

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

КАЗАРЯН СЕРГЕЙ СУРЕНОВИЧ

УДК 537.591:539.1.074

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЯ НЕУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПИОНОВ И НУКЛЕОНОВ С ЯДРАМИ ЖЕЛЕЗА  
В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 0,5-5,0 ТэВ

Специальность 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  
кандидата физико-математических наук

1986

Работа выполнена в Ереванском физическом институте.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
В.В.АВАКЯН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Т.Л.АСАТИАНИ (ЕрФИ)  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
В.Я.ШЕСТОПЕРОВ (НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация: ИФ АН ГССР

Защита состоится " 11 " 03 1986 г. в 14.00 час  
на заседании специализированного совета Д 034.03.01 Ереван-  
ского физического института (375036, г.Ереван, ул. Маркья-  
на, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ.

Автореферат разослан " 23 " января 1986 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета ЕрФИ *Шахбазян* В.А.ШАХБАЗЯН

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование взаимодействий адронов высоких энергий с ядрами различных веществ становится все более важной областью физики элементарных частиц. Новые экспериментальные данные по измерению характеристик взаимодействий адронов с ядрами в области энергий, намного превышающих достигнутые на современных ускорителях, важны для проверки различных теоретических моделей, расчетов и гипотез. В отличие от традиционных ускорительных исследований характеристик взаимодействий элементарных процессов типа  $PP$ ,  $P\bar{P}$ , измерения на ядрах позволяют получить уникальную информацию о сложной структуре ядра, как многонуклонной системы, пространственно-временном развитии процессов множественного рождения частиц, мультипериферическом характере неупругого взаимодействия и других свойствах ядерной материи. В связи с этим важное значение приобретает измерение и сравнение динамических характеристик во взаимодействиях пионов, протонов и нейтронов с ядрами. Здесь можно судить о кварк-глюонной структуре адронов и о внутриядерных перераспределениях при высоких энергиях.

Измерение сечения взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами железа в настоящем эксперименте практически доказывает, что в области энергий до 10 ТэВ проявляется различие в характеристиках взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами и имеется указание на продолжающийся рост сечения неупругого взаимодействия адронов с ядром железа. Необходимо продолжить исследования

адрон-ядерных взаимодействий на разных ядрах-мишенях при более высоких энергиях.

Цель работы.

1. Создание экспериментальной установки, предназначенной для идентификации адронов в области энергий 300-5000 ГэВ и измерения характеристик взаимодействия пионов, протонов и нейтронов с ядрами атомов различных веществ.
2. Измерение сечения неупругого взаимодействия пионов, протонов (нейтронов) с ядрами железа в области энергии 300-5000 ГэВ и сечения неупругого взаимодействия адронов с ядрами железа вплоть до энергии 20 ТэВ. Исследование зависимости сечения от энергии и от плотности воздушного ливневого сопровождения. Теоретическое и расчетное обоснования полученных результатов.

Новизна работы. Впервые в экспериментах с частицами космического излучения создана светосильная и полностью автоматизированная установка, позволяющая разделить потоки пионов и протонов в области энергии до 5 ТэВ.

Впервые в мировой практике на одной и той же установке с одинаковыми методическими и статистическими ошибками одновременно измерялись сечения неупругого взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами железа в зависимости от энергии.

Научная и практическая ценность работы. Установка "Пион", созданная на основе двух узлов - РИИ-детектора и ионизационного калориметра - фактически является новым типом масспектрометра адронов высокой энергии. Такой прибор позволяет произвести комплексные исследования космических лучей, в том числе: измерения энергетических спектров различных адронов на высоте гор, определение абсолютных потоков пионов, протонов и нейтронов в интервале энергии от 300 ГэВ до 5 ТэВ, исследование потоков адронов в зависимости от воздушного ливневого сопровождения,

получение "чистых" пучков пионов и нуклонов и измерение характеристик взаимодействия с ядрами железа, графита и свинца, определение нижнего предела значения сечения неупругого взаимодействия протонов с ядрами атома воздуха и т.д.

На установке "Пион" осуществлены методические исследования, которые позволяют более точно сравнить результаты, полученные на разных установках в космических лучах. Результаты по определению потоков и спектров адронов позволят значительно улучшить выбор основных параметров Монте-Карло расчетов прохождения протонов через атмосферу. Представляет самостоятельный интерес выработка методов оценки потоков мюонов и электронно-фотонной компоненты высокой энергии на уровне гор. На этой установке впервые в космических лучах применена комплексная система автоматизации съема, записи, калибровки и предварительной обработки информации на базе двух ЭВМ, работающих в линию с установкой.

Исследование сечения неупругого взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами железа, возможность сравнения сечений при разных энергиях, а также теоретико-расчетный анализ полученных результатов фактически являются достаточно завершенными и могут быть использованы в экспериментах на будущих ускорителях высокой энергии. Впервые получены значения сечения  $\sigma_{(pFe)}^{in}$  при энергиях, на порядок превышающих энергии, достигнутые на ускорителях. Эти результаты важны для понимания механизма взаимодействия и для выбора оптимального варианта моделей.

Результаты диссертации в дальнейшем могут быть использованы:

- а) при создании экспериментальных установок как на ускорителях, так и в космических лучах;

- б) при экспериментальных измерениях сечения неупругого взаимодействия с учетом всевозможных методических и физических фоновых процессов (электронные и мюонные толчки, критерии отбора акта взаимодействия, учет пороговых эффектов, учет альbedo частиц и т.д.);
- в) при расчетах прохождения космических частиц в атмосфере, а также при сравнении и выборе теоретических моделей, объясняющих процессы взаимодействия частиц с ядрами различных атомов;
- г) для практического использования результатов по измерению спектров и характеристик взаимодействия адронов с веществом, полученных при разных энергиях и на различных экспериментальных установках.

Апробация работ. Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в советских и зарубежных научных журналах, докладывались на Всесоюзных (Якутск, 1977; Ереван, 1979; Самарканд, 1975; 1981) и Международных (Киото, 1979; Париж, 1981; Бангалор, 1983; Сан-Диего, 1985) конференциях по космическим лучам, УП и УН Европейских симпозиумах по космическим лучам (Ленинград, 1980; Рим, 1982), Рабочих Сессиях ОЯФ АН СССР (Москва, 1982), Всесоюзных совещаниях АНИ, а также на семинарах ЕФИ, ИФ АН СССР.

По теме диссертации опубликовано 11 работ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 129 страниц, включает 33 рисунка, 23 таблицы и 91 наименование в списке литературы.

На защиту выносятся следующие результаты работы:

- I. Экспериментальная установка, сочетающая РШИ-детектор с ионизационным калориметром для исследования потоков и спектров пионов, протонов и нейтронов при энергиях 0,3-5,0 ТэВ

и их характеристиками взаимодействия с ядрами разных атомов.

2. Анализ известных методов измерения сечения неупругого взаимодействия адронов в калориметре. Расчетное обоснование выбора оптимального способа измерения.
3. Результаты исследования влияния разных фоновых, методических и физических эффектов на экспериментально измеренную величину  $\sigma^{in}$  (порог по калориметру, порог детекторов, мюонные толчки, дискретный характер съема информации, обратный ток, коэффициенты режески пионов и протонов, сопровождение, эффективность регистрации адронов и т.д.).
4. Результаты исследования сечения неупругого взаимодействия пионов, протонов и нейтронов с ядрами атомов железа. Анализ экспериментальных результатов и сравнение с теорией. Аппроксимация мировых данных по сечениям пионов и протонов, вывод эмпирической зависимости типа  $\sigma^{in} = f(E)$  (где  $E$  - энергия адронов в области от 100 ГэВ до 5,0 ТэВ).
5. Результаты анализа зависимости сечения заряженных адронов от плотности воздушного ливневого сопровождения. Метод определения сечения взаимодействия протонов с ядрами атомов поглотителя калориметра в интервале энергии  $> 5$  ТэВ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится краткая характеристика современного состояния исследований сечений неупругого взаимодействия пионов, протонов и нейтронов с ядрами различных веществ, проводимых как в экспериментах на ускорителях, так и в космических лучах. Дана постановка задач, решаемых в диссертации, и определено ее место в общей картине исследований. Приводится структура диссертации.

В первой главе дается описание установки "Пион" (рис. I).

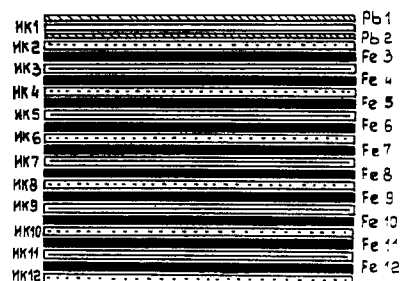
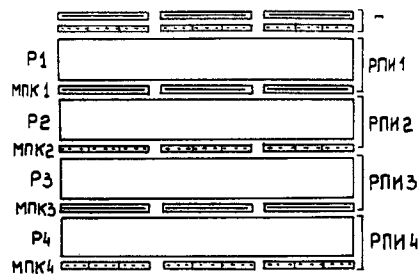


Рис. 1. Схема установки "Пион".

$P_1 - P_4$  и МПК1 - МПК4 - соответственно, радиаторы и пропорциональные камеры модулей РПИ-детектора;

$Pb_1$  и  $Pb_2$  - слои свинца;

$Fe_3 - Fe_{12}$  - слои железа ионизационного калориметра;

ИК1 - ИК12 - ряды ионизационных камер.

В диссертацию вошел экспериментальный материал, полученный на установке за период 1978-1984 г.г.

С точки зрения решения физических проблем установка "Пион" - многоцелевая. Она позволяет исследовать состав и по-

ток адронной компоненты космического излучения на высоте гор, а также определять некоторые из основных характеристик взаимодействия пионов, протонов и нейтронов с различными ядрами при энергиях 500-5000 ГэВ.

Основными узлами установки являются координатная геодезическая система, детектор рентгеновского переходного излучения (РПИ-детектор), ионизационный калориметр (ИК), электронная аппаратура и комплексная система автоматизации приема и обработки информации.

Калориметр состоит из 10 рядов железного поглотителя общей толщиной  $780 \text{ г/см}^2$ , что соответствует  $\sim 6 \Lambda_{Fe}$ . Над калориметром расположено два слоя свинца толщиной 3 и 2 см, соответственно, для регистрации электронно-фотонных ливней. Детекторами ионизации служат цилиндрические ионизационные камеры диаметром 10 см и длиной 330 см, заполненные чистым аргоном до давления 5 атм. Суммарное количество вещества в калориметре составляет  $900 \text{ г/см}^2$  или 7,5 ядерных пробегов. Рабочая площадь ИК -  $10 \text{ м}^2$ .

С учетом статистического характера развития ядерно-электронного каскада (ЯЭК) и методических погрешностей суммарная ошибка в определении энергии адрона в ИК не превышает 15%. В указанном диапазоне энергии с ростом энергии ошибки уменьшаются.

Регистрация событий на установке осуществлялась при выполнении следующих условий:

- энерговыделение в ИК больше или равно  $E_{\text{пор}}$  (в основной серии измерений был установлен порог  $E_{\text{пор}} \geq 450 \text{ ГэВ}$ );
- ЯЭК охватывает по крайней мере 2 ряда ионизационных камер в каждой проекции;
- энерговыделение в каждом из 4-х рядов должно соответствовать прохождению  $\geq 250 \pm 30$  каскадных частиц (порог по ряду).

РПИ-детектор установки "Пион" основан на методе энергоседеления и предназначен для разделения пионов от протонов в потоке одиночных заряженных частиц космического излучения в интервале энергии до 10 ТэВ. Детекторами излучения служат многопроволочные пропорциональные камеры (МПК) толщиной 4 см с полезной площадью  $90 \times 90 \text{ см}^2$ , наполненные смесью 90% Ar + 10% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Каждый модуль состоит из 120 слоев лавсана C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub> толщиной 22 мкм, расположенных в воздухе на расстоянии 0,3 см друг от друга.

В установке использовались 56 МПК (36 в РПИ-детекторе и 10 в годоскопической системе). Все МПК идентичны. Выходной импульс МПК имеет следующие параметры:

$$\begin{aligned} \tau_{\phi} &= 250-300 \text{ нс}; & V &= 0,5-4,0 \text{ мВ}; \\ \text{длительность импульса} & & & 500-700 \text{ нс}. \end{aligned}$$

Были проведены расчет и моделирование РПИ-детектора. В установке "Пион" в первой серии измерений был установлен 4-модульный РПИ-детектор, в дальнейшем - 5-ти модульный.

На установке действовала комплексная система съема, накопления, визуализации и предварительной обработки информации, осуществленная на базе двух ЭВМ "Наири" в линии с экспериментом, накопитель на магнитной ленте (НМЛ) типа "Изот" и алфавитно-цифровое печатающее устройство АЦПУ-128. С помощью системы производилась регистрация и предварительная обработка событий, а также выполнение статистических обработок и калибровочных расчетов по специальным программам.

Вторая глава посвящена критериям отбора событий и статистической обработке экспериментальных данных. Количественные характеристики критериев отбора необходимы прежде всего для сравнения данных, полученных на разных установках.

В главе описывается принцип анализа первичного материала.

полученного в течение эксплуатации установки "Пион".

Информация уже от двух рядов МПК обеспечивает определение заряда с достоверностью 98-99%. Однако частицы сопровождения, случайные срабатывания или те обратные частицы могут имитировать прохождение заряженного адрона. Поэтому разделение потока адронов на заряженную и нейтральную компоненты нами проводилось только в тех случаях, когда траектория адрона проходила по крайней мере через три ряда МПК в РПИ-детекторе.

В главе рассматривается метод идентификации пионов и протонов. Расчет и моделирование РПИ-детектора показали, что для 4-х модульного РПИ-детектора погрешность восстановления значений числа пионов  $N_{\pi}$  и числа протонов  $N_p$  составляет  $< 1\%$ .

При определении состава и спектров адронов важную роль играет корректная оценка фоновых эффектов, влияющих на точность идентификации пионов и нуклонов, а также факторов, определяющих интенсивность потоков адронов на установке "Пион". К таким эффектам следует отнести:

- а) плотность сопровождения адронов;
- б) фон от  $\delta$ -электронов, образуемых частицей непосредственно над установкой и внутри объема РПИ-детектора;
- в) обратный ток частиц, генерированных во взаимодействиях заряженных и нейтральных адронов с ядрами вещества МК;
- г) вклад мюонов и электромагнитной компоненты, которые могут имитировать МК от одиночного заряженного адрона;
- д) случайные срабатывания МПК от частиц, генетически не связанных с регистрируемым адроном;
- е) светосила установки.

С учетом всех перечисленных факторов получены экспериментальные значения  $J/\rho$  для потоков адронов с разными плотностями сопровождения.

В третьей главе обсуждаются экспериментальные методы определения пробега неупругого взаимодействия адронов с ядрами вещества калориметра. Наиболее широкое распространение для определения  $\lambda_{hA}^{in}$  в установках калориметрического типа получили следующие три метода:

Метод 1. Определение  $\lambda^{in}$  по распределению чисел взаимодействий в слоях поглотителя калориметра методом максимального правдоподобия.

Метод 2. Метод выбывания из пучка.

Метод 3. Определение  $\lambda^{in}$  по отношению чисел взаимодействий в слоях вещества одинаковой толщины, расположенных один над другим.

Анализ этих методов показал, что в применении к ИК установки "Пион" наиболее оптимальным методом для определения  $\lambda_{hFe}^{in}$  является метод 1.

В главе рассмотрены также методические и физические эффекты, искажающие истинную величину  $\lambda_{hFe}^{in}$ , а следовательно, и величину  $\sigma_{hFe}^{in}$ .

В четвертой главе приводятся результаты измерений  $\sigma^{in}$  на установке "Пион" и проводится их анализ.

Весь статистический материал, отобранный для определения  $\sigma^{in}$ , был разбит на 5 групп в зависимости от наличия или отсутствия заряда у провзаимодействовавшего в железе ИК адрона и величины плотности воздушного сопровождения, а именно:

- 1 группа - идентифицированные пионы и протоны (пионы - 1219 событий, протоны - 1779 событий);
- 2 группа - заряженные адроны (3831 событие);
- 3 группа - нейтральные адроны (1818 событий);
- 4 группа - ливневые события (1741 событие);
- 5 группа - все отобранные адроны (14242 события).

Этот материал был разбит также на шесть энергетических интервалов. На основании этого статистического материала с учетом поправок на методические и физические эффекты по распределению чисел взаимодействий в ИК смли определены пробеги неупругого взаимодействия с ядрами железа. Результаты измерений сведены в табл. I-3.

Таблица I

$\langle E \rangle$ ГэВ	400	600	870	1500	3500
$\sigma_{pFe}^{in}$ мб	754 $\pm$ 58	759 $\pm$ 39	772 $\pm$ 40	779 $\pm$ 42	784 $\pm$ 60
$\sigma_{nFe}^{in}$ мб	625 $\pm$ 43	635 $\pm$ 37	650 $\pm$ 39	657 $\pm$ 45	665 $\pm$ 36
$\sigma_{pFe}^{in} / \sigma_{nFe}^{in}$	1,20 $\pm$ 0,08	1,19 $\pm$ 0,06	1,19 $\pm$ 0,05	1,18 $\pm$ 0,05	1,18 $\pm$ 0,14

Таблица 2

$\langle E \rangle$ , ГэВ	400	600	870	1500	2600	4800
$\sigma_{3Fe}^{in}$ мб	693 $\pm$ 26	723 $\pm$ 23	736 $\pm$ 28	749 $\pm$ 31	759 $\pm$ 54	791 $\pm$ 34
$\sigma_{nFe}^{in}$ мб	746 $\pm$ 39	751 $\pm$ 34	755 $\pm$ 41	759 $\pm$ 54	772 $\pm$ 58	790 $\pm$ 74

Таблица 3

$\langle E \rangle$ , ГэВ	400	600	870	1500	2600	4800
$\sigma_{hFe}^{in} \bar{\nu}$ мб	657 $\pm$ 34	666 $\pm$ 35	668 $\pm$ 36	670 $\pm$ 42	696 $\pm$ 56	744 $\pm$ 35
$\sigma_{hFe}^{in} \bar{\nu}$ мб	695 $\pm$ 14	717 $\pm$ 11	728 $\pm$ 17	737 $\pm$ 20	763 $\pm$ 25	780 $\pm$ 36

Проведено сопоставление ускорительных данных с экспериментами по адрон-ядерным взаимодействиям в космических лучах при более высоких энергиях. Для этого необходимо:

а) перейти от сечений адрон-ядерных взаимодействий к элементарным адрон-нуклонным взаимодействиям во всем исследуемом диапазоне энергий;

б) количественно учесть все измеряемые в космических лучах процессы без рождения вторичных частиц.

При переходе от адрон-ядерных к адрон-нуклонным сечениям применялась теория многократного рассеяния. Сечение неупругого нуклон-нуклонного взаимодействия параметризовалось в виде

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

а пион-нуклонного взаимодействия -

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

Эти аппроксимации достаточно хорошо описывают существующие ускорительные данные.

Величины  $\sigma_{hA}^{in}$  рассчитывались по формуле

$$\sigma_{in}(hA) = \int d^2b (1 - e^{-\sigma_{in} \tau(\vec{b})}) \quad (3)$$

где  $\tau(\vec{b}) = \int \rho(b, z) dz$  - проекция одночастичной ядерной плотности  $\rho(\vec{x})$  на плоскость прицельного параметра.

По формулам (1), (2) и (3) были рассчитаны неупругие сечения взаимодействия пионов и протонов с ядрами железа, которые приведены на рис. 2 и 3, соответственно. Там же нанесены данные по  $\sigma_{PFe}^{in}$  и  $\sigma_{\pi Fe}^{in}$ , полученные в космических лучах в экспериментах Мэрилендского университета, и результаты настоящей работы. Анализ рисунков показывает, что наблюдается хорошее согласие полученных результатов с ускорительными данными. Вместе

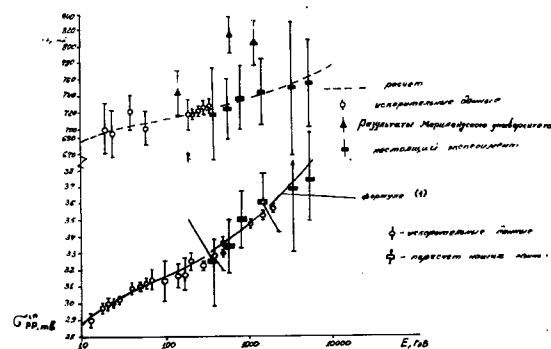


Рис. 2. Зависимость  $\sigma_{PP}^{in}$  и  $\sigma_{PFe}^{in}$  от энергии.

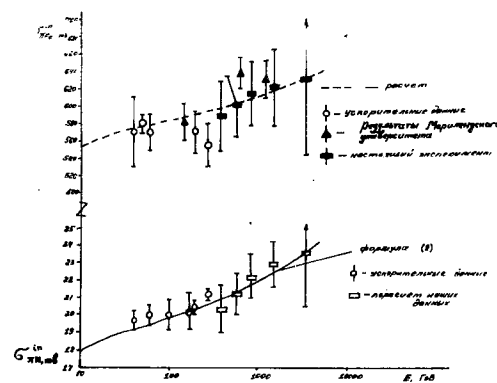


Рис. 3. Зависимость  $\sigma_{\pi P}^{in}$  и  $\sigma_{\pi Fe}^{in}$  от энергии.

с тем, полученные нами элементарные сечения позволяют продвигаться по энергии существенно выше имеющихся экспериментальных данных по  $pp$  - и  $p\bar{p}$  взаимодействиям вплоть до 5 ГэВ.

В главе проведен также анализ величин  $\sigma_{hFe}^{in}$  для адронов с различным ливновым сопровождением (рис. 4). Анализ показал, что адроны с малым сопровождением ( $\rho_{max} \leq 1 \text{ м}^{-2}$ ) при

$E > 2000$  ГэВ являются, в основном, протонами. С другой стороны, при достаточно большом сопровождении ( $\rho_{max} \gg 2 \text{ м}^{-2}$ ) в исследуемой области энергии поток адронов в основном состоит из пионов.

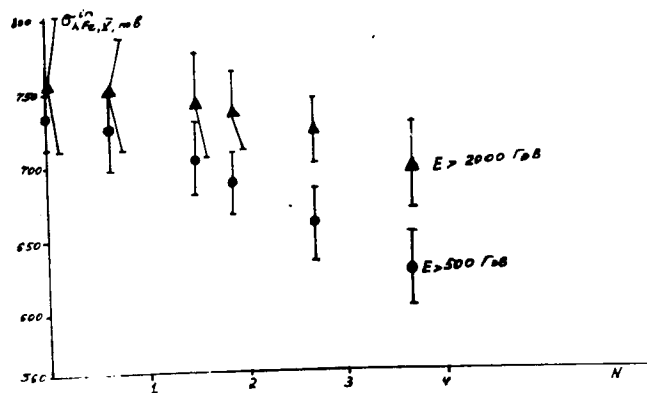


Рис. 4. Зависимость  $\sigma_{hFe}^{in}$  (группа 5) от плотности ливнового сопровождения.

### Основные результаты работы.

Основные результаты работ, выполненных при непосредственном участии автора на всех этапах создания и эксплуатации установки и вошедших в диссертацию, состоят в следующем:

I. Создана установка, сочетающая ионизационный калориметр и многомодульный детектор рентгеновского переходного излучения. Впервые в эксперименте в каждом индивидуальном событии осуществлена идентификация пионов и протонов в потоке космических адронов с энергией больше 300 ГэВ.

Одной из технических задач, решенных при создании установки, является разработка конструкции и выработка технологии изготовления многопроволочных пропорциональных камер больших площадей на деревянной основе. Решена также задача конструирования и изготовления генератора переходного излучения размерами  $310 \times 100 \text{ см}^2$ , состоящего из 120 слоев лавсановой пленки толщиной каждый 20 мкм, расположенных строго параллельно друг относительно друга на расстоянии 3 мм.

Впервые установка, эксплуатируемая в горных экспедиционных условиях, снабжена ЭВМ, работающей в линии с экспериментом. Полностью автоматизированы съем информации, калибровка всех узлов и предварительная статистическая обработка накопленных данных. Электронная аппаратура, комплексная система автоматизации на основе двух микро-ЭВМ, ионизационные и пропорциональные камеры обеспечили более чем пятилетнюю стабильную непрерывную работу установки.

Моделированием процессов прохождения частиц через калориметр было показано, что для измерения величины  $\sigma^{in}$  на установке "Пион" самым оптимальным способом является метод максимального правдоподобия. Для корректного определения сечения неупругого взаимодействия проведен анализ процессов

методического и физического характера, влияющих на истинное распределение чисел взаимодействий в рядах калориметра ("чистота" пучков пионов и протонов; ненулевой порог ионизационных камер, регистрирующих начало каскада в калориметре, вклад  $\mu$  толчков, эффект альbedo, вклад электронно-фотонных ливней, неодинаковая эффективность регистрации каскадов на разных глубинах калориметра) и определены количественные характеристики этих эффектов.

Впервые в космических лучах измерены сечения неупругого взаимодействия пионов, протонов (а также нейтронов) с ядрами железа в интервале энергии 500–5000 ГэВ.

При  $\langle E \rangle = 1,4$  ТэВ

$$\sigma_{\text{PFe}}^{\text{in}} = 737 \pm 41;$$

$$\sigma_{\text{JFe}}^{\text{in}} = 657 \pm 49;$$

$$\sigma_{\text{nFe}}^{\text{in}} = 769 \pm 50.$$

На основе теории многократного рассеяния из сечений  $\sigma_{\text{PFe}}^{\text{in}}$  и  $\sigma_{\text{JFe}}^{\text{in}}$  извлечены "элементарные" сечения неупругого взаимодействия, согласующиеся с имеющимися ускорительными данными. Рассчитаны зависимости  $\sigma_{\text{PP}}^{\text{in}}$  и  $\sigma_{\text{JFe}}^{\text{in}}$  от энергии:

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

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

Полученные экспериментальные значения  $\sigma_{\text{PFe}}^{\text{in}}$  и  $\sigma_{\text{nFe}}^{\text{in}}$  совпали в пределах ошибок во всем исследуемом интервале энергий.

3. Показано, что отношение  $\sigma_{\text{PFe}}^{\text{in}} / \sigma_{\text{JFe}}^{\text{in}}$  не зависит от энергии в интервале от 500 ГэВ до 5000 ГэВ и совпадает с выводами теории Глаубера. Для отношения  $\sigma_{\text{PFe}}^{\text{in}} / \sigma_{\text{JFe}}^{\text{in}}$  при  $\langle E \rangle \approx 1400$  ГэВ получено значение  $1,21 \pm 0,06$ .

4. Проведен анализ зависимости сечения адронов с ядрами железа в различных энергетических диапазонах и различных значениях плотности сопровождения. Показано, что при больших энергиях ( $> 5$  ТэВ) поток заряженных адронов состоит в основном из протонов независимо от наличия или отсутствия сопровождения.

Публикации по материалам диссертации:

1. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г., Арзуманян С.А., Багдасарян Л.С., Винницкий О.М., Казарян С.П., Казарян С.С., Канкян С.А., Мамиджян Э.А., Мартиросов Р.М., Оганезова Дж.С., Оганесян А.Г., Просцов В.В. и Таманян А.Г. Экспериментальная установка для исследования взаимодействий космических адронов высоких энергий с использованием РИ-детекторов. – Изв. АН СССР, сер. физич., 1976, т. 10, № 5, с. 1058–1060.
2. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г., Арзуманян С.А., Багдасарян Л.С., Винницкий О.М., Казарян С.П., Казарян С.С., Канкян С.А., Кочарян М.С., Мамиджян Э.А., Мартиросов Р.М., Мурадян М.М., Оганесян А.Г., Оганезова Дж.С., Обсепян Г.Г., Оганян Г.М., Просцов В.В., Саргсян А.С., Сохоян С.О., Качатрян С.В., Таманян А.Г. Установка для исследования взаимодействий космических адронов с энергией выше 500 ГэВ. – Труды Международного симпозиума по переходному излучению частиц высоких энергий. Фреван, 1977. с. 277–286.
3. Avakyan V.V., Avundzhyan A.T., Antonyan K.G., Bagdasaryan L.S., Vinnitskij O.M., Kazaryan S.P., Kazaryan S.S., Kiremidzhyan S.A., Mamidzhanyan E.A., Muradyan M.M., Oganezova Dzh.S., Ognessian A.G., Oganyan G.Zh., Sokhoyan S.O.

Arrangement for the Identification of Cosmic Ray Hadrons and the Measurement of Interaction Cross Sections at Energies  $E > 500$  GeV. - Proc. 16th ICRC, Kyoto, 1979, v.13, p.61-65.

4. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г., Багдасарян Л.С., Винницкий О.М., Казарян С.П., Казарян С.С., Киремиджан С.А., Мамиджян Э.А., Мурадян М.М., Оганезова Дж.С., Оганесян А.Г., Оганян Г.Ж. и Сохоян С.О.  
Установка для идентификации адронов космического излучения и измерения сечений взаимодействий при энергиях  $E \geq 500$  ГэВ. - Изв. АН СССР, сер. физич., 1980, т. 44, № 3, с. 479-482.
5. Avakian V.V., Boyadjian N.G., Kazarian S.S., Keropian M.I., Mamidjanian E.A., Oganезova J.S., Pleshko M.P. Investigation of Correlations Between Registration Threshold and Measured Characteristics of Hadron Interactions in Ionization Calorimeter. - Proc. 17th ICRC, Paris, 1981, v.11, p.34-37.
6. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Антонян К.Г., Арзуманян С.А., Багдасарян Л.С., Винницкий О.М., Казарян С.С., Казарян С.П., Канкян С.А., Карагезян Г.В., Керопян М.И., Мамиджян Э.А., Мартиросов Р.М., Мурадян М.М., Овсепян Г.Г., Оганезова Дж.С., Оганесян А.Г., Оганян Г.Ж., Сохоян С.О., Таманян А.Г.  
Установка "Пион". - Вопросы Атомной Науки и Техники, серия: Техника физического эксперимента. Ереван, 1983, вып. 4(16) с. 3-24.
7. Avakian V.V., Avundjian A.T., Bagdasarian L.S., Boyadjian N.G., Kazarian S.P., Kazarian S.S., Mamidjanian E.A., Martirossov R.M., Muradian M.M., Oganезova J.S., Oganian G.J.,

Ovsepien G.G., Pleshko M.P., Sokhoyan S.O., Winnitski O.M.  
On the Cross-Section Behaviour of Pion and Nucleon Inelastic Interaction in Iron for the Energy Region 0.5 - 2.0 TeV. - Proc. 17th ICRC, Paris, 1981, v.5, p.90-93.

8. Авакян В.В., Авунджян А.Т., Гарья А.И., Геворкян С.Р., Шамкочян В.И., Казарян С.С., Карагезян Г.В., Керопян М.И., Мамиджян Э.А., Мартиросов Р.М., Овсепян Г.Г., Оганесян А.Г., Оганян Г.Ж., Сохоян С.О., Тер-Антонян С.В.  
Определение сечения неупругого взаимодействия пионов и нуклонов с ядрами железа в интервале энергий 0,5-5,0 ТэВ. - Вопросы Атомной Науки и Техники, серия: Техника физического эксперимента. Ереван, 1983, вып. 4(16), с. 45-55.
9. Avakian V.V., Avundjian A.T., Bagdasarian L.S., Chilingarian N.S., Garyaka A.P., Karageozian G.V., Kazarian S.P., Kazarian S.S., Keropian M.I., Mamidjanian E.A., Martirossov R.M., Muradian M.M., Oganessian A.G., Oganезova D.S., Oganian G.Zh., Ovsepien G.G., Pleshko M.P., Sanossian Kh.N., Sokhoyan S.S. 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. 18th ICRC, Bangalore, 1983, v.5, p.263-266.
10. Авакян В.В., Гарья А.И., Геворкян С.Р., Казарян С.С., Карагезян Г.В., Керопян М.И., Мамиджян Э.А., Мартиросов Р.М., Оганесян А.Г., Тер-Антонян С.В.  
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. 949-950.

II. Avakian V.V., Avundjian A.T., Bagdasarian L.S., Gevorkian S.R., Karagjozian G.V., Kazarian S.P., Kazarian S.S., Kero-  
pian M.I., Mamidjanian E.A., Martirosov R.M., Oganessian  
A.G., Ovsepian G.G., Ohanian G.Zh. Determination of the  
Cross Section of the Pion and Nucleon Interaction with  
Iron Nuclei in the Energy Range 0.5-5.0 TeV. - Nucl. Phys.,  
1985, v.B2<sup>50</sup> 156, 163.



Технический редактор А.С.Абрамян

---

Подписано в печать 10.01.86г.      Формат 60x84/16

Офсетная печать      ВФ - 06512      Тираж 170 экз.

Зак.тип. № 025

---

Отпечатано в Ереванском физическом институте

Ереван-36, Маркаряна, 2