

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ЧАСНИКОВ

ИВАН ЯКОВЛЕВИЧ

ЛИДИРУЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ В АДРОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

Специальность 01.04.01 - Экспериментальная физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1977.

Работа выполнена в Лаборатории множественных процессов при высоких энергиях Института физики высоких энергий Академии наук Казахской ССР.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент АН СССР, профессор

Г.Т.ЗАЦЕЛИН

доктор физико-математических наук,
профессор

А.Н.ГОРБУНОВ

доктор физико-математических наук

А.В.ЕФРЕМОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт физики высоких энергий (г.Серпухов)

Автореферат разослан " _____ " _____ 1977 года.

Защита состоится " _____ " _____ 1977 года в _____ час.
на заседании специализированного Совета Д-56/2 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна, Московской обл., Лаборатория высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

М.Ф.ЛИХАЧЕВ

Основу диссертации составляют работы, посвященные изучению проблемы лидирующих частиц во взаимодействиях адронов (в основном π^- -мезонов) с нуклонами и атомными ядрами в области энергий, достижимых на современных ускорителях.

Проблема лидирующих частиц включает в себя выделение их из числа вторичных частиц, образованных в неупругих адронных взаимодействиях, исследование их свойств и корреляций с характеристиками остальных (нелидирующих) частиц и особенностей их поведения в сложных атомных ядрах. Решение этой проблемы связано с более глубоким изучением процесса множественного образования частиц в том числе его пространственно-временных характеристик.

Цель работы — исследование свойств лидирующих частиц и их роли в адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействиях, что является перспективным направлением в изучении динамики сильных взаимодействий.

Научная новизна состоит в том, что впервые было проведено систематическое исследование свойств лидирующих частиц в пион-нуклонных взаимодействиях, в которых наиболее трудно выделить эти частицы. Исследования начаты автором в 1968г. Изучена корреляция лидирующих частиц с различными характеристиками неупругих взаимодействий адронов с нуклонами и атомными ядрами в области энергий 10–200 Гэв и показано, что свойства лидирующих и остальных (нелидирующих) частиц, образованных во взаимодействиях адронов с нуклонами и атомными ядрами, существенно разные.

Практическая ценность заключается в том, что полученные экспериментальные данные используются для проверки теоретических представлений множественного образования частиц в адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействиях. Показано, что после исключения лидирующих частиц и нуклонов отдачи, угловые и импульсные характеристики остальных частиц (пионов), образованных в неупругих адрон-нуклонных взаимодействиях могут быть описаны в рамках термодинамического подхода. Знание поведения лидирующих частиц внутри атомного ядра значительно сокращает круг теоретических моделей множественного образования частиц на ядрах атомов.

Изучение неупругих взаимодействий адронов потребовало разработки методов определения энергии и природы быстрых частиц, а также создания измерительно-вычислительного комплекса, включающего специальные установки для измерения координат следов в пузырьковых камерах и ядерных фотоэмульсиях.

Предложенные методы исключения ложного рассеяния и других помех при определении энергии и природы заряженных частиц по измерениям их многократного кулоновского рассеяния и ионизационных потерь в ядерных фотоэмульсиях нашли практическое применение в ряде лабораторий СССР и за рубежом.

Основные положения, выдвинутые автором на защиту:

I. Лидирующие частицы представляют собой, в основном, "сохранившиеся" первичные адроны, испытавшие неупругие взаимодействия с нуклонами или атомными ядрами. Свойства лидирующих и остальных (нелидирующих) частиц, образованных в адронных взаимодействиях, существенно отличаются. Вероятность об -

разования лидирующих частиц во взаимодействиях адронов со сложными ядрами атомов меньше, чем во взаимодействиях адронов с нуклонами, что не согласуется с представлением о полной пассивности лидирующих частиц в ядерной материи.

2. Распределение лидирующих частиц по полным импульсам с увеличением атомного номера ядра мишени смягчается, а в распределении по поперечным импульсам, наоборот, значительно чаще наблюдаются частицы с очень большими поперечными импульсами.

3. Асимметрия в угловом, импульсном и других распределениях ливневых частиц, особенности одночастичных корреляций и наличие дальнедействующих двухчастичных корреляций в инклюзивных и полунклюзивных реакциях обусловлены, в основном, вкладом лидирующих частиц, исключение которых существенно меняет средние характеристики оставшихся вторичных частиц и позволяет описать их свойства в рамках термодинамических моделей.

4. Характеристики медленных частиц, образованных в адрон-ядерных взаимодействиях, слабо зависят от первичной энергии и более чувствительны к природе налетающего адрона и размеру ядра мишени в отличие от характеристик быстрых частиц.

5. Отношение средней множественности ливневых частиц к корню квадратному из дисперсии распределения по множественности слабо зависит от энергии и ~~природы~~ первичных адронов и атомного номера ядра мишени.

6. Теоретические модели, основанные на идее обычного внутриядерного каскада, не согласуются с экспериментальными данными по неупругим взаимодействиям адронов с атомными ядрами при высоких энергиях.

Автор также защищает методические разработки, связанные с повышением точности и надежности в определении импульсов и природы быстрых частиц в ядерных фотозумьских.

Настоящая работа является частью многолетних плановых экспериментальных исследований неупругих взаимодействий адронов (в основном π -мезонов) с нуклонами и ядрами, проводимых в лаборатории множественных процессов при высоких энергиях Института физики высоких энергий Академии наук Казахской ССР, руководимой автором с момента ее организации (1963г.). Исследования проводились при энергиях 7,5; 10; 11; 17; 40; 50; 60 и 200 Гэв ^{ж)}. При этом было проанализировано более 20 тысяч событий, в том числе, примерно в половине случаев с измеренными импульсами лидирующих и остатальных частиц.

Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и заключения, списка литературы и приложения.

В первой главе описываются основные черты неупругих взаимодействий адронов с нуклонами и ядрами при высоких энергиях и их теоретическая интерпретация на основе существующих моделей. Важной особенностью этих процессов является эффект лидирования.

Долгое время считалось, что адроны, испытавшие неупругие соударения, исчезают и одновременно появляются другие элементарные частицы. Такой подход, например, рассматривался в статистической теории Ферми, основная идея которой состоит в том, что в результате неупругого взаимодействия адронов образуется единая компаунд-система, из которой испускаются отдельные частицы. Однако, экс-

ж) Часть экспериментального материала, относящегося к энергиям $E > 40$ Гэв, получена коллективно в лабораториях Алма-Аты, Будапешта, Бухареста, Варшавы, Дубны, Кракова, Ленинграда, Москвы, Серпухова, Софии, Ташкента, Тбилиси, Улан-Батора, Ханоя. Пользуясь случаем, автор выражает глубокую признательность коллегам по сотрудничеству за совместную работу.

периментальные факты показывают, что испытывшие взаимодействия адроны, как правило, сохраняют свою природу, значительную долю энергии, направление движения, знак заряда. Эффект лидирования проявляется в распределениях вторичных частиц по импульсам, углам, скоростям и т.п.

Несмотря на то, что указания о существовании лидирующих частиц были известны давно, их свойства и роль в адронных взаимодействиях стали изучаться в основном в последние годы.

Экспериментальное изучение лидирующих частиц проводилось нами двумя методами: в адрон-нуклонных взаимодействиях, в основном, с помощью пузырьковых камер, в адрон-ядерных - с помощью ядерных фотоэмульсий. В работе используется экспериментальный материал, полученный при обработке снимков с 81см и 200см пузырьковых водородных камер, облученных на ускорителе ЦЕРНа π^- -мезонами с импульсами 10 и 11 Гэв/с, соответственно [1-7], (более 5 тысяч событий) и при обработке снимков с 2-х метровой пропановой пузырьковой камеры ОИЯИ, облученной на ускорителе ИФВЭ в Серпухове π^- -мезонами с импульсом 40 Гэв/с [8-11] (более 2 тысяч событий). Обработка снимков с пузырьковых камер осуществлялась по методике, разработанной в ОИЯИ, на созданном в ИФВЭ АН КазССР измерительно-вычислительном комплексе. Комплекс создан, в основном, на базе отечественного оборудования, средств автоматизации и вычислительной техники и в настоящее время включает в себя БЭСМ-6, две БЭСМ-4, три ЭВМ "Электроника-100" и одну ЕС-1010, два спиральных измерителя, около десяти полуавтоматов типа ПУОС и другого оборудования, созданного и создаваемого на базе разработок ИФВЭ АН КазССР (г.Алма-Ата), ОИЯИ (г.Дубна), ИФВЭ (г.Серпухов) и других организаций. Научно-организационная работа по созданию измерительно-вычислительного комплекса ИФВЭ АН КазССР проводилась под руководством академика АН КазССР Ж.С.Такибаева и автора.

В ядерных фотоэмульсиях было проанализировано около 14 тысяч взаимодействий адронов с нуклонами и ядрами атомов, в том числе 1266, 4234, 654, 1986, 2153 взаимодействий, образованных π^- -мезонами с энергией, соответственно, 7,5 Гэв [12], 17 Гэв [12,13,14], 50 Гэв [15]; 60 Гэв [12,14,16]; 200 Гэв [17] и более 3,4 тысяч взаимодействий, образованных протонами с энергиями 10 и 200 Гэв [18,19].

Всего для анализа использовано около 21 тысячи событий, из них около 9 тысяч событий, образованных π^- -мезонами и протонами с энергией $E_0 \geq 40$ Гэв, были обработаны, как уже ранее отмечалось, совместно сотрудниками лабораторий из различных городов [8-11,15,17,19].

На части событий, найденных в фотоэмульсиях, облученных протонами с импульсом 10 Гэв/с и π^- -мезонами с импульсами 17 и 60 Гэв/с, методом многократного кулоновского рассеяния [20], были измерены импульсы большинства вторичных высокоэнергетичных частиц (практически, у всех лидирующих частиц). В фотоэмульсиях, облученных в магнитном поле π^- -мезонами с импульсом 50 Гэв/с, измерялись не только импульсы вторичных частиц, но и их знаки заряда.

Просмотр и отбор событий осуществлялись по общепринятой методике. Измерение углов вторичных частиц и их многократного кулоновского рассеяния или кривизны следов проводились на полуавтоматических микроскопах МИГЭ-2 и МИРЭ-2 с записью информации на перфоленту и последующей ее обработкой на БЭСМ-4.

В специальном параграфе первой главы обосновывается критерий выделения лидирующих частиц в отдельных событиях по максимальному импульсу в L -системе (лабораторная система координат).

Независимо от энергии первичной частицы, размеров ядра мише-

ни, типа взаимодействия и методов исследования в интегральных импульсных спектрах вторичных частиц наблюдается изгиб в области $P_i = (0,1-0,3)P_0$ (рис. I). Место изгиба в спектрах зависит от числа генерированных частиц и размеров ядра мишени.

Интегральные спектры в области малых и больших импульсов могут быть описаны экспонентой $\exp(-u/u_0)$, где $u = P_i/p$. Постоянная u_0 в высокоэнергичной части спектров в 2,2-2,5 раза больше, чем для низкоэнергичной. Возможность описания спектров, представленных на рис. I, одной прямой линией оценивалась по χ^2 -критерию и оказалась маловероятной ($P \leq 0,1\%$) [3,21].

В спектре вторичных пионов из pp -взаимодействий никаких изгибов не наблюдается (рис. Ia, точки 3). Однако, в суммарном спектре вторичных пионов и протонов появляется изгиб в той же области, что и в спектре частиц из πp взаимодействий при одной и той же множественности и первичной энергии (рис. Ia, точки 1). Разумно предположить, что высокоэнергичная часть спектра в πp -взаимодействиях, также как и в pp -взаимодействиях, обусловлена "сохранившимися" первичными частицами.

Выделение "сохранившихся" (лидирующих) частиц в неупругих пион-нуклонных и пион-ядерных взаимодействиях, когда первичная частица по своим характеристикам подобна большинству вторичных частиц, представляет собой сложную задачу. Кроме того, в неупругих взаимодействиях адронов может образоваться не только одиночная лидирующая частица, но и лидирующая система (например, ρ^0 -мезон), образованная в результате возбуждения первичного пиона. В диссертации отмечается, что используемый нами критерий выделения лидирующих частиц по максимальному импульсу ($P_{\text{лид}} \geq u_{\text{из}} P_0$, где $P_{\text{лид}}$ и P_0 - импульсы лидирующей и первичной частиц, $u_{\text{из}}$ - коэффициент, соот-

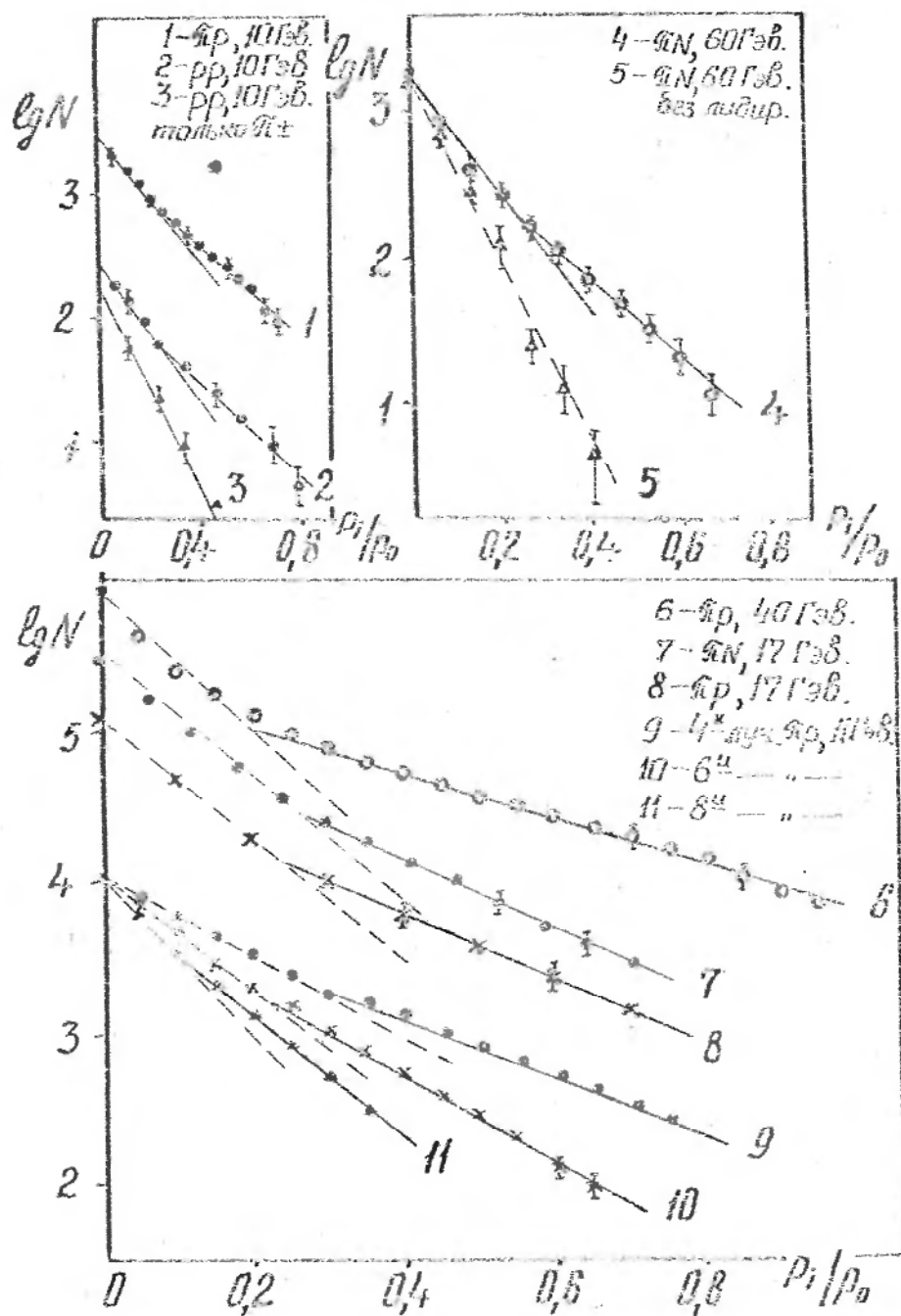


Рис. 1а. Интегральные излученные спектры вторичных частиц в адрон-нуклонных взаимодействиях в L - системе.

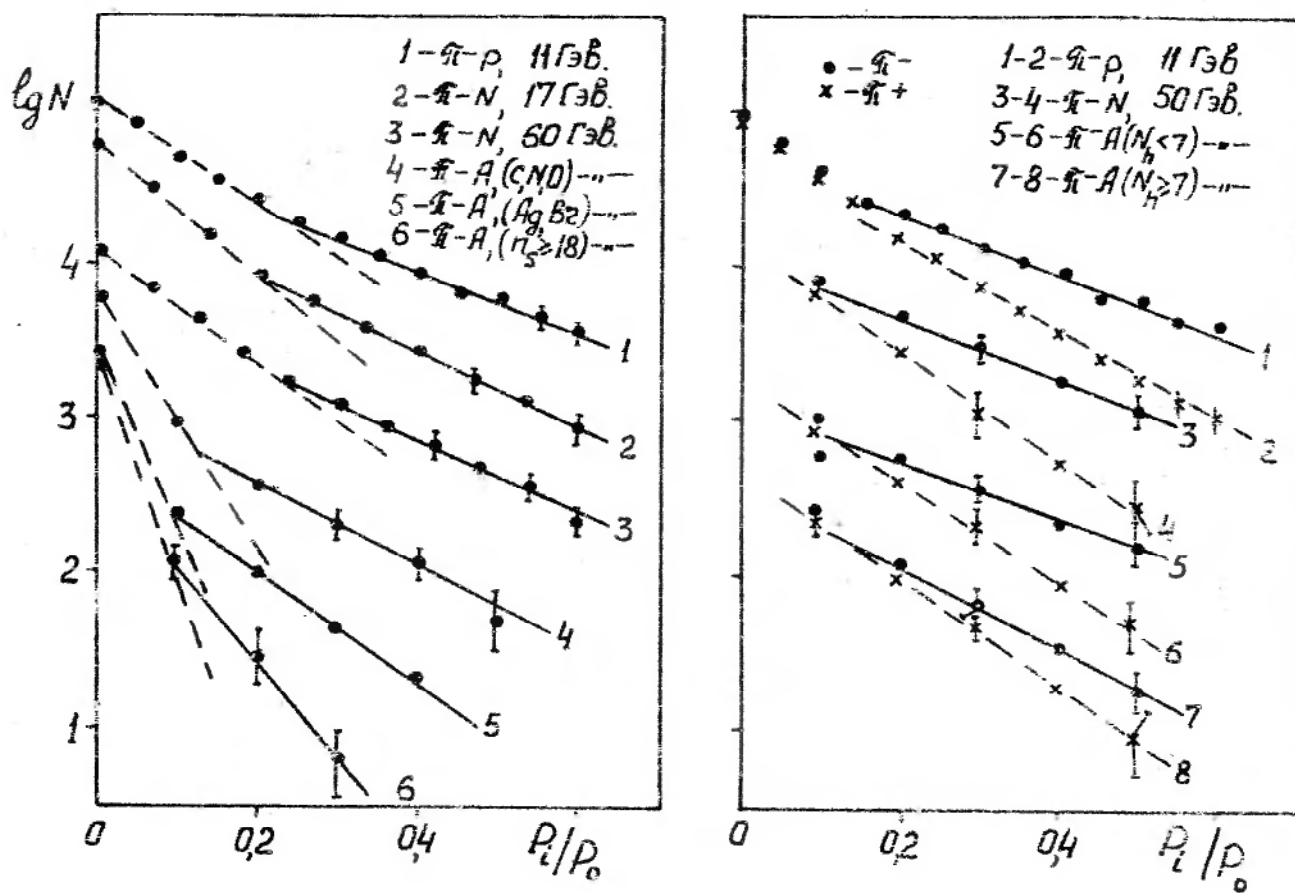


Рис. 16. Интегральные импульсные спектры вторичных частиц в пион-нуклонных и пион-ядерных взаимодействиях.

ветствующий изгибу в интегральном импульсном спектре, рис.1) не является совершенным. Однако, в применении к индивидуальным ливням и последующего анализа множественных процессов на нуклонах и ядрах атомов он является наиболее приемлемым.

Вторая глава посвящена изучению свойств лидирующих частиц, выделенных по критерию максимального импульса. Приводится доля лидирующих π^- , π^+ и π^0 мезонов в различных каналах π^+p -реакций при энергиях 10 и 11 Гэв. Показано, что с увеличением числа образованных частиц, доля лидирующих пионов того же знака заряда, что и налетающий адрон, уменьшается, а противоположного, наоборот - увеличивается. Число лидирующих π^- -мезонов в π^+p -реакциях не зависит от перезарядки протона мишени. Во взаимодействиях π^- -мезонов с атомными ядрами при энергиях 50 и 60 Гэв число лидирующих частиц уменьшается с увеличением размеров атомных ядер. Так, число заряженных лидирующих частиц во взаимодействиях пионов с тяжелыми ядрами вещества фотоэмульсии почти в три раза меньше числа таких же частиц в пион-нуклонных соударениях. Причем, это уменьшение обусловлено частицами, имеющими тот же знак заряда, что и налетающий пион. Уменьшение числа лидирующих пионов в πA взаимодействиях по сравнению с πN соударениями указывает на то, что лидирующая частица не может быть "пассивной" в атомном ядре, в области рассматриваемых энергий [15,22-24].

Анализ углов вылета лидирующих частиц показал, что они почти не зависят от числа образованных частиц в пион-нуклонных взаимодействиях и несколько увеличиваются с ростом атомного номера ядра мишени. Среди частиц, имеющих минимальный угол вылета в

L -системе в отдельных ливнях, около 60% составляют лидирующие частицы. Зависимость среднего значения поперечного импульса и сред-

ней энергии в C -системе (система центра инерции) у лидирующих и остальных (нелидирующих) частиц от числа образованных частиц (множественности) существенно разная (рис.2).

Средний поперечный импульс лидирующих частиц примерно в 1,5 раза больше, чем поперечный импульс остальных частиц и с ростом атомного номера ядра мишени увеличивается.

Поведение ассоциативных множественностей от величины поперечного импульса в реакциях $\pi^- N \rightarrow \pi_{\perp} + X$ и $\pi^+ A \rightarrow \pi_{\perp} + X$ неодинаково. Если в области больших значений $P_{\perp}$ в πN взаимодействиях ассоциативная множественность падает, то в πA соударениях, наоборот, увеличивается (рис.3). Увеличение среднего значения поперечного импульса лидирующих частиц с ростом атомного номера ядра мишени и увеличение ассоциативной множественности в πA -соударениях с ростом величин $P_{\perp}$ указывает на неупругое взаимодействие лидирующих частиц внутри сложного атомного ядра.

В последнем параграфе второй главы рассматривается вопрос о природе лидирующих частиц. Для анализа были взяты 4-х лучевые πP взаимодействия при энергии 10 Гэв и было показано [3], что природа и знак заряда лидирующих частиц в большинстве случаев те же, что и у налетающего адрона. В анализируемых реакциях, например, в $\pi^- P \rightarrow \rho^0 \pi^- \pi^+$, $\pi^- P \rightarrow \rho^0 \pi^- \pi^+ \pi^0$ в 70-60% случаев лидирующей частицей является π^- -мезон, в остальных случаях π^+ и π^0 -мезоны. Показано, что примерно в 20% случаев лидирующие π^- , π^+ и π^0 -мезоны образуются в результате распада высокоэнергичных (лидирующих) резонансов. Исключение лидирующих π^- , π^+ и π^0 -мезонов, образованных за счет распада высокоэнергичных резонансов, уменьшает долю одиночных лидирующих частиц: π^- -мезонов в 1,3-1,5

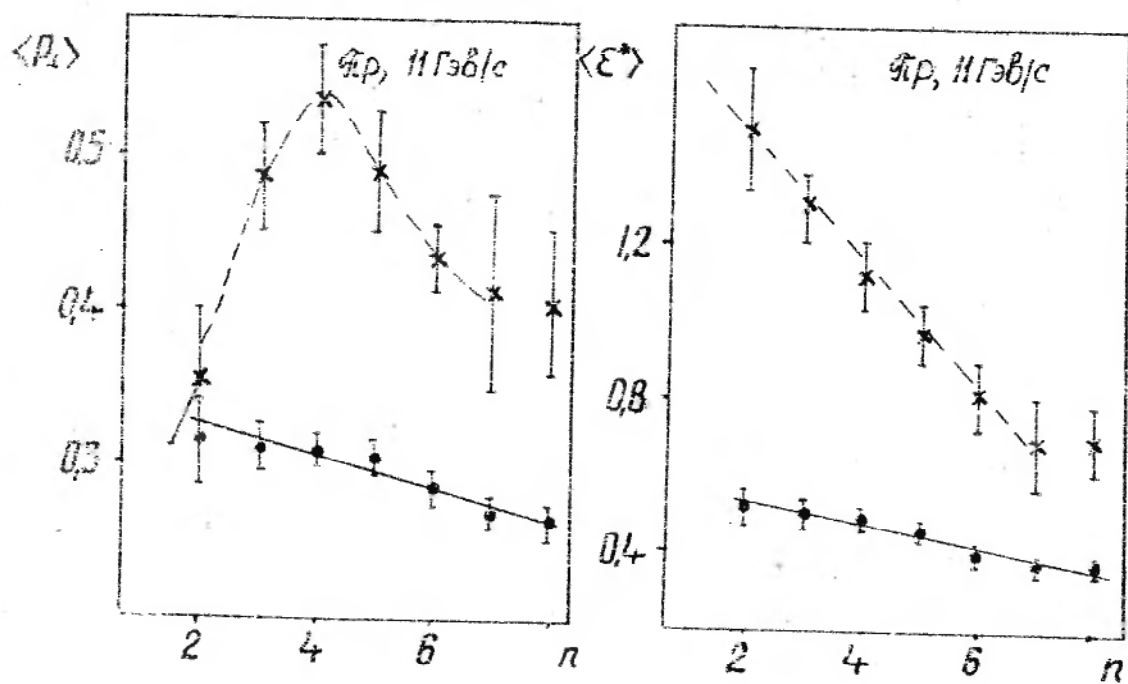


Рис. 2. Средние значения $\langle P_1 \rangle$ и $\langle \epsilon' \rangle$ лидирующих и остальных частиц в зависимости от числа n генерированных пионов: кресты - лидирующие частицы; точки - остальные пионы.

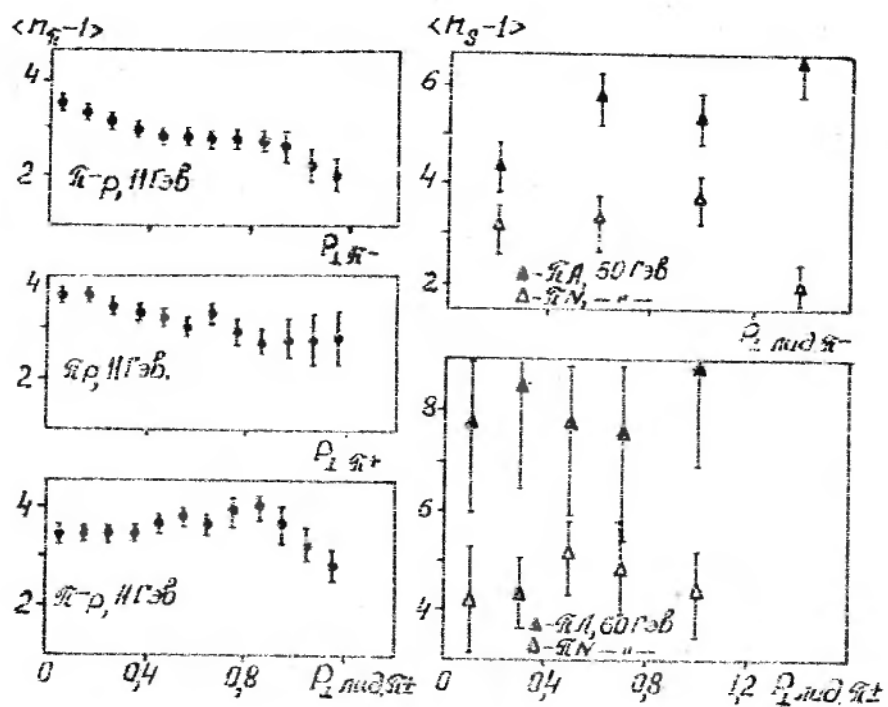


Рис. 3. Ассоциативные множественности в зависимости от поперечного импульса лидирующих частиц.

раза, а π^+ и π^- -мезонов в 2-4 раза. Таким образом, лидирующие π^+ и π^- -мезоны в IP -реакциях образуются в основном в результате распада высокоэнергичных резонансов.

В третьей главе изучаются импульсные характеристики вторичных частиц, образованных в пион-нуклонных и пион-ядерных взаимодействиях в интервале энергий 10-60 Гэв с учетом исключения лидирующих частиц. Показано, что импульсные распределения в С-системе (система центра инерции сталкивающихся частиц) большинства вторичных пионов, образованных в пион-нуклонных взаимодействиях, с ростом энергии, практически, не изменяются, за исключением "хвоста" распределения в области больших импульсов. Этот эффект и различия импульсных спектров пионов разного знака объясняются наличием лидирующих частиц.

В распределениях по P_T^2 релятивистских частиц, образованных в пион-нуклонных и пион-ядерных взаимодействиях, в области $P_T^2 \approx (0,2-0,3) \text{ (Гэв/с)}^2$ наблюдается изгиб (рис.4). Как видно, спектры по P_T^2 невозможно описать одной экспонентой. Большинство экспериментальных точек может быть описано двумя экспонентами. Причем, показатели экспонент в области малых P_T^2 примерно в 3 раза больше, чем в области больших значений P_T^2 (при $E_0 = 60 \text{ Гэв}$). Высокоэнергичная часть спектра, также как в распределении по P/P_0 определяется, в основном, вкладом лидирующих частиц. Спектры частиц по P_T^2 в области малых поперечных импульсов, в отличие от распределения по P/P_0 , почти не зависят от энергии первичного адрона и атомного номера ядра мишени, а в области больших, - наоборот, заметно отличаются при различных энергиях первичного адрона. С ростом энергии спектр частиц по P_T^2 в области больших импульсов ст

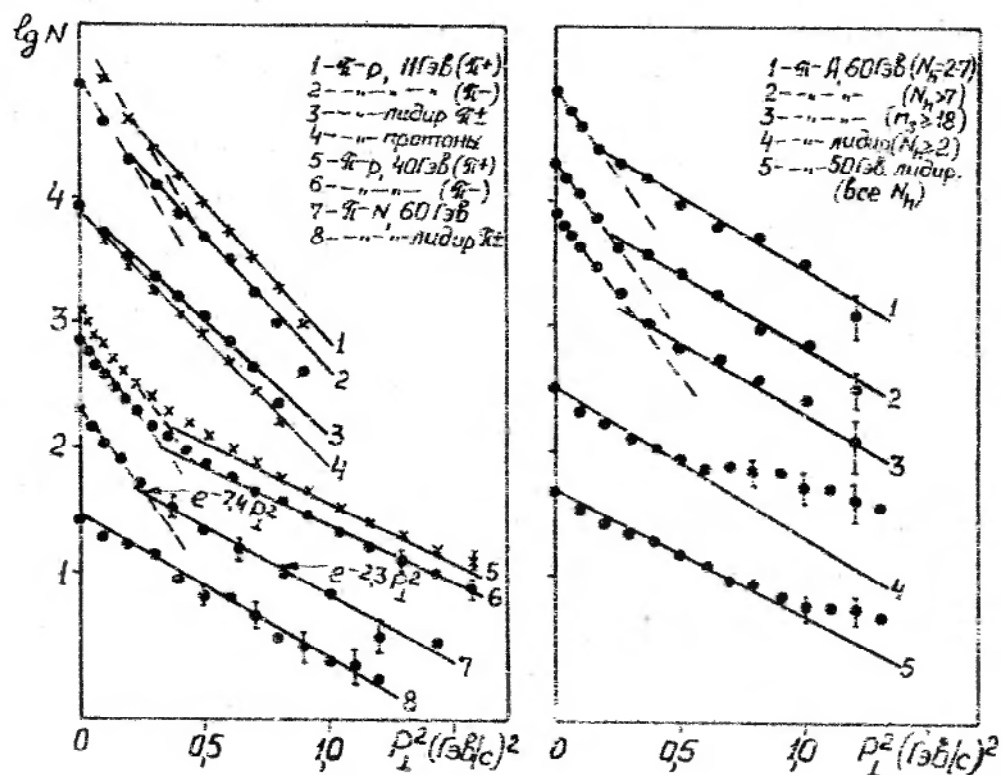


Рис. 4. Распределение квадратов поперечных импульсов в пион-нуклонных и пион-ядерных взаимодействиях.

новится более жестким. Из анализа данных, представленных на рис. 4, можно сделать вывод, что поперечные импульсы большинства вторичных частиц не зависят от атомного номера ядра мишени и энергии первичного адрона. Отличия наблюдаются для лидирующих частиц с большими поперечными импульсами. Число лидирующих частиц в πA взаимодействиях с $P_{\perp} \geq 0,8$ Гэв/с по отношению к их полному числу превышает на 15% число таких же лидирующих частиц в πN взаимодействиях. Появление частиц с большими поперечными импульсами может быть объяснено рассеянием лидирующих частиц внутри ядра.

В диссертации подробно рассматривается вопрос об определении коэффициента неупругости в адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействиях. Если парциальный коэффициент неупругости $K_{\pm}$ определять по доле энергии, уносимой всеми заряженными частицами, то он в пределах ошибок не зависит от атомного номера ядра мишени. Исключение лидирующих из числа вторичных частиц приводит к увеличению коэффициента неупругости $K'_{\pm}$ с ростом атомного номера ядра мишени (табл. I).

Таблица I

Средние значения парциальных коэффициентов неупругости $K_{\pm}$ и $K'_{\pm}$ (в скобках) в пион-нуклонных и пион-ядерных взаимодействиях.

Энергия первично- го пиона в Гэв	Тип взаимодействия				
	πN	$\pi A (N_k < 7)$	$\pi A (N_k \geq 7)$	$\pi A (C, N, O)$	$\pi A (Ag, Br)$
50 [15]	$0,61 \pm 0,02$ ($0,42 \pm 0,02$)	$0,64 \pm 0,01$ ($0,47 \pm 0,01$)	$0,58 \pm 0,01$ ($0,53 \pm 0,01$)		
60 [24]	$0,61 \pm 0,02$ ($0,42 \pm 0,02$)	$0,57 \pm 0,02$ ($0,44 \pm 0,01$)	$0,58 \pm 0,02$ ($0,53 \pm 0,02$)	$0,54 \pm 0,03$ ($0,41 \pm 0,03$)	$0,59 \pm 0,02$ ($0,54 \pm 0,02$)

* После исключения лидирующих частиц.

Зная изменение коэффициента неупругости в зависимости от атомного номера ядра мишени Z , предполагая, что в адрон-ядерных соударениях все вторичные частицы образуются только за счет последовательных взаимодействий налетающего адрона с внутриядерными нуклонами, можно оценить верхний предел кратности неупругого столкновения его внутри ядра. Энергия налетающего адрона после

ν -столкновения определяется как:

$$E_\nu = \left(1 - \frac{3}{2} \kappa'_\pm\right)^\nu E_0 = \left(1 - \frac{3}{2} (\kappa'_\pm)_A\right)^\nu E_0,$$

где E_0 - энергия налетающего адрона, $\frac{3}{2} \kappa'_\pm$ и $\frac{3}{2} (\kappa'_\pm)_A$ - полный коэффициент неупругости во взаимодействиях адронов с нуклонами и атомными ядрами.

Для π -мезон-ядерных взаимодействий при энергиях 50-60 Гэв значение ν , найденное на основе приведенного соотношения и данных таблицы I, оказывается равным $\sim 1,4$ в расчете на среднее ядро атомов вещества фотозумульсии без квазинуклонных взаимодействий, что существенно меньше величины средней кратности неупругого столкновения, предполагаемой в моделях последовательного независимого столкновения налетающего адрона с нуклонами ядра как со свободными частицами.

В третьей главе также рассматривается вопрос теоретического описания импульсных характеристик вторичных частиц. Отмечается, что теоретическое описание лидирующих частиц в адронных взаимодействиях дело будущего, хотя некоторые их свойства можно понять в рамках периферических кварковых и других моделей. В статистической теории Ферми образование лидирующих частиц объяснить трудно. Хорошо также известно, что с помощью этой теории импульсные и угловые характеристики не только лидирующих, но и всех вторичных частиц, образованных в адронных взаимодействиях при высоких энер-

гиях, не удастся полностью объяснить. Многочисленные модификации теории Ферми не привели к существенному ее улучшению. Е.Л.Фейнберг^{ж)} считает, что статистическое термодинамическое описание характеристик генерированных частиц возможно в случае, если правильно выбраны объекты исследования. Ими могут быть системы вторичных частиц без лидирующих или системы, в которых роль лидирующих частиц незначительна. В диссертации показано, что характеристики вторичных частиц (без лидирующих), образованных в адронных взаимодействиях при энергиях 10-60 Гэв, могут быть описаны в рамках термодинамических моделей [6,24,25]

Четвертая глава посвящена изучению одночастичных, двухчастичных и других корреляций частиц^и их характеристик во взаимодействиях π^- -мезонов с нуклонами и ядрами. Показано, что имеющиеся особенности в одночастичных корреляциях могут быть устранены путем исключения лидирующих частиц, например, зависимость величины поперечного импульса $\langle P_\perp \rangle$ от быстроты $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + P_\parallel}{E - P_\parallel}$ становится, практически, симметричной относительно значения $y = 0$ (рис.5). В области $-0,5 < y < 0,5$ в зависимости $\langle P_\perp \rangle = f(y)$ в пределах ошибок наблюдается плато. Следует отметить, что с ростом энергии первичной частицы наблюдается увеличение области по y , где $\langle P_\perp \rangle = const$, что, по-видимому, указывает на возрастание вклада частиц, образованных за счет пионизации, т.е. за счет частиц, образованных в результате распада мезонного сгустка (кластера и т.п.) на отдельные пионы [7,9]. В работе анализируются и другие зависимости средних значений поперечных импульсов вторичных частиц от их полных импульсов и продольных составляющих,

^{ж)} УФН, 104, 539 (1971).

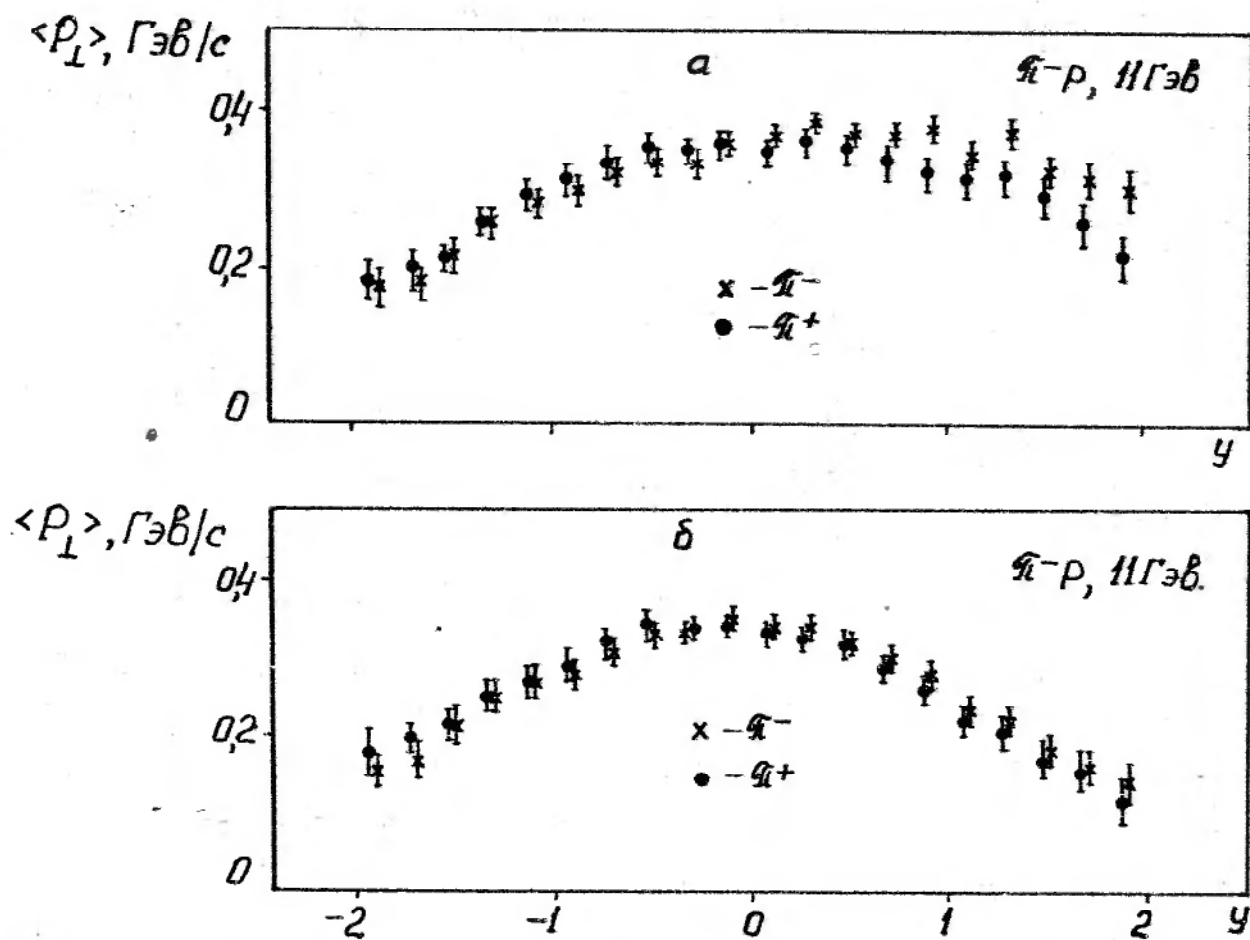


Рис. 5. Зависимость среднего поперечного импульса от быстроты :
 а - без исключения лидирующих частиц; б - после исключения лидирующих частиц.

коэффициента неупругости и т.п. Показано, что эти зависимости существенно разные для лидирующих и остальных частиц.

Установлена экспериментальная зависимость $\langle P_1 \rangle = \beta \frac{K_c}{n}$ [4] где β - слабо меняющаяся величина (близкая к 3 Гэв/с для π - p -взаимодействий при энергии 11 Гэв); n - полное число генерированных частиц (без нуклонов отдачи и лидирующих частиц); K_c - полный коэффициент неупругости, найденный в С-системе, как $K_c = \frac{E_c - E_{cn} - E_{c\pi}}{E_c - m_N - m_\pi}$ ($E_c, E_{cn}, E_{c\pi}$ - полная энергия столкновения частиц, энергия нуклона мишени и налетающего пиона после взаимодействия, m_N и m_π - массы нуклона и пиона).

Двухчастичные корреляции изучались с помощью стандартной корреляционной функции

$$R(y, y_2) = \frac{\rho(y, y_2)}{\rho(y) \rho(y_2)} - 1,$$

где $\rho(y)$, $\rho(y_2)$ и $\rho(y, y_2)$ - одно и двухчастичные плотности распределения заряженных вторичных частиц по быстроте y . Корреляционные эффекты изучались нами в области энергий от 11 до 200 Гэв, в том числе и в адрон-ядерных взаимодействиях [7, 11, 15, 17]. В диссертации анализируются двухчастичные корреляции только в πp -взаимодействиях при энергии 11 Гэв, так как при малых энергиях проявление лидирующих частиц в корреляционных эффектах наибольшее. На основании проведенного анализа было показано, что дальнodelствующие корреляции в полуинклюзивных реакциях обусловлены, в основном, вкладом лидирующих частиц.

При анализе корреляционной зависимости между импульсами вторичных частиц и углами их вылета в отдельных ливнях (такой анализ имеет смысл проводить в ливнях с большой множественностью) было обнаружено, что в некоторых взаимодействиях π -мезонов с ядрами атомов наблюдается неоднозначная (в основном двухзначная)

зависимость между импульсами и углами вылета ливневых частиц. Одной из возможных причин такой неоднозначности может быть неупругое взаимодействие налетающей частицы более чем с одним внутриядерным нуклоном.

В пятой главе рассматриваются угловые характеристики ливневых частиц, образованных в адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействиях. Анализируются асимметрия углового распределения ливневых частиц, структура углового распределения в области малых углов, где вклад лидирующих частиц велик, а также особенности углового распределения частиц в зависимости от энергии и природы налетающего адрона и размеров атомного ядра мишени.

На рис.6 приведено угловое распределение вторичных пионов, образованных в πp и πN взаимодействиях при энергиях 10 и 60 Гэв [14,21,25], из которого видно, что асимметрия углового распределения в С-системе обусловлена в значительной мере вкладом лидирующих частиц. Однако, исключение одиночных лидирующих частиц не приводит к полной симметрии углового распределения частиц в С-системе. Исключение лидирующих $\pi^{\pm}$ и ρ^0 -мезонов позволяет получить симметричное угловое распределение частиц (рис.7б). На рис.7 приведено также распределение ливневых частиц, образованных в πN взаимодействиях с множественностью заряженных частиц $n_{\pm} \geq 9$. В событиях с большой множественностью вклад лидирующих частиц незначителен. Поэтому в таких случаях угловое распределение ливневых частиц в С-системе, практически, симметрично. Угловое распределение вторичных частиц после исключения лидирующих или когда их вклад несущественен, может быть описано в рам-

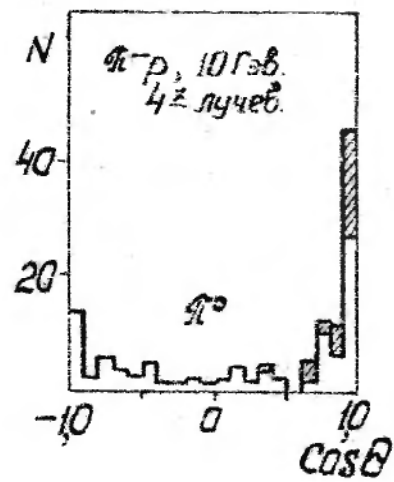
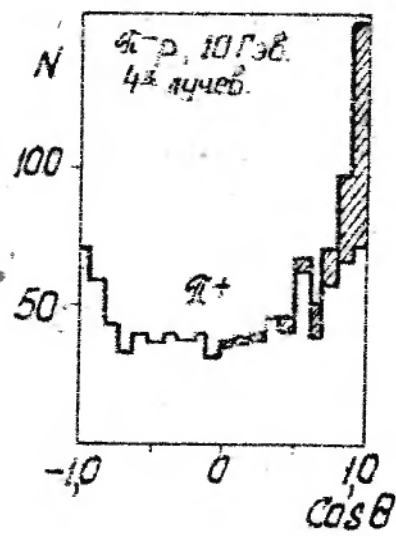
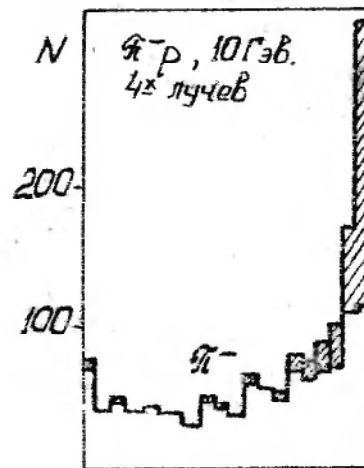
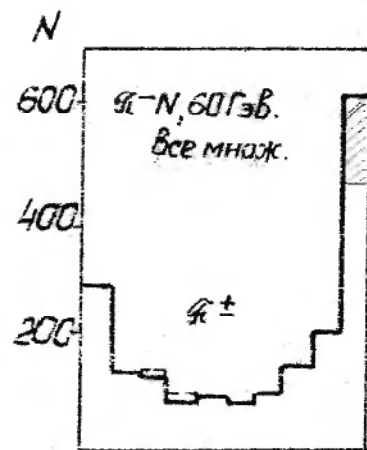


Рис. 6. Угловое распределение вторичных пионов в С-системе. Заштрихованная часть — распределение лидирующих пионов.

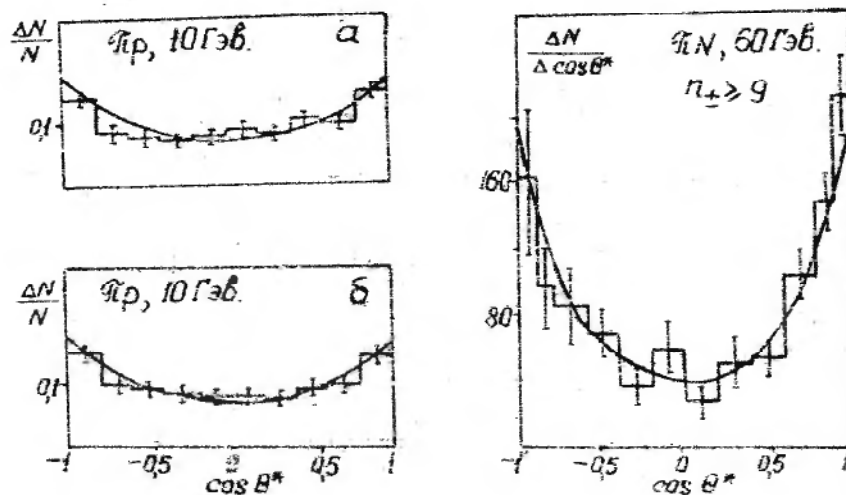


Рис. 7. Угловое распределение пионов в С-системе: а - без лидирующих $\pi^\pm$ -мезонов, б - без лидирующих $\pi^\pm$ и ρ^0 -мезонов. Кривые - двухтемпературная модель с учетом корреляции ρ_1 и ρ_4^* .

ках двухтемпературной термодинамической модели с учетом корреляции поперечного $P_{\perp}$ и продольного $P_{\parallel}$ импульсов [25].

Изучение структуры углового распределения ливневых частиц, образованных в пион-нуклонных и протон-нуклонных взаимодействиях, позволило установить, что эти распределения отличаются, главным образом, в области малых углов. Этому факту дано следующее объяснение: распад возбужденного налетающего протона (барионная система) на нуклон или пионы (частицы фрагментации) в отличие от распада возбужденного пиона (бозонная система) на подобные ему частицы, приводит к несколько большей выделенности (коллимации) лидирующего протона по сравнению с лидирующим пионом из-за разности их масс и, соответственно, к различию угловых характеристик частиц в области самых малых углов в случае протон-нуклонных и пион-нуклонных взаимодействий. Несколько большая асимметрия углового распределения частиц в пион-нуклонных взаимодействиях по сравнению с протон-нуклонными может быть объяснена тем, что возбужденный налетающий пион фрагментирует на большее число частиц, чем налетающий протон.

В диссертации значительное внимание уделяется анализу угловых распределений ливневых частиц, образованных π^- -мезонами и протонами во взаимодействиях с атомными ядрами в области ускорительных энергий. Было показано, что в области малых углов наблюдается слабая зависимость этих распределений ^{от} типа мишени при фиксированной энергии, а в области больших углов они почти не зависят от первичной энергии для определенной мишени. Как видно из рис. 8, с увеличением размеров ядра мишени множественность ливневых частиц растет, в основном, за счет малоэнергичных частиц, угловое распределение которых в области $\lambda \gtrsim 0$ ($\theta \gtrsim 45^\circ$) почти

не меняется с энергией налетающего адрона. Это характерно для частиц, образованных в результате фрагментации нуклонов мишени. Если число частиц, образованных за счет фрагментации нуклонов, и их угловое распределение не очень сильно меняется с энергией, то отношение числа частиц с $\lambda \geq 0$, образованных во взаимодействиях на ядрах, к числу частиц с такими же λ из адрон-нуклонных соударений может характеризовать число фрагментирующих нуклонов [24,]. Найденное таким образом число фрагментирующих внутриядерных нуклонов для среднего ядра фотоэмульсии (кроме водорода) равно $4,2 \pm 0,4$. В случае, когда первичной частицей является протон, оно равно $5 \pm 0,2$. Заметим, что эти числа значительно больше числа столкновений первичного пиона в ядре, оцененного из анализа импульсных характеристик ядерных взаимодействий. Если фрагментирующие нуклоны мишени являются нуклонами отдачи, то среди них протоны должны составлять примерно половину. Таким образом, среднее число протонов отдачи оказывается равным $2,1 \pm 0,2$ и $2,5 \pm 0,1$ на событие, соответственно, для взаимодействий пионов и протонов со средним ядром атомов вещества фотоэмульсии, что ненамного отличается от среднего числа медленных частиц (g -частиц), оставляющих в эмульсии серые следы.

Детальный анализ угловых распределений ливневых частиц, образованных во взаимодействиях пионов с ядрами атомов показал, что в этих взаимодействиях (в расчете на среднее ядро фотоэмульсии), происходит уменьшение числа частиц с малыми углами (наибольшими энергиями) примерно на 30% по сравнению с взаимодействиями адронов на нуклонах.

На рис.9а приведено угловое распределение частиц, получен-

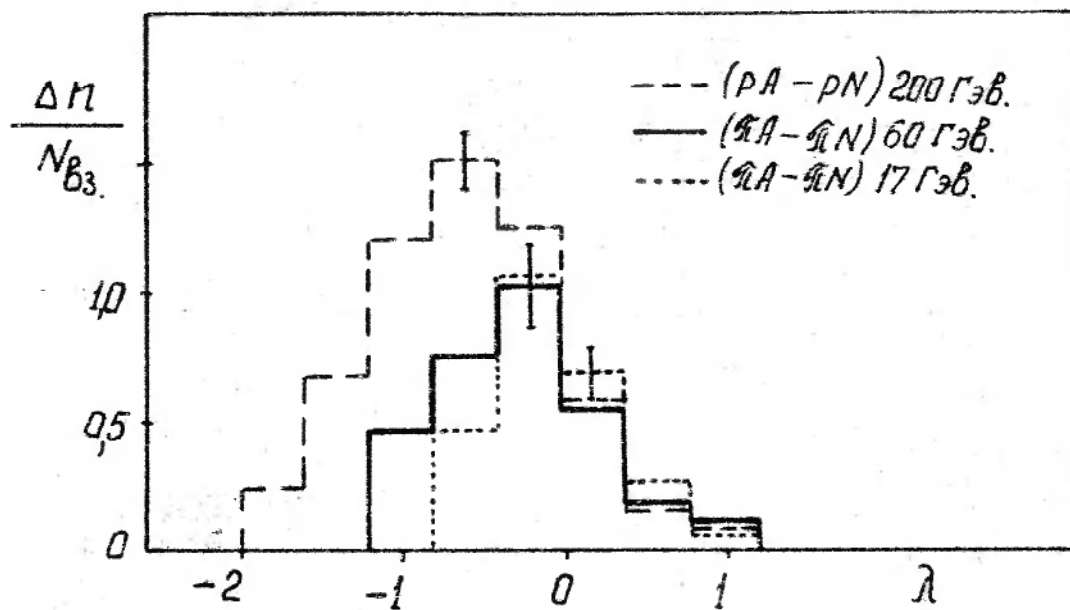


Рис. 9 а. Угловые распределения, найденные как разность распределений ливневых частиц по λ в адрон-ядерных и адрон-нуклонных взаимодействиях.

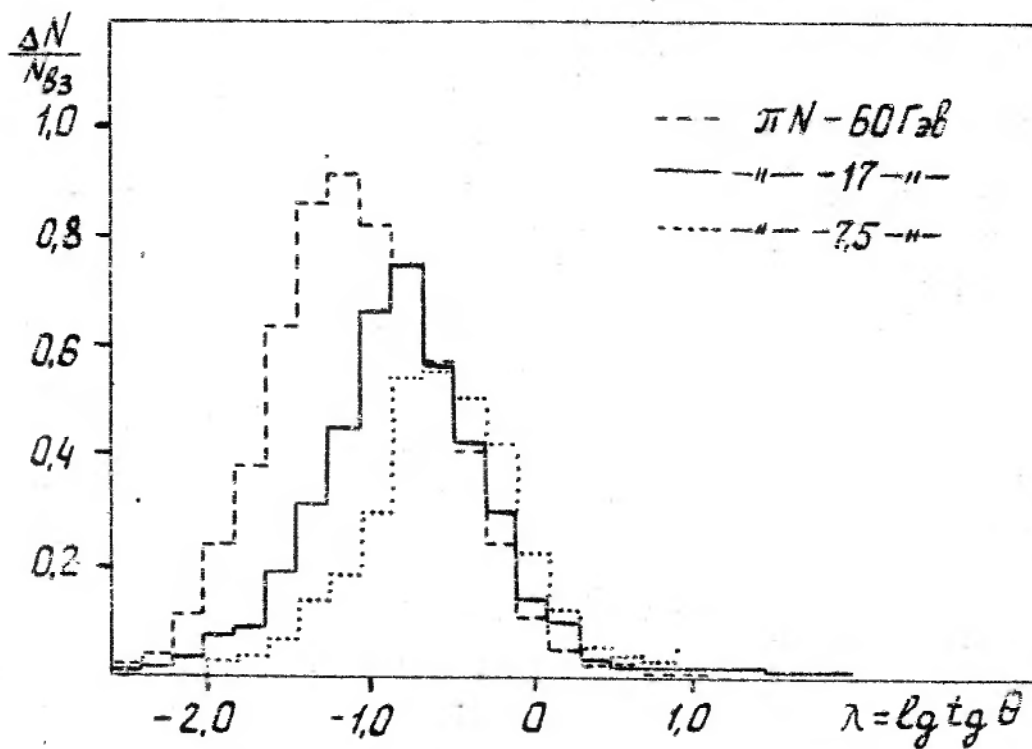


Рис. 9 б. Распределение ливневых частиц в координатах $\lambda = \lg \tg \theta$ в πN взаимодействиях.

ное как разность распределений частиц по $\lambda = 6496$ в адрон-ядерных и адрон-нуклонных взаимодействиях. Оказывается, это распределение подобно распределению по λ ливневых частиц, образованных в элементарных адрон-нуклонных взаимодействиях (рис.96). Сравнение распределений, представленных на рисунках 9а и 9б, показывает, что механизм ^и множественного образования частиц во взаимодействиях с нуклонами и сложными ядрами, по-видимому, в значительной мере идентичны.

Шестая глава посвящена анализу характеристик распределения быстрых и медленных частиц по множественности образованных в адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействиях в области энергий 7,5-200 Гэв. Приводятся экспериментальные данные о зависимости этих характеристик от энергии и природы налетающего адрона и размеров атомного ядра мишени. Показано, что исклучение лидирующих частиц приводит к изменению зависимости от энергии таких характеристик, как средняя множественность заряженных частиц, отношение средней множественности к корню квадратному из дисперсии по множественности и т.п. Вкладом лидирующих частиц и протонов отдачи объясняется рост показателя λ в зависимости $R \approx A^\lambda$ (или $R \approx E_0^\lambda$), где R нормированная множественность ливневых частиц в адрон-ядерных взаимодействиях, A - атомный номер ядра мишени, в области анализируемых энергий. Величина R и, соответственно, показатель λ в протон-ядерных взаимодействиях систематически больше, чем в пион-ядерных взаимодействиях при одной и той же энергии E_0 и для одних и тех же ядер мишеней, в то время, как в протон-нуклонных взаимодействиях множественность ливневых частиц меньше, чем в пион-нуклонных. В работе проводилось сравнение экспериментальной зависимости $R = f(A)$ с расче -

тами, сделанными на основе различных теоретических моделей и сделан вывод о согласии с экспериментом только тех моделей, из которых следует слабая зависимость R от A : $R_p \leq A^{0,16}$ и $R_\pi \leq A^{0,10}$ в случае протон- и пион-ядерных взаимодействий.

Анализ распределений по множественности ливневых частиц показал, что вид этих распределений и, соответственно, отношение средней множественности к корню квадратному из распределения по множественности, слабо меняются с изменением энергии и природы первичного адрона и атомного номера ядра мишени. [22-24, 26] Сравнение экспериментальной зависимости величины $f_{2A} = \mathcal{D}_A^2 - \langle n_s \rangle_A$ от $\langle n_s \rangle_A$ [где $\langle n_s \rangle_A$ - средняя множественность ливневых частиц в адрон-ядерных взаимодействиях, а $\mathcal{D}_A^2$ - дисперсия распределения по множественности] с расчетами по модели независимого последовательного столкновения налетающего адрона с внутриядерными нуклонами показывает, что взаимодействия в ядрах нельзя рассматривать как независимые соударения налетающих адронов (лидирующих частиц) с внутриядерными нуклонами.

В диссертации подробно анализируются также характеристики распределений по множественности медленных v и g -частиц, оставляющих в эмульсии черные и серые следы, и их корреляции с характеристиками ливневых частиц. Показано, что поведение средних значений $\langle n_v \rangle$ и $\langle n_g \rangle$ числа v - и g -частиц в зависимости от энергии первичного адрона и атомного номера ядра мишени существенно отличается от поведения величины средней множественности ливневых частиц $\langle n_s \rangle_A$ и не может быть объяснено в рамках обычного внутриядерного каскада.

Отношение $\frac{\langle N_k \rangle}{\mathcal{D}}$ среднего числа всех медленных частиц $\langle N_k \rangle$ к корню квадратному из дисперсии распределения частиц

по N_L слабо меняется с ростом энергии первичного адрона и примерно в два раза меньше аналогичного отношения быстрых (ливневых) частиц. Сильная зависимость величины $\langle n_g \rangle$ от A не может быть объяснена взаимодействием в ядре только налетающего адрона.

Интересным фактом является различие отношений $\frac{\langle n_e \rangle}{\langle n_g \rangle}$ для пион-ядерных и протон-ядерных взаимодействий. В области энергий $E_0 \leq 60$ Гэв эти величины соответственно равны $2,9 \pm 0,08$ и $1,65 \pm 0,04$. Однако, при энергии 200 Гэв они становятся равными $2,06 \pm 0,13$ и $1,93 \pm 0,08$. Таким образом, уже при энергии 200 Гэв характеристики медленных частиц в ядерных взаимодействиях становятся менее чувствительными к природе налетающего адрона.

В последнем разделе шестой главы рассматриваются особенности множественного образования частиц в ядерных фотоэмульсиях. На основании данных, полученных в работах [14, 19, 27], и работ других авторов, список которых приведен в диссертации, показано, что вероятность образования в ядерных фотоэмульсиях квазинуклонных событий, отобранных по общепринятым критериям с нечетным числом лучей, зависит от природы первичного адрона и сильно растет с увеличением его энергии. Причем, это увеличение можно только частично объяснить когерентным взаимодействием налетающего адрона с ядром как целым, сечение которого также увеличивается с ростом энергии. Анализ показал, что это увеличение и имеющиеся особенности в распределениях событий по числу ливневых частиц имеет место для взаимодействий с $N_L \leq 1$. Такие взаимодействия адронов осуществляются в основном с периферийными нуклонами атомных ядер вещества фотоэмульсии. В работе

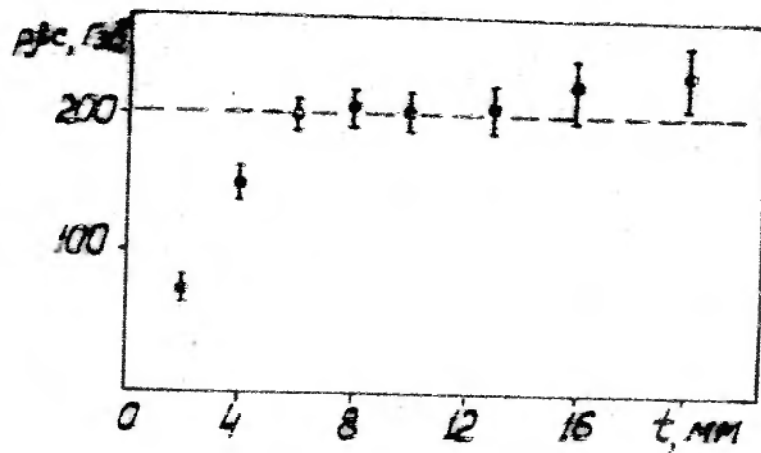


Рис. 10. Зависимость средних значений $p\beta c$ от длины ячейки.

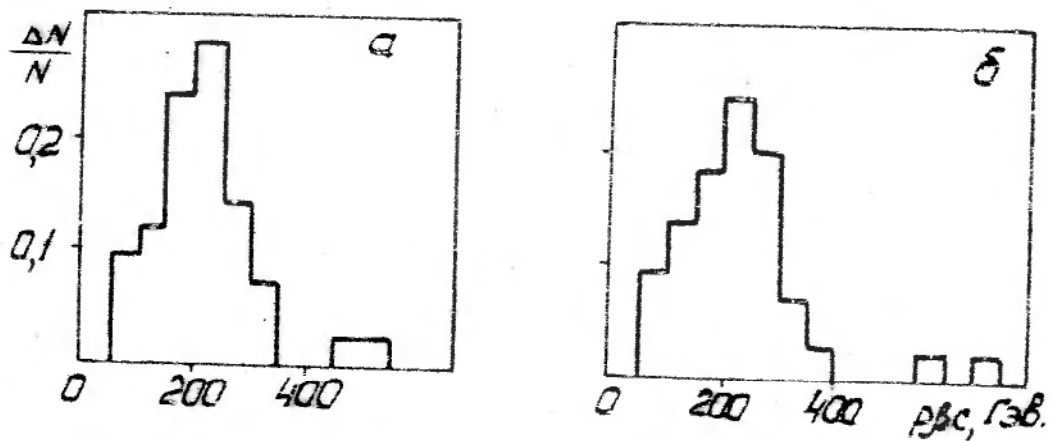


Рис. 11. Распределение по $p\beta c$, найденных методом относительного рассеяния, на ячейках а - $t = 6$ мм; б - $t = 8$ мм.

показано, что увеличение квазинуклонных взаимодействий (событий с $N_k \leq 1$) с ростом энергии первичного адрона связано с уменьшением событий с $N_k \geq 2$, что объясняется в основном уменьшением вероятности взаимодействия налетающего адрона с двумя и более внутриядерными нуклонами и возможным поглощением медленных частиц ядрами атомов. Некоторое превышение плотности нейтронов по сравнению с протонами на периферии тяжелых ядер и уменьшение эффективности взаимодействия лидирующих частиц внутри ядра с ростом энергии приводит к увеличению сечения образования квазинуклонных событий с нечетным числом заряженных частиц.

В приложении к диссертации рассматриваются методы исключения ложного рассеяния и других помех при измерении многократного кулоновского рассеяния заряженных частиц. Показано, что по измерениям многократного кулоновского рассеяния на отдельных следах, можно определять импульсы частиц вплоть до 60 Гэв/с. Измерение же относительного рассеяния на парах следов позволяет оценить импульсы порядка 200 Гэв/с с точностью 25% (рис. IО и II) [20,28]. Найдены экспериментальные зависимости "ионизация-импульс" для ядерных эмульсий различной чувствительности и условия надежной идентификации частиц [29]. Предложен метод идентификации частиц в ядерных фотоэмульсиях с помощью δ -электронов [30].

Основные результаты работы.

I. На основе изучения процессов множественного образования частиц в неупругих взаимодействиях адронов (в основном, π -мезонов) с нуклонами и ядрами атомов в пузырьковых камерах и ядерных фотоэмульсиях в области энергий 10-200 Гэв с помощью созданного в ИФВЭ АН КазССР измерительно-вычислительного комплекса ус-

тановлены следующие основные характеристики лидирующих частиц:

а) Природа и знак заряда лидирующих частиц в большинстве случаев те же, что и у налетающего адрона. Например, в реакциях $\pi^+ p \rightarrow p^2 \pi^+ \pi^+$ и $\pi^- p \rightarrow p^2 \pi^- \pi^-$ при импульсе 10 Гэв/с в 70-80% случаев лидирующими частицами являются π^- -мезоны, в остальных случаях π^+ или π^- -мезоны. При этом лидирующие π^+ и π^- мезоны образуются в основном в результате распадов высокоэнергичных резонансов. Число лидирующих π^- -мезонов в $\pi^- p$ реакциях не зависит от перезарядки протона мишени и уменьшается с ростом множественности.

б) Вероятность образования лидирующих π^- -мезонов (в отличие от лидирующих π^+ -мезонов) в πA -взаимодействиях уменьшается с увеличением атомного номера ядра мишени. Это не согласуется с представлением о полной "пассивности" лидирующих частиц в ядерной материи. Вероятность неупругого взаимодействия лидирующих частиц в сложных атомных ядрах вещества фотоэмульсии в области энергий 50-60 Гэв составляет не более 1/3 от вероятности неупругого соударения налетающего адрона, предполагаемой в моделях последовательного и независимого его соударения с внутриядерными нуклонами как со свободными частицами.

в) Интегральный импульсный спектр лидирующих частиц в пион-нуклонных взаимодействиях слабо изменяется с ростом энергии первичного адрона. Этот спектр может быть описан экспонентой: $\exp(-u/u_0)$, где $u = p/p_0$. Постоянная u_0 для лидирующих частиц в 2,2-2,5 раза больше, чем эта же постоянная для остальных частиц. С увеличением атомного номера ядра мишени импульсный спектр лидирующих частиц смягчается. Описать импульсный спектр

всех вторичных частиц одной экспонентой невозможно. Вероятность этой гипотезы по χ^2 -тесту составляет менее 0,1%.

г) Зависимость среднего значения поперечного импульса от числа рожденных пионов у лидирующих частиц существенно отличается от этой же зависимости у остальных частиц. Распределение ^{частиц} по P_1^2 в пределах ошибок не зависит от атомного номера ядра мишени. Различия наблюдаются лишь для распределений лидирующих частиц в области больших значений P_1^2 ($P_1^2 \geq 0,6 \text{ Гэв/с}^2$). Изменение спектра лидирующих частиц по P_1^2 при возрастании атомного номера ядра мишени может быть объяснено их взаимодействием внутри ядра. Экспериментальные распределения всех вторичных частиц по P_1^2 (также как и распределение по P/P_0) могут быть описаны двумя экспонентами $\exp(-a \cdot P_1^2)$, причем, постоянная a в области больших P_1^2 (при энергии первичного пиона 60 Гэв) примерно в 3 раза меньше, чем в области малых значений P_1^2 . Спектр лидирующих частиц по P_1^2 с ростом энергии первичного пиона в отличие от распределения по P/P_0 становится более жестким.

д) Угловые характеристики лидирующих частиц в адрон-нуклонных взаимодействиях слабо изменяются с увеличением числа частиц в конечном состоянии. Среди частиц, вылетающих с минимальным углом в L -системе, примерно 60% составляют лидирующие. С ростом атомного номера ядра мишени средний угол вылета лидирующих частиц несколько увеличивается. В области малых углов в распределениях частиц, образованных во взаимодействиях адронов разной природы с нуклонами и ядрами атомов, имеются различия, которые объясняются кинематическими ограничениями на характеристики лидирующих частиц разной природы и частиц фрагментации налетающе-

го адрона, испытывшего взаимодействия.

е) Исключение лидирующих частиц устраняет особенности в одночастичных корреляциях, симметризует зависимость поперечных импульсов вторичных частиц от их быстроты и их угловые распределения в С-системе, существенно уменьшает дальнодействующие двухчастичные корреляции и т.д. Импульсные и угловые распределения вторичных пионов, образованных в адрон-нуклонных взаимодействиях, после исключения лидирующих частиц, описываются в рамках термодинамических моделей.

2. На основании сравнительного анализа адрон-нуклонных и адрон-ядерных взаимодействий сделаны следующие выводы:

а) Среднее число фрагментирующих внутриядерных нуклонов, оцененных из угловых распределений ливневых частиц, образованных во взаимодействиях пионов и протонов с ядрами атомов вещества фотомульсии, равно, соответственно, $4,2 \pm 0,4$ и $5 \pm 0,2$. Эти числа существенно больше кратности столкновения налетающего адрона внутри атомного ядра, оцененной из анализа импульсных и угловых распределений ливневых частиц, распределений их по множественности и зависимости коэффициента неупругости от атомного номера ядра мишени.

б) Зависимость среднего числа медленных частиц, образованных в ядерных взаимодействиях, от энергии первичного адрона и атомного номера ядра мишени отличается от аналогичной зависимости быстрых (ливневых) частиц и не согласуется с расчетами, сделанными на основе модели обычного внутриядерного каскада. Вид кривой распределения быстрых частиц по множественности в пределах ошибок не зависит от энергии и природы налетающего адрона и

атомного номера ядра мишени. Отношение средней множественности быстрых частиц к квадратному корню из дисперсии распределения по множественности $\langle n_s \rangle / \sigma$, практически, постоянно и близко к двум. Для медленных частиц отношение $\langle n_s \rangle / \sigma$ также слабо меняется с ростом энергии, но его величина примерно в два раза меньше, чем для быстрых частиц.

в) Изучены особенности множественного образования частиц в ядерных фотоэмульсиях и показано, что увеличение числа квазинуклонных событий с нечетным числом лучей с ростом энергии может быть объяснено увеличением вероятности взаимодействия налетающего адрона только с одним периферийным нуклоном (нейтроном) тяжелого атомного ядра, т.е. уменьшением вероятности взаимодействия с внутриядерными нуклонами.

3. В области методических разработок наиболее важными результатами являются:

а) Создана экспериментальная база в лаборатории множественных процессов при высоких энергиях ИФВЭ АН КазССР для обработки информации с пузырьковых камер и в ядерных фотоэмульсиях.

б) Предложены и разработаны методы исключения ложного рассеяния и других помех, позволяющие измерять импульсы отдельных заряженных частиц по их многократному кулоновскому рассеянию в ядерных фотоэмульсиях порядка 60 Гэв/с, а методом относительного рассеяния порядка 200 Гэв/с с точностью 25%

в) Найдены экспериментальные зависимости "ионизация-импульс" для ядерных эмульсий различной чувствительности и условия надежной идентификации заряженных частиц.

Большинство результатов, приведенных в диссертации, были получены впервые и докладывалось на многих семинарах, совещаниях и конференциях, в том числе на Международных конференциях по физике высоких энергий (Киев, 1970г.; Чикаго, 1972г.; Лондон, 1974г.; Тбилиси, 1976г.); на I Международном совещании по нуклон-нуклонным и пион-нуклонным взаимодействиям (Дубна, 1968г.); на Международных конференциях по физике космических лучей (Будапешт, 1969; Денвер, 1973г.); на IV Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Дубна, 1971г.); на Международном семинаре по глубоконеупругим и множественным процессам при высоких энергиях (Дубна, 1973г.); на Международном совещании по процессам множественного рождения и инклюзивным реакциям при высоких энергиях (Серпухов, 1976г.) и опубликованы в работах [1-30] .

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Ш.Гайтинов, Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников, Изв. АН СССР, сер. физ., 34, 1885 (1970).
2. А.Ш.Гайтинов, Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников, Изв. АН СССР, сер. физ., 35, 2083 (1971).
3. А.Ш.Гайтинов, Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников, Ядерная физика, 13, 124 (1971).
4. А.Ш.Гайтинов, М.Избасаров, Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников, ДАН СССР, 222, 1068 (1975).
5. Е.О.Абдрахманов, ..., И.Я.Часников, Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат., 6, 24 (1975).
6. А.Ш.Гайтинов, М.Избасаров, Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников, Ядерная физика, 24, 350 (1976).
7. А.Ш.Гайтинов, М.Избасаров, И.Я.Часников. Препринт ИФВЭ АН КазССР № 34 (1976), Доклад на XVIII Международной конференции по физике высоких энергий, А2/166-4, Тбилиси (1976), Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат., 6, 1 (1976).
8. А.У.Абдурахимов, Н.Ангелов, ..., И.Я.Часников и др., ОИЯИ, Р1-7103 (1973), Ядерная физика, 18, 545 (1973).
Nucl. Phys., B72, 189 (1974), сотрудничество АББВДКМСТТУХ.
9. А.У.Абдурахимов, Н.Ангелов, ..., И.Я.Часников и др., ОИЯИ, Р1-7543 (1973), Ядерная физика, 19, 1039 (1974), сотрудничество АББВДКМСТТУХ.
10. Н.Ангелов, К.П.Вишневецкая, ..., И.Я.Часников и др., ОИЯИ, I-8064 (1974), Ядерная физика; 21, 328 (1974), сотрудничество АББВДКМСТТУХ.

11. Н.Ангелов, К.П.Витневская, ... , И.Я.Часников и др., ОИЯИ, Р1-8269 (1974); Ядерная физика 22, 122 (1975), сотрудничество АББВДЖМСТУХ.
12. З.В.Анзон, Ж.С.Тажибаев, И.Я.Часников, Письма ЖЭТФ, 14, 405 (1971).
13. З.В.Анзон, А.Х.Виницкий, ... , И.Я.Часников и Ц.И.Шахова, Труды ИЯФ АН КазССР, том 7, стр. 100, Алма-Ата (1967); Изв. АН КазССР, 6, 13 (1967).
14. Е.О.Абдрахманов, З.В.Анзон, ... , И.Я.Часников и Ц.И.Шахова, Сб. Физика высоких энергий и космических лучей, изд. "Наука", Алма-Ата, стр.120 (1971).
15. В.Г.Воинов, А.Ш.Гайтинов, И.Я.Часников и др., Письма ЖЭТФ, 22, 56 (1975); ОИЯИ, Р1-9217 (1975); Препринты № 105 и № 106, ФИАН СССР (1976); Доклады на XIII Международную конференцию по физике высоких энергий, А6/224-51 и А6/1063-57, Тбилиси (1976), сотрудничество АЛМТ.
16. З.В.Анзон, ... , И.Я.Часников и др., Ядерная физика, 10, 991 (1969).
17. З.В.Анзон, А.Ш.Гайтинов, ... , И.Я.Часников и др.; Доклады на XIII Международной конференции по физике высоких энергий, А3/444-1, А6/208-50, А6/225-52, Тбилиси (1976); Препринты ФИАН СССР, № 22 и № 29, Москва (1976); сотрудничество АЛМТ.
18. А.Ш.Гайтинов, Г.Я.Руськина, Ж.С.Тажибаев, И.Я.Часников, ОИЯИ, Р-2016 (1965).
19. З.В.Анзон, ... , И.Я.Часников и др., Письма в ЖЭТФ, 17, 655 (1973); 18, 19 (1973); 19, 598 (1974), Ядерная физика, 19, 322 (1974) и 19, 1046 (1974). Препринт ФИАН СССР, № 9, (1974); сотрудничество АЛМТ.

20. В.Г.Воинов, И.Я.Часников, Многократное рассеяние частиц в ядерных фотоэмульсиях, Алма-Ата, Изд. "Наука" (1969).
21. Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников и др., Ядерная физика, 16, 539 (1972).
22. И.Я.Часников, Ж.С.Такибаев и др., Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика высоких энергий, Харьков, вып.2 (4), 77 (1973).
23. З.В.Анзон, Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников, Материалы Международного семинара по глубоконеупругим и множественным процессам при высоких энергиях, Дубна, стр. 229 (1973).
24. З.В.Анзон, И.Я.Часников, Сб. Физика высоких энергий и космических лучей, Изд. "Наука", Алма-Ата, стр. 23 (1974).
25. В.Г.Воинов, А.Ш.Гайтинов, И.С.Стрельцов, И.Я.Часников, Сб. Физика высоких энергий и космических лучей, Изд. "Наука", Алма-Ата, стр. 90 (1974).
26. А.Х.Виницкий, Ю.А.Еременко, Ю.Т.Лукин, Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников, Материалы II Международной конференции по космическим лучам, Будапешт, стр. 165 (1969).
27. S.V.Anson, I.Ya.Chasnikov et al., Phys.Lett., 31B, 237 (1970), 31B, 241 (1970); ОИЯИ, Р1-5072 (1970), сотрудничество АБДКМСТУ.
28. З.В.Анзон, В.Г.Воинов, Н.П.Павлова, И.Я.Часников, Препринт ИФВЭ АН КазССР, ЭВЭ-5, Алма-Ата (1973).
29. И.Я.Часников, Ц.И.Шахова, Препринт ИФВЭ АН КазССР, ЭВЭ-9, Алма-Ата (1974), ПТЭ, 3, 52 (1975).
30. И.Я.Часников, Вестник АН КазССР, № 8, 96 (1962).