

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-45

P1-99-45

Ц.Баатар<sup>1</sup>, А.И.Бондаренко<sup>2</sup>, Р.А.Бондаренко<sup>2</sup>,  
Б.Ганхуяг, Е.Н.Кладницкая, А.А.Кузнецов,  
О.В.Рогачевский, Г.П.Тонеева, В.В.Ужинский

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ  
И ПРОТОНОВ В АС-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
ПРИ ИМПУЛЬСЕ  $p = 4,2$  ГэВ/с на нуклон  
В РАМКАХ МОДЕЛИ FRITIOF

Направлено в журнал «Ядерная физика»

<sup>1</sup>Институт физики и технологии АН Монголии, Улан-Батор

<sup>2</sup>Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан, Ташкент

Баатар Ц. и др.

Анализ характеристик  $\pi^-$ -мезонов и протонов  
в  $AC$ -взаимодействиях при импульсе  $p = 4,2$  ГэВ/с на нуклон  
в рамках модели FRITIOF

Представлены средние множественности  $\pi^-$ -мезонов и протонов и их распределения по кинематическим переменным в  $pC$ -,  $dC$ -,  $\alpha C$ - и  $CC$ -взаимодействиях при импульсе  $p = 4,2$  ГэВ/с на нуклон. Экспериментальные распределения сравниваются с соответствующими распределениями, полученными по модели FRITIOF. Показано, что используемый для анализа вариант FRITIOF удовлетворительно описывает экспериментальные данные.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

### Перевод авторов

Baatar Ts. et al.

An Analysis of Characteristics for  $\pi^-$ -Mesons and Protons  
in Inelastic  $AC$ -Interactions at  $p = 4.2$  GeV/c per Nucleon  
in the Framework of FRITIOF Model

An average multiplicity of  $\pi^-$ -mesons, protons and their kinematical variable distributions in  $pC$ -,  $dC$ -,  $\alpha C$ -, and  $CC$ -interactions at  $p = 4.2$  GeV/c per nucleon are presented. The data are compared with predictions of the FRITIOF model. This version of the model is shown satisfactorily reproduce the data.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

# 1. Введение

Для выяснения механизма адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий часто используется методика сравнения результатов, полученных в эксперименте, с предсказаниями существующих теоретических моделей, таких как каскадно-испарительная модель (КИМ), модель кварк-глюонных струн (МКГС), FRITIOF и другие.

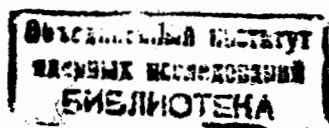
В области энергий 2–5 ГэВ на нуклон ядро-ядерные взаимодействия традиционно анализировались в рамках модели КИМ. Эта модель качественно описывает экспериментальные данные, хотя количественные расхождения имеют место. В частности, КИМ, например, занижает величину поперечных импульсов пионов и переоценивает их множественность [1]-[4].

Сравнение экспериментальных данных для  $AC$ -взаимодействий с МКГС показало их удовлетворительное согласие [5]-[7]. Вместе с тем при описании характеристик  $ATa$ -взаимодействий [8] обнаружилось существенное расхождение между экспериментом и моделью. В физике высоких энергий популярна и широко используется модель FRITIOF [9]. Считается, что ее нельзя использовать при умеренных энергиях, поскольку становится неприменимой идеология образования и распада кварковых струн. Однако аккуратный учет кинематических ограничений и релятивистски-инвариантный учет "ферми-движения" нуклонов позволяют [10] снизить формальный предел использования модели и удовлетворительно описать, как будет показано ниже, основные характеристики ядро-ядерных взаимодействий.

Настоящая работа посвящена анализу экспериментальных данных по протонам и  $\pi^-$ -мезонам из  $AC$ -взаимодействий в рамках модифицированной модели FRITIOF.

## 2. Экспериментальный материал

В работе использован материал, полученный на двухметровой пропановой пузырьковой камере ЛВЭ ОИЯИ, облученной в пуч-



ках протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц и ядер углерода с импульсом 4,2 ГэВ/с на нуклон на синхрофазотроне ОИЯИ. К настоящему времени получена окончательная статистика событий на пропане.

Из полных ансамблей взаимодействий легких ядер в пропановой камере были выделены неупругие взаимодействия с ядрами углерода  $pC-$ ,  $dC-$ ,  $\alpha C-$ , и  $CC-$  [11]. Однако при использовании критериев, примененных в [11], выделяется около 70% полного числа ядро-углеродных событий, которые определялись по известным сечениям  $Ap-$  и  $AC-$  взаимодействий и соотношению протонов и ядер углерода в молекуле пропана. Оставшиеся взаимодействия были статистически разделены на  $Ap-$  и  $AC-$  события с помощью введения весов на события. Вес определялся таким образом, чтобы числа событий на углероде и водороде соответствовали числам, ожидаемым из известных сечений неупругих взаимодействий [12]. Число вторичных частиц и их распределения были скорректированы путем введения поправок на пропущенные частицы, вылетающие в направлении, близком к оптической оси фотообъектива (крутые следы), и на частицы, импульсы которых не могли быть определены из-за малой длины следа частицы. Кроме того, все положительные частицы с импульсом выше 0,5 ГэВ/с получили веса, определяющие вероятность того, что данная частица является протоном или  $\pi^+$ -мезоном (до 0,5 ГэВ/с протоны и  $\pi^+$ -мезоны достаточно надежно идентифицируются по ионизации на следах этих частиц).

Подробно процедура корректировки экспериментальных данных, включенных в полный набор ядро-пропан взаимодействий, описана в [11]. Как и в предыдущих работах [6], [7], [13]–[15], для сравнения с модифицированной моделью FRITIOF использовались множественности и распределения  $\pi^-$ -мезонов и протонов-участников. Исключены испарительные протоны ( $p < 0,3$  ГэВ/с) и стриппинговые фрагменты ядер-снарядов ( $p > 3$  ГэВ/с,  $\theta < 4^\circ$ ).

### 3. Модель FRITIOF

Модель FRITIOF [9] предполагает двухчастичную кинематику неупругих адрон-адронных взаимодействий  $a+b \rightarrow a'+b'$ , где  $a'$  и  $b'$  - возбужденные состояния адронов  $a$  и  $b$ . Возбужденные состояния характеризуются массой, для выбора которой используется следующий подход: в системе центра масс сталкивающихся адронов закон сохранения энергии-импульса имеет вид

$$\begin{aligned} E_a + E_b &= E_{a'} + E_{b'} = \sqrt{s_{ab}}, \\ p_{az} + p_{bz} &= p_{a'z} + p_{b'z} = 0, \\ 0 &= \vec{p}_{a'\perp} + \vec{p}_{b'\perp}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E_a$  и  $E_b$  ( $E_{a'}$ ,  $E_{b'}$ ) - энергии исходных (конечных) адронов  $a$  и  $b$  ( $a'$ ,  $b'$ ), а  $p_{az}$  и  $p_{bz}$  - продольные компоненты импульсов (проекция импульсов на ось взаимодействия).

Складывая и вычитая первые два уравнения системы (1), преобразуем ее к виду

$$\begin{aligned} P_a^+ + P_b^+ &= P_{a'}^+ + P_{b'}^+, \\ P_a^- + P_b^- &= P_{a'}^- + P_{b'}^-, \\ 0 &= \vec{p}_{a'\perp} + \vec{p}_{b'\perp}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $P^+ = E + p_z$ ,  $P^- = E - p_z$ .

В модели используется следующее распределение по  $P_{a'}^-$  и  $P_{b'}^+$ :

$$\begin{aligned} dW &\sim dP_{a'}^- / P_{a'}^-, \\ dW &\sim dP_{b'}^+ / P_{b'}^+. \end{aligned} \quad (3)$$

Пределы изменения  $P_{a'}^-$  и  $P_{b'}^+$  определяются как

$$[P_a^-, P_b^-], \quad [P_b^+, P_a^+]. \quad (4)$$

В случае адрон-ядерных взаимодействий для первого соударения налетающего адрона  $a$  с каким-либо нуклоном ядра ( $a+N_1 \rightarrow a'+N_1'$ ) используется кинематика, определяемая уравнениями

(2) – (4). Для второго соударения ( $a' + N_2 \rightarrow a'' + N_2'$ ) используются аналогичные соотношения, однако условие (4) заменяется на условие

$$[P_{a'}^-, P_{N_2}^-], [P_{N_2}^+, P_{a'}^+]. \quad (5)$$

В результате в последовательных соударениях происходит последовательное увеличение массы адрона  $a$ , если передачи поперечного импульса малы.

Этот же подход применяется и при моделировании ядро-ядерных взаимодействий. Здесь рассматриваются реакции  $a' + b' \rightarrow a'' + b''$ . Распределение по  $P_{a''}^-$  и  $P_{b''}^+$  выбирается в прежнем виде, а область изменения  $P_{a''}^-$  и  $P_{b''}^+$  определяется как

$$[P_{a'}^-, P_{b'}^-], [P_{b'}^+, P_{a'}^+]. \quad (6)$$

Распределение по поперечному импульсу, которым обмениваются сталкивающиеся нуклоны, было выбрано в виде

$$dW = b^2 e^{-BP_T^2} P_T dP_T, \quad B = 6,7 \cdot (\text{ГэВ}/c)^{-2}.$$

В используемый нами вариант модели введены следующие изменения [16]:

- нижняя граница масс возбужденных нуклонов положена равной 1,1 ГэВ;
- в случае двухчастичного распада струн с массой меньше 1,7 ГэВ моделируется изотропный разлет частиц в системе покоя струны;
- в 50% случаев двухвершинной дифракции допускается обмен зарядами между сталкивающимися нуклонами;
- значение среднего квадрата поперечного импульса, которым обмениваются сталкивающиеся нуклоны, равно  $0,15(\text{ГэВ}/c)^2$ .

Все эти изменения введены в модель для достижения удовлетворительного описания распределений  $\pi^-$ -мезонов и протонов в

$np$ -взаимодействиях в интервале импульсов 1-5 ГэВ/с [16]. Далее вариант модели FRITIOF с этими изменениями использовался для сравнения с экспериментальными данными по широкому кругу нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий [17]–[19]. Используемый в настоящей работе банк моделированных событий, содержащих от 6 (dC) до 20 (CC) тысяч, был записан в виде DST и обработан по тем же условиям, что и экспериментальный материал.

#### 4. Результаты анализа

Начнем рассмотрение с характеристик  $\pi^-$ -мезонов. В таблице 1 представлены средние множественности  $\pi^-$ -мезонов в зависимости от массы ядра-снаряда вместе со значениями, рассчитанными по использованной версии модели FRITIOF. Как видно из таблицы, модель согласуется с экспериментом в пределах 5% для  $pC^-$ ,  $dC^-$ ,  $\alpha C^-$ , и  $CC$ -взаимодействий. В таблице 2 приведены

Статистика	Тип реакций			
	p+C	d+C	$\alpha$ +C	C+C
Число соб.	8371	5807	13318	20594
Экспер.	$0.407 \pm 0.006$	$0.686 \pm 0.009$	$0.968 \pm 0.007$	$1.439 \pm 0.007$
FRITIOF	$0.408 \pm 0.002$	$0.703 \pm 0.003$	$1.003 \pm 0.001$	$1.505 \pm 0.002$

Табл. 1. Средние множественности  $\pi^-$ -мезонов в неупругих (p, d,  $\alpha$ , C)+C-взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с на нуклон

средние значения кинематических характеристик  $\pi^-$ -мезонов в  $pC^-$ ,  $dC^-$ ,  $\alpha C^-$ , и  $CC$ -взаимодействиях при  $p=4,2$  ГэВ/с на нуклон. Наибольшее расхождение между экспериментом и моделью, наблюдаемое в  $pC^-$  и  $dC^-$  событиях, не превышает 6%. С увеличением атомной массы ядра-снаряда согласие экспериментальных и расчетных значений сравниваемых величин существенно улучшается. На рис. 1 представлены распределения  $\pi^-$ -мезонов по кинематическим переменным  $-p, p_\perp, y, \theta$ ,

Тип реакций	Средние значения кинематических переменных			
	$P_{\text{лаб.}} \text{ ГэВ/с}$	$\theta_{\text{лаб.}} \text{ град.}$	$P_T \text{ ГэВ/с}$	Быстрота $Y$
pC Экспер.	$0.503 \pm 0.007$	$50.8 \pm 0.6$	$0.248 \pm 0.003$	$0.832 \pm 0.013$
pC FRITIOF	$0.480 \pm 0.003$	$49.1 \pm 0.3$	$0.236 \pm 0.001$	$0.860 \pm 0.002$
dC Экспер.	$0.557 \pm 0.007$	$46.0 \pm 0.5$	$0.255 \pm 0.003$	$0.941 \pm 0.011$
dC FRITIOF	$0.540 \pm 0.002$	$44.6 \pm 0.2$	$0.240 \pm 0.001$	$0.970 \pm 0.003$
$\alpha$ C Экспер.	$0.583 \pm 0.004$	$44.1 \pm 0.3$	$0.250 \pm 0.001$	$1.000 \pm 0.006$
$\alpha$ C FRITIOF	$0.570 \pm 0.002$	$43.4 \pm 0.3$	$0.240 \pm 0.001$	$1.010 \pm 0.001$
CC Экспер.	$0.592 \pm 0.003$	$41.0 \pm 0.2$	$0.241 \pm 0.001$	$1.071 \pm 0.004$
CC FRITIOF	$0.600 \pm 0.001$	$40.9 \pm 0.1$	$0.240 \pm 0.001$	$1.090 \pm 0.003$

Табл. 2. Средние значения кинематических переменных  $\pi^-$ -мезонов для (p, d,  $\alpha$ , C)+C-взаимодействий при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с на нуклон

нормированные на полное число событий, в сравнении с расчетами по модели FRITIOF. На рис.1а представлены импульсные распределения  $\pi^-$ -мезонов в CC-взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с на нуклон. Модель несколько превышает экспериментальные значения при импульсах 0,2-0,6 ГэВ/с. Далее разность между экспериментом и моделью уменьшается. На рис.1б даны распределения по поперечному импульсу: расчетные значения превышают экспериментальные при  $p_T \approx 0,2-0,6$  ГэВ/с. На рис.1в сравниваются распределения по быстротам: экспериментальное и расчетное распределения  $\pi^-$ -мезонов имеют максимум при одном и том же значении быстроты  $y_0 \sim y_{\text{с.ч.м.}} \approx 1,1$  для NN-взаимодействий. Расчетные значения превышают экспериментальные в областях фрагментации ядер ( $y \sim -0,5 \div 0,5$  и  $y \sim 1,5 \div 2,5$ ). На рис. 1г представлены угловые распределения  $\pi^-$ -мезонов. Видно, что модель завышает множественность мезонов при малых углах  $\theta \sim 0^\circ \div 30^\circ$ . Возможно, учет поглощения  $\pi^-$ -мезонов в ядрах - остатках, не учитываемый в существующем варианте модели, может способствовать лучшему воспроизведению экспериментальных закономерностей.

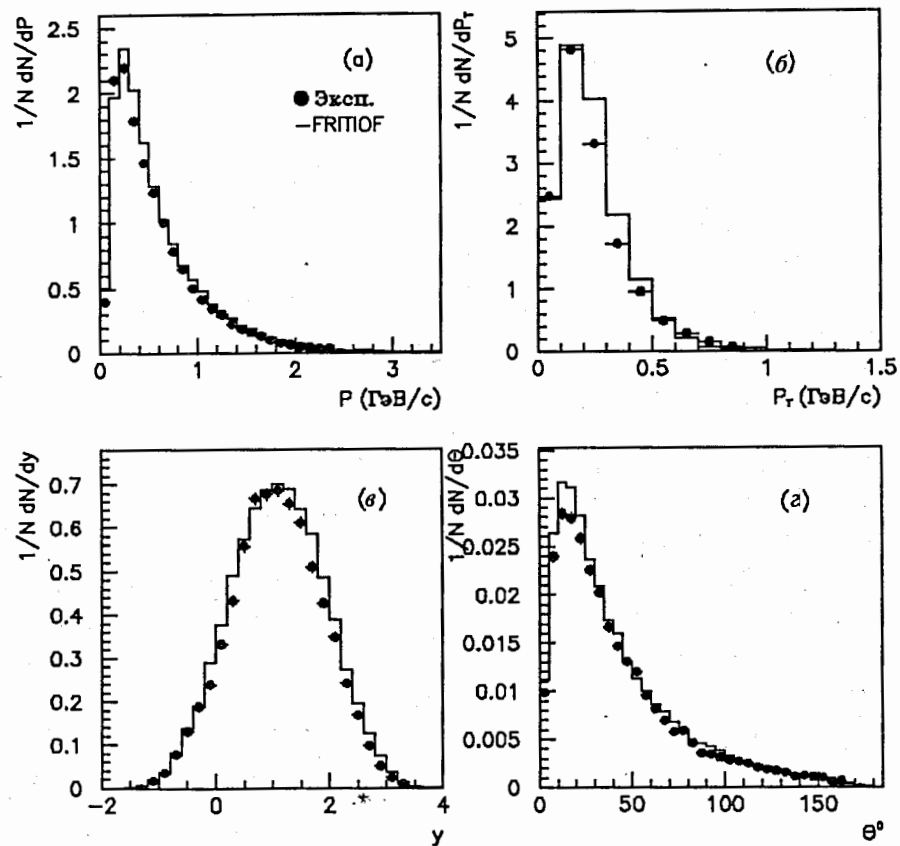


Рис. 1. Распределения по кинематическим переменным отрицательно заряженных частиц в CC- взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  А ГэВ/с на нуклон

В целом модель хорошо воспроизводит одночастичные распределения  $\pi$ -мезонов по кинематическим переменным и может быть использована в дальнейшем, более детальном анализе, а также для оценки выхода мезонов в соударениях тяжелых ионов.

В таблице 3 представлены средние множественности протонов-участников в  $AC$ -взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с в сравнении с расчетами по модели FRITIOF. Наибольшее рас-

Статистика	Тип реакций			
	$p+C$	$d+C$	$\alpha+C$	$C+C$
Число соб.	8371	5807	13318	20593
Экспер.	$1.82 \pm 0.01$	$2.10 \pm 0.02$	$2.90 \pm 0.01$	$4.43 \pm 0.02$
FRITIOF	$1.99 \pm 0.02$	$2.05 \pm 0.03$	$2.77 \pm 0.01$	$4.13 \pm 0.03$

Табл. 3. Средние множественности протонов-участников в неупругих ( $p$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ,  $C$ )+ $C$ -взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с

хождение наблюдается в пределах 10 % для  $pC$ -взаимодействий.

В таблице 4 приведены средние значения кинематических характеристик протонов-участников в  $AC$ -взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с на нуклон. Наибольшие расхождения наблюдаются в средних углах и средних импульсах протонов в  $pC$ -взаимодействиях (в пределах 10 %).

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные распределения протонов по кинематическим переменным в  $CC$ -взаимодействиях. На рис. 2а приведены импульсные распределения протонов.

Превышение экспериментальных данных над расчетными значениями наблюдается при значениях импульса протона в области  $p = 0,4 \div 1,0$  ГэВ/с. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями при  $p_{лаб} \sim 3$  ГэВ/с, по-видимому, связано с условием определения стриппинговых протонов. На рис. 2б представлены распределения протонов-участников по поперечному импульсу. Модель недооценивает экспериментальные значения при  $p_T \sim 0,3 \div 0,4$  ГэВ/с.

На рис.2в показаны распределения протонов по быстротам.

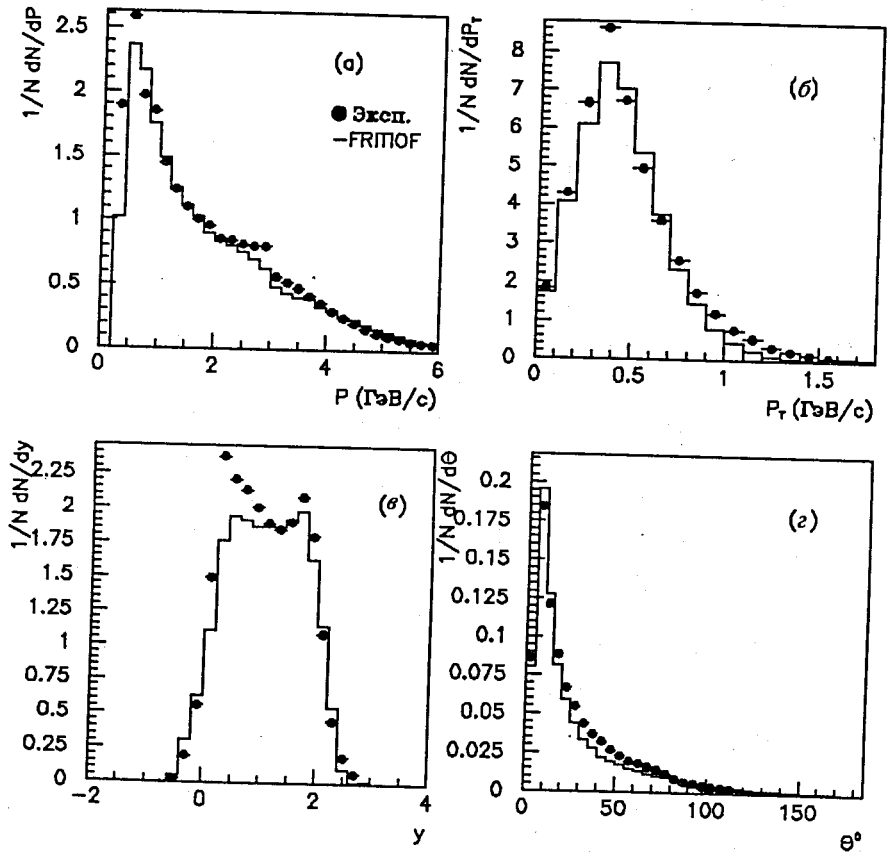


Рис. 2. Распределения по кинематическим переменным протонов-участников в  $CC$ -взаимодействиях при 4,2 А ГэВ/с на нуклон



Тип реакций	Средние значения кинематических переменных			
	$P_{lab}, \text{ГэВ}/c$	$\theta_{lab}, \text{град.}$	$P_T, \text{ГэВ}/c$	Быстрота, $Y$
pC Экспер.	$1.292 \pm 0.007$	$36.1 \pm 0.2$	$0.443 \pm 0.002$	$0.775 \pm 0.004$
pC FRITIOF	$1.170 \pm 0.003$	$39.3 \pm 0.3$	$0.420 \pm 0.001$	$0.720 \pm 0.004$
dC Экспер.	$1.289 \pm 0.008$	$36.5 \pm 0.2$	$0.437 \pm 0.002$	$0.765 \pm 0.005$
dC FRITIOF	$1.250 \pm 0.002$	$38.4 \pm 0.2$	$0.440 \pm 0.001$	$0.750 \pm 0.003$
$\alpha$ C Экспер.	$1.541 \pm 0.005$	$33.0 \pm 0.1$	$0.464 \pm 0.001$	$0.887 \pm 0.003$
$\alpha$ C FRITIOF	$1.450 \pm 0.002$	$33.6 \pm 0.3$	$0.408 \pm 0.001$	$0.817 \pm 0.003$
CC Экспер.	$1.857 \pm 0.004$	$27.5 \pm 0.1$	$0.476 \pm 0.001$	$1.051 \pm 0.002$
CC FRITIOF	$1.808 \pm 0.001$	$26.8 \pm 0.1$	$0.440 \pm 0.001$	$1.070 \pm 0.004$

Табл. 4. Средние значения кинематических переменных протонов для (p, d,  $\alpha$ , C)+C- взаимодействий при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с на нуклон

Видно, что экспериментальное распределение имеет два максимума при  $y \sim 0,2$  и  $1,5$  и минимум - при  $y \sim 1,1$ . Асимметрия быстрых  $y$ -распределений протонов обусловлена небольшой (10%) примесью дейтронов, которые смещают спектр в область больших быстрых при приписывании им массы протона. Расчетное распределение такой асимметрии не имеет. Модель, как видно, недооценивает выход медленных протонов в областях фрагментации ядер.

На рис.2г показаны угловые распределения протонов-участников. Видно, что небольшое расхождение между экспериментальными и расчетными значениями наблюдается в широком интервале углов.

В целом, хотя имеются некоторые расхождения в форме экспериментальных и расчетных распределений, проведенное сравнение экспериментальных инклюзивных распределений протонов по кинематическим переменным для pC-, dC-,  $\alpha$ C- и CC-взаимодействий с соответствующими распределениями, полученными в рамках модели FRITIOF, позволяет сделать вывод о качественном согласии модели FRITIOF с экспериментом для AC-взаимодействий.

Суммируя рассмотренное в данной работе, можно заключить, что

- используемая версия модели FRITIOF удовлетворительно описывает изучаемые средние характеристики  $\pi^-$ -мезонов и протонов в неупругих AC-взаимодействиях;
- модель дает качественное описание распределений  $\pi^-$ -мезонов;
- детальное описание распределений протонов в областях фрагментаций ядер все еще остается проблемой.

Авторы благодарят участников сотрудничества по исследованиям на двухметровой пропановой пузырьковой камере за получение экспериментального материала, лаборантов за просмотр пленок и измерение событий, Л.А.Ратникову за помощь в оформлении рукописи.

## Литература

- [1] Агакишиев Г.Н. и др., ЯФ, 1984, т.40, с.1209, Zeit. Phys. C 1985, v.27, p.177.
- [2] Бондаренко А.И. и др., Препр. ОИЯИ Р1-98-155, Дубна, 1998.
- [3] Агакишиев Г.Н. и др., ЯФ, 1981, т.34, с.1517.
- [4] Агакишиев Г.Н. и др., ЯФ, 1990, т.51, с.758.
- [5] Backovich S. et al., Phys.Rev.C, 1992, v.46, p.1501.
- [6] Бекмирзаев Р.Н. и др., ЯФ, 1995, т.58, с. 63.
- [7] Бекмирзаев Р.Н. и др., ЯФ, 1995, т.58, с.1642.
- [8] Бекмирзаев Р.Н. и др., ЯФ, 1995, т.58, с. 1822.
- [9] Andersson B. et al. Nucl.Phys., 1987, v. 281B, p.289; Nilsson-Almqvist B., Stenlund E. Comp. Phys. Comm., 1987 v.43, p.387.



- [10] Uzhinskii V.V. JINR prepr. **E2-96-192**, Dubna, 1996.
- [11] Бондаренко А.И. и др., Сообщ. ОИЯИ **P1-98-292**, Дубна, 1998.
- [12] Агакишиев Г.Н. и др., Сообщ. ОИЯИ, **1-83-662**, Дубна, 1983.
- [13] Армутлийски Д. и др., ЯФ, 1987, т.45, с.1047, Zeit.Phys.A, 1987, v.328, p.455.
- [14] Бондаренко А.И. и др., Препр. ОИЯИ **P1-96-447**, Дубна, 1996, ЯФ, 1997, т.60, с.2004.
- [15] Агакишиев Г.Н. и др., ЯФ, 1984, т.40, с.1209, Zeit.Phys.C, 1985, v.27, p.177.
- [16] Ганхуяг Б. Сообщ. ОИЯИ, **P2-98-26**, Дубна, 1998.
- [17] Ганхуяг Б, Ужинский В.В. Сообщ. ОИЯИ, **P2-96-419**, Дубна, 1996. Ganhuayag B, Uzhinskii V. Czechoslovak Journal of Physics, 1997, v.47, p. 913.
- [18] Ганхуяг Б., Ужинский В.В. Сообщ. ОИЯИ, **P1-97-315**, Дубна, 1997.
- [19] Ганхуяг Б., Ужинский В.В. Сообщ. ОИЯИ, **P2-97-397**, 1997.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 февраля 1999 года.