



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

П405

УДК.539.12+539.14

1-89-456

ПЛЮТА Ян

**ПРОЦЕССЫ
МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ ПИОНОВ
И ИСПУСКАНИЯ НУКЛОНОВ
В СТОЛКНОВЕНИЯХ АДРОНОВ И ЯДЕР С ЯДРАМИ
ПРИ ЭНЕРГИЯХ 3 +40 ГэВ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика.

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1989

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор физико-математических наук,
профессор

ХАЧАТУРЯН
Марлен Нарисеевич

доктор физико-математических наук,
профессор

ФЛЯГИН
Владимир Борисович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

ШАБЕЛЬСКИЙ
Юлий Мечиславович

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета.

Защита диссертации состоится _____ 1989 года
в _____ часов на заседании специализированного совета Д-047.01.02
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, Лаборатория высоких энергий, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан _____ 1989 года.

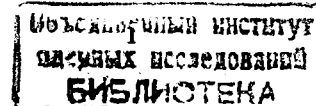
Ученый секретарь специализированного совета

М.Ф. Лихачев

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Процессы множественной генерации частиц в столкновениях релятивистских адронов и ядер с ядрами являются предметом интенсивных исследований на протяжении многих лет. Исследователей привлекает идея использовать внутриядерную среду в качестве микроскопического детектора с разрешением, сравнимым с радиусом действия сильных взаимодействий. Опыт исследований адронных столкновений показал, что для понимания механизмов множественной генерации недостаточно располагать лишь только данными о характеристиках конечных продуктов взаимодействия. Множественное рождение частиц рассматривается поэтому как процесс, характеристики которого являются предметом анализа. Современные представления о кварковой структуре адронов и свойствах сильных взаимодействий подтверждают целесообразность такого подхода. Вопрос длины и времени формирования, свойства процессов адронизации и взаимодействий кварков на больших расстояниях, природа конфайнмента - это проблемы, имеющие прямую связь с развитием процессов множественного рождения.

Для изучения пространственно-временных характеристик процессов множественного образования частиц проводится анализ т.н. интерференционных корреляций. Поведение двухчастичной корреляционной функции тождественных частиц в области малых относительных импульсов зависит от пространственно-временного распределения излучающих эти частицы источников. Экспериментальные исследования интерференционных корреляций проводятся интенсивно для всех, практически, типов взаимодействий - от e^+e^- -аннигиляции до ядро-ядерных столкновений. Получаемая информация раскрывает новые свойства изучаемых процессов. Последние результаты эксперимента NA35 (CERN), в котором наблюдались anomalously большие поперечные размеры области генерации пионов, до сих пор не нашли удовлетворительного объяснения. Неизвестно также, в какой мере наблюдаемые эффекты являются новым свойством, характерным для самых высоких энергий сталкивающихся ядер. Согласно существующим представлениям интерференционные явления содержат информацию о связи геометрических и динамических факторов, определяющих развитие процесса взаимодействия. Необходимо продолжение как экспериментальных, так и теоретических исследований. В диссертации много внимания уделяется изучению корреляции тождественных адронов для получения данных о пространственно-временных и динамических характеристиках исследуемых процессов.



Наряду с изучением процессов образования частиц рассматриваются также вопросы передачи энергии ядру-мишени и возбуждения ядерной материи; определяется тормозная способность ядер и обсуждаются признаки установления термодинамического равновесия. При энергиях в несколько ГэВ на нуклон процесс торможения может привести к остановке сталкивающихся ядер и созданию сильно возбужденной материи с большой плотностью барионов. В области самых высоких энергий наиболее волнующим вопросом является создание условий для осуществления фазового перехода ядерной материи в состояние кварк-глюонной плазмы. Для этого необходимо выполнение определенных условий, касающихся температуры и плотности ядерной материи. Естественное, на первый взгляд, стремление к самым высоким энергиям наиболее тяжелых ядер необязательно является лучшим способом достижения ожидаемых результатов. Наблюдаемая экспериментально прозрачность ядер для ультрарелятивистских снарядов подсказывает, что должна существовать оптимальная энергия для создания требуемых условий. Проводимые в Дубне исследования показывают, что некоторые асимптотические свойства ядерных взаимодействий достигаются уже при энергиях в несколько ГэВ на нуклон. В диссертации рассматриваются вопросы торможения и остановки частиц в ядре-мишени, даются оценки температуры излучающих частицы источников, определяется плотность ядерной материи в ядро-ядерных столкновениях.

В последнее время часто рассматриваются ядро-ядерные взаимодействия как сложение многих адрон-ядерных столкновений. Этот простой подход хорошо описывает многие характеристики вторичных частиц в широком диапазоне энергий сталкивающихся ядер. С другой стороны, некоторые результаты противоречат этой простой картине взаимодействия. Возникает вопрос: в каких условиях появляются новые свойства исследуемого процесса? Для проведения детального анализа целесообразно располагать данными по адрон-ядерным столкновениям, в которых прицельный параметр меняется контролируемым образом. Такой анализ проводится в диссертации.

ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ РАБОТЫ

1. Проведение экспериментальных исследований, в которых характеристики вторичных частиц изучаются в зависимости от переменной, определяющей степень центральности адрон-ядерного столкновения.

2. Экспериментальное выделение адрон-ядерных взаимодействий, в которых налетающая частица теряет в ядре-мишени свою энергию, причем не наблюдается образование вторичных частиц, а происходит только эмиссия нуклонов. Таким способом разделяются процессы множественной

генерации и процессы испускания нуклонов. Анализ проводится в зависимости от степени центральности столкновения.

3. Изучение пространственно-временных характеристик процессов образования частиц и испускания нуклонов в столкновениях быстрых адронов и ядер с ядрами. Для этой цели применяется метод корреляции тождественных адронов, испускаемых с близкими импульсами. Изучаются корреляции пионов и протонов для представительного набора ядер мишени (^1H , ^{12}C , ^{133}Xe , ^{181}Ta) и снарядов (π^- , p , d , α , ^{12}O).

4. Проведение совместного анализа полученных результатов и доступных литературных данных. Детально анализируется зависимость от массового числа ядра-мишени, а также типа и энергии налетающего снаряда.

5. Нахождение общих закономерностей процессов множественного рождения пионов и испускания нуклонов на основе проведенного анализа экспериментальных данных.

НОВИЗНА РАБОТЫ И НАУЧНАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

1. Получены обширные данные о характеристиках вторичных частиц, испускаемых во взаимодействиях π^- -мезонов с ядрами ксенона при 3.5 ГэВ/с. Изучены множественности частиц в π -Xe взаимодействиях при импульсах (2.34 - 9.0) ГэВ/с.

2. Впервые подробно изучены характеристики π^0 -мезонов в зависимости от степени центральности адрон-ядерного столкновения, которая связана с числом испущенных протонов.

3. Впервые выделены экспериментально и проанализированы взаимодействия релятивистских пионов с ядрами, в которых не наблюдается образования вторичных частиц, а только испускание нуклонов. Показано, что процесс торможения адрона в ядерной материи характеризует зависимость типа "пробег-энергия", а при импульсах в несколько ГэВ/с возможна остановка налетающего адрона в ядре-мишени.

4. Показано, что в π -Xe столкновениях при 3.5 ГэВ/с наблюдаются два типа источников вторичных пионов, которые характеризуются разными значениями температуры.

5. Впервые определены размеры области испускания нейтральных пионов методом анализа интерференционных корреляций.

6. Определены размеры области испускания протонов в разных типах адрон-ядерных и ядро-ядерных реакций: π^- -Xe при 3.5 ГэВ/с, $(p, d, \alpha, \text{O}-\text{C}$ при 4.2 ГэВ/с на нуклон, p -Ta при 10 ГэВ/с.

7. Впервые показано, что размеры области формирования адронных струй в мягких адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействиях совпадают с размерами, полученными для процессов e^+e^- -аннигиляции.

8. Определены размеры и форма области испускания π^- -мезонов в центральных $^{12}\text{C}-\text{C}$ столкновениях при 3.66 А·ГэВ. Получены данные для разных интервалов быстротного распределения пионов. Показано, что полученные результаты качественно отличаются от аналогичных данных при энергии 200 А·ГэВ.

9. Создана комплексная система обработки экспериментальных данных, зарегистрированных на снимках 180-литровой ксеноновой пузырьковой камеры ИТЭФ.

10. Разработан метод определения размеров области испускания протонов по анализу двухчастичных корреляций с учетом условий эксперимента.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

1. Получены детальные данные о характеристиках π^0 -мезонов, образованных в адрон-ядерных взаимодействиях при импульсах в несколько ГэВ/с. Тем самым получена информация, трудно доступная с помощью других экспериментальных установок. Ее можно в дальнейшем использовать как для проверки моделей множественной генерации частиц, так и для прикладных применений при планировании экспериментов с регистрацией нейтральных пионов. Полученный экспериментальный материал используется в дальнейших исследованиях.

2. Показано, что множественность вторичных протонов, испускаемых с импульсами (0.2 + 0.7) ГэВ/с в адрон-ядерных столкновениях, отражает с хорошим приближением "толщину" ядерной материи на пути налетающего адрона в ядре. Таким образом, ядро-мишень можно рассматривать как слой ядерной материи, имея видимый индикатор его основной характеристики.

3. Показано, что кинематические характеристики вторичных протонов связаны с пространственно-временным развитием процесса их эмиссии. Таким образом, получается возможность контролировать ход процесса по характеристикам протонов.

4. Результаты проведенного анализа пространственно-временного развития процессов множественного рождения пионов и испускания нуклонов показали, что этот метод способен дать информацию, которая отражает существенные свойства исследуемых процессов. Полученные результаты были использованы в планировании новых экспериментов на лучках создаваемого в ОИЯИ нуклотрона.

5. Методические разработки, проведенные в рамках этой работы, используются в дальнейших экспериментальных исследованиях.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ И ПУБЛИКАЦИИ

Результаты работы и выводы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах в Лаборатории высоких энергий и Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, а также Института физики Варшавского технического университета. Отдельные результаты докладывались на заседаниях Камерного комитета ОИЯИ и совещаниях международной Коллаборации по экспериментам с использованием пропановой пузырьковой камеры. Большая часть результатов представлялась на международных конференциях: в 1985г. на Конференции по ядро-ядерным столкновениям в Visby /Швеция/, в 1986г. на Конференции по ядерной физике в Harrogate /Великобритания/, в 1987г. на конференции "Частицы и ядра" (PANIC'87) в Kyoto /Япония/, в 1988г. на Конференции по ядро-ядерным столкновениям в Saint-Malo /Франция/.

Основные экспериментальные результаты и выводы диссертации опубликованы в препринтах и сообщениях ОИЯИ, в журналах "Ядерная физика", "Известия Академии наук СССР", "Z.Physik A", в материалах вышеупомянутых конференций.

Список основных публикации приводится в конце автореферата.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

Во введении дается краткое представление тематики диссертации. На фоне общей характеристики процессов множественного рождения и эмиссии частиц в столкновениях релятивистских адронов и ядер формулируются основные цели работы. Приводится также краткое содержание отдельных разделов диссертации.

В первой главе описывается эксперимент по исследованиям взаимодействий π^- -мезонов с ядрами ксенона. Основной экспериментальный материал получен с помощью 180-литровой ксеноновой пузырьковой камеры Института теоретической и экспериментальной физики в Москве. Камера облучалась в пучке π^- -мезонов с импульсами 3.5 ГэВ/с.

Общая физическая задача эксперимента состояла в получении полной (по мере методических возможностей) информации о характеристиках вторичных частиц. При просмотре отбирались все хорошо идентифицированные события; измерялись все треки заряженных частиц, включая следы электронов конверсии. Просмотр и измерения проводились в Институте физики Варшавского технического университета и в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

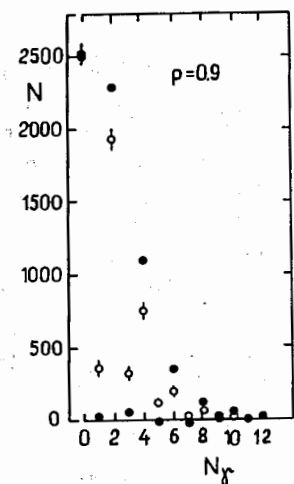


Рис. 1. Распределение по множественности γ -квантов. \circ - экспериментальное распределение. \bullet - распределение с учетом эффективности регистрации ρ .

Особенностью ксеноновой пузырьковой камеры является высокая эффективность регистрации γ -квантов - следовательно, π^0 -мезонов, которые являются главным их источником. Рис. 1. показывает, что в подавляющем большинстве событий наблюдается четное число γ -квантов N_γ ; события с нечетным N_γ являются результатом неполной эффективности регистрации, которая, однако, достаточно высока ($\approx 90\%$). Нейтральные пионы регистрируются в камере в полном диапазоне их кинетических энергий; с нулевых - до самых высоких, возможных кинематически. Для идентифицированных π^0 -мезонов проводилась коррекция энергии соответствующих им γ -квантов при условии совпадения эффективной массы $M_{\gamma\gamma}$ с массой π^0 -мезона. Средние ошибки определения энергии и углов эмиссии π^0 -мезонов (после процедуры коррекции) составляют соответственно $9,3\%$ и $1,9^\circ$.

Частицы, останавливавшиеся в рабочем объеме камеры, были идентифицированы как протоны. Импульсы протонов, выделяемых таким способом, заключаются в интервале от $0,2$ ГэВ/с до около $0,7$ ГэВ/с. В работе обсуждаются методические погрешности такой идентификации. Возможные примеси π^- -мезонов не превышают 2% .

В анализируемых событиях фиксировалось также число V^0 -частиц и т.н. нейтральных звезд, образованных вследствие взаимодействий вторичных нейтронов с ядрами ксенона в камере. Эти данные были использованы в качестве вспомогательной информации.

Лента суммарных результатов содержит 6301 событие.

В работе проводится также анализ распределений по множественностям разных сортов частиц. Для этой цели были использованы данные для взаимодействий π^+ -Xe при $2,34$ ГэВ/с (6110 событий), π^- -Xe при 5 ГэВ/с и при 9 ГэВ/с (1468 и 1994 событий соответственно).

Во второй главе представлены основные результаты эксперимента. Наиболее детально рассмотрены характеристики π^0 -мезонов, учитывая, что эта информация трудно доступна с помощью других экспериментальных установок. Отдельно представлен анализ данных по множественностям разных сортов частиц в диапазоне начальных импульсов $(2,34 \pm 9,0)$ ГэВ/с.

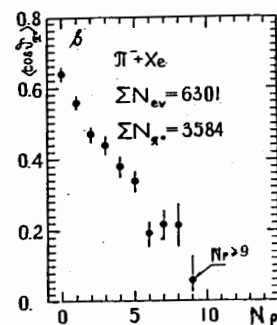
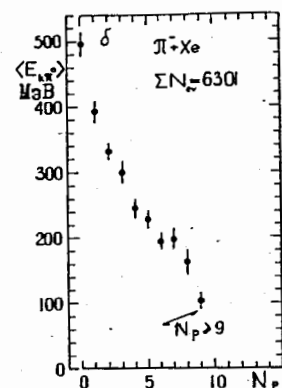
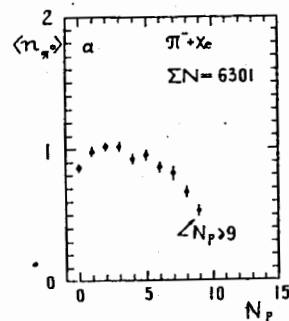


Рис. 2. Зависимости: а - средней множественности, б - средней кинетической энергии, в - среднего косинуса угла эмиссии π^0 -мезонов от числа вторичных протонов в π^- -Xe столкновениях при $3,5$ ГэВ/с $^{12}\text{Г}$.

В первоначальной стадии исследований оказалось, что характеристики разных вторичных частиц определенным образом зависят от числа испущенных протонов $^{1-4}$. Несколько примеров демонстрируют рисунки. Характеристики пионов радикально меняются с ростом числа испущенных протонов (рис. 2.). Характеристики самих протонов от их числа в событии почти не зависят. Учитывая наблюдаемые факты, можно заключить, что число испущенных протонов качественно характеризует параметр столкновения налетающей частицы с ядром. В дальнейшем проводится детальный анализ разных характеристик вторичных частиц в зависимости от числа протонов в событии.

Результаты эксперимента сравнивались также с предсказаниями модели внутриядерного каскада. Получено согласие для большинства энергетических и угловых характеристик, хотя множественности вторичных частиц оказались в эксперименте меньше, чем в модели.

В конце этой главы обсуждается результат, который в дальнейшем стимулировал работы по разделению процессов рождения пионов и испускания нуклонов. В зависимости среднего числа протонов от числа пионов в событии видно сильное увеличение средней множественности протонов для числа пионов, $N_\pi = 0$ $^{3/}$. Такой зависимости в других экспериментах до этого не наблюдалось. Отсутствие пионов (с любым зарядом) среди вторичных частиц означает, что налетающий пион передал ядру всю свою энергию, вследствие чего и наблюдается большая множественность эмиссии протонов. Детальное рассмотрение этих вопросов представляется в следующей главе.

В третьей главе сначала обсуждаются методические вопросы, связанные с выделением событий без множественного рождения частиц, а затем рассматриваются физические свойства выделенного класса событий.

В упрощенном представлении события без рождения вторичных частиц удовлетворяют следующим критериям:

$$N_{\pi} = 0, 1, \quad N_{V^0} = 0, \quad N_p \geq 0,$$

где N_{π} , N_{V^0} , N_p - число пионов в событии (включая π^0 -мезоны), число V^0 -частиц, число вторичных протонов соответственно.

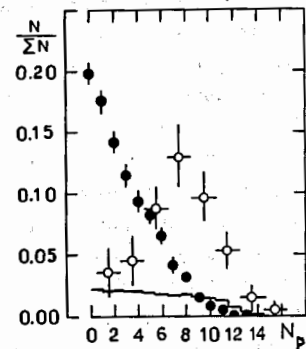


Рис. 3. Распределения по множественности протонов.

○ - в событиях с $N_{\pi} = 0$,
● - в событиях с $N_{\pi} \geq 1$.

Наблюдается сильная зависимость числа вторичных протонов от угла вылета пиона в событиях с $N_{\pi} = 1$. Азимутальные распределения протонов указывают на существование асимметрии в плоскостях, определяемых углом вылета пиона. Оказалось также, что относительная доля событий с $N_{\pi} = 0$ быстро уменьшается с ростом импульса налетающего пиона. Для $P_{\pi} \geq 5$ ГэВ/с таких событий практически не наблюдается.

Сравнение результатов, полученных для выделенного класса событий, с результатами, представленными во второй главе, а также с литературными данными для других реакций, показывает, что процессы множественного рождения не влияют существенно на характеристики испускаемых протонов. Форма энергетических и угловых распределений протонов является характерным свойством процесса их эмиссии. Множественность испущенных протонов тесно связана с энергией, теряемой налетающим адроном на своем пути в ядре. Для импульсов

Условие $N_{\pi} = 0$ означает, что первичный пион передает ядру всю свою энергию, в результате чего наблюдается интенсивная эмиссия нуклонов. На рис. 3 представлено распределение по числу протонов в таких событиях; приведено также аналогичное распределение для $N_{\pi} \geq 1$. Яркое различие в форме этих двух распределений соответствует приблизительно двухкратной разнице в значении средних множественностей. Для $N_{\pi} > 0$ не наблюдается существенной зависимости числа вторичных протонов от N_{π} .

Анализ показал, что импульсные и угловые характеристики протонов в так выделенных событиях не зависят от числа вторичных протонов N_p и не отличаются от соответствующих им характеристик в событиях, где $N_{\pi} > 1$.

налетающих адронов в несколько ГэВ/с потери энергии приводят к остановке адрона в ядре-мишени.

На основе проведенного анализа был сделан вывод, что процесс эмиссии нуклонов развивается последовательным образом вдоль траектории налетающей частицы в ядре. Ход этого процесса определяют локальные свойства ядерной материи, зондируемой налетающим адроном (плотность ядерной материи, распределение плотности заряда и др.). Зависимость от массового числа ядра-мишени выражается геометрическим фактором, учитывающим вид распределения плотности ядерной материи. Множественности протонов, полученные в предположении о распределении плотности ядерной материи в виде распределения Ферми, дали неплохое согласие с результатами эксперимента.

В четвертой главе анализируются свойства источников, излучающих вторичные частицы в столкновениях пионов с ядрами ксенона при $P_{\pi} = 3.5$ ГэВ/с. В связи с этим рассматриваются также вопросы передачи энергии ядру-мишени и возбуждения ядерной материи; определяется тормозная способность ядра и обсуждаются признаки установления термодинамического равновесия.

В начале главы описан метод анализа данных, позволяющий определить систему, которую можно рассматривать как собственную систему источников. Принятый подход дает возможность получить информацию о локальном возбуждении ядерной материи, а также определить тормозную способность ядра-мишени. На рис. 4. показаны распределения π^0 -мезонов по быстрой для разных значений N_p . Все распределения приблизительно симметричны, но с увеличением числа протонов их положения сдвигаются систематически в сторону меньших быстрой. Для $N_p = 0$ середина распределения соответствует симметричной эмиссии пионов в системе пион-нуклон при $P_{\pi} = 3.5$ ГэВ/с; для $N_p > 8$ подобный эффект виден в лабораторной системе отсчета.

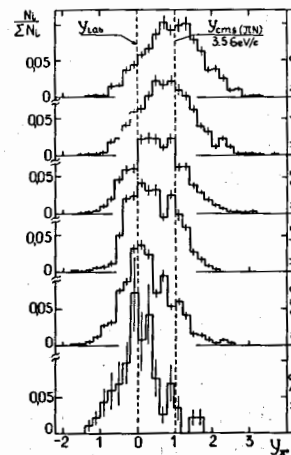


Рис. 4. Распределения по быстрой π^0 -мезонов в событиях с разным числом вторичных протонов N_p .

Наблюдаемые зависимости соответствуют картине, в которой пионы испускаются движущимися источниками, скорости которых зависят от степени центральности события, выражаемого числом протонов N_p .

Для определения скорости излучающей системы $\beta_s(N_p)$ использовались трансформационные свойства быстроты:

$$\beta_s(N_p) = \tanh [y_M(N_p)], \quad (1)$$

где $y_M(N_p)$ - медиана быстротного распределения π^0 -мезонов для данного значения N_p . В так определенной системе числа пионов, летящих вперед и назад, совпадают.

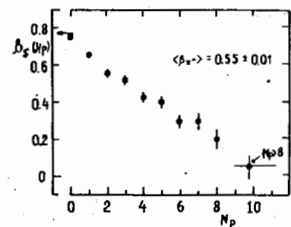


Рис. 5. Зависимость скорости источников от числа протонов N_p .

На рис. 5. показана зависимость определенной таким способом скорости от числа протонов в событии. Стрелка на рисунке отмечает скорость системы пион-нуклон при $P_\pi = 3.5$ ГэВ/с. Скорость $\beta_s = 0$ соответствует лабораторной системе отсчета. Экспериментальные точки занимают весь интервал между этими значениями.

Таким образом, наблюдается полное торможение излучающей системы в ядре-мишени. Почти изотропная эмиссия пионов в лабораторной системе координат достигается при этом для числа вторичных протонов $N_p > 8$, что близко к средней множественности протонов в событиях с остановкой налетающего пиона в ядре-мишени. Проведен анализ зависимости $\langle y_{\pi^0} \rangle = f(N_p)$, которая характеризует тормозную способность ядра; $\Delta y / \Delta N_p = -0.081 \pm 0.003$. Показано также, что с уменьшением прицельного параметра возрастает степень изотропии угловых и импульсных распределений.

В дальнейшем анализировались инклюзивные распределения π^0 -мезонов в зависимости от их кинетических энергий. Для аппроксимации распределений потребовались двухкомпонентные экспоненциальные функции типа:

$$f(T) = A_1 \exp(-T/T_{01}) + A_2 \exp(-T/T_{02}). \quad (2)$$

Здесь, A_1, A_2, T_{01}, T_{02} - параметры аппроксимации.

Оказалось, что в лабораторной системе отсчета имеет место сильная зависимость параметров аппроксимации T_{01} и T_{02} от выбранного углового интервала и числа протонов N_p . Эти зависимости практически исчезают после перехода в систему симметричной эмиссии, определенной формулой (1). Аппроксимируя неинвариантные распределения пионов в системе симметричной эмиссии, получим следующие значения температур для двух типов источников:

$$T_1 = 135 \pm 4 \text{ МэВ}, \quad T_2 = 52 \pm 3 \text{ МэВ}.$$

Более детальный анализ показал, что с увеличением

степени центральности события возрастает вклад второго источника.

Значение T_2 приблизительно совпадает со значениями температуры, полученными для протонов, испускаемых назад в π^- -Xe столкновениях при 3.5 ГэВ/с.

В пятой главе проводится анализ интерференционных корреляций вторичных пионов, испускаемых в столкновениях релятивистских адронов и ядер. Как известно, корреляции тождественных частиц, испускаемых с близкими импульсами, несут информацию о пространственно-временных характеристиках процесса их генерации.

Вначале дается краткое описание теоретических подходов, в которых интерференционные корреляции применяются для извлечения информации о пространственно-временных характеристиках исследуемых процессов; приводятся разные виды параметризации двухчастичной корреляционной функции и рассматриваются методические вопросы анализа двухчастичных распределений в области малых относительных импульсов. В дальнейшем проводится детальный анализ данных по определению размеров области эмиссии пионов в столкновениях релятивистских адронов и ядер.

Отдельно представлены результаты анализа интерференционных корреляций π^0 -мезонов, испускаемых в π^- -Xe взаимодействиях при 3.5 ГэВ/с. Нейтральные пионы являются хорошим объектом для исследования их интерференции из-за отсутствия эффектов кулоновского отталкивания. Идентификация нескольких π^0 -мезонов в одном событии требует, однако, очень высокой эффективности регистрации γ -квантов. Поэтому полученные в этой работе данные являются первым в мировой литературе результатом по определению размеров области испускания π^0 -мезонов.

На рис. 6 показано одно из полученных распределений. Двухчастичная корреляционная функция представлена здесь в зависимости от переменной Q , которая определяет разницу импульсов пионов в их собственной системе отсчета. Кривая показывает результат аппроксимации экспериментального распределения по формуле:

$$R(Q) = A (1 + \lambda \exp(-Q^2 \gamma_0^2)), \quad (3)$$

где A, λ, γ_0 - параметры распределения.

Конечные результаты, определяющие среднеквадратичный радиус области испускания π^0 -мезонов и временные интервалы их генерации, следующие:

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = 1.2 \pm 0.3 \text{ фм}, \quad \text{ст} = 0.8 \text{ фм}.$$

Рис. 6. Распределение $R(Q)$. Кривая - результат аппроксимации по формуле (3).

Эти результаты соответствуют аналогичным результатам работ, выполненных по корреляциям заряженных пионов, образованных в адрон-адронных взаимодействиях; совпадают также с результатами, полученными для взаимодействий протонов и антипротонов с ядрами ксенона при энергии 200 ГэВ. Полученные размеры меньше размеров области эмиссии заряженных пионов в ядро-ядерных столкновениях при энергиях порядка нескольких ГэВ на нуклон.

Таким образом, экспериментальные наблюдения показывают, что размеры ядра-мишени не определяют пространственно-временных характеристик процесса множественной генерации. Результаты, полученные в этой работе, согласуются с общим предположением, что размеры области генерации пионов определяются размерами меньшего из сталкивающихся объектов.

В дальнейшем представлены результаты анализа интерференционных корреляций в адронных струях, выделяемых инвариантным методом в столкновениях π^- -мезонов с протонами и ядрами углерода при начальном импульсе 40 ГэВ/с. Интерес к таким исследованиям исходит из представления о кварковой структуре адронов и ядер. В связи с этим возникла гипотеза, что характеристики адронных струй не зависят от происхождения и свойств цветной кварковой системы (типа взаимодействия), а определяются динамикой процесса адронизации. Действительно, результаты исследований, проводимых в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, показали, что многие свойства адронных струй, рассматриваемых в пространстве относительных четырехмерных скоростей, имеют универсальный характер, и не отличаются даже в таких разных типах взаимодействия, как e^+e^- -аннигиляция и кумулятивные π^- -C взаимодействия. Существует много данных по исследованию интерференционных корреляций в струях, регистрируемых в процессах e^+e^- -аннигиляции, но подобных исследований для ядерных процессов пока не проводилось.

В этой работе струи выделялись по методу минимизации суммы квадратов относительных четырехмерных скоростей. Струи, образующиеся в области фрагментации пучка и в области фрагментации мишени, рассматривались отдельно. Анализ проводился в системе центра масс π -p ($P_{\pi} = 40$ ГэВ/с), а также в системе покоя струи. Применялись разные типы параметризации корреляционной функции, основанные на разных предположениях о характеристиках излучающей системы. Отдельно рассматривались корреляционные функции, построенные относительно инвариантной переменной Q - четырехмерной разницы импульсов:

$$Q^2 = -(p_1 - p_2)^2, \text{ где } p_1, p_2 - \text{четыреимпульсы пионов, составляющих пару.}$$

Результаты показали, что интерференционные корреляции в струях, образующихся в области фрагментации пучка, не зависят от массы ядра

мишени и совпадают с аналогичными данными, полученными для процессов e^+e^- -аннигиляции. Отличие наблюдается для струи в области фрагментации мишени. Полученные результаты демонстрируют новое свойство процессов множественного рождения в мягких адрон-адронных и адрон-ядерных столкновениях: пространственно-временные характеристики адронных струй, выделяемых инвариантным методом в области фрагментации налетающего адрона, являются универсальным свойством процессов образования струи, независимым от типа и природы сталкивающихся объектов.

В конце этой главы представлены результаты анализа продольных и поперечных размеров области испускания π^- -мезонов в центральных столкновениях $^{12}\text{C} - \text{O}$ при энергии 3.66 А ГэВ. Работу стимулировали недавние результаты коллаборации NA35 (CERN), где наблюдалось anomальное увеличение поперечных размеров области испускания π^- -мезонов в столкновениях $^{16}\text{O} - \text{Au}$ при 200 А ГэВ для центрального интервала быстрого распределения пионов. В нашей работе были использованы данные, полученные с помощью 2-метровой стримерной камеры (установка СКМ-200). Результаты показали, что при энергии 3.66 А ГэВ не наблюдается аналогичного увеличения поперечных размеров области испускания пионов, но видно увеличение продольных размеров. Полученный результат указывает на разную природу эффектов, наблюдаемых для разных энергий налетающих ядер.

В главе шестой анализируются корреляционные характеристики протонов в области малых относительных импульсов и определяются размеры области испускания протонов.

Поведение двухчастичной корреляционной функции протонов в области малых относительных импульсов определяют эффекты квантовой статистики, взаимодействия в конечном состоянии и кулоновского отталкивания. Функция имеет характерный вид с широким максимумом, высота которого зависит главным образом от пространственно-временных свойств процесса эмиссии протонов.

После краткого теоретического введения рассматриваются методические вопросы построения двухчастичных распределений с учетом экспериментальных условий. Область корреляционного эффекта составляет только небольшую часть фазового объема, доступного в случае камерной методики. Наблюдение корреляции требует, следовательно, большого объема экспериментального материала. Недостаток данных приводит к необходимости построения сравнительно широких интервалов, охватывающих значительную часть корреляционного максимума. В пределах одного интервала имеет место как большой рост плотности пар протонов, так и изменения корреляционной функции. Учет

всех этих взаимно связанных условий реализуется путем статистического моделирования.

В дальнейшем представлены результаты анализа двухпротонных корреляций для реакций: $\pi^- - \text{Xe}$ при 3.5 ГэВ/с, $(p, d, \alpha, \text{O} - \text{C}$ при 4.2 ГэВ/с на нуклон, $p - \text{Ta}$ при 10 ГэВ/с. Подробно рассмотрена зависимость корреляционных характеристик протонов от их импульсов.

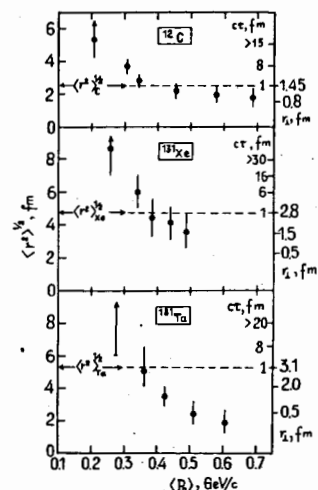


Рис. 7. Зависимость среднеквадратичных радиусов области испускания протонов от средних импульсов протонов $\langle p_p \rangle$.

Наблюдается усиление корреляционного эффекта с ростом импульсов протонов, чему соответствует уменьшение размеров области их эмиссии. На рис. 7 представлена зависимость среднеквадратичного радиуса области эмиссии протонов $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ от средних импульсов коррелированных пар $\langle p_p \rangle = \langle |\vec{p}_1 + \vec{p}_2| \rangle$ для трех ядер-мишеней:

$(^{12}\text{C}, ^{136}\text{Xe}, ^{181}\text{Ta})$. Теоретические расчеты проводились в предположении сферически-симметричной формы области эмиссии; для временного параметра принималось значение: $\text{ст} = 1 \text{ фм}$. Во всех случаях для средних импульсов протонов в интервале (0.3–0.4) ГэВ/с значения среднеквадратичных радиусов области испускания соответствуют среднеквадратичным радиусам ядер-мишеней. Размеры области испускания медленных протонов ($P < 0.3$ ГэВ/с) систематически больше; для самых высоких импульсов размеры заметно меньше размеров мишени, что особенно хорошо видно в случае ядра тантала.

Наблюдаемые закономерности можно связать с увеличением временных интервалов процесса эмиссии (для медленных протонов) и с уменьшением поперечных размеров области испускания (для протонов быстрых). Результаты соответственных расчетов показаны на шкале с правой стороны рисунка. Представленные там значения временных интервалов процесса эмиссии, а также поперечные размеры области испускания, альтернативным путем позволяют объяснить экспериментально наблюдаемые корреляционные характеристики.

В конце главы проводится совместный анализ результатов этой работы и литературных данных, доступных в настоящее время. Для сравнения результатов разных работ вводится определение:

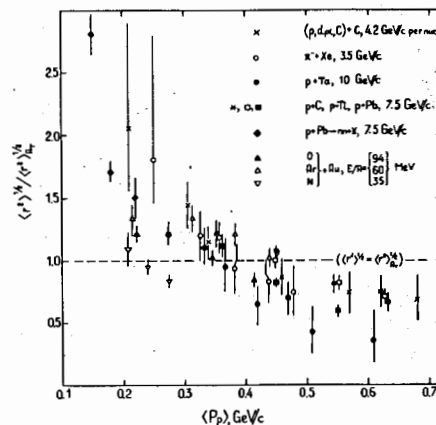


Рис. 8. Зависимость относительных размеров γ_{rel} от средних импульсов протонов.

$$\gamma_{\text{rel}} = \langle r^2 \rangle^{1/2} / \langle r^2 \rangle_{A_T}^{1/2}, \quad (4)$$

где $\langle r^2 \rangle_{A_T}^{1/2}$ — среднеквадратичный радиус ядра-мишени. На рис. 8 представлена зависимость γ_{rel} от средних значений импульсов протонов. Результаты других работ подтверждают общие закономерности, наблюдаемые в настоящей работе. В частности, оказывается, что размеры области испускания быстрых протонов ($P > 0.3$ ГэВ/с) зависят от массового числа ядра-мишени как $A^{1/3}$ и по абсолютной величине близки геометрическим размерам ядра. При этом не наблюдается существенной зависимости от массового числа ядра-снаряда.

В заключении изложены основные результаты и выводы работы.

I. Проведен цикл экспериментальных исследований

1) Выполнены экспериментальные исследования взаимодействий π^- -мезонов с ядрами ксенона в интервале импульсов 2.34–9 ГэВ/с с помощью методики пузырьковых камер. Получен новый экспериментальный материал и обширные данные о характеристиках вторичных частиц. Лента суммарных результатов содержит 6301 событие. Результаты опубликованы в 23 работах.

2) Проведен анализ уникального класса событий, в которых взаимодействие налетающей частицы с ядром не приводит к образованию вторичных частиц, а только к интенсивной эмиссии нуклонов. Наблюдение и выделение этого класса событий дало возможность экспериментально разделить процесс эмиссии нуклонов и процессы множественной генерации пионов. Определены основные свойства выделенного класса событий. Полученная лента суммарных результатов содержит 1212 событий. Результаты опубликованы в 10 работах.

3) Изучены двухчастичные корреляции тождественных пионов и протонов, в области малых относительных импульсов, с целью получения информации о пространственно-временных характеристиках исследуемых

процессов. Исследования проведены для широкого круга данных, выделяемых по разным физическим критериям. Статистика проанализированного экспериментального материала составляет около 54000 событий. Результаты опубликованы в 8 работах.

II. Выполнены методические разработки

1) Создана программа геометрической реконструкции событий, зарегистрированных на снимках 180-литровой ксеноновой пузырьковой камеры.

2) Разработан метод анализа двухчастичной корреляционной функции π^0 -мезонов, идентифицированных по измеренным характеристикам γ -квантов, регистрируемых в ксеноновой пузырьковой камере.

3) Разработан метод учета экспериментальных условий при определении размеров области испускания протонов по методу двухчастичных корреляций.

III. Получены новые физические результаты

1) Получены данные о характеристиках π^0 -мезонов и протонов, испускаемых в π^- -Xe столкновениях при 3.5 ГэВ/с. Проанализирована зависимость импульсных и угловых распределений вторичных частиц от степени центральности столкновения. Получены значения параметров наклона инклюзивных спектров π^0 -мезонов в лабораторной системе координат и в т.н. системе "симметричной эмиссии". Установлено, что для аппроксимации инклюзивных спектров π^0 -мезонов требуется определение двух значений параметров наклона.

2) Впервые выделены и проанализированы события остановки пионов с импульсами 3.5 ГэВ/с в ядре ксенона. Среднее число протонов в таких событиях больше чем в два раза превышает среднее число протонов в остальных случаях и составляет $\langle N_p \rangle = 7.4 \pm 0.3$.

3) Впервые метод интерференционных корреляций был использован для определения размеров области генерации π^0 -мезонов и временных интервалов их эмиссии. Полученные значения для столкновений π^- -Xe при 3.5 ГэВ/с, составляют:

$$\langle r^2 \rangle^{1/2} = 1.2 \pm 0.3 \text{ фм}, \quad \text{ст} = 0.8 \begin{matrix} +0.4 \\ -0.3 \end{matrix} \text{ фм}$$

4) Определены размеры области испускания протонов в столкновениях π^- -Xe при 3.5 ГэВ/с, $\langle {}^1\text{H}, {}^2\text{H}, {}^4\text{He}, {}^{12}\text{C} \rangle$ -C при 4.2 ГэВ/с на нуклон и p-Ta при 10 ГэВ/с. Проанализирована зависимость размеров области испускания от импульсов протонов.

5) Впервые изучены интерференционные корреляции в адронных струях, выделяемых в π^- -p и π^- -C взаимодействиях при 40 ГэВ/с.

6) Впервые определены размеры области формирования барионных кластеров в столкновениях релятивистских ядер: $\langle r^2 \rangle^{1/2} = 2.7 \pm 0.5$ фм, для столкновений ядер углерода при 4.2 ГэВ/с на нуклон.

7) Определены размеры и форма области испускания π^- -мезонов в центральных ${}^{12}\text{C}$ -Ql столкновениях при 3.66 А ГэВ для разных интервалов быстрого распределения пионов.

IV. Изучены свойства процессов множественного рождения пионов и испускания нуклонов

1) В рамках квазиклассического подхода установлено, что существенным параметром, определяющим ход процессов испускания нуклонов и множественного рождения пионов в столкновениях релятивистских адронов с ядрами, является толщина слоя внутриядерной материи на пути адрона в ядре. Ее видимым индикатором является множественность быстрых ($P > 0.3$ ГэВ/с) протонов.

2) Торможение адрона в ядерной материи является последовательно развивающимся процессом. Скорости излучающих вторичные пионы источников постепенно уменьшаются по мере увеличения толщины ядерной материи на пути налетающей частицы в ядре. Тормозная способность ядра характеризуется величиной: $\Delta u / \Delta N_p = -0.081 \pm 0.003$.

4) Свойством процесса торможения является зависимость типа "пробег-энергия" подобно процессу торможения заряженных частиц в материалах. Для энергии налетающего адрона в несколько ГэВ процесс торможения может привести к остановке адрона внутри ядра.

5) В столкновениях π^- -Xe при 3.5 ГэВ/с наблюдается два типа источников вторичных пионов: первый - с температурой около 50 МэВ; второй - с температурой около 140 МэВ.

6) Процесс множественной генерации пионов локализован в области, размеры которой определяются в основном размерами налетающего адрона или меньшего из сталкивающихся ядер. Размеры области испускания нуклонов с импульсами меньше 1 ГэВ/с не зависят от массы релятивистского снаряда, а определяются размерами ядра-мишени.

7) Кинематические характеристики нуклонов, испускаемых в интервале импульсов (0.15-1.0) ГэВ, отражают пространственно-временные свойства процесса их эмиссии:

- а - первоначальной стадии процесса, развивающегося последовательным образом вдоль траектории налетающего снаряда сопутствует эмиссия быстрых ($P > 0.4$ ГэВ/с) нуклонов;
- б - расширение поперечных размеров области испускания и увеличение временных интервалов эмиссии соответствует

испусканию более медленных нуклонов;

в - нуклоны с импульсами в интервале (0.15 ± 0.30) ГэВ/с
испускаются из области, размеры которой равны или
больше размеров ядра-мишени.

8) Размеры адронных струй, выделяемых в области фрагментации
налетающего снаряда в адрон-адронных и адрон-ядерных столкновениях,
совпадают и не отличаются от размеров, получаемых для процессов e^+e^-
аннигиляции. Этот результат является указанием на независимость
динамических свойств процессов адронизации кварков и кварковых
систем от их происхождения.

9) Размеры барионных кластеров, выделяемых в области
фрагментации ядра-мишени, не зависят от типа налетающего снаряда.
Величина их размеров соответствует приблизительно размерам
ядра-мишени.

10) Для пионов, выпускаемых в центральной области их быстрого
распределения, форма и размеры области их эмиссии в центральных
ядро-ядерных столкновениях существенно меняются с ростом энергии
снаряда.

Таким образом, обнаружен ряд характерных свойств процессов
множественного рождения пионов и испускания нуклонов. Полученные
результаты позволили установить связи между свойствами ядра-мишени и
характеристиками выпускаемых протонов, дали возможность разделить
процесс эмиссии нуклонов и процессы множественной генерации пионов,
позволили проанализировать пространственно-временное развитие
исследуемых процессов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Я. Плюта, З.С. Стругальский,
"Рождение π^+ -мезонов во взаимодействиях π^- -Хе при 3.5 ГэВ/с",
ОИЯИ, Р1-7398, Дубна, 1973.
2. Я. Плюта, З. Стругальский,
"Характеристики протонов, выпускаемых в π^- -Хе взаимодействиях
при 3,5 ГэВ/с", ОИЯИ, Р1-7399, Дубна, 1973.
3. З. Стругальский, Я. Плюта,
"Энергетические и угловые спектры протонов, выпускаемых в
 π^+ -Хе взаимодействиях при 3,5 ГэВ/с",
ОИЯИ, Р1-7730, Дубна, 1974.
4. Я. Плюта, Стругальский,
"К вопросу о взаимодействии частиц высоких энергий с ядрами
атомов", ОИЯИ, Р1-9204, Дубна, 1975; ЯФ, 1976, т.24, с.766.
5. Л.С. Охрименко, Я. Плюта, Б.Словинский, З. Стругальский,

"Энергетические спектры протонов, выпускаемых в π^- -Хе
взаимодействиях при 3,5 ГэВ/с", ОИЯИ, Р1-9692, Дубна, 1976.

6. Л.С. Охрименко, Я. Плюта, и др.,
"Исследование масштабных свойств энергетических спектров
протонов, выпускаемых в π^- -Хе взаимодействиях при
2.34 и 3.5 ГэВ/с", ОИЯИ, Р1-9806, Дубна, 1976.
7. Л.С. Охрименко, Я. Плюта, и др.,
"Угловые и энергетические спектры протонов, выпускаемых в
 π^- -Хе взаимодействиях при 2.34 и 3.5 ГэВ/с",
ОИЯИ, Р1-10977, Дубна, 1977; ЯФ, 1978, т.27, с.1567.
8. Z. Strugalski, T. Pawlak, W. Peryt, J. Pluta,
"Proton Spectra in High-Energy Pion-Nuclei Collisions not
Accompanied by Multiparticle Production",
JINR, E1-11975, Dubna, 1978.
9. И.Н. Варданян, Я. Плюта и др.,
"Парциальные коэффициенты неупругости при взаимодействии
адронов с различными мишенями", ОИЯИ, Р1-12691, Дубна, 1979;
Изв. АН СССР, Сер.Физ. т.44, с.486, 1980.
10. Z. Strugalski, T. Pawlak, W. Peryt, J. Pluta,
"Proton Multiplicity Distribution in Pion-Xenon Nucleus
Collisions at 3.5 GeV/c", JINR, E1-80-39, Dubna, 1980.
11. Z. Strugalski, T. Pawlak, J. Pluta,
"Experimental Study of the Pion-Xenon Nucleus Collisions
without particle production at 3.5 GeV/c momentum:
а) "General Data", JINR, E1-82-718, Dubna, 1982.
б) "Asymmetry in Proton Emission",
JINR, E1-82-719, Dubna, 1982.
в) "Energy and Momentum Spectra of Emitted Protons",
JINR, E1-82-841, Dubna, 1982.
12. Стругальский, Я. Плюта, и др.,
"Экспериментальные исследования столкновений пион-ксенон
при 3,5 ГэВ/с:
а) "Энергетические и импульсные спектры испущенных протонов",
ОИЯИ, Р1-83-68, Дубна, 1983.
б) "Угловые распределения испущенных протонов",
ОИЯИ, Р1-83-237, Дубна, 1983.
в) "Относит. интенс. испускания частиц", ОИЯИ, Р1-83-564, Дубна, 1983
г) "Рождение нейтральных пионов", ОИЯИ, Р1-83-568, Дубна, 1983.
13. Е. Балеа, Я. Плюта, и др.,
"Двухпротонные корреляции в α -С-взаимодействиях при импульсе
4,2 ГэВ/с на нуклон",
ОИЯИ, Р1-85-639, Дубна, 1985; ЯФ, 1986, т.44, с.434.

14. Z. Strugalski, T. Pawlak, J. Pluta,
"Experimental Study of the Pion-Xenon Nucleus Collisions Without Particle Production at 3.5 GeV/c momentum: Physical Meaning of the Proton Multiplicity Distribution", JINR, E1-85-888, Dubna, 1985.
15. J. Bartke, ..., J. Pluta, et al.,
"Size of the Proton Emission region in Pion-Xenon Interactions at 3.5 GeV/c from Two-Particle Correlations" Int. Conf on Nucleus-Nucleus Collisions, Visby, 10-14 June 1985, Vol.1, pp.102.; Z. Phys. A, 1986, 324, p.471.
16. J. Pluta,
"Observation of $\pi^0\pi^0$ Interference and Size of Pion Emission Volume in π^- -Xe Interactions at 3.5 GeV/c". Proc. of the Int. Nucl. Phys. Conf., Harrogate, 25-30 August 1986, Vol.1 p.463.
17. В.Г. Гришин, ..., Я. Плюта, и др.
"Температура и плотность ядерной материи в СС-взаимодействиях при $\rho=4.2$ ГэВ/с на нуклон", ОИЯИ, P1-86-639, Дубна, 1986; ЯФ, 1987, T46, с. 832.
18. В.Г. Гришин, ..., Я. Плюта, и др.,
"Наблюдение эффекта ($\pi^0\pi^0$)-интерференции и размеры области испускания π^0 -мезонов в π^- -Xe взаимодействиях при 3,5 ГэВ/с", ОИЯИ, P1-86-585, Дубна, 1986; ЯФ, 1987, T47, с. 439.
19. G.N. Agakishiev, ..., J. Pluta et al.,
"Size of the Proton Emission Region in p-C, d-C, α -C and C-C Interactions at 4.2 GeV/c per Nucleon from Two-Proton Correlations", Z. Phys. A, 1987, 327, p.443.
20. Г.Н. Агакишев, ..., Я. Плюта, и др.
"Двухпротонные корреляции и размеры области испускания протонов в рГа-взаимодействиях при импульсе 10 ГэВ/с", ОИЯИ, P1-87-442, Дубна, 1987; ЯФ, 1988, 47, 1292.
21. K. Miller, ..., J. Pluta et al.,
"Pion Energy Dissipation in π^- + Xenon Nucleus Collisions at 3.5 GeV/c", XI Int. Conf. Particles and Nuclei "PANIC'87" Kyoto, 20-24 April 1987, Book 1, p.258; JINR, E1-87-362, Dubna, 1987.
22. Z. Strugalski, ..., J. Pluta et al.
"Experimental Study of Hadron Passage Through Intranuclear Matter", JINR, E1-88-211, Dubna, 1988.
23. J. Pluta, et al.,
"Nuclear Matter Excitation in Pion-Xenon Collisions at 3.5 GeV/c: Inclusive Spectra of Neutral Pions",

- III Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions, Saint-Malo, 6-11 June 1988, Vol.1 p.134; JINR, E1-88-450, Dubna, 1988.
24. J. Pluta,
"Space-Time Characteristics of Secondary Proton Sources in Relativistic Nuclear Collisions From Two-Particle Correlations", III Int. Conf. on Nucleus-Nucleus Collisions, Saint-Malo, 6-11 June 1988, Vol.1 p.133; JINR, E1-88-754, Dubna, 1988.
25. Я. Плюта,
"Некоторые методические вопросы исследования двухчастичных корреляций протонов в области малых относительных импульсов", ОИЯИ, P1-89-247, Дубна, 1989.
26. А.У. Абдурахимов, ..., Я. Плюта и др.,
Продольные и поперечные размеры области испускания π^- -мезонов в центральных столкновениях $^{12}\text{C-Cu}$ при энергиях 3.36 А ГэВ, ОИЯИ, 1-89-272, Дубна, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 июня 1989 года.