

2-99-19

На правах рукописи  
УДК 539.04; 539.043

Р-19

ГАНХУЯГ  
Батмунхийн

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ  
МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ  
В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ  
В РАМКАХ МОДЕЛИ FRITIOF

Специальность: 01.04.16 — физика ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1999

# 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность проблемы

Несмотря на успехи квантовой хромодинамики познание механизма "мягких" адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий все еще остается нерешенной проблемой. На ее решение направлены многочисленные эксперименты, реализуемые и планируемые в ряде крупнейших физических центров мира таких, как Брукхейвен, Дармштадт, Дубна и ЦЕРН. Уже получены ультра-релятивистские пучки ядер золота ( $E_{\text{лаб}}=10.6$  А ГэВ) и ядер свинца ( $E_{\text{лаб}}=160$  А ГэВ) на ускорителях AGS-BNL (США) и SPS-CERN (Швейцария). Ведется интенсивная работа по созданию ядерных коллайдеров RHIC-BNL (США) и LHC-CERN (Швейцария).

Для интерпретации полученных данных и выбора наиболее перспективных направлений исследований необходимо развивать существующие теоретические подходы и развивать новые, применимые во всем диапазоне энергий.

Среди теоретических подходов, используемых для анализа "мягких" взаимодействий, пожалуй наибольшей популярностью пользуется модель FRITIOF [1], положения которой легли в основу современных моделей таких, как модель релятивистской квантовой молекулярной динамики (RQMD) [2] и модель HIJING [3]. Широко применяются и представления каскадно-испарительная модели (КИМ) [4].

Надо отметить, что анализ адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в рамках тех, или иных теоретических подходов существенно осложняется влиянием ядерной среды на процессы множественного рождения частиц. Думается, что характеристики отрицательно заряженных частиц в наименьшей степени подвержены этому влиянию. В то же время характеристики протонов в значительной мере отражают глубоко ядерные эффекты. Поэтому раздельное изучение  $\pi^-$ -мезонов и протонов позволяет анализировать различные аспекты "мягких" взаимодействий.

Широкую базу для такого анализа дают данные 2-х метровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ, облученной пучками ядер с импульсом 4,2 ГэВ/с, и данные однометровой водородной камеры ЛВЭ ОИЯИ, облученной пучками нейтронов.

## Цели и задачи исследования

- Анализ данных о нейтрон-протонных взаимодействиях при  $p_n = 1,25 \div 5,1$  ГэВ/с с целью уточнения параметров модели FRITIOF.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, УЖИНСКИЙ  
ЛВТА ОИЯИ Владимир Витальевич

Официальные оппоненты:

кандидат физико-математических наук, АНОШИН  
научный сотрудник НИИЯФ МГУ Александр Иванович  
доктор физико-математических наук, ГАРЕЕВ  
профессор, ЛТФ ОИЯИ Фангиль Ахматгареевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Физический институт РАН, г. Москва

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_" 1999 года в "\_\_\_" часов  
на заседании диссертационного совета Д-047.01.02 в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_" 1999 года

Ученый секретарь

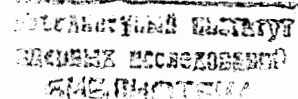
диссертационного совета,

доктор физико-математических наук,

профессор

*М.Ф. Лихачев*

/М.Ф. Лихачев/



Эта задача имеет самостоятельный интерес поскольку позволяет проверить основные положения модели на границе области применимости модели.

- Анализ существующих данных о процессах множественного рождения  $\pi^-$ -мезонов в ядро-ядерных взаимодействиях в рамках каскадно-испарительной модели и модели FRITIOF.
- Получение экспериментальных данных о  $\pi^-$ -мезонах и протонах, наблюдаемых с помощью 2-х метровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ с учетом последних методических и экспериментальных достижений, и их анализ в рамках модели FRITIOF.

### Научная новизна работы

Впервые модель FRITIOF использована для анализа нуклон-нуклонных взаимодействий при энергиях порядка 1 ГэВ и выше.

Впервые модель FRITIOF использована для систематического анализа процессов множественного рождения частиц в соударениях ядер с ядрами при импульсах порядка  $4, 2 \div 4, 5$  А ГэВ/с.

Получены экспериментальные данные о характеристиках  $\pi^-$ -мезонов и протонов в ядро-ядерных взаимодействиях с учетом различных методических особенностей регистрации событий в 2-х метровой пропановой пузырьковой камере ЛВЭ ОИЯИ.

Впервые достигнуто успешное, комплексное описание указанных данных в рамках модели FRITIOF.

### Научная и практическая ценность

Научное значение полученных результатов определяется тем, что показана возможность рассмотрения на единой основе различных процессов во взаимодействиях ядер с ядрами во всем достигнутом диапазоне ускорительных энергий. Предложенные усовершенствования модели FRITIOF и подбор параметров модели позволяют успешно интерпретировать экспериментальные данные и извлекать сведения о механизме реакций, предсказывать выходы частиц в различных ядерных реакциях. Последнее имеет большое значение при проектировании радиационной защиты ускорителей и космических аппаратов, при создании электроядерных установок и решении задач трансмутации радиоактивных отходов.

Вся совокупность полученных результатов и методов может быть использована при планировании новых исследований взаимодействий ядер с ядрами при высоких энергиях.

Основные результаты диссертации были представлены и неоднократно докладывались на международных конференциях, совещаниях, семинарах и школах по релятивистской ядерной физике: "International Nuclear Physics Conference-INPC/98", 1998 Париж, Франция; "International Workshop on Relativistic Heavy-Ion Physics-RHIP'96", Прага, Чехия, 1996; "XIII Международный семинар по проблемам физики высоких энергий", Дубна, 1996; "International School-Seminar on High Energy Physics", Гомель, Белоруссия, 1997; "European School on High Energy Physics", Дубна, 1995; "XIV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий", Дубна, 1998, а также докладывались на семинарах ЛВЭ и ЛВТА ОИЯИ.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 работах, список которых приводится в конце автореферата, и в материалах вышеупомянутых международных конференций.

### Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения содержит 101 страниц машинописного текста, включая 21 рисунок, 16 таблиц и библиографию из 62 наименований на 5 страницах.

## 2 СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации дан краткий обзор современного состояния физики высоких энергий, выделены актуальные направления исследований, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлен общий план рассмотрения.

В первой главе дано описание 2-м пропановой пузырьковой камеры ДППК-500 ЛВЭ, ОИЯИ. Приведены: система фотографирования, характеристики магнитного поля камеры, процедуры обработки и корректировки экспериментальных данных. Просмотр стереофотографий проводился на просмотрных столах типа БПС-1, БПС-2. Отобранные при просмотре события измерялись на полуавтоматах типа ПУОС и САМЕТ, работающих на линии связи с ЭВМ. При просмотре регистрировались все заряженные треки в событии, а также  $\gamma$ -кванты и  $V^0$ -частицы ( $K_s^0$ -мезоны и  $\Lambda^0$ -гипероны), смотрящие в точку взаимодействия.  $\gamma$ -кванты регистрировались по  $e^+e^-$  парам от конверсии, а  $V^0$ -частицы по заряженным продуктам распада:  $K_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$

и  $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$ . На каждом треке измерялось от 6 до 20 точек в зависимости от его длины. Короткие следы останавливающихся частиц измерялись по двум точкам: начало и остановка. Для восстановления

Тип взаимодействия	Первичный импульс [ГэВ/с]	Число событий	упр. + диффракционн.
$p + C_3H_8$	4.2	12757	1982
$d + C_3H_8$	4.2 A	9016	557
$\alpha + C_3H_8$	4.2 A	22975	973
$C + C_3H_8$	4.2 A	39544	1418
$p + C$	4.2	8371	-
$d + C$	4.2 A	5807	-
$\alpha + C$	4.2 A	13319	-
$C + C$	4.2 A	20594	-
Итого	-	84292/48091	4930

Табл. 1: Статистика экспериментального материала 2-м ДППК-500.

геометрической картины событий использовалась программа GEOFIT [5]. Средние ошибки измерений импульсов частиц составляли величину  $\langle \Delta p/p \rangle = (11,5 \pm 0,3)\%$ . Идентификация первичных частиц производилась по визуальным критериям: направлению полета, ионизации и числу  $\delta$ -электронов. Камера находилась в магнитном поле, что позволяло разделять отрицательно и положительно заряженные вторичные частицы на фотоснимках по знаку кривизны следов. Среди положительно заряженных частиц с импульсами  $p < 500$  МэВ/с по ионизации визуально идентифицировались  $\pi^+$ -мезоны и протоны. Останавливающиеся в камере черные следы считались протонами, для которых идентификация начиналась с  $p > 140$  МэВ/с и пробег  $L > 0,2$  см. Производилось статистическое разделение  $\pi^+$ -мезонов и протонов с импульсами больше 500 МэВ/с. Спектаторные фрагменты налетающих ядер выделялись по особым критериям. При корректировке данных учитывались: поправка к начальному значению импульса налетающих ядер, обусловленная ионизационными потерями и многократными рассеяниями частиц; поправки на частицы с неизмеренным импульсом и на пропущенные частицы (большинство частиц с неизмеренным импульсом испускалось перпендикулярно плоскости камеры).

Для выделения упругих взаимодействий использовались кинематические критерии [6]. По аналогичным критериям выделялись случаи

дифракционной диссоциации ядер снарядов. Специальные критерии применялись для идентификации взаимодействий с ядрами углерода. События, неотнесенные к взаимодействиям с ядрами углерода, статистически были разделены на события взаимодействий с ядрами водорода и углерода [6]. Статистика, использованных в работе экспериментальных данных с 2-х метровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ, приведена в табл. 1.

Во второй главе диссертации рассматриваются используемые теоретические модели: каскадно-испарительная модель (КИМ) и модель FRITIOF. Основные положения КИМ, изложенные в §2.1, хорошо известны [4].

В §2.2 представлены основные положения модели FRITIOF [1]. Модель FRITIOF предполагает двухчастичную кинематику неупругих адрон-адронных взаимодействий  $a+b \rightarrow a'+b'$ , где  $a'$  и  $b'$  - возбужденные состояния исходных 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  $P^+ = E + p_z$ ,  $P^- = E - p_z$ .

При высоких энергиях приближенно имеем:

$$P_{a'}^- \simeq m_{a'}^2/2 |p_{a'z}|, \quad P_{b'}^+ \simeq m_{b'}^2/2 |p_{b'z}|. \quad (3)$$

Поэтому, используемое в модели распределение по  $P_{a'}^-$  и  $P_{b'}^+$ , приобретает вид

$$\begin{aligned} dW &\sim dP_{a'}^-/P_{a'}^- \simeq dm_{a'}^2/m_{a'}^2, \\ dW &\sim dP_{b'}^+/P_{b'}^+ \simeq dm_{b'}^2/m_{b'}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Пределы изменения  $P_a^-$  и  $P_b^+$  определяются как

$$[P_a^-, P_b^-], [P_b^+, P_a^+]. \quad (5)$$

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) – (5). Для второго соударения ( $a' + N_2 \rightarrow a'' + N_2'$ ) используются аналогичные соотношения, однако условие (5) заменяется на условие

$$[P_{a'}^-, P_{N_2}^-], [P_{N_2}^+, P_{a'}^+]. \quad (6)$$

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

$$[P_{a'}^-, P_{b'}^-], [P_{b'}^+, P_{a'}^+]. \quad (7)$$

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

$$dW = b^2 e^{-BP_T^2} P_T dP_T, \quad B = 3,33 \text{ (ГэВ/с)}^{-2}.$$

Ферми-движение нуклонов и процессы разрушения ядер учитывались как и в работе [7].

В третьей главе диссертации анализируются данные однометровой водородной камеры - исследуется возможность описания в рамках модели FRITIOF характеристик  $\pi^-$ -мезонов и протонов, рождающихся в нейтрон-протонных взаимодействиях при  $p_n=1,25-5,1$  ГэВ/с. Проверка модели при таких экстремально низких энергиях представляет особый интерес поскольку можно ожидать, что здесь недостатки модели проявятся наиболее полно.

На рис. 1 представлены экспериментальные и расчетные распределения  $\pi^-$ -мезонов по быстрой  $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E+p_z}{E-p_z}$ , где  $E$  и  $p_z$ -энергия и продольный импульс  $\pi^-$  мезона. Как видно из рисунка, распределения, рассчитанные по исходной модели (см. светлые точки), обладают бимодальной структурой, особенно при низких энергиях. При импульсе нейтрона, равном 1,25 ГэВ/с, дифракционная система с массой 1,2 ГэВ (минимальная масса возбужденного нуклона, предполагаемая моделью

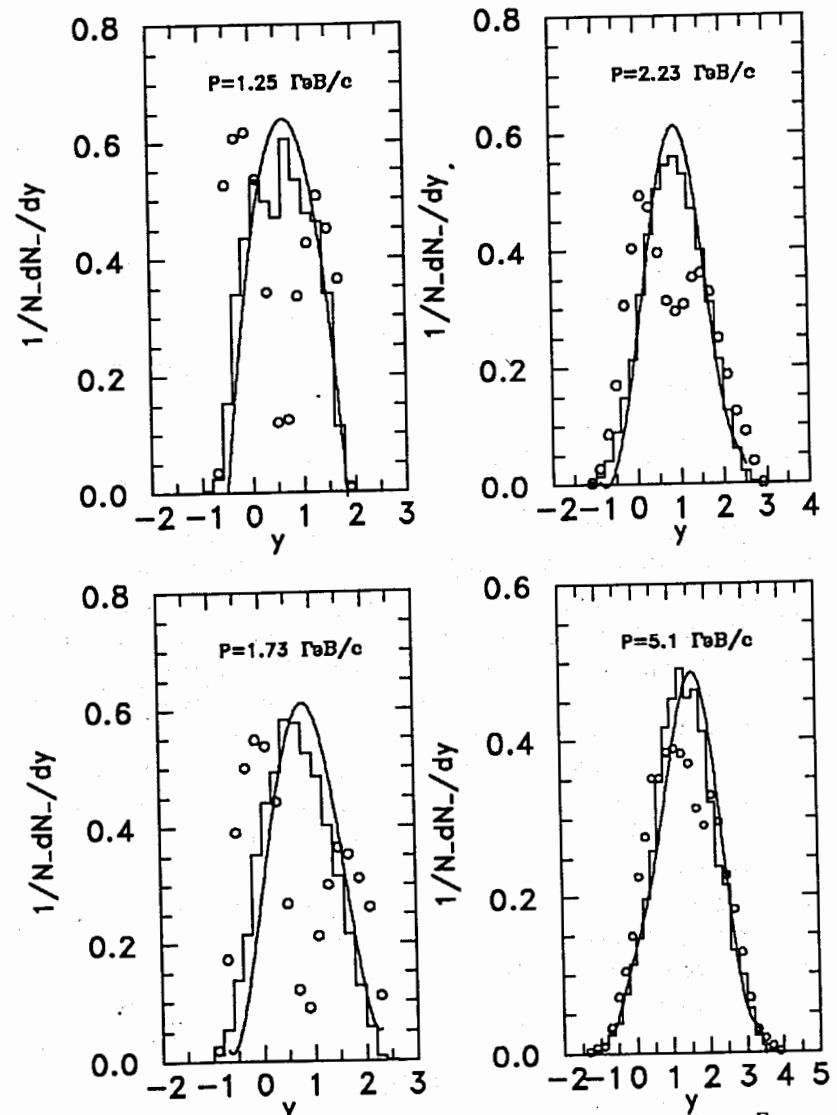


Рис. 1: Распределения  $\pi^-$ -мезонов по быстрой в взаимодействиях. Гистограммы - экспериментальные данные. Светлые точки - расчеты по исходной модели. Сплошные кривые - расчеты по модифицированной версии модели

адронов. Поэтому можно однозначно сказать, что бимодальная структура расчетного распределения не является следствием дифракционной диссоциации адронов, а отражает анизотропию распада струн с малой массой. Прямое моделирование распадов струн с малой массой показало, что бимодальная структура характерна для распадов струн с массой меньше или равной 1,7 ГэВ. В распадах таких струн доминируют двухчастичные каналы. При больших массах доминируют многочастичные каналы распада, и расчетные распределения становятся более регулярными. Учитывая характер экспериментальных распределений при  $P_n = 1,25; 1,73$  ГэВ/с, в диссертации предложено моделировать изотропный распад струн с малой массой в случае двухчастичного канала распада. Граничное значение массы струн – 1,7 ГэВ, ниже которого применялась предлагаемая процедура, выбрано из требования наилучшего описания экспериментальных данных. Как видно из рис. 1 (сплошные кривые), это позволило практически точно описать экспериментальные распределения.

Модель предсказывала средние поперечные импульсы, превосходящие соответствующие экспериментальные значения даже при изменении характера распада струн с малой массой. Поэтому для уменьшения среднего поперечного импульса была уменьшена минимальная масса возбужденных нуклонных состояний до значения 1,1 ГэВ.

Важными характеристиками взаимодействий являются сечения отдельных каналов реакций  $nr$ -взаимодействий. В диссертации представлены расчетные топологические сечения реакций, нормированные на экспериментально измеренные полные неупругие сечения. Показано, что модель качественно воспроизводит соотношения между топологическими сечениями. В то же время, расхождение между экспериментальными и расчетными сечениями отдельных каналов реакций может быть довольно большим.

Анализ спектров протонов дает дополнительную информацию и позволяет точнее определить параметры модели. Для анализа использовались данные по следующим реакциям:



В реакции (8) согласно модели доминируют процессы дифракционной диссоциации налетающей частицы. В реакции (9) – процессы двухвершинной дифракции.

Наконец, в реакции (10) мы имеем равные вклады процессов одновершинной и двухвершинной дифракций. Поэтому изучение указанных реакций позволяет проверить различные компоненты модели.

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные распределения протонов по быстротам в  $nr$ -взаимодействиях. Как видно из рисунков, в экспериментальных данных о реакциях (8) наблюдается бимодальная структура распределений. Пик при малых быстротах обусловлен сохранившимся протоном мишени. Пик при больших быстротах связан с протонами, образовавшимися при дифракции налетающих частиц. В реакциях (9) структура распределений выражена гораздо слабее. Наконец, в реакциях (10) имеет место преимущественное образование протонов в области фрагментации мишени.

Расчеты по исходному варианту модели согласуются с данными по реакциям (8) и (9). В то же время расчеты распределений для реакции (10) имеют пик в области  $y \sim 1,8$ , ненаблюдаемый в эксперименте. Анализ расчетов показал, что пик в распределении протонов, образовавшихся при дифракции налетающей частицы по каналу  $n' \rightarrow n\pi^+\pi^-$  находится в области  $y \sim 0,4$  (см. светлые квадратные точки на рис. 2e). В том же месте находится пик и в распределении протонов при дифракции протонов мишени по каналу  $p' \rightarrow p\pi^+\pi^-$  (см. темные квадратные точки на рис. 2e). В то же время пик в распределении протонов, образовавшихся в процессах двухвершинной дифракции ( $n' \rightarrow p\pi^-$ ,  $p' \rightarrow n\pi^+$ ), лежит в области  $y \sim 1,8$  (см. звездочки на рис. 2e).

Простейший путь устранения расхождения – допустить зарядовый обмен между сталкивающимися адронами в процессах "двухвершинной дифракции", что и было сделано в диссертации, то есть, в 50 % случаев двухвершинной дифракции производился обмен зарядом между сталкивающимися нуклонами. Это позволило лучше описать реакции (10), но несколько ухудшило описание реакций (9).

Таким образом, в рамках сравнительно простой модели удалось достичь комплексного описания спектров  $\pi^-$ -мезонов и протонов в  $nr$ -взаимодействиях, что имеет большое значение для моделирования адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий при высоких энергиях.

В диссертации представлены расчеты средней множественности  $\pi^-$ -мезонов в  $rr$ -,  $rp$ - и  $nn$ -взаимодействиях при более высоких энергиях. Показано, что предсказания модели с измененными значениями параметров согласуются с экспериментальными данными в пределах 8–9% и 6–7% для  $rr$ - и  $rp$ -,  $nn$ -взаимодействий, соответственно.

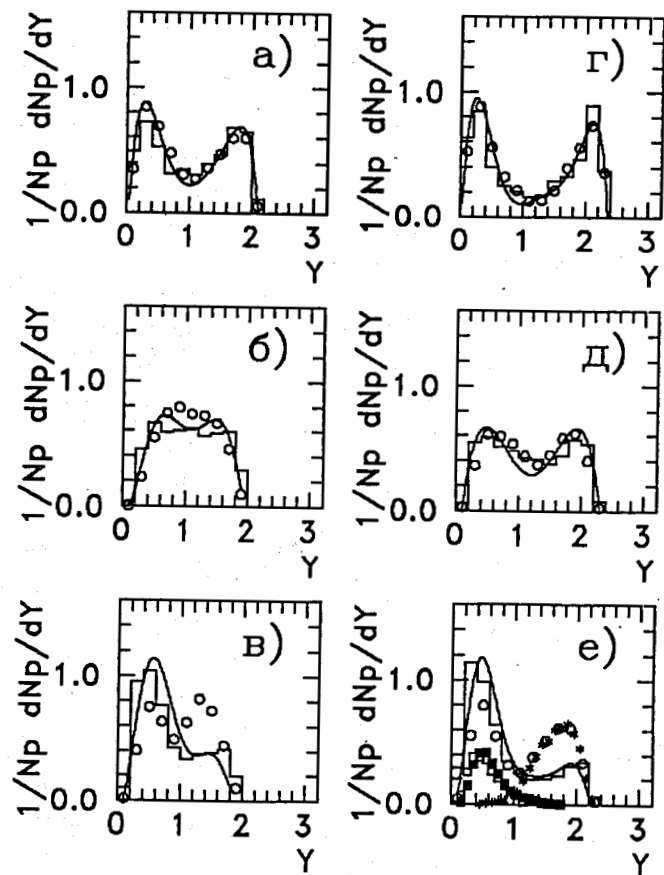


Рис. 2: Распределения протонов по быстротам в  $pr$ -взаимодействиях при  $P_n = 3,83$  ГэВ/с (а,б,в) и  $P_n = 5,1$  ГэВ/с (г,д,е): а)  $pr \rightarrow prp^-$ ; б)  $pr \rightarrow prp^- \pi^0$ ; в)  $pr \rightarrow pr \pi^+ \pi^-$ ; г)  $pr \rightarrow prp^-$ ; д)  $pr \rightarrow prp^- \pi^0$ ; е)  $pr \rightarrow pr \pi^+ \pi^-$ ; гистограммы - экспериментальные данные, кривые - расчет.

В четвертой главе диссертации анализируются процессы множественного рождения частиц в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях. Представлены расчеты средней множественности  $\pi^-$ -мезонов в  $pA$ -взаимодействиях при высоких энергиях. Показано, что модель FRITIOF воспроизводит множественности рожденных частиц в пределах 7%.

В §4.2 рассматриваются распределения по множественности  $\pi^-$ -мезонов в ядро-ядерных взаимодействиях. На рис. 3 представлены экспериментальные данные, полученные с помощью стримерной камеры (темные точки), вместе с расчетами по каскадно-испарительной модели (гистограммы) и по модели FRITIOF (светлые точки). Экспериментальные данные были нормированы на сечение рождения новых частиц ( $\sigma_{prod}$ ) с целью адекватного сравнения с предсказаниями теоретических моделей - в моделях не учитываются квазиупругие реакции, сопровождаемые развалом одного или обоих сталкивающихся ядер без рождения мезонов.

Как видно из рисунка, имеет место систематическое отличие расчетов по КИМ от экспериментальных данных - модель завышает множественность рожденных частиц. В то же время, модель FRITIOF на удивление хорошо воспроизводит экспериментальные распределения.

В табл. 2 приведены расчетные и экспериментальные значения средней множественности  $\pi^-$ -мезонов во взаимодействиях ядер с ядрами тантала при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон вместе с расчетами по модели кварк-глюонных струн. Как видно из таблицы, КИМ и МКГС неудовлетворительно описывают рождение отрицательно заряженных частиц на тяжелых ядрах тантала при рассматриваемой энергии взаимодействий.

В §4.3 анализируются распределения  $\pi^-$ -мезонов, рождающихся в ядро-ядерных взаимодействиях, по кинематическим переменным. На рис. 4 приведены экспериментальные (гистограммы) и расчетные распределения по поперечному импульсу  $\pi^-$ -мезонов в ядро-ядерных взаимодействиях. Расчеты по КИМ представлены ломаными линиями,

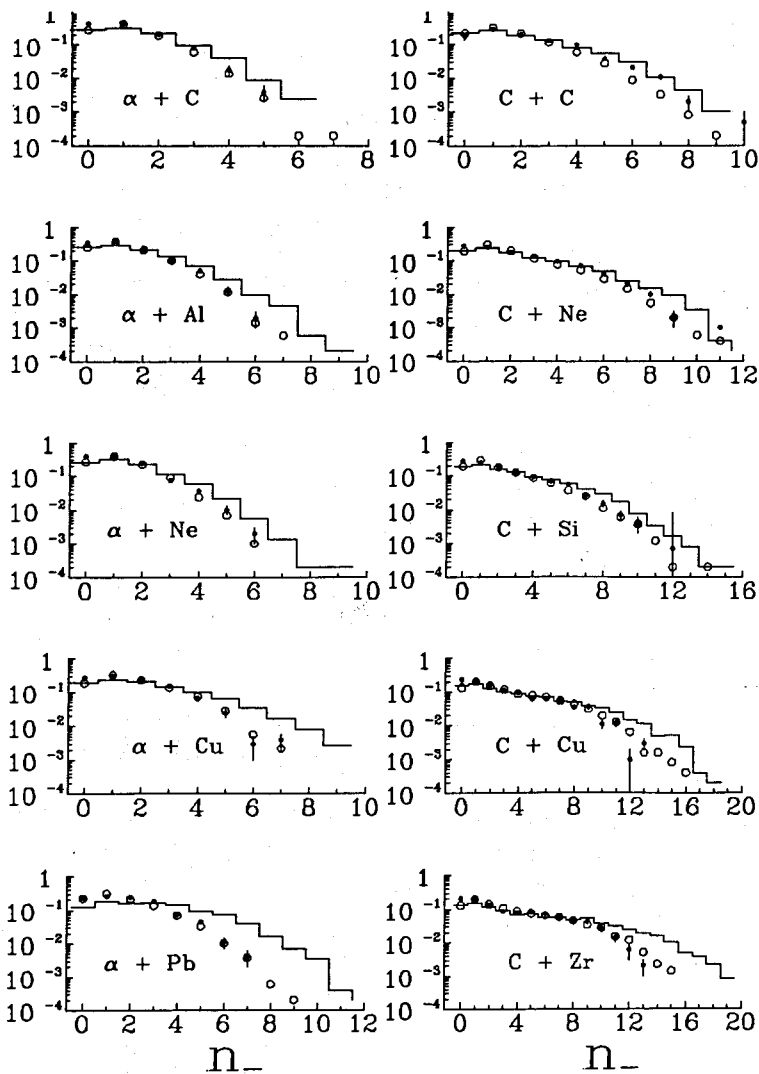


Рис. 3: Распределения по множественности отрицательно заряженных частиц в ядро-ядерных взаимодействиях при 4,5 А ГэВ/с.

	d+Ta	He+Ta	C+Ta	ссылки
Экспер.	$0.86 \pm 0.03$	$1.42 \pm 0.06$	$3.40 \pm 0.04$	[8]
FRITIOF	0.85	1.52	3.64	—
КИМ	0.78	2.66	5.58	—
МКГС	—	—	$5.18 \pm 0.04$	[8]

Табл. 2: Расчетные и экспериментальные значения средней множественности  $\pi^-$  мезонов во взаимодействиях ядер с ядрами тантала при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон

расчеты по модели FRITIOF—светлыми точками. Можно видеть довольно хорошее согласие расчетов по модели FRITIOF с экспериментальными данными. Пожалуй, наиболее существенные расхождения наблюдаются только для  $\alpha+Pb$ -взаимодействий при  $P_T \leq 0,2$  ГэВ/с. Для всех взаимодействий в областях  $P_T > 0,2$  ГэВ/с расчетные величины несколько превышают экспериментальные значения. КИМ, как видно из рисунков, предсказывает значительную множественность частиц с  $P_T \leq 0,2$  ГэВ/с, особенно в  $\alpha + Pb$ -взаимодействиях.

На рис. 5 представлены экспериментальные данные и расчетные распределения  $\pi^-$ - мезонов по быстротам во взаимодействиях  $\alpha$ -частиц с ядрами при импульсе 4,5 ГэВ/с на нуклон. Гистограммами представлены экспериментальные данные, расчеты по модели FRITIOF — светлыми точками, а расчеты по КИМ — ломаными линиями. Как видно из рисунков, КИМ завышает множественность вторичных частиц, рождающихся в областях фрагментаций ядер-мишеней ( $y \sim 0$ ). Особенно сильно это превышение проявляется в расчетах характеристик взаимодействий с тяжелыми ядрами. Модифицированная программа FRITIOF, при всей ее простоте, значительно лучше описывает экспериментальные данные.

В §4.5 анализируются данные пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ, полученные при участии автора диссертации. Рассмотрение начинается с изучения характеристик  $\pi^-$ - мезонов. В таблице 3 представлены средние множественности  $\pi^-$ - мезонов в зависимости от массы ядра-снаряда вместе со значениями, рассчитанными по улучшенной версии модели FRITIOF. Как видно из таблицы, модель согласуется с экспериментом в пределах (3, 6, 6 и 8)% для  $pC, dC, \alpha C$  и  $CC$  взаимодействий, соответственно. Наибольшее расхождение между экспериментом и моделью наблюдается для  $CC$ -взаимодействий (8%).

В таблице 4 приведены средние значения кинематических характеристик  $\pi^-$ -мезонов в  $pC$ -,  $dC$ -,  $\alpha C$ -, и  $CC$ - взаимодействиях при



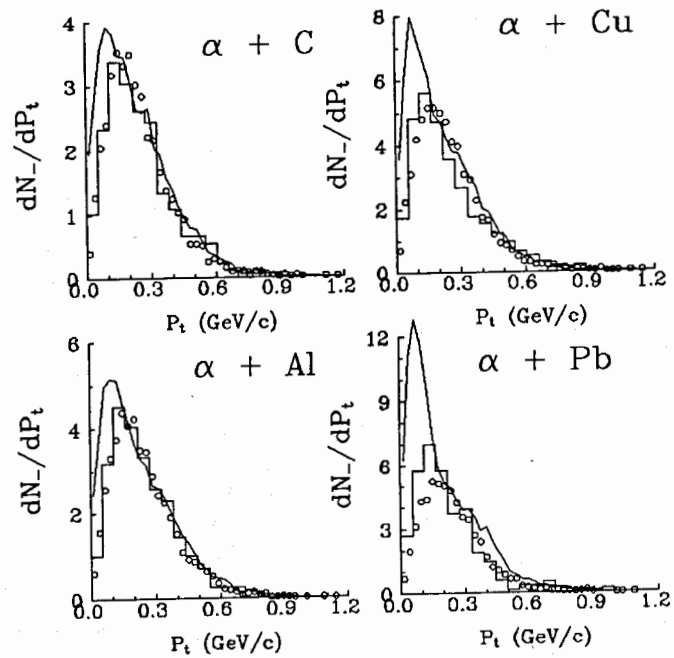


Рис. 4: Распределения отрицательно заряженных частиц в ядро-ядерных взаимодействиях при 4,5 А ГэВ/с по поперечному импульсу.

$p=4,2$  ГэВ/с/нуклон. Наибольшее расхождение между экспериментом и модели наблюдается в средних поперечных импульсах  $\pi^-$ - мезонов в пределах 4%.

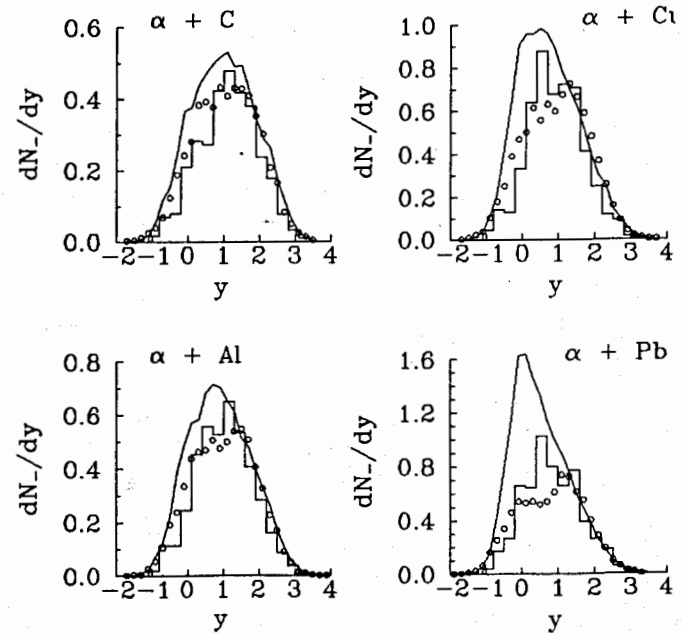


Рис. 5: Распределения  $\pi^-$ -мезонов по быстротам в ядро-ядерных взаимодействиях при 4,5 ГэВ/с/нуклон

Статистика	Тип реакций			
	p+C	d+C	$\alpha$ +C	C+C
Число соб.	8124	6937	11537	20405
Экспер.	$0.41 \pm 0.02$	$0.69 \pm 0.03$	$0.98 \pm 0.03$	$1.43 \pm 0.02$
FRITIOF	$0.42 \pm 0.02$	$0.73 \pm 0.03$	$1.03 \pm 0.01$	$1.55 \pm 0.02$

Табл. 3: Средние множественности  $\pi^-$  мезонов в неупругих (p, d,  $\alpha$ , C)+C взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с/нуклон.

На рис. 6 представлены распределения  $\pi^-$  мезонов по кинематическим переменным -  $p, p_T, \theta, y$ , нормированные на полное число событий, в сравнении с расчетами по модели FRITIOF. На рис. 6а представлены импульсные распределения  $\pi^-$  мезонов в CC-взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  А ГэВ/с. Модель несколько превышает экспериментальные значения при импульсах 0,2-0,6 ГэВ/с. Далее разность между экспериментом и модели уменьшается. На рис. 6б даны распределения по поперечному импульсу: расчетные значения превышают экспериментальные при  $p_T \approx 0,2 - 0,5$

Тип реакций	Средние значения кинематических переменных			
	$P_{\text{лаб}}$ [ГэВ/с]	$\theta_{\text{лаб}}$ [град.]	$P_T$ [ГэВ/с]	Быстрота, $Y$
pC Экспер.	$0.50 \pm 0.01$	$50.71 \pm 0.6$	$0.24 \pm 0.01$	$0.83 \pm 0.01$
pC FRITIOF	$0.48 \pm 0.03$	$49.10 \pm 0.3$	$0.23 \pm 0.01$	$0.86 \pm 0.06$
dC Экспер.	$0.55 \pm 0.01$	$45.27 \pm 0.5$	$0.25 \pm 0.02$	$0.96 \pm 0.01$
dC FRITIOF	$0.54 \pm 0.02$	$44.61 \pm 0.2$	$0.24 \pm 0.01$	$0.97 \pm 0.07$
$\alpha$ C Экспер.	$0.57 \pm 0.01$	$44.24 \pm 0.3$	$0.25 \pm 0.01$	$0.99 \pm 0.01$
$\alpha$ C FRITIOF	$0.57 \pm 0.02$	$43.40 \pm 0.3$	$0.24 \pm 0.01$	$1.01 \pm 0.01$
CC Экспер.	$0.59 \pm 0.02$	$41.10 \pm 0.2$	$0.24 \pm 0.01$	$1.08 \pm 0.01$
CC FRITIOF	$0.60 \pm 0.01$	$40.92 \pm 0.1$	$0.24 \pm 0.01$	$1.09 \pm 0.03$

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

ГэВ/с. На рис. 6с сравниваются распределения по быстротам: экспериментальное и расчетное распределения  $\pi^-$  мезонов имеют максимум при одном и том же значении быстроты  $y_0 \sim y_{\text{с.п.м.}} \approx 1,1$  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. 6д представлены угловые распределения  $\pi^-$ -мезонов. Видно,

что модель превышает выход  $\pi^-$  мезонов при малых углах  $\theta \sim 0^\circ \div 30^\circ$ . Поэтому учет поглощения  $\pi^-$ -мезонов в ядрах-остатках в рамках модели FRITIOF может способствовать лучшему воспроизведению экспериментальных закономерностей. В целом, согласие расчетов с экспериментальными данными вполне удовлетворительное.

Далее рассматриваются экспериментальных данных о выходе протонов. В таблице 5 представлены средние множественности протонов-участников во взаимодействиях ядер с ядрами углерода при импульсе  $p=4,2$  А ГэВ/с в сравнении с расчетами по модели FRITIOF.

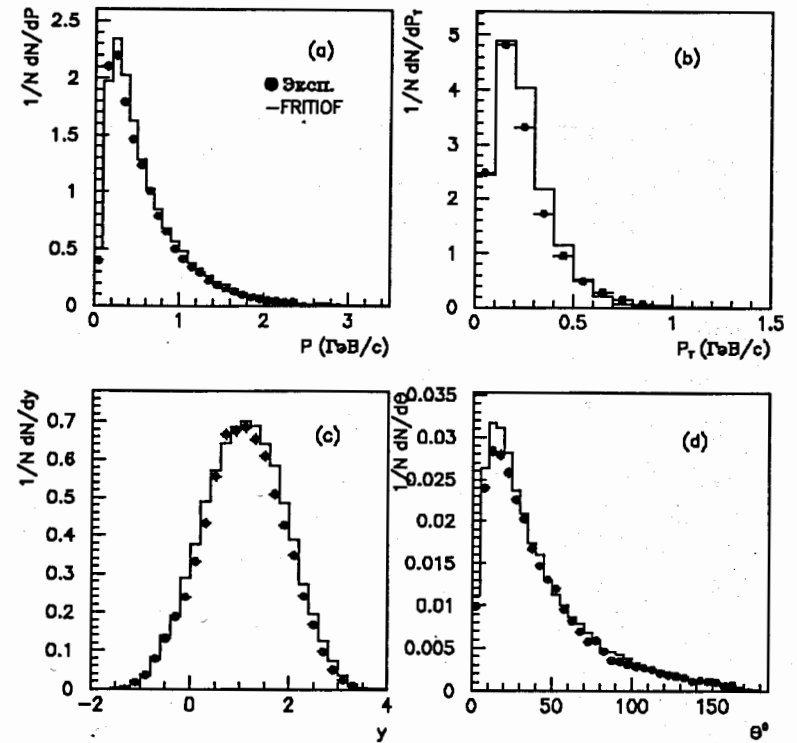


Рис. 6: Распределения по кинематическим переменным отрицательно заряженных частиц в CC- взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  А ГэВ/с/нуклон.

Как видно из таблицы, точность модели составляет 10; 0; 5; и 7 % соответственно для  $pC$ ,  $dC$ ,  $\alpha C$  и  $CC$ -взаимодействий. Наибольшее расхождение наблюдается в пределах 10 % для  $pC$ -взаимодействий.

Статистика	Тип реакций			
	$p+C$	$d+C$	$\alpha+C$	$C+C$
Число соб.	8124	6937	11537	20405
Экспер.	$1.80 \pm 0.01$	$2.05 \pm 0.02$	$2.91 \pm 0.01$	$4.46 \pm 0.02$
FRITIOF	$1.99 \pm 0.02$	$2.05 \pm 0.03$	$2.77 \pm 0.01$	$4.13 \pm 0.06$

Табл. 5: Средние множественности протонов-участников в неупругих ( $p$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ) $C+C$  взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с/нуклон.

В табл. 6 представлены средние значения кинематических характеристик протонов-участников в указанных ядро-ядерных взаимодействиях. Наибольшие расхождения наблюдаются в средних углах и средних импульсах протонов в  $pC$ -взаимодействиях (в пределах 9-10 %).

Тип реакций	Средние значения кинематических переменных			
	$P_{\text{лаб}}$ [ГэВ/с]	$\theta_{\text{лаб}}$ [град.]	$P_T$ [ГэВ/с]	Быстрота, $Y$
$pC$ Экспер.	$1.30 \pm 0.09$	$36.01 \pm 0.8$	$0.43 \pm 0.04$	$0.78 \pm 0.02$
$pC$ FRITIOF	$1.17 \pm 0.03$	$39.29 \pm 0.3$	$0.42 \pm 0.01$	$0.72 \pm 0.07$
$dC$ Экспер.	$1.27 \pm 0.06$	$36.63 \pm 0.5$	$0.43 \pm 0.02$	$0.76 \pm 0.05$
$dC$ FRITIOF	$1.25 \pm 0.02$	$38.42 \pm 0.2$	$0.44 \pm 0.01$	$0.75 \pm 0.09$
$\alpha C$ Экспер.	$1.47 \pm 0.07$	$33.27 \pm 0.5$	$0.45 \pm 0.02$	$0.88 \pm 0.08$
$\alpha C$ FRITIOF	$1.45 \pm 0.02$	$33.65 \pm 0.3$	$0.40 \pm 0.01$	$0.81 \pm 0.06$
$CC$ Экспер.	$1.75 \pm 0.05$	$27.58 \pm 0.3$	$0.46 \pm 0.02$	$1.05 \pm 0.04$
$CC$ FRITIOF	$1.80 \pm 0.01$	$26.79 \pm 0.1$	$0.44 \pm 0.01$	$1.07 \pm 0.07$

Табл. 6: Средние значения кинематических переменных протонов-участников в ( $p$ ,  $d$ ,  $\alpha$ ,  $C$ ) $C+C$  взаимодействиях при импульсе  $p=4,2$  ГэВ/с/нуклон.

На рис. 7 представлены экспериментальные и расчетные распределения протонов по кинематическим переменным в  $CC$ -взаимодействиях. На рис. 7а приведены импульсные распределения протонов. Превышение экспериментальных данных расчетных значений наблюдается в области  $p = 0,4 \div 1,0$  ГэВ/с. На рис. 7б представлены распределения протонов-участников по поперечному импульсу. Модель недооценивает экспериментальные значения при  $p_T \sim 0,3 \div 0,4$  ГэВ/с. На рис. 7с

показаны распределения протонов по быстротам. Видно, что экспериментальное распределение имеет два максимума при  $y \sim 0,2$  и  $1,5$  и минимум при  $y \approx 1,1$ . Асимметрия быстрых распределений протонов обусловлена разными условиями регистрации протонов с различными импульсами и выделением стриппинговых протонов. Расчетное распределение такой асимметрии не имеет. Модель, как видно, недооценивает выход медленных протонов в областях фрагментации ядер. На рис. 7д показаны угловые распределения протонов-участников. Видно, что модель переоценивает выход протонов при малых углах.

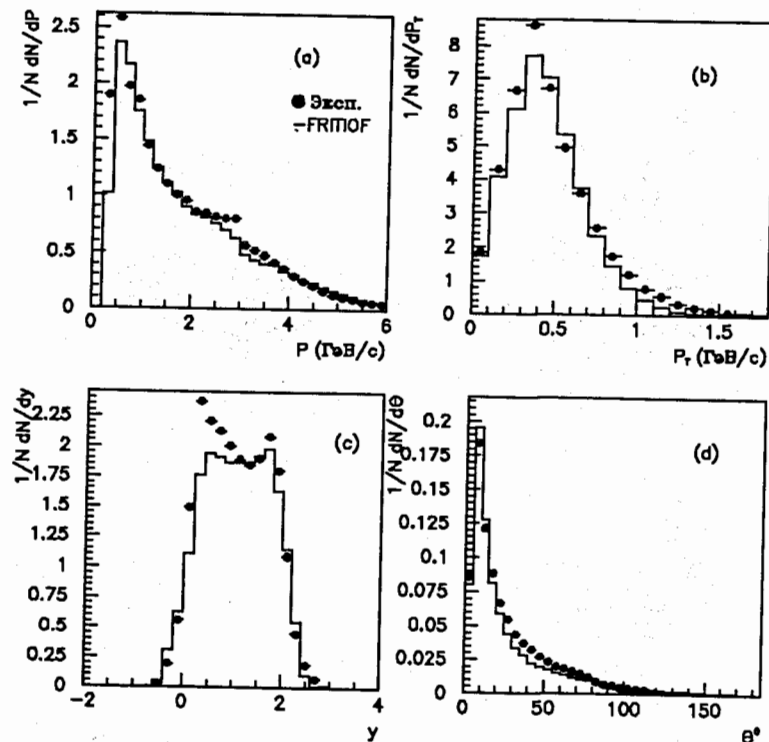


Рис. 7: Распределения по кинематическим переменным протонов-участников в  $CC$ -взаимодействиях при  $4,2 A$  ГэВ/с/нуклон.

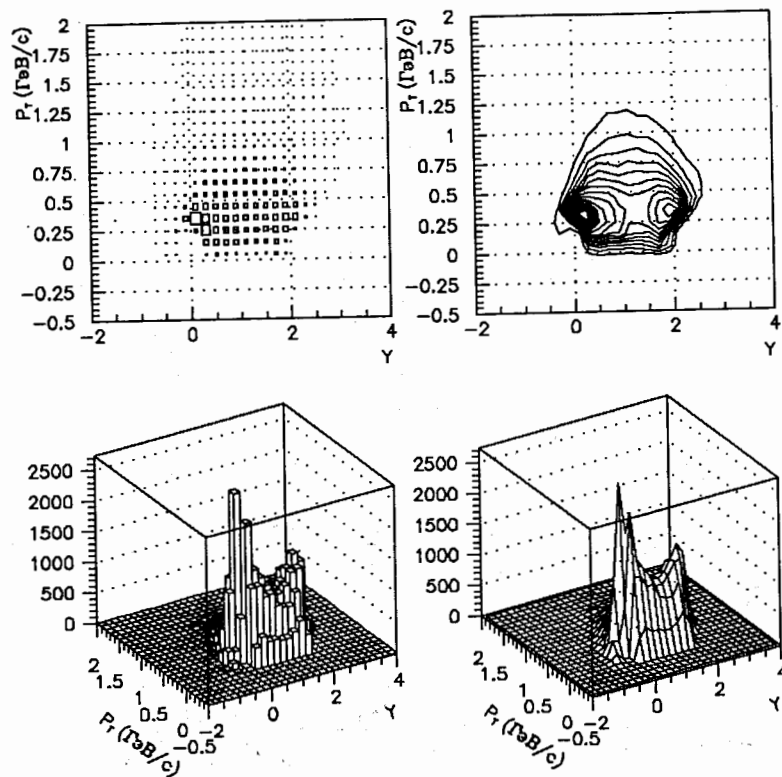


Рис. 8: Двухмерные экспериментальные распределения протонов-участников в  $CC$ -взаимодействиях при  $4,2 \text{ А ГэВ/с}$ .

На рис. 8 и 9 представлены двухмерные экспериментальные и расчетные распределения протонов-участников в неупругих  $CC$  взаимодействиях в лаб. системе. На рис. 8 видно четкое разделение областей фрагментаций ядер мишеней и ядер-снарядов. Распределение протонов с  $P_T < 0,5 \text{ ГэВ/с}$  по быстротам характеризуются явно выраженными максимумами в областях фрагментации ядер углерода и минимумом в центральной области.

В расчетных распределениях такая структура выражена гораздо слабее. Это связано с недостаточно точным учетом процессов, происходящих в ядрах - остатках.

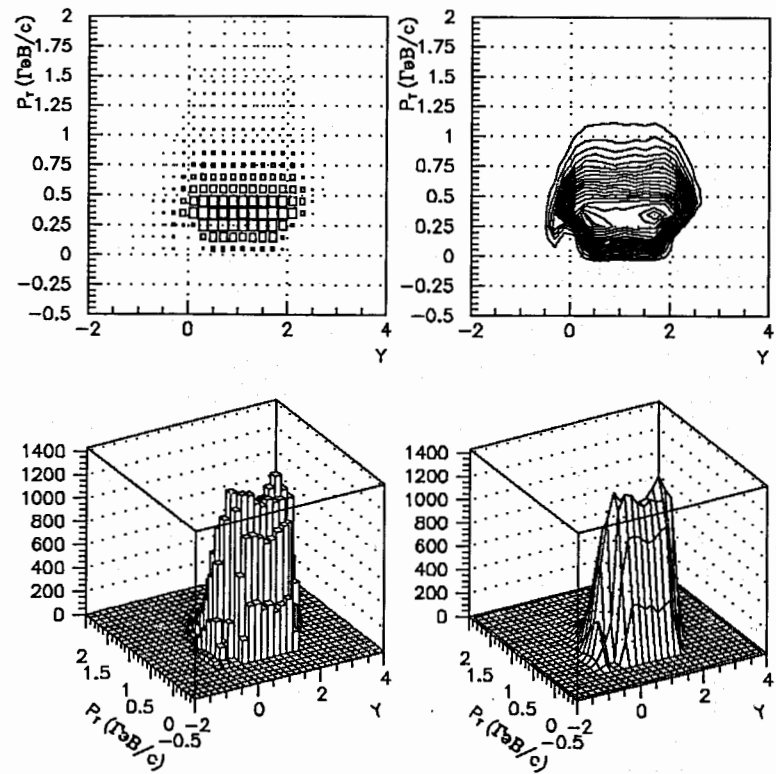


Рис. 9: Двухмерные расчетные распределения протонов-участников в  $CC$ -взаимодействиях при  $4,2 \text{ А ГэВ/с}$ .

В целом, можно сделать вывод о качественном согласии предсказаний модели с экспериментальными данными хотя имеются некоторые расхождения в форме экспериментальных и расчетных распределений протонов по кинематическим переменным в  $CC$ -взаимодействиях. Детальное описание характеристик протонов в областях фрагментаций ядер все еще остается проблемой.

В заключении диссертации кратко сформулированы основные результаты.

#### Результаты, представляемые к защите:

1. Анализ распределений  $\pi^-$ -мезонов и протонов по быстротам и поперечным импульсам в  $np$ -взаимодействиях при импульсах  $p_n = 1,25 \div 5,1$  ГэВ/с в рамках модели FRITIOF. За счет подбора параметров модели достигнуто комплексное описание  $np$ -взаимодействий.
2. Расчеты средней множественности  $\pi^-$ - мезонов в  $pp$ -,  $pn$ -,  $nn$ -взаимодействиях в широком диапазоне энергий от 2 до 400 ГэВ в рамках модифицированной модели FRITIOF. Показано, что модель воспроизводит множественность  $\pi^-$ - мезонов в пределах 8-9% для  $pp$ - взаимодействий и 6-7% для  $pn$  - и  $nn$ - взаимодействий.
3. Расчеты в рамках модели FRITIOF средней множественности  $\pi^-$ - мезонов в адрон-ядерных взаимодействиях в диапазоне энергий от 2 до 400 ГэВ, согласующиеся с экспериментальными данными в пределах 7%.
4. Анализ характеристик  $\pi^-$ -мезонов, рождающихся во взаимодействиях  $\alpha$ -частиц и ядер углерода с ядрами при импульсах  $p=4,5$  А ГэВ/с, по данным стримерной камеры, в рамках каскадно-испарительной модели и модифицированной модели FRITIOF. Показано, что модель FRITIOF, в отличие от каскадно-испарительной модели, хорошо описывает распределения  $\pi^-$ -мезонов по множественности, скорости и по поперечному импульсу.
5. Экспериментальные данные о распределениях  $\pi^-$ -мезонов и протонов по кинематическим переменным во взаимодействиях протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц и ядер углерода с ядрами углерода при импульсе 4,2 А ГэВ/с и их анализ в рамках модели FRITIOF. Показано, что модель FRITIOF, неучитывающая распады резонансов в ходе быстрой стадии взаимодействий, хорошо воспроизводит основные экспериментальные закономерности. Трудность представляет детальное, количественное описание спектров протонов, выбиваемых из ядер.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Б. Ганхуяг, В.В. Ужинский // "Рождение отрицательно-заряженных частиц в высокоэнергетических ядро-ядерных взаимодействиях". Сообщ. ОИЯИ, **P2-96-419**, Дубна, 1996.
2. B. Ganhuyag, V. Uzhinskii // " Modified FRITIOF Code: Negative Charged Particle Production In High Energy Nucleus-Nucleus Interactions", Czechoslovak Journal of Physics, **47 (1997), 913**
3. Б. Ганхуяг, В.В. Ужинский // "Описание характеристик  $\pi^-$ -мезонов в  $np$ -взаимодействиях при  $P_n=1-5$  ГэВ/с в рамках модели FRITIOF", Сообщ. ОИЯИ, **P1-97-315**, Дубна, 1997.
4. Б. Ганхуяг, В.В. Ужинский // "Описание характеристик протонов в  $np$ -взаимодействиях при  $P_n=3,83$  и 5,1 ГэВ/с в рамках модели FRITIOF", Сообщ. ОИЯИ, **P2-97-397**, Дубна, 1997.
5. Б. Ганхуяг // "Описание характеристик  $\pi^-$ -мезонов и протонов в  $np$ -взаимодействиях при  $P_n=1,25-5,1$  ГэВ/с в рамках модели FRITIOF", Сообщ. ОИЯИ, **P2-98-26**, Дубна, 1998.
6. B. Ganhuyag, R. Badalian // "Proton and Pion Spectra in CC Collisions at  $p=4.2$  GeV/c", In proc.: European School on High Energy Physics, 1995 CERN **96-04.**, 1996.
7. B. Ganhuyag, V. Uzhinskii // " Modified FRITIOF Code", Abst., XIII Int. Sem. High Energy Phys. Problems, Dubna, Russia, 1996, p.141
8. Ц. Баатар, Б. Ганхуяг и др. // "Некоторые свойства адронных кластеров при высоких энергиях", Труды ИФТ, МАН, **96-03.** Улан-Батор, 1996.
9. B. Ganhuyag, V. Uzhinskii, et al., // "Application of FRITIOF Model at Dubna Energies", Abst., XIV Int. Sem. High Energy Phys. Problems, Dubna, 1998, p. 93
10. B. Ganhuyag, V. Uzhinskii // "Application of FRITIOF Model at Low Energies", Abst., Int. Nucl. Phys. Conf., Paris, France. **Vol.1, p.237**

## Цитированная литература

- [1] B. Andersson et al, //Nucl. Phys. **281B** (1987) 289; B. Nilsson-Almquist, E. Stenlund //Comp. Phys. Comm. **43** (1987) 387.
- [2] H. Sorge, H. Stoker, W. Greiner //Ann. of Phys. (N.Y.) **192** (1989) 266; Nucl. Phys. **A498** (1989) 567c.
- [3] X.N. Wang and M. Gyulassy //Phys. Rev. **D44** (1991) 3501.
- [4] В.С. Барашенков, В.Д. Тонеев //”Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами”, М., Атомиздат, 1972.
- [5] Н.Ф. Маркова и др. //препр. ОИЯИ, P10-3768, Дубна, 1968 г.
- [6] Г.Н. Агакишиев и др. //препр. ОИЯИ, N1-83-662, Дубна, 1983.
- [7] A.I. Adamovich et al., (EMU-01 Collab.)// Zeit. fur Phys. A 358, (1997) 337.
- [8] Р.Н. Бекмирзаев и др. // ЯФ **58** (1995) 1822.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 февраля 1999 года.