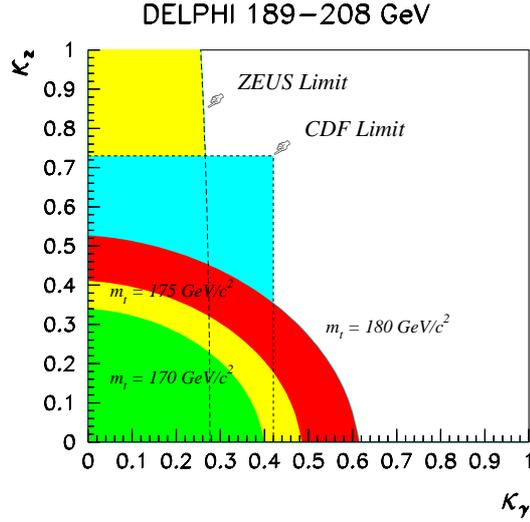


Рис. 9. Контуры, соответствующие 95% -му уровню достоверности в плоскости $\kappa_\gamma - \kappa_Z$ для различных масс t -кварка.

Глава 7 посвящена обзору калибровочного сектора Стандартной модели и методам, применяемым при вычислении многофермионных амплитуд.

Подробно обсуждается формализм, который позволяет строить $SU(2)_L \times U(1)_Y$ -инвариантные операторы высоких размерностей, вклад которых может быть ассоциирован с разложением эффективного лагранжиана по полевым операторам. Приведены выражения для аномальных трехбозонных констант как в заряженном, так и в нейтральном секторах. Отмечается, что феноменологические параметризации обладают существенными недостатками, такими как явное нарушение локальной $SU(2)_L \times U(1)_Y$ -инвариантности, нарушение унитарности на древесном уровне и отсутствие перенормируемости. Обсуждаются представления аномальных вершин, основанные на калибровочно-инвариантном формализме.

Подробно рассматривается техника вычисления спиральных амплитуд, которая может быть эффективно применена как для чи-

сленных, так и для аналитических расчетов многофермионных процессов. Обсуждаются проблемы калибровочных сокращений в сингулярных диаграммах и технические методы их реализации.

Завершается данная глава рассмотрением основных классов процессов с аномальными трехбозонными вершинами. Обсуждается чувствительность различных процессов, показывается важность процессов с одиночным рождением калибровочных бозонов.

В **Главе 8** приводятся результаты поиска аномальных трехбозонных вершин в эксперименте DELPHI.

Изучение нейтрального сектора трехбозонных констант возможно в процессах $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$, $e^+e^- \rightarrow Z\gamma^*$ и $e^+e^- \rightarrow ZZ$. Поледный процесс наблюдается на LEP выше порога образования пары Z -бозонов.

Наиболее чувствительным к аномальным константам является процесс $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$, когда фотон в конечном состоянии находится на массовой поверхности. В этом процессе наиболее чувствительной кинематической областью является область больших энергий и больших полярных углов фотона. Наличие аномальных констант приводит как к изменению числа событий, так и к увеличению сечения рождения продольно-поляризованных Z -бозонов. Основное внимание уделяется изучению двух каналов $e^+e^- \rightarrow \bar{\nu}\nu\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \bar{q}q\gamma$, для которых наблюдается максимальная статистика.

Процедура отбора рождения $Z\gamma$ -конечного состояния в кинематических областях, которые наиболее чувствительны к наличию аномальных констант, сосредоточена на изучении событий с энергичными фотонами в угловом диапазоне $45^\circ < \theta < 135^\circ$, где θ — полярный угол по отношению к оси пучка. Эта область полностью перекрыта центральным газовым электромагнитным калориметром, что обеспечивает хорошее энергетическое и пространственное разрешение для фотонов. Кроме того, большие полярные углы фотонов позволяют значительно уменьшить фон от излучения в начальном состоянии, характеризующемся малыми углами рождаемых фотонов. Обсуждается процедура отбора событий в конечных состояниях $\bar{\nu}\nu\gamma$ и $\bar{q}q\gamma$, приводятся сравнения наблюдаемых величин с предсказаниями Стандартной модели.

Конечное состояние ZZ характеризуется большим набором сигнатур, соответствующих различным каналам распада Z -бозонов. В анализе используются конечные состояния $q\bar{q}q\bar{q}$ (49% всех распадов в топологии ZZ), $q\bar{q}\nu\bar{\nu}$ (28%) и $q\bar{q}l\bar{l}$ (9.3%).

Наиболее статистически значимое четырехструйное конечное состояние характеризуется большим фоном, возникающим от процессов $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ и $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(\gamma)$. Для разделения W^+W^- и ZZ -гипотез используется вероятностный подход, основанный на оценке комбинированной вероятности, учитывающей следующие факторы: амплитуды рождения W^+W^- и ZZ ; конечные ширины калибровочных бозонов и фазовый объем; вероятность кинематических фитов с условием сохранения 4-импульса и равенства инвариантных масс двухструйных конфигураций; вероятность наличия b -струй в конечном состоянии.

Данный метод позволяет надежно разделить W^+W^- и ZZ -гипотезы, но оставляет большой фон от $q\bar{q}(\gamma)$ -событий. Для идентификации этого фона заметим, что 4-струйные конфигурации в конечном состоянии $q\bar{q}(\gamma)$ возникают в процессе фрагментации жесткого глюона, амплитуда излучения которого имеет массовую и коллинеарную сингулярности. Это означает, что две дополнительные струи, соответствующие глюону, должны быть близки в пространстве к одной из кварковых струй. Использование переменной $D_{\text{cut}} = E_1\theta_1\sqrt{E_2\theta_2}$, где $E_1(E_2)$ — энергии самой энергичной (и второй по энергии) струи, а $\theta_1(\theta_2)$ — минимальный (и следующий по малости) угол между струями в событии, позволяет существенно снизить фон от КХД процессов.

Характерной особенностью $q\bar{q}\nu\bar{\nu}$ -конечного состояния является наличие двух акопланарных стуй (аколлинеарных в плоскости, перпендикулярной пучку) с инвариантной и недостающими массами, сравнимыми с массой Z -бозона. Наиболее серьезным фоном в данном канале являются процессы одиночного рождения W ($e^+e^- \rightarrow W e \nu_e$) и WW при распаде одного из бозонов в $\tau\nu_\tau$ и КХД процессы.

После проведения предварительного отбора окончательный анализ осуществляется с помощью построения дискриминирующей переменной методом, аналогичным тому, который использовался при

анализе процессов с изменением аромата. Анализ конечных состояний $ZZ \rightarrow q\bar{q}l\bar{l}$ и $Z\gamma^* \rightarrow q\bar{q}l\bar{l}$ полностью эквивалентен и основан на идентификации изолированных лептонов одинакового аромата и противоположного заряда в конечном состоянии. Единственное отличие состоит в выборе диапазона масс лептонной пары ($M_{ll} \sim M_Z$ для ZZ конечного состояния и $M_{ll} < 10 - 20$ ГэВ при распаде виртуального фотона в лептонную пару).

Во всех каналах не обнаружено статистически значимых отклонений от предсказаний Стандартной модели. Полученные ограничения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Ограничения на аномальные трехбозонные константы в нейтральном секторе.

Параметр	Канал	Значение	95% C.L.	On-shell
a)				
$\tilde{\ell}_1^{ZZZ} m_Z^2$	$ZZ Z\gamma^*$	$-0.13^{+0.33}_{-0.20}$	$[-0.48, +0.41]$	f_4^Z
$\ell_1^{ZZZ} m_Z^2$	$ZZ Z\gamma^*$	$+0.11^{+0.28}_{-0.27}$	$[-0.41, +0.67]$	f_5^Z
$\tilde{\ell}_3^{ZZ\gamma} m_Z^2$	$ZZ Z\gamma^*$	$+0.05^{+0.14}_{-0.20}$	$[-0.26, +0.28]$	f_4^γ
$\ell_2^{ZZ\gamma} m_Z^2$	$ZZ Z\gamma^*$	$+0.14^{+0.27}_{-0.37}$	$[-0.48, +0.60]$	f_5^γ
$\tilde{\ell}_1^{ZZ\gamma} m_Z^2$	$Z\gamma Z\gamma^*$	$+0.10^{+0.09}_{-0.27}$	$[-0.24, +0.25]$	h_1^Z
$\ell_1^{ZZ\gamma} m_Z^2$	$Z\gamma Z\gamma^*$	$-0.19^{+0.29}_{-0.08}$	$[-0.32, +0.18]$	h_3^Z
$\tilde{\ell}_1^{Z\gamma\gamma} m_Z^2$	$Z\gamma Z\gamma^*$	$+0.06^{+0.06}_{-0.17}$	$[-0.15, +0.15]$	h_1^γ
$\ell_1^{Z\gamma\gamma} m_Z^2$	$Z\gamma Z\gamma^*$	$+0.003^{+0.023}_{-0.025}$	$[-0.046, +0.048]$	h_3^γ
b)				
$\tilde{\ell}_4^{ZZ\gamma} m_Z^4$	$Z\gamma^*$	$+0.1^{+1.6}_{-1.7}$	$[-2.8, +2.8]$	–
$\ell_2^{Z\gamma\gamma} m_Z^4$	$Z\gamma^*$	$-0.03^{+0.64}_{-0.60}$	$[-1.00, +0.98]$	–
c) i)				
$-\cot\theta_W m_Z^2 \frac{v^2}{4} \tilde{\ell}$	$Z\gamma^{(*)} ZZ$	$+0.05^{+0.06}_{-0.16}$	$[-0.14, +0.15]$	h_1^γ
$-\cot\theta_W m_Z^2 \frac{v^2}{4} \ell$	$Z\gamma^{(*)} ZZ$	$+0.003^{+0.023}_{-0.025}$	$[-0.049, +0.047]$	h_3^γ
ii)				
$-\cot\theta_W m_Z^2 \frac{v^2}{4} \tilde{\ell}_8^A$	$Z\gamma^{(*)} ZZ$	$+0.09^{+0.09}_{-0.27}$	$[-0.25, +0.25]$	h_1^Z
$-\cot\theta_W m_Z^2 \frac{v^2}{4} \ell_8^A$	$Z\gamma^{(*)} ZZ$	$-0.17^{+0.29}_{-0.09}$	$[-0.31, +0.19]$	h_3^Z
$-\cot\theta_W m_Z^2 \frac{v^2}{4} \tilde{\ell}_8^B$	$Z\gamma^{(*)} ZZ$	$+0.06^{+0.06}_{-0.16}$	$[-0.15, +0.15]$	h_1^γ
$-\cot\theta_W m_Z^2 \frac{v^2}{4} \ell_8^B$	$Z\gamma^{(*)} ZZ$	$+0.003^{+0.023}_{-0.024}$	$[-0.046, +0.048]$	h_3^γ

Вершины $\gamma W^+ W^-$ и $Z W^+ W^-$ дают вклад в процессы $e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$ и $e^+ e^- \rightarrow W e \nu$. Первый процесс содержит диаграммы с s -канальными γ и Z и характеризуется относительно большим сече-

нием (доминирующий процесс парного образования калибровочных бозонов, $\sigma \sim 20$ пб). Второй процесс связан с одиночным рождением W -бозона и характеризуется малыми углами вылета конечного электрона (позитрона). В данной кинематической области доминирует t -канальная диаграмма с вершиной $\gamma W^+ W^-$, и ее влияние на поведение сечения как функции аномальных констант приводит к тому, что при сечении $\sigma \sim 0.6$ пб данный процесс является столь же чувствительным к параметру $\Delta\kappa_\gamma$, как и процесс парного образования калибровочных бозонов, что определяет его важность в изучении аномальных констант.

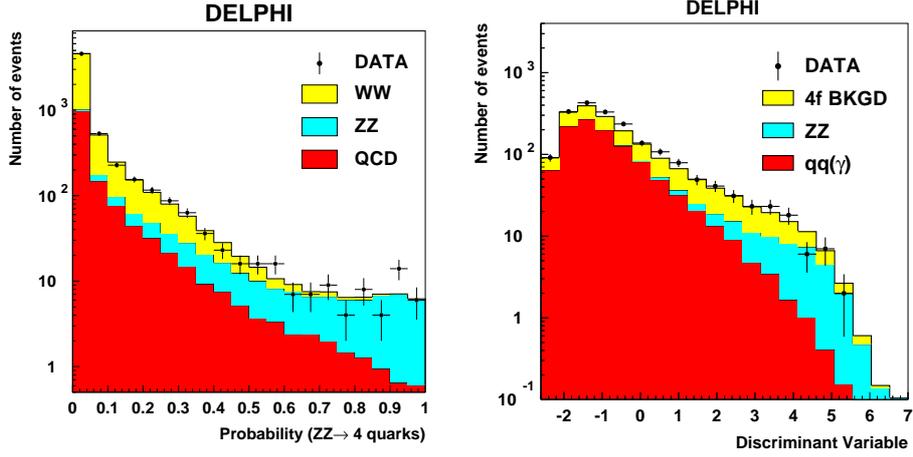


Рис. 10. Комбинированная вероятность для $q\bar{q}q\bar{q}$ конечного состояния (левый рисунок) и дискриминирующая переменная для $q\bar{q}\nu\bar{\nu}$.

Анализ аномальных трехбозонных констант в процессах $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ и $e^+e^- \rightarrow We\nu$ осуществляется в топологиях $jjl\nu$ и $jjjj$ при парном рождении W , jjX и lX при одиночном рождении W .

Анализ конечного состояния $jjl\nu$ осуществляется в технике итерационного дискриминирующего анализа. В данной технике предполагается, что сигнал и фон имеют схожие распределения, но со смещенными средними значениями.

При анализе канала $jjjj$ использовалась нейронная сеть, основанная на пакете JETNET, использующем стандартный алгоритм обратной пропагации. Нейронная сеть тренировалась независимо на каждой энергии. Для тренировки использовались 2500 сигнальных событий и 2500 событий из фона $Z/\gamma \rightarrow q\bar{q}(g)$. После этого алгоритм нейронной сети использовался для других независимых наборов Z/γ , $\gamma\gamma$ и четырехфермионных фоновых процессов и для реальных данных.

Конечные состояния jjX и lX соответствуют рождению одиночного W -бозона и характеризуются наличием двух энергичных струй и недостающим импульсом, направленным под значительным углом к оси пучка (jjX), а также наличием одного энергичного лептона в событии (lX).

Основными фоновыми процессами в топологии jjX являются процессы двухфермионного рождения ($e^+e^- \rightarrow q\bar{q}(\gamma)$), процессы парного рождения W -бозонов с распадом одного из бозонов в лептонную моду и потерей сигнала от лептона в области малых полярных углов и процессы $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\nu\bar{\nu}$. Последний тип процессов может соответствовать как парному рождению Z -бозонов, так и мультипериферическим диаграммам в процессе $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\nu_e\bar{\nu}_e$. В последнем случае в данный процесс также дает существенный вклад диаграмма с одиночным рождением Z -бозона и аномальной вершиной ZWW .

Таким образом, в отличие от конечных состояний $jjjj$ и $jjl\nu$, сигнатура jjX имеет фоновые процессы, которые сами по себе содержат вклады трехбозонных вершин, что позволяет также использовать эти события для извлечения ограничений на аномальные трехбозонные вершины. Строго говоря, только процесс $\gamma q\bar{q}$ может рассматриваться как фон в данном канале, поэтому при анализе одиночного рождения W -бозона учитывались зависимости всех остальных процессов от аномальных констант.

Наличие аномальных трехбозонных вершин приводит как к изменению полного числа событий, так и к модификации угловых распределений излучаемого W -бозона. Во всех описанных выше каналах (кроме lX) используется как полное число событий, так и угловые характеристики излучения или распада W -бозона.

Во всех каналах применялся метод расширенной функции правдоподобия, который в дополнении к функции правдоподобия выбранных переменных использует и абсолютное значение для предсказываемой величины сечения (числа событий).

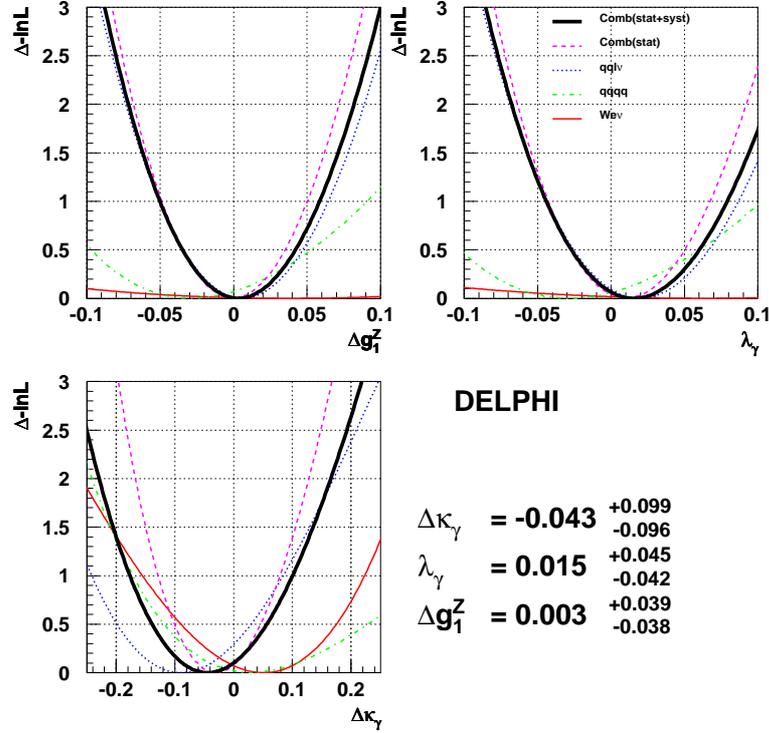


Рис. 11. Логарифмы функций правдоподобия для однопараметрических фитов в разных каналах. Показаны также комбинированные кривые и учет систематических ошибок.

Во всех каналах, ассоциированных с аномальными трехбозонными константами в заряженном секторе, не обнаружено отклонений от предсказаний Стандартной модели. На **рис. 11** приведены логарифмы функций правдоподобия как для отдельных каналов, так и комбинированные с учетом систематических ошибок.

В **Заключении** сформулированы **основные результаты диссертации**:

1. Разработана и создана система реконструкции и анализа данных установки ИСТРА+. Система включает в себя приложения, позволяющие осуществлять калибровку трековых детекторов как в on-line, так и в off-line режимах: привязку и общий мониторинг качества данных установки; осуществлять реконструкцию пучкового и вторичных треков; реконструировать ливни в электромагнитном калориметре. При анализе треков используются алгоритмы полного перебора, обеспечивающие максимальную эффективность реконструкции. Разработан и реализован метод реконструкции ливней в электромагнитном калориметре, основанный на интерполируемых образах ливней. Данный метод использует полную информацию о распределении энергодыхделения по ячейкам кластера и позволяет существенно улучшить разрешение калориметра даже при его ограниченной длине и в случае перекрывающихся кластеров. Общая эффективность реконструкции пучковой части установки составила $\sim 85\%$, что определяется в основном эффективностью работы камер и фоновыми условиями. Эффективность реконструкции вторичных треков составляет $\sim 60\%$ и определяется геометрическим аксептансом. Система идентификации вторичных частиц позволяет эффективно и с малым уровнем фона выделять электроны, мюоны и π -мезоны. Реконструкция вершины распада осуществляется с высокой точностью, и процедуры кинематического фита позволяют надежно восстанавливать кинематические переменные в инклюзивных распадах.
2. Разработана и создана система Монте-Карло установки ИСТРА+. Система поддерживает детальное описание геометрии, материалов и свойств различных элементов установки, включая учет оптических и дисперсионных свойств материала электромагнитного калориметра и квантовые характеристики фотокатодов фотоэлектронных умножителей.

Монте–Карло установки проводятся с учетом реальных характеристик пропорциональных и дрейфовых камер, калибровочных свойств электромагнитного калориметра. Данное свойство системы Монте–Карло позволяет получить адекватное описание установки и сигналов в различных детекторах. События, полученные в Монте–Карло, реконструируются и анализируются теми же процедурами, что и реальные события.

3. Проведено исследование распада $K^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \pi^0$. Статистика, отобранная для анализа, составляет 919К событий и существенно превышает мировую.

Анализ векторного формфактора осуществлен во всей физически разрешенной области Далитц–плота. Впервые на статистически значимом уровне обнаружена нелинейность в векторном формфакторе, которая находится в согласии с предсказаниями киральной пертурбативной теории в порядке $O(p^6)$. Величины параметров формфактора с квадратичной нелинейностью составили:

$$\lambda'_+ = 0.00084 \pm 0.00027 (stat) \pm 0.00031 (syst)$$

для квадратичного члена и

$$\lambda_+ = 0.02324 \pm 0.00152 (stat) \pm 0.00032 (syst)$$

для линейного, который в порядке $O(p^6)$ должен интерпретироваться как $df_+(t)/dt|_{t=0}$. Использование линейного формфактора приводит к значению

$$\lambda_+^{\text{lin}} = 0.02774 \pm 0.00047 (stat) \pm 0.00032 (syst),$$

который при статистически значимой нелинейности имеет смысл среднего наклона формфактора в физической области распада.

В данном канале получены ограничения на аномальные тензорный и скалярный вклады, которые составили:

$$f_T/f_+(0) = -0.012 \pm 0.021 (stat) \pm 0.011 (syst)$$

и

$$f_S/f_+(0) = -0.0037_{-0.0056}^{+0.0066} (stat) \pm 0.0041 (syst)$$

соответственно. Их значения сравнимы с нулем, что позволяет констатировать отсутствие аномальных вкладов.

4. Проведено исследование распада $K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \pi^0$. Статистика, отобранная для анализа, как и в случае K_{e3} распада, существенно превышает мировую и составляет 537К событий. Проведен анализ векторного и скалярного формфакторов $K_{\mu 3}$ распада. Наклон векторного формфактора в линейном приближении составил

$$\lambda_+ = 0.0277 \pm 0.0013 (stat) \pm 0.0009 (syst),$$

что находится в отличном согласии с величиной, полученной в распаде K_{e3} и подтверждает гипотезу $e - \mu$ универсальности. Величина наклона скалярного формфактора составила

$$\lambda_0 = 0.0183 \pm 0.0011 (stat) \pm 0.0006 (syst),$$

что является наиболее точным измерением данного параметра на настоящий момент и находится в хорошем согласии с предсказаниями киральной пертурбативной теории.

Как и в K_{e3} -распаде, в данном канале исследовались возможные аномальные вклады. Получены следующие значения для тензорного и скалярного вкладов:

$$f_T/f_+(0) = -0.0007 \pm 0.0071 (stat) \pm 0.002 (syst)$$

и

$$f_S/f_+(0) = 0.0017 \pm 0.0014 (stat) \pm 0.0009 (syst) \pm 0.0053 (theor).$$

Полученные значения сравнимы с нулем и являются наиболее сильными на настоящий момент.

5. В рамках модели распада Z -бозона с изменением аромата, исследована возможность обнаружения процессов одиночного рождения t -кварка на коллайдере LEP. Получены численные оценки сечений и дифференциальных распределений, которые позволяют утверждать, что изучение данного процесса на энергиях LEP может привести к существенному улучшению имеющихся ограничений на параметры модельного лагранжиана. Проведен анализ кинематических характеристик частиц, рождающихся в процессе $e^+e^- \rightarrow (\gamma, Z) \rightarrow t\bar{c}$ и установлено, что

область энергий в районе порога данной реакции характеризуется достаточно жестко фиксированной кинематикой продуктов распада, что позволяет надежно выделить данный процесс на фоне обычных КХД-процессов и процессов рождения пар калибровочных бозонов.

6. Проведен анализ данных установки DELPHI с целью поиска процессов одиночного рождения t -кварка. Анализ осуществлялся в лептонном и адронном каналах распадов W -бозона. Количество отобранных событий при различных энергиях хорошо согласуется с предсказаниями Стандартной модели. Получены ограничения на константы модельного лагранжиана для вершин $\gamma \rightarrow t\bar{c}$ и $Z \rightarrow t\bar{c}$ на уровне достоверности 95%:

m_t (ГэВ)	170	175	180
$\kappa_Z(\kappa_\gamma = 0)$	0.340	0.411	0.527
$\kappa_\gamma(\kappa_Z = 0)$	0.402	0.486	0.614

Данный результат улучшает ограничения, полученные в экспериментах ZEUS и CDF.

7. Разработан пакет программ DELTGC, позволяющий осуществлять вычисления сечений и дифференциальных распределений в процессах $e^+e^- \rightarrow f\bar{f}\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow 2f2\bar{f}$ для произвольных конечных состояний и в произвольной кинематической области. В данном пакете реализованы полные представления для аномальных трехбозонных констант в заряженном и нейтральном секторах. Аномальные трехбозонные константы в нейтральном секторе впервые реализованы как в стандартном (on-shell), так и в общем (off-shell) представлениях.
8. В результате анализа данных установки DELPHI в каналах ZZ , $Z\gamma$ и $Z\gamma^*$ получены ограничения на аномальные трехбозонные константы в нейтральном секторе:
Впервые получены ограничения на аномальные константы в общем виде (без условия массовой поверхности).

9. В результате анализа данных установки DELPHI в каналах WW и $W e \nu$ получены ограничения на аномальные трехбозонные константы в заряженном секторе:

$$\begin{aligned}\Delta g_1^Z &= 0.003_{-0.038}^{+0.039}, \\ \Delta \kappa_\gamma &= -0.043_{-0.096}^{+0.099}, \\ \lambda_\gamma &= 0.015_{-0.042}^{+0.045}.\end{aligned}$$

Полученные значения существенно улучшают ограничения, установленные в экспериментах D0 и CDF, и хорошо согласуются с результатами других коллабораций LEP.

Список литературы

- [1] И.В. Ажиненко и др. (Коллаборация ИСТРА+) “Изучение распада $K^- \rightarrow \pi^0 e^- \nu$ ”, *Phys. Atom. Nucl.* **65** (2002) 2064; *ЯФ.* **65** (2002) 2125.
- [2] И.В. Ажиненко и др. (Коллаборация ИСТРА+) “Изучение распада $K^- \rightarrow \mu^- \nu \pi^0$ ”, *Phys. Atom. Nucl.* **66** (2003) 105; *Яд. Физ.* **66** (2003) 107.
- [3] I.V. Ajinenko et al. (ISTRA+ Collaboration) “Study of the $K^- \rightarrow \pi^0 e^- \nu$ decay”, *Phys. Lett.* **B574** (2003) 14.
- [4] O.P. Yushchenko et al. (ISTRA+ Collaboration) “High statistic study of the $K^- \rightarrow \pi^0 \mu^- \nu$ decay”, *Phys. Lett.* **B581** (2004) 31.
- [5] O.P. Yushchenko et al. (ISTRA+ Collaboration) “High statistic measurement of the $K^- \rightarrow \pi^0 e^- \nu$ decay form-factors”. – IHEP Preprint 2004-12. Принято к публикации в *Phys. Lett.* **B**.
- [6] В.Ф. Образцов, С.Р. Слабоспицкий, О.П. Ющенко. “Поиск аномальных взаимодействий топ-кварка на коллайдере LEP-2”, *ЯФ.* **62** (1999) 108.
- [7] P. Abreu et al. (DELPHI Collaboration) “Search for Leptoquarks and FCNC in e^+e^- Annihilation at $\sqrt{s} = 183$ GeV”, *Phys. Lett.* **B446** (1999) 62.

- [8] V.F. Obraztsov et al. (DELPHI Collaboration) “Search for FCNC in Hadronic Events at $\sqrt{s} = 189$ GeV”, CERN-OPEN-99-376 (1999), Proceed. Lepton-Photon 99, Singapur, World Scientific (2000)927.
- [9] P. Abreu et al. (DELPHI Collaboration) “Search for Single Top Production via FCNC at $\sqrt{s} = 189 - 208$ GeV”, CERN-EP-2003-066 (2003), accepted by Phys. Lett. B.
- [10] А.А. Лиходед, О.П. Ющенко. “Аномальные бозонные константы в процессе $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ на e^+e^- коллайдерах”, *ЯФ.* **60** (1997) 612.
- [11] O. Yushchenko, V. Kostyukhin. “DELTCG. A Programm for Four Fermion Calculations”, DELPHI 99-4 PHYS-816 (1999).
- [12] W. Adam et al. (DELPHI Collaboration) “Search for Anomalous Production of Single Photons at $\sqrt{s} = 130$ and 136 GeV”, *Phys. Lett.* **B380** (1996) 471.
- [13] P. Abreu et al. (DELPHI Collaboration) “Measurement of Trilinear Gauge Couplings in e^+e^- Collisions at 161 and 172 GeV.”, *Phys. Lett.* **B423** (1998) 194.
- [14] J. Abdallah et al. (DELPHI Collaboration) “ZZ Production in e^+e^- Interactions at $\sqrt{s} = 183 - 209$ GeV”, *Eur. Phys. Jour.* **C30** (2003) 447.
- [15] P. Abreu et al. (DELPHI Collaboration) “Measurement of Trilinear Gauge Boson Couplings WWV , ($V \equiv Z, \gamma$) in ee Collisions at 189 GeV”, *Phys. Lett.* **B502** (2001) 9.
- [16] P. Abreu et al. (DELPHI Collaboration) “Measurement of Trilinear Gauge Boson Couplings WWV , ($V \equiv Z, \gamma$) in ee Collisions at 183 GeV”, *Phys. Lett.* **B459** (1999) 382.
- [17] P. Abreu et al. (DELPHI Collaboration) “Measurement and Interpretation of the W-pair cross-section in e^+e^- Interaction at 161 GeV”, *Phys. Lett.* **B397** (1997) 158.

- [18] O.P. Yushchenko. "Single-W Production and Neutral TGC at LEP-2", Proceedings Europhysics Conference on High-Energy Physics 99, Bristol, UK (2000), 745.
- [19] O.P. Yushchenko. "Rare Processes and Anomalous Gauge Couplings at LEP-2", Proceedings Beyond the Desert 2002 (Oulu, Finland), Bristol and Philadelphia Publ. (2003) 665.

Рукопись поступила 22 апреля 2004 года.

Список авторов коллаборации ИСТРА+

И.В.Ажиненко, С.А.Акименко, К.С.Белоус, Г.И.Бритвич,
И.Г.Бритвич, К.В.Дацко, А.П.Филин, А.В.Инякин,
А.С.Константинов, В.Ф.Константинов, И.Я.Корольков,
В.А.Хмельников, В.М.Леонтьев, В.П.Новиков, В.Ф.Образцов,
В.А.Поляков, В.И.Романовский, В.М.Ронжин, В.И.Шелихов,
Н.Э.Смирнов, А.А.Соколов, О.Г.Чикилев, В.А.Уваров,
О.П.Ющенко, В.Н.Болотов, С.В.Лаптев, А.Р.Пасцяк,
А.Ю.Поляруш, Р.Х.Сиродеев.

Список авторов коллаборации DELPHI

J.Abdallah, P.Abreu, W.Adam, P.Adzic, T.Albrecht, T.Alderweireld, R.Aleman-Fernandez, T.Allmendinger, P.P.Allport, U.Amaldi, N.Amapane, S.Amato, E.Anashkin, A.Andreazza, S.Andringa, N.Anjos, P.Antilogus, W-D.Apel, Y.Arnoud, S.Ask, B.Asman, J.E.Augustin, A.Augustinus, P.Baillon, A.Ballestrero, P.Bambade, R.Barbier, D.Bardin, G.Barker, A.Baroncelli, M.Battaglia, M.Baubillier, K-H.Becks, M.Begalli, A.Behrmann, E.Ben-Haim, N.Benekos, A.Benvenuti, C.Berat, M.Berggren, L.Berntzon, D.Bertrand, M.Besancon, N.Besson, D.Bloch, M.Blom, M.Bluj, M.Bonesini, M.Boonekamp, P.S.L.Booth, G.Borisov, O.Botner, B.Bouquet, T.J.V.Bowcock, I.Boyko, M.Bracko, R.Brenner, E.Brodet, P.Bruckman, J.M.Brunet, L.Bugge, P.Buschmann, M.Calvi, T.Camporesi, V.Canale, F.Carena, N.Castro, F.Cavallo, M.Chapkin, Ph.Charpentier, P.Checchia, R.Chierici, P.Chliapnikov, J.Chudoba, S.U.Chung, K.Cieslik, P.Collins, R.Contri, G.Cosme, F.Cossutti, M.J.Costa, B.Crawley, D.Crennell, J.Cuevas, J.D'Hondt, J.Dalmau, T.da Silva, W.Da Silva, G.Della Ricca, A.De Angelis, W.De Boer, C.De Clercq, B.De Lotto, N.De Maria, A.De Min, L.de Paula, L.Di Ciaccio, A.Di Simone, K.Doroba, J.Drees, M.Dris, G.Eigen, T.Ekelof, M.Ellert, M.Elsing, M.C.Espirito Santo, G.Fanourakis, D.Fassouliotis, M.Feindt, J.Fernandez, A.Ferrer, F.Ferro, U.Flagmeyer, H.Foeth, E.Fokitis, F.Fulda-Quenzer, J.Fuster, M.Gandelman, C.Garcia, Ph.Gavillet, E.Gazis, R.Gokieli, B.Golob, G.Gomez-Ceballos, P.Goncalves, E.Graziani, G.Grosdidier, K.Grzelak, J.Guy, C.Haag, A.Hallgren, K.Hamacher, K.Hamilton, S.Haug, F.Hauler, V.Hedberg, M.Hennecke, H.Herr, J.Hoffman, S-O.Holmgren, P.J.Holt, M.A.Houlden, K.Hultqvist, J.N.Jackson, G.Jarlskog, P.Jarry, D.Jeans, E.K.Johansson, P.D.Johansson, P.Jonsson, C.Joram, L.Jungermann, F.Kapusta, S.Katsanevas, E.Katsoufis, G.Kernel, B.P.Kersevan, U.Kerzel, A.Kiiskinen, B.T.King, N.J.Kjaer, P.Kluit, P.Kokkinias, C.Kourkouvelis, O.Kouznetsov, Z.Krumstein, M.Kucharczyk, J.Lamsa, G.Leder, F.Ledroit, L.Leinonen, R.Leitner, J.Lemonne, V.Lepeltier, T.Lesiak, W.Liebig, D.Liko, A.Lipniacka, J.H.Lopes, J.M.Lopez, D.Loukas, P.Lutz, L.Lyons, J.MacNaughton, A.Malek, S.Maltezos, F.Mandl, J.Marco, R.Marco, B.Marechal, M.Margoni, J-C.Marin, C.Mariotti, A.Markou, C.Martinez-Rivero,

J.Masik, N.Mastroiannopoulos, F.Matorras, C.Matteuzzi, F.Mazzucato, M.Mazzucato, R.Mc Nulty, C.Meroni, W.T.Meyer, E.Migliore, W.Mitaroff, U.Mjoernmark, T.Moa, M.Moch, K.Moenig, R.Monge, J.Montenegro, D.Moraes, S.Moreno, P.Morettini, U.Mueller, K.Muenich, M.Mulders, L.Mundim, W.Murray, B.Muryn, G.Myatt, T.Myklebust, M.Nassiakou, F.Navarria, K.Nawrocki, R.Nicolaidou, M.Nikolenko, A.Oblakowska-Mucha, V.Obraztsov, A.Olshevski, A.Onofre, R.Orava, K.Osterberg, A.Ouraou, A.Oyanguren, M.Paganoni, S.Paiano, J.P.Palacios, H.Palka, Th.D.Papadopoulou, L.Pape, C.Parkes, F.Parodi, U.Parzefall, A.Passeri, O.Passon, L.Peralta, V.Perepelitsa, A.Perrotta, A.Petrolini, J.Piedra, L.Pieri, F.Pierre, M.Pimenta, E.Piotto, T.Podobnik, V.Poireau, M.E.Pol, G.Polok, V.Pozdniakov, N.Pukhaeva, A.Pullia, J.Rames, L.Ramler, A.Read, P.Rebecchi, J.Rehn, D.Reid, R.Reinhardt, P.Renton, F.Richard, J.Ridky, M.Rivero, D.Rodriguez, A.Romero, P.Ronchese, E.Rosenberg, P.Roudeau, T.Rovelli, V.Ruhlmann-Kleider, D.Ryabtchikov, A.Sadovsky, L.Salmi, J.Salt, A.Savoy-Navarro, U.Schwickerath, A.Segar, R.Sekulin, M.Siebel, A.Sisakian, G.Smadja, O.Smirnova, A.Sokolov, A.Sopczak, R.Sosnowski, T.Spassov, M.Stanitzki, A.Stocchi, J.Strauss, B.Stugu, M.Szczekowski, M.Szeptycka, T.Szumlak, T.Tabarelli, A.C.Taffard, F.Tegenfeldt, J.Timmermans, L.Tkatchev, M.Tobin, S.Todorovova, B.Tome, A.Tonazzo, P.Tortosa, P.Travnicek, D.Treille, G.Tristram, M.Trochimczuk, C.Troncon, M-L.Turluer, I.A.Tyapkin, P.Tyapkin, S.Tzamarias, V.Uvarov, G.Valenti, P.Van Dam, J.Van Eldik, A.Van Lysebetten, N.van Remortel, I.Van Vulpen, G.Vegni, F.Veloso, W.Venus, P.Verdier, V.Verzi, D.Vilanova, L.Vitale, V.Vrba, H.Wahlen, A.J.Washbrook, C.Weiser, D.Wicke, J.Wickens, G.Wilkinson, M.Winter, M.Witek, O.Yushchenko, A.Zalewska, P.Zalewski, D.Zavrtanik, V.Zhuravlov, N.I.Zimin, A.Zintchenko, M.Zupan

О.П. Ющенко.

Исследования K_{l3} -распадов на установке ИСТРА+, поиск аномальных распадов калибровочных бозонов на установке DELPHI.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л^AT_EX**.

Редактор Н.В. Ежела.

Технический редактор Н.В. Ежела.

Подписано к печати 26.04.2004. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.

Печ.л. 1,48. Уч.-изд.л. 1,26. Тираж 100. Заказ 250. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий

142284, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2004-17, И Ф В Э, 2004
