

Т - 813



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**1-80-532**

**ТУВДЕНДОРЖ  
ДЭНДЭВИЙН**

**МНОЖЕСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕУПРУГИХ  
ПИОН-УГЛЕРОДНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ**

**Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук**

**Дубна 1980**

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Э.Г. БОСС

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

А.В. ВЕРЕМОВ

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

В.С. МУРЗИН

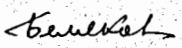
Ведущее научно-исследовательское учреждение -  
Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, Москва

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1981 г. в \_\_\_ часов  
на заседании специализированного совета Д-047.01.02 при Лаборатории  
высоких энергий Объединенного института ядерных исследований по ад-  
ресу: г. Дубна, Московской области, Лаборатория высоких энергий ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1980 г.

Ученый секретарь

специализированного совета  М.Ф. Лихачев

### Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Изучение процессов множественной генерации адронов в адрон-ядерных взаимодействиях при высоких энергиях является одним из главных направлений исследования проблемы сильного взаимодействия.

К началу нашего эксперимента появились новые теоретические идеи и методы, позволяющие извлекать и использовать такую фундаментальную информацию, как масштабная инвариантность, корреляционный анализ, свойства одночастичных распределений и т.п. Актуальность этого рода исследований сохранится на многие годы. С ростом числа вторичных частиц, образованных при высоких энергиях, в основном исследуются характеристики одной или нескольких частиц при усреднении по всем другим вторичным частицам (инклюзивные процессы). Настоящая работа является одним из первых систематических исследований этих процессов в пион-ядерных взаимодействиях при энергиях нескольких десятков ГэВ.

Цель работы - экспериментальное исследование множественной генерации заряженных и нейтральных пионов в пион-углеродных взаимодействиях; систематический анализ полученных данных по множественности, одночастичным инклюзивным спектрам и корреляционным характеристикам вторичных частиц и сравнение этих результатов с теоретическими моделями для определения их области применимости.

Новизна работы состоит в том, что впервые изучены характеристики  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  и  $\pi^0$ - мезонов, а также  $\gamma$  - квантов, образованных в  $\pi\pi^{-12}C$ - взаимодействиях при высоких энергиях.

Впервые получены результаты для инклюзивных и полупинклюзивных реакций с рождением  $\gamma$  - квантов, заряженных пионов и протонов.

Исследованы двухчастичные корреляции  $\gamma$  -квантов и заряженных пионов. Изучены свойства быстрой и медленной компонент частиц, рожденных в пион-углеродных взаимодействиях.

Научная ценность работы. Получен и проанализирован большой экспериментальный материал по пион-углеродным взаимодействиям.

Данные по пион-углеродным взаимодействиям имеют большое значение в общей проблеме изучения адрон-ядерных соударений. Например, данные по рождению нейтральных пионов в адрон-ядерных взаимодействиях, изученные в настоящей работе, практически отсутствуют.

Сравнение экспериментальных данных по взаимодействиям адронов с ядрами с взаимодействиями со свободными протонами при одной и той же энергии, полученных единой методикой, важно для проверки моделей множественного рождения частиц.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
Библиотека

Практическая ценность работы. Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы при проектировании новых экспериментов по исследованию взаимодействий частиц и ядер высоких энергий с ядрами.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на международных конференциях и семинарах по физике высоких энергий в Амстердаме (1971), Оксфорде (1972), Батави (1973), Экс-ан-Провансе (1973), Тбилиси (1976), а также на семинарах ЛВЭ и совещаниях международного сотрудничества по обработке снимков с 2-метровой пропановой камеры ЛВЭ.

Публикации. Из общего числа более 30 работ по адрон-ядерным взаимодействиям в основу настоящей диссертации легли результаты 17 работ, опубликованных в виде препринтов ОИЯИ и статей в журналах "Ядерная физика", "Phys. Lett.", "Nucl. Phys." в течение 1971-1979 гг.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 123 страницы машинописного текста, 72 рисунка и библиографию, включающую 149 наименований.

Автор защищает:

1. Прделанную работу по получению и обработке 10000 пион-углеродных взаимодействий при  $P_{\pi} = 40$  ГэВ/с, выявленных на снимках с двухметровой пропановой камеры, и 17000  $\gamma$ -квантов, образованных в этих взаимодействиях.

2. Результаты, полученные при исследовании общих свойств  $\pi^{-}n$  - взаимодействий.

3. Результаты исследования инклюзивных и полуйнклюзивных спектров  $\gamma$ -квантов, заряженных пионов и протонов, образованных в пион-углеродных взаимодействиях.

4. Результаты исследования двухчастичных корреляций  $\gamma$ -квантов и заряженных пионов.

5. Свойства быстрой и медленной компонент вторичных пионов, образованных в  $\pi^{-}n$  - взаимодействиях.

#### Содержание диссертации

Во введении отмечается актуальность изучения процессов множественного рождения частиц в адрон-ядерных взаимодействиях, сформулированы основная цель и содержание работы.

В главе I описана методика обработки экспериментальной информации.

Работы, вошедшие в настоящую диссертацию, были выполнены на основе данных, полученных при обработке снимков с двухметровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ, помещенной в магнитное поле напряженностью  $H \approx 15$  кГс.

Камера экспонировалась в пучке отрицательных  $\pi^{-}$ -мезонов с импульсом  $p = (40, 0 \pm 0, 24)$  ГэВ/с на ускорителе ИФЭЭ в г. Серпухове.

Просмотр стереофотоснимков осуществлялся на просмотрных столах БПС-1 и БПС-2. По критериям, принятым для пропановой пузырьковой камеры, события идентифицировались как  $\pi^{-}p$ ,  $\pi^{-}n$  и  $\pi^{-}C$ -взаимодействия вместе с  $\gamma$ -квантами и нейтральными странными частицами.

Было дважды просмотрено  $\sim 60000$  стереофотографий. Эффективность двойного просмотра по поиску событий составила 99,7%, по поиску  $\gamma$ -квантов и нейтральных странных частиц - 99%.

Измерения треков проводились на полуавтоматах типа ПУОС, работающих на линии с ЭВМ БЭСМ-4.

Математическая обработка проводилась с помощью программы ГЕОФИТ, созданной для ЭВМ типа СДС-1604А. Точность определения параметров заряженных вторичных пионов, удовлетворяющих критериям  $\chi^2_{xy}, \chi^2_z \leq 3,5$ , оказалась равной:

$$\langle \frac{\Delta p}{p} \rangle = (13,9 \pm 0,03)\%$$

$$\langle \Delta tg\alpha \rangle = 0,0061 \pm 0,0001$$

$$\langle \Delta \beta \rangle = (0,0037 \pm 0,0001) \text{ рад, а для протонов}$$

$$\langle \frac{\Delta p}{p} \rangle = (4,6 \pm 0,1)\%$$

для  $\gamma$ -квантов:

$$\langle \frac{\Delta p}{p} \rangle = (12,4 \pm 0,1)\%$$

$$\langle \Delta tg\alpha \rangle = 0,00317 \pm 0,00003$$

$$\langle \Delta \beta \rangle = (0,0045 \pm 0,0001) \text{ рад,}$$

где  $\alpha$  - угол наклона следа относительно горизонтальной плоскости камеры,  $\beta$  - угол в этой плоскости относительно направления первичного  $\pi^{-}$ -мезона.

В  $\pi^{-}p$ -соениях присутствует примесь  $\alpha = 0,44$  от взаимодействий на квазисвободных нуклонах ядер углерода.

Выбрана эффективная область для регистрации  $\gamma$ -квантов и "звезд". Для учета возможных потерь  $\gamma$ -квантов и медленных протонов были введены соответствующие поправки.

Во второй главе приводятся физические результаты по множественности вторичных заряженных и нейтральных пионов, рожденных в пион-углеродных взаимодействиях. Здесь же приводятся результаты исследования вопросов, связанных со скейлингом по множественности и парциальным коэффициентам неупругости.

Средняя множественность вторичных быстрых заряженных частиц, образованных в  $\pi^-^{12}C$ -взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с, составляет  $\langle n_s \rangle = 6,54 \pm 0,05 / 1$ ,  $\langle n_s \rangle = 6,32 \pm 0,03 / 9$  соответственно по просмотрным и измеренным данным.

Результаты по множественности сравнивались с расчетами, выполненными по каскадной модели. Модель только качественно описывает экспериментальные данные. Вычисленное среднее число образовавшихся частиц приблизительно на единицу выше, чем дает эксперимент. Отметим слабую зависимость  $\langle n_s \rangle$  от числа медленных протонов  $^{12}/2$ .

Имеющиеся экспериментальные данные для величины  $R_A = \frac{\langle n_s \rangle_{\pi^+A}}{\langle n_s \rangle_{\pi^+p}}$  вместе с нашими данными показали, что для легких ядер  $R_A = const$  в области энергий вплоть до 200 ГэВ. Для величины  $\alpha$  в соотношении  $R_A = A^\alpha$  получено значение:  $\alpha = 0,070 \pm 0,004$ .

Величина отношения  $\langle n_s \rangle / D$  не зависит от числа испущенных во взаимодействии протонов  $^{13}/3$ .

Для средней множественности  $\pi^0$ -мезонов, образованных в  $\pi^-^{12}C$ -взаимодействиях, получено  $\langle n_{\pi^0} \rangle = 2,91 \pm 0,04 / 4$  и значение  $1,15 \pm 0,02$  для величины  $R_A$ , которое совпадает с результатом для заряженных пионов.

Вычисленное по каскадной модели среднее число  $\pi^0$ -мезонов оказалось на единицу выше экспериментального значения

$$\langle n_{\pi^0} \rangle_{\pi^-^{12}C}^{теор} = 3,64 \pm 0,03 / 5.$$

Среднее число  $\pi^0$ -мезонов в  $\pi^- C$ -взаимодействиях не зависит от числа медленных вторичных протонов в событии и растет с увеличением числа вторичных заряженных пионов  $^{5}/5$ . Подробная положительная корреляция имеет место и для  $\pi^- p$  и  $\pi^- n$ -взаимодействий.

На основе результатов измерения вторичных следов в  $\pi^- p$ ,  $\pi^- n$  и  $\pi^-^{12}C$ -взаимодействиях получено подтверждение скейлингового поведения распределений по множественности вторичных частиц (КНО-скейлинг), указание на которое было известно только по просмотрным данным.

Таким образом, КНО-скейлинг наблюдается для разного типа взаимодействий в широком диапазоне энергий  $^{3}/3$ .

Таблица I

Среднее число  $\pi^0$ -мезонов в  $\pi^- C$ -взаимодействиях в зависимости от числа вторичных заряженных частиц (кроме наблюдаемых протонов)  $^{5}/5$

$N_p^* = 0$	$N_p = 1^*$	$N_p = 2$	$N_p = 3+5$
$n_{\pm} \langle n_{\pi^0} \rangle$	$n_{\pm} \langle n_{\pi^0} \rangle$	$n_{\pm} \langle n_{\pi^0} \rangle$	$n_{\pm} \langle n_{\pi^0} \rangle$
0) 2,14 $\pm$ 0,37	0) 1,44 $\pm$ 0,18	0) 2,32 $\pm$ 0,32	0) 2,21 $\pm$ 0,32
1) 2,72 $\pm$ 0,18	1) 2,24 $\pm$ 0,19	1) 2,51 $\pm$ 0,29	1) 3,21 $\pm$ 0,41
2) 2,90 $\pm$ 0,23	2) 2,65 $\pm$ 0,20	2) 3,20 $\pm$ 0,30	2) 3,08 $\pm$ 0,29
3) 2,62 $\pm$ 0,24	3) 3,34 $\pm$ 0,24	3) 3,25 $\pm$ 0,26	3) 3,71 $\pm$ 0,34
4) 2,86 $\pm$ 0,34	4) 3,22 $\pm$ 0,29	4) 4,60 $\pm$ 0,39	4) 3,71 $\pm$ 0,34
5) 4,26 $\pm$ 0,34	5) 3,62 $\pm$ 0,48	5) 3,97 $\pm$ 0,46	5) 3,71 $\pm$ 0,34
6) 4,26 $\pm$ 0,34	6) 3,62 $\pm$ 0,48	6) 3,97 $\pm$ 0,46	6) 3,71 $\pm$ 0,34
7) 4,26 $\pm$ 0,34	7) 3,62 $\pm$ 0,48	7) 3,97 $\pm$ 0,46	7) 3,71 $\pm$ 0,34
8) 4,26 $\pm$ 0,34	8) 3,62 $\pm$ 0,48	8) 3,97 $\pm$ 0,46	8) 3,71 $\pm$ 0,34
9) 4,26 $\pm$ 0,34	9) 3,62 $\pm$ 0,48	9) 3,97 $\pm$ 0,46	9) 3,71 $\pm$ 0,34
10) 4,26 $\pm$ 0,34	10) 3,62 $\pm$ 0,48	10) 3,97 $\pm$ 0,46	10) 3,71 $\pm$ 0,34
11) 4,26 $\pm$ 0,34	11) 3,62 $\pm$ 0,48	11) 3,97 $\pm$ 0,46	11) 3,71 $\pm$ 0,34
12) 4,26 $\pm$ 0,34	12) 3,62 $\pm$ 0,48	12) 3,97 $\pm$ 0,46	12) 3,71 $\pm$ 0,34
13) 4,26 $\pm$ 0,34	13) 3,62 $\pm$ 0,48	13) 3,97 $\pm$ 0,46	13) 3,71 $\pm$ 0,34
14) 4,26 $\pm$ 0,34	14) 3,62 $\pm$ 0,48	14) 3,97 $\pm$ 0,46	14) 3,71 $\pm$ 0,34
15) 4,26 $\pm$ 0,34	15) 3,62 $\pm$ 0,48	15) 3,97 $\pm$ 0,46	15) 3,71 $\pm$ 0,34

\* Исключены взаимодействия на квазисвободных нуклонах ядра.

Значения величины парциальных коэффициентов неупругости для  $\pi^-^{12}C$ -взаимодействий составляют 0,25 для  $\pi^+$ ,  $\pi^0$  и 0,40 для  $\pi^-$ -мезонов, что совпадает с аналогичными данными для  $\pi^- p$ -столкновений и практически не зависит от числа испущенных в событии протонов  $^{6}/6$ .

Показано, что имеет место аналог КНО-скейлинга, так называемый "частный" КНО-скейлинг. Экспериментальные распределения удовлетворительно описываются универсальной функцией  $\psi'$ , определяемой соотношением:

$$\psi' \left( \frac{n}{\bar{n}(x)} \right) = \frac{\bar{n}(x)}{d\sigma} \cdot \frac{dG_n}{dx}$$

где  $d\sigma$  - сечение рождения  $n$  - заряженных частиц;  $\bar{n}(x)$  - средняя ассоциативная множественность частиц, имеющих фиксированное значение парциального коэффициента неупругости  $(x)$  <sup>/7/</sup>.

Глава 3 посвящена изложению результатов исследования инклюзивных реакций с образованием  $\gamma$  - квантов, заряженных пионов и протонов.

В начале этой главы кратко изложен инклюзивный метод изучения множественных процессов. Рассмотрены гипотезы Фейнмана, Янга.

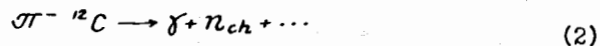
В таблице 2 приведены общие характеристики  $\gamma$  - квантов, рожденных в  $\pi^- C$ ,  $\pi^- p$  и  $\pi^- n$  - взаимодействиях <sup>/5/</sup>.

Таблица 2

Тип взаим.	$\langle P \rangle$ (ГэВ/с)	$\langle P_{  } \rangle$ (ГэВ/с)	$\langle P_{\perp} \rangle$ (ГэВ/с)	$\langle P_{\perp}^2 \rangle$ (ГэВ/с)	$\langle \theta \rangle$	$\langle \cos \theta \rangle$
$\pi^- C$	$1,365 \pm 0,059$	$1,319 \pm 0,059$	$0,183 \pm 0,006$	$0,079 \pm 0,012$	$0,455 \pm 0,012$	$0,810 \pm 0,008$
$\pi^- p$	$1,62 \pm 0,059$	$1,586 \pm 0,059$	$0,179 \pm 0,007$	$0,140 \pm 0,064$	$0,351 \pm 0,009$	$0,878 \pm 0,006$
$\pi^- n$	$1,838 \pm 0,117$	$1,807 \pm 0,117$	$0,164 \pm 0,006$	$0,056 \pm 0,005$	$0,324 \pm 0,014$	$0,836 \pm 0,009$

Значения  $\langle P_{\perp} \rangle_{\gamma}$  не зависят от числа вторичных протонов ( $N_p$ ) и близки к значению для  $\pi^- p$  - взаимодействий <sup>/16/</sup>.

Рассмотрены одночастичные инклюзивные и полунклюзивные распределения для процесса:



На рис. 1 приведены нормированные поперечные сечения для реакции (1) в зависимости от продольной скорости  $\gamma$  - квантов, вычисленной в лабораторной системе координат <sup>/8/</sup>.

Из рисунка видно, что в области  $1 \leq y \leq 3$  величина нормированного сечения не зависит от "y", т.е. наблюдается плато. На этом же рисунке приведены аналогичные данные для реакции:



при том же первичном импульсе. Нормированные сечения в области плато для реакций (1) и (3) совпадают с точностью 8%. При  $y^* = 0$  сечения совпадают с соответствующими данными для  $pp$  - взаимодействий при  $E_p = 500-1500$  ГэВ. Это может служить указанием на выполнение масштабной инвариантности в таких реакциях.

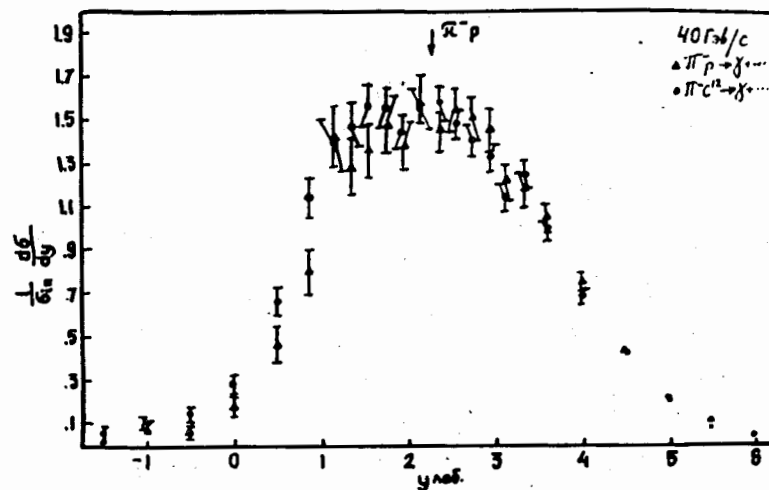


Рис. 1. Нормированные поперечные сечения для реакций (1) и (3) в зависимости от продольной скорости в лабораторной системе координат

Одночастичные спектры  $\gamma$  - квантов  $\frac{1}{\sigma_{in}} \frac{dG}{dy}$  для реакций (1) и (3) оказались равными в области фрагментации первичной частицы. Такой результат показывает, что имеет место факторизация сечения, которая согласуется с предсказанием партонной модели <sup>/8/</sup>.

На рис. 2 показано распределение нормированных поперечных сечений  $\frac{1}{\sigma_{in}} \frac{dG}{dP_{\perp}}$  для реакций (1) и (3) в зависимости от продольного импульса  $\gamma$  - квантов в лабораторной системе координат, там же приведены отношения этих величин ( $R$ ). Видно, что в области  $P_{\perp}^{лаб} \leq 0,5$  ГэВ/с (область фрагментации мишени) нормированные сечения отличаются, тогда как для  $P_{\perp}^{лаб} > 1$  ГэВ/с они совпадают (с точностью  $\pm 8\%$ ); таким образом, влияние ядра существенно сказывается на медленных вторичных частицах. То же самое получается на основе анализа нормированных поперечных сечений  $\frac{1}{\sigma_{in}} \frac{dG}{dP_{\perp}}$  в зависимости от продольного импульса в антилабораторной системе координат. При всех множественностях вторичных заряженных частиц, в области фрагментации ядра мишени они отличаются. С ростом множественности вторичных заряженных частиц это отличие растет <sup>/4/</sup>.

$$A_1 = (1,73 \pm 0,09) \text{ мбн ГэВ}^{-1} \text{с}, \quad A_2 = 1,08 \pm 0,02,$$

$$A_3 = (5,58 \pm 0,07) \text{ ГэВ/с}^{-1} \text{ для } \pi^- \text{-мезонов.}$$

Таблица 3

Множественность протонов	$\pi^-$ - мезоны			$\pi^+$ - мезоны		
	$\langle \gamma \rangle$ лаб	$D \langle \gamma \rangle$	$\langle P_L \rangle$ (МэВ/с)	$\langle \gamma \rangle$ лаб	$D \langle \gamma \rangle$	$\langle P_L \rangle$ (МэВ/с)
0	$2,63 \pm 0,01$	1,56	$367 \pm 2$	$2,20 \pm 0,01$	1,35	$378 \pm 2$
1	$2,44 \pm 0,02$	1,86	$351 \pm 3$	$2,01 \pm 0,02$	1,57	$372 \pm 4$
2	$2,24 \pm 0,03$	1,79	$341 \pm 7$	$1,90 \pm 0,03$	1,42	$390 \pm 7$
3	$2,14 \pm 0,05$	1,82	$345 \pm 10$	$1,71 \pm 0,04$	1,30	$375 \pm 11$
$\geq 4$	$2,00 \pm 0,06$	1,76	$330 \pm 14$	$1,75 \pm 0,06$	1,42	$396 \pm 17$
Все	$2,46 \pm 0,01$	1,75	$354 \pm 1$	$2,05 \pm 0,01$	1,45	$378 \pm 2$

Особенностью распределений  $\frac{1}{\pi} \frac{d\sigma}{d\gamma}$  является разница в спектрах  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов: максимумы распределений значительно сдвинуты друг относительно друга. Максимум в распределении  $\pi^+$ -мезонов наблюдается в области  $\gamma_{max}^* = -0,7$ , тогда как для  $\pi^-$ -мезонов  $\gamma_{max}^* = +0,5$  (рис. 3).

На рис. 4 показано отношение:

$$R = \left( \frac{1}{\sigma_{in}} \frac{d\sigma}{dX} \right)_{\pi^-} / \left( \frac{1}{\sigma_{in}} \frac{d\sigma}{dX} \right)_{\pi^+}$$

в зависимости от  $X = \frac{P_L^*}{P_{max}^*}$ . Отношение инклюзивных спектров максимально в области  $X \approx -1$  (область фрагментации ядра), затем спадает, пересекая значение  $R \approx 1$  в районе  $X = 0,1$ . Нет существенной разницы в поведении  $R$  для  $\pi^-$  и  $\pi^+$ -мезонов.

В области  $X < -0,6$  отношение  $R$  сильнее зависит от атомного номера ядра, чем ожидается из соотношения  $R \sim A^{1/3}$ .

Распределение  $\pi^\pm$ -мезонов по быстротам в  $\pi^-$ - $^{12}\text{C}$ -взаимодействиях с различным числом идентифицированных протонов показало, что как для  $\pi^+$ , так и для  $\pi^-$ -мезонов максимум спектров смещается в сторону малых значений быстрот с ростом множественности протонов  $N_p$ .

Структурные функции для  $\pi^\pm$ -мезонов изучены в корреляции с числом испущенных из взаимодействий  $\pi^\pm$ -мезонов и медленных протонов  $^{10}\text{O}$ . Для этого все события были разбиты на группы с числом вторичных  $\pi^\pm$ -мезонов  $n_\pi \leq 6$  и  $n_\pi > 6$ , причем отдельно рассматривались взаимодействия с числом идентифицированных протонов  $N_p = 0, 1$  и  $N_p \geq 2$ .

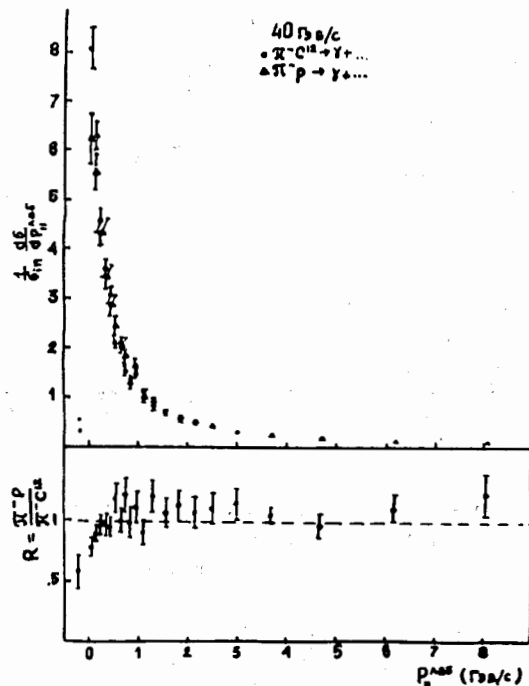


Рис. 2. Распределение нормированных поперечных сечений  $\frac{1}{\sigma_{in}} \frac{d\sigma}{dP_L}$  для реакций (1) и (3) в зависимости от продольного импульса  $\gamma$ -квантов в лабораторной системе координат.

В таблице 3 приведены средние характеристики заряженных пионов в зависимости от числа наблюдаемых протонов  $N_p$ .

Распределения вторичных заряженных пионов по поперечным импульсам ( $P_L$ ) аппроксимировались выражением вида:

$$\frac{d\sigma}{dP_L} = A_1 P_L^{A_2} e^{-A_3 P_L}$$

с параметрами:  $A_1 = (2,12 \pm 0,11) \cdot 10^4 \text{ мбн ГэВ}^{-1} \text{с}$ ,  $A_2 = 1,08 \pm 0,02$ ,  $A_3 = (5,99 \pm 0,07) \text{ ГэВ/с}^{-1}$  для  $\pi^+$ -мезонов;

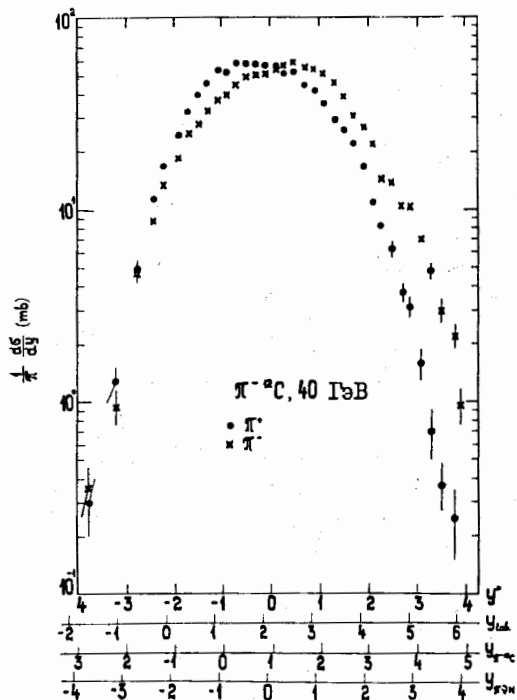


Рис. 3. Распределение по продольным быструтам для  $\pi^+$  и  $\pi^-$ - мезонов, образованных в  $\pi^- p$ - взаимодействиях.

Распределения структурных функций для всех  $\pi p$  и  $\pi^- p$ - взаимодействий с  $n_\pi \leq 6$  имеют экспоненциальный вид.

Структурные функции для событий с  $n_\pi > 6$  удается описывать одной экспонентой только в случае  $\pi p$  и  $\pi^- p$ - взаимодействий с малой множественностью протонов ( $N_p = 0, 1$ ).

Для всех  $\pi^- p$ - взаимодействий ( $n_\pi > 6$ ) наилучшие условия аппроксимации достигаются при использовании выражения, состоящего из суммы двух экспонент:

$$f(p_1) = A_1 \exp(-B_1 p_1) + A_2 \exp(-B_2 p_1).$$

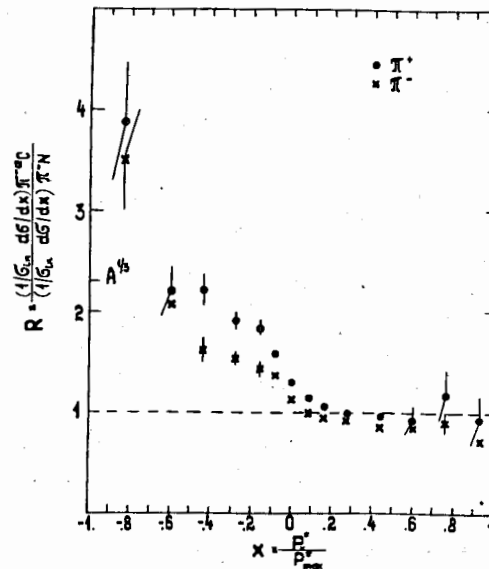


Рис. 4. Зависимость отношения  $R$  от  $X = \frac{P_{max}^*}{P_{max}}$

Причем этот результат в основном связан с  $\pi^- p$ - взаимодействиями, имеющими не только большую множественность  $\pi^-$ - мезонов ( $n_\pi > 6$ ), но и протонов ( $N_p \geq 2$ ). Значения полученных параметров  $B_1$  и  $B_2$  приведены в таблице 4.

В конце третьей главы представлены результаты изучения инклюзивной реакции <sup>11,17/</sup>



с числом испущенных протонов  $n \geq 1$ .

Наблюдается приближенное эмпирическое соотношение:

$$W_{N_p} = W_1^{N_p}. \quad (5)$$

Таблица 4

Значения параметров  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (ГэВ/с)<sup>-1</sup> в распределении

$$f(p_\perp) = A_1 \exp(-\beta_1 p_\perp) + A_2 \exp(-\beta_2 p_\perp)$$

для  $\pi C$  - взаимодействий с  $n_\pi > 6$

Тип взаимодействия	$\pi^+$			$\pi^-$		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\bar{\chi}^2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\bar{\chi}^2$
ПС $N_p \geq 2$	$5,71 \pm 0,26$	$2,4 \pm 1,7$	0,9	$6,78 \pm 0,35$	$3,38 \pm 0,97$	1,3
ПС, все	$5,86 \pm 0,25$	$3,1 \pm 1,0$	1,2	$6,60 \pm 0,22$	$3,31 \pm 0,67$	1,3

где  $W_1$  - вероятность наблюдения событий с одним протоном, испущенным "назад";  $W_{N_p}$  - вероятность наблюдения событий с числом  $N_p$  испущенных "назад" протонов.

Выражение (5) указывает на независимость излучения разного числа протонов в заднюю полусферу. Для протонов, испущенных "вперед", такого вывода сделать нельзя, так как для них не получается простого соотношения типа (5).

Изучение реакции (4) показало:

а) средние характеристики заряженных пионов в событиях с протоном "назад" такие же, как и во всех  $\pi^- \pi^+ C$  - взаимодействиях;

б) не наблюдается существенной зависимости средних множественностей  $\pi^\pm$ -мезонов от числа испущенных "назад" протонов и их импульсов;

в) средние характеристики протонов в событиях с протоном "назад" и во всех  $\pi^- \pi^+ C$  - взаимодействиях не отличаются друг от друга, за исключением средних множественностей протонов.

Изучены структурные функции для протонов, вылетающих под различными углами, в том числе и для событий с разным числом этих протонов.

Полученные распределения аппроксимировались одной или суммой двух экспонент в зависимости от условий достижения наилучшей аппроксимации:

$$f_1(p^2) = A_1 \exp(-\beta_1 p^2) \text{ и } f_2(p^2) = A_2 \exp(-\beta_2 p^2) + A_3 \exp(-\beta_3 p^2). \quad (6)$$

Можно отметить следующие факты: значения параметров  $\beta_1$  для  $\pi^+ C$  и  $\pi^- n$  взаимодействий совпадают со значениями параметра  $\beta_3 \approx 9$  для протонов, испущенных "вперед" из  $\pi^- \pi^+ C$  - взаимодействий, в

в том числе и в разных интервалах "передних" углов. Таким образом, среди протонов, испущенных из  $\pi^- \pi^+ C$  - взаимодействий "вперед", существует группа, которая не "чувствует" влияния ядра. В  $\pi^- \pi^+ C$  - взаимодействиях с  $N_p = 1$  и  $N_p \geq 2$  значения параметров  $\beta_1$  и  $\beta_3$  оказываются одинаковыми по величине, причем с увеличением угла испускания намечается рост величин параметров  $\beta_3$ .

Параметр  $\beta_2$  для протонов, испущенных в  $\pi^- \pi^+ C$  - взаимодействиях "вперед" и "назад", одинаков в пределах ошибок и не зависит от числа протонов.

В главе 4 представляются данные, полученные при исследовании двухчастичных корреляций.

Рассмотрены двухчастичные  $\gamma\gamma$ -корреляции в процессах  $\pi^0 \pi^0$ :

$$\pi^- \pi^+ C \rightarrow \gamma + \gamma + \dots \quad (7)$$

$$\pi^- \pi^+ C \rightarrow \gamma + \gamma + n_{ch} + \dots \quad (8)$$

При этом были использованы стандартные корреляционные функции:

$$C(y_1^*, y_2^*) = \frac{1}{\sigma_{in}} \frac{d^2\sigma}{dy_1^* dy_2^*} - \frac{1}{\sigma_{in}^2} \frac{d\sigma}{dy_1^*} \frac{d\sigma}{dy_2^*} \quad (9)$$

$$R(y_1^*, y_2^*) = \sigma_{in} \frac{d^2\sigma}{dy_1^* dy_2^*} / \frac{d\sigma}{dy_1^*} \frac{d\sigma}{dy_2^*} - 1 \quad (10)$$

В инклюзивных реакциях в центральной области ( $|y_1^*|, |y_2^*| < 1$ ) наблюдаются положительные  $\gamma\gamma$ -корреляции. В остальных областях значения корреляционных функций либо отрицательны, либо равны нулю. Значения функций  $C$  и  $R$  в  $\pi^- \pi^+ C$  - взаимодействиях, как правило, меньше, чем соответствующие значения в  $\pi^- N$  - взаимодействиях  $R^{\pi^- \pi^+ C}(0,0) = 0,34 \pm 0,09$ ,  $R^{\pi^- N}(0,0) = 0,68 \pm 0,18$  и

$$C^{\pi^- \pi^+ C}(0,0) = 0,82 \pm 0,21, \quad C^{\pi^- N}(0,0) = 1,11 \pm 0,28.$$

В полудиинклюзивных реакциях (8) с малой множественностью вторичных заряженных частиц  $\leq 2$  наблюдаются положительные корреляции.

При исследовании азимутальных корреляций анализировались распределения  $\frac{1}{\sigma\sigma} \frac{d\sigma}{d\phi}$  в зависимости от угла между поперечными импульсами двух частиц:

$$\cos \phi = \frac{\vec{P}_{1\perp} \cdot \vec{P}_{2\perp}}{|\vec{P}_{1\perp}| |\vec{P}_{2\perp}|} \quad (11)$$

и значения коэффициента асимметрии  $B$ :

$$B = \frac{N(\phi > \pi/2) - N(\phi \leq \pi/2)}{N(\phi > \pi/2) + N(\phi \leq \pi/2)} \quad (12)$$



где  $N(\varphi \approx \pi/2)$  - число пар частиц, имеющих угол  $\varphi \approx \pi/2$ . Показано, что на фоне приблизительно равномерного распределения  $\varphi$  наблюдается увеличение числа пар гамма-квантов при  $\varphi \rightarrow 0$ . Эффект увеличения числа пар гамма-квантов при  $\varphi \rightarrow 0$  зависит от разности быстрот  $|\Delta y^*|$ . Наиболее сильно он выражен при  $0 \leq |\Delta y^*| \leq 0,4$ , слабее при  $0,4 < |\Delta y^*| \leq 0,8$  и исчезает при больших значениях  $|\Delta y^*|$ . Эффект наблюдается также при  $|\Delta y_1^*| \leq 1, |\Delta y_2^*| \leq 1$ , т.е. в случае, когда оба гамма-кванта находятся в центральной области.

В таблице 5 приводятся значения коэффициента асимметрии  $B$  для  $\pi^- \pi^0$ -взаимодействий при различных значениях  $\Delta y$  двух гамма-квантов.

Таблица 5

Значения коэффициента асимметрии  $B$

	$0 \leq  \Delta y^*  \leq 0,4$	$0,4 <  \Delta y^*  \leq 0,8$	$0,8 <  \Delta y^*  \leq 1,2$	$ \Delta y_1^*  \leq 1,  \Delta y_2^*  \leq 1$
$\pi^- \pi^0$	$-0,14 \pm 0,03$	$-0,08 \pm 0,03$	$0,04 \pm 0,03$	$-0,08 \pm 0,02$

Проанализированы двухчастичные корреляции для реакций  $^{13}/$ :

$$\pi^- \pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^+ + \dots \quad (I3)$$

$$\pi^- \pi^0 \rightarrow \pi^- \pi^- + \dots \quad (I4)$$

$$\pi^- \pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- + \dots \quad (I5)$$

Анализ показал, что общий ход корреляционных функций одинаков для  $\pi^- \pi^0$  и  $\pi^- p$ -взаимодействий, за исключением  $R$ -функций для комбинаций  $\pi^+ \pi^+$ ; для них в  $\pi^- p$ -взаимодействиях в области  $y_2^* < 0$  наблюдаются более сильные отрицательные корреляции.

Значения  $R$  и  $C$ -функций для центральной области  $(|y_1^*|, |y_2^*| \leq 0,25)$  сведены в таблице 6.

Таблица 6

Значения функций  $R$  и  $C$  для пар  $\pi^+ \pi^+, \pi^+ \pi^-, \pi^- \pi^-, \pi^- \pi^+$ ,  $y_1^*, y_2^* \leq 0,25$

	$R(0,0)$		$C(0,0)$			
	$\pi^+ \pi^+$	$\pi^+ \pi^-$	$\pi^- \pi^-$	$\pi^+ \pi^+$	$\pi^+ \pi^-$	$\pi^- \pi^-$
$\pi^- \pi^0$ 40 ГэВ/с	$0,04 \pm 0,07$	$0,58 \pm 0,10$	$0,09 \pm 0,08$	$0,05 \pm 0,08$	$0,57 \pm 0,08$	$0,08 \pm 0,06$
$\pi^- p$ 40 ГэВ/с	$0,14 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,05$	$0,26 \pm 0,04$	$0,09 \pm 0,02$	$0,41 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,02$

Видно, что:

а) Корреляционные функции  $R(0,0)$  и  $C(0,0)$  для  $\pi^- \pi^0$ -взаимодействий, как правило, меньше, чем для  $\pi^- p$ -событий.

б) Как и в случае  $\pi^- p$ -взаимодействий, для пар  $\pi^+ \pi^-$ -мезонов наблюдаются положительные корреляции короткого действующего характера.

Общий вид распределений по разности азимутальных углов  $\varphi$  пар  $\pi^-$ -мезонов для  $\pi^- \pi^0$  и  $\pi^- p$  взаимодействий одинаков, намечается отличие для  $\pi^+ \pi^-$ -комбинаций.

Параметр  $B$  при малых значениях  $\Delta y^*$  несколько больше для пар  $\pi^+ \pi^-$ -мезонов, чем для  $\pi^+ \pi^+$ -пар, а для больших  $\Delta y^*$  величина  $B$  в пределах ошибок не зависит от зарядовой комбинации пары. При этом во всех случаях коэффициент асимметрии в  $\pi^- \pi^0$ -событиях остается меньшим по величине, чем для  $\pi^- p$ -взаимодействий.

В главе 5 приводятся экспериментальные данные, полученные при изучении быстрой и медленной компонент для частиц, образованных в  $\pi^- \pi^0$ -взаимодействиях при 40 ГэВ/с  $^{14}/$ .

Частицы, вылетающие под углом в л.с.к., большим граничного угла  $8^\circ$  ("внешний" конус), были отнесены к медленной компоненте, все остальные к быстрой ("внутренний" конус). Для  $\pi^- p$ -взаимодействий это значение соответствует так называемому половинному углу. В интервале быстрот от  $\sim 0,9$  до  $\sim 2,65$  спектры  $\pi^+$ -мезонов как "внутреннего", так и "внешнего" конусов совпадают со спектрами  $\pi^-$ -мезонов, причем этот интервал увеличивается с ростом числа образовавшихся в  $\pi^- \pi^0$ -взаимодействиях медленных протонов. В этом же интервале число  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов от  $\pi^- \pi^0$ -взаимодействий не зависит от  $y$  и на (10-15)% больше числа  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов от  $\pi^- p$ -взаимодействий при той же энергии первичного  $\pi^-$ -мезона. При выбранных значениях граничного угла  $\theta_n = (2,5^\circ, 8^\circ, 10^\circ)$  средняя множественность  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов внутреннего конуса не зависит от числа протонов и совпадает с соответствующими данными  $\pi^- p$ -взаимодействий, а для внешнего конуса растет линейно с увеличением  $N_p$   $^{15}/$ . Аналогичный результат получается для средних углов вылета этих мезонов. Это, однако, не означает, что ядро полностью "прозрачно" для этой группы частиц, так как с ростом  $N_p$  наблюдается уменьшение средней энергии  $\pi^\pm$ -мезонов внутреннего конуса. Средняя энергия  $\pi^-$ -мезонов внешнего конуса остается при этом постоянной.

Общий характер распределений величин  $\bar{n}, \bar{x}$  остается таким же, как и для взаимодействий, имеющих протоны с  $p_p \geq 300$  МэВ/с, причем нет никакой разницы между событиями с суммарным зарядом  $\sum Q < 1$  и  $\sum Q \geq 1$  за исключением, может быть, распределения по  $\bar{n}$   $\pi^-$ -мезонов внутреннего конуса в событиях с  $\sum Q \geq 1$ .

## Основные выводы

1. В период с 1971 по 1979 гг. с участием автора обработаны по стандартным критериям, принятым для двухметровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ, около 600000 стереофотоснимков. Найдено ~10000  $\pi^-12C$ -взаимодействий с 65000  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонами, с 8000 протонами и с 17000  $\gamma$ -квантами. Вся экспериментальная информация с помощью стандартных программ записана на магнитных лентах суммарных результатов.

Из всех  $\pi^-12C$ -взаимодействий ~50% событий происходит на квазисвободных нуклонах.

2. Анализ полученных данных по множественности заряженных и нейтральных пионов в  $\pi^-12C$ -взаимодействиях при  $p_{\pi^-} = 40$  ГэВ/с и сравнение их с данными для  $\pi^-N$ -соударений при той же энергии и с данными при других энергиях позволяют сделать следующие выводы:

а) Величина  $R_A = \langle n_s \rangle_{\pi^-12C} / \langle n_s \rangle_{\pi^-N}$  постоянна в области энергий (5–200) ГэВ и средняя множественность вторичных частиц логарифмически растет с увеличением первичного импульса.

б) Средняя множественность как заряженных, так и нейтральных  $\pi$ -мезонов только качественно согласуется с расчетными данными по каскадной модели.

в) Впервые обнаружено, что  $\langle n_{\pi^0} \rangle$  возрастает с увеличением числа вторичных частиц в пион-углеродных взаимодействиях.

г) Установлено, что имеет место скейлинг по множественности для разного типа мишеней ( $p, n, 12C$ ).

д) Величина отношения  $\langle n_s \rangle / D = 1,93 \pm 0,02$  для  $\pi^-12C$ -взаимодействий при 40 ГэВ/с близка к соответствующим величинам  $\pi^-p$  и  $p-p$ -взаимодействий при высоких энергиях и не зависит от числа вторичных идентифицированных протонов.

3. Парциальные коэффициенты неупругости вторичных  $\pi^+, \pi^-$  и  $\pi^0$ -мезонов в  $\pi^-12C$  и  $\pi^-p$ -взаимодействиях одинаковы. Изучено поведение распределений по множественности рожденных частиц в зависимости от парциального коэффициента неупругости в  $\pi^-12C, \pi N$  и  $\pi p$ -взаимодействиях и показано, что имеет место так называемый "частный" КНО-скейлинг.

4. Анализ данных по одночастичным инклюзивным спектрам  $\gamma$ -квантов и пионов в  $\pi^-12C$  и  $\pi^-N$ -взаимодействиях показал:

а) Нормированные сечения по быстроте и продольным импульсам в системах покоя мишени и налетающей частицы для реакций  $\pi^-12C \rightarrow \gamma + \dots$  и  $\pi^-p \rightarrow \gamma + \dots$  в области плато и в области фрагментации налетающей частицы совпадают в пределах экспериментальных ошибок ( $\pm 8\%$ ).

С ростом множественности происходит сужение распределения по быстроте и сдвиг максимума к  $y^* = 0$  в системе центра инерции пион-нуклон.

б) Наблюдается разница в инклюзивных спектрах вторичных  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов, связанная с присутствием лидирующих отрицательных пионов. Отношение инклюзивных спектров на ядре и нуклоне ( $R$ ) максимально в области  $x = -1$  (область фрагментации ядра), затем круто спадает, и  $R = 1$  в районе  $x = 0,1$ . Отсутствует существенная разница в поведении для  $\pi^-$  и  $\pi^+$ -мезонов. Как для  $\pi^+$ , так и для  $\pi^-$ -мезонов максимум инклюзивных спектров смещается в сторону малых значений быстрот с ростом множественности протонов.

в) Структурные функции для  $\pi^+, \pi^-$ -мезонов, образованных в  $\pi^-12C$ -взаимодействиях с большой множественностью  $\pi^+, \pi^-$ -мезонов и протонов, описываются двумя экспонентами в отличие от структурных функций для других типов взаимодействий, описываемых одной экспонентой.

5. Изучены  $\pi^-12C$ -взаимодействия, сопровождающиеся испусканием, по крайней мере, одного протона. Соотношения между вероятностями испускания разного числа протонов в заднюю полусферу лабораторной системы координат показывает, что эти процессы независимы.

Средние характеристики  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов в этих взаимодействиях оказались такими же, как и во всех  $\pi^-12C$ -взаимодействиях.

Структурные функции для протонов, вылетающих под разными углами, аппроксимировались экспоненциальными зависимостями. Показано, что как в  $\pi^-12C$ , так и в  $\pi^-p$ -взаимодействиях существует группа протонов, обладающих одинаковыми свойствами, причем параметр наклона экспонент для высокоэнергичной части спектров растет с увеличением угла испускания протонов.

6. Проводились исследования эффекта "прозрачности" ядерной материи во взаимодействиях  $\pi^-$ -мезонов с ядрами углерода в зависимости от углов вылета вторичных пионов:

а) При всех выбранных значениях граничного угла  $\theta_n = (2,5^\circ, 8^\circ, 10^\circ)$  средняя множественность  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов внутреннего конуса не зависит от числа протонов  $N_p$  и при значениях  $\theta_n = 2,5^\circ, 8^\circ$  совпадает с соответствующими данными для  $\pi^-p$ -взаимодействий. Это, однако, не означает, что ядро полностью "прозрачно" для этой группы частиц, так как с ростом  $N_p$  наблюдается уменьшение средней энергии  $\pi$ -мезонов внутреннего конуса.

Множественность  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов внешнего конуса растет с  $N_p$ , причем с увеличением  $N_p$  от 0 до 4 множественность возрастает почти в 2 раза.

Не наблюдается различия между распределениями для "многоуклонных" взаимодействий ( $\sum Q > 1$ ) и всех остальных событий, за исключением распределений по  $\bar{n}$  для  $\pi^-$ -мезонов внутреннего конуса из событий с суммарным зарядом  $\sum Q > 1$ , для которых наблюдается тенденция уменьшения  $\bar{n}$  с ростом  $N_p$ .

б) В интервале быстрот от  $\sim 0,9$  до  $\sim 2,65$  спектры  $\pi^+$ -мезонов как "внутреннего", так и "внешнего" конусов совпадают со спектрами  $\pi^-$ -мезонов.

7. Исследованы двухчастичные гамма-гамма корреляции и корреляции заряженных пионов. Впервые показано, что в двухчастичных гамма-гамма корреляциях, как и для заряженных  $\pi^-$ -мезонов, наблюдаются положительные короткодействующие корреляции в центральной области ( $-1 \leq y_1^*$ ,  $y_2^* \leq 1$ ) как в инклюзивных, так и в полуйнклюзивных реакциях, причем эти корреляции, как правило, меньше, чем в  $\pi^-p$ -взаимодействиях.

Азимутальные корреляции оказались близкими к результатам, полученным для  $\pi^-p$ -взаимодействий.

Из совокупности сделанных в диссертации выводов следует, что взаимодействие пионов высоких энергий с легкими ядрами происходит следующим образом. Примерно в 50% соударений происходит взаимодействие с одним нуклоном ядра. Поэтому характеристики  $\pi^-^{12}C$ -соударений при высоких энергиях в среднем слабо отличаются от характеристик взаимодействий пионов со свободными нуклонами (см. п.п. 1, 2 (а, в, г, д) и 3). Однако они сильно различаются в области фрагментации мишени (п.п. 4а, б), что можно объяснить каскадным размножением медленных частиц. В центральной области в пределах ошибок эксперимента ( $\pm 8\%$ ) характеристики  $\gamma$ -квантов в  $\pi^-^{12}C$  и  $\pi^-p$ -взаимодействиях не отличаются друг от друга. В области фрагментации первичного пиона обнаружено уменьшение числа вторичных пионов в  $\pi^-^{12}C$ -взаимодействиях, что свидетельствует о поглощении быстрых частиц в ядре.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.У.Абдурахимов, Н.Ангелов, В.А.Беляков, ..., Д.Тувдэндорж и др. ОИЯИ Р1-6277, Дубна, 1972. Phys. Lett, 39B, 571, 1972.
2. А.У.Абдурахимов, Н.Ангелов, В.А.Беляков, ..., Д.Тувдэндорж и др. ЯФ, т. 16, 989, 1972.
3. Н.Ангелов, С.Бацкович, В.Г.Гришин, В.Б.Любимов, Ю.Надь, М.К.Сулейманов, Д.Тувдэндорж. ЯФ, 25, 1009, 1977.
4. Н.Ангелов, К.П.Вишневская, В.Г.Гришин, ..., Д.Тувдэндорж и др. ЯФ 25, 1201, 1977, ОИЯИ Р1-9882, 1976, Дубна.

5. А.У.Абдурахимов, Н.Ангелов, К.П.Вишневская, ..., Д.Тувдэндорж, и др. ЯФ 17, 6, 1235, 1973. Nucl. Phys. B63, 114, 1973.
6. Н.Ангелов, И.А.Ивановская, Т.Канарек, В.Б.Любимов, Н.Н.Мельникова, М.И.Соловьев, М.К.Сулейманов, Д.Тувдэндорж. ЯФ 27, 190, 1978.
7. А.И.Аношин, М.И.Соловьев, М.К.Сулейманов, Д.Тувдэндорж, В.В.Ужвинский. ЯФ 30, 389, 1979.
8. А.У.Абдурахимов, Н.Ангелов, К.П.Вишневская, ..., Д.Тувдэндорж и др. ЯФ 20, 384 (1974). Nucl. Phys. B83, 365, 1974.
9. Н.Ангелов, К.П.Вишневская, В.Г.Гришин, ..., Д.Тувдэндорж и др. ЯФ, 25, 1013, 1977.
10. Т.Канарек, В.Б.Любимов, М.И.Соловьев, М.К.Сулейманов, Д.Тувдэндорж. Сообщение ОИЯИ Р1-12898, 1979, Дубна.
11. Н.Ангелов, А.И.Аношин, В.Г.Гришин, В.Б.Любимов, М.И.Соловьев, М.К.Сулейманов, Д.Тувдэндорж. ЯФ, 30, 400, 1979.
12. Н.Ангелов, С.Бацкович, В.Г.Гришин, ..., Д.Тувдэндорж и др. ОИЯИ Р1-10768, 1977, Дубна.
13. Н.Ангелов, К.П.Вишневская, В.Г.Гришин, ..., Д.Тувдэндорж и др. ЯФ, 26, 1029, 1977.
14. А.И.Аношин, В.Б.Любимов, М.И.Соловьев, М.К.Сулейманов, Д.Тувдэндорж. ЯФ 29, 674, 1979.
15. А.И.Аношин, В.Б.Любимов, М.И.Соловьев, М.Сулейманов, Д.Тувдэндорж. ЯФ 27, 1240, 1978.
16. Л.А.Диденко, В.Б.Любимов, Д.Тувдэндорж. ОИЯИ I-9022, 1975, Дубна.
17. Н.Ангелов, К.П.Вишневская, В.Г.Гришин, ..., Д.Тувдэндорж и др. ЯФ 22, 1026, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 июля 1980 года.