

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-6

P1-99-6

П.З.Христов, Т.В.Христова

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
С ПОМОЩЬЮ ЧЕРЕНКОВСКИХ ДЕТЕКТОРОВ
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ЭКСЧАРМ

1999

Эффективность распознавания заряженных частиц
с помощью черенковских детекторов в эксперименте ЭКСЧАРМ

Предложен метод оценки эффективности выделения заряженных частиц с помощью черенковских детекторов в эксперименте ЭКСЧАРМ, основанный на анализе реперных сигналов в спектрах инвариантных масс. Определены соответствующие эффективности и приведены примеры, характеризующие надежность идентификации исследуемых состояний.

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 98-07-90294.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Перевод авторов

Khristov P.Z., Khristova T.V.

P1-99-6

Efficiency of Charged Particle Identification
with Cherenkov Detectors in the EXCHARM Experiment

A method for evaluation of the efficiency of charged particle identification with Cherenkov detectors in the EXCHARM experiment, based on analysis of signals in the mass spectra, is proposed. The correspondent efficiencies are obtained and the reliability of the identification is illustrated.

The investigation has been performed at the Laboratory of Particle Physics, JINR and supported by the Russian Foundation for Basic Research, project 98-07-90294.

1 . Введение

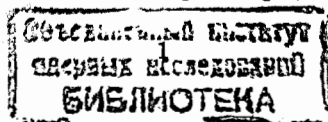
В экспериментах по физике высоких энергий для идентификации типа заряженных частиц широко применяются многоканальные пороговые газовые черенковские счетчики (МПГЧС). Наиболее распространенные алгоритмы анализа, как правило, используют информацию об импульсе частицы, ее траектории и сработавших каналах МПГЧС, что позволяет оценить вероятность принадлежности каждой зарегистрированной заряженной частицы к тому или иному типу.

Процедура выделения частиц нужного типа имеет статистический характер и обычно сопровождается потерей некоторого количества событий исследуемой конфигурации. Правильная оценка таких потерь имеет важное значение при анализе экспериментальных данных. В дальнейшем под эффективностью идентификации будет пониматься отношение количества частиц выделяемого типа, удовлетворяющих критериям идентификации, к их общему числу (без привлечения процедуры идентификации).

В данной работе предложена методика и проведены расчеты эффективности черенковской идентификации заряженных адронов в эксперименте ЭКСЧАРМ [1], основанные на анализе реперных сигналов в спектрах эффективных масс.

2 . Система идентификации заряженных частиц в эксперименте ЭКСЧАРМ

В состав аппаратуры системы идентификации заряженных частиц, кроме магнитного спектрометра, входят два многока-



нальных пороговых газовых черенковских счетчика МПГЧС-14 и МПГЧС-32 [2, 3]. 14-канальный МПГЧС-14, заполненный фреоном-12, и 32-канальный МПГЧС-32, заполненный воздухом, работающие при атмосферном давлении.

Расчетные пороги регистрации разных частиц для МПГЧС-14 и МПГЧС-32 представлены в таблице.

Счетчик	Газ	Пороги регистрации, ГэВ/с		
		π	K	p
МПГЧС-14	Фреон-12	3,1	10,8	20,5
МПГЧС-32	Воздух	6,0	21,2	40,3

В идеальном случае такой набор счетчиков позволяет:

- в импульсном интервале $3,1 \leq p \leq 10,8$ ГэВ отделять π^\pm от $K^\pm, p(\bar{p})$;
- в импульсном интервале $10,8 \leq p \leq 21,2$ ГэВ полностью разделять π^\pm, K^\pm и $p(\bar{p})$;
- в импульсном интервале $21,2 \leq p \leq 40,3$ ГэВ отделять π^\pm, K^\pm от $p(\bar{p})$.

Для определения геометрических характеристик передаточных функций применяемых позиционно-чувствительных детекторов, распознавания треков, определения геометрических параметров траекторий, зарядов и импульсов частиц использовались программы многофункционального комплекса BISON [4]. Для создания банка результатов математической обработки экспериментальных данных [5] использовалась система РИСК-96 на базе локального кластера компьютеров типа PENTIUM.

Идентификация заряженных частиц осуществлялась в программе статистического анализа BISMXS [6]. Для каждой из частиц рассматривались три гипотезы о ее типе ($\pi^\pm, K^\pm, p(\bar{p})$). Процедура разделения имела итерационный характер и включала в себя следующие шаги:

- инициализация;
 - присвоение частицам априорных вероятностей быть $\pi^\pm, K^\pm, p(\bar{p})$ с учетом их импульсов и зарядов;
- итерация;
 - для каждой частицы:
 - * расчет ожидаемого распределения черенковского света для каждой гипотезы об ее типе и определение списка каналов, в которые мог попасть свет;
 - * расчет ожидаемого распределения черенковского света от ассоциативных частиц при наиболее вероятной гипотезе об их типе;
 - * определение ожидаемого числа фотоэлектронов в каждом канале МПГЧС;
 - * переопределение вероятности каждой из трех гипотез с учетом реально сработавших каналов МПГЧС;
 - проверка условий окончания вычислений;
- запись результатов.

Процесс останавливается при достижении стационарных вероятностей для каждой гипотезы каждой частицы. Подробное описание процедуры вычисления приведено в приложении к работе [2]. Отметим, что вероятности (W_π, W_K, W_p) для данной частицы быть π^\pm, K^\pm или $p(\bar{p})$ называются "черенковскими весами" и нормированы следующим образом: $\sum_{i=\pi, K, p} W_i = 3$.

Описанная выше процедура определения черенковских весов лежит в основе расчета эффективности идентификации заряженных частиц по методу Монте-Карло, проведенного в работе [7]. Применяемый при этом алгоритм можно условно разделить на две части: определение срабатываний каналов МПГЧС от сгенерированных заряженных частиц и расчет черенковских весов в программе анализа по вышеописанной схеме. Для каждой частицы с учетом ее типа (однозначно определенного в рамках

моделирующей программы) рассчитывается распределение черенковского света и определяются каналы МПГЧС, в которые попадают фотоны. Затем разыгрывается число фотоэлектронов, родившихся в каждом канале МПГЧС. Срабатывание каналов МПГЧС определяется с учетом эффективности фотоэлектронных умножителей, их порогов регистрации и вероятности запуска от фоновых частиц. Преимущество этого метода в том, что каждое событие рассматривается индивидуально и учитываются все факторы, влияющие на эффективность черенковской идентификации. Однако метод сильно зависит от правильности выбранной модели генерации событий, в частности от кинематических характеристик частиц сопровождения. Это затрудняет его применение в случае редких процессов, так как подбор параметров модели становится нетривиальной задачей. Наличие второго независимого метода оценки эффективности идентификации позволяет судить о величине систематических ошибок.

3. Эффективность идентификации

При оценке эффективности идентификации по экспериментальным данным необходим независимый и надежный способ определения типа частиц. Один из возможных вариантов - когда идентифицируемые заряженные частицы являются продуктами распада хорошо выделяемых в спектре инвариантных масс сигналов от долгоживущих частиц или резонансов.

Выбранные для исследования состояния удовлетворяют следующим требованиям:

- имеют достаточно большие сечения рождения;
- их собственные ширины позволяют выделить сигналы в спектрах инвариантных масс;
- имеют высокие парциальные вероятности требуемых распадов;

- распознаются без привлечения процедуры черенковской идентификации;
- импульсы продуктов распада перекрывают пороги регистрации МПГЧС.

Это позволяет достаточно точно определить число распавшихся частиц при аппроксимации спектра инвариантных масс продуктов распада.

Для оценки эффективности идентификации частиц различного типа (π^\pm , K^\pm или p/\bar{p}) рассматривались следующие распады, удовлетворяющие вышеперечисленным требованиям:

- $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ - для π^+ и π^- ;
- $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$ - для p и π^- ;
- $\bar{\Lambda}^0 \rightarrow \bar{p}\pi^+$ - для \bar{p} и π^+ ;
- $\phi \rightarrow K^+K^-$ - для K^+ и K^- ;
- $K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ - для K^+ и π^- ;
- $\bar{K}^{*0} \rightarrow K^-\pi^+$ - для K^- и π^+ .

Для выделения распадов K_S , Λ^0 и $\bar{\Lambda}^0$ достаточно использовать геометрические критерии (на расстояние между разноименно заряженными треками и положение их общей вершины). При получении сигналов ϕ , K^{*0} и \bar{K}^{*0} дополнительно требовалось присутствие ассоциативных частиц (K_S для ϕ и \bar{K}^{*0} , K_S или Λ^0 для K^{*0}) в событии. Допускалось также использование черенковских весов (на уровне $W \geq 0,4$) для второй распадной частицы, эффективность идентификации которой в данный момент не исследуем.

В случае слабых распадов (K_S , Λ^0 , $\bar{\Lambda}^0$) из-за пренебрежимо малой собственной ширины сигналы описывались функцией Гаусса, а фон - гладкой функцией (полиномом второй степени). Сигналы от распадов резонансов (ϕ , K^{*0} и \bar{K}^{*0}) аппроксимировались релятивистским распределением Брейта-Вигнера, ширина

которого не зависит от импульса и модифицируется только за счет разрешения. Фон под резонансами – полиномом третьей степени, умноженный на экспоненту. Оценка параметров осуществлялась в пакете PAW [8]. При этом использовались ограничения на возможные интервалы изменения положения сигнала и его ширины. При минимизации функции правдоподобия применялась процедура MIGRAD, а анализ ошибок параметров выполнен процедурами HESSE и MINOS [8]. Число зарегистрированных распадов и его статистическая погрешность вычислялись на основе полученных параметров сигналов и их ошибок.

Обычно данной частице при анализе присваивается тип i , если ее черенковский вес (W_i) не меньше некоторого значения W_i^{min} . При увеличении W_i^{min} возрастает вероятность того, что она действительно i -го типа. Однако условие ($W_i \geq W_i^{min}$) может нарушаться: когда частица пролетает мимо системы МПГЧС, если импульс недостаточен для возникновения свечения или свет от разных частиц события попадает в один и тот же канал счетчика, и, разумеется, при фоновых срабатываниях.

Зависимость числа регистрируемых распадов от черенковского веса одной из вторичных частиц отражает эффективность идентификации. Более точный учет особенностей МПГЧС требует рассмотрения в импульсных интервалах, определенных порогами свечения частицы i -го типа в среде МПГЧС:

- $p < 3,1$ ГэВ/с;
- $3,1 \leq p < 6,0$ ГэВ/с;
- $6,0 \leq p < 10,8$ ГэВ/с;
- $10,8 \leq p < 21,2$ ГэВ/с;
- $21,2 \leq p < 40,3$ ГэВ/с;
- $40,3 \leq p$ ГэВ/с.

Для каждого интервала построена гистограмма числа зарегистрированных распадов в зависимости от черенковского веса

выбранной вторичной частицы. В большинстве случаев результат соответствует монотонно невозрастающей функции. Тогда оценка эффективности идентификации при заданном ограничении на черенковский вес получается как отношение числа входов в каждом канале гистограммы на число входов в первом канале (где идентификация отсутствует).

В некоторых импульсных интервалах флуктуации фона приводят к нарушению монотонности исследуемой зависимости, сначала идет рост числа зарегистрированных распадов, затем – выход на плато и спад. В таких случаях возможно вычислить усредненное значение числа частиц в окрестности плато и его ошибку, а затем распространить их на область малых значений черенковских весов. Более универсальный метод учета априорной информации об исследуемой зависимости состоит в следующем: содержимое в каждом канале гистограммы модифицируется так, чтобы выполнялось условие монотонности, при этом минимизируется взвешенная сумма квадратов отклонений исходных и новых значений. В математической классификации проблема относится к задачам квадратического программирования с линейными ограничениями:

$$\begin{aligned} z_i &= ?, \quad i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - z_i)^2}{\sigma_i^2} &\rightarrow \min, \\ z_i &\geq z_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n - 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где z_i – искомое новое значение, y_i , σ_i – исходное содержимое i -ого канала гистограммы и его ошибка, n – число интервалов группировки.

Поставленная задача решается численно с помощью подпрограммы E04NCF пакета NAG [9]. Результат зависит нелинейно от исходных данных, поэтому ошибки посчитаны косвенным путем: содержимое каждого канала исходной гистограммы разыгрывалось несколько раз согласно распределению Гаусса (i -й

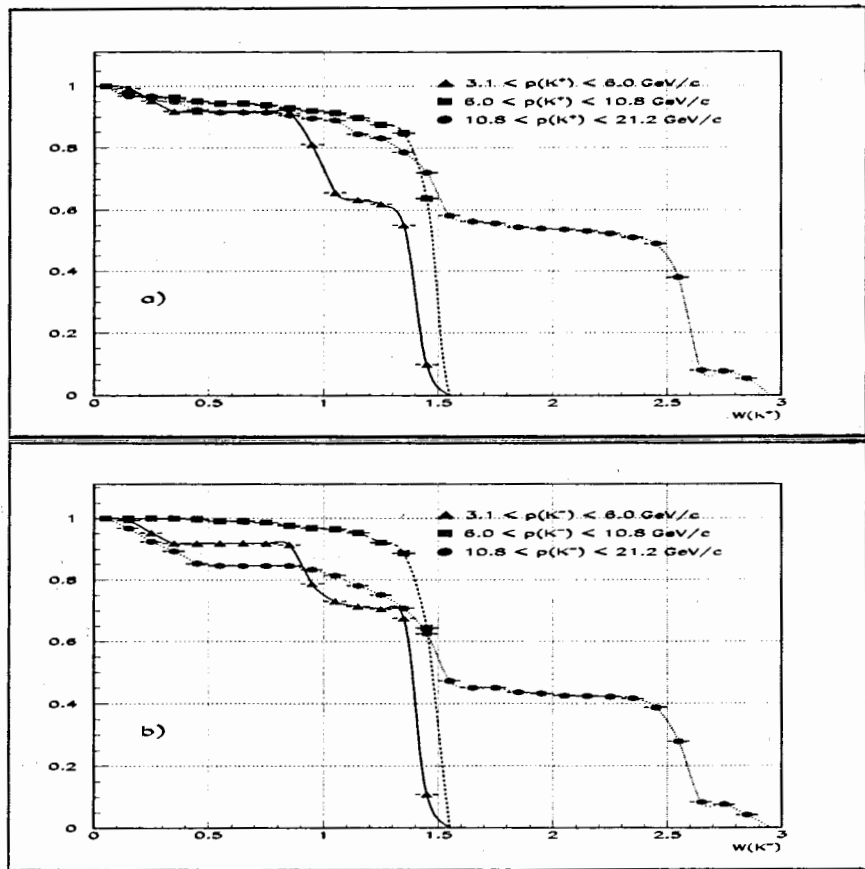


Рис. 1. Эффективность черенковской идентификации K^+ (a) и K^- (b), полученная на основе распадов ϕ , $K^{*0}(892)$ и $\bar{K}^{*0}(892)$ в разных импульсных интервалах. Полная ошибка в каждом интервале гистограмм не превышает 5%

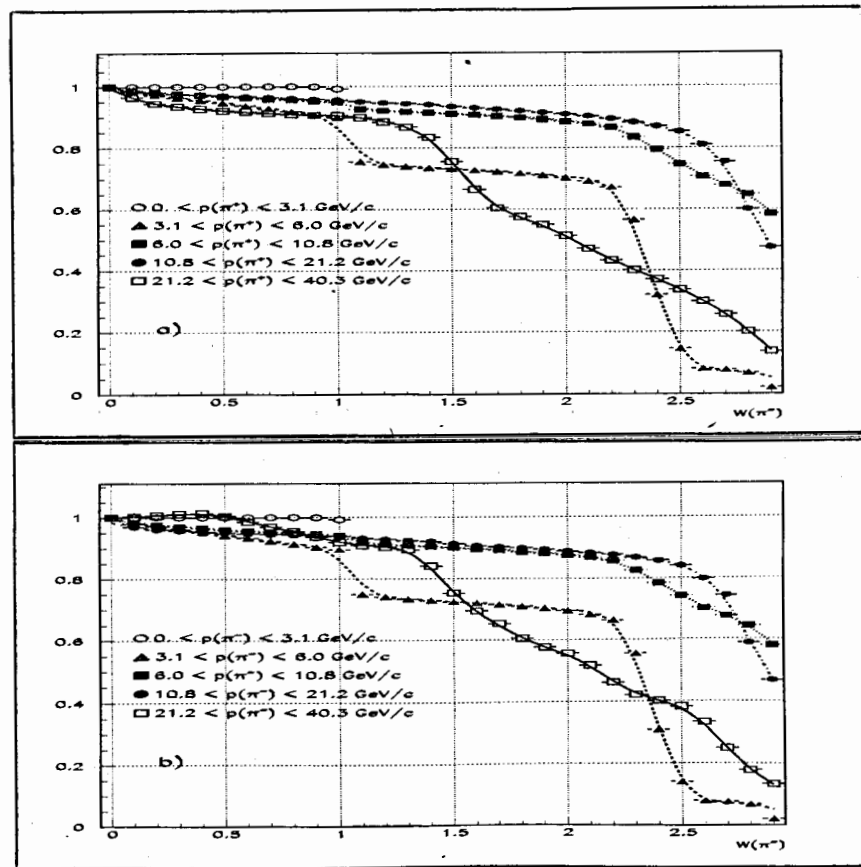


Рис. 2. Эффективность черенковской идентификации π^+ (a) и π^- (b) от распадов K_S в разных импульсных интервалах. Полная ошибка в каждом интервале гистограмм не превышает 5%

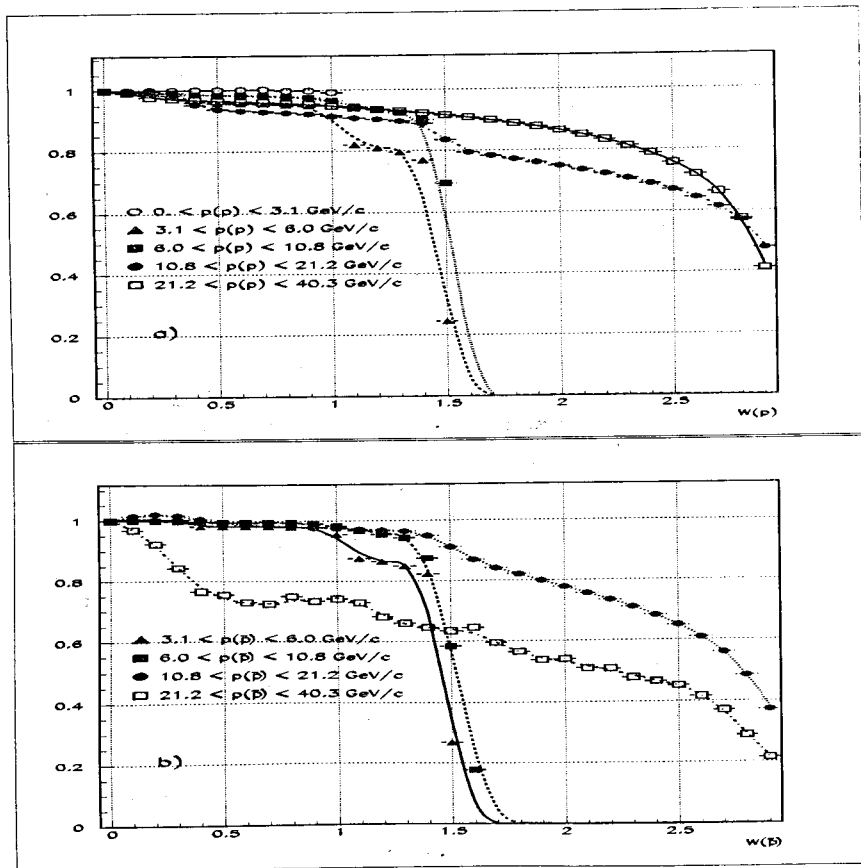


Рис. 3. Эффективность черенковской идентификации p (a) и \bar{p} (b) от распадов Λ и $\bar{\Lambda}$ в разных импульсных интервалах. Полная ошибка в каждом интервале гистограмм не превышает 5%.

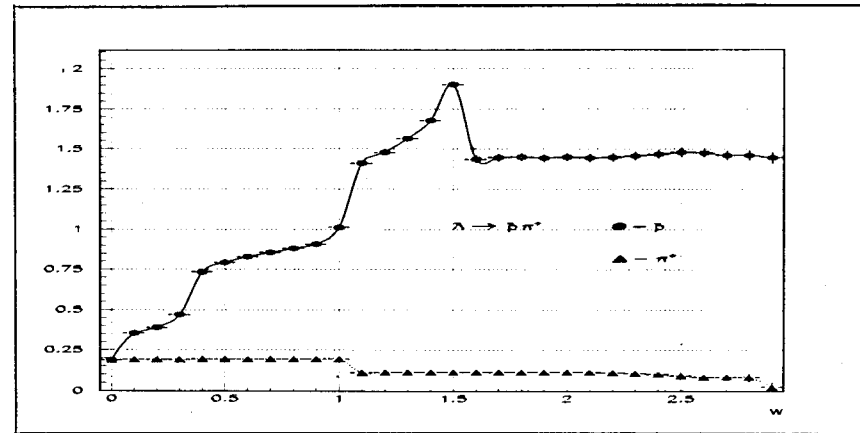


Рис. 4. Отношение сигнал/фон при черенковской идентификации \bar{p} и π^+ от распадов $\bar{\Lambda}$

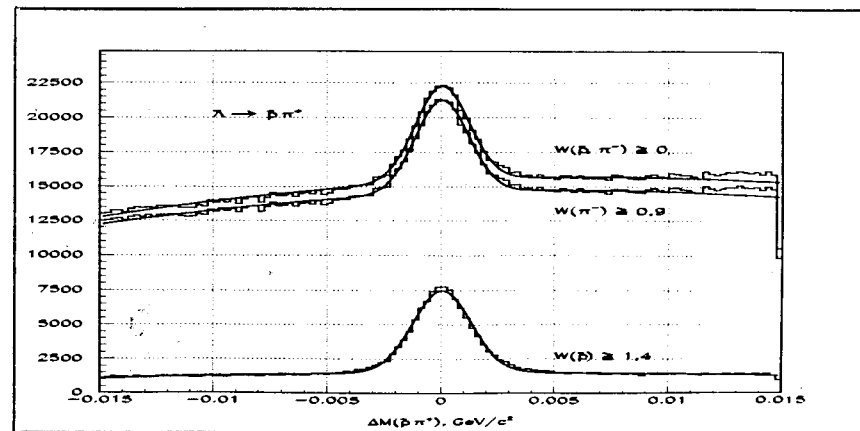


Рис. 5. Пример сигнала от распадов $\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p}\pi^+$ при оптимальных значениях черенковских весов

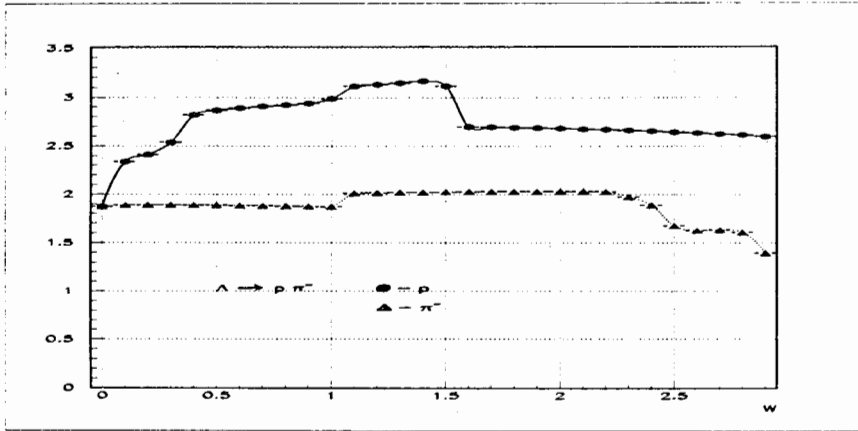


Рис. 6. Отношение сигнал/фон при черенковской идентификации p и π^- от распадов Λ

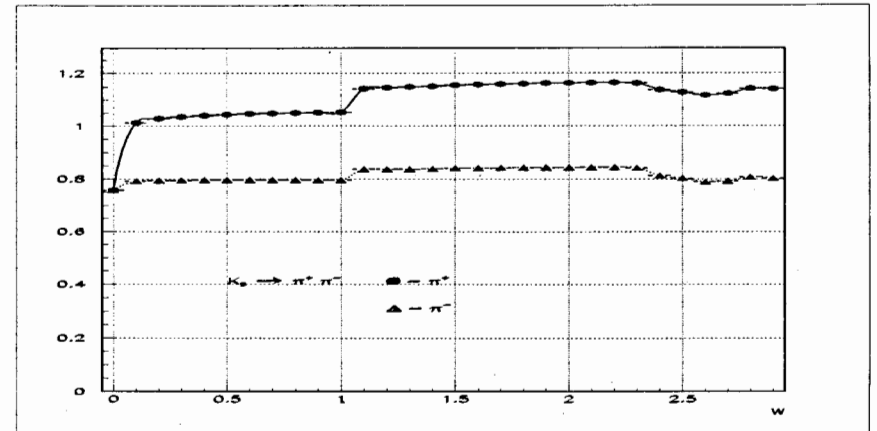


Рис. 8. Отношение сигнал/фон при черенковской идентификации π^+ и π^- от K_S

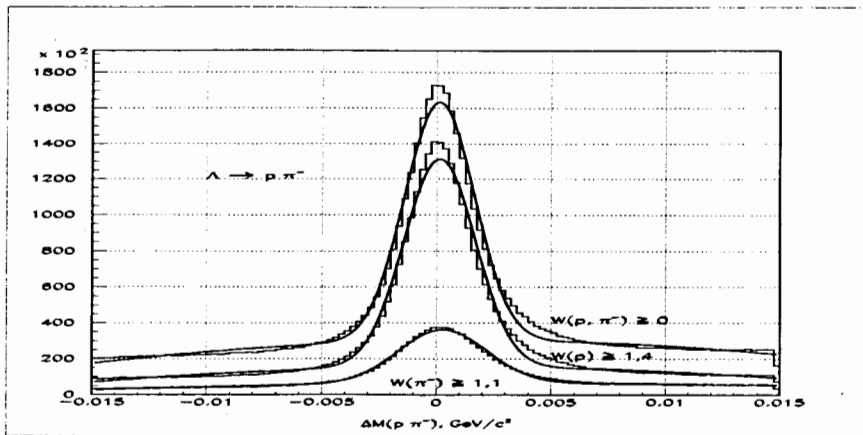


Рис. 7. Пример сигнала от распадов $\Lambda \rightarrow p\pi^-$ при оптимальных значениях черенковских весов

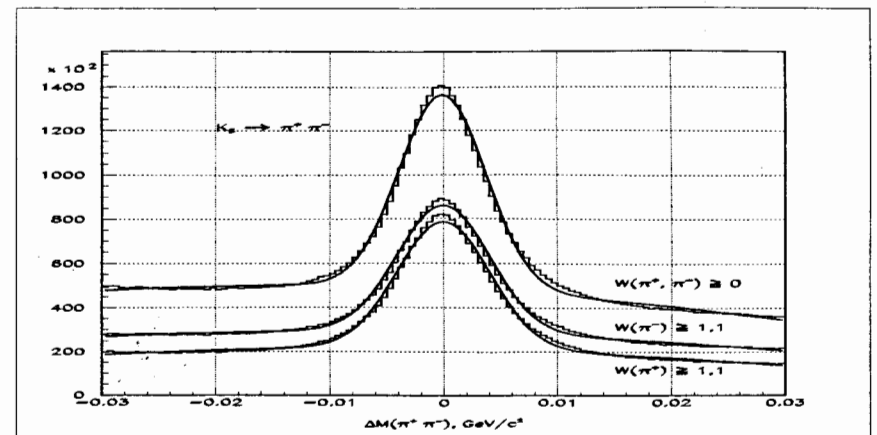


Рис. 9. Пример сигнала от распадов $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ при оптимальных значениях черенковских весов

канал со средним y_i и дисперсией σ_i), с полученными данными находился минимум с ограничениями (1). На основе набора решений вычислена дисперсия в каждом канале.

Результаты показаны на рис.1, 2 и 3. Кривые получены при сплайн-интерполяции и служат лишь для иллюстрации. Интервалы, для которых рассматриваемый сигнал отсутствует, не приводятся на рисунках. Для K^+ и K^- (рис.1) показана усредненная эффективность, которая получена на основе распадов ϕ , K^{*0} и \bar{K}^{*0} , и ее полная ошибка.

Систематическая ошибка, возникающая из-за интегрирования по угловым распределениям и множественности вторичных частиц, является основным фактором, ограничивающим точность метода. Использование разных источников (K_S , Λ^0 , $\bar{\Lambda}^0$, K^{*0} и \bar{K}^{*0}) для π^+ и π^- позволяет определить точность метода, при этом величина полной ошибки не превышает 5%.

Для демонстрации возможностей используемой в эксперименте ЭКСЧАРМ системы МПГЧС на рис.4, 6 и 8 приведены отношения сигнал/фон, которые вычислены на основе распадов $\bar{\Lambda}^0$, Λ^0 и K_S . Область сигнала рассматривалась в пределах трех стандартных отклонений по разрешению от центрального значения. Оценка фона в этом интервале получена при интегрировании фоновой функции. Видно, что для каждого сигнала необходимо выбирать компромиссное значение черенковских весов вторичных частиц, оптимизирующее соотношение сигнал/фон при минимальной потере сигнала. В качестве иллюстрации на рис.5, 7 и 9 показаны исходные сигналы от распадов $\bar{\Lambda}^0$, Λ^0 и K_S и их вид после черенковской идентификации одного из продуктов распада. В некоторых случаях, например при идентификации антипротонов от $\bar{\Lambda}^0$, возможно существенное подавление фона при минимальной потере сигнала.

4. Заключение

В работе определена эффективность черенковской идентифи-

кации заряженных адронов в эксперименте ЭКСЧАРМ на базе изучения реперных сигналов в спектрах эффективных масс. Систематическая погрешность, возникающая из-за усреднения по угловым распределениям и множественности вторичных частиц, является основным фактором, ограничивающим точность метода. Полная ошибка при этом не превышает 5%.

Определено также отношение сигнал/фон, характеризующее возможности системы МПГЧС установки ЭКСЧАРМ. Правильное использование ограничений на черенковские веса обеспечивает существенное подавление фона при выделении событий требуемых конфигураций.

Авторы благодарны участникам сотрудничества ЭКСЧАРМ за поддержку и плодотворные обсуждения.

Литература

- [1] Алеев А.Н и др. ОИЯИ, P13-98-286, Дубна, 1998.
- [2] Гуськов Б.Н. и др. ОИЯИ, P1-86-248, Дубна, 1986.
- [3] Алеев А.Н. и др. ОИЯИ, P13-94-520, Дубна, 1994.
- [4] Иванченко З.М. и др. Методика преобразования координат локальных детекторов в единую систему. ОИЯИ, D5,11-97-112, Дубна, 1997, с. 332.
Иванченко И.М. и др. Математическое обеспечение для распознавания траекторий, регистрируемых спектрометром БИС-2. ОИЯИ, P10-89-436, Дубна, 1989.
Бонюшкина А.Ю. и др. Алгоритмы определения эффективной массы K_0 и L_0 , регистрируемых спектрометром ЭКСЧАРМ. ОИЯИ, P1-93-168, Дубна, 1993.
- [5] Иванченко И.М. http://dct119.jinr.ru/dst97_s10.htm.
- [6] Зинченко А.И. и др. ИФВЭ АН РК, 92-01, Алма-Ата, 1992.
- [7] Камбурян А.Ф. и др. ОИЯИ, P13-93-362, Дубна, 1993.

[8] PAW, Physics Analysis Workstation, CERN Q121, 1995.

[9] Fortran Library Mark 18 <http://www.nag.co.uk/>.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 января 1999 года.