



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2010–2  
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, Л.Л. Курчанинов,  
Г.Я. Митрофанов, В.С. Петров, А.В. Плескач, В.М. Роньжин, В.Н. Рядовилов,  
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. Ланщикова, Ю.П. Петухов, Н.Ф. Фурманец, А.И. Юкаев

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна*

**СВОЙСТВА НЕЙТРАЛЬНЫХ ОЧАРОВАННЫХ МЕЗОНОВ  
В рА-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 70 ГэВ**

Представлено на сессии физического  
отделения РАН, Москва, ноябрь 2009 г.

Протвино 2010

### Аннотация

Ардашев Е.Н. и др. Свойства нейтральных очарованных мезонов в рА-взаимодействиях при 70 ГэВ: Препринт ИФВЭ 2010–2. – Протвино, 2010. – 11 с., 9 рис., 3 табл., библиогр.: 11.

Приведены результаты обработки данных эксперимента SERP-E-184 «Изучение механизмов образования очарованных частиц в рА-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. После выделения сигнала от двухчастичного распада нейтральных очарованных мезонов и оценки сечения образования чарма при околопороговой энергии ( $\sigma(c\bar{c})=7.1 \pm 2.4$  (стат.)  $\pm 1.4$  (сист.) (мкбн/нуклон)) [2] исследованы некоторые свойства  $D^0$  и  $\bar{D}^0$ , а именно: зависимость сечения от атомного веса ядра мишени (А-зависимость), поведение дифференциальных сечений  $d\sigma/dp_t^2$  и  $d\sigma/dx_f$ , зависимость параметра  $\alpha$  от кинематических переменных  $x_f$ ,  $p_t^2$  и  $p_{\text{лаб}}$ . Экспериментальные результаты сравниваются с предсказаниями, полученными с помощью программы FRITIOF7.02.

### Abstract

Ardashev E.N. et al. Properties of neutral charmed mesons in pA-interactions at 70 GeV: IHEP Preprint 2010–2. – Protvino, 2010. – p. 11, figs. 9, tables 3, refs.: 11.

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. When two-prongs neutral charmed mesons decays signal has been obtained and charm production cross section estimated at near threshold energy ( $\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \pm 2.4$  (stat.)  $\pm 1.4$  (syst.) (mkb/nucleon)), some properties of  $D^0$  and  $\bar{D}^0$  were studied, in particular: A-dependence of cross section, kinematical distributions  $d\sigma/dp_t^2$  and  $d\sigma/dx_f$ , the dependence of  $\alpha$  parameter versus  $x_f$ ,  $p_t^2$  and  $p_{\text{lab}}$ . Experimental results are compared to the predictions of FRITIOF7.02 program.

## Введение

Эксперимент SERP-E-184 «Изучение механизмов образования очарованных частиц в рА-взаимодействиях при 70 ГэВ и их распадов» [1] выполняется на установке СВД-2. Активная мишень, состоящая из пластинок углерода, кремния и свинца, облучается пучком протонов 70 ГэВ. В работе [2] после выделения сигнала в спектре эффективных масс системы (Кл) была дана оценка сечения образования очарованных мезонов в рА-взаимодействиях при околороговой энергии. Измеренное значение сечения образования чарма составило

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

Полученная величина сечения превышает предсказания жесткой КХД ( $\sigma(c\bar{c}) \sim 1$  мкбн). Вместе с тем, с учетом изменения параметров модели и получаемого поля ошибок [3], это сечение не кажется чересчур большим (рис. 1а). Попытки оценить сечение образования чарма при околороговой энергии были предприняты более двадцати лет назад в эксперименте на установке БИС-2 ИФВЭ при облучении углеродной мишени нейтронами с энергией 40–70 ГэВ [4]. В кинематической области  $x_f > 0.5$  измеренное сечение образования  $D^0$ -мезонов оказалось гораздо больше теоретических предсказаний, а именно  $\sigma(D^0)=28\pm 14$  мкбн/ядро. В пересчете на всю кинематическую область сечение образования чарма составило  $\sim 5$  мкбн/нуклон. Примерно такую же теоретическую оценку этой величины получила группа А.Б. Кайдалова при вычислении сечения образования чарма в модели кварк-глюонных струн [5]. На рис. 1б представлен график из этой работы с добавлением нашей точки.

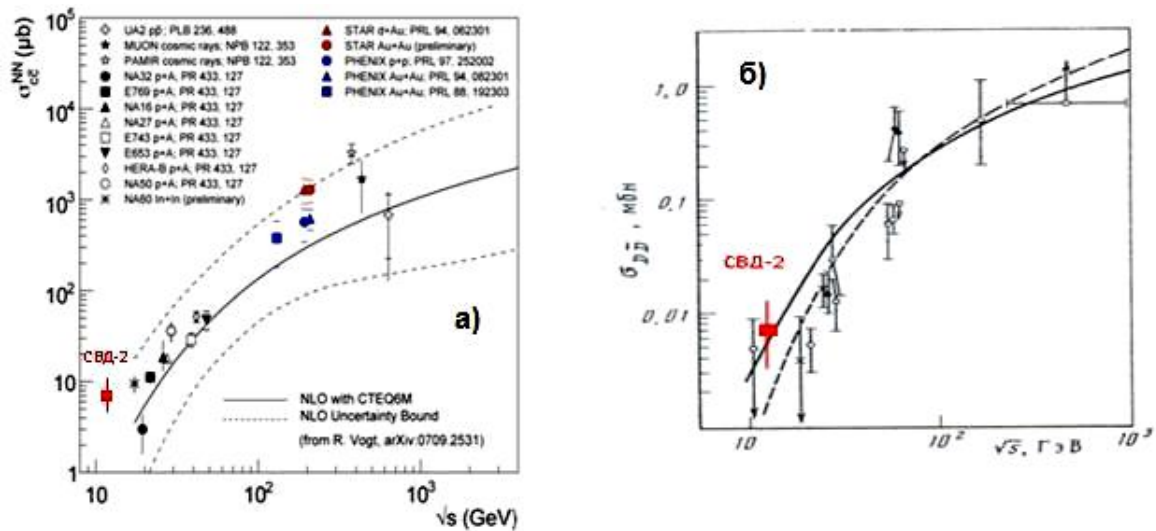


Рис. 1. Экспериментальные сечения образования чарма в рА-взаимодействиях и теоретические предсказания: а) пертурбативная КХД [3], б) модель кварк-глюонных струн [5].

Подробное описание установки СВД-2 можно найти в работе [1]. Наличие в эксперименте E-184 мишени, содержащей пластинки углерода, кремния и свинца, позволяет измерить зависимость сечения образования чарма от атомного веса ядер мишени. В работе [2] было показано, что параметр  $\alpha$  в  $A$ -зависимости ( $\sigma \sim A^\alpha$ ) в этом эксперименте равен  $1.08 \pm 0.12$ , что согласуется с результатами других экспериментов [6, 7, 8].

Выполненное детальное моделирование процессов регистрации распадов очарованных частиц в установке СВД-2 с помощью программ FRITIOF7.02 и GEANT3.21 позволяет определить эффективности всех процедур системы обработки данных и их зависимость от кинематических параметров  $p_t^2$  и  $x_b$ , что, в свою очередь, дает возможность оценить инклюзивные спектры для нейтральных D-мезонов.

## 1. Время жизни нейтральных D-мезонов

Для проверки того, что выделенные распады (Кл) являются распадами очарованных мезонов, измерялось время их жизни из зависимости сечения от длины пробега (Кл) системы. Видимая длина пробега поправлялась на фактор  $(p/M)$ , т.е.  $L=L_{\text{вид}}/(p/M)$ , где  $p$  – импульс и  $M$  – измеренная масса системы. Диапазон длин пробега делился на интервалы, в каждом интервале строился спектр эффективных масс системы

(Кπ) и вычислялось сечение по количеству событий в сигнале от распада  $D^0$ -мезона. Из-за небольшой статистики сигналы от  $D^0$ - и анти- $D^0$ -мезонов объединялись в один спектр. Описание зависимости сечения от длины пробега (рис. 2) функцией  $d\sigma/dL \sim \exp(-L/\sigma)$  дает значение  $\sigma = 0.123 \pm 0.024$  мм, что совпадает с табличной величиной 0,124 мм в пределах ошибки.

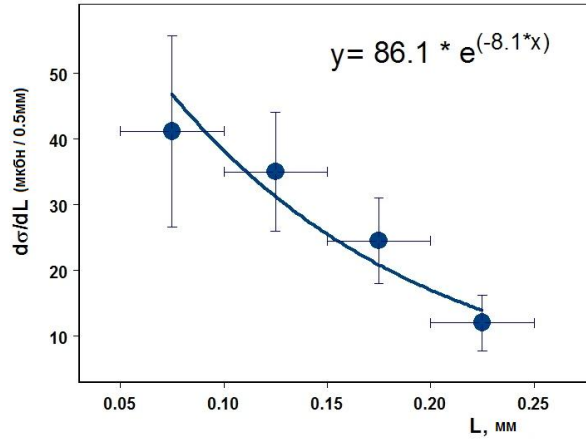


Рис. 2. Зависимость сечения образования нейтральных D-мезонов от длины их пробега.

## 2. Дифференциальное сечение $d\sigma/dp_t^2$

Акseptанс установки СВД-2 позволяет измерять поперечный импульс ( $p_t$ ) и переменную Фейнмана ( $x_F = 2p_t/\sqrt{s}$ ) очарованных мезонов в широкой области:  $p_t^2$  от 0 до 4 (ГэВ/с)<sup>2</sup> и  $x_F$  от -0.2 до 0.6. Моделирование показывает, что при этом в апертуру спектрометра попадает 54%  $D^0$ -мезонов и 23% анти- $D^0$ -мезонов.

Для получения спектра по  $p_t^2$  строились спектры эффективных масс системы (Кπ) в четырех интервалах по  $p_t^2$ . В каждом спектре выделялся сигнал  $N_{\text{рег}}$  от распада нейтральных D-мезонов и вычислялось инклюзивное парциальное сечение для данного интервала по  $p_t^2$  по формуле

$$\sigma(D^0)_{\text{яд}} = K_{\text{ап}} * N_{\text{рег}} * A^{0.7} / (B\Gamma * \epsilon * L_{\text{инт}})$$

с использованием определенных ранее значений эффективностей и других величин (бренчинга, интегральной светимости и аппаратного коэффициента) [2]. В табл. 1 приведены значения сечений с их статистической ошибкой для четырёх интервалов  $p_t^2$ . Для вычисления среднего по ядрам сечения использовалась величина суммарного сигнала и усредненное значение атомного веса ядер, как описано в [2]. Измеренное

среднее значение поперечного импульса нейтральных D-мезонов равно  $\langle p_t \rangle = 1.02$  ГэВ/с.

Таблица 1. Дифференциальные сечения образования  $D^0$ -мезонов для четырёх интервалов  $p_t^2$  ( $\Delta p_t^2 = 1.0$  (ГэВ/с) $^2$ ).

$\langle p_t^2 \rangle$ (ГэВ/с) $^2$	$\epsilon_{\text{рег}}$ %	Углерод	Кремний	Свинец	Среднее по ядрам
		$d\sigma$ (мкбн/яд)	$d\sigma$ (мкбн/яд)	$d\sigma$ (мкбн/яд)	$d\sigma$ (мкбн/яд)
0.5	3.7	13±13	83±28	945±285	218 ±45
1.5	3.8	26±18	63±24	669±237	157±38
2.5	3.4	15±15	30±17	281±162	72±27
3.5	3.5	14±14	10±10	91±91	20±14

Описывая зависимость экспериментального сечения для всех ядер выражением  $d\sigma/dp_t^2 \sim \exp(-bp_t^2)$ , находим значение показателя степени  $b=0.79 \pm 0.15$  (ГэВ/с) $^{-2}$  (рис. 3).

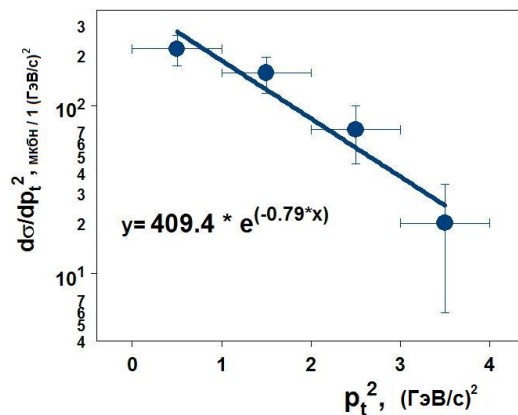


Рис. 3. Дифференциальное сечение  $d\sigma/dp_t^2$  образования нейтральных D-мезонов.

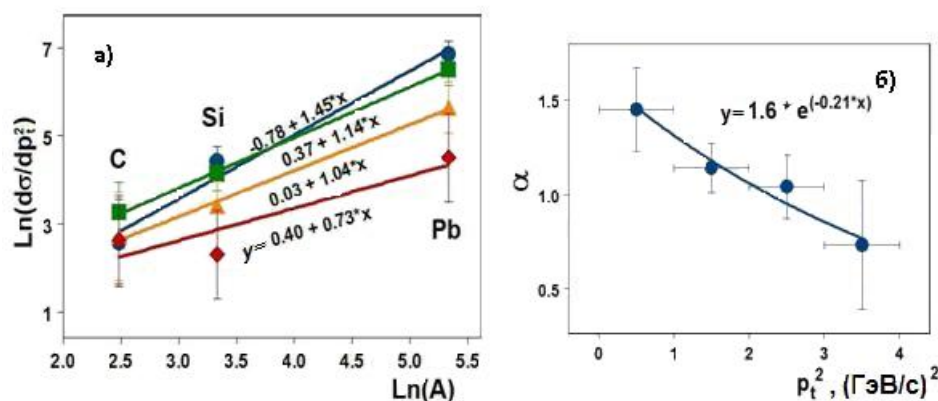


Рис. 4. а) Зависимость дифференциального сечения от атомного веса ядер мишени для четырёх интервалов  $p_t^2$ . б) Зависимость параметра A-зависимости  $\alpha$  от  $p_t^2$ .

В протон-ядерных столкновениях исследуется поведение параметра  $A$ -зависимости  $\alpha$  от кинематических переменных. Несмотря на небольшую статистику сигнала и, вследствие этого, большие ошибки, была предпринята попытка посмотреть зависимость  $\alpha$  от  $p_t^2$ . На рис. 4а приведена зависимость дифференциальных сечений для четырёх интервалов по  $p_t^2$  от атомного веса ядер мишени. Видно, что наклоны прямых линий отличаются для разных значений  $p_t^2$ . Экспериментальные данные указывают на уменьшение параметра  $\alpha$  с ростом  $p_t^2$  по экспоненте (рис. 4б).

### 3. Дифференциальное сечение $d\sigma/dx_f$

Исследовано поведение сечения от переменной Фейнмана ( $x_f$ ). Способ вычисления сечений для разных интервалов по  $x_f$  аналогичен случаю с поперечным импульсом, т.е. с построением спектров эффективных масс системы ( $K\pi$ ) в четырех интервалах по  $x_f$  и определением количества событий в сигнале для каждого интервала (табл. 2).

Таблица 2. Дифференциальные сечения образования  $D^0$ -мезонов для разных интервалов по  $x_f$  ( $\Delta x_f = 0.2$ ).

$\langle x_f \rangle$	$\epsilon_{\text{пер}}$ %	Углерод	Кремний	Свинец	Среднее по ядрам
		$d\sigma$ (мкбн/яд)	$d\sigma$ (мкбн/яд)	$d\sigma$ (мкбн/яд)	$d\sigma$ (мкбн/яд)
-0.1	2.6	$10 \pm 10$	$13 \pm 13$	$245 \pm 173$	$40 \pm 23$
0.1	9.4	$16 \pm 9$	$55 \pm 14$	$541 \pm 135$	$123 \pm 21$
0.3	13.5	$7 \pm 5$	$15 \pm 6$	$118 \pm 52$	$39 \pm 10$
0.5	12.5	$2 \pm 2$	$6 \pm 4$	$25 \pm 25$	$6 \pm 4$

На рис. 5 приведены экспериментальные значения сечений образования нейтральных очарованных мезонов от переменной  $x_f$ . Для описания зависимости использовалась стандартная параметризация вида  $d\sigma/dx_f \sim (1 - |x_f|)^n$ . Параметр  $n$  получился равным  $6.8 \pm 0.8$ , а среднее значение  $\langle x_f \rangle = 0.12$ .

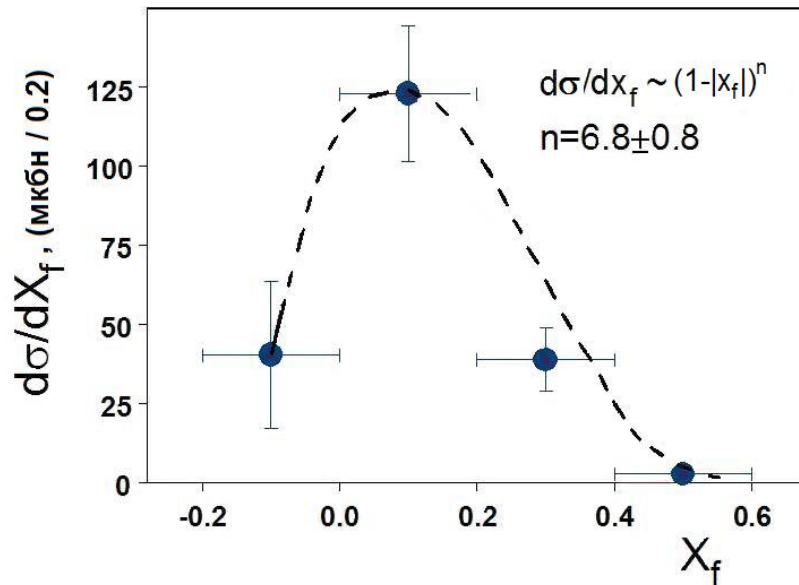


Рис. 5. Дифференциальное сечение образование нейтральных D-мезонов  $d\sigma/dx_f$ .

Аналогично зависимости параметра  $\alpha$  от  $p_t^2$  была исследована зависимость этого параметра от переменной  $x_f$ . Для этого оценивались сигналы от  $D^0$ -мезонов и соответствующие сечения их образования в интервалах по  $x_f$  для трех материалов активной мишени (рис. 6а). Из рис. 6б видно, что значения параметра  $\alpha$  уменьшаются с увеличением  $x_f$ . Если использовать описание данных экспонентой, то при  $x_f \rightarrow 1$  параметр  $\alpha$  уменьшается до значения 0.55. Это согласуется с теоретическим предсказанием, сделанным в [5].

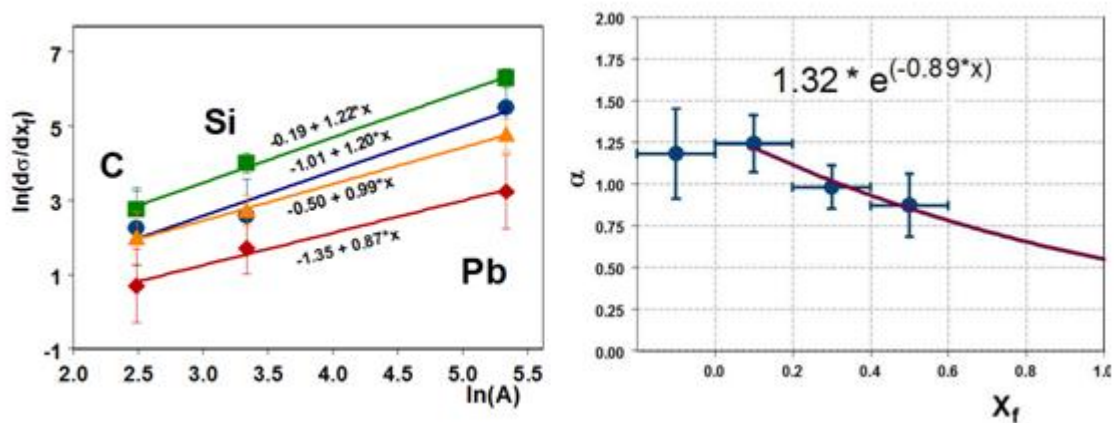


Рис. 6. а) Зависимость  $d\sigma/dx_f$  от атомного веса ядер мишени для четырёх интервалов  $x_f$ .  
б) Зависимость параметра А-зависимости  $\alpha$  от переменной Фейнмана ( $x_f$ ).



Следует отметить, что систематические неоднозначности в полученных величинах сечений мы оцениваем на уровне 20% их статистической ошибки.

#### 4. FRITIOF и A-зависимость сечения

В программе моделирования адрон-адрон и адрон-ядерных взаимодействий FRITIOF применена Лундская струнная модель. Предполагается, что после обмена 4-импульсом адроны становятся двумя возбужденными струнными состояниями, которые далее излучают глюоны в приближении цветных диполей КХД. Конечная адронизация выполняется с использованием Лундской модели фрагментации струн. Столкновение с ядром рассматривается как независимые столкновения налетающего нуклона с конституентными нуклонами ядра. Учитываются фермиевское движение нуклонов, деформация ядра и многократное перерасеяние. Плотность распределения нуклонов в ядре описывается потенциалом Вудса-Саксона. Мы использовали эту программу для проведения модельного исследования зависимости параметра  $\alpha$  от кинематических параметров  $D^0$ -мезонов и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными. Имеющиеся числа моделированных (МК) событий с  $D^0$ -мезонами для трех значений атомного веса ядер мишени (C, Si, Pb) взвешивались таким образом, чтобы в среднем по всем событиям выполнялась A-зависимость с параметром  $\alpha=1$ . Затем из трех распределений по данной кинематической переменной ( $x_f$ ,  $p_t^2$  и  $p_{\text{лаб}}$ ) для  $D^0$ -мезонов вычислялась зависимость параметра  $\alpha$  от этой величины.

В работе [9] показано, что зависимость  $\alpha$  от  $x_f$  должна отражать вклад в сечение разных ядерных подпроцессов, таких как поглощение в конечном состоянии, взаимодействия с близко летящими адронами (interactions with comovers), затенение распределений партонов, потери энергии партонов в среде и компоненты с внутренним очарованием. Это приводит к росту или падению параметра  $\alpha$  с увеличением  $x_f$ .

На рис. 7 (слева) показаны исходные моделированные распределения событий в трех мишенях (C, Si, Pb) по переменной Фейнмана  $x_f$  для  $D^0$ - и анти- $D^0$ -мезонов, из которых вычисляется параметр  $\alpha$ . График зависимости его от переменной  $x_f$  приведен справа (сплошная и пунктирная кривые). Там же приведены экспериментальные значения  $\alpha$  для четырех интервалов по  $x_f$ .

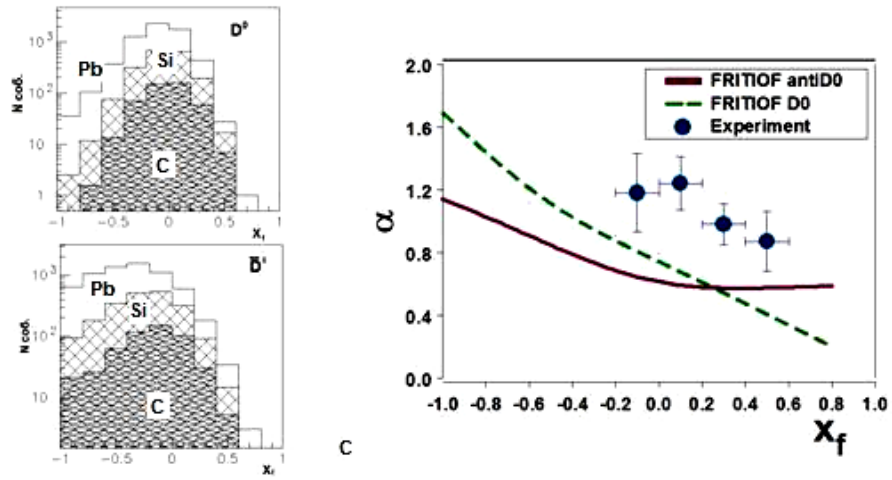


Рис. 7. Распределения по  $x_f$  для нейтральных D-мезонов и зависимость параметра  $\alpha$  от  $x_f$ .

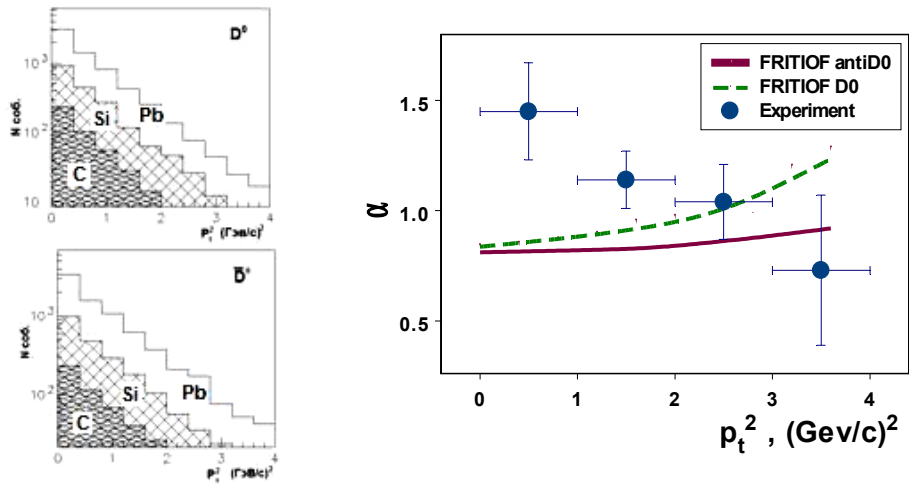


Рис. 8. Распределения по  $p_t^2$  для нейтральных D-мезонов и зависимость параметра  $\alpha$  от  $p_t^2$ .

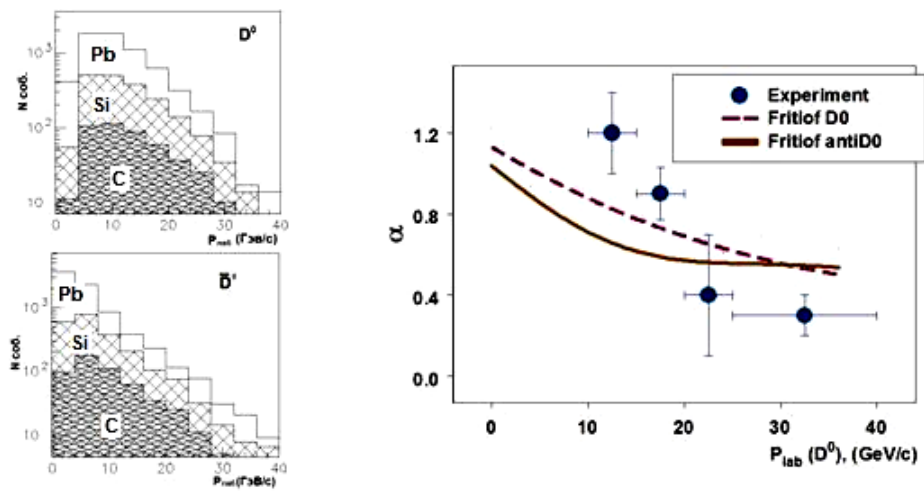


Рис. 9. Распределения по  $p_{lab}$  для нейтральных D-мезонов и зависимость параметра  $\alpha$  от  $p_{lab}$ .

Нужно отметить, что имеются «нефизические» значения переменной  $x_f$  для МК-событий, выходящие за пределы области  $[-1,1]$  как следствие того, что при вычислении переменной Фейнмана  $x_f=2p_L/\sqrt{s}$  энергия в с.ц.м.  $\sqrt{s}$  оказывается заниженной, если не учитывать взаимодействие налетающего нуклона с несколькими нуклонами ядра мишени. В работе [10] было показано, что при учете всех взаимодействующих нуклонов ядра (при моделировании программой FRITIOF это число известно) распределение по переменной  $x_f$  заключено в интервале  $[-1,1]$ , как и должно быть. К сожалению, в эксперименте число взаимодействующих нуклонов ядра неизвестно, поэтому энергия в с.ц.м. вычисляется для двух нуклонов (налетающего и мишени) и приходится использовать «нефизические» значения переменной  $x_f$  для МК-событий. При этом  $\alpha$  уменьшается с увеличением  $x_f$  во всей области изменения  $x_f$ . Эксперимент это качественно подтверждает.

На рис. 8 (слева) показаны распределения по  $p_t^2$  для моделированных  $D^0$ - и анти- $D^0$ -мезонов и зависимость параметра  $\alpha$  от  $p_t^2$  (справа). При сравнении моделированных по FRITIOF зависимостей и экспериментальных точек видно, что нет даже качественного согласия между моделью и экспериментом (хотя экспериментальные ошибки значительны по причине небольшой статистики).

На рис. 9 мы приводим аналогичные распределения от  $p_{\text{лаб}}$  для нейтральных  $D$ -мезонов. В этом случае нет проблемы представления данных, как в случае с переменной Фейнмана  $x_f$ , когда неизвестно число взаимодействующих нуклонов ядра. Такая же зависимость параметра  $\alpha$  приводится в работе [11]. Здесь мы видим качественное согласие эксперимента и модели, т.е.  $\alpha$  уменьшается с увеличением  $p_{\text{лаб}}$  для нейтральных  $D$ -мезонов.

## Заключение

В заключение приведём таблицу, в которой представлены результаты некоторых экспериментов по исследованию образования чарма в  $pA$ -взаимодействиях. Видно, что наши результаты в пределах ошибок не противоречат этим данным. Однако необходимы дальнейшие исследования по уточнению свойств очарованных частиц, образующихся в  $pA$ -взаимодействиях при околороговой энергии.

Таблица 3. Данные по образованию нейтральных D-мезонов и их свойствам в pA-взаимодействиях.

Эксперимент	Пучок (ГэВ)	$\sigma(D^0)$ (мкбн/нук.)	$\sigma \sim A^\alpha$ $\alpha$	$d\sigma/dx_f \sim (1 -  x_f )^n$ , n	$d\sigma/dp_t^2 \sim \exp(-b p_t^2)$ b
<b>SVD-2</b>	<b>70</b>	<b>7.1±3.8</b>	<b>1.08±0.12</b>	<b>6.8±0.8</b>	<b>0.79±0.15</b>
E769 [6]	250	12.0±3.8	0.92±0.08	4.1±0.6	0.95±0.09
NA16 [6]	360	20.4±16.	-	-	-
NA27 [6]	400	18.3±2.5	-	4.9±0.5	1.0±0.1
E-789 [7]	800	17.7 ±4.2	1.02±0.05	-	0.91±0.12
E743 [6]	800	22. ±14.	-	8.6±2.0	0.8±0.2
E653 [6]	800	39. ±15.	-	11.0±2.0	1.1±0.2
HERA-B [8]	920	48.7±10.6	0.97±0.07	7.5±3.2	0.84±0.1

При сравнении поведения параметра A-зависимости сечения  $\alpha$  от кинематических переменных для смоделированных по FRITIOF событий и эксперимента наблюдается качественное согласие для случая переменной Фейнмана  $x_f$  и  $p_{\text{лаб}}$  нейтральных D-мезонов. В случае переменной  $p_t^2$  наблюдается значительное различие: в модели  $\alpha$  практически не зависит от  $p_t^2$ , в то время как экспериментальные точки указывают на уменьшение  $\alpha$  с ростом  $p_t^2$ .

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 09-02-00445 и НШ-1456-2008-2.

### Список литературы

- [1] М. Ю. Боголюбовский и др. – Препринт ИФВЭ 96-98, Протвино, 1996.  
<http://web.ihep.su/library/pubs/prep1996/ps/96-98.pdf>
- [2] Ардашев Е.Н. и др. – Препринт ИФВЭ 2009-9, Протвино, 2009.  
<http://web.ihep.su/library/pubs/prep2009/ps/2009-09.pdf>
- [3] Shabetai A. et al. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 104112 (2008).
- [4] BIS-2 collaboration. // Zeit. fur Physik C37, 243-249 (1988).
- [5] Кайдалов А.Б. и др. // ЯФ, т. 43, вып. 6, 1986.
- [6] Appel J. A. – X Int. Conference on Physics in Collision, Durham, North California, June 21-23, 1990.
- [7] Daniel M. Kaplan. [http://arxiv.org/PS\\_cache/hep-ex/pdf/9610/9610003v1.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/hep-ex/pdf/9610/9610003v1.pdf)

- [8] S. Kupper. Doctoral Thesis, University of Ljubljana, 2007.
- [9] R. Vogt. [http://arxiv.org/PS\\_cache/hep-ph/pdf/9907/9907317v1.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/hep-ph/pdf/9907/9907317v1.pdf)
- [10] А. П. Воробьев и др. – Препринт ИФВЭ 2008-17, Протвино, 2008.  
<http://web.ihep.su/library/pubs/rep2008/ps/2008-17.pdf>
- [11] M.J. Leitch. [http://arxiv.org/PS\\_cache/nucl-ex/pdf/9909/9909007v3.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/nucl-ex/pdf/9909/9909007v3.pdf)

*Рукопись поступила 12 марта 2010 г.*

Е.Н. Ардашев и др.

Свойства нейтральных очарованных мезонов в рА-взаимодействиях при 70 ГэВ.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати 17.03.2010.    Формат 60 × 84/16.    Офсетная печать.  
Печ. л. 0,81.    Уч.- изд. л. 1,25.    Тираж 100.    Заказ 21.    Индекс 3649.

---

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

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2010-2, ИФВЭ, 2010

---