

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Тер-Антонян Самвел Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО КАЛОРИМЕТРА
ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЮОНОВ НА ЯДРАХ СВИНЦА
И ГРУПП МЮОНОВ ПОД БОЛЬШИМИ ЗЕНИТНЫМИ УГЛАМИ

(ОI.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

Технический редактор

Технический редактор А.С. Абрамян

Заказ 42I

ВФ - 03907

Тираж 170

Подписано к печати 03.08.82г. Формат издания 60x84 $\frac{1}{16}$

Отдел научно-технической информации Ереванского физического
института. 375036 Ереван 36, Маркаряна 2.

Ереван - 1982

Работа выполнена в Ереванском Физическом институте
Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Т.Л.Асатиани

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор А.А.Петрухин (МФИ)
кандидат физико-математических наук, ст.науч.сотрудник Т.Т.Барнавели (ИФ АН Гр.ССР)

Ведущая организация: научно-исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова

Защита состоится "28" сентября 1982г. в 14.00 час. на заседании специализированного совета Д 034.03.01 Ереванского физического института (375036, г.Ереван, ул.Маркаряна,2)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЕрФИ.

Автореферат разослан " " _____ 1982г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В экспериментальной физике для исследования мюонов космических лучей высоких энергий к настоящему времени широкое распространение получили многорядные установки, состоящие из большого числа поглотителей, прослоенных ливневыми детекторами. При использовании в качестве детекторов широкозонных искровых камер (искровой калориметр) или пропорциональных камер можно успешно проводить оценку энергии мюонов по количеству и мощности вторичных электромагнитных ливней, образованных мюонами в слоях поглотителей, в основном, за счет процесса прямого рождения электрон-позитронных пар. Вопросы выбора оптимального метода определения энергии в установках типа искрового калориметра и корректного расчета точности оценки энергии являются наиболее важными при исследовании характеристик мюонного потока космических лучей и до настоящего времени не были детально изучены. Возможность измерения энергии мюонов в искровом калориметре позволяет успешно исследовать такие актуальные проблемы современной мюонной физики космических лучей, как группы мюонов, рожденные в атмосфере под большими зенитными углами и процесс адронорождения мюонами (ядерного взаимодействия мюонов) на ядрах вещества поглотителей при малых значениях квадрата передаваемого четырех-импульса.

Цель работы.

1. Создание экспериментальной установки - искрового калориметра, работающего в совместном режиме с Арагацским магнитным спектрометром.
2. Разработка оптимального метода измерения энергии мюонов в искровом калориметре. Калибровка точности определения энергии магнитным спектрометром.
3. Исследование методом искрового калориметра интенсивности и пространственно-энергетических характеристик групп мюонов под большими зенитными углами.
4. Исследование методом искрового калориметра процесса адронорождения мюонами с энергиями больше 10 ГэВ на ядрах свинца.

Новизна работы. Проведено подробное исследование всех известных методов оценки энергии мюонов по вторичным каскадным ливням, генерируемым мюонами при прохождении через искровой калориметр. Впервые точность измерения энергии методом искрового калориметра была калибрована магнитным спектрометром с максимально измеримым импульсом 1 ТэВ/с. Проведено исследование групп мюонов, рожденных в атмосфере под зенитными углами $60^\circ + 90^\circ$. Впервые на основе анализа распределения энергий мюонов в группах получена оценка вкладов основных процессов генерации групп под большими зенитными углами. Впервые методом искрового калориметра проведено комплексное исследование процесса адронорождения мюонами на ядрах свинца при малых передаваемых четырех-импульсах и получена зависимость сечения адронорождения от энергии мюонов космических лучей в интервале $20 + 250$ ГэВ.

Научная и практическая ценность работы. Разработана универсальная программа на ЭВМ БЭСМ-6, моделирующая методом Монте-Карло псевдо-экспериментальные прохождения мюонов через произвольную установку типа искрового калориметра или пар-метра. Расчеты проводятся с учетом всех существенных процессов взаимодействия мюонов, а также с учетом флуктуаций и угловых распределений каскадных ливней. Программа может быть использована для произвольных многорядных установок, регистрирующих мюоны с энергией больше 5 ГэВ. На основе данной программы проведена разработка оптимальной конструкции мюонной установки в планируемом эксперименте АНИ. Кроме этого, программа моделирования может быть использована для расчетов мюонного фона в адронных ионизационных калориметрах.

Исследование оптимальных методов оценки энергии в установках типа искрового калориметра показало, что при энергиях мюонов больше $200 + 300$ ГэВ и толщине поглотителей $8 + 10$ рад.ед. наиболее эффективным методом, использующим максимально информацию о прохождении мюона, является непараметрический метод, основанный на теории распознавания образов.

Разработанная методика исследования мюонных групп и ядерных взаимодействий мюонов в дальнейшем может быть использована в планируемом эксперименте АНИ.

Апробация работы. Результаты, приведенные в диссертации, докладывались на рабочих совещаниях по эксперименту АНИ (Нор-Амберд (ЕФИ) 1980 г., Зименки (ФИАН) 1981 г.), конференциях молодых ученых ЕФИ (Нор-Амберд 1977 г., Севан 1981 г.), Всесоюзных конференциях по космическим лучам (Ереван 1979 г., Самарканд 1981 г.), VII Европейском симпозиуме по космическим лучам (Ленинград 1980 г.).

По теме диссертации опубликовано 10 работ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержит 150 страниц, включая 38 рисунков, 12 таблиц; список литературы включает в себя 101 наименование.

На защиту выносятся следующие результаты работы.

1. Экспериментальная установка - искровой калориметр, и ее применение для исследования процесса адронорождения мюонами на ядрах свинца и групп мюонов горизонтального потока космических лучей.

2. Результаты исследования различных методов определения энергии мюонов в многослойных установках по количеству и мощности вторичных каскадных ливней. Результаты калибровки Арагацским магнитным спектрометром методов определения энергии мюонов в искровом калориметре.

3. Экспериментальные данные по интенсивности и пространственно-энергетическим характеристикам мюонных групп с энергиями мюонов больше 5 ГэВ, при зенитных углах больше 60° . Вывод об отсутствии аномальных процессов генерации групп под большими зенитными углами в области энергий $5 + 200$ ГэВ.

4. Результаты исследования следующих характеристик процесса адронорождения мюонами на ядрах свинца: парциальные коэффициенты неупругости, распределение множественности и поперечного импульса вторичных адронов в интервале переданных энергий $1,5 \div 40$ ГэВ и энергий мюонов $20 \div 250$ ГэВ.

Содержание диссертации

В введении обсуждается актуальность исследования групп мюонов под большими зенитными углами и процесса адронорождения мюонами на ядрах свинца методом искрового калориметра, основной особенностью которого наряду с высоким пространственным разрешением (~ 1 мм) является возможность определения энергии мюонов.

В первой главе описывается экспериментальная установка Арагацкий искровой калориметр (ИК), расположенный на высоте 3200 м над уровнем моря и представляющий собой 8-рядную установку из свинцовых поглотителей толщиной 5 см, прослоенных широкозазорными искровыми камерами (ШЗИК) размерами $(220 \times 110 \times 13) \text{ см}^3$ (рис.1). По обеим сторонам ИК для увеличения вероятности неупругого взаимодействия мюонов установлены дополнительные поглотители (мишени) толщиной 25 см. Полная толщина вещества ИК ~ 1000 г/см². Установка сконструирована в

апертуре Арагацкого магнитного спектрометра (МС) и имеет два режима работы: автономный и совместно с МС. Основные параметры установки, работающей в автономном режиме для регистрации одиночных мюонов следующие (в скобках указаны параметры для регистрации групп мюонов): интервал зенитных углов $1,26 \pm \pi/2$ ($0,96 \pm \pi/2$), интервал азимутальных углов $\pi/2 \pm 0,23$, $3\pi/2 \pm 0,23$ ($\pi/2 \pm 0,61$, $3\pi/2 \pm 0,61$), минимальная энергия мюонов $8 \div 10$ ГэВ ($4 \div 5$ ГэВ), светосила установки $280 \text{ см}^2 \cdot \text{стер}$, средняя скорость счета $\sim 100 \text{ час}^{-1}$ ($6,3 \cdot 10^{-2} \text{ час}^{-1}$). В режиме совместной работы с МС параметры установки следующие: максимально измеримый импульс спектрометра ~ 1000 ГэВ/с, интервал зенитных углов $1,4 \pm \pi/2$, интервал азимутальных углов $\pi/2 \pm 0,17$, $3\pi/2 \pm 0,17$, светосила установки $65 \text{ см}^2 \cdot \text{стер}$, минимально регистрируемый импульс $8 \div 10$ ГэВ/с, средняя скорость счета $\sim 10 \text{ час}^{-1}$.

В работе приведены конструктивные особенности ШЗИК, обеспечивающие высокую и стабильную эффективность при длительной работе в условиях высокогорья, система высоковольтного питания искровых отсеков, сцинтилляционный телескоп и блок-схема электроники установки. Съём информации с искровых камер осуществляется зеркальной системой и специальным стереофотоаппаратом со стереобазой 517,5 мм. Светосила установки для регистрации как одиночных, так и групп мюонов рассчитывалась методом Монте-Карло с относительной точностью $1 \div 5$ %.

Во второй главе проведено исследование каскадных ливней, генерируемых мюонами в искровом калориметре. Основными процессами взаимодействия высокоэнергичных мюонов с веществом поглотителей являются: упругое рассеяние мюонов на атомных электронах (δ - процесс), прямое рождение электрон-позитронных пар (e^+e^-), тормозное излучение (γ), неупругое рождение адронов (h). Высокоэнергичные вторичные частицы (γ, e^+, e^-) дают начало каскадным электрон-фотонным ливням, заряженная компонента которых при выходе из поглотителей регистрируется искровыми камерами. В работе приведены критерии отбора и методика обработки экспериментальных данных по каскадным ливням. Так как исследования на искровом калориметре

проводились сериями измерений, то для корректного объединения экспериментальных данных применялись статистические критерии проверки однородности: G - критерий Кокрена и t - критерий Стьюдента. Уровень достоверности выбирался 95%. Данная методика позволила выявлять грубые "промахи", связанные с качеством проявки фотопленки, эффективности работы искровых отсеков и выделяющей сцинтилляционной системы.

Для выбора оптимального метода определения энергии мюонов по каскадным ливням в работе исследованы выборочные коэффициенты корреляции $\rho(P_M, \xi)$ между информацией ξ , полученной после прохождения мюона через искровой калориметр и импульсом мюона P_M , измеренным в магнитном спектрометре. Такой информацией являлись: K_P - количество искровых отсеков (рядов) с числом зарегистрированных вторичных электронов больше порогового ρ (кратность с порогом K_P), $S = \sum_{i=1}^N n_i$ - полное число вторичных частиц во всех рядах ИК (суммарный толчок), наличие проникающих через поглотители ливней. Основные результаты следующие: $\rho(P_M, K_P)_{\rho=1+4} \approx 0,3 \pm 0,08$, $\rho(P_M, S) = 0,34 \pm 0,09$, $\rho(S, K_1) = 0,63 \pm 0,06$. Коэффициент корреляции между импульсом и вероятностью проникновения каскадов оказался равным $0,25 \pm 0,1$. Ошибки рассчитаны с уровнем достоверности 99%. Численные значения коэффициентов корреляции указывают на возможность оценки энергии (импульса) мюона по количеству (K_P) и мощности (S) вторичных каскадных ливней, образованных мюонами в веществе поглотителей. Если включать проникающие каскады, то для оценки энергии мюонов в ИК можно использовать метод максимального правдоподобия. Функция правдоподобия выбирается в виде $\Phi(E|\vec{A}) = \prod_i f(E|n_i)$ где $f(E|n_i)$ - вероятность зарегистрировать в i -ом ливневом детекторе (ШЗИК) n_i вторичных частиц после прохождения мюона энергией E . Компоненты вектора $\vec{A}(n_1, \dots, n_N)$ предполагаются независимыми (N - число рядов калориметра). В работе приводится метод оценки $f(E|n)$, основанный на аппроксимации эффективного слоя генерации более чем n частиц с учетом энергетического спектра вторичных электронов в Б приближении каскадной теории. Полученные аппроксимации

применимы при энергиях ливней $10^2 < E_0/\beta < 10^7$ и энергиях вторичных частиц $0,2 < E_i/\beta < 2$, где β - критическая энергия.

В заключение главы приводится сравнение предварительных экспериментальных данных по спектрам ливней (~ 6000 событий) с ожидаемыми расчетными значениями. Из анализа данных следует, что для Арагацкого ИК основной вклад в спектр толчков вносит область $n \leq 10$. В этой связи в теоретических расчетах необходимо учитывать флуктуации в развитии каскадов. Пренебрежение флуктуациями приводит к занижению спектра толчков для $n \approx 1$ в 2 + 3 раза и применимо лишь для $n \gg 1$.

Третья глава посвящена методам определения энергии мюонов в искровом калориметре. Приводятся основные формулы и алгоритмы программы по моделированию на ЭВМ БЭСМ-6 псевдо-экспериментальных прохождений мюонов через многослойную установку типа искрового калориметра. В программе учитываются все существенные процессы взаимодействия мюонов в поглотителях, флуктуации и угловые распределения каскадных ливней, а также эффективность регистрации вторичных частиц в искровых камерах. Для оценки функции эффективности ШЗИК проведены калибровочные измерения на ускорителе. Получено аппроксимационное выражение, описывающее суммарный эффект недомера числа каскадных электронов в искровых камерах.

Поскольку всякая модель неадекватна реальной системе, то такие вопросы, как степень адекватности, точность модели, ее чувствительность к вариациям различных параметров были решены с помощью калибровки расчетов экспериментальными данными ИК, работающего в совместном режиме с МС. Сравнение расчетов с экспериментом проводилось как интегрально по энергетическому спектру мюонов (10^4 событий), так и дифференциально (2500 событий) для 5 энергетических интервалов. На основе реализации Монте-Карло программы были исследованы основные методы оценки энергии мюонов в искровом калориметре. Спектр каскадных ливней $f(E|n_i)$ был аппроксимирован выражением вида

$$f(E|n_i) \approx a_1 E^{-\delta_1} \cdot \exp\{-a_2 E^{-\delta_2} (n_i - a_3)^{\delta_3}\} \quad \text{для } n_i \geq 1$$

$$\{E|0\rangle = d_1^{(0)} E^{-\gamma_1^{(0)}} \cdot \exp\{-d_2^{(0)} E^{-\gamma_2^{(0)}}\}$$

Коэффициенты d и γ получены методом минимизации χ^2 . Применяя обычную процедуру метода максимального правдоподобия с учетом энергетического спектра мюонов под большими зенитными углами для оценки E' энергии E было получено окончательное выражение

$$E' = \beta_0 \cdot \left[\frac{0.223(7.78 \sum (n_i - 0.59) + 2.76(N-K) + 37.6)}{K(0.174 - 0.32) + 0.32 N + 4.88} \right]^{1/0.223}$$

Нормировочный коэффициент $\beta_0 = 1,89$ был определен из условия минимума относительной ошибки оценки E' . Полученное выражение калибровалось известными значениями энергий (импульсов), измеренных в МС. Относительная точность оценки $\approx 70\%$. Другой способ определения энергии мюонов в искровом калориметре основан на корреляции энергии мюона с кратностью зарегистрированных толчков (K_p). Для Арагацкого ИК с помощью Монте-Карло расчетов получено аппроксимационное выражение для оценки $E \approx \rho(K_i)$. Кроме этих методов в работе описывается непараметрический метод оценки энергии, основанный на теории распознавания образов и позволяющий учитывать корреляцию ливней в соседних рядах калориметра при сверхвысоких энергиях. На рис.2 приведены распределения оценки E' энергии мюона E (отмечено стрелкой), полученные методом "кратности" (линия 1), максимального правдоподобия (линия 2) и распознавания образов (линия 3). Комбинирование методов (2) и (3) позволяет получить оптимальную оценку энергии мюона.

В четвертой главе приводятся результаты исследования групп мюонов методом искрового калориметра. Приводятся обобщенные известные экспериментальные данные по исследованию мюонных групп. Описываются особенности исследования групп мюонов методом искрового калориметра, предложенного впервые в работе Бибилашвили и др. (1971). Излагаются критерии отбора и методика обработки мюонных групп, зарегистрированных на Арагацком искровом калориметре. Основные результаты по интенсивности и пространственно-энергетическим характеристикам мюонных групп, из-

меренным в ИК приведены в таблице I, где M - число мюонов в группе, N_s - число зарегистрированных событий за все время экспозиции (~ 1000 часов), $\langle E \rangle$, $\sigma_E / \langle E \rangle$ - средняя энергия (ГэВ) и флуктуация энергии мюонов в группах, Δ_e - электронная плотность сопровождения, W_h - вероятность адронного сопровождения, $\langle \sum E \rangle$ - средняя суммарная энергия группы, $\langle d \rangle$ и $\langle d' \rangle$ - средние значения расстояний и углов между мюонами. Для групп с $n \geq 4$ приведены средне-минимальные и средне-максимальные расстояния.

Для интерпретации экспериментальных данных в работе проведен анализ возможных механизмов генерации групп под большими зенитными углами. Рассматриваются:

- 1 - образование мюонных групп от распада π, K - мезонов ШАЛ;
- 2 - электророждение пар мюонов высокоэнергичными мюонами на ядрах воздуха ($\mu + A \rightarrow \mu' + A' + \mu^+ + \mu^-$);
- 3 - адронорождение мюонами на ядрах воздуха с последующим распадом заряженных π, K мезонов ($\mu + A \rightarrow \mu' + m\pi^\pm \rightarrow n\mu^\pm$).

Подробно приводятся методика расчета и основные результаты по оценке ожидаемой интенсивности и средних характеристик мюонных групп по модели (1). Приводятся окончательные результаты оценки вкладов процессов (2) и (3), из которых следует, что процессом электророждения мюонных пар можно пренебречь, в то время как процесс адронорождения может вносить вклад до 5 + 3%. На рис.3 приведены результаты расчетов по модели (1) и экспериментальных данных относительной интенсивности мюонных групп $J'(n) = J(n) / \sum_{n=2}^{\infty} J(n)$ в сравнении с данными других авторов. Арагац 2 - группы, зарегистрированные в МС (Асатиани и др. 1978), Арагац 1 - результаты данной работы. На рис.3 приведены также расчетные значения интенсивности с коррекцией на вероятность запуска установки от электронного сопровождения группы. Для экспериментального выделения вкладов в спектр групп от процессов (2) и (3) в работе введена специальная статистика, определяющая факт лидирования в мюон-

ных парах: $L = |E_1 - E_2| / (E_1 + E_2)$. На основе критерия $3\sigma_L$ было выделено три события, являющиеся вероятнее всего следствием процессов (2) и (3) ($\langle E^* \rangle \approx 500$ ГэВ, $L \rightarrow 1$), причем родительской частицей группы предполагается лидирующий мюон. Исключая эти события из основной выборки, было получено, что в парах мюонов $\langle E \rangle \approx 45$ ГэВ, что хорошо согласуется с гипотезой генерации групп в ШАЛ.

В пятой главе приводятся результаты исследования процесса адронорождения мюонами на ядрах свинца методом искрового калориметра.

Вначале приводится обзор современного состояния проблемы адронорождения мюонами на ядрах и специфика исследования процесса в экспериментах с космическими мюонами. Основные преимущества исследования адронорождения методом искрового калориметра являются возможность оценки энергии мюонов, измерение энергии всех вторичных адронов и полной энергии передачи, возможность оценки квадрата передаваемого четырех-импульса при больших множественностях ($n_{ch} \geq 2$) методом двух струй (файрболов). Выделение процессов адронорождения мюонами проводится в Арагацском ИК с большой достоверностью по проникающим трекам вторичных заряженных адронов (в основном, пионы). В работе приводятся критерии отбора и методика обработки событий адронорождения.

За все время экспозиции (~ 1000 часов) было зарегистрировано $1,03 \cdot 10^{10}$ прохождений мюонов с энергиями больше $8 + 10$ ГэВ через установку. Зарегистрировано 48 случаев ядерного взаимодействия мюонов. В таблице 2 приведены основные характеристики процесса адронорождения, полученные после обработки экспериментальных данных. Нижние две строки - расчетные значения, \sqrt{s} - энергия передачи (ГэВ), Q^2 - квадрат четырехмерного передаваемого импульса (ГэВ/с)², x, y - переменные Бьеркена, K_{π^0}, K_{π^\pm} - парциальные коэффициенты неупругости для рождения π^0 и π^\pm мезонов, n_{ch} - множественность заряженных адронов, P_L - переданный адроном поперечный импульс. Распределение углов вылета заряженных адронов изотропно в системе центра масс. Распределение множественнос-

ти близко к нормальному с учетом аппроксимации Вроблевского. Получено дифференциальное сечение процесса $yd\sigma/dy$ (мкб/нуклон) для трех значений $\langle y \rangle$: 0,09; 0,17; 0,28. Соответствующие значения сечений $2,0 \pm 0,3$; $1,1 \pm 0,3$; $0,94 \pm 0,3$. Результаты сравниваются с предсказаниями по модели векторной доминантности (МВД). В таблице 3 приведены результаты полного сечения взаимодействия в зависимости от энергии мюона и ожидаемые значения по аппроксимации (Goswami et al 1979). На рис.4 приведено полное сечение адронорождения мюонами с энергиями больше 10 ГэВ с учетом и без учета коррекций на критерии отбора. Эффект затенения нуклонов в ядре в расчетах был выбран в форме $\sigma_{pB} = \sigma_{\mu N} \cdot A^n$, где $n = 0,92$. Сечение фоторождения для интервала энергий фотона $E_\gamma = 1,5 + 40$ ГэВ, аппроксимировалось по ускорительным данным выражением $\sigma_{\mu\gamma}(E_\gamma) = (1 + 1/E_\gamma^2) \cdot 110$ мкб. В заключении главы приводятся основные выводы по исследованию процесса адронорождения мюонами на ядрах свинца, подтверждающие с большой достоверностью адронородный характер взаимодействия виртуальных фотонов.

В заключении диссертации приведены основные результаты, полученные в работе.

1. Создана экспериментальная установка - искровой калориметр для комплексного исследования околоразностного потока мюонов космических лучей.
2. Проведено исследование процесса адронорождения мюонами энергий больше 10 ГэВ на ядрах свинца. Получены экспериментальные распределения по множественности, парциальным коэффициентам неупругости, дифференциальное и интегральное сечения взаимодействия в зависимости от энергии мюона в интервале $20 + 250$ ГэВ и энергий передач $1,5 + 40$ ГэВ.
3. Проведено исследование пространственно-энергетических характеристик групп мюонов энергий больше 5 ГэВ под зенитными углами $60 \div 90^\circ$. Получены теоретические оценки ожидаемой интенсивности мюонных групп для Арагацкого искрового калориметра. Расчетные значения согласуются с экспериментальными данными.

4. Получены оптимальные методы измерения энергии мюонов в искровом калориметре. Относительная точность определения энергии была калибрована магнитным спектрометром и составила $\sim 70\%$ для интервала $0,01 \div 5$ ТэВ.
5. Проведено исследование спектра каскадных ливней, образованных электромагнитными взаимодействиями мюонов со свинцовыми поглотителями. Экспериментальные данные согласуются с Монте-Карло расчетами, проведенными с учетом флуктуаций и угловых распределений каскадных ливней.

Публикации по материалам диссертации:

1. Тер-Антонян С.В. Об эффективном слое генерации электромагнитного каскадного ливня с учетом энергетического спектра вторичных частиц. Ереван, 1978, Изд. ЕФИ - 10 с. (Препринт / Ереванский физический институт, ЕФИ - 315(40)-78).
2. Асатиани Т.Л., Тер-Антонян С.В. Исследование мюонов горизонтального потока космических лучей методом искрового калориметра. Изв.АН Арм.ССР, Физика, 1980, т.15, № 3, с. 174 - 185.
3. Тер-Антонян С.В. О планировании мюонной установки Парметр в эксперименте АНИ. Вопросы Атомной Науки и Техники. Серия: техника физического эксперимента, Харьков, Изд. ХГУ, 1981, вып. 2(8), с. 75 - 76.
4. Асатиани Т.Л., Тер-Антонян С.В. Моделирование прохождения мюонов через Арагацкий искровой калориметр. Ереван, Изд. ЕФИ, 1981, с.20 (Препринт/Ереванский физический институт, ЕФИ - 469 (II)- 81).
5. Тер-Антонян С.В. Метод оценки энергии мюонов многослойными детекторами. У конференция молодых ученых ЕФИ, (22 сентября, 1981 г.): Тезисы докладов / Ереванский физический институт - Ереван, Изд. ЕФИ, 1981, с. 58-59.
6. Тер-Антонян С.В. Исследование групп мюонов высоких энергий в горизонтальном потоке космических лучей. У конференция молодых ученых ЕФИ (22 сентября 1981 г.): Тезисы докладов / Ереван, Изд. ЕФИ, 1981, с.60-61.
7. Тер-Антонян С.В. Исследование ядерного взаимодействия высокоэнергичных мюонов на Арагацком искровом калориметре. У конференция молодых ученых ЕФИ. (22 сентября 1981 г.): Тезисы докладов / Ереван, Изд.ЕФИ, 1981, с.62-63.

8. Асатиани Т.Л., Алчуджян С.В., Амроян К., Зверев А., Козлинер Л.И., Мартиросян Г.С., Тер-Антонян С.В., Чилингарян А.А. Исследование горизонтального потока мюонов с помощью магнитного спектрометра и искрового калориметра. Изв.АН СССР, серия физическая, 1981, т. 45, № 7, 1265-8.
9. Асатиани Т.Л., Алчуджян С.В., Газарян К.А., Козлинер Л.И., Мартиросян Г.С., Прохоров В.Н., Тер-Антонян С.В., Чилингарян А.А. Исследование характеристик высокоэнергичных мюонов космического излучения. Изв. АН СССР, серия физическая, 1980, т.44, с.590-593.
10. Асатиани Т.Л., Иванов В.А., Мнацаканян Э.А., Тер-Антонян С.В. О возможной программе исследования мюонов в широких атмосферных ливнях. Сб.Вопросы Атомной Науки и Техники, серия техника физического эксперимента, 1982, 3(12), с. 79-89.

Таблица I

n	N ₃	<E>	$\sigma_E / \langle E \rangle$	$\Delta_e [u^2]$	W_k	$\langle \Sigma E \rangle$	$\langle d \rangle [cm]$	$\langle d \rangle$
1	$1,03 \cdot 10^5$	-	-	-	-	-	-	-
2	36	85 ± 25	$1,9 \pm 0,3$	$1,8 \pm 0,31$	$0,07 \pm 0,04$	180	44 ± 5	$0,05 \pm 0,02$
3	10	40 ± 20	$0,56 \pm 0,07$	$2,76 \pm 0,94$	$0,07 \pm 0,07$	120	38 ± 6	$0,05 \pm 0,02$
4	9	40 ± 20	$0,22 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,9$	$0,42 \pm 0,2$	150	8/70	$0,06 \pm 0,03$
5	2	30 ± 2	-	$7,8 \pm 1,6$	$0,5 \pm 0,5$	150	8/130	-
>5	6	30 ± 2	$0,17 \pm 0,1$	$9,3 \pm 0,2$	$0,57 \pm 0,3$	260	1/200	$0,03 \pm 0,01$

Таблица 2

α	E	γ	Q^2	Y	X	K_{T^0}	K_{T^2}	n_{ch}	P_1
α_{max}	220	37	3	0,33	0,11	0,79	0,94	7	0,63
α_{min}	20	1,5	0,05	0,05	0,007	0	0,00	1	0,11
$\langle \alpha \rangle$	70 ± 10	$9,8 \pm 1,4$	$1,1 \pm 0,18$	$0,13 \pm 0,04$	$0,05 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,03$	$0,57 \pm 0,03$	$2,52 \pm 0,2$	$0,41 \pm 0,03$
σ_{α}^2	-	76	0,76	0,02	0,049	0,055	0,049	8,5	0,014
$\langle \alpha \rangle_T$	84	9,53	1,05	0,17	-	-	-	2,5	-
$\sigma_{\alpha_T}^2$	-	387	17,5	0,03	-	-	-	-	-

Таблица 3

E (ГэВ)	17	42	75	150
$\sigma(\gamma, e)_{\mu/b/N}$	$1,01 \pm 0,3$	$3,6 \pm 0,8$	$4,15 \pm 1,3$	$5,4 \pm 1,7$
анпр. Goswami	2,3	3,51	4,28	5,16

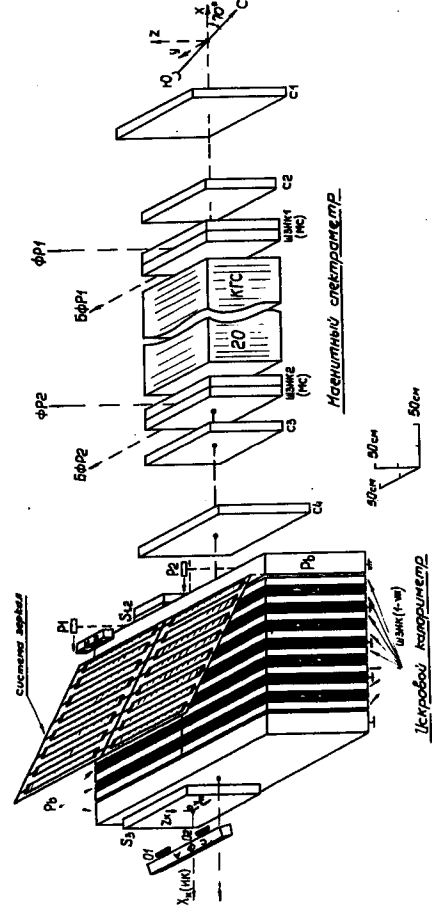


Рис. 1. Арагагский искровой калориметр (АЛС) и магнитный спектрометр (МС)

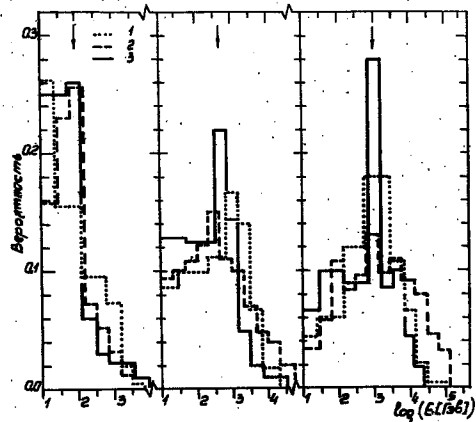


Рис.2. Распределение оценки E' энергии мюона E (отмечено стрелкой) методом кратности (1), максимального правдоподобия (2), распознавания образов (3)

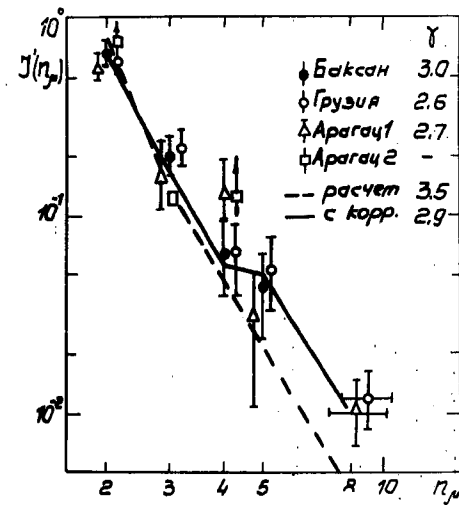


Рис.3. Относительная интенсивность мюонных групп

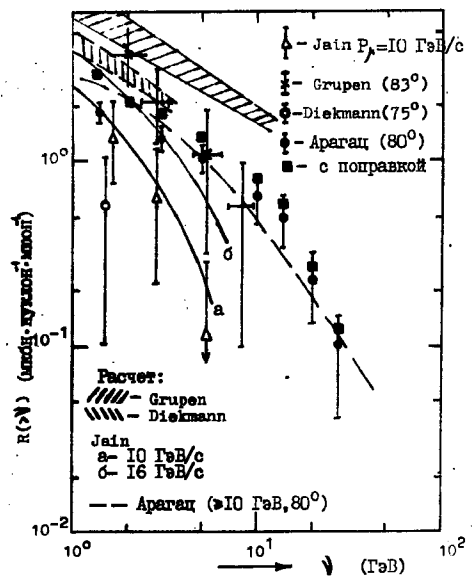


Рис.4. Полное сечение адронорождения мюонами с энергиями больше 10 ГэВ в зависимости от энергии передачи ν .