

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УДК 537.591:539.1.074

АВАКЯН ВАГРАМ ВАРАЗДатович

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НУКЛОНОВ И ПИОНОВ
С ЯДРАМИ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ
В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ 0,5 - 5,0 ТэВ

01.04.16 -- Физика атомного ядра и
элементарных частиц

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ЕРЕВАН - 1987

Работа выполнена в Ереванском физическом институте.

Официальные оппоненты: академик АН Арм.ССР

ГАРИЯН Г.М. (ЕрФИ)

член-корреспондент АН СССР

НИКОЛЬСКИЙ С.И. (ФИАН СССР)

доктор физико-математических наук,

профессор ПЕТРУХИН А.А. (МИФИ)

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт

ядерной физики (ИГУ)

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1987 г.
в 14 часов на заседании Специализированного совета Д 034 01.03
по присуждению ученой степени доктора физико-математических
наук при Ереванском физическом институте (375036, г. Ереван,
ул. Маркяна, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1987 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
кандидат физ.-мат. наук

И.А. ШАХГАЗЯН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. За последние годы заметно возрос интерес к экспериментальному исследованию адрон-ядерных столкновений при высоких и сверхвысоких энергиях. В первую очередь это обусловлено тем фактом, что ядро представляет собой уникальный объект для выяснения пространственно-временной картины сильных взаимодействий и кварк-глюонной структуры налетающего на ядро нуклона. Учет кварк-глюонной природы сильных взаимодействий позволил конкретизировать картину адрон-адронного взаимодействия и получить определенные количественные предсказания. В то же время отсутствует последовательная теория, объясняющая основные процессы во взаимодействиях адронов и ядер. Действительно, полученные за последнее время впечатляющие подтверждения кварк-глюонной теории относятся в основном к области малых расстояний. Что касается адрон-ядерных взаимодействий в области небольших импульсов, то здесь лишь сформулировано большое количество моделей, основанных на представлениях о кварк-глюонной структуре адронов и на ускорительных данных. Однако предсказания этих моделей сильно расходятся друг с другом с ростом энергий.

К числу основных интегральных характеристик, определяющих процессы множественного рождения на больших расстояниях, относятся полные неупругие сечения взаимодействия адронов с нуклонами и ядрами σ_{in} и коэффициенты неупругости K . Особенно актуально сопоставление характеристик взаимодействия с ядрами нуклонов и пионов, когда разные модельные представления дают различие ряда характеристик процессов в ЛА и РА взаимодействиях. Измерение этих величин в области сверхускорительных энергий необходимо для проверки и уточнения различных моделей.

Несмотря на успехи и перспективы ускорительных исследований, область энергий выше 1 ТэВ с ядерной микроскопией в значительной степени остается прерогативой космических лучей.

Цель работы. К началу настоящих исследований процесс взаимодействия адронов с ядрами различных элементов был изучен при энергиях первичных протонов до 400 ГэВ, а пионов — до 200 ГэВ. Эксперименты по определению сечения неупругого взаимодействия, проведенные на калориметрически укомплектованных, страдали неопределенностью из-за незнания точного состава потока адронов в космических лучах при ТэВ-ных энергиях. Между тем получение картины взаимодействия нуклонов и пионов с ядрами при энергиях, на порядок превышающих ускорительные (≥ 400 ГэВ), являлось сложной проблемой, связанной, с одной стороны, с созданием приборов, способных идентифицировать каждый регистрируемый адрон, и, с другой стороны, с круто падающим спектром космического излучения, требующим соответствующего увеличения масштабов установок с ростом исследуемой области энергии.

Была разработана программа экспериментальных исследований с целью измерения большинства основных характеристик первичного адрона. Эта программа включала в себя изучение энергетических спектров пионов и нуклонов в зависимости от плотности сопровождения адронов воздушными ливневыми частицами; исследование физических и методических факторов, влияющих на измеряемые физические величины. Целью экспериментальных работ, описанных в диссертации, являлось: 1) разработка и создание установки, адекватной поставленной задаче; 2) получение данных по адрон-нуклон-ядерным взаимодействиям в области энергий пионов и протонов; 3) анализ полученного материала и его сравнение с ускорительными данными и имеющимися наиболее корректными данными в космических лучах; 4) сравнение измеренных и теоретических физических величин с предсказаниями теории.

Научная новизна работы. Большинство результатов, полученных в диссертации, получены впервые.

Предложена и создана экспериментальная установка, обеспечивающая как идентификацию пионов и нуклонов в потоке косми-

ческих адронов, так и измерение характеристик их взаимодействия с ядрами различных веществ в интервале энергий от 300 ГэВ до 5000 ГэВ. При этом идентификация пионов и протонов в каждом событии осуществлена впервые в космических лучах.

Впервые измерены сечения неупругого взаимодействия пионов и протонов с ядрами в интервале энергий, охватывающем почти два порядка.

Впервые получены величины парциальных коэффициентов неупругости во взаимодействиях пионов и протонов с ядрами железа в интервале энергии 300–5000 ГэВ. При этом разработана новая методика определения парциальных коэффициентов неупругости, уменьшающая методические неопределенности, присущие адронным калориметрам.

Впервые получены энергетические спектры пионов, протонов и нейтронов космических лучей на высотах гор в зависимости от плотностей воздушного ливневого сопровождения. Разработаны алгоритм и программа обработки событий в калориметре, впервые обеспечивающие получение полной информации при их групповом прохождении через калориметр.

Основные положения, выдвинутые автором на защиту:

1. Предложение, обоснование, разработка и внедрение в эксперимент метода идентификации частиц с энергией $> 0,5$ ТэВ в установке, сочетающей детекторы рентгеновского переходного излучения и адронный калориметр. Разработана оригинальная методика обработки каскадов в калориметре для исследования спектров адронов и их взаимодействия с ядрами вещества калориметра. Путем расчета и экспериментально были показаны достоверность предложенных в диссертации методов идентификации и определения параметров адронов, а также регистрации акта взаимодействия в калориметре в каждом из событий.

2. Новые физические результаты по определению сечения неупругого взаимодействия пионов, протонов и нейтронов с ядрами в интервале энергии 0,3–5,0 ТэВ. Показано, что сечение взаимодействия адронов с ядрами растет с увеличением энергии медленнее, чем "элементарные" сечения "адрон-адронного" столкновения. Наблюдается независимость отношения $\sigma_{ppc}^{in} / \sigma_{pFe}^{in}$ от энергии. На основе экспериментальных данных можно сделать вывод, что

вплоть до энергии 5 ТэВ имеется различие в характеристиках пион- и протон-ядерных взаимодействий. Это с учетом некоторых теоретических представлений указывает на то, что асимптотика далеко не достигается при нескольких ТэВ.

3. Новые данные о поведении парциальных коэффициентов неупругости от энергии и сорта адронов. Показано, что различие парциальных коэффициентов неупругости в пионных и протонных взаимодействиях является следствием заметной величины вероятности неупругой перезарядки пиона. Экспериментальное отношение величин $K_{\pi^0}(pFe)$ и $K_{\pi^0}(pFe)$ не противоречит кварковой структуре пионов и протонов. Полученные результаты сравнивались с предсказанием теории многократного рассеяния, что привело к заключению о правомерности применения теории Глаубера в адрон-ядерных взаимодействиях в исследуемом интервале энергии.

4. Исследования параметров энергетических спектров пионов и нуклонов и зависимости наблюдаемого состава адронного компонента космических лучей от энергии адронов и плотности сопровождающих адроны каскадных частиц. Из экспериментальных данных видно, что при исследуемых энергиях в событиях с малоплотным сопровождением доля протонов увеличивается с ростом энергии. Согласно расчетных и экспериментальных результатов указывает на одинаковость инклюзивных спектров в адрон-адронных и адрон-ядерных столкновениях при энергиях выше 500 ГэВ.

Научная и практическая ценность работы.

1. Полученные результаты использованы (как нами, так и другими авторами) для проверки теоретических представлений о процессах в адрон-ядерных взаимодействиях. Показано, что теория многократного рассеяния Глаубера способна объяснить совокупность экспериментальных данных, полученных в этой работе. Проведены расчеты в рамках теории КХД и моделей нуклонического поперона.

2. Данные о составе и спектрах потока адронов используются для тестов моделей при розыгрыше прохождения адронов через земную атмосферу. Измеренные в настоящей работе зависимости N_{π}/N_p , N_n/N_p и N_z/N_n — отношений от энергии и плотности сопровождения могут служить тестом при моделировании процессов развития каскадов в атмосфере и для планирования экспериментальных

данных по ШАЛ.

3. Исследования в области энергий взаимодействия > 1 ТэВ позволяют планировать эксперименты на ускорителях следующего поколения по исследованию фрагментационной области адрон-ядерных взаимодействий.

4. Важным итогом является разработка и создание нового типа масс-спектрометра на основе сочетания РПИ-детектора и прибора, измеряющего энергию частиц. Этот принцип, заложенный в установке "Пион", уже несколько лет удачно используется в экспериментах, проводимых в космических лучах и на ускорителях.

5. Некоторые методические разработки, в первую очередь, способ определения параметров каскада и адрона в калориметре, а также метод определения величины парциального коэффициента K_{π^0} могут быть применены в экспериментах "АНИ" на Арагаце и "Адрон" на Тянь-Шане.

Апробация работы и публикации. Основные результаты настоящей работы представлялись и докладывались на научных семинарах ЕрФИ, ФИАН СССР, совещаниях по взаимодействиям при высоких энергиях в Бакуриани и Нор-Амберде, на всех Всесоюзных и Международных конференциях по космическим лучам, начиная с 1975 г., на сессиях отделений ЯФ и ФИА АН СССР, на Европейских симпозиумах по космическим лучам в г.Риме (1982 г.), в ЧССР (1984 г.) и в г.Бордо (1986 г.). В представленных в диссертации материалах автором совместно с соавторами опубликованы 35 работ, список которых приведен в конце автореферата. Полный список печатных работ с участием автора диссертации содержит 78 наименований.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она содержит 276 страниц, в том числе 47 таблиц, 74 рисунка и список литературы, состоящий из 193 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обсуждается постановка вопроса о важности исследования характеристик адрон-ядерных взаимодействий в косми-

ческих лучах в области энергий 500-5000 ГэВ, а также определения характеристик потоков пионов, протонов и нейтронов на уровне гор. Сформулированы основные научные задачи, пути их решения. Дается краткое изложение содержания диссертации, актуальность и цель работы. Освоение области энергий выше ускорительных связано было с созданием качественно новой установки. Показано, что метод сочетания адронного калориметра с детектором рентгеновского переходного излучения открыло научное экспериментальное направление в исследованиях физики элементарных частиц высоких энергий.

В первой главе приведены описание и основные характеристики установки "Пион" (рис. 1). Первый раздел главы посвящен обоснованию новой методики идентификации пионов и протонов в потоке заряженных адронов космических лучей. Традиционные методы разделения пионов и протонов в потоке заряженных адронов (магнитные спектрометры, черенковские счетчики, измерение ионизационных потерь в газовых счетчиках) ограничиваются энергиями до 300 ГэВ. При более высоких энергиях вплоть до $E \sim 10$ ТэВ идентификация пионов и протонов стала возможной практически только с появлением детекторов рентгеновского переходного излучения (РПИ-детектор). РПИ-детектор позволяет измерять Лоренц-фактор ($\gamma = E/mc^2$) заряженной частицы. Ионизационный (или сцинтилляционный) калориметр измеряет энергию адрона (E). Сочетанием обоих методов в одной установке удалось создать новый тип адронного масс-спектрометра в области энергии $E \geq 0,3$ ТэВ. В 1972 г. на высокогорной станции Арагац был осуществлен первый эксперимент, где РПИ-детектор в сочетании со сцинтилляционно-искровым калориметром был использован для решения конкретной физической проблемы - определения числа пионов и протонов в потоке космических лучей с энергиями

$E > 300$ ГэВ. Аналогичная установка с большим числом модулей РПИ-детектора была осуществлена в 1974 г. в США. Последующие экспериментальные исследования на Арагаце в 1975-1977 гг. Авакяна В.В., Багдасаряна Л.С., Мамиджяна Э.А., Огнисяна А.Т. с сотрудниками привели к созданию установки "Пион", где впервые в космических лучах проводилась идентификация адронов в каждом индивидуальном событии и, тем самым, стало возможным

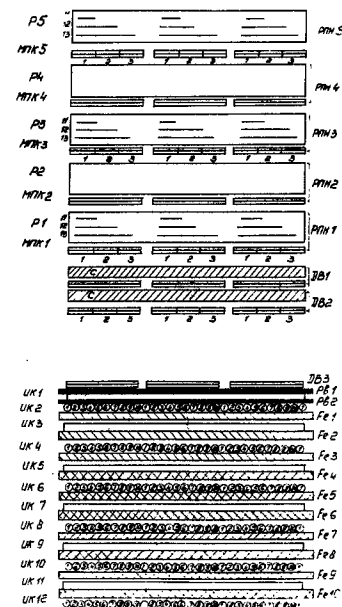


Рис. 1. Схема расположения детекторов установки "Пион"
 РП1 - РП5 - генераторы переходного излучения; МПК1 - МПК5 - многонитяные пропорциональные камеры; ИК1 - ИК12 - ионизационные камеры; ДВ1, ДВ2 - детекторы взаимодействия

исследование и сравнение характеристик взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами атомов разных веществ.

Установка "Пион" состоит из пяти основных узлов: 1) Ионизационного калориметра (ИК); 2) РПИ-детектора; 3) Годоскопической системы (ГС); 4) Детектора взаимодействия (ДВ); 5) Системы автоматизации. В 1983 г. установка была расширена с целью исследования энергетических характеристик и разных компонентов ШАЛ в ствольной области в интервале энергии $5 \cdot 10^{13} - 10^{15}$ эВ.

В связи с этим были установлены сцинтилляционные счетчики, которые одновременно служили детекторами ливневого сопровождения. Для проведения непрерывной калибровки физических параметров многонитяных пропорциональных камер (МПК) над РПИ-детектором были установлены два ряда МПК.

Ионизационный калориметр установки "Пион" предназначен для определения энергии и места первого взаимодействия адронов в калориметре, а также характеристик пространственного развития ядерно-электромагнитного каскада (ЯЭК) в веществе калориметра. По энерговыделениям в калориметре формируется управляющий импульс запуска всей установки. Калориметр состоит из 10 слоев железа толщиной $\Delta X_{Fe} = 10$ см каждый. Над железным поглотителем расположено два свинцовых слоя толщиной 3 см и 2 см. Между слоями поглотителя расположены ряды ионизационных камер длиной 330 см и диаметром 10 см. Толщина стенок камеры 2,0 мм. Камеры изготовлены из латунных труб и наполнены чистым аргоном до давления 5 атм. Общее количество вещества в ИК составляет 900 г/см^2 . Высота ИК равна 260 см, поперечное сечение - 10 м^2 . Наиболее существенной с методической точки зрения специфической исследуемой физической задачи является выработка алгоритма определения параметров адрона в калориметре (энергия, направление оси ливня, характеристики ЯЭК и т.д.). Энергия адронов определялась двумя способами:

Традиционный способ, когда применяется формула $E = K \sum J_i$, где J_i - измеренные амплитуды сигналов в каналах калориметра. Для улучшения точности определения коэффициента K были проведены специальные калибровочные измерения и расчеты на основе данных калибровок адронных калориметров на ускорителях. Рассмотрена природа различных факторов, влияющих на энергетическое разрешение калориметра. Существенными оказались факторы, связанные с дискретным характером съема информации с ионизационных камер и с недомером энергии адрона из-за конечного размера калориметра;

Во втором способе энергия частицы определялась, исходя из анализа ЯЭК в каждом событии. Нами найдена аппроксимационная формула для определения ионизационных потерь в ЯЭК в плотном веществе

$$\frac{dE}{dt} = E \frac{1}{t_0} \frac{e^{-\delta^2/t_0}}{\sqrt{2\pi\delta}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(t/t_0)}{\delta}\right]^2\right),$$

где $t_0 = T_0 \ln(E/\beta)$, β - критическая энергия в веществе калориметра, δ - подгоночный параметр, E - энергия адрона в единицах ГэВ, T_0 - радиационная единица длины поглотителя в г/см^2 . Значение параметра δ было получено минимизацией χ^2 и оказалось равным $\delta^2 \approx \ln^2$. Мера функции распределения (точка глобального максимума) равна t_0 и совпадает с глубиной максимума развития ЯЭК. На основе результатов Монте-Карло расчетов для коэффициента вариации каскадных кривых получено аппроксимационное выражение

$$\frac{\sigma(dE/dx)}{\langle dE/dx \rangle} = \frac{a_1}{(t/t_0)} + \frac{a_2}{t^2} (t/t_0)^2,$$

где $a_1 = 0,38$, $a_2 \approx 1000$. Предлагаемая здесь оценка энергии измерением параметра t_0 по наблюдаемой в калориметре каскадной кривой включает в себя учет проноса доли энергии через нижнее основание и боковые стенки калориметра. Апробация данного метода с учетом флуктуаций каскадной кривой проводилась нами методом Монте-Карло. Расчеты показали, что фактор недомера ионизации не влияет на относительную среднеквадратичную ошибку измерения энергии предложенным здесь методом, начиная с энергий $E > 200$ ГэВ. Важным преимуществом метода является то, что в определении среднеквадратичных отклонений величины информация в первых двух рядах начала ЯЭК в калориметре менее существенна, чем считалось раньше. Этот вывод важен, так как именно в первых двух верхних рядах каскад подвержен сильной флуктуации и имеется большой фон от частиц сопровождения. Метод позволяет также с точностью не хуже 20% определить энергию адрона, имея информацию только в четырех рядах калориметра (короткие каскады с большим переносом энергии через нижнее основание калориметра).

Сопоставление средних значений энергии ЯЭК, полученных двумя способами, показывает, что разница в оценке энергии адрона не превышает 3% в интервале от 1000 до 2000 ГэВ.

Предложенный нами метод определения энергии адрона в

калориметрических установках обладает рядом преимуществ перед традиционным способом:

- 1) Независимость окончательных результатов от неопределенности в фиксации точки генерации ЯЭК в калориметре;
- 2) Автоматический учет пороговых эффектов и недомера энергии всех каскадов;
- 3) Возможность оценки энергии при наличии информации в четырех рядах — это особенно важно для анализа энергии каждого адрона при одновременном прохождении группы адронов в калориметре;
- 4) Универсальность метода при определении энергии ЯЭК, генерированных в графитовой мишени или в свинцовых фильтрах калориметра;
- 5) Быстрота обработки большого числа событий с применением ЭВМ.

РПИ-детектор установки "Пион", основанный на методе энергосъемления, измеряет Лоренц-фактор заряженной частицы и совместно с годоскопом дает информацию о наличии на уровне наблюдения заряженных частиц, сопровождающих регистрируемое событие, а также с высокой достоверностью ($\sim 98\%$) разделяет заряженный и нейтральный компоненты адронов космического излучения.

РПИ-детектор в сборе представляет собой 36 (начиная с 1981 г. — 45) идентичных модулей, состоящих каждый из генератора переходного излучения и многонитяных пропорциональных камер. Слоистая среда генератора изготовлена из 120 слоев майлара толщиной 22 мкм, расположенных в воздухе на расстоянии 0,3 см друг от друга. Рабочая площадь МПК $0,9 \times 0,9 \text{ м}^2$, камеры наполнены смесью $90\% \text{ Ar} + 10\% \text{ C}_2\text{H}_2$. Эффективная толщина газа соответствует 2,7 см. Анодные нити в МПК объединены в три секции, а их направления в чередующихся рядах (4 ряда до 1981 г. и 5 рядов с 1981 г.) взаимоперпендикулярны. МПК были разработаны, изготовлены и исследованы нами специально для РПИ-детектора больших размеров. Отметим некоторые основные характеристики камер:

1. Параметры выходного импульса — $t_d = 250-300 \text{ нс}$, $U = 0,5-4,0 \text{ МВ}$ (рабочее напряжение $U = 2500-2700 \text{ В}$);
2. Эффективность регистрации одиночных заряженных частиц

- $92 \pm 4\%$;

3. Разрешающая способность (ширина распределения γ -исогочника Fe^{56} с $E_\gamma = 595 \text{ КэВ}$) — $\pm 25\%$;

4. Линейность в 10-кратном диапазоне регистрации заряженных частиц — 100%. Зависимость $\Phi(\omega)$ величины сигнала энергосъемления в МПК от энергии γ -квантов (ω) аппроксимируется выражением $\Phi(\omega) = 7,89 \cdot 10^{0,609}$.

В главе приведены расчетные (ожидаемые) характеристики РПИ-детектора, полученные в процессе моделирования прохождения протонов и пионов разных энергий через все модули РПИ-детектора с учетом геометрических и физических параметров детектора.

Линейная зависимость выхода γ -квантов РИ в РПИ-детекторе продолжается до значения Лоренц-фактора $3 \cdot 10^4$ ($E_L = 4000 \text{ ГэВ}$). Получены зависимости коэффициентов режекции пионов и протонов $\delta_{p,l}$ от эффективности регистрации $\epsilon_{p,l}$ в 4-х модульном варианте РПИ-детектора. Например, для значения $\epsilon_{l,p} \approx 70\%$, $\delta_p \approx 10\%$, $\delta_l \approx 14\%$.

В первой главе кратко описаны технические и физические параметры калибровочного ряда, годоскопических камер, детектора взаимодействия и детекторов сопровождения. Приведены также характеристики разных серий измерений и вариантов эксплуатации установки.

Во всех сериях измерений установка запускалась при одновременном выполнении трех условий: а) энергосъемление в калориметре $E \geq E_{\text{пор}}$; б) ЯЭК в калориметре должен охватывать по крайней мере 4 ряда ионизационных камер; г) уровень энергосъемления в этих рядах $E_{\text{ряд}} \geq E_{\text{пор}}^{\text{ряд}} \approx 100 \text{ ГэВ}$.

На этой установке решены несколько технических задач:

1. Создан новый тип МПК рабочей площадью $\sim 1 \text{ м}^2$.
2. Разработана технология и созданы генераторы переходного излучения больших размеров.
3. Отработана методика совместной работы большого числа МПК, сцинтилляционных счетчиков и ионизационных камер.
4. Осуществлена полная автоматизация процессов съема калибровки, визуализации, записи и предварительной физической обработки информации во время работы установки. Создана система автоматизации на базе двух микро-ЭВМ и центрального процес-

сора (ЭВМ типа СМ-4), работающих "в линию" с экспериментом.

Установка позволила измерять следующие характеристики отдельного события в области энергии адронов от 300 ГэВ до 5 000 ГэВ:

- Величина энергии одиночных и групп адронов с точностью $\sim 15\%$.
- Направление прихода адрона с точностью $\pm 1^\circ$.
- Координаты входа частиц в установку (ΔX и ΔY) с точностью $\pm 2,7$ см.
- Наличие заряда адрона с эффективностью $\sim 98\%$.
- Факт прохождения адронов в калориметре с эффективностью $> 98\%$.
- Плотность сопровождения адронов ливневыми воздушными частицами в пределах от 1 до ~ 20 частиц на 1 кв. м.
- Глубину первого взаимодействия адрона в калориметре с точностью ± 1 т. единицы.
- Поперечное и продольное развитие ядерного каскада в калориметре с точностью ± 5 см.
- Величины энерговыделения в каждой МПК при прохождении заряженной одиночной частицы.
- Амплитуды импульсов на выходах сигнальных нитей МПК и ИК с точностью $\pm 0,5\%$ (всего на установке 573 аналоговых канала).

Во второй главе приведено описание метода анализа экспериментального материала, алгоритм обработки данных на ЭВМ, излагается метод идентификации пионов и протонов из измеренных на счете величин энерговыделения в детекторах установки. Особое внимание уделено специфике настоящих исследований, связанных с факторами методического и физического характера, искажающими физические результаты эксперимента.

В течение ~ 17 тыс. часов чистого времени эксплуатации установки "Пион" в разных модификациях накопилось $\sim 2 \cdot 10^5$ событий, записанных на магнитные ленты с помощью ЭВМ "Наири-2". Были разработаны схемные и программные передачи информации на

базовую ЭВМ ЕРФИ - БЭСМ-6 и специальные программы "сжатия" информации и оперативного выборочного обращения к банкам данных.

Одной из важных процедур анализа накопленного материала является выработка критериев отбора и классификация событий по категориям, по признаку наличия или отсутствия заряда адрона, по плотности сопровождения и т.д. Особый интерес представляет выявление закономерности о зависимостях измеряемых на установке физических величин от плотности ливневого сопровождения адронов воздушными заряженными частицами. Нами введены две количественные величины, характеризующие плотность сопровождения:

1. Плотность ρ_{max} - для оценки плотности сопровождения в колонне ($S \sim 1 \text{ м}^2$) из 4-х (или 5-и) модулей по траектории адрона.

2. N_e , частиц/м² - для оценки плотности сопровождения по всей площади РИИ-детектора.

Алгоритм программы обработки экспериментального материала обеспечивал выдачу следующих параметров каждого события:

- Сорт событий ("пустой", "ливень", "группа", "только ИК" и т.д.).

- Тип, группа, категория адрона. Зенитный и азимутальный углы входа частицы в установку.

- Полный набор информации об ЯЭК. Энергия адрона.

- Величины энерговыделения в секциях МПК по треку адрона. Плотность сопровождения в единицах ρ_{max} и N_e .

- Количество треков в ИК и информация о каскадах.

- Информация (амплитудная и координатная) о работе сцинтилляционных детекторов.

Такая "паспортизация" позволяла в дальнейшем произвести корректный отбор событий как для решения конкретной физической задачи, так и для статистического анализа накопленной информации.

В алгоритме идентификации пионов и протонов использовался метод максимального правдоподобия. Параметр правдоподобия R позволяет определить процент ошибок при классификации "пионных" и "протонных" событий.

Алгоритм отбора частиц по знаку заряда позволяет вести

исследования потоков нейтральных и заряженных адронов в зависимости от энергии, от плотности сопровождения и от глубины взаимодействия в калориметре. Проведен анализ потока нейтронов, отобранных при наличии информации от двух, трех и более детекторов заряда, расположенных по траектории первичной частицы.

Показано, что наличие обратного тока, частиц сопровождения может сильно искажать экспериментально измеренные отношения

N_{π}/N_p , N_n/N_H , особенно в тех случаях, где заряд и плотность сопровождения определяются одним или двумя рядами детекторов.

В главе подробно описаны результаты по исследованию характеристик частиц, рожденных в глубинах калориметра (> 100 г/см²) и вылетевших обратно в лабораторной системе координат. Изучение адрон-ядерных взаимодействий, сопровождающихся испусканием адронов в заднюю полусферу в л.с.к. — это прежде всего анализ явлений, связанных с фрагментацией ядра мишени. Эти исследования могут дать существенную информацию о свойствах ядерной материи. В настоящее время в литературе нет прямых данных по множественности и угловому распределению частиц альbedo при ТэВ-ных энергиях, в том числе адронов, кинематика генерации которых соответствует взаимодействию первичной частицы с многонуклонной мишенью (кумулятивный процесс). Поэтому приведенные в этой главе данные в некоторой мере ликвидируют пробел в этом вопросе.

Третья глава посвящена анализу экспериментальных результатов по потокам адронного компонента космических лучей на высоте гор. Использование многомодульного РИИ-детектора, позволяющего идентифицировать пионы и протоны в энергетическом интервале 500–5000 ГэВ, дало возможность исследовать отдельные компоненты потока адронов.

Рассмотрим связи спектров вторичных компонентов адронного излучения на высоте гор с процессами, происходящими в атмосфере при энергиях, в несколько раз превосходящих регистрацию порога установки. Измерялись показатели степени спектров χ при различных плотностях ливневого сопровождения ρ_{max} , а также парциальный состав пионов, протонов и нейтронов в потоке адронов. Был проведен корректный расчет светосилы установки. В тех случаях, когда конфигурация детекторов сравнительно проста,

светосилу установки удастся вычислить аналитически. Однако в случае "Пион"-а при расчете светосилы необходимо провести сложные численные расчеты с учетом как геометрических размеров детекторов, так и факторов, влияющих на эффективность регистрации адронов. К числу таких факторов относятся угловые распределения адронов разных групп, условия выработки триггерного импульса, наличие нечувствительных зон между детекторами, эффективность детекторов, боковые эффекты в калориметра, характеристики ЯЭК и, наконец, критерии отбора разных типов событий. Нами был развит метод определения светосилы на основе расчета Монте-Карло с использованием уравнения Фредгольма I рода. В табл. 3.1 диссертации приведены результаты расчетных значений светосилы установки. Расчеты показывают, что светосила установки слабо зависит от показателя углового распределения адронов m ($\pm 15\%$ при значениях m от 5 до 12).

Как известно, интенсивность адронов под азимутальным углом определяется как

$$J(\theta) = J_0(\theta) e^{-\frac{\chi(\sec\theta - 1)}{\lambda(h \text{air})}} = J_0(\theta) f(\theta)$$

Наблюдаемое угловое распределение имеет форму $F(\theta) = f(\theta) dG(\theta)$, где $dG(\theta)$ представляет собой угловую зависимость светосилы установки. В главе приведены наблюдаемые и скорректированные показатели угловых распределений адронов разных групп и значения средних величин $\langle \theta \rangle$. Наши измерения показывают, что с увеличением энергии наблюдается тенденция роста показателя m . Были вычислены величины m и $\langle \theta \rangle$ для P и π — $m_p = 7,1 \pm 1,5$; $\langle \theta \rangle_p = 16,2^\circ$; $m_\pi = 6,3 \pm 1,7$, $\langle \theta \rangle_\pi = 18,4^\circ$. N_π/N_p , N_n/N_H и N_n/N_p — отношения

В гл. III приведена итоговая таблица (табл. 3.5) значений N_π/N_p — отношений с учетом поправок всех фоновых процессов и физических эффектов, влияющих как на точности идентификации пионов и протонов, так и на плотность сопровождения. В статистику вошли 1811 пионов и 1955 протонов с энергией $E \geq 300$ ГэВ. Приведены результаты других экспериментальных работ и сравнение с данными настоящей работы.

На установке "Пион" впервые N_π/N_p — отношения определены в зависимости от плотности ливневого сопровождения. Анализ

большинства экспериментов в КЛ показывает, что при отборе потоков заряженных и нейтральных адронов накладывалось сильное ограничение на ливневое сопровождение (для анализа отбиралось не более 50-60% всех адронов), а при таком отборе появляется большая неопределенность в величине N_p/N_n и, тем самым, в определении N_π/N_p . На основе результатов измерения N_π/N_p - отношений на установке "Пион" можно сделать следующие выводы:

- Пионный компонент сильнее зависит от плотности сопровождения, чем протонный. Это объясняется, в основном, увеличением числа проскочивших атмосферу без взаимодействия протонов в потоке адронов с малыми значениями ρ_{max} .

- При фиксированных критериях отбора ($\rho_{max} = const$) отношение N_π/N_p уменьшается с ростом энергии частиц по закону $A E^{-m}$.

Высокая чувствительность установки "Пион" к определению заряда первичного адрона и возможность идентификации пионов и протонов позволила исследовать закономерности поведения N_3/N_H и N_n/N_p - отношений в потоке КЛ. В главе указаны результаты измерения отношения потоков заряженных и нейтральных адронов в зависимости от плотности ливневого сопровождения (N_e), от энергии адронов и от глубины первого взаимодействия адронов в калориметре. Полученные нами результаты сравнивались с мировыми данными (см. рис. 3.4 диссертации). Из результатов измерений следует, что отношение N_3/N_H имеет тенденцию роста с увеличением энергии адронов. Такое поведение можно объяснить возрастанием плотности сопровождения с ростом энергии и, следовательно, ростом неопределенности определения заряда адрона. К такому выводу можно прийти из анализа зависимости отношений N_3/N_H от плотности ливневого сопровождения. В потоке адронов с нулевым или малоплотным сопровождением преобладает число проскочивших протонов. В интервале энергии от 500 ГэВ до 3000 ГэВ в событиях с $N_e = 0$ отношение N_3/N_H находится в пределах от 1,04 до 1,22.

В событиях с малоплотным сопровождением с увеличением глубины первого взаимодействия в калориметре отношение N_3/N_H уменьшается. Эта зависимость косвенно указывает на уменьшение средней множественности обратного тока с увеличением глубины

их рождения.

Исследована зависимость отношения N_n/N_p от энергии при двух фиксированных значениях ρ_{max} . Отношение N_n/N_p мало меняется с увеличением энергии от 0,5 ТэВ до 3 ТэВ (меняется в пределах от 0,61 до 0,83). Это отношение очень чувствительно к изменению плотности сопровождения.

Энергетические спектры адронов разных групп. В настоящем эксперименте путем прямой идентификации впервые измерены энергетические спектры пионов и протонов. Примечательно, что эти данные получены при различных значениях плотности ливневого сопровождения, благодаря чему можно прийти к более обоснованному физическим заключением путем сравнения экспериментальных и расчетных ожидаемых результатов.

В области энергий 600-2000 ГэВ спектры протонов представляются в виде

$$J_p(>E) = (2,43 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} E^{-1,90 \pm 0,04} m^{-2}_{cp} I_c^{-1} \quad \text{при } \rho_{max} \leq 0,1;$$

$$J_p(>E) = (3,13 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} E^{-1,86 \pm 0,03} m^{-2}_{cp} I_c^{-1} \quad \text{при } \rho_{max} \leq 0,3;$$

$$J_p(>E) = (3,78 \pm 0,06) \cdot 10^{-5} E^{-1,84 \pm 0,04} m^{-2}_{cp} I_c^{-1} \quad \text{при } \rho_{max} \leq 2.$$

Существенное различие в поведении спектров наблюдается при энергиях $E > 2$ ТэВ. При этом чем больше ρ_{max} , тем больше значение энергии, при котором резко меняется наклон спектров.

Спектры пионов при $E > 600$ ГэВ имеют вид:

$$J_\pi(>E) = (2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-6} E^{-2,60 \pm 0,19} m^{-2}_{cp} I_c^{-1} \quad \text{при } \rho_{max} \leq 0,1;$$

$$J_\pi(>E) = (3,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} E^{-2,56 \pm 0,15} m^{-2}_{cp} I_c^{-1} \quad \text{при } \rho_{max} \leq 0,2;$$

$$J_\pi(>E) = (9,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-6} E^{-2,57 \pm 0,15} m^{-2}_{cp} I_c^{-1}$$

при $\rho_{max} \approx 2$.

На рис. 2 показаны интегральные энергетические спектры пионов и протонов при значениях $\rho_{max} \approx 2$.

В главе описаны результаты расчетных исследований спектров и приводятся потоки одиночных адронов на высоте ~ 3000 м над уровнем моря. Рассматривались два варианта Монте-Карло расчета прохождения адронов через атмосферу. Расчетные данные использовались для интерпретации результатов по составу и спектру адронов.

Первый вариант основан на решении уравнений диффузии для энергетических спектров адронов космического излучения в атмосфере с применением упрощенной схемы картины взаимодействия.

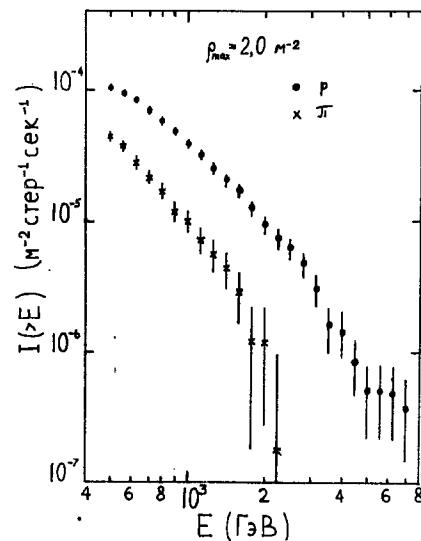


Рис. 2. Интегральные энергетические спектры пионов и протонов, $\rho_{max} \approx 2 \text{ м}^{-2}$

Расчет основан на учете ливневых частиц лишь от последнего взаимодействия первичного адрона. Естественно предположить, что в событиях с малым ρ мы имеем дело со случаем, когда последнее взаимодействие лидирующего адрона имело место достаточно высоко над установкой и сопровождающий ливень находится в стадии затухания. Получены инклюзивные спектры различных компонент адронов. Согласие с экспериментом при $\rho \approx 0,1$ хорошее. Получена аналитическая зависимость вида $N_{\pi}/N_p(>E) = AE^{-m}$, и при $E = 0,3$ ТэВ для N_{π}/N_p -отношения были получены значения $0,42 \pm 0,01$; $0,43 \pm 0,02$ и $0,81 \pm 0,07$, соответственно, при плотностях сопровождения $\rho_{max} = 0,1$, $\rho_{max} = 0,3$ и $\rho_{max} = 2$. Эти значения не искажены пороговыми эффектами установки и близки к истинным экспериментальным величинам при $E \geq 500$ ГэВ. Решение уравнения диффузии методом Монте-Карло привело к определению отношения потоков протонов и нейтронов на уровне X г/см².

$$\frac{N_p(E, X)}{N_n(E, X)} = \frac{1 - \delta_0 e^{-2X/\lambda \cdot \tau_{эфф} < u^{x-1} >}}{1 + \delta_0 \exp(-2X/\lambda \tau_{эфф} < u^{x-1} >)},$$

где

$$\delta_0 = \frac{1 - \alpha(0)}{1 + \alpha(0)}, \quad \alpha(0) = N_n(0) / N_p(0)$$

$\tau_{эфф}$ - эффективный коэффициент неупругой перезарядки. Анализ совокупности имеющихся ускорительных данных по нуклон-нуклонным и нуклон-ядерным процессам, а также экспериментов в космических лучах указывает на то, что значения величины $\tau_{эфф}$ находится в пределах $0,24 \leq \tau_{эфф} \leq 0,5$. По данным установки "Пион" $0,30 \leq \tau_{эфф} \leq 0,40$.

Целью второго варианта моделирования являлся расчет ожидаемых значений состава и энергетического спектра адронов с энергией > 300 ГэВ - условиях установки "Пион" при различных значениях мюонной, адронной и электронной (позитронной) плотностей сопровождения. В алгоритм трехмерного Монте-Карло расчета прохождения первичных космических лучей через атмосферу заложены двухкомпонентная модель взаимодействия адронов с ядрами атомов воздуха, слабое нарушение скейлинга во фрагментационной области. За основу была принята программа моделирова-

ния ШАЛ энергий 10^{13} – 10^{17} эВ, разработанная в ФИАН СССР. Программа существенно модифицирована для моделирования не только ШАЛ, но также и одиночного потока адронов с учетом электронного, мюонного и адронного сопровождений. В алгоритме использованы последние данные ускорительных экспериментов по определению основных параметров нуклон-нуклонных взаимодействий, а также новые результаты, полученные в космических лучах. На основе расчетных значений статистической обработки 3000 "псевдо-экспериментальных" событий приведено сравнение ожидаемых и экспериментальных спектров заряженных и нейтральных одиночных адронов (когда адрон не имел адронного сопровождения) на уровне 700 г/см^2 в зависимости от плотности сопровождения. Сравнение показывает, что используемая нами модель в пределах экспериментальных и расчетных ошибок согласуется с результатами, полученными на установке "Пион".

Четвертая глава посвящена анализу экспериментальных результатов по сечениям неупругого взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами атомов Fe, Pb, C, Al. Кратко описаны методы измерения сечения неупругого взаимодействия адронов с ядрами в калориметрических установках. Цель исследования заключалась в выборе способа для определения величины σ^{in} с наилучшей точностью на основе измерения распределения точек взаимодействий адронов в калориметре. Для выбора оптимального способа методом Монте-Карло был смоделирован эксперимент при фиксированных значениях толщины слоя ИК $\Delta l = 80 \text{ г/см}^2$ и $\sigma_{pFe}^{in} = 718 \text{ мб}$. Показано, что наиболее приемлемым для нашего эксперимента способом определения σ^{in} является метод максимального правдоподобия.

Специально рассмотрен вопрос влияния толщины "элементарного" слоя железа (Δl) на определение истинной величины пробега. Расчет показывает, что при данной толщине вещества в калориметре ($l = \text{const}$) изменение элементарного слоя от $\Delta l = 0$ до $\Delta l \approx 2/3 \lambda_{pFe}^{in}$ практически не меняет погрешность в определении λ^{in} . При определении величин сечения особо важен корректный учет всех методических и физических эффектов, которые могут исказить истинное распределение точек взаимодействия адронов в калориметре. К таким эффектам относятся эффектив-

ность регистрации адронов в зависимости от глубины взаимодействия в ИК; наличие обратных частиц; угловое распределение адронов; вклад мюонов высокой энергии; величины коэффициентов режекции пионов и протонов; критерии отбора.

В табл. I приведены экспериментальные величины сечения неупругого взаимодействия пионов и протонов с ядрами железа. Значения σ^{in} получены после поправок, вызванных вышеописанными эффектами.

Таблица I
Экспериментальные значения величин сечения неупругого взаимодействия пионов и протонов с ядрами железа

ΔE , ГэВ	500–700	700–1000	1000–2000	> 2000
$\langle E \rangle$, ГэВ	600	870	1500	3500
σ_{pFe}^{in} , мб	759 ± 38	772 ± 40	779 ± 42	784 ± 85
$\sigma_{\pi Fe}^{in}$, мб	636 ± 37	650 ± 39	657 ± 45	665 ± 86

В главе приведены результаты эксперимента по определению сечения неупругого взаимодействия всех одиночных по калориметру адронов (14242 события), и адронов, входящих в группы: "заряженные" (3831), "нейтральные" (1818) и "ливневые" (2741) с ядрами атомов железа. Сопоставление наших данных с результатами, полученными на ускорителях, позволяет произвести модельное сравнение механизма взаимодействия адронов высоких энергий с ядрами. Очевидно, что для сопоставления ускорительных данных с экспериментами адрон-ядро взаимодействий в космических лучах при более высоких энергиях необходимо:

1) перейти от сечений адрон-ядерных взаимодействий (J_A , P_A , n_A) к элементарным адрон-нуклонным (J_N , p_N , n_N) взаимодействиям во всем диапазоне исследуемых энергий;

2) количественно учесть все процессы без регистрации вторичных частиц.

Существуют несколько моделей, устанавливающих связь между

элементарным и ядерным сечениями. Наши исследования показали, что наиболее эффективными при энергиях 10^{12} - 10^{13} эВ можно считать модели, основанные на подходе Глаубера. Для сравнения предсказаний теории с экспериментальными данными необходимо учесть, что в эксперименте частицы, теряющие энергию меньше некоторой заданной, не регистрируются. Так, на установке "Пион" не регистрировались начальные адроны, которые теряли ~ 8% своей энергии (дифракционная область). Наблюденная поправка растет с атомным номером по закону $\sim A^{0,38}$ и существенна даже для легких ядер ($\Delta\sigma = 15 \text{ мб}$ для ядер воздуха). Экспериментальные данные по сечениям нуклон-нуклонного взаимодействия аппроксимируются функцией:

$$\sigma_{NN}^{in} = 41,14 - 21,87 E^{-1/2} - 3,12 \ln E + 0,33 \ln^2 E$$

Воспользовавшись тем, что отношение $\sigma_{pp}^{in} / \sigma_{pA}^{in}$ практически не меняется от энергии в интервале 100-300 ГэВ и равно 1,6, сечение неупругого JN -взаимодействия можно представить в виде:

$$\sigma_{JN}^{in} = 25,71 - 13,67 E^{-1/2} - 1,95 \ln E + 0,21 \ln^2 E$$

Эти параметризации в пределах 10% ошибки описывают существующие экспериментальные данные на ускорителях. На основе аппроксимационных формул и согласно теории Глаубера были рассчитаны неупругие сечения взаимодействия пионов и протонов с ядрами железа. На рис. 3 показана зависимость σ_{pp}^{in} и σ_{pFe}^{in} от энергии. Там же приведены наши результаты и данные, полученные на ускорителях. Анализ показывает, что наблюдается хорошее согласие полученных результатов с ускорительными данными. Это указывает на то, что теория многократного рассеяния (ТМР) в этой области энергий может быть использована эффективно. Вместе с тем, полученные нами элементарные сечения позволяют продвинуться по энергии существенно выше имеющихся экспериментальных данных по pp и pA -взаимодействиям вплоть до 5 ТэВ.

В ТМР энергетическая зависимость неупругих сечений адрон-ядерных взаимодействий слабее чем аналогичная величина на нуклонах. Это подтверждается в эксперименте, где наблюдаемый рост

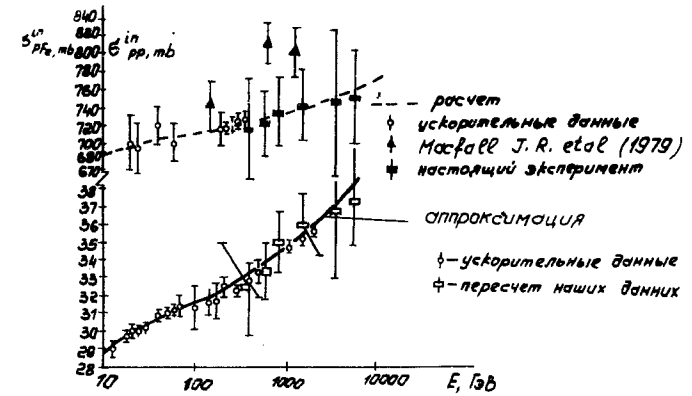


Рис. 3. Зависимость σ_{pp}^{in} и σ_{pFe}^{in} от энергии

сечения взаимодействия на ~ 5% в интервале энергий 500 - 5000 ГэВ приводит к росту сечения σ_{pN}^{in} на ~ 12% в том же диапазоне энергии. Представляет особый интерес сопоставление отношений $f = \sigma_{pA}^{in} / \sigma_{pA}^{in}$, полученных на установке "Пион" и на ускорителях. Расчетные значения f по ТМР для ядер C (Air), Fe и Pb , соответственно, равны 1,34, 1,22, 1,13. Определенные нами величины f для ядер железа при разных интервалах энергии в пределах ошибки измерения не меняются, а средняя величина $\langle f \rangle$ в области энергии 500-5000 ГэВ $\langle f \rangle = 1,19 \pm 0,07$.

В расширенном варианте установки между РПИ-детектором и ИК были установлены графитовая мишень и детекторы. Три ряда МПК предназначены для регистрации акта взаимодействия в графите. Были определены значения σ^{in} заряженных ($J+P$) и нейтральных (n) адронов с ядрами графита и свинца. Сечения заряженных (ch) адронов можно представить посредством сечений пионов и протонов следующим соотношением

$$\sigma_{ch}^{in} = \frac{N_{\pi} \sigma_{\pi} + N_p \sigma_p}{N_p + N_{\pi}}$$

Из расчетной зависимости $f = \sigma_{pA}^{in} / \sigma_{\pi A}^{in}$ определяются величины $\sigma_{pc}^{in} / \sigma_{\pi c}^{in} = 1,32$ и $\sigma_{pp\pi}^{in} / \sigma_{\pi p\pi}^{in} = 1,13$. Известны также экспериментальные значения потоков пионов и протонов N_{π} / N_p для исследуемого интервала энергий. На основании этих данных можно определить сечения взаимодействия пионов и протонов как в свинце, так и для графитовой мишени. Результаты сведены в табл. 2. В экспериментальные данные введены поправки на дифракционную диссоциацию. Однако данные табл. 2 являются предварительными. Ныне завершается анализ экспериментальной информации, которая позволит на основе статистики, увеличенной на порядок, определять сечения в индивидуальном случае.

Сечение неупругого взаимодействия протонов с ядрами атомов воздуха определялось путем сопоставления абсолютных потоков первичных протонов с энергией $\geq E$ и одиночных протонов

Таблица 2

Экспериментальные величины сечения взаимодействия пионов, протонов и нейтронов с ядрами C и Pb

ΔE , ТэВ	0,5 - 1,0	1,0 - 2,0	> 2,0
$\langle E \rangle$, ГэВ	700	1500	3500
σ_{pc} , мб	235 ± 23	243 ± 30	258 ± 35
$\sigma_{\pi c}$, мб	176 ± 20	180 ± 25	193 ± 33
$\sigma_{\pi c}$, мб	240 ± 21	250 ± 25	261 ± 30
$\sigma_{pp\pi}$, мб	1786 ± 96	1863 ± 125	1951 ± 125
$\sigma_{\pi p\pi}$, мб	1582 ± 98	1631 ± 110	1728 ± 120
$\sigma_{pp\pi}$, мб	1869 ± 90	1938 ± 118	2017 ± 125

той же энергии на глубине X г/м² атмосферы.

В табл. 3 сведены результаты измерения σ_{pAiz}^{in} на установке "Пион". Зависимость типа $\sigma_{pAiz}^{in} = (267 \pm 8) +$

Таблица 3

Сводка данных σ_{pAiz}^{in} на установке "Пион"

$\langle E \rangle$, ГэВ	630	840	1260	2340	4000
σ_{pAiz}^{in} , мб	266 ± 3	272 ± 7	275 ± 7	267 ± 14	308 ± 18

+ $(10,1 \pm 2) \ln(\frac{E}{200})$ мб является лучшей аппроксимацией экспериментальных данных в интервале энергии от 100 ГэВ до 100 ТэВ.

Результаты установки "Пион" характерны тем, что нижняя граница σ_{pAiz}^{in} была определена по спектру протонов, непосредственно идентифицированных с помощью РПИ-детектора, а также тем, что в отобранных событиях плотность воздушного сопровождения сильно ограничена ($\rho_{max} \leq 0,1 \text{ м}^{-2}$). На рис. 4 приведены значения полных сечений pp-столкновений, вычисленных из данных σ_{pAiz}^{in} на основе теории Глаубера. Результаты космических лучей сравниваются с данными, полученными на ускорителях.

В пятой главе приведены результаты эксперимента по изучению основных параметров ядерно-электромагнитных каскадов, инициированных адронами высоких энергий в плотном веществе калориметра. Исследованы флуктуации ЯЭК, выявлены корреляции между физическими характеристиками адрон-ядерных столкновений и параметрами каскада. Проведены аналитические исследования зависимости характеристики ЯЭК от флуктуаций нескольких процессов, одновременно происходящих при генерации ливня. Задача решена моделированием ЯЭК методом Монте-Карло.

Проведенный нами анализ экспериментальных данных по имеющимся инклюзивным сечениям, инклюзивным спектрам и структурным функциям сохранившегося протона в pp и pA взаимодействиях, позволил выбрать расчетную модель розыгрыша неупругого акта адрон-ядерного взаимодействия.

Для решения широкого круга вопросов, связанных с развитием каскада, была создана детальная программа, моделирующая методом Монте-Карло ядерно-каскадный процесс, генерированный

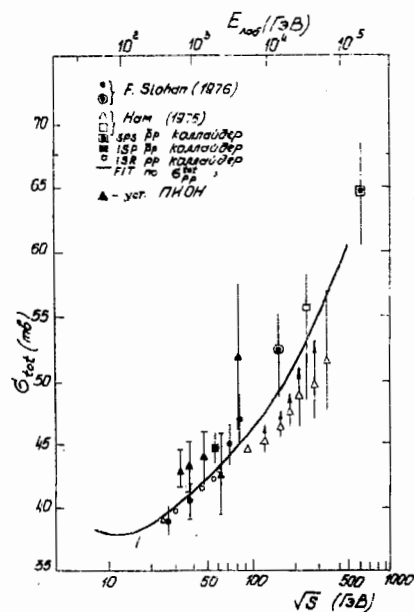


Рис. 4. Зависимость \bar{X}_c^{in} от энергии, вычисленная по данным \bar{X}_c^{in} . Сплошная линия - аппроксимация ускорительных данных.

пионами и протонами в однородном железном поглотителе calorimetра. Сравнение экспериментальных и расчетных усредненных ЯЭК, генерированных пионами и нуклонами, указывает на существенное различие их математических характеристик. Показано, что первый момент \bar{X}_c (центр тяжести) ЯЭК, который определяется в первую очередь величиной парциального коэффициента неупругости K_{π^0} в начале генерации ЯЭК, слабо зависит от флуктуации других характеристик взаимодействия. Определение глубины первого максимума ионизационной кривой, а также ее центра тяжести \bar{X}_c , значительно уточняется при интерполировании исследуемой кривой. Исследование искусственных ЯЭК показало, что

применение параболической интерполяции повышает более чем вдвое точность определения искомым величин. Для определения зависимости средних значений центра тяжести \bar{X}_c от возможных значений K_{π^0} была разыграна серия искусственных ЯЭК при различных фиксированных значениях энергии первичного адрона. Дисперсия распределения \bar{X}_c составляет $\sim 0,3 \langle \bar{X}_c \rangle$. При экспериментальной статистике $n_{\text{эк}} \geq 100$ событий в узком интервале энергий первичного адрона $\Delta E \leq 0,1 \langle E \rangle$ ошибка в определении K_{π^0} оказывается меньше $0,03 \langle K_{\pi^0} \rangle$. Получена расчетная зависимость величины \bar{X}_c от K_{π^0} при различных значениях энергии генерирующего адрона. Парциальный коэффициент моделировался по выражению $K_{\pi^0}^p = 1/3 (K - \eta)$ - для нуклонов и $K_{\pi^0}^p \approx 1/3 (K - \eta) + \alpha_c (1 - K)$ - для пионов, где K - полный коэффициент неупругости, η - доля энергии, переданная адронном в ядерное расщепление, α_c - вероятность неупругой перезарядки.

Для проверки модели было проведено сопоставление расчетов с экспериментальными calorиметрическими данными в интервале первичных энергий 500-5000 ГэВ. Производились сравнения расчетных и экспериментальных характеристик по основным параметрам каскада (усредненные кривые ионизации для пионов, протонов и нейтронов; средние смещения интерполяционных значений ионизации от истинных по глубине развития каскада; число экстремумов усреднения кривых; распределение центров тяжести ЯЭК, генерированных пионами и протонами; средние значения энерговыделения на первом уровне наблюдения; длина каскада в ИК; частота разных амплитуд в конце каскада и т.д.). Получено вполне удовлетворительное согласие эксперимента с расчетом.

Средние величины K_{π^0} определялись сопоставлением средних ядерно-каскадных кривых - экспериментальной и расчетной. Были определены средние значения для распределений центров тяжести экспериментальных ЯЭК в данных интервалах энергий и соответствующие им значения K_{π^0} по расчетной зависимости \bar{X}_c . Экспериментальные ошибки определения K_{π^0} были получены в соответствии с дисперсиями распределений центров тяжести экспериментальных ЯЭК. На рис. 5 показана расчетная зависимость \bar{X}_c от величины K_{π^0} при различных значениях энергии генериру-

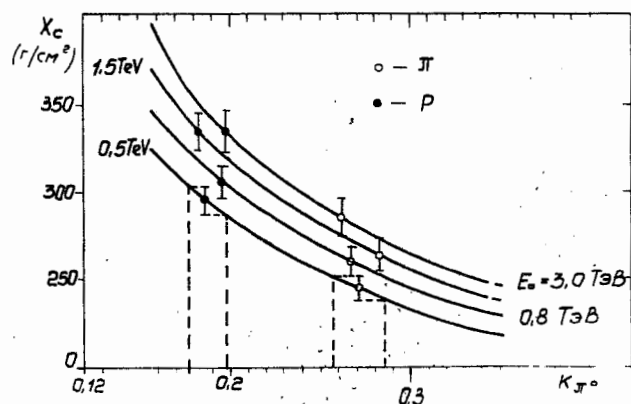


Рис. 5. Зависимость величин центров тяжести ЯЭК от $\langle K_{\pi^0} \rangle$. Сплошные кривые – моделирование Монте-Карло

щего адрона. В табл. 4 приведены полученные значения парциальных коэффициентов неупругости для четырех интервалов энергий. Указанные величины K_{π^0} получены при предположении 100% эффективности регистрации в ИК ядерно-электромагнитных каскадов. Метод определения K_{π^0} практически не зависит от изменения других характеристик неупругого взаимодействия.

На рис. 6 показаны результаты наших измерений в сравнении с имеющимися в литературе экспериментальными данными по K_{π^0} для взаимодействия пионов и протонов с ядрами железа. В конце главы рассматриваются теоретические модели для интерпретации экспериментальных результатов. Проведен расчет величин K_{π^0} для железа в рамках теории многократного рассеяния и показано, что ТМР удовлетворительно описывает данные по парциальному коэффициенту неупругости как при взаимодействии нуклонов, так и для первичных пионов в области энергий ~ 1 ТэВ.

Получены величины K_{π^0} в рамках квазиядерной (аддитив-

Таблица 4.

Парциальные коэффициенты неупругости для взаимодействий пионов и протонов с ядрами железа

ΔE , ТэВ	$K_{\pi^0}(PFe)$	$K_{\pi^0}(LFe)$
400-600	$0,19 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,01$
600-1000	$0,20 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,01$
1000-2000	$0,18 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,01$
> 2000	$0,20 \pm 0,01$	$0,26 \pm 0,01$

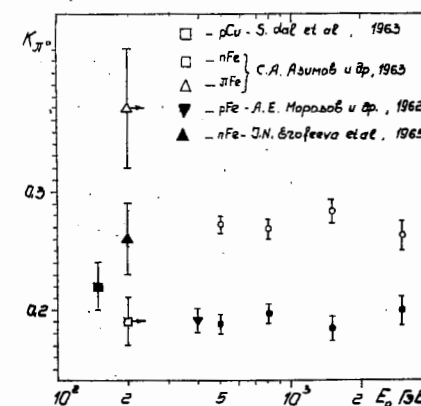


Рис. 6. Сводка данных по парциальным коэффициентам неупругости P , π и L в железе

ной) кварковой модели, основанной на представлении, что мезоны состоят из двух, а барионы – из трех пространственно разделенных объектов – составляющих или одетых кварков (окруженных кварк-антикварковыми парами, или глюонами). При этом вторичные частицы образуются преимущественно за счет энергии одного из

налетающих кварков. Принимается, что в коэффициент неупругости K_{π^0} основной вклад дают χ -кванты от распада Λ^0 - и η -мезонов, которые могут рождаться как в центральной области, так и в области фрагментации налетающей частицы. Расчетные величины K_{π^0} сравнивались с экспериментальными данными "Пион"-а. В интервале энергий 500-3000 ГэВ расчетные средние величины K_{π^0} в реакциях Λp и $p p$ равны, соответственно, 0,31 и 0,21.

Полученные на установке "Пион" значения K_{π^0} сравнивались также с результатами расчетов по модели кварк-глюонных струн (МКГС) для $p p$ и Λp столкновений. Использовался вариант модели с величиной критичности померона $\Delta = 0,14$. Согласие эксперимента с теорией вполне удовлетворительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью настоящей экспериментальной работы было исследование неупругих столкновений протонов и пионов космического излучения в области энергий 500-5000 ГэВ. Для решения этой задачи коллективом сотрудников нескольких лабораторий Ереванского физического института на высокогорной станции Арагац (3250 м над уровнем моря) в 1975-1978 гг. была разработана, создана и эксплуатировалась до настоящего времени установка "Пион", представляющая собой масс-спектрометр на основе ионизационного калориметра и детекторов рентгеновского переходного излучения. Установка позволила впервые в космических лучах в области сверхскоростных энергий идентифицировать протоны и пионы в потоке заряженных частиц и исследовать их взаимодействие с ядрами атомов мишени.

Установка "Пион" работала в линии с ЭВМ, что позволило впервые автоматизировать все этапы сбора, накопления и обработки экспериментальных данных, извлекаемых из эксперимента в космических лучах, общим объемом более ~ 120 000 событий. Ниже приведены основные результаты исследований на установке "Пион", полученные под руководством и при активном участии автора.

Приведем основные результаты исследований на установке "Пион":

I

Разработаны и реализованы:

- Генераторы переходного излучения больших размеров (~ 10 м²).
- Многоклеточные пропорциональные камеры с эффективностью регистрации 95-97%, однородностью $\pm 10\%$, линейным диапазоном до 10 эквивалентных частиц, разрешающей способностью $\sim 10-15\%$.
- Автоматизированная система сбора, накопления и предварительной обработки информации.
- Система калибровки аппаратуры в процессе набора статистического материала.
- Метод усреднения ядерно-электромагнитных каскадов, позволяющей существенно улучшить точность определения энергии каскада.
- Новый метод определения энергии в калориметрических установках.
- Метод более точного определения точки генерации ядерно-электромагнитных каскадов.
- Алгоритм и программа отбора как одиночных, так и групповых прохождений адронов в ионизационном калориметре с оценкой энергии каждого адрона (в пределах пространственного разрешения калориметра).
- Анализ влияния близпороговой области экспериментальных данных на точность оценки показателя спектра. Показано, что при априорном знании функции отклика калориметра, использование близпороговой информации позволяет достичь предельной точности.
- Методика определения парциального коэффициента неупругости на основе измеренного в эксперименте центра тяжести ядерно-каскадной кривой. Предлагаемый способ определения парциальных коэффициентов неупругости обеспечивает точности измерения не хуже ускорительных ($\pm 3\%$).

II

1. Впервые определены величины эффективного сечения для неупругих столкновений пионов и протонов с ядрами атомов железа в области энергий 500-5000 ГэВ.

При энергиях $\langle E \rangle =$ 600 870 1500 3500 ГэВ
 $\sigma_{\pi Fe}^{in} = 636 \pm 37, 650 \pm 39, 687 \pm 45, 665 \pm 86 mb$
 $\sigma_{p Fe}^{in} = 659 \pm 38, 772 \pm 40, 779 \pm 42, 784 \pm 85 mb.$

Наблюден $\sim 5\%$ рост сечения неупругого взаимодействия протонов и пионов в исследуемой области энергий.

Определено сечение неупругого взаимодействия нейтронов с ядрами железа в той же области энергий. При энергиях $\langle E \rangle =$ 400, 600, 870, 1500, 2600 и 4800 ГэВ величины $\sigma_{n Fe}^{in}$ равны, соответственно, $746 \pm 36, 751 \pm 34, 753 \pm 41, 759 \pm 54, 772 \pm 88$ и $790 \pm 133 mb$. Измеренные экспериментальные величины $\sigma_{h Fe}^{in}$ согласуются с имеющимися ускорительными данными об энергетической зависимости σ_{pp}^{in} , пересчитанными к ядру железа по теории Глаубера.

2. На основе теории Глаубера извлеченные из $\sigma_{\pi Fe}^{in}$ и $\sigma_{p Fe}^{in}$ "элементарные" сечения $\sigma_{\pi p}^{in}$ и σ_{pp}^{in} вплоть до энергий 5 ТэВ аппроксимируются следующими зависимостями:

$$\sigma_{\pi p}^{in} = 25,71 - 13,67 E^{-1/2} - 1,95 \ln E + 0,21 \ln^2 E$$

$$\sigma_{pp}^{in} = 41,14 - 21,87 E^{-1/2} - 3,12 \ln E + 0,33 \ln^2 E$$

3. Показано, что отношение $\sigma_{p Fe}^{in} / \sigma_{\pi Fe}^{in}$ слабо зависит от энергии в интервале от $3 \cdot 10^{10}$ эВ до $5 \cdot 10^{12}$ эВ и согласуется с выводами теории многократного рассеяния. Экспериментальное значение отношения $\sigma_{p Fe}^{in} / \sigma_{\pi Fe}^{in}$, усредненное для всего исследуемого интервала энергий, равно

$$\left\langle \frac{\sigma_{p Fe}^{in}}{\sigma_{\pi Fe}^{in}} \right\rangle = 1,19 \pm 0,06.$$

4. Измерена нижняя граница сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами атомов воздуха в интервале энергии 0,5-5,0 ТэВ.

Впервые эта величина определена использованием "чистого" потока протонов, падающего на установку без сопровождения.

Наблюдается $\sim 8\%$ рост сечения $\sigma_{p Ai_z}^{in}$ в указанном интервале энергии.

5. Впервые в космических лучах проведен анализ определяемого в эксперименте сечения неупругого взаимодействия адронов с ядрами железа в зависимости от плотности частиц воздушного ливневого сопровождения. Показано:

- В интервале энергии адронов до 5 ТэВ значения сечения взаимодействия адронов, падающих на установку без сопровождения ($\rho \leq 0,1 m^{-2}$), близки к сечению протонных взаимодействий.

- В области энергии до 3 ТэВ с увеличением плотности сопровождения сечение падает и при плотности $\rho \geq 3 m^{-2}$ совпадает с $\sigma_{\pi Fe}^{in}$.

- В интервале энергии 5-10 ТэВ $\sigma_{h Fe}^{in}$ слабо зависит от плотности сопровождения и мало отличается от протонного сечения.

III

1. Впервые определены величины парциальных коэффициентов неупругости K_{π^0} во взаимодействиях протонов и пионов с ядрами атомов железа в области энергии 0,5-5,0 ТэВ. Средние величины K_{π^0} как для пионов, так и для протонов практически не зависят от энергии и составляют:

$$\langle K_{\pi^0} \rangle = 0,27 \pm 0,01 \text{ для пионов}$$

$$\langle K_{\pi^0} \rangle = 0,19 \pm 0,01 \text{ для протонов.}$$

В этом же интервале энергий измерена величина K_{π^0} для нейтронов $\langle K_{\pi^0} \rangle = 0,20 \pm 0,01$. Эти величины парциальных коэффициентов соответствуют полученным на ускорителях инклюзивным спектрам образования π^0 -мезонов протонами и пионами на ядрах при энергиях ~ 100 ГэВ. Полученные результаты согласуются с выводами теории многократного рассеяния и с расчетами, выполненными на основе КХД.

2. Впервые оценена и приводится величина вероятности неупругой перезарядки пионов во взаимодействиях с ядрами железа при энергиях 500-5000 ГэВ $\alpha_n \geq 0,2$.

3. Измерены основные параметры ядерно-электронных каскадов, инициированных взаимодействиями пионов и протонов в железном поглотителе калориметра. Экспериментальные данные согласуются с ожидаемыми значениями Монте-Карло расчета, выполненным на основе результатов последних лет, полученных на ускорителях.

IV

1. Измерены дифференциальные энергетические спектры адронов, протонов, пионов и нейтронов на высоте гор в зависимости от плотности ливневого сопровождения в области энергии 0,5–5,0 ТэВ. Результаты согласуются с соответствующими значениями потоков, полученных методом Монте-Карло по двухкомпонентной модели и квазисейлинга во фрагментационной области.

2. Измерено отношение потоков пионов и протонов на горах N_{π}/N_p . На основе решения уравнения диффузии с учетом каскадных частиц, генерированных в последнем взаимодействии адрона, проведен аналогичный расчет. Согласие расчетных и экспериментальных результатов указывает на то, что инклюзивные спектры адронов в адрон-ядерных взаимодействиях при энергиях $E > 500$ ТэВ не отличаются заметно от спектров в адрон-адронных столкновениях в области фрагментации. Наилучшее согласие получается при значении коэффициента неупругой перезарядки $\eta \approx 0,40$.

3. Определена зависимость наблюдаемого состава адронного компонента космических лучей от энергии адронов и плотности потока ливневого сопровождения. Доля протонов в событиях с малоплотным сопровождением растет при увеличении энергии.

У

Измерен обратный поток частиц (альbedo) при образовании ядерно-электромагнитных каскадов в толще поглотителя. Получены количественные характеристики альbedo во взаимодействиях адронов с ядрами атомов свинца и железа при энергиях выше 500 ТэВ (угловые распределения частиц альbedo при различных глубинах образования каскада). Наличие в альbedo частиц с

высокими энергиями указывает на заметную роль кумулятивных эффектов в процессах их генерации.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Avakian V.V., Pleshko M.P. Pions in the cosmic ray nuclear-active flux at an altitude of 3250 m above sea level. - Canadian Journal of Physics, 1968, v. 46, p. 709-714.
2. Авакян В.В., Алиханян А.И., Гавукчян С.М. и др. Идентификация адронов с энергией 100–2000 ТэВ методом измерения переходного излучения в сочетании с калориметром. - Препринт ЕФИ-4(72), Ереван, 1972. - 19 с.
3. Avakian V.V., Avakian K.M., Alkhanian A.I. et al. Preliminary results of the experiment on the identification of cosmic hadrons using the XTR detectors. - Preprint EPI-100(74), Yerevan, 1974, - 9 p.
4. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г. и др. Экспериментальная установка для исследования взаимодействий космических адронов высоких энергий с использованием РПИ-детекторов. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1976, т. 40, № 5, с. 1058–1060.
5. Авакян В.В., Арзуманян С.А., Авунджян А.Т. и др. Пропорциональные камеры для РПИ-детектора. - Препринт ЕФИ-232 (25), Ереван, 1977. - 17 с.
6. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г. и др. Использование ЭВМ "Наири-2" в эксперименте с космическими лучами. - Препринт ЕФИ-219(II), Ереван, 1977. - 26 с.
7. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Багдасарян Л.С. и др. Система электроники экспериментальной установки по разделению поперечной компонент и исследование ядерных взаимодействий космических лучей с помощью РПИ-детектора и ионизационного калориметра. - Препринт ЕФИ-251(44), Ереван, 1977. - 53 с.
8. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г. и др. Расчет методом Монте-Карло РПИ-детектора установки для исследования характеристик взаимодействия адронов космических лучей с энергией 500–5000 ТэВ. - Изв. АН Арм.ССР, сер. физ., 1978, т. XIII, вып. 3, с. 172–178.
9. Авакян В.В., Багдасарян Л.С., Васинюк И.Е. и др. Автомати-

ческий прием и накопление информации от экспериментальной установки по изучению космических лучей с одновременной обработкой на ЭВМ "Наири-2". - Приборы и Техника эксперимента (ПТЭ), 1979, № 6, с. 58-63.

10. Avakyan V.V., Avundzhyan A.T., Bagdasaryan L.S. Measurements of pion, proton, neutron fluxes at mountain altitudes and determination of inelastic cross sections of π , p and n interactions with iron nuclei for energies $E > 0.5$ TeV. - Proc. of XVIth ICRC, Kyoto, Japan, 1979, v. 13, p. 66-69.
11. Авакян В.В., Оганезова Д.С. Комплексная система приема и обработки информации от экспериментальной установки "Пион" на базе двух "Наири". - Препринт БИИ-405(12), Ереван, 1980. - 35 с.
12. Авакян В.В., Оганезова Д.С. Вывод информации с экспериментальной установки "Пион", содержащей ЭВМ "Наири-2" на АЦПУ-128. - ПТЭ, 1981, № 6, с. 58-59.
13. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Азарян М.О. и др. Поток части альбедо в калориметрических установках. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1981, т. 45, № 7, с. 1249-1254.
14. Avakian V.V., Boyadjian N.G., Kazarian S.S. et al. Investigation of correlations between registration threshold and measured characteristics of hadron interactions in ionization calorimeter. - Proc. of XVIIth ICRC, Paris, 1981, v. 11, p. 34-37.
15. Avakian V.V., Avundjian A.T., Bagdasarian L.S. et al. Determination of ratios of pion, proton and neutron fluxes at mountain altitude at $E \sim 1$ TeV. - Proc. of XVIIth ICRC, Paris, 1981, v. 11, p. 38-41.
16. Avakian V.V., Avundjian A.T., Bagdasarian L.S. et al. On the cross-section behaviour of pion and nucleon inelastic interaction in iron for the energy region 0.5 - 2.0 TeV. - Proc. of XVIIth ICRC, Paris, 1981, v. 5, p. 90-98.
17. Авакян В.В., Гаряка А.П., Мамиджян Э.А. К описанию спектров адронов космического излучения в глубине атмосферы при ограниченном ливневом сопровождении. - Препринт БИИ-590(77), Ереван, 1982. - 8 с.
18. Авакян В.В., Бадалян А.Р., Мамиджян Э.А., Мурадян М.М. Об одном методе определения парциального коэффициента

неупругости в адрон-ядерных взаимодействиях. - Ядерная физика, 1982, т. 36, вып. 2(8), с. 441-446.

19. Авакян В.В., Мамиджян Э.А., Мурадян М.М. и др. Определение парциальных коэффициентов неупругости пионов и протонов в железе при энергиях 0,5-5,0 ТэВ. - Ядерная физика, 1982, т. 36, вып. 4(10), с. 899-905.
20. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Казарян С.С. и др. Различие в парциальных коэффициентах неупругости K_{π^0} для взаимодействий π_{Fe}^+ , p_{Fe}^+ при энергиях 0,5-5,0 ТэВ. - Изв. АН СССР, сер. физ., 1982, т. 46, № 9, с. 1762-1764.
21. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г. и др. Установка "Пион". - Вопросы атомной науки и техники, серия: Техника физического эксперимента (ВАНТ), Ереван, 1983, вып. 4(16), с. 3-24.
22. Avakian V.V., Avundjian A.T., Bagdasarian L.S. et al. Hadron component composition at mountain altitudes and determination of characteristics of pion and proton interactions with iron nuclei in the energy range 0.5 - 5.0 TeV ("Pion" experiment). - Proc. of XVIIIth ICRC, Bangalore, India, 1983, v. 5, p. 263-266.
23. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Багдасарян Л.С. и др. Исследование состава и спектров адронов космического излучения на высотах гор. - ВАНТ, серия: Техника физического эксперимента, Ереван, 1983, вып. 4(16), с. 25-45.
24. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Гаряка А.П. и др. Определение сечения неупругого взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами железа в интервале энергий 0,5-5,0 ТэВ. - ВАНТ, серия: Техника физического эксперимента, Ереван, 1983, вып. 4(16), с. 45-56.
25. Авакян В.В., Геворкян С.Р., Жамкочян В.М. и др. Определение парциальных коэффициентов неупругости пионов и протонов в железе при энергиях 0,5-5,0 ТэВ. - ВАНТ, серия: Техника физического эксперимента, Ереван, 1983, вып. 4(16), с. 56-69.
26. Авакян В.В., Арзуманян С.А., Багдасарян Г.А. и др. Установка для исследования адронной компоненты ШАЛ при энергиях $> 10^{14}$ эВ на средних расстояниях от оси ливня. - ВАНТ, серия: Техника физического эксперимента, Ереван, 1984, вып. 3(20), с. 69-76.

27. Авакян В.В., Гаряка А.П., Геворкян С.Р. и др. Определение сечения неупругого взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами железа в интервале энергий 0,5–5,0 ТэВ. – Ядерная физика, 1984, т. 40, вып. 4(10), с. 949–959.
28. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Багдасарян Л.С. и др. Определение состава потока адронов на высоте гор и исследования характеристик взаимодействия пионов, протонов и нейтронов с ядрами железа на установке "Пион". – Материалы II симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий. – Ереван, 1984, с. 512–531.
29. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Мамиджян Э.А., Оганесян А.Г. Интенсивность потока одиночных протонов на высотах гор и сечение неупругого взаимодействия протонов с ядрами атома воздуха. – Изв. АН СССР, сер. физ., 1985, т. 49, № 7, с. 1254–1255.
30. Avakian V.V., Karagjozian G.V., Mamidjanian E.A. et al. Determination of the cross section of the proton, pion and neutron inelastic interaction with lead and carbon nuclei at 0.5 - 5.0 TeV energies ("Pion" experiment). – Proc. of 19th ICRC, La Jolla, USA, 1985, v. 6, p. 17-20.
31. Avakian V.V., Avundjian A.T., Bagdasarian L.S. et al. Determination of the cross section of the pion and nucleon interaction with iron nuclei in the energy range 0.5 - 5.0 TeV. – Nuclear Physics, 1985, v. B259, p. 163-169.
32. Avakian V.V., Gevorkian S.R., Mamidjanian E.A. et al. Determination of the inelasticity partial coefficients of pions and protons in iron in the energy range 0.5 - 5.0 TeV. – Nuclear Physics, 1985, v. B259, p. 156-162.
33. Авакян В.В., Акопов Н.В., Арутюнян С.Х. и др. Организация проблемно-ориентировочного банка данных с развитыми средствами прямого доступа на ЭВМ ЕЭСМ-6. – ВАНТ, серия: Техника физического эксперимента, Ереван, 1986, вып. 5(31), с. 88–93.
34. Авакян В.В., Азарян М.О., Григорян С.А. и др. Исследование характеристик частиц альbedo, генерированных во взаимодействиях адронов космического излучения. – Ядерная физика, 1986, т. 44, вып. 5(11), с. 1224–1231.

35. Avakian V.V., Mamjanian E.A., Ovsopian G.G. et al. The absolute spectrum of 1 TeV hadrons 700 g/cm² deep in the atmosphere. – Preprint EPI-952(2), Yerevan, 1987. – 8 p.

Технический редактор А.С.Абрамян

Подписано в печать 03.06.87 ВФ-02868 Формат 60x84

Офсетная печать. Уч. изд. л. 1,0 Тираж 170 экз.

Зак. тип. № 342 Индекс 3624

Отпечатано в Ереванском физическом институте
Ереван 36, Маркаряна 2.