

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ГАЗАРЯН Карен Арташесович

ИМПУЛЬСНЫЙ СПЕКТР И ЗАРЯДОВОЕ ОТНОШЕНИЕ
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

О1.04.01 - экспериментальная физика

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

Ереван - 1977

Работа выполнена в Ереванском физическом институте

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Асатиани Т.Л.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Ракобольская И.В.
МГУ НИИЯФ, г.Москва

доктор физико-математических наук,
Испирян К.А.
ЕФИ, г.Ереван

Ведущее предприятие - Тбилисский Государственный университет

Защита диссертации состоится " " 1977 г. в часо
на заседании специализированного Ученого Совета по защите
диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-матема-
тических наук, Д-034- 03.01, при Ереванском физическом инсти-
туте ИКАЭ (г.Ереван, ул.Маркаряна 2, Ереванский физический
институт).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ереван -
ского физического института.

Автореферат разослан " " 1977 г.

Ученый секретарь специализированного
совета

Шахбазян В.А.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Одной из основных проблем совре-
менной физики является задача построения теории сильных вза-
имодействий. В связи с многочисленными теоретическими попыт-
ками решения этой проблемы, необходима экспериментальная про-
верка выдвигаемых гипотез в области высоких и сверхвысоких
энергий сталкивающихся частиц (10^{12} - 10^{14} эв). С этой точки
зрения понятен интерес к космическим лучам, где можно полу-
чить качественную, а иногда и количественную информацию о та-
ких взаимодействиях.

Понятно, что возможности непосредственного исследования
актов столкновений при таких энергиях ограничены из-за малой
интенсивности. Значительно легче регистрировать продукты та-
ких взаимодействий. Очевидно, что состав, интенсивность, заря-
довый состав, угловое распределение и энергетический спектр
вторичных частиц определяются характеристиками первичного
взаимодействия и параметрами первичного пучка.

Вторичные частицы, в основном это пионы и каоны, при про-
хождении через атмосферу земли участвуют в конкурирующих про-
цессах взаимодействия и распада, образуя при этом мюоны и
 γ - кванты.

В этом аспекте исследование характеристик мюонного потока,
а именно, энергетического спектра, углового распределения и
зарядового состава, представляется важным с точки зрения кос-
венного изучения сильных взаимодействий при высоких энергиях.

Целью работы является измерение энергетического спектра и
зарядового отношения горизонтального потока космических мюонов

больших энергий с помощью магнитного спектрометра.

Научная новизна. Исследование импульсного спектра и зарядового отношения мюонного потока космических лучей с помощью магнитных спектрометров проводилось обычно для мюонов, идущих без сопровождения и на уровне моря. Поскольку сопровождение мюона обусловлено электромагнитным взаимодействием последнего с ядрами воздуха и веществом в установке растет с ростом энергии мюона, то исключение таких случаев может исказить спектр, особенно в области высоких энергий. Применяемая нами методика дает возможность включения таких мюонов в измеряемый спектр и зарядовое отношение.

Научная и практическая ценность работы

Впервые в Советском Союзе создан магнитный спектрометр для комплексного исследования горизонтального потока космических мюонов. Оригинальная методика прецизионного съема информации с пленок сканирующим автоматом связанным на линию с ЭВМ и обработки этих данных позволяет получать большую информативность в сочетании с высокой точностью. Этот метод имеет практическую ценность с точки зрения его использования на других аналогичных установках.

Предложен и разработан простой и эффективный метод оптических клиньев, позволяющий восстанавливать пространственные координаты траектории частиц в искровых камерах без использования зеркал и стереофоторегистрации.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на Всесоюзной (Самарканд - 1975) и Международной (Мюнхен - 1976) и представлялись на Международной (Тбилиси -

1976) конференциях.

Публикации. Результаты по диссертационной теме опубликованы в 7 работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 165 страниц машинописного текста, 46 рисунков, 10 таблиц и список литературы - 157 наименований.

Содержание работы. Во введении рассматривается актуальность исследования импульсного спектра и зарядового отношения мюонного потока при высоких энергиях.

Работа посвящена измерению импульсного спектра и зарядового отношения высокоэнергичных мюонов, поскольку они несут информацию о ядерных взаимодействиях, инициированных в атмосфере высокоэнергичными частицами космического излучения.

Рассматривается методика измерения этих характеристик мюонного потока.

В первой главе описаны основы метода измерения импульса и заряда мюона с помощью магнитного спектрометра со сплошным магнитом и дается описание установки с подробным рассмотрением работы ее отдельных узлов.

Спектрометр расположен на высокогорной станции "Арагац" Ереванского физического института на высоте 3200 м над уровнем моря [1]. Измерения проводятся в горизонтальном направлении, а ось спектрометра направлена под азимутальным углом $\approx 70^\circ$, где поле зрения установки свободно от горных массивов.

Пролетая через установку, заряженный мюон отклоняется в магнитном поле спектрометра. Это отклонение, зависящее от импульса и знака заряда мюона, определяется по траектории части-

цы до и после магнита, которая фиксируется телескопом широко-
зазорных оптических искровых камер (ИК). Выделение частицы,
пролетевшей через установку, осуществляется сцинтилляционным
телескопом [2].

Точное знание P_{max} установки позволяет проводить кор-
ректные поправки измеренного импульсного спектра и зарядового
отношения. В работе описаны возможные методы определения P_{max} .
Выявление многократного рассеяния, конечного пространственного
разрешения искровых камер, а также исключение случаев большого
однократного рассеяния и несвязанных траекторий осуществляют-
ся с помощью, расхождения траекторий в центре магнитного
объема или же на выходе из него, определяемого для каждой
частицы.

В параграфе I - 4 описан используемый магнит спектромет-
ра, методика измерения топографии магнитного поля в сплошном
объеме магнита (80 x 80 x 210 см) и приведены полученные ре-
зультаты [3]. Отклоняющая сила магнита $BL = 44.7$ кгс.м явля-
ется очень высокой и превосходит в этом отношении большинство
спектрометров, используемых для аналогичных целей.

Сцинтилляционный телескоп состоит из четырех пластических
сцинтилляционных блоков $C_1 - C_4$. Размеры C_1 и C_4 -
100 x 100 x 5 см³, а C_2 и C_3 - 80 x 80 x 4 см³. Блок состоит
из четырех счетчиков, каждый из которых просматривается одним
ФЭУ-36. Блоки защищены светонепроницаемыми и магнитными экра-
нами, поскольку в местах расположения сцинтилляционных блоков
имеются существенные рассеянные магнитные поля. Сцинтилляцион-
ные блоки связаны в быструю ($\tau_{раз} = 12$ нсек) схему совпаде-
ний.

Телескоп оптических искровых камер состоит из двух ИК,
группы реперных меток, оптических клиньев и фоторегистраторов.
Изготовление и эксплуатация больших искровых камер (их размер
100 x 100 x (2 x 15) см³) в условиях высокогорья, где наблю-
даются большие перепады давления и температуры оказалась не-
тривиальной, добавим к этому пониженное внешнее атмосферное
давление (500 тор), что уменьшает яркость треков. Независимо
от ИК, в поле зрения ФР-ов установлены 10 реперных меток,
позволяющих привести информацию с ИК в единую координатную
систему. Центральные проекции углов, полученные на пленке,
отличаются от истинных углов, для получения последних необхо-
димо иметь вторую проекцию траектории. Для этой цели нами
разработан метод оптических клиньев, позволяющий получить на
одном кадре обе проекции трека, не используя при этом зеркала.
Оптические клинья устанавливаются между фоторегистратором и
искровой камерой таким образом, что фоторегистратор видит
сквозь них края трека, на пленке изображения этих отрезков
трека смещаются относительно изображения трека на величину,
пропорциональную глубине. В диссертации получено аналитичес-
кое выражение зависимости смещений от глубины.

Во второй главе приведены полученные экспериментальные
данные, описана методика обработки этих данных, рассмотрены
особенности регистрации установкой мюонного потока, обосно-
ваны и описаны применяемые поправки к импульсному спектру и
зарядовому отношению на инструментальное влияние и искажение
мюонного потока при прохождении через атмосферу земли.

Экспериментальные данные были получены за ~ 2000 часов
работы установки в период с ноября 1972 г. по июнь 1973 г.

За это время зарегистрировано ~ 20000 мюнов, из которых в 10% случаев мюон пролетал с сопровождением. Средняя скорость регистрации $\sim (10-11)$ частиц в час, при этом средняя скорость срабатывания ~ 38 в час. Показано, что ложные запуски вызваны наклонными атмосферными ливнями. В процессе набора статистического материала полярность магнитного поля периодически менялась, что дает возможность выявить систематические эффекты.

Съем информации с пленок проводился с помощью прецизионного проектора и сканирующего автомата НРД, связанного на линию с ЭВМ. Ниже приводятся данные основанные на ~ 9000 случаях, измеренных на НРД. Угловая точность следования трека по траектории частицы определялась по измерениям угла между треками в отсеках искровой камеры и характеризуется средне-квадратичной дисперсией этого угла. В случае проекционного съема информации значение дисперсии равно $\sigma_{\varphi} = 0,00082$, а при съеме на НРД $\sigma_{\varphi} = 0,00123$ рад. На основании этих данных максимально измеримый импульс равен 1635 Гэв/с и 1085 Гэв/с соответственно [4]. Из-за распадных процессов, энергетических потерь и геомагнитных эффектов характеристики мюонного пучка искажаются при прохождении от места образования до места наблюдения. В процессе измерения вносятся дополнительные искажения. Для получения неискаженных параметров мюонного пучка в месте наблюдения или образования применяются соответствующие поправки. Таким образом можно выделить две причины искажений импульсного спектра и зарядового отношения — инструментальные и геомагнитно-атмосферные. В диссертации подробно рассмотрены эти процессы.

Инструментальное влияние в основном обусловлено конечным пространственным разрешением искровых камер, зависимостью светосилы от импульса и многократным рассеянием частиц в сплошном сердечнике магнита. Причем, если две последние причины искажения существенны для низкоэнергичных частиц мюонного потока, то первая влияет только на его высокоэнергичную часть. Каждая из этих причин вызывает увеличение расхождения, которое таким образом зависит от импульса. Распределение расхождения в зависимости от импульса подтвердило выше определенную величину максимально измеримого импульса при автоматическом съеме информации.

При расчете зависимости светосилы от импульса нами разработана методика вычисления этой величины для приборов такого типа.

Геомагнитное влияние обусловлено тем фактом, что частицы разного знака заряда вследствие искривления траектории в магнитном поле земли проходят различные пути в атмосфере и, соответственно, при этом теряют разные энергии. Следовательно, частицы разного знака с одинаковой энергией в точке наблюдения имеют неодинаковую энергию при генерации и, соответственно, разные вероятности образования и выживания. Геомагнитное влияние тем больше, чем больше угол между осью спектрометра и магнитным меридианом, как например в нашем случае. Рассчитанные поправки на геомагнитное влияние неправильны при энергиях меньше 20 Гэв, поскольку в этом случае высота генерации неспределенна. Имеется большой вклад от частиц второго и третьего поколения.

В третьей главе проведен обзор теоретических и экспери-

ментальных работ, имеющих к настоящему времени по импульсному спектру и зарядовому отношению. Сделан анализ теоретического подхода вычисления импульсного спектра и зарядового отношения, а также вычислен теоретический спектр для высоты 3200 м над уровнем моря.

Основной вклад в мюонный поток обусловлен распадом высокоэнергетичных пионов и частично каонов, образованных в первом взаимодействии первичного космического излучения с ядрами воздуха. Предполагая определенный механизм адронных взаимодействий и зная интенсивность первичного космического излучения, можно предсказать импульсный спектр и зарядовое отношение мюонов на уровне моря.

Исследуя энергетические спектры при различных зенитных углах, можно определить долю каонов. При множественном рождении пионов в моделях адронных взаимодействий статистического типа, когда заряд равномерно распределяется среди вторичных частиц, зарядовое отношение должно стремиться к 1 с увеличением энергии первичной частицы, так как с энергией растет множественность пионов, что противоречит экспериментальным данным, полученным при энергиях вплоть до нескольких тысяч Гэв. Для объяснения сохранения положительного избытка в мюонном потоке привлекались различные механизмы образования мюонов от распада гиперонов, изобар, каонов, ρ - мезонов и др. Развитие теории адронных взаимодействий, например, гипотеза автомодельности, с использованием экспериментальных данных, полученных на ISR, дали возможность получить не только качественную картину поведения зарядового отношения, но и провести более определенные, частично успешные предсказания о величине R .

В работе проведен обзор теоретических предсказаний зарядового отношения, и рассмотрен метод вычисления зарядового отношения на основании которого объясняются важные особенности R , а именно, независимость от энергии, значение большее 1 и т.д.

Поскольку описанный метод расчета R является типичным, то различие в результатах, полученных разными авторами, в основном объясняется различием в входных параметрах, что вызвано недостатком наших знаний о химическом составе и спектре первичного космического излучения и механизме адронных взаимодействий. Чувствительность R к вариациям входных параметров рассматривается в диссертации.

Был рассчитан импульсный спектр космических мюонов, идущих под большими зенитными углами по формулам, предложенным Зацепиным-Кузьминым и Алкофером.

В четвертой главе представлены поправленные экспериментальные значения импульсного спектра и зарядового отношения. Проведено сравнение с аналогичными измерениями, имеющимися в настоящее время и полученными как с помощью магнитных спектрометров, так и другими методами, а так же с теоретическими предсказаниями. Представлены измерения при четырех фиксированных зенитных углах. Проведено фитирование импульсного спектра с целью получения значений показателя спектра и доли каонов. Проведено обсуждение полученных результатов.

Применяя к исходным экспериментальным данным соответствующие коррекции на инструментальное влияние и искажения, вызванные геомагнитными эффектами, мы получили импульсный спектр и зарядовое отношение мюонного потока космических лучей.

Полученные результаты представлены на рис. 1 и 2 (4-6).

На этих же рисунках приведены для сравнения данные, полученные на аналогичных установках, а на рис.2 и теоретические предсказания зарядового отношения.

По полученным экспериментальным данным мы определили показатель спектра и долю каонов по методу наименьших квадратов, используя при этом теоретические выражения, описанные в третьей главе.

Показано, что если не применять геомагнитных поправок к импульсному спектру, то полученное значение γ искажено. Это обусловлено тем фактом, что основной вклад в определение γ вносят частицы низкоэнергичных ячеек, которые статистически более обеспечены, в то же время именно на частицы таких энергий существенно влияние магнитного поля земли.

Показатель спектра $\gamma = 2.47 \pm 0.03$, с учетом геомагнитных эффектов $\gamma = 2.67 \pm 0.05$, при этом доля каонов составляет 0.09 ± 0.07 .

В спектрометрических измерениях импульсного спектра и зарядового отношения учитываются только одиночные мюоны, так как, в основном, трудно выделить траекторию мюона, пролетевшего через установку с сопровождением. Применяемая нами методика позволяет успешно регистрировать как мюоны, идущие с сопровождением, так и множественное прохождение частиц через спектрометр.^[7]

В работе показано, что с увеличением энергии вероятность сопровождения растет, что согласуется с теорией. Следовательно, учет сопровождения уплощает спектр, причем, если при 10 Гэв $\Delta\gamma$ равно 0.01, то при 200 Гэв $\Delta\gamma \sim 0.06$.

Согласно полученным данным, в области выше 100 Гэв спектр

становится более пологим с $\gamma = 2.42 \pm 0.08$, что не согласуется с $\gamma = 2.75$ для первичного спектра. Если модель масштабной инвариантности сохраняется, то это указывает на возможно большую примесь тяжелых ядер в первичном излучении, чем это обычно принято.

Как видно из рисунка 2 зарядовое отношение практически не зависит от энергии и находится в хорошем согласии с данными других экспериментов и есть указание на некоторое расхождение с теоретическими предсказаниями в области больших энергий. Интегральное значение зарядового отношения в области выше 100 Гэв равно 1.283 ± 0.058 . В качестве возможного объяснения некоторого расхождения теории с экспериментом рассматриваются два процесса или нарушение гипотезы скейлинга, или наличие в первичном излучении избытка группы ядер VH (группа железа).

Резюмируя, можно сказать, что полученные результаты вместе с имеющимися данными по импульсному спектру и зарядовому отношению, дают некоторое указание на возможное нарушение гипотезы скейлинга в области высоких энергий или на изменение в химическом составе первичного излучения. Однако, упрощенный характер предлагаемых теоретических моделей, различие между ними и недостаточная статистическая точность в области высоких энергий и, по существу, отсутствие в области ~ 2 Тэв прямых спектрометрических данных по импульсному спектру и зарядовому отношению не позволяет сделать однозначных выводов.

В заключении приведены основные результаты работы, которые можно сформулировать следующим образом:

I. Методика эксперимента

1. Создана экспериментальная установка для исследования импульсного спектра и зарядового отношения горизонтального потока космических лучей.

2. Предложен и разработан простой и экономичный метод оптических клинзев, позволяющий восстанавливать пространственные координаты частиц в широкоазорных оптических искровых камерах без использования зеркал и стереофотографирования.

3. Решен ряд методических вопросов, связанных с изготовлением больших искровых камер, работающих в условиях высокогорья; с измерением топографии магнитного поля в сплошном железе сердечнике магнита; с временной настройкой 16 сцинтилляционных счетчиков, связанных быстрой схемой совпадения; с пространственной привязкой оптических камер в искровом теле-скопе.

4. Приведен метод расчета светосилы для магнитных спектрометров в зависимости от импульса частиц.

5. Разработана методика съема информации на прецизионном проекторе и соответствующие программы обработки экспериментальных данных на ЭВМ.

6. Разработана методика расчета кинематических характеристик частиц на основании данных, полученных с просмотрного автомата НРД (на ЭВМ ЕС 1020).

II. Физические результаты

1. Измерен дифференциальный импульсный спектр мюонов космических лучей в области энергий 10 ± 2000 Гэв и интервале

зенитных углов от 80° до 90° . Из сравнения с теорией получено, что наилучшее согласие достигается при $\gamma = 2.66 \pm 0.05$ и доля каонов составляет 0.09 ± 0.07 . С увеличением энергии спектр несколько уплощается и при энергии ~ 200 Гэв $\gamma = 2.41 \pm 0.14$.

2. Показана необходимость учета геомагнитных эффектов при измерении импульсного спектра. Так, если показатель наклона дифференциального спектра равен 2.47 ± 0.03 , то учет геомагнитных эффектов приводит к $\gamma = 2.67 \pm 0.05$.

3. Измерена вероятность электромагнитного сопровождения мюонов в зависимости от энергии. Вероятность сопровождения растет и, если при 10 Гэв она составляет $\sim 5\%$, то при 1 Тэв $\sim 23\%$.

4. Указано на важность учета мюонов, идущих с сопровождением при измерении импульсного спектра, особенно в области высоких энергий. Учет сопровождения уплощает спектр, причем, если при 10 Гэв $\Delta\gamma$ равно 0.01, то при 200 Гэв $\Delta\gamma \sim 0.06$.

5. Проведено исследование зарядового отношения в области энергий 30 ± 2000 Гэв. Получено, что зарядовое отношение не зависит от энергии и его интегральное значение в области выше 100 Гэв равно 1.283 ± 0.058 , что находится в хорошем согласии с данными других работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. S.V. Alchudjian, T.L. Asatiani, H.V. Badalian, K.A. Gazarian
G.I. Melikov, M.V. Krishchian, A.N. Prokhorov, V.N. Prokhorov
Canadian Journal of Phys., vol.46, S1169, 1968.
2. Т.Л.Асатиани, Л.В.Алчуджян, Г.В.Бадалян, Г.В.Быданов,
К.А.Газарян, Л.И.Козлинер, В.М.Крицян, Г.Э.Минасян, В.Н.Про-
хоров, К.К.Прохорова, С.В.Тер-Антонян. Научн.сообщ.
ЕФИ-129 (1975)
3. Т.Л.Асатиани, С.В.Алчуджян, Г.В.Бадалян, К.А.Газарян,
Э.В.Григорян, Л.И.Козлинер, В.М.Крицян, Г.И.Меликов, Э.А.Мна-
цакянян, В.С.Саркисян, С.В.Тер-Антонян. Научн.сообщение
ЕФИ-128 (1975)
4. Т.Л. Asatiani, S.V. Alchudjian, K.A. Gazaryan, G.E. Minasyan
L.I. Kozliner, S.V. Ter-Antonyan, V.N. Prokhorov, K.K. Pro-
khorova and A.A. Chilingaryan PICCR, Munchen, 6, 2151.
5. Т.Л.Асатиани, С.В.Алчуджян, К.А.Газарян, Л.И.Козлинер
V.M. Kreshchian, G.S.Martirosyan, S.V. Ter-Antonyan
PICCR, Munchen, 6, 2024, 1975
6. Т.Л.Асатиани, С.В.Алчуджян, К.А.Газарян, Л.И.Козлинер,
Г.С.Мартirosян, С.В.Тер-Антонян. Изв. АН Арм.ССР, Физика,
II, 251, 1976.
7. Т.Л.Асатиани, С.В.Алчуджян, К.А.Газарян, Л.И.Козлинер,
G.S.Martirosyan, S.V.Ter-Antonyan PICCR, Munchen, 6,
1975

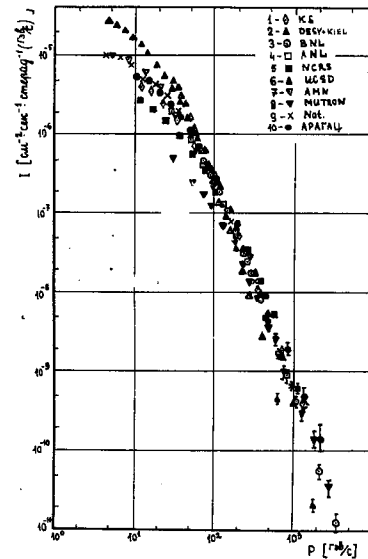


Рис.1 Дифференциальный импульсный спектр

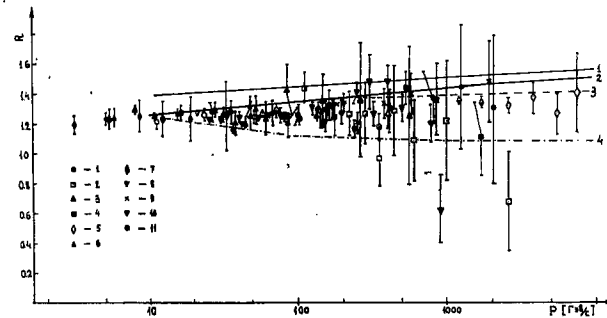


Рис.2 Зарядовое отношение космических мюонов II наши данные

Тех. редактор А.С.Абрамян

Заказ 953

ВФ-03245

Тираж 160

Издано Отделом научно-технической информации
Ереванского физического института, Ереван-36,
пер. Маркаряна 2