



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009–9
ЛДС

Сотрудничество СВД-2

Е.Н. Ардашев, А.Г. Афонин, М.Ю. Боголюбский, А.П. Воробьев, С.Н. Головня,
С.А. Горохов, В.Ф. Головкин, В.Н. Запольский, А.А. Киряков, В.В. Константинов,
Л.Л. Курчанинов, Г.Я. Митрофанов, В.С. Петров, А.В. Плескач, В.М. Роньжин,
В.Н. Рядовиков, В.А. Сенько, Н.А. Шаланда, М.М. Солдатов, А.Г. Холоденко,
Ю.П. Цюпа, В.И. Якимчук

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино

С.Г. Басиладзе, С.Ф. Бережнев, Г.А. Богданова, А.М. Вишневская, В.Ю. Волков,
А.Г. Воронин, Г.Г. Ермаков, П.Ф. Ермолов, Н.И. Гришин, Я.В. Гришкевич,
Е.Г. Зверев, С.А. Зоткин, Д.С. Зоткин, Д.Е. Карманов, В.Н. Крамаренко,
А.В. Кубаровский, А.К. Лефлат, С.И. Лютов, М.М. Меркин, В.В. Попов,
Д.В. Саврина, Л.А. Тихонова

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

А.Н. Алеев, В.П. Баландин, В.И. Киреев, Н.А. Кузьмин, Г.И. Ланшиков,
Ю.П. Петухов, Т.П. Топурия, Н.Ф. Фурманец, А.И. Юкаев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

**РЕГИСТРАЦИЯ РОЖДЕНИЯ И РАСПАДОВ
НЕЙТРАЛЬНЫХ ОЧАРОВАННЫХ МЕЗОНОВ
В pA-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 70 ГэВ
НА УСТАНОВКЕ СВД-2**

Направлено в ЯФ

Протвино 2009

Аннотация

Ардашев Е.Н. и др. Регистрация рождения и распадов нейтральных очарованных мезонов в pA-взаимодействиях при 70 ГэВ на установке СВД-2: Препринт ИФВЭ 2009-9. – Протвино, 2009. – 15 с., 14 рис., 3 табл., библиогр.: 17.

Приведены результаты обработки данных эксперимента SERP-E-184 «Изучение механизмов образования очарованных частиц в pA-взаимодействиях при 70 ГэВ и их распадов» [1], полученные при облучении активной мишени установки СВД-2, состоящей из пластинок углерода, кремния и свинца, пучком протонов 70 ГэВ. Выделен сигнал от двухчастичного распада нейтральных очарованных мезонов D^0 и $\bar{D}^0$. Отношение сигнал/шум равно $(51 \pm 17)/(38 \pm 13)$. После детального моделирования процессов по программам FRITIOF и GEANT определены эффективности регистрации мезонов и дана оценка сечения рождения чарма при этой энергии $\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \pm 2.4(\text{стат.}) \pm 1.4(\text{сист.})$ (мкб/нуклон).

Abstract

Ardashev E.N. et al. Registration of Neutral Charmed Mesons Production and Their Decays in pA-Interactions at 70 GeV with SVD-2 Setup: IHEP Preprint 2009-9. – Protvino, 2009. – p. 15, figs. 14, tables 3, refs.: 17.

The results of data handling for E-184 experiment are presented received with 70 GeV proton beam irradiation of active target with carbon, silicon and lead plates. Two-prongs neutral charmed D^0 and $\bar{D}^0$ -mesons decays signal are obtained. Signal/background ratio is $(51 \pm 17)/(38 \pm 13)$. Efficiency of registration for mesons are defined and evaluation for charm production cross section at near threshold energy are presented: $\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \pm 2.4(\text{stat.}) \pm 1.4(\text{syst.})$ (mkb/nucleon).

Введение

Подробное описание установки СВД-2 можно найти в [2]. К настоящему времени имеется около десяти экспериментов по исследованию рождения открытого чарма в протон-ядерных взаимодействиях. Однако количество событий с рождением открытого чарма в рА-взаимодействиях, полученных в экспериментах за последние 20 лет, значительно уступает статистике экспериментов с пучками электронов, в которых изучены основные свойства очарованных частиц (масса, брэнчинги распада и т.п.). Между тем, данные протон-ядерных экспериментов важны для изучения динамики образования очарованных кварков в столкновениях нуклонов и механизмов их адронизации, проверки существующих теоретических моделей. В табл. 1 [4] перечислены основные протон-ядерные эксперименты по рождению чарма и их результаты. Эти эксперименты перекрывают область энергий протона от 250 до 920 ГэВ. Мы отобрали эксперименты, в которых измерения проводились в передней полусфере в с.ц.м. ($X_F > -0.1$), что соответствует возможностям эксперимента E-184. Зависимость сечения в них от атомного веса ядер мишени линейна, т.е. $\sigma_{pA} = \sigma_{pN} \times A$. В табл. 1 обозначения (D^0) и (D^+) используются для суммы частица + античастица.

Таблица 1. Экспериментальные данные для сечения рождения D -мезонов в рА-взаимодействиях.

Эксперимент	Мишень	Пучок (ГэВ)	$\sqrt{s}$	$N(D^0)$ (соб.)	$\sigma(D^0)$ (мкб/нуклон)	$N(D^+)$ (соб.)	$\sigma(D^+)$ (мкб/нуклон)
E769	Be, Al, Cu, W	250	22.4	136	12.0 ± 3.8	159	6.6 ± 1.4
NA16	H ₂	360	26.8	5	$20.4 \pm 16.$	10	10.6 ± 4.8
NA27	H ₂	400	28.3	98	18.3 ± 2.5	119	11.9 ± 1.5
E743	H ₂	800	40.0	10	$22. \pm 14.$	46	$26. \pm 10.$
E653	Эмульсия	800	40.0	108	$39. \pm 15.$	18	$31. \pm 22.$
HERA-B	C, Ti, W	920	43.0	175	48.7 ± 10.6	130	20.2 ± 4.9

На рис. 1 представлена зависимость сечения рождения D^0 -мезонов в мкб/нуклон от энергии в с.ц.м. Кривая на рис. 1 получена параметризацией данных в виде степенной функции $\sigma(\sqrt{s}) = P I * (\sqrt{s})^{P2}$.

Если экстраполировать кривую в область $\sqrt{s}=11.8$ ГэВ (энергия в с.ц.м. эксперимента E-184), то получаем

$$\sigma(D^0 + \bar{D}^0) = 4.3 \pm 2.3 \text{ (мкб/нуклон)}.$$

Взяв из экспериментальных данных работы [4] значение выхода частиц

$$(D^0 + \bar{D}^0) = 48.7/49.6/2. = 0.49,$$

получаем оценку для ожидаемого сечения рождения $c\bar{c}$ -пар при нашей энергии:

$$\sigma(c\bar{c}, \sqrt{s}=11.8) \approx 4.5 \pm 2.5 \text{ мкб/нуклон.}$$

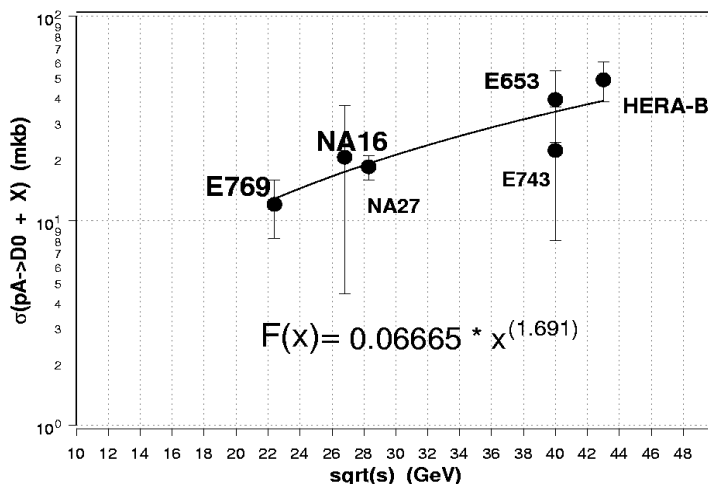


Рис. 1. Экспериментальные данные для сечения рождения D^0 -мезонов в рА-взаимодействиях.

Зная сечение неупругого рр-взаимодействия ($\sigma_{in}(pp)=31.44 \text{ мб}$ при $70 \text{ ГэВ}/c$ [6]) и исходя из экспериментального факта, что сечение рождения $c\bar{c}$ -пар в нуклон-ядерных взаимодействиях линейно зависит от атомного веса ядер мишени, тогда как «обычное» неупругое сечение пропорционально $A^{0.7}$, можно оценить количество всех событий с рождением чарма, ожидаемых в эксперименте E-184 для статистики 52 млн. событий с неупругим рА-взаимодействием. В табл. 2 приведено экспериментальное количество событий в разных веществах мишени и число ожидаемых событий с рождением чарма, вычисленное по формуле

$$N(c\bar{c}) = N_0 (\sigma(c\bar{c}) * A^1) / (\sigma_{in}(pp) * A^{0.7}),$$

где N_0 – число событий в мишени с атомным весом A , $\sigma(c\bar{c})$ принимаем за 1 мкб.

Таблица 2. Число ожидаемых событий с чармом при $\sigma(c\bar{c})=1 \text{ мкб}$.

Материал	Толщина (мкм)	Число вз. (%)	A	$A^{0.7}$	N_0 (млн. соб.)	$N(c\bar{c})$ (соб.)
C	540	21	12	5.7	10.92	732
Si	300x5=1500	55	28	10.3	28.60	2472
Pb	270	24	207	41.8	12.48	1966
ИТОГО:		100			52.00	5170

Зная выходы частиц из моделирования и бренчинги, можно оценить количество событий с определенными модами распада очарованных частиц. В табл. 3 приведены ожидаемые числа событий для случая $\sigma(c\bar{c})=1.0 \text{ мкб/нуклон}$.

Таблица 3. Число ожидаемых событий с распадами D^0 -мезонов.

Распад	Брен- чинг [7]	Углерод		Кремний		Свинец		Общее число соб.
		Выход	Число событий	Выход	Число событий	Выход	Число событий	
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	0.038	0.488	14	0.497	47	0.527	39	100
$\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	0.038	0.590	16	0.585	55	0.578	43	114
ИТОГО:			74		250		196	484

После детального моделирования процессов взаимодействия протонов с ядрами углерода, кремния и свинца с помощью программы FRITIOF7.02 [2] и процессов регистрации продуктов этих взаимодействий в детекторах установки СВД-2 с помощью программы GEANT3.21 [13] были получены оценки эффективностей прохождения событий через этапы системы обработки данных эксперимента [3]. Затем были обработаны по всем процедурам 52 млн. событий и получены массовые спектры для двухчастичной системы $(K\pi)$, в которых выделен сигнал от распада нейтральных D -мезонов. После анализа полученных сигналов оценен фон и получено число событий с распадом нейтральных D -мезонов, которое позволяет оценить сечение рождения чарма в околопороговой области по энергии.

1. Моделирование регистрации событий с V^0 в вершинном детекторе

Для моделирования протон-ядерных взаимодействий при 70 Гэв использовалась программа FRITIOF 7.02. В генераторе FRITIOF разыгрывались рА-взаимодействия с учетом фермиевского движения нуклонов, деформации ядра мишени и многократного перерасеяния. Для распределения нуклонов в ядре использован потенциал Вудса-Саксона

$$\rho(r) = \rho(0) / (1 + \exp(\frac{(r-r(0))^3 \sqrt{A}}{c}))$$

с параметрами $r(0) = 1.16(1 - 1.16A^{-2/3})$ фм и $c \approx 0.5$ фм.

В отобранных “minibias”-событиях рождение кварк-антикварковых пар моделировалось в рамках дипольно-каскадной модели, процессы адронизации выполнялись по лундской схеме с использованием функции фрагментации $f(z) \propto z^{-1}(1-z)^a \exp(-bm_i^2/z)$. Для параметров функции использованы значения $a=0.18$ и $b=0.34$ ГэВ⁻², в соответствии с результатами e^+e^- -экспериментов OPAL [9] и CLEO [10], в которых настройка параметров делалась по измеренным спектрам D - и D^* -мезонов. Для всех других параметров модели использованы установочные значения программы FRITIOF7.02.

Для моделирования регистрации частиц в установке СВД-2 использовалась программа GEANT3.21. Геометрия чувствительных элементов и пассивных конструкций установки моделировалась согласно чертежам, реальным метрологическим измерениям и юстировки положения детекторов по восстановлению прямых треков. Значения величин напряженности магнитного поля задавались измеренной картой [17], которая используется при обработке экспериментальных данных.

Координаты точки рА-взаимодействия в активной мишени (АМ) моделировались следующим образом:

- вычислялась вероятность взаимодействия в данной пластинке АМ с учетом ее толщины и значения ядерной длины вещества. Сумма вероятностей всех семи пластинок нормировалась на 1, при этом учитывались условия экспериментального триггера. С использованием генератора случайных чисел, равномерного в интервале [0,1], определялся номер пластинки, в которой произошло взаимодействие;
- продольная координата Z задавалась положением центра пластинки АМ и смещением, которое разыгрывалось равномерно по толщине данной пластинки;

- поперечные координаты (X , Y) точки взаимодействия задавались профилем пучка, полученным из экспериментальных данных.

Кинематика частиц в точке взаимодействия определялась данными, полученными в программе FRITIOF7.02, с учетом вида вещества АМ. Для нашего случая в GEANT использовались три файла с взаимодействиями на углероде, кремнии и свинце, отдельно для моделирования событий с рождением чарма и фоновых событий. В этих файлах для нестабильных частиц отсутствовали продукты распада, т.к. их распад осуществлялся непосредственно при работе программы GEANT. Для очарованных мезонов задавалась определенная мода распада. При прохождении частицы через вершинный детектор (ВД) [1] производился учет размытия заряда по стрипам, внесение шума в каждый канал согласно экспериментальным данным, обрезание амплитуд аналогично обрезанию при сборе данных в эксперименте. При формировании хитов в магнитном спектрометре (МС) учитывались экспериментально полученные эффективности срабатывания пропорциональных проволоочных камер.

Система обработки данных эксперимента E-184 включает в себя следующие процедуры:

- фильтрацию данных ВД и отбор событий с вторичной вершиной вблизи точки взаимодействия, кандидатов в события с рождением чарма. Для этого применяется метод анализа в пространстве параметров треков $\{a, b\}$ [5];
- геометрическую реконструкцию событий в МС и определение импульса заряженных частиц;
- анализ событий, в том числе и кинематический.

На рис. 2 показаны распределения по Z-координате первичной вершины. Числа взаимодействий в каждой из пластинок АМ зависят от материала мишени. Видно также, что эффективности восстановления первичной вершины для разных пластинок разные, что необходимо учитывать при анализе данных. В целом, вероятности восстановления первичной вершины в данной пластинке для случаев экспериментальных данных и событий, разыгранных методом Монте-Карло (МК), совпадают.

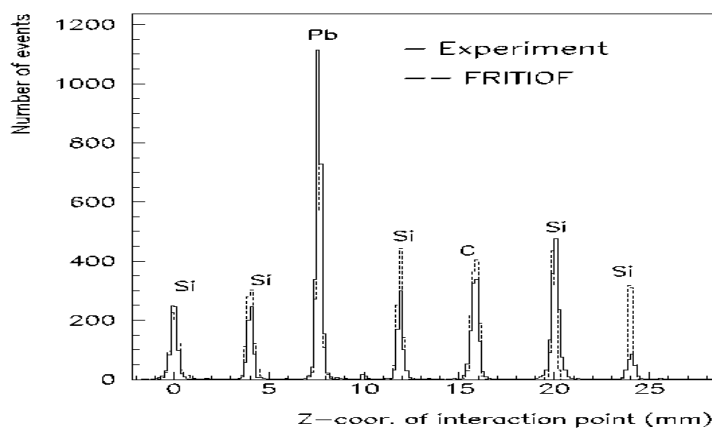


Рис. 2. Координата точки взаимодействия вдоль пучка (мм) для экспериментальных событий (сплошная линия) и МК-событий (штриховая линия).

На рис. 3 представлено сравнение характеристик экспериментальных и МК-событий, прошедших цепочку процедур системы обработки данных эксперимента E-184. Можно сделать вывод, что программа FRITIOF правильно предсказывает поведение параметров события в эксперименте E-184. Имеющиеся расхождения в распределении по множественности, особенно

для углеродной мишени, можно объяснить влиянием триггерных условий и отличием эффективностей обработки данных для экспериментальных и МК-событий.

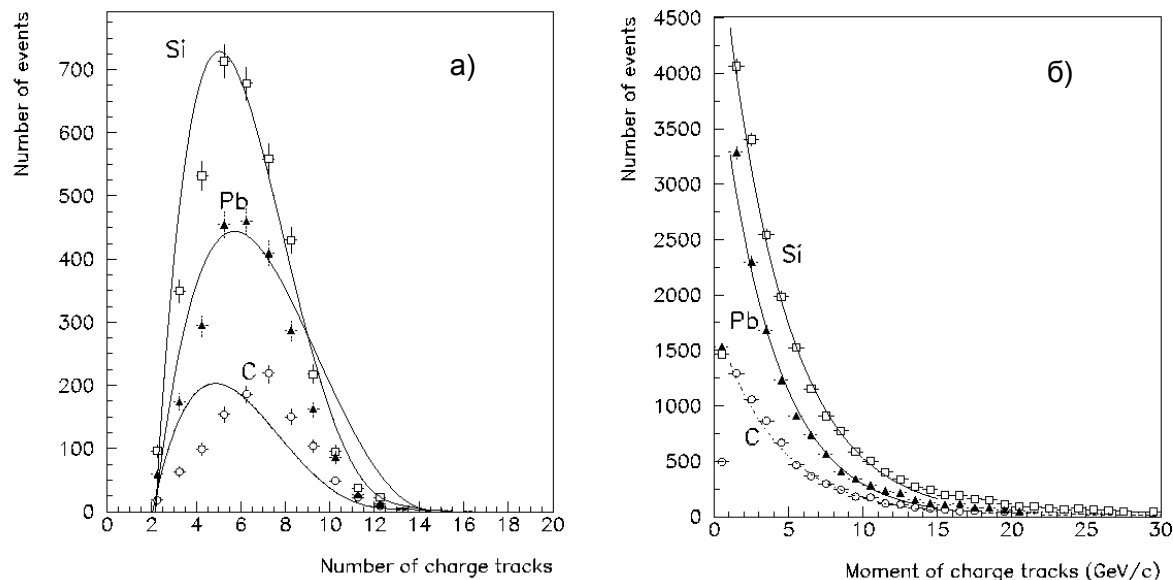


Рис. 3. Предсказания программы FRITIOF (сплошная линия) и экспериментальные данные (● – C, ■ – Si, ▲ – Pb): а) распределение по множественности заряженных частиц в первичной вершине; б) импульсное распределение заряженных частиц.

2. Регистрация K^0s -мезонов

Одной из задач эксперимента E-184 является оценка сечения рождения нейтральных очарованных мезонов при околопороговой энергии. Для этого необходимо знать эффективности всех процедур обработки экспериментальных данных. Регистрация K^0s -мезонов в ВД в этом случае становится некой реперной процедурой, т.к. сечение рождения каона известно и оно во много раз больше сечения рождения очарованных частиц.

По программе FRITIOF было смоделировано 540 тыс. событий с рА-взаимодействием, в которых имелось 124 тыс. каонов. Эти события подавались в программу GEANT, на выходе записывался файл с данными, к которым были применены следующие критерии отбора: 1) число заряженных треков > 3 ; 2) расстояние между первичной вершиной и вершиной $K^0s > 0.5$ мм; 3) Z-координата $K^0s < 35$ мм; 4) треки от распада K^0s должны попадать в последнюю плоскость ВД. Из 85 тыс. каонов с распадом $K^0s \rightarrow \pi^+ \pi^-$ только 2674 ($\approx 3\%$) удовлетворяют этим условиям. Такая информация доступна только для МК-событий, когда известно точно, что в данном событии есть K^0s . Далее работает программа быстрого фильтра, которая по данным только ВД отбирает события с V^0 . Для уменьшения фона от ложно найденных V^0 на этапе фильтрации используется система критериев отбора по параметрам треков, образующих V^0 , на проекциях XZ и YZ с учетом их ошибок. Эти критерии следующие:

- трек от V^0 должен иметь промах относительно первичной вершины, $\Delta b/\sigma_b > 2$;
- два трека от V^0 пересекаются в одной пространственной точке, $\chi^2 < 4$ [5];
- вершина V^0 отделена от первичной вершины, $(Z_2 - Z_1)/\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} > 3$;
- V^0 удовлетворяет модифицированному критерию Армантероса-Подольянского [3].

После фитирования сигнала функцией Лоренца и фона полиномом 2-й степени было получено число K^0s равное 317 ± 19 . Таким образом, эффективность регистрации событий с распадом $K^0s \rightarrow \pi^+ \pi^-$ равна $317/85000 = 0.0036$.

Чтобы сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными, было обработано по тем же процедурам 1115091 экспериментальных событий с взаимодействием в активной мишени. В спектре эффективных масс ($\pi^+ \pi^-$) виден сигнал от распада K^0s (рис. 4). Фит сигнала дает значение 498.6 МэВ для массы K^0s , ширина пика на полувысоте $\Gamma = 12$ МэВ. На рис. 5 сравниваются импульс и переменная X_f восстановленных K^0s в полосе сигнала массового спектра после масштабирования гистограмм.

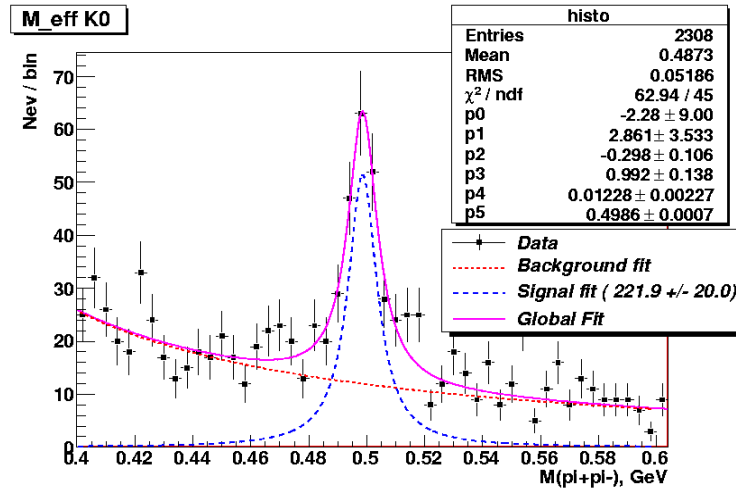


Рис. 4. Спектр эффективных масс системы ($\pi^+ \pi^-$) для экспериментальных событий.

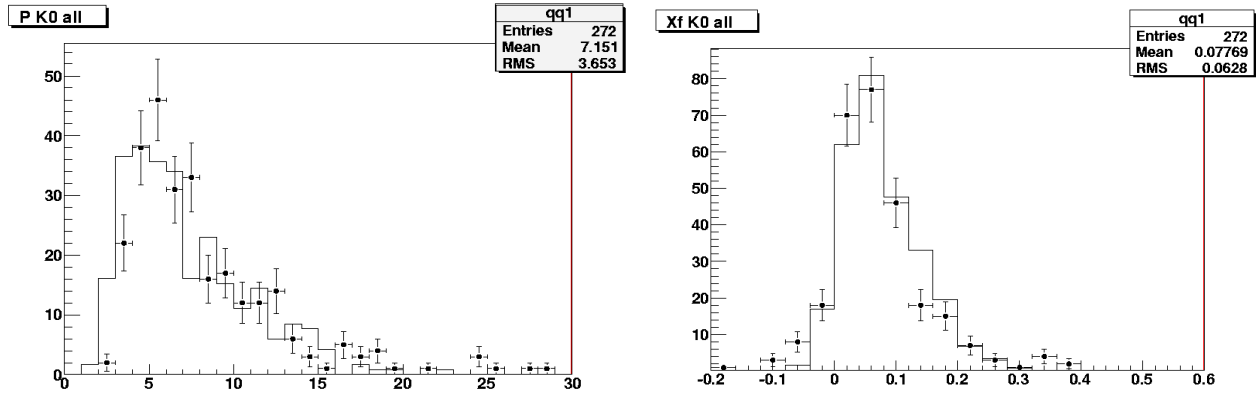


Рис. 5. Распределение по импульсу (а) и переменной X_f (б) восстановленных K^0s для МК-событий (сплошная линия) и экспериментальных событий (черные точки).

3. Моделирование регистрации нейтральных D -мезонов

Для моделирования был выбран двухчастичный канал распада $D^0(\bar{D}^0) \rightarrow K\pi$, брэнчинг которого составляет 3.8%. По программе FRITIOF было разыграно 100000 событий с рождением чарма. Далее эти события подавались в программу GEANT, где происходил распад

очарованных мезонов по заданному каналу. Процедуры обработки данных были аналогичны случаю выделения сигнала от K^0_S .

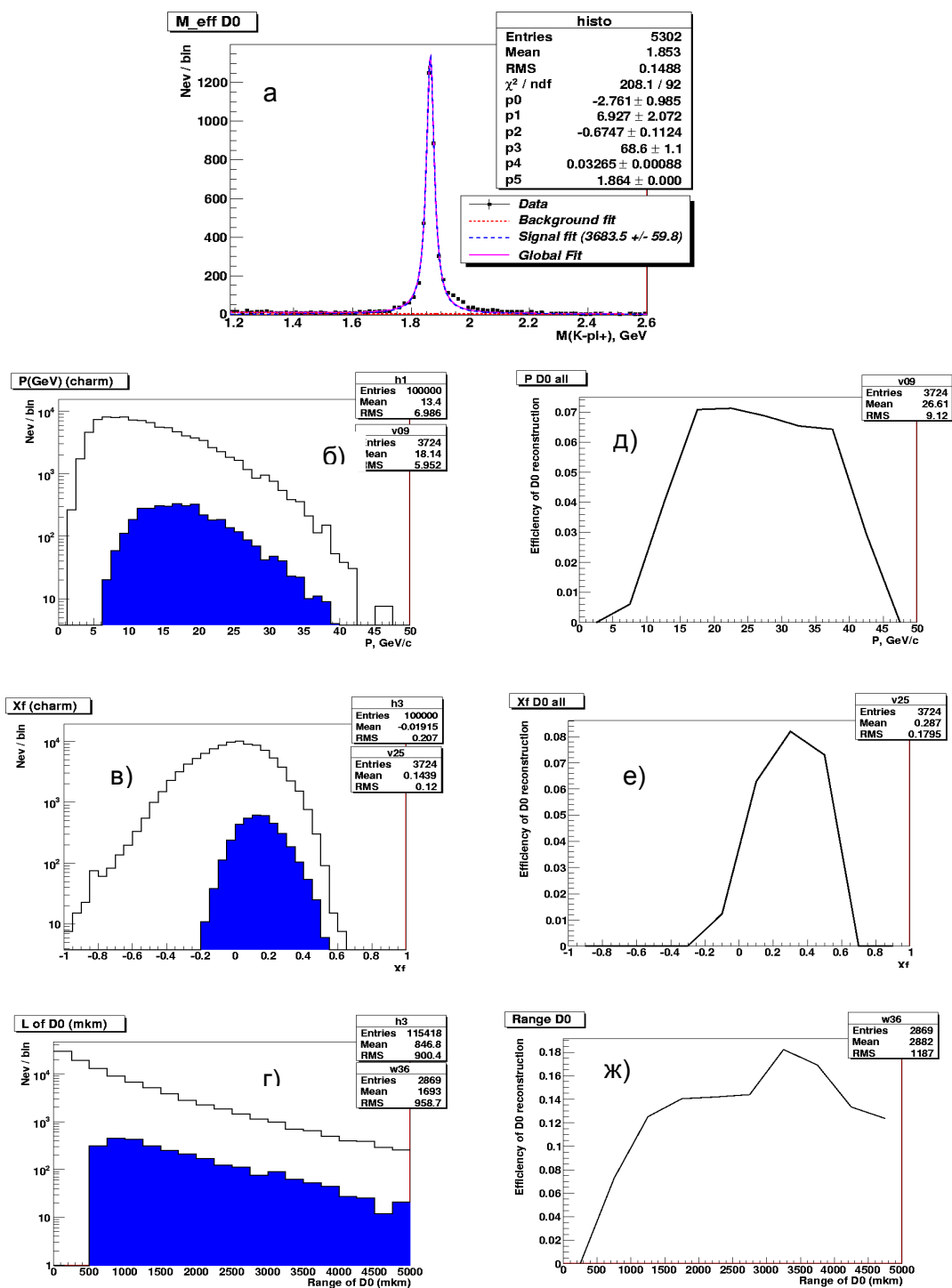


Рис. 6. а) Спектр эффективных масс системы $(K^- \pi^+)$; б) импульс, в) X_f , г) длина пробега всех и восстановленных D^0 (заштриховано); эффективность регистрации D^0 в зависимости от импульса (д), X_f (е) и длины пробега (ж).

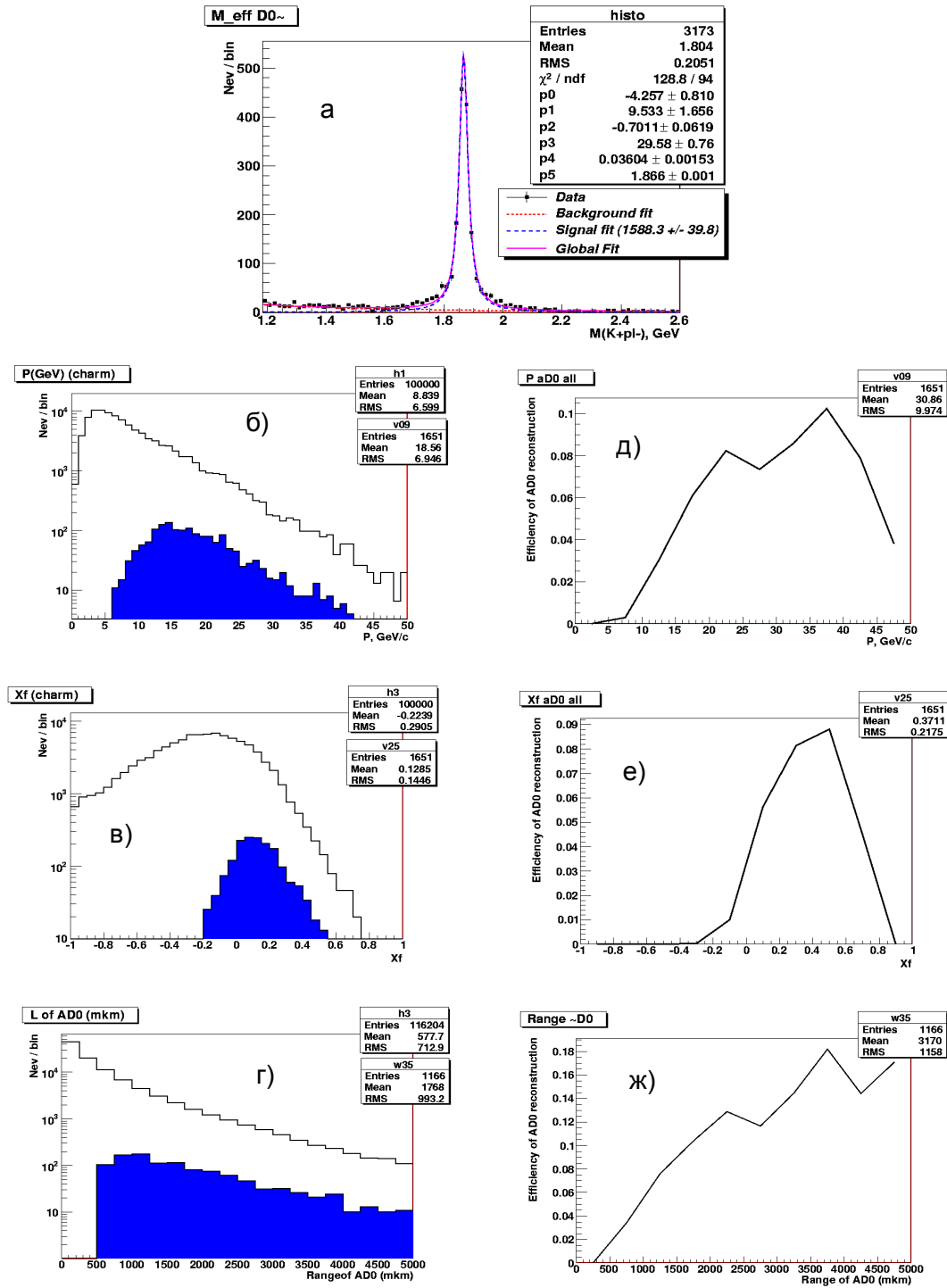


Рис. 7. а) Спектр эффективных масс системы $(K^+\pi^-)$; б) импульс, в) X_f , г) длина пробега всех и восстановленных $\check{D}^0$ (заштриховано); эффективность регистрации $\check{D}^0$ в зависимости от импульса (д), X_f (е) и длины пробега (ж).

Моделирование показало следующие эффективности процедур восстановления событий с распадами нейтральных очарованных мезонов:

- $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$. Число D^0 равно 51133, что соответствует выходу D^0 . Было 27967 событий, удовлетворяющих условиям, применяемым в случае K^0 s: 1) число заряженных треков > 3 , 2) расстояние между первичной вершиной и вершиной $D^0 > 0.5$ мм, 3) Z -координата $D^0 < 35$ мм, 4) треки от распада D^0 должны попадать в последнюю плоскость ВД. После геометрической реконструкции и анализа массового спектра сигнал от D^0 составлял 3683 ± 60 событий (рис. 6а). Эффективность регистрации событий с распадом D^0 -мезонов равна 7.2%. После фитирования сигнала и фона имеем: масса $D^0 = 1864$ МэВ (табличное значение – 1865 МэВ), ширина пика на полувысоте $\Gamma = 33$ МэВ.

- $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$. Число $\bar{D}^0$ равно 58454, что соответствует выходу $\bar{D}^0$. Число событий после применения критериев отбора (см. выше) равно 13160. После геометрической реконструкции и анализа массового спектра сигнал от $\bar{D}^0$ составлял 1588 ± 40 событий (рис. 7а). Эффективность регистрации событий с распадом $\bar{D}^0$ -мезонов равна 2.7%. После фитирования сигнала и фона имеем: масса $\bar{D}^0 = 1866$ МэВ, ширина пика на полувысоте $\Gamma = 36$ МэВ.

4. Выделение событий с распадом нейтральных D-мезонов

При обработке моделированных событий с рождением чарма были оптимизированы критерии отбора событий с распадом нейтральной частицы вблизи точки взаимодействия, которые являются кандидатами в события с распадом нейтрального D -мезона ($D^0 \rightarrow K\pi$). Основные критерии отбора следующие:

- расстояние между первичной вершиной и вершиной V^0 должно быть больше 0.5 мм;
- распадные треки V^0 -частицы должны иметь промах по отношению к первичной вершине, а общий трек должен смотреть в нее;
- эффективная масса системы $(K\pi)$ должна лежать в области ± 0.5 ГэВ от табличного значения массы $D^0 (=1.865$ ГэВ);
- импульс системы $(K\pi)$ должен быть больше 10 ГэВ/с;
- поперечный импульс распадной частицы по отношению к направлению движения системы $(K\pi)$ должен быть больше 0.3 ГэВ/с, что вытекает из анализа критерия Армантероса-Подольянского и условия подавления фона от распада нейтральных каонов и Λ^0 -гиперонов (рис. 8);
- из двух гипотез $(K^- \pi^+)$ и $(K^+ \pi^-)$ отбиралась та, у которой значение эффективной массы ближе к табличному значению массы D^0 -мезона.

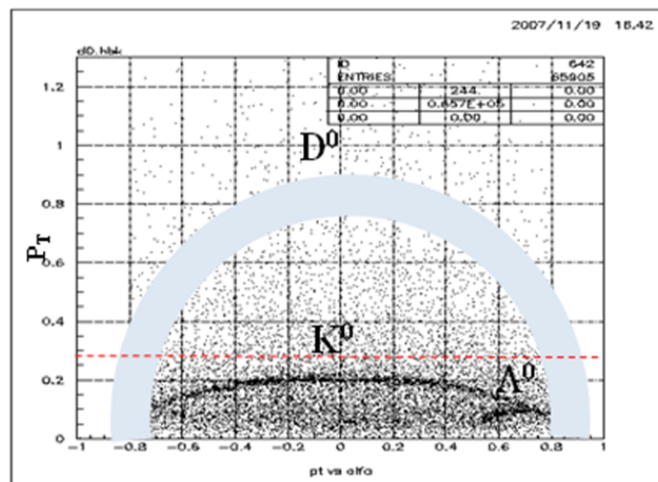


Рис. 8. Армантероса-Подольянского плот для K^0 , Λ^0 и D^0 .

Было установлено, что основным источник фона обусловлен неточным знанием пространственного положения детектирующих элементов установки и наличием ложных V^0 , треки которых принадлежат первичной вершине, но имеют большие угловые ошибки. Особенно это актуально для событий с большой множественностью. Поэтому на последней стадии обработки была введена процедура физического просмотра выделенных событий. Специально созданный графический пакет позволял детально отобразить на экране компьютера область вершинного детектора с отметкой сработавших элементов (стрипов) и построенных треков. По результатам физического просмотра исключались из дальнейшего рассмотрения события, в которых треки от V^0 могут смотреть в первичную вершину и/или имеются треки, не прошедшие геометрическую реконструкцию в магнитном спектрометре, но могущие принадлежать данному V^0 . На рис. 9 показан пример, как выглядит во время физического просмотра событие с двухлучевой вторичной вершиной.

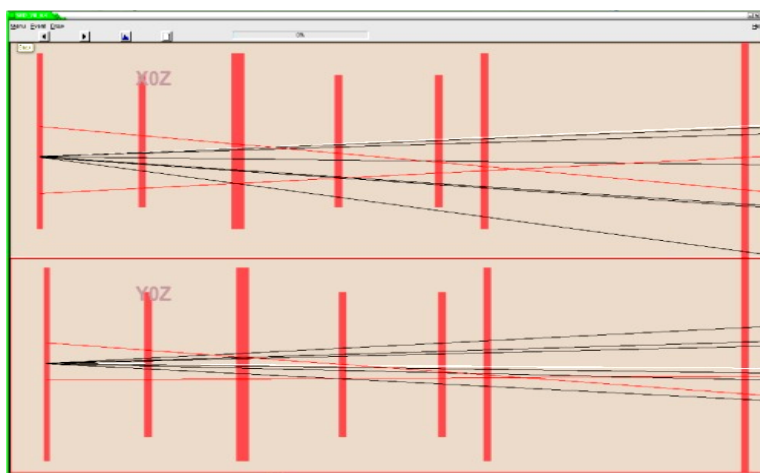


Рис. 9. Пример события с увеличенным изображением треков в области активной мишени.

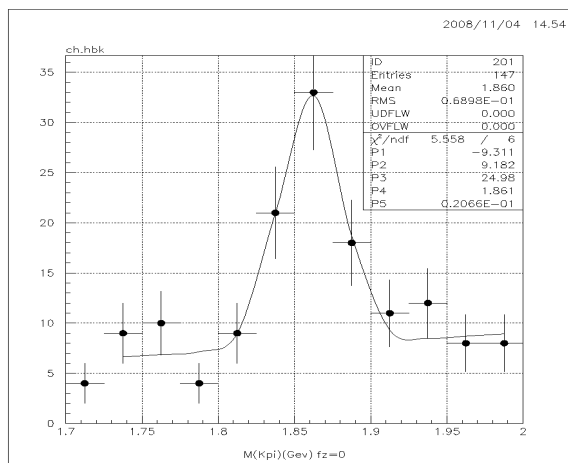
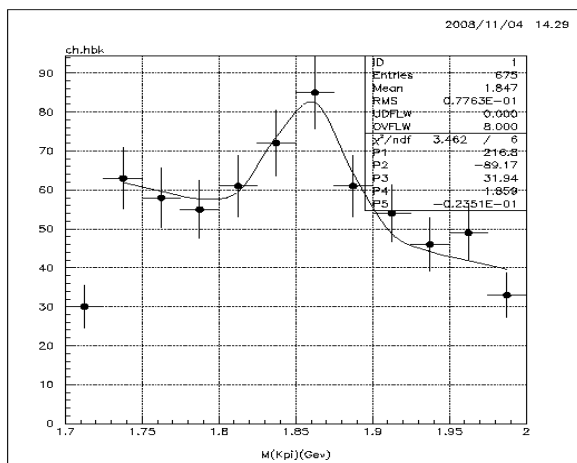


Рис. 10. Спектры эффективной массы системы $(K\pi)$ до (слева) и после (справа) физического просмотра.

На рис. 10 приведены спектры эффективной массы системы ($K\pi$), которые получены после применения критериев отбора и после отбора событий в результате физического просмотра. По причине небольшой статистики, спектры для ($K^-\pi^+$)- и ($K^+\pi^-$)-систем объединены в один спектр. Область масс, для которых выполнялся физический просмотр, была ограничена от 1.7 до 2.0 ГэВ. Количество событий в пике после просмотра меняется незначительно, но уровень фона заметно уменьшается. Результат фита прямой и Гауссом данных после физ. просмотра дает для D^0 значение массы $1861 \text{ МэВ}/c^2$ и ширину распределения $\sigma=21 \text{ МэВ}/c^2$. Отношение сигнал/шум равно $(51\pm 17)/(38\pm 13)$. В общем сигнале имеется 21 ($K^+\pi^-$)- и 30 ($K^-\pi^+$)-распадов.

Для проверки результата отбора событий распределения по длине пробега системы ($K\pi$) в области масс $M_{D\pm 3\sigma}$, ее импульсу и переменной Фейнмана (X_f) сравнивались с аналогичными распределениями, полученными с моделированными событиями (рис. 11). Из рис. 11 видно, что измеренные свойства отобранных в эксперименте распадных систем ($K\pi$) соответствуют свойствам моделированных D^0 -мезонов.

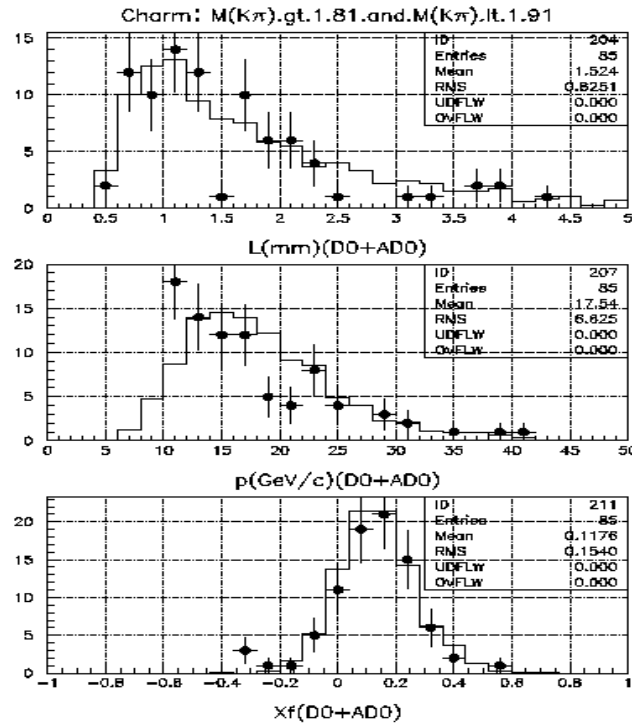


Рис. 11. Распределения (сверху вниз) по длине пробега, импульсу и переменной Фейнмана (X_f) системы ($K\pi$) для МК-событий (сплошная линия) и экспериментальных событий (черные точки).

5. Оценка сечения рождения чарма

Для оценки значения сечения, кроме знания числа событий в сигнале и общей статистики, необходимо знание еще нескольких величин: коэффициента триггирования, эффективностей всех процедур системы обработки данных. Коэффициент триггирования, т.е. степень подавления регистрации неупругих событий во время сеанса облучения установки, оценивался по сравнению распределений по множественности заряженных частиц в ВД экспериментальных и моделированных неупругих событий. Анализ распределений на рис. 12 дает значение $K_{trig} = 0.51$.

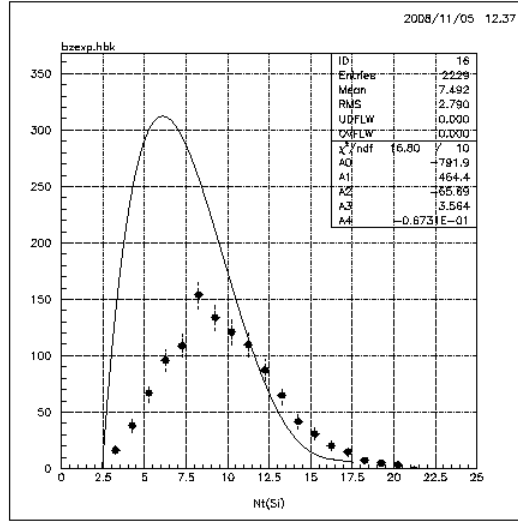


Рис. 12. Распределение по множественности заряженных частиц для экспериментальных событий (точки) и моделированных событий (сплошная линия).

При сравнении результатов моделирования регистрации K^0_s и результатов обработки экспериментальных данных было показано, что при обработке экспериментальных данных эффективность процедур обработки несколько падает, что относится также ко всем регистрируемым V^0 . Этот аппаратный коэффициент для найденных D -мезонов можно оценить по результатам выделения сигнала от K^0_s . Известны экспериментальные значения сечения рождения K^0_s ($\sigma=3430$ мкб) при нашей энергии в pp -взаимодействиях и показатель степени α в A -зависимости сечения для pA -взаимодействий ($\alpha=0.78$) [15]. Эффективность регистрации МК-событий с распадом K^0_s -мезонов равна 0.36% (см. выше) и число распадов $K^0_s \rightarrow \pi^+ \pi^-$ должно быть

$$N(K^0_s) = 52 \cdot 10^6 \cdot (3.43/31.44) \cdot (A^{0.08}) \cdot 0.692 \cdot 0.0036 = 19200,$$

т.к. усредненный атомный вес ядер мишени $A = 68$. На нашей статистике выделен сигнал от K^0_s в количестве 12 тыс. распадов. Тогда $K_{ap} = 19200/12000 = 1.6$.

Была сделана попытка вычислить сечение рождения чарма по количеству выделенных распадов нейтральных D -мезонов несколькими способами, отдельно для каждого вещества мишени.

Способ 1:

Предсказания для числа событий с распадом нейтральных D -мезонов на статистике эксперимента без учета K_{trig} и $\sigma(cc) = 1$ мкб (Табл. 3) дают значение $N_{pred} = 30(C) + 102(Si) + 82(Pb) = 214$ событиям. Выделено $N_{reg} = 7(C) + 22(Si) + 22(Pb) = 51$ такому событию с усредненной по гипотезам эффективностью $\epsilon = 0.036$. Из формулы

$$\sigma(cc) = K_{ap} \cdot (N_{reg} / \epsilon) / (N_{pred} / K_{trig})$$

получаем оценку сечения рождения чарма для разных мишеней:

$$\sigma(cc) = 5.3 (C); = 4.9 (Si); = 6.1 (Pb).$$

Взвешенное среднее значение по этим ядрам равно: $\sigma(cc) = 5.5$ (мкб/нуклон).

Способ 2:

Формулу для вычисления сечения рождения нейтральных D -мезонов на ядрах можно записать в виде

$$\sigma(D^0)_{\text{яо}} = K_{ap} \cdot N_{reg}(D) / (Br \cdot \epsilon \cdot L_{int}),$$

где брэнчинг (Br) распада $D^0 \rightarrow K\pi$ равен 0.038, интегральная светимость (L_{int}) с учетом всевозможных потерь была вычислена в работе [14] и равна $2.3 \cdot 10^{33}$. Интегральную светимость

для каждого вещества мишени определяем, умножая ее на коэффициент из табл. 2. Так как эта светимость соответствует событиям на ядрах, то ее значение нужно разделить на величину $A^{0.7}$, что соответствует A -зависимости сечения неупругих взаимодействий (фона). Тогда для каждого вещества получаем

$$\sigma(D^0)_{\text{яд}} = 96.5 (C); = 209.5 (Si); = 1949.0 (Pb) \text{ (мкб)}.$$

Полученные значения сечений проявляют зависимость от атомного веса ядер мишени (A -зависимость) с показателем степени $\alpha = 1.08 \pm 0.12$ (рис. 13), что совпадает с поведением сечений рождения чарма на ядрах.

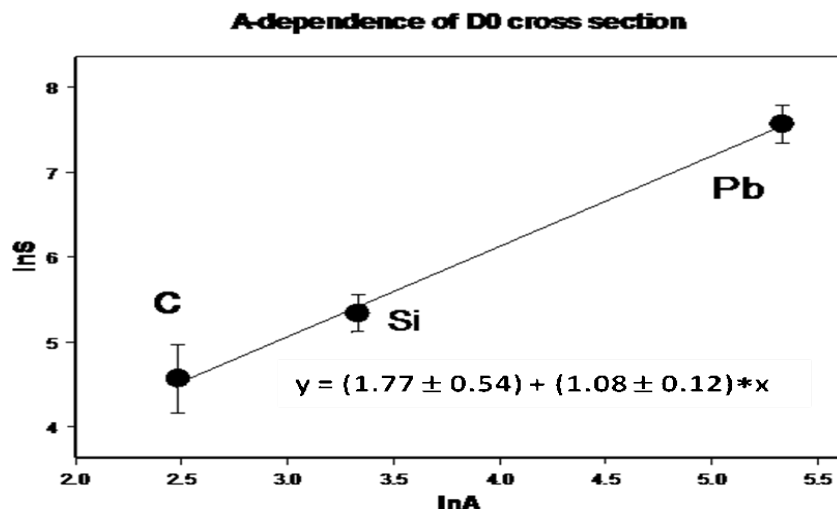


Рис. 13. A -зависимость сечения рождения чарма.

Чтобы эту величину сравнить с сечением, полученным выше (способ 1), и данными других экспериментов, нужно учесть A -зависимость сечения рождения чарма ($\alpha=1.0$), используя данные других экспериментов. Тогда получаем значения:

$$\sigma(D^0) = \sigma(D^0)_{\text{яд}} / A = 8.0 (C); = 7.5 (Si); = 9.4 (Pb) \text{ (мкб/нуклон)}.$$

Чтобы получить значение $\sigma(c\bar{c})$, нужно эту величину разделить на долю событий с нейтральными D -мезонами, которая равна 49% по результатам измерения в эксперименте [4], и на число 2, т.к. мы рассматриваем сумму ($D^0 + \bar{D}^0$). Тогда для сечения образования чарма имеем значение

$$\sigma(c\bar{c}) = \sigma(D^0) / 0.49 / 2. = 8.2 (C); = 7.6 (Si); = 9.6 (Pb) \text{ (мкб/нуклон)}.$$

Взвешенное среднее значение по этим ядрам равно: $\sigma(c\bar{c}) = 8.7 \text{ (мкб/нуклон)}$.

Усреднение по двум способам вычисления дает значение

$$\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \text{ (мкб/нуклон)}.$$

Ошибка полученного сечения обусловлена статистикой сигнала от распада нейтральных D -мезонов и неопределенностей в вычислениях коэффициентов и эффективностей. Имеем: а) неопределенность в числе событий при фитировании сигнала в спектре эффективных масс равна 34% (рис. 10); б) неопределенность в значении эффективности регистрации – 3% [3], коэффициента триггирования – 6% (рис. 12), аппаратного коэффициента – 11% [3]. Суммарная неопределенность равна 54%.

Закключение

В результате детального моделирования процессов в установке СВД-2 и анализа данных по распаду нейтральных D -мезонов была получена оценка сечения рождения чарма в рА-взаимодействиях при околопороговой энергии 70 ГэВ:

$$\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \pm 2.4(\text{стат.}) \pm 1.4(\text{сист.}) \text{ (мкб/нуклон)}.$$

На рис. 14 показана зависимость сечения рождения D^0 -мезонов в рА-взаимодействиях от энергии в с.ц.м. с учетом данного эксперимента. Нужно добавить, что попытки оценить сечение чарма при околопороговой энергии были предприняты в работе [16] более двадцати лет назад в эксперименте на установке БИС-2 ИФВЭ при облучении углеродной мишени нейтронами с энергией 40-70 ГэВ. В кинематической области $X_F > 0.5$ измеренное сечение рождения D^0 -мезонов оказалось гораздо больше теоретических предсказаний, а именно $\sigma(D^0) = 28 \pm 14 \text{ мкб/ядро}$. Полученное в данном эксперименте значение сечения также превышает теоретические оценки, что требует более детального изучения данного вопроса. Выполненная работа имеет важное значение, т.к. до сих пор нет надежных данных по сечению образования чарма в рА-взаимодействиях при околопороговой энергии, которые необходимы для проверки теоретических моделей описания таких процессов.

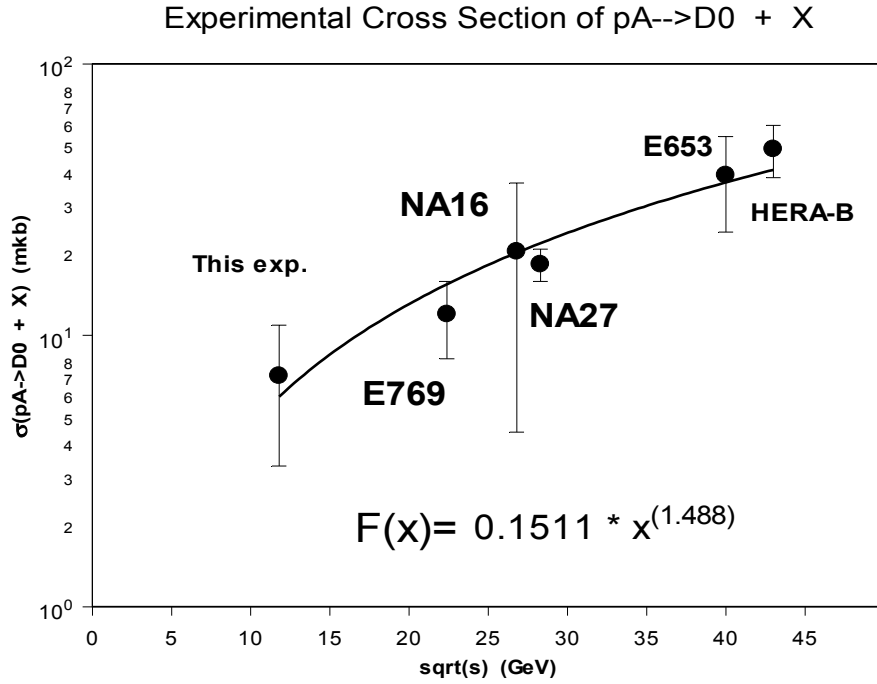


Рис. 14. Зависимость сечения рождения D^0 -мезонов в рА-взаимодействиях от энергии в с.ц.м. с учетом данного эксперимента.

Список литературы

- [1] Е.Н. Ардашев и др. Препринт ИФВЭ 96-98, Протвино, 1996.
<http://web.ihep.su/library/pubs/prep1996/ps/96-98.pdf>
- [2] B. Pi, Computer Phys. Comm. 71, 173 (1992).
- [3] А.П. Воробьев и др. Препринт ИФВЭ 2008-17, Протвино, 2008.
<http://web.ihep.su/library/pubs/prep2008/ps/2008-17.pdf>
- [4] S. Kupper, Charm production in 920 GeV proton-nucleus interactions,
http://www-hera-b.desy.de/general/talks/06/hp06_faccioli.pdf
- [5] А. А. Киряков и др. Препринт ИФВЭ 2005-45, Протвино, 2005.
<http://web.ihep.su/library/pubs/prep2005/ps/2005-45.pdf>
- [6] Yu. Gorin et al., Phys. at. Nucl. **14**, 998, (1971).
- [7] Particle Data Group, W.-M. Yao et al., Journal of Physics **G 33**, 1 (2006).
- [8] N.S. Amaglobeli et al., Experimental Estimation of the Charm-Production Cross Section in pp-Interactions at 70 GeV/c with the Aid of the SVD Setup;
Phys. at. Nucl. **64**, 5 (2001).
- [9] The OPAL Collaboration, Zeit. fur Physik **C72**, 1-16 (1996).
- [10] G.S. Huang et al. Phys. Rev. Lett. **94**, 011802 (2005).
- [11] E. Belau et al. NIM **214**, 253-260 (1983).
- [12] А.А. Киряков и др. Методы реконструкции координат в кремниевых микроstriповых детекторах, IETechniques **47**, 611-618, (2004).
<http://web.ihep.su/library/pubs/prep2003/ps/2003-38.pdf>
- [13] GEANT 3.21, CERN Program Library Long Writeup W5013.
- [14] SVD Collaboration, [arXiv:0803.3313v2](https://arxiv.org/abs/0803.3313v2)
- [15] HERA-B Collaboration, Eur. Phys. J. C **29**, 181-190 (2003).
- [16] BIS-2 Collaboration, Zeit. fur Physik **C37**, 243-249 (1988).
- [17] И.В. Богуславский и др. Препринт ОИЯИ Р1-90-247, Дубна, 1990.

Рукопись поступила 24 июня 2009 г.

Ардашев Е.Н. и др.

Регистрация рождения и распадов нейтральных очарованных мезонов
в рА-взаимодействиях при 70 ГэВ на установке СВД-2.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати	25.06.2009.	Формат $60 \times 84/8$.	Офсетная печать.
Печ. л. 2,125.	Уч.- изд. л. 1,7.	Тираж 100.	Заказ 29.
Индекс 3649.			

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2009-9, ИФВЭ, 2009
