

1-91-513

КОРЫТОВ

Андрей Валентинович

УДК 539.12.162.8

АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР ДЕЛФИ
И ИНКЛЮЗИВНЫЕ СПЕКТРЫ АДРОНОВ
В e^+e^- -АННИГИЛЯЦИИ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук Г. Д. Алексеев

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук В. И. Рыкалин
кандидат физико-математических наук А. В. Куликов

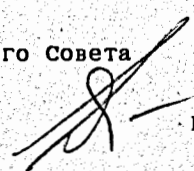
Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Московский инженерно-физический институт, г. Москва

Защита диссертации состоится 26. XII 1991 г.
в 14³⁰ часов на заседании специализированного Совета
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем, Объединенного
института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан 25. XI 1991 г.

Ученый секретарь специализированного Совета
доктор физико-математических наук


Ю. А. Батусов

Актуальность.

Установка DELPHI является универсальным детектором, позволяющим регистрировать и идентифицировать все продукты e^+e^- -взаимодействий. Детектор установлен на ускорителе LEP, предназначенном для детальных проверок стандартной модели. Возможность детального описания событий позволяет решать широкий класс актуальных физических задач. Таким образом, адронный калориметр, предназначенный для измерения энергии адронов, идентификации различных частиц, а также дающий важную триггерную информацию, является неотъемлемой частью такой установки как DELPHI.

Пластиковые стримерные трубки, используемые в адронном калориметре DELPHI, находят все большее применение в больших детекторах. Поэтому информация различного характера о возможностях этого типа детекторов, о способах повышения их надежности является крайне необходимой.

Изучение различных характеристик сравнительно мягких адронов в струях является тестом применимости КХД к описанию мягких процессов. Проблема состоит в том, что стандартный метод приближений не работает в случае КХД, когда энергии кварков и глюонов становятся сравнимыми с Λ_{QCD} и константа взаимодействия перестает быть малым параметром. Исследования в этом направлении ведут к пониманию физики конфайнмента.

Цель работы:

- многоплановые исследования пластиковых стримерных трубок, организация и проведение массовых испытаний детекторов с конечной целью создания надежно работающего адронного калориметра DELPHI;

- анализ инклюзивных спектров адронов, полученных на установке DELPHI в контексте КХД расчетов, выполненных в модифицированном приближении лидирующих логарифмов.

Научные результаты и новизна.

В диссертации получены следующие новые результаты, выдвигаемые автором для защиты:

1. При участии автора создана автоматизированная система

массовых испытаний детекторов адронного калориметра ДЕЛФИ.

2. На стендах массовых испытаний в течении двух лет были "оттенированы" и испытаны более 25 000 детекторов (200 000 анодных проволок) длиной от 30 см до 4 м.

3. Показано, что в результате "тренировки" плато счетных характеристик детекторов в среднем увеличивается на 300 В. Качество процесса "тренировки" и испытаний обеспечило надежную работу детекторов в калориметре (более 99% по данным 2-годовой эксплуатации калориметра).

4. Продемонстрировано, что механическая полировка графитовой поверхности катода значительно повышает надежность работы детекторов при больших загрузках.

5. Проведены исследования различных газовых смесей с целью выбора оптимального газа для детекторов адронного калориметра ДЕЛФИ. Продемонстрирована независимость максимального заряда стримера от широких вариаций компонент в газовой смеси. Выбранная смесь ($Ar+CO_2+C_4H_{10}=10+60+30$) используется в настоящее время в калориметре.

7. Проведены исследования, направленные на выявление чувствительности характеристик детекторов к изменениям различных факторов:

а) чувствительность к изменениям атмосферного давления наибольшая (около 1% изменения заряда на 1 мм ртутного столба); эти данные явились основанием для создания системы "медленного контроля" калориметра;

б) показано, что систематические отклонения в геометрии детекторов должны быть меньше 200 микрон;

в) показано, что старение детекторов не должно проявиться при обозримых сроках эксплуатации ДЕЛФИ;

г) изменение заряда стримера в магнитном поле пренебрежимо (~3%) при работе в стримерном режиме и может быть заметным в переходной области от пропорционального режима к стримерному (~15%).

8. Разработан пакет программ для физического анализа адронных инклюзивных спектров в сопоставлении с расчетами в рамках Модифицированного приближения лидирующих логарифмов.

Проведен физический анализ данных DELPHI, а также

совместный анализ данных OPAL и TASSO.

(*) При анализе без идентификации адронов эффективный параметр обрезания $\Lambda_{eff}=210\pm 20$ MeV и находится в согласии с данными других установок.

(*) Продемонстрировано согласие данных DELPHI, OPAL и TASSO с гипотезой о соответствии между Λ_{eff} и массой соответствующих адронов. В рамках модели относительные выходы адронов и их спектры описываются с использованием единственного феноменологического параметра, который идеально не должен зависеть от энергии. Фит данных даёт величину, варьирующуюся от 1.17 до 0.97 в диапазоне энергий от 14 до 91 ГэВ.

Практическая ценность работы.

Данные, полученные в результате методических исследований пластиковых стримерных трубок, представляют большой интерес как для уже работающих установок, базирующихся на данном типе детекторов, так и для вновь создающихся.

Опыт работы калориметра DELPHI даёт важную информацию о возможностях калориметров данного типа.

Анализ инклюзивных спектров говорит об их неплохом согласии с предсказаниями КХД.

Пакет фитирующих программ, разработанный автором, может быть использован для дальнейшего анализа данных DELPHI с идентифицированными адронами, что стало возможно после установки RICH-детектора. Это обеспечит существенно более детальное сравнение экспериментальных данных с теорией.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались на научных семинарах ОИЯИ, на международных совещаниях группы адронного калориметра ДЕЛФИ, на совещаниях коллаборации ДЕЛФИ, на научных семинарах в ЦЕРНе.

Публикации.

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 8 работах.

Структура диссертации. Диссертация состоит из трех разделов и заключения.

РАЗДЕЛ 1.

В первом разделе формулируются основные направления исследований на ускорителе LEP и дается краткое описание структуры установки DELPHI (рис.1).

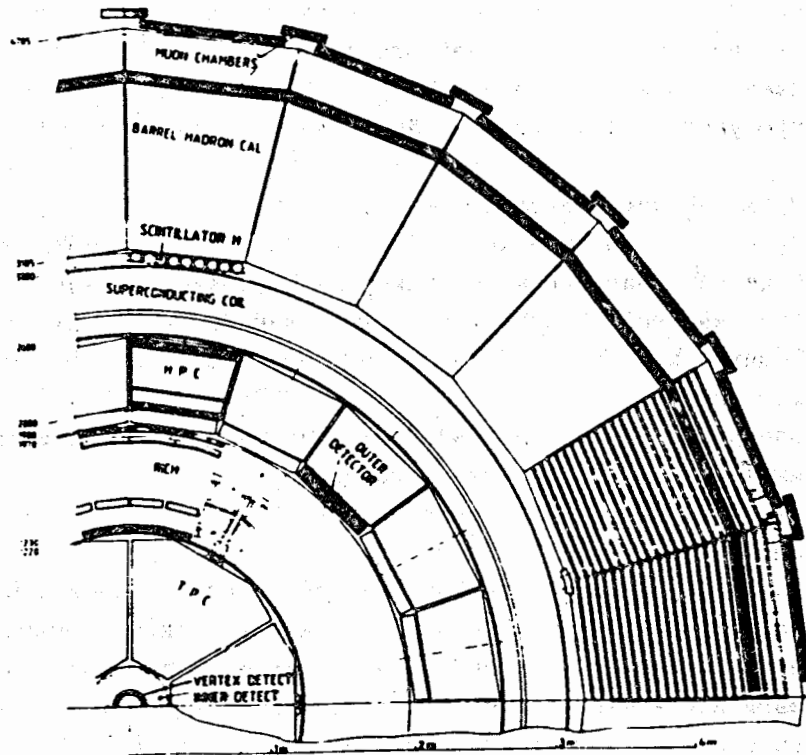


Рис.1. Четверть поперечного сечения установки DELPHI.

РАЗДЕЛ 2.

Второй раздел посвящен адронному калориметру DELPHI.

В первой главе формулируются общие основные задачи адронной калориметрии, дается обзор феноменологического описания калориметра.

Также здесь приводится геометрическая структура адронного

калориметра DELPHI. Адронный калориметр DELPHI является классическим железным калориметром с газоразрядными детекторами. На рис.2 показан один из модулей калориметра с торца. Двадцать пятисантиметровых железных слоев (~6λ) чередуются с газовыми проволочными детекторами, вставленными в двухсантиметровые зазоры. В качестве детекторов используются пластиковые стримерные трубки Tagocci (рис3) с внешними считывающими электродами, которые организованы в проективные башни. Продольная сегментация калориметра -- 4 (электроды подсоединены по 5 на один канал электроники). Размеры электродов (~20×20 см²) приблизительно соответствуют поперечным размерам адронного ливня. Детекторы работают в самогасящемся стримерном режиме. Ожидаемое разрешение калориметра ~80%/E^{0.5}+10%.

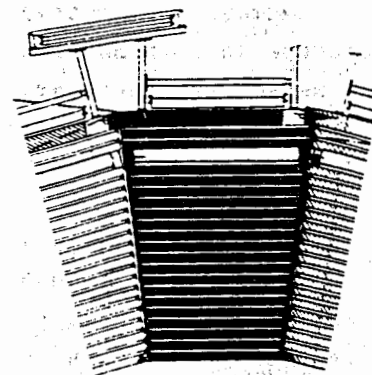


Рис.2. Поперечное сечение одного из модулей адронного калориметра DELPHI.

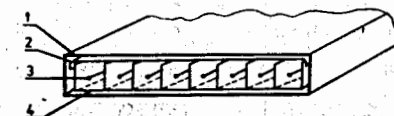


Рис.3. Сечение детектора -- пластиковой стримерной трубки: 1 - пенал, 2 - крышка (катод), 3 - анодные проволочки, 4 - профиль (катод).

Во второй главе детально описывается система автоматизированных испытаний, включающая в себя три стенда: стенд высоковольтных испытаний и "тренировки", стенд контроля работы детекторов под большой нагрузкой и стенд проверки величины натяжения проволочек в готовых детекторах. В результате испытаний более 25 000 детекторов длиной от 30 см до 4 м 8% было забраковано (около половины из этого числа связано с производственным браком, другая половина не прошла

критериев отбора, причем вероятность браковки коррелировала с длиной детектора, что указывает на то, что фактором, определяющим стабильность работы данного типа детекторов, является качество катода). На большой статистике проверенных детекторов было показано, что выбранная процедура "тренировки" существенно повышает надежность работы детекторов (область рабочих напряжений в среднем увеличивается на 300 В). Качество проведенных испытаний обеспечило надежную работу адронного калориметра DELPHI (надежность работы детекторов в адронном калориметре составляет более 99% по данным двухлетней эксплуатации калориметра).

В следующем параграфе второй главы приведена большая часть различных исследований, связанных с работой стримерных трубок DELPHI.

Важным результатом можно считать тесты, продемонстрировавшие эффективность механической полировки катода. Эта простая операция, имеющая целью ликвидировать микроскопические непрокрашенные островки на поверхности катода, увеличивает надежность работы этих детекторов в 5-10 раз.

В результате тестов с широким спектром вариаций процентного содержания компонент в газовой смеси было продемонстрировано, что максимально достижимый заряд стримера не зависит от выбора газовой смеси (рис. 4). Смесь, выбранная в результате оптимизации, в настоящее время используется в адронном калориметре DELPHI.

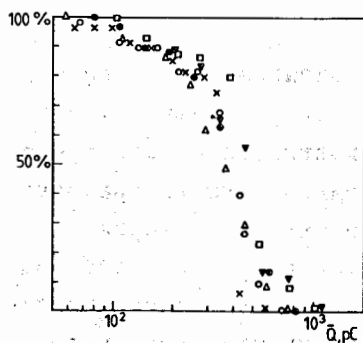


Рис. 4. Вероятность браковки детекторов в зависимости от заряда стримера (100% = 60 детекторов). Различные символы соответствуют различным пропорциям компонент в газовых смесях $Ar+CO_2+C_4H_{10}$ и $Ar+CO_2+C_5H_{12}$

Показано, что чувствительность заряда стримера к давлению существенна (рис. 5), что требует создания системы "медленного контроля" с целью коррекции отклика калориметра. Такая система в настоящее время создана и установлена.

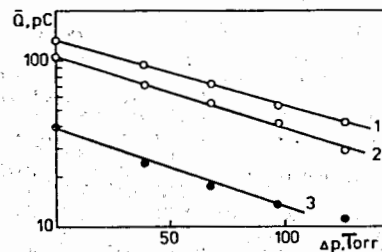


Рис. 5. Зависимость уменьшения заряда стримера с увеличением давления (1 - $U=4.5$ kV, 2 - $U=4.4$ kV, 3 - $U=4.1$ kV).

Также были проведены исследования влияния магнитного поля на заряд в лавине и стримере ($\sim 3\%/Tл$); чувствительности заряда стримера к точности приготовления газовой смеси ($\sim 10-20\%$ изменения заряда на один абсолютный процент изменения состава в смеси); старения детекторов под нагрузкой (максимально возможный накопленный заряд на проволоке составляет около 0.5 Кл/см, что при заряде стримера 100 пКл соответствует 5×10^9 частиц/см); чувствительности детектора к различным отклонениям в геометрии (систематические изменения в геометрии не должны превосходить $\sim 1\%$).

Третья глава второго раздела посвящена рабочим характеристикам адронного калориметра DELPHI.

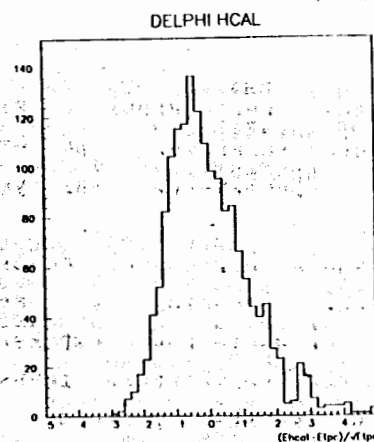


Рис. 6. Разрешение адронного калориметра DELPHI (E_{had} - отклик калориметра; E_{trc} - импульс частицы, измеренный трековой системой ТРС). Распределение соответствует энергетическому разрешению $\sim 100\%/E^{0.5}$.

После коррекции на зависимость отклика калориметра от угла входящего адрона, энергетическое разрешение калориметра DELPHI составило около $100\%/E^{0.5}$ (рис. 6). Замечательно, что этого разрешения вполне достаточно для самостоятельного калориметрического триггера на адронные распады Z^0 .

Адронный калориметр играет существенную роль в мюонном триггере и при режекции адронов (идентификации мюонов). Набор трех критериев (ограничение на максимальный заряд в каждой из 4 башен калориметра вдоль трека; ограничение на суммарный заряд со всех 4 башен; совместимость сигнала не менее чем в 3 башнях с гипотезой о прохождении минимальноионоизирующей частицы) позволяет режектировать адроны от мюонов в одном только адронном калориметре на уровне 7-1% в диапазоне энергий 10-40 ГэВ. Это улучшает режекцию, основанную только на мюонных камерах, более чем в 10 раз, доводя ее до малых долей процента (~0.2%). Эффективность регистрации (идентификации) мюона только с помощью адронного калориметра составляет около 80%.

В четвертой главе приведен пример первой физической задачи ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$), где эффективно применялся адронный калориметр. Адронный калориметр использовался в триггере при наборе статистики, был одним из трех детекторов, участвовавших в идентификации мюонов (мюонная система, адронный и электромагнитный калориметры).

РАЗДЕЛ 3.

Третий раздел посвящен анализу инклюзивных спектров адронов в сопоставлении с предсказаниями расчетов, выполненных в модифицированном приближении лидирующих логарфмов.

В первой главе третьего раздела приводятся основные положения, принятые при проведении расчетов в рамках обсуждаемой модели. Затем даются окончательные выражения, пригодные для сопоставления с экспериментальными данными. Расчеты проводятся для сравнительно мягких процессов, тем самым тестируя низкоэнергетические свойства КХД и физику конфайнмента и процессов адронизации. Эти расчеты дают

аналитические выражения для различных характеристик струй (множественности, инклюзивные распределения, корреляции и т.д.), которые в основном определяются относительно мягкими частицами.

При описании струи КХД имеет дело с партонами (глюоны и кварки), описывая их развитие вплоть до энергий Q_0 , после чего неизбежно приходится включать некоторое феноменологическое описание процесса адронизации (рис. 7). Один из принципиальных вопросов состоит в том, как велика величина Q_0 , или другими словами, какая из стадий доминирует в формировании структуры струй: стадия асимптотической свободы (пертурбативная КХД) или стадия, связанная с конфайнментом и не поддающаяся расчетам внутри пертурбативной КХД.

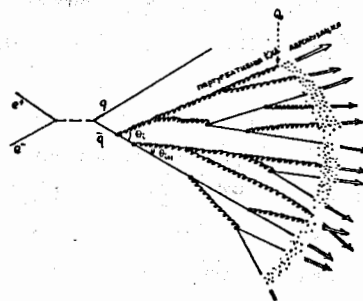


Рис. 7. Процесс партонообразования в струе с последующей адронизацией. Величина Q_0 является формальной границей между пертурбативной КХД и феноменологией адронизации.

Одним из впечатляющих предсказаний пертурбативной КХД в применении к мягким процессам является предсказание "горбатой" структуры партонного спектра $x \cdot d\sigma/dx$ в струе, что связано с деструктивной интерференцией мягких глюонов.

Выбор величины Q_0 , как упоминалось выше, дает формальную границу применимости КХД. Также по физическому смыслу Q_0 соответствует минимальной энергии партонов, т.е. имеет прямую аналогию с эффективной массой партона, или массой конечного адрона.

Надо заметить, что при конечных энергиях ($\ln(E/\Lambda^{-1})$) форма спектра легких частиц (пионов) может заметно отличаться от спектра для каонов или протонов в силу разницы величин $Q_0 \sim m_{hadron}$. Таким образом, вообще говоря, суммарный спектр

заряженных частиц будет видоизменен. Поэтому анализ спектра всех заряженных величин должен давать величину Λ_{eff} , близкую к Λ_{QCD} , но, вообще говоря, отличающуюся от нее.

При $E \rightarrow \infty$ форма спектра перестает зависеть от Q_0 и определяется единственной переменной $Y = \ln(E/\Lambda)$.

Одним из удивительных свойств конечных формул является факт, что формально при $Q_0 \rightarrow \Lambda$ ($\lambda = \ln(Q_0/\Lambda) \rightarrow 1$) выражение для спектра имеет конечный предел, который совпадает с предельной формой, упомянутой выше. С формальной точки зрения такая процедура невозможна на стадии промежуточных расчетов, где используется разложение по малой константе взаимодействия $\alpha_s \sim 1/\lambda \ll 1$. Такая инфракрасная стабильность говорит в пользу того, что процессы, происходящие на последних стадиях развития струи, не играют значительной роли в формировании ее основных характеристик; другими словами, все физические распределения реальных адронов должны близко соответствовать аналогичным распределениям партонов.

При $\lambda=0$ формулы сильно упрощаются и принимают вид, позволяющий сравнивать расчеты с экспериментальными данными. При этом аналитический вид содержит, по сути дела, один параметр Λ_{eff} , величина которого должна быть близка к Λ_{QCD} (параметр общей нормировки распределения отражает отношение количества адронов к количеству партонов, полученных в рамках КХД, т.е. является единственным проявлением предельноупрощенной феноменологии процесса адронизации).

Этот подход к описанию характеристик струй дает также предсказание двух-частичных корреляций по энергиям частиц, а также рост множественности частиц с энергией.

Во второй главе третьего раздела приводятся условия отбора адронных событий. Конечный анализ был проведен на статистике ~70000 событий. Наложение ограничений подавляло фон от взаимодействий на остаточном газе в трубе, а также фон от $\gamma\gamma$ -взаимодействий до уровня меньшего, чем 0,1%; наибольший вклад в фон связан с лептонной модой распада $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ и по оценкам из Монте Карло составляет ~0,24%.

Монте Карло моделирование выполнялось в три этапа. Прежде всего моделировались физические события с помощью

программы JETSET 6.3. Затем эти события пропускались через программу DELSIM, моделирующую отклик детекторов DELPHI. И, наконец, события восстанавливались с помощью пакета программ DELANA, используемого при анализе реальных данных. Коэффициенты коррекции возникали как отношение изначальных данных к данным, полученным после реконструкции.

Далее после модификации теоретических формул к виду, позволяющему провести фитирование, скорректированные данные DELPHI сопоставляются с теорией. После учета систематических ошибок, анализ инклюзивных спектров адронов дает:

$$\Lambda_{eff} = (210 \pm 20) \text{ MeV},$$
$$N(Y) = 1.22 \pm 0.03,$$

Небезынтересно сравнить полученные величины с результатами установок OPAL и L3:

$$\text{OPAL: } \Lambda_{eff} = (253 \pm 30) \text{ MeV}, N(Y) = 1.28 \pm 0.01$$

$$\text{L3: } \Lambda_{eff} = (220 \pm 20) \text{ MeV}, N(Y) = 1.20 \pm 0.04$$

Далее проводится анализ по некоторым приближенным формулам.

Как упоминалось выше, идентификация частиц позволила бы провести существенно более детальную проверку теории. Также это должно дать много дополнительной информации для понимания основных закономерностей адронизации. Следующий шаг анализа имел целью обосновать целесообразность такого рода исследований. Для этого была использована предельная "наивная" версия модели.

Для вычисления пионного спектра использовалась предельная форма, где считается $Q_0 = \Lambda$. Как уже упоминалось, в качестве простейшего приближения можно считать $Q_0 = M_{\text{pion}}$, т.е. насильственно считается $\Lambda = M_{\text{pion}} \sim 140$ МэВ (такой выбор, по крайней мере не является абсурдным, если считать что масса пиона полностью определяется динамикой КХД, где есть единственный массовый параметр Λ (массу u - и d -кварков можно считать нулевой)).

Форма спектра для каонов и протонов пересчитывалась из той же предельной формулы, путем подстановки вместо Q_0 величины M_{hadron} . При асимптотически больших энергиях величина относительных нормировочных констант для частиц с

разными массами (при этом предполагается, что динамика рождения всех адронов одинакова, и единственное отличие связано с разницей масс) также полностью определяется только массами. Для пиона $Q_0 = \Lambda$ и величина $K^\pi = 1.0$; для каонов и протонов соответствующие константы для $n_f = 3$ равны $K^K = 0.219$, $K^p = 0.136$.

Таким образом, была сделана попытка описания спектра заряженных частиц в виде суммы трех независимых спектров (пионы, каоны, протоны) с жестко заданными формами и относительными вкладами. Единственной (!) свободной переменной была общая нормировочная константа.

Фит данных DELPHI представлен на рис. 8.

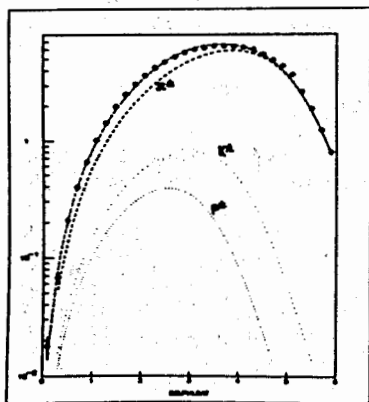


Рис. 8. Фит инклюзивного спектра адронов, полученного на установке DELPHI ($\sigma^{-1}d\sigma/d\xi$ vs ξ , где $\xi = \ln(1/x)$). Пунктирами показаны ожидаемые вклады π^\pm , K^\pm , p^\pm .

Результаты фитирования доступных данных суммированы в следующей таблице (для фитирования были взяты все точки):

Данные	Escm (GeV)	Const	$\chi^2/d.f.$
TASSO	14	1.167(14)	4.96
TASSO	22	1.076(14)	3.44
TASSO	35	1.054 (4)	16.74
TASSO	44	0.997 (6)	8.12
OPAL	91	0.958 (2)	8.81
DELPHI	91	0.972 (3)	7.81

Здесь уместно упомянуть, что анализ спектра π^0 , проведенный коллаборацией L3, а также анализ идентифицированных заряженных адронов при меньших энергиях (TASSO, TRC) дает величины, совместимые с этим "наивным" вариантом модели ($\Lambda_{eff} = Q_0 \cdot M_{hadron}$), а именно: формы спектров и относительные выходы частиц взаимосогласованы с моделью.

Совместный фит данных по множественности частиц от 10 до 90 ГэВ приводит к:

$$\Lambda_{eff} = (138 \pm 62) \text{ MeV},$$

$$\chi^2/d.f. = 2.3/11;$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В заключении кратко сформулированы результаты, положенные в основу диссертации.

ПУБЛИКАЦИИ, ПОЛОЖЕННЫЕ В ОСНОВУ ДИСЕРТАЦИИ:

- G.D.Alekseev, S.Czellar, B.A.Khomenko, A.V.Korytov, P.A.Kulinich, G.V.Mitselmakher, Yu.V.Sedykh, R.Toledo "High Voltage Tests and Training of Plastic Streamer Tubes for the DELPHI Hadron Calorimeter" JINR Preprint E13-87-399, 1987
- G.D.Alekseev, A.V.Korytov, "Magnetic Field Influence on the Selfquenching Streamer Discharge" NIM A268 (1988) 151
- G.D.Alekseev, A.Baronchelli, C.Bosio, S.Colilli, S.Czellar, A.V.Korytov, G.V.Mitselmakher, D.Sacco, E.Spiriti, L.Tortora, V.I.Travkin "Investigations of the Operational Stability of Plastic Streamer Tubes After Polishing of Their Graphite Cathode" NIM A269 (1988) 652

4. G.D.Alekseev, Yu.E.Bonushkin, A.V.Korytov
 "Operation of DELPHI Plastic Streamer Tubes with Gas Mixture Ar:CO₂:C₄H₁₀"
 JINR Preprint E1-89-236, 1989
5. G.D.Alekseev, M.S.Bilenky, Yu.E.Bonushkin, A.V.Korytov,
 "Studies of the Stability and Systematics of Operation of the DELPHI Plastic Streamer Tubes"
 NIM A292 (1990) 551
6. P.Aarnio ... A.Korytov... (DELPHI Collaboration),
 "The DELPHI Detector"
 NIM A303 (1991) 233
7. G.D.Alekseev, Yu.Ye.Bonyushkin, S.Czellar, B.Fialovszki,
 B.A.Khomenko, N.N.Khovansky, A.V.Korytov, P.A.Kulinich,
 M.Lokajicek, G.V.Mitselmakher, J.Patochka, V.D.Ryabtsov,
 J.Ridky, Yu.V.Sedykh, V.V.Tokmenin, R.Toledo, E.Torjan
 "The Results of Mass Testing of Plastic Streamer Tubes for the DELPHI Hadron Calorimeter"
 NIM A305 (1991) 344
8. A.Korytov, G.Mitselmakher, I.Patashnikova, N.Skachkov,
 O.Smirnova, Tz.Spasofof, L.Tkatchev, L.Vertogradov
 "Tests of QCD Predictions in Inclusive Hadron Production Processes in e⁺e⁻-Annihilation"
 DELPHI 91-16 PHYS87 (1991)

Рукопись поступила в издательский отдел

21 ноября 1991 года.