

СВОЙСТВА НЕЙТРАЛЬНЫХ ОЧАРОВАННЫХ МЕЗОНОВ В pA -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 70 ГэВ

© 2011 г. В. Н. Рядовиков*
(от имени Сотрудничества СВД-2)¹⁾

Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Поступила в редакцию 28.05.2010 г.

Приведены результаты обработки данных эксперимента SERP-E-184 “Изучение механизмов образования очарованных частиц в pA -взаимодействиях при 70 ГэВ и их распадов”, полученные при облучении активной мишени установки СВД-2, состоящей из пластинок углерода, кремния и свинца, пучком протонов с энергией 70 ГэВ. После выделения сигнала от двухчастичного распада нейтральных очарованных мезонов и оценки сечения образования чарма при околороговой энергии ($\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \pm \pm 2.4(\text{стат.}) \pm 1.4(\text{сист.})$ мкбн/нуклон) исследованы некоторые свойства D^0 и \bar{D}^0 : зависимость сечения от атомного веса ядра мишени (A -зависимость), поведение дифференциальных сечений $d\sigma/dp_t^2$ и $d\sigma/dx_F$, зависимость параметра α от кинематических переменных x_F , p_t^2 и $p_{\text{лаб}}$. Экспериментальные результаты сравниваются с предсказаниями, полученными с помощью программы FRITIOF7.02.

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент SERP-E-184 “Изучение механизмов образования очарованных частиц в pA -взаимодействиях при 70 ГэВ и их распадов” [1] выполняется на установке СВД-2 (ИФВЭ, Протвино). Активная мишень, состоящая из пластинок углерода, кремния и свинца, облучается пучком протонов с энергией 70 ГэВ. В работе [2] после выделения сигнала в спектре эффективных масс системы $K\pi$ дана оценка сечения образования очарованных мезонов в pA -взаимодействиях при околороговой энергии. Сечение образования чарма составило

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

Полученная величина сечения превышает предсказания теории жесткой КХД [1] ($\sigma(c\bar{c}) \sim 1$ мкбн). Вместе с тем, в пределах возможного изменения параметров модели меняется поле ошибок [3], и это сечение не кажется чересчур большим (рис. 1а, взят из работы [4], добавлена наша точка). Попытки оценки сечения образования чарма при околороговой энергии предпринимались более 20 лет назад на установке БИС-2 ИФВЭ при облучении углеродной мишени нейтронами с энергией 40–70 ГэВ [5]. В кинематической области $x_F > 0.5$ измеренное сечение образования D^0 -мезонов оказалось значительно больше теоретических предсказаний, а именно $\sigma(D^0) = 28 \pm 14$ мкбн/ядро. В пересчете на всю кинематическую область сечение образования чарма составило ~ 5 мкбн/нуклон. Примерно такая же теоретическая оценка этой величины получена группой Кайдалова при вычислении сечения образования чарма в модели кварк-глюонных струн [6]. На рис. 1б представлен график из работы [6] с добавлением нашей точки.

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 α в A -зависимости ($\sigma \sim A^\alpha$) в этом эксперименте равен 1.08 ± 0.12 , что согласуется с результатами других экспериментов [7–9].

*E-mail: riadovikov@ihep.ru

¹⁾ А. Н. Алеев, Е. Н. Ардашев, А. Г. Афонин, В. П. Баландин, С. Г. Басиладзе, С. Ф. Бережнев, Г. А. Богданова, М. Ю. Боголюбовский, А. М. Вишневская, В. Ю. Волков, А. П. Воробьев, А. Г. Воронин, Г. Г. Ермаков, П. Ф. Ермолов, С. Н. Головня, С. А. Горохов, В. Ф. Головкин, Н. И. Гришин, Я. В. Гришкевич, В. Н. Запольский, Е. Г. Зверев, С. А. Зоткин, Д. С. Зоткин, Д. Е. Карманов, В. И. Киреев, А. А. Киряков, В. Н. Крамаренко, А. В. Кубаровский, Н. А. Кузьмин, Л. Л. Курчанинов, Г. И. Ланшиков, А. К. Лефлат, С. И. Лютов, М. М. Меркин, Г. Я. Митрофанов, В. С. Петров, Ю. П. Петухов, А. В. Плескач, В. В. Попов, В. М. Роньжин, Д. В. Саврина, В. А. Сенько, М. М. Солдатов, Л. А. Тихонова, Н. Ф. Фурманец, А. Г. Холоденко, Ю. П. Цюпа, Н. А. Шаланда, А. И. Юкаев, В. И. Якимчук.

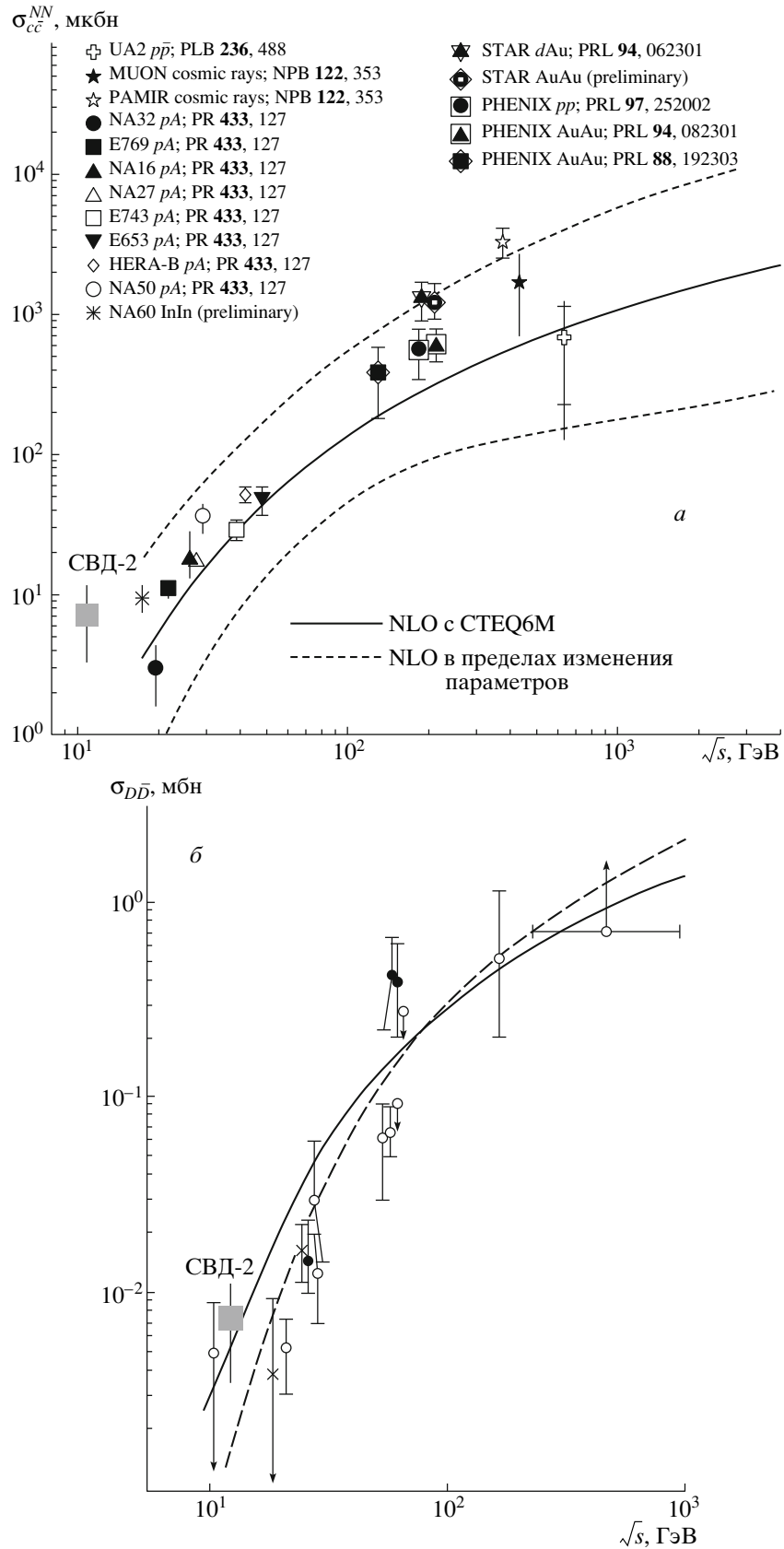


Рис. 1. Экспериментальные сечения образования чарма в pA -взаимодействиях и теоретические предсказания: a — пертурбативная КХД [3], b — модель кварк-глюонных струн [6].

Выполненное детальное моделирование процессов регистрации распадов очарованных частиц на 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_F , что, в свою очередь, дает возможность оценить инклюзивные спектры для нейтральных D -мезонов. Далее в тексте обозначение D^0 используется для суммы “частица + античастица”.

ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕЙТРАЛЬНЫХ D -МЕЗОНОВ

Для проверки того, что выделенные распады $K\pi$ являются распадами очарованных мезонов, измерялось время их жизни из зависимости сечения реакции $pA \rightarrow D^0 + X$ от длины пробега $K\pi$ -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 (см. рис. 2), в каждом интервале строился спектр эффективных масс системы $K\pi$ и определялось сечение по количеству событий в сигнале от распада D^0 -мезона. Из-за небольшой статистики сигналы от D^0 - и \bar{D}^0 -мезонов объединялись в один спектр. Описание зависимости сечения от длины пробега (рис. 2) функцией $\sigma \sim \exp(-L/c\tau)$ дает значение $c\tau = 0.123 \pm 0.024$ мм, что совпадает с табличной величиной 0.124 мм в пределах ошибки.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ $d\sigma/dp_t^2$

Акцептанс установки СВД-2 позволяет измерять поперечный импульс (p_t) и переменную Фейнмана ($x_F = 2p_L/\sqrt{s}$) очарованных мезонов в широкой области: p_t^2 от 0 до 4 $(\text{ГэВ}/c)^2$ и x_F от -0.2

до 0.6. Моделирование показывает, что при этом в апертуру спектрометра попадает 54% D^0 -мезонов и 23% \bar{D}^0 -мезонов.

Для получения спектра по p_t^2 строились спектры эффективных масс системы $K\pi$ в четырех интервалах по p_t^2 . В каждом спектре определялось число событий $N_{\text{рег}}$ с распадом нейтральных D -мезонов и вычислялось инклюзивное парциальное сечение для данного интервала по p_t^2 по формуле

$$\sigma(D^0)_{\text{яд}} = K_{\text{ап}} \cdot N_{\text{рег}} \cdot A^{0.7} / (\text{Br} \cdot \varepsilon \cdot L_{\text{инт}}),$$

используя определенные ранее значения эффективностей и других величин (бренчинг, интегральная светимость и аппаратный коэффициент) [2]. В табл. 1 приведены значения сечений с их статистическими ошибками для четырех интервалов p_t^2 . Для вычисления среднего по ядрам сечения использовались 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. Описывая зависимость экспериментального сечения для всех ядер выражением $d\sigma/dp_t^2 \sim \exp(-bp_t^2)$, находим значение показателя степени $b = 0.79 \pm 0.15$ $(\text{ГэВ}/c)^{-2}$ (рис. 3).

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

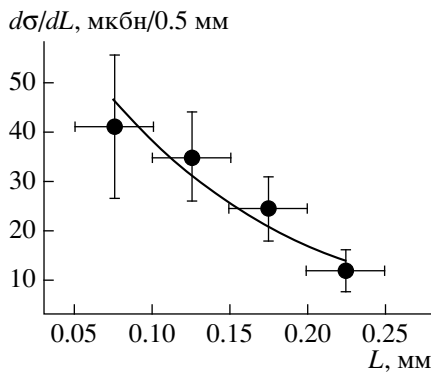


Рис. 2. Зависимость сечения образования нейтральных D -мезонов от длины их пробега. Точки — экспериментальные данные, кривая — результат параметризации экспонентой.

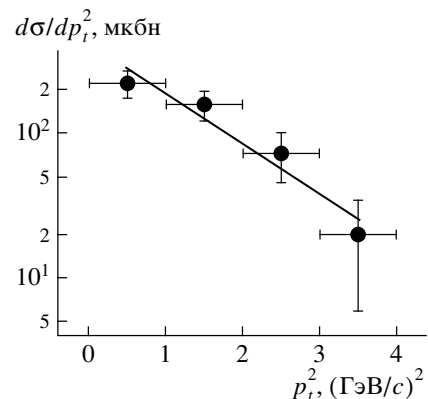


Рис. 3. Дифференциальное сечение $d\sigma/dp_t^2$ образования нейтральных D -мезонов. Точки — экспериментальные данные, кривая — результат параметризации экспонентой.

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

$\langle p_t^2 \rangle$, (ГэВ/с) ²	$\varepsilon_{\text{рег}}$, %	$d\sigma$, мкбн/ядро			
		углерод	кремний	свинец	среднее по ядрам
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

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

$\langle x_F \rangle$	$\varepsilon_{\text{рег}}$, %	$d\sigma$, мкбн/ядро			
		углерод	кремний	свинец	среднее по ядрам
-0.1	2.6	10 ± 10	13 ± 13	245 ± 173	40 ± 23
0.1	9.4	16 ± 9	55 ± 14	541 ± 135	123 ± 21
0.3	13.5	7 ± 5	15 ± 6	118 ± 52	39 ± 10
0.5	12.5	2 ± 2	6 ± 4	25 ± 25	6 ± 4

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ $d\sigma/dx_F$

Исследовано поведение сечения реакции $pA \rightarrow D^0 + X$ от переменной Фейнмана x_F . Способ вычисления сечений для разных интервалов по x_F проведен по аналогии со случаем исследования зависимости от поперечного импульса, т.е. с построением спектров эффективных масс системы $K\pi$ в четырех интервалах по x_F и с определением коли-

чества событий в сигнале для каждого интервала (табл. 2). На рис. 5 приведены экспериментальные значения сечений образования нейтральных очарованных мезонов в зависимости 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 ± 0.8 , а среднее значение $\langle x_F \rangle = 0.12$.

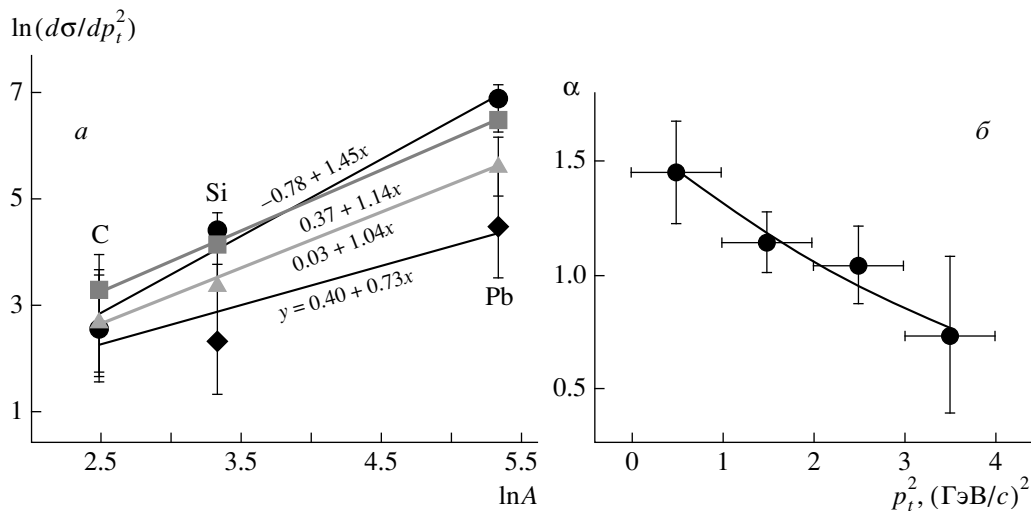


Рис. 4. а — Зависимость дифференциального сечения от атомного веса ядер мишени; б — зависимость параметра α от p_t^2 . Точки — экспериментальные данные, кривая — результат параметризации экспонентой.

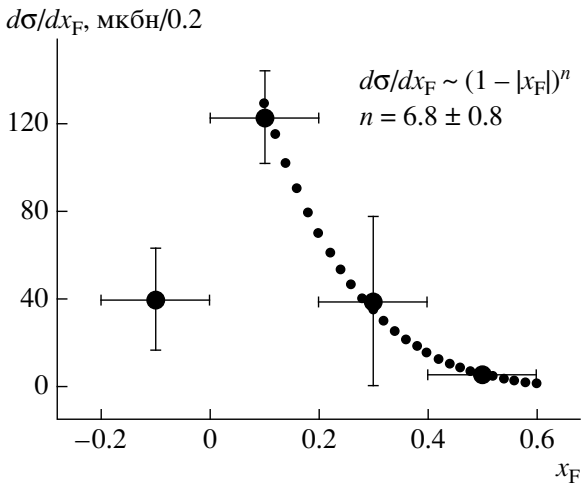


Рис. 5. Дифференциальное сечение образования нейтральных D -мезонов $d\sigma/dx_F$. Точки — экспериментальные данные, точечная кривая — результат параметризации вида $d\sigma/dx_F \sim (1 - |x_F|)^n$.

Аналогично зависимости параметра α 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 α уменьшаются с увеличением x_F . Если использовать описание данных экспонентой, то при $x_F \rightarrow 1$ параметр α уменьшается до значения 0.55. Это согласуется с теоретическим предсказанием, сделанным в [6].

Следует отметить, что в табл. 1 и 2 приведены только статистические ошибки сечений, а система-

тические неоднозначности в полученных величинах сечений мы оцениваем на уровне 20% их статистической ошибки.

FRITIOF И A -ЗАВИСИМОСТЬ СЕЧЕНИЯ

В программе моделирования адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействий FRITIOF реализуется 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 конstituентными 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 α 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 $r_{\text{лаб}}$) для D^0 -мезонов вычислялась зависимость параметра α от этой величины.

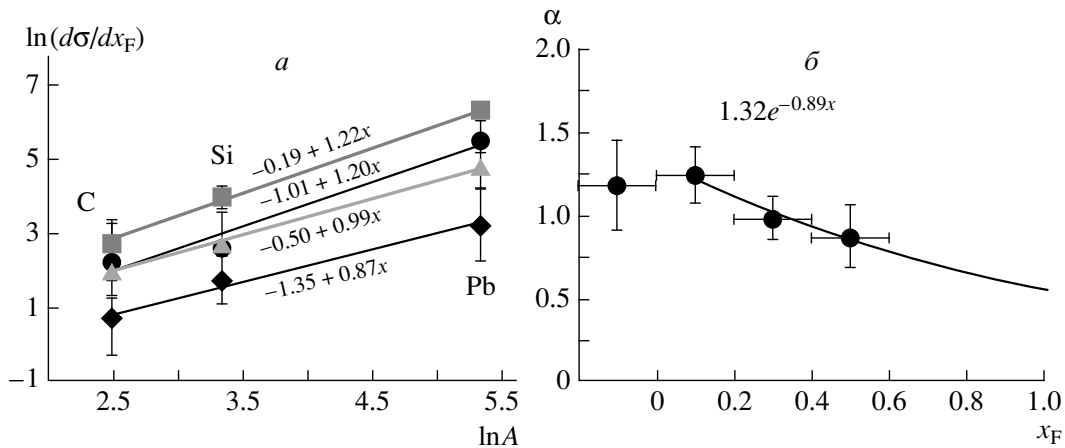


Рис. 6. а — Зависимость $d\sigma/dx_F$ от атомного веса ядер мишени для четырех интервалов x_F (см. табл. 2); б — зависимость параметра α от x_F . Точки — экспериментальные данные, кривая — результат параметризации экспонентой.

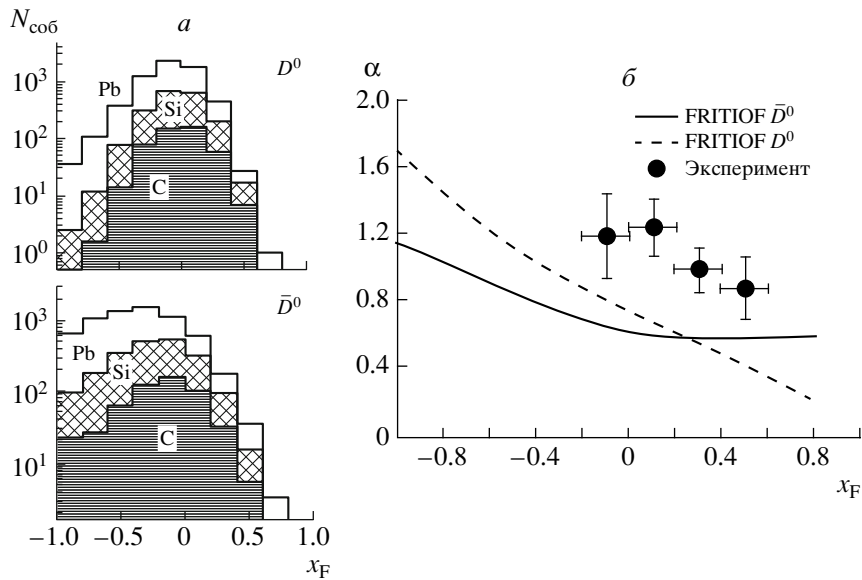


Рис. 7. *a* – Распределения по x_F для D -мезонов; *б* – зависимость параметра α от x_F . Точки – экспериментальные данные, кривые – результаты моделирования.

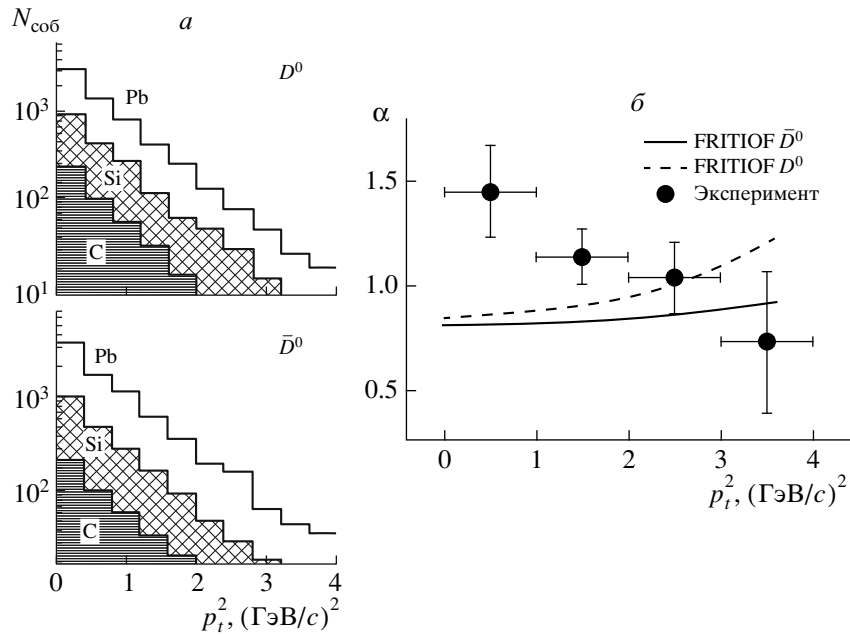


Рис. 8. *a* – Распределения по p_T^2 для D -мезонов; *б* – зависимость параметра α от p_T^2 . Точки – экспериментальные данные, кривые – результаты моделирования.

В работе [10] показано, что зависимость α 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 α с увеличением x_F .

На рис. 7*a* показаны исходные моделированные распределения событий в трех мишенях (C, Si, Pb) по переменной Фейнмана x_F для D^0 - и \bar{D}^0 -мезонов, из которых вычисляется параметр α .

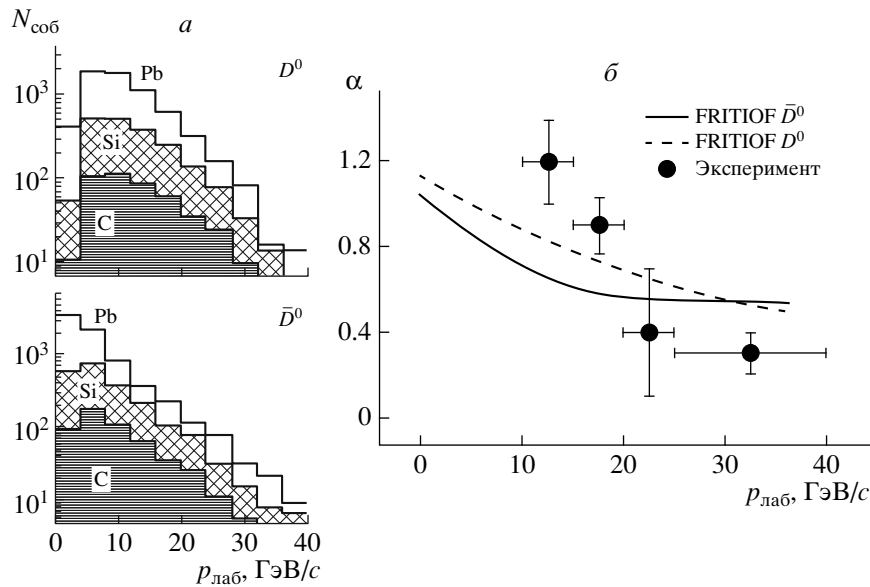


Рис. 9. а — Распределения по $p_{\text{лаб}}$ для D -мезонов; б — зависимость параметра α от $p_{\text{лаб}}$. Точки — экспериментальные данные, кривые — результаты моделирования.

График его зависимости от переменной x_F приведен на рис. 7б (сплошная и штриховая кривые). Там же приведены экспериментальные значения α для четырех интервалов по x_F .

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 [11] 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 α уменьшается с увеличением x_F во всей области изменения x_F , и эксперимент это качественно подтверждает.

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

Эксперимент	Энергия пучка, ГэВ	$\sigma(D^0)$, мкбн/нукл.	α ($\sigma \sim A^\alpha$)	n ($d\sigma/dx_F \sim (1-x_F)^n$)	b ($d\sigma/dp_t^2 \sim \exp(-bp_t^2)$)
SVD-2	70	7.1 ± 3.8	1.08 ± 0.12	6.8 ± 0.8	0.79 ± 0.15
E769 [7]	250	12.0 ± 3.8	0.92 ± 0.08	4.1 ± 0.6	0.95 ± 0.09
NA16 [7]	360	20.4 ± 16.0	—	—	—
NA27 [7]	400	18.3 ± 2.5	—	4.9 ± 0.5	1.0 ± 0.1
E-789 [8]	800	17.7 ± 4.2	1.02 ± 0.05	—	0.91 ± 0.12
E743 [7]	800	22.0 ± 14.0	—	8.6 ± 2.0	0.8 ± 0.2
E653 [7]	800	39.0 ± 15.0	—	11.0 ± 2.0	1.1 ± 0.2
HERA-B [9]	920	48.7 ± 10.6	0.97 ± 0.07	7.5 ± 3.2	0.84 ± 0.1

На рис. 8 показаны распределения по p_t^2 для моделированных D^0 и \bar{D}^0 -мезонов (рис. 8а) и зависимость параметра α от p_t^2 (рис. 8б). При сравнении моделированных по FRITIOF зависимостей и экспериментальных точек видно, что нет даже качественного согласия между моделью и экспериментом (экспериментальные ошибки значительны из-за небольшой статистики).

На рис. 9 мы приводим аналогичные распределения по $p_{\text{лаб}}$ 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 α приводится в работе [12].) Здесь мы видим качественное согласие эксперимента и модели, т.е. α уменьшается с увеличением $p_{\text{лаб}}$ нейтральных D -мезонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение приведем табл. 3, где 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 околопороговой энергии.

При сравнении поведения параметра A -зависимости сечения α 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 α прак-

тически не зависит от p_t^2 , в то время как экспериментальные точки указывают на уменьшение α с ростом p_t^2 .

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 09-02-00445 и НШ-1456-2008-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М. Ю. Боголюбский и др., Препринт № 96-98, ИФВЭ (Протвино, 1996); <http://web.ihep.su/library/pubs/prep1996/ps/96-98.pdf>
2. Е. Н. Ардашев и др., Препринт № 2009-9, ИФВЭ (Протвино, 2009); <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2009/ps/2009-09.pdf>
3. A. Shabetai, qm2008.bnl.gov/Program/8Feb/Session_XIV/qm08_shabetai.ppt
4. A. D. Frawley, T. Ullrich, and R. Vogt, Phys. Rept. **462**, 125 (2008).
5. BIS-2 Collab., Z. Phys. C **37**, 243 (1988).
6. А. Б. Кайдалов, О. И. Пискунова, ЯФ **43**, 1545 (1986).
7. J. A. Appel, in *Proceedings of X International Conference on Physics in Collision, Durham, North California, Jun. 21-23, 1990*.
8. M. Daniel Kaplan, http://arxiv.org/PS_cache/hep-ex/pdf/9610/9610003v1.pdf
9. S. Kupper, PhD Thesis (University of Ljubljana, 2007).
10. R. Vogt, http://arxiv.org/PS_cache/hep-ph/pdf/9907/9907317v1.pdf
11. А. П. Воробьев и др., Препринт № 2008-17, ИФВЭ (Протвино, 2008); <http://web.ihep.su/library/pubs/prep2008/ps/2008-17.pdf>
12. M. J. Leitch, http://arxiv.org/PS_cache/nucl-ex/pdf/9909/9909007v3.pdf

PROPERTIES OF NEUTRAL CHARMED MESONS IN pA INTERACTIONS AT 70 GeV

V. N. Ryadovikov
(On behalf of the SVD-2 Collaboration)

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-prong neutral charmed meson decay signal has been obtained and charm production cross section estimated at near-threshold energy ($\sigma(c\bar{c}) = 7.1 \pm 2.4(\text{stat.}) \pm 1.4(\text{syst.}), \mu\text{b/nucleon}$), 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 α parameter versus x_F , p_t^2 , and $p_{\text{лаб}}$. Experimental results are compared to the predictions of FRITIOF7.02 program.