

ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

УДК 535.853: 539.126.33: 537.591

МНАЦАКАНЯН ЭДУАРД АПОТОВИЧ

ПРИНЦИПЫ СВЕТОСИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ
СПЕКТРОМЕТРИИ МЮОНОВ ШАЛ

ОГ.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

Ереван - 1989

Работа выполнена в Ереванском физическом институте

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор Т.Л.Асабяни
доктор физико-математических наук, профессор Э.А.Мамиджян

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Ю.Н.Вавилов (ФМ АН СССР)
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Т.Т.Барнавели (ИФ АН Гр.ССР)

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

Защита состоится "30" мая 1989 г. 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 "27" апреля 1989г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время единственным источником получения количественной информации об особенностях адрон-ядерных взаимодействий, а также о потоке первичного космического излучения (ПКИ) при сверхвысоких энергиях ($> 10^{15}$ эВ), является комплексное исследование широких атмосферных ливней (ШАЛ). При этом важными являются детальные исследования пространственно-энергетических характеристик мюонного компонента ШАЛ; особенно актуальными являются исследования мюонов высоких энергий в индивидуальном ливне. Однако с переходом исследования от статистических характеристик ШАЛ к характеристикам индивидуального ливня и к более высоким энергиям первичного излучения становится необходимым создание комплексных установок больших площадей и объемов, в том числе светосильных магнитных спектрометров мюонов, превышающих по светосиле существующие в десятки раз. В составе экспериментального комплекса АНИ, создаваемого в настоящее время на в/с "Арагац" ЕрФИ, сооружается магнитный спектрометр мюонов со светосилой $21 + 33 \text{ м}^2 \text{ ср}$ (светосила существующих магнитных спектрометров мюонов в ШАЛ не превышает $0,2 \text{ м}^2 \text{ ср}$). Актуальным в настоящее время является также поиск прямых (быстрых) каналов генерации мюонов высоких энергий в космических лучах. В этой связи особый интерес представляет возможность измерения энергий каждого мюона в группе при помощи магнитного спектрометра с большой площадью. Как было показано в работе /13/, вопрос о прямой генерации мюонов может быть решен путем исследований на единой светосильной установке

как вертикальных, так и горизонтальных мюонов. Такая возможность позволяет эффективнее использовать светосильный магнитный спектрометр, предназначенный для исследования мюонов в ШАЛ. Однако при создании и эксплуатации уникального по масштабам и возможностям светосильного магнитного спектрометра мюонов неизбежно возникает ряд проблем принципиального характера, не имеющих место при создании малых спектрометров. Необходимость постановки и решения этих задач появилась в связи с разработкой и созданием светосильного магнитного спектрометра экспериментального комплекса АНИ - "АНИМАГ".

Цель работы состояла в:

1) развитию метода магнитной спектрометрии мюонов и разработке принципиальной схемы светосильного широкоапертурного замкнутого (твердотельного) магнитного спектрометра, позволяющего исследовать с высокой эффективностью, как множественные события мюонов в ШАЛ, так и горизонтальный поток мюонов;

2) разработке и обосновании метода, обеспечивающего возможность определения распределения интеграла по полю в больших объемах ферромагнетиков светосильных магнитных спектрометров мюонов;

3) исследовании эффекта возникновения ложных траекторий при пространственном восстановлении траектории множественных событий, регистрируемых многослойными координато-чувствительными детектирующими системами;

4) исследовании путем моделирования характеристик и экспериментальных возможностей магнитного спектрометра АНИ.

Новизна работы. Предложена и разработана новая принципиальная схема светосильного широкоапертурного магнитного спектрометра мюонов, которая позволяет впервые провести одновременные исследования на единой установке как вертикального, так и горизонтального потока мюонов, а также повторно измерять импульсы одной и той же частицы вертикального потока. Предложен и обоснован новый метод определения интеграла по полю светосильных замкнутых магнитных спектрометров мюонов, основанный на использовании вертикального потока мюонов космических лучей. Впервые исследован эффект возникновения ложных траекторий при пространственном восстановлении траекторий множественных событий, регистрируемых многослойными координато-чувствительными детектирующими системами, и получены аналитические выражения, связывающие число ложных траекторий с параметрами детектирующей системы и плотностью потока частиц.

Научная и практическая ценность работы. Предложенная новая принципиальная схема светосильного широкоапертурного магнитного спектрометра значительно расширяет экспериментальные возможности метода магнитной спектрометрии мюонов космического излучения. На основе предложенной схемы разработан и в настоящее время сооружается на в/с "Арагац" ЕРФИ магнитный спектрометр комплекса АНИ с рабочей площадью 42 м^2 и светосилой $21-33 \text{ м}^2 \text{ ср}$ по вертикальному направлению и $2 \times 11 \text{ м}^2$, $2 \times 1,5 \text{ м}^2 \text{ ср}$ по-горизонтальному. Предложенный метод определения интеграла по полю обеспечивает измерение интеграла по полю в больших объемах ферромагнетика светосильных магнитных спектрометров мюонов. В частности, в случае спектрометра АНИ обеспечивается точность не

хуже 10%. Использование полученных аналитических выражений позволяет на практике произвести оптимальный выбор параметров детектирующей системы, минимизирующий число ложных траекторий, а также учитывать их влияние на экспериментальные результаты.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при создании и эксплуатации светосильных магнитных спектрометров мюонов космического излучения, а полученные аналитические выражения о числе ложных траекторий могут быть использованы также при создании и эксплуатации многослойных детектирующих систем, предназначенных для регистрации событий с большой множественностью.

Апробация работы. Результаты, приведенные в диссертации, докладывались на Международных конференциях по космическим лучам (Париж, 1981; Бангалор, 1983), на Всесоюзных рабочих совещаниях АНИ (1980-1984 гг.), а также на семинарах ЕРФИ.

Потеме диссертации опубликовано 12 работ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 129 страниц машинописного текста, 27 рисунков и 17 таблиц. Список литературы содержит 91 наименование.

Автор диссертации защищает:

I. Принципиальную схему светосильного широкоапертурного замкнутого магнитного спектрометра, обеспечивающую, одновременное исследование мюонов, как вертикального, так и горизонтального потока космических лучей, а также повторное измерение импульса одной и той же частицы вертикального потока.

2. Метод определения интеграла по полю в больших объемах ферромагнетиков светосильных магнитных спектрометров, основанный на использовании вертикального потока мюонов космического излучения. Результаты моделирования применения этого метода к определению интеграла по полю магнитного спектрометра АНИ.

3. Результаты исследования эффекта возникновения ложных траекторий при пространственном восстановлении траекторий множества частиц, регистрируемых многослойными координато-чувствительными детектирующими системами—аналитические выражения зависимостей числа ложных траекторий от параметров детектирующей системы и от плотности потока частиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность исследования методом магнитной спектрометрии пространственно-энергетических характеристик высокоэнергичных (≥ 1 ТэВ) мюонов в индивидуальном ШАД, измерения энергии каждого мюона в многомюонных событиях (мюонных пар, групп мюонов) в широком диапазоне зенитных углов и, в связи с этим, обосновывается актуальность настоящей работы.

В первой главе рассмотрены особенности принципиальной схемы (см. рис. I), лежащей в основе существующих магнитных спектрометров мюонов космического излучения.

Указан ряд причин, показывающих нецелесообразность применения этой схемы при создании спектрометров, превышающих по светосиле существующие в десятки раз. С целью повышения эффективности и расширения экспериментальных возможностей метода магнитной спектрометрии мюонов предложена новая принципиальная схема свето-

равной 2,7 м, составляет: $S\Omega_I = 21 \text{ м}^2\text{ср}$; $S\Omega_{II} = 22 \text{ м}^2\text{ср}$; в режиме двукратного измерения импульса одной и той же частицы $S\Omega_{I,II} = 10 \text{ м}^2\text{ср}$; общая светосила в режиме однократного измерения $S\Omega_{0,5} = 33 \text{ м}^2\text{ср}$. Максимальный зенитный угол регистрации для I и II - 45° , для режима двукратного измерения - 33° . Максимальный измеримый импульс вертикального канала I, в случае использования ШИК, составляет $P_{\text{max}} \approx 3,4 \text{ ТэВ/с}$.

Приводятся результаты оценки числа стволов ШАЛ за год, падающих на расстоянии $< 1 \text{ м}$ и $< 5 \text{ м}$ от края спектрометра, для различных значений первичной энергии E_0 . При $E_0 = 10^{15} \text{ эВ}$ число стволов составляет $2 \cdot 10^3$ и $5,2 \cdot 10^3$, а при $E_0 = 10^{16} \text{ эВ}$ - 40 и 10^2 соответственно.

Приводятся зависимости отношения среднеквадратичной флуктуации угла отклонения $\delta_{\Delta\varphi}$ к углу магнитного отклонения $\Delta\varphi$ от импульса мюонов для различных значений координатных ошибок. Отношение угла многократного рассеяния к углу магнитного отклонения составляет $\sim 0,15$.

Приводится, по результатам моделирования, эффективность идентификации F мюонных траекторий для различных значений плотности мюонов в случае использования ШИК. Показано, что при значении плотности мюонов вплоть до 20 м^{-2} идентификация мюонных траекторий осуществляется с достаточно высокой эффективностью (70%).

В первой главе приводится также описание горизонтального канала "АНИМАГ". Отношение угла многократного рассеяния к углу магнитного отклонения - 0,04, интервал зенитных углов - $75-90^\circ$, азимутальных - $\pm 17^\circ$, максимальная светосила - $1,5 \text{ м}^2\text{ср}$ с каж-

дой стороны. В качестве координатных детекторов предполагается использование многопроволочных камер с шагом намотки 1 мм. Расстояние между камерами в каждом из плеч может варьироваться в пределах от 2 до 6 м. Благодаря тому, что спектрометр находится в подземном помещении на склоне горы, значительная доля мюонов с энергией ниже пороговой отсекается горным массивом. Пороговая энергия в направлении север-юг составляет 6-15 ТэВ, а в направлении юг-север 15 ТэВ.

Приводятся результаты моделирования по влиянию юстировочных ошибок координатных детекторов на точность измерения импульсов мюонов. Показано, что для минимально достижимых значений юстировочных ошибок $P_{\text{max}} \approx 10 \text{ ТэВ/с}$, а максимально достигаемая величина $P_{\text{max}} \approx 30 \text{ ТэВ/с}$ при базе 6 м.

Приводятся ожидаемые интенсивности мюонов и оценки ожидаемой интенсивности многомюонных событий разной кратности за год.

Вторая глава посвящена методу определения интеграла по полю в больших объемах ферромагнетиков светосильных магнитных спектрометров мюонов. Рассматривается влияние точности определения интеграла по полю на точность определения импульса мюонов. Предельная точность определения импульса мюонов при малых значениях импульса ($\leq 200 \text{ ТэВ}$) обусловлена в основном многократным рассеянием в теле магнита и составляет для "АНИМАГ" $\sim 0,15$ (15%). Показано, что при определении интеграла по полю с точностью $\sim 10-15\%$, предельная точность определения импульса ухудшается незначительно и составляет $\sim 0,18-0,2$, а при импульсах $\geq 200 \text{ ТэВ}$ это влияние еще меньше.

Приводится подробный анализ условий применимости существу-

ющих (индукционных) методов определения интеграла по полю.

Показан ряд трудностей принципиального и практического характера применения индукционного метода в случае больших значений объема ферромагнетика и индуктивности магнита ($V = 360 \text{ м}^3$; $L_{\text{min}} = 1,5 \text{ Гн}$ для "АНИМАГ"). Для успешного применения индукционного метода, требующего изменения магнитного потока путем коммутации намагничивающего тока, необходимо, чтобы общее время установления магнитного потока, соответственно, время измерения $t_{\text{из}}$, удовлетворяло следующему условию $t_{\text{из}} \leq K_{\gamma} \tau_{\chi}$, где K_{γ} коэффициент, зависящий от заданной величины допустимой динамической погрешности γ , τ_{χ} - характерное время средства измерения (время интегрирования, время "сползания" или время "дрейф нуля"). Показано, что в случае магнитного спектрометра АНИ время установления потока составляет $2 \cdot 10^3$ сек, намного превышающее характерное время современных средств измерения ($K_{\gamma} \tau_{\chi} \sim 60$ сек для веберметра $\Phi 190$, и $K_{\gamma} \tau_{\chi} \sim 180$ сек для цифрового веберметра $\Phi 5050$), что далеко не удовлетворяет условию малости времени установления магнитного потока. Таким образом, для успешного применения индукционного метода в случае больших объемов ферромагнетика (в частности, в случае "АНИМАГ") требуются средства измерения с характерным временем порядка одного часа, разработка которых сама по себе представляет собой сложную задачу. Что касается практических трудностей применения индукционного метода, то они связаны с необходимостью, в любом случае, создания в теле магнитопровода большого количества канавок с измерительными катушками (по 160 штук в каждой рабочей зоне "АНИМАГ") и проведения большого числа коммутаций

намагничивающего тока в 2500А (по 500 раз для каждой зоны). С целью преодоления указанных трудностей предлагается новый метод определения интеграла по полю, базирующийся на ином принципе, нежели индукционный метод. Сущность предложенного метода заключается в использовании в качестве меры интеграла по полю степени изменения под влиянием магнитного поля интенсивности вертикального потока мюонов космического излучения, проходящих сквозь исследуемый участок магнита и наблюдаемых в заданном телесном угле Ω . В качестве установки, обеспечивающей измерение интенсивности мюонов в Ω , рассматривается телескоп из четырех детекторов, расположенных по два с каждой стороны измеряемой области магнитного поля. В этом случае задача определения зависимости интенсивности мюонов от интеграла поля сводится к определению зависимости числа четырехкратных совпадений N^{4x} от интеграла поля $\int B dl$. С целью выяснения принципиальной возможности и практической осуществимости предложенного метода проводится моделирование (методом Монте - Карло) прохождения мюонов через телескоп и ферромагнетик при различных значениях поля. В результате моделирования находится зависимость $\langle N^{4x} \rangle$ от $\int B dl$. При моделировании использованы результаты работы /14/ по измерению спектра мюонов вертикального потока на высоте 3200 м над уровнем моря (гора Арагац) в интервале импульсов $2 + 100 \text{ ГэВ/с}$. Моделирование проведено с учетом потерь энергии мюонами в веществе над магнитом "АНИМАГ", в теле магнитопровода (ферромагнетика) и в детекторах, а также с учетом многократных рассеяний в ферромагнетике. В работе приводятся входные данные программы моделирования. Выходной величиной

программы является среднее число четырехкратных совпадений $\langle N^{4x} \rangle$ при величине двухкратных совпадений N^{2x} , меняющейся от $4 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ с шагом $2 \cdot 10^4$. $\langle N^{4x} \rangle$ вычислялось для различных значений магнитного поля от 0 до 2.0 Тл, расстояния между первым и вторым детекторами Z_1 , расстояния между третьим и четвертым детекторами Z_2 и площади детектора $S = 0,25$; $1,0 \text{ м}^2$. На основе полученных зависимостей $\langle N^{4x} \rangle$ от $\int B dl$ (рис. 5) вычисляются возможные относительные погрешности ϵ_1 и ϵ_2 определения значения интеграла по полю "АНИМАГ", равного 3,24 Тл.М. ϵ_1 и ϵ_2 определяются следующим образом:

$$\epsilon_1 = \delta_1 / 3,24; \quad \epsilon_2 = \delta_2 / 3,24$$

где δ_1 и δ_2 - отклонения величины $\int B dl$, соответствующие двум стандартным отклонениям $\sigma = \sqrt{\langle N^{4x} \rangle}$ средней величины четырехкратных совпадений $\langle N^{4x} \rangle$ при значении $\int B dl = 3,24 \text{ Тл.М}$. Приводятся результаты вычисления ϵ_1 и ϵ_2 для различных значений Z_1 , Z_2 , N^{2x} и S , а также значения времени измерения, необходимого для набора заданных значений N^{2x} . Эти результаты показывают, что при $S = 1 \text{ м}^2$, $Z_1 = 1,5 \text{ м}$ и $N^{2x} = 2 \cdot 10^5$ проведение измерения в течение 3,16 часа обеспечивает определения величины интеграла по полю с ошибкой менее 5%, а при $S = 0,25 \text{ м}^2$ потребуется ~ 20 часов измерения для обеспечения такой же точности. Однако в этом случае исследование пространственного распределения $\int B dl$ можно провести со значительно меньшим шагом, чем в случае $S = 1,0 \text{ м}^2$. Рассматриваются влияния различных факторов на результаты моделирования, с учетом которых общая погрешность определения ин-

теграла по полю в рабочих зонах "АНИМАГ" составляет $\sim 10\%$.

В третьей главе проведено исследование эффекта возникновения ложных траекторий при пространственном восстановлении траекторий множественных событий, регистрируемых многослойными координато-чувствительными детектирующими системами.

Число одновременно упавших на спектрометр "АНИМАГ" мюонов составляет $200 + 400$ при энергиях $10^{14} - 10^{17}$ эВ и расстоянии от оси ШАЛ $\lesssim 10 \text{ м}$. При пространственном восстановлении траекторий столь большого количества частиц число восстановленных траекторий может оказаться больше, чем число истинных, за счет случайных (ложных) "сшиваний" координат разных частиц из разных слоев в одну линию, вследствие наличия ошибок определения координат частиц. Указывается на необходимость оценки числа ложных траекторий для учета их влияния на результаты эксперимента и оптимального выбора параметров детектирующей системы. В связи с отсутствием количественных соотношений о числе ложных траекторий ставится и решается задача о получении аналитических выражений зависимостей среднего числа ложных траекторий от параметров детектирующей системы и от плотности потока частиц. Задача решается для случая регистрации траекторий в одной проекции (двумерный случай) и для случая регистрации в двух проекциях (трехмерный случай).

1. Двумерный случай. Рассматривается детектирующая система с общей высотой H , длиной L и состоящая из m слоев детекторов с ошибками измерений одной координаты частиц $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \dots, \sigma_{x_m}$. Определяется вероятность образования траекторий под углом α относительно оси Ox , совпадающей с

первым слоем детекторов, в интервале длины $(x_1, x_1 + dx_1)$ и угла $(\alpha, \alpha + d\alpha)$, при регистрации каждым слоем потока с линейными плотностями $\bar{n}_1, \bar{n}_2, \dots, \bar{n}_m$

$$dP' = \sum_{\substack{i < j \\ j=2}}^m \bar{n}_i \bar{n}_j \frac{1}{\sin^2 \alpha} d\alpha dx_1 |h_i - h_j| \prod_{\substack{k+i \\ k+j}} [1 - \exp(-\Delta x_k \bar{n}_k)], \quad (1)$$

где h_i и h_j - расстояния i -ого и j -ого слоев от первого слоя, $\Delta x_k = 2 \sigma_{\text{чк}}$ ($k = 1, 2, \dots$). Затем, интегрируя (1) по α , находится вероятность образования траектории, проходящей через случайно выбранный малый интервал dx_1 со всех возможных направлений

$$dP = L \frac{1}{H} dx_1 \sum_{\substack{i < j \\ j=2}}^m \bar{n}_i \bar{n}_j |h_i - h_j| \prod_{\substack{k+i \\ k+j}} [1 - \exp(-\Delta x_k \bar{n}_k)]. \quad (2)$$

Далее, учитывая, что эту же вероятность можно представить как $\bar{n}_n dx_1$, где \bar{n}_n - средняя плотность ложных траекторий, и выражая h в единицах H , т.е. $h = RH$, где $R < 1$, получается среднее число \bar{N}_n ложных траекторий, образованных по всей длине детектирующей системы

$$\bar{N}_n = L^2 \sum_{\substack{i < j \\ j=2}}^m \bar{n}_i \bar{n}_j |R_i - R_j| \prod [1 - \exp(-\Delta x_k \bar{n}_k)]. \quad (3)$$

В случае, когда пространственные разрешения всех детекторов одинаковы (ΔX) и плотности падающих частиц на всех слоях равны (\bar{n}):

$$\bar{N}_n = L^2 \bar{n}^2 [1 - \exp(-\Delta x \bar{n})]^{m-2} \sum_{\substack{i < j \\ j=2}}^m |R_i - R_j| \quad (4)$$

При равномерном расположении детекторов, т.е. $R_i = \frac{i-1}{m-1}$, $R_i = \frac{j-1}{m-1}$

$$\bar{N}_n = \frac{1}{6} m(m+1) \bar{n}^2 L^2 [1 - \exp(-\Delta x \bar{n})]^{m-2} \quad (5)$$

В случае же $\Delta x \bar{n} \ll 1$

$$\bar{N}_n \approx \frac{1}{6} m(m+1) \bar{n}^2 L^2 \Delta x^2 \quad (6)$$

2. Формулируется задача для трехмерного случая и приводится вывод выражения числа ложных траекторий в этом случае

$$\bar{N}_n = S^2 \sum_{\substack{i < j \\ j=2}}^m \bar{\rho}_i \bar{\rho}_j (R_i - R_j)^2 \prod [1 - \exp(-\bar{\rho}_k \Delta S_k)]. \quad (7)$$

где S - площадь детектирующей системы, $\bar{\rho}$ - плотность потока частиц, $\Delta S = \Delta X \Delta Y$ - пространственное разрешение по двум координатам.

В случае, когда $\bar{\rho}_1 = \bar{\rho}_2 = \dots = \bar{\rho}_m = \bar{\rho}$, $\Delta S_1 = \Delta S_2 = \dots = \Delta S_m = \Delta S$, $\bar{\rho} \Delta S \ll 1$ и равномерного расположения слоев,

$$\bar{N}_n = \frac{1}{12} m^2 \frac{m+1}{m-1} \bar{\rho}^m S^2 \Delta S^{m-2} \quad (8)$$

Приводятся численные результаты о ложных траекториях в условиях "АНИМАГ", вычисленные при помощи полученных выражений для различных значений параметров детектирующей системы и плотности потока мюонов. Показано, что при близких к реальным значениям пространственного разрешения детекторов и плотности потока мюонов число ложных траекторий может значительно превышать число истинных: так, при $\sigma_x = 0,5$ мм и $\bar{p}_\mu = 2$ м⁻², среднее число мюонов, падающих на "АНИМАГ", составляет $\bar{N}_\mu = 80$, а число ложных траекторий $\bar{N}_f = 140$ при количестве слоев $m = 3$, и $\bar{N}_f = 4$ при $m = 4$, а при $\bar{p}_\mu = 5$ м⁻², $\bar{N}_\mu = 200$, $\bar{N}_f = 2071$ при $m = 3$, $\bar{N}_f = 94$ при $m = 4$, и $\bar{N}_f = 4$ при $m = 5$.

В четвертой главе изучаются характеристики и экспериментальные возможности спектрометра "АНИМАГ" при помощи имитационной модели. Приводится описание имитационной модели, которая имеет два режима: 1) генерацию и моделирование прохождения мюонов и групп мюонов через спектрометр; 2) генерацию ШАЛ и моделирование регистрации мюонов ШАЛ спектрометром. Генерация ШАЛ с энергией больше 10^{12} эВ осуществлялась с помощью программы, разработанной в ФИАН. Приведено число зарегистрированных и идентифицированных мюонных групп с числом мюонов n_μ при различных значениях числа мюонов в группах n_μ , на первый слой детекторов. Вероятность $W(n_\mu' = n_\mu)$ зарегистрировать и идентифицировать полное число частиц в группе, падающей на первый слой детекторов спектрометра, составляет $0,57 \pm 0,006$ при $n_\mu = 1 + 50$. Приведены данные по имитации эксперимента в режиме работы с программой ШАЛ. Показаны

распределения мощности (кратности) групп; приведены также средние значения и дисперсии распределений.

Рассматривается также ряд экспериментальных возможностей "АНИМАГ":

1. Возможность измерения энергетического спектра мюонов ШАЛ определялась на основе генерации 10^4 событий по программе ШАЛ в диапазоне $10^{15} - 10^{16}$ эВ на уровне места расположения спектрометра (3200 м) и при условии попадания оси ШАЛ на ионизационный калориметр (40 x 40 м²) комплекса "АНИ". Степень искажения энергетического спектра, обусловленного ошибками измерения и восстановления траекторий мюонов для значений энергии мюонов 13,60,300,1500 ГэВ, составляет $\partial T(E)/\partial E$: $\partial T(E')/\partial E' = 93, 1.09, 1.04, 0.99$, соответственно, где $\partial T(E)/\partial E$ - дифференциальный спектр мюонов ШАЛ, $\partial T(E')/\partial E'$ - "измеренный" энергетический спектр.

2. Определение направления оси ШАЛ получено тремя способами (при $P_{max} = 3,3$ ТэВ/с): а) при помощи траектории наиболее энергичного мюона - точность составляет $\sigma_\theta = 3,7 \cdot 10^{-3}$ рад; б) при помощи "средневзвешенного" значения угла мюонов, проходящих через спектрометр - $\sigma_\theta = 3,8 \cdot 10^{-3}$ рад; в) при помощи среднего значения зенитных углов мюонов до магнитного спектрометра - $\sigma_\theta = 4,5 \cdot 10^{-3}$

3. Указывается, что благодаря большой светосиле "АНИМАГ" впервые становится возможным измерение прямым методом энергии индивидуального мюона в паре и в группе, что позволяет определить эффективную массу мюонных пар с точностью $\sim 20 + 30\%$ в интервале масс 2-10 ГэВ и энергии мюонов 10-500 ГэВ.

Указывается также на возможность исследования мюонных семейств, определения сечения взаимодействия протонов с ядрами воздуха (при условии обеспечения $P_{max} \geq 4 + 5$ ТэВ/с, точности восстановления оси ШАЛ $\Delta \ell \leq 0,25$ м, исследования анизотропии и поиска локальных источников космических лучей.

В заключении кратко приведены основные результаты диссертации:

1. Предложена новая принципиальная схема светосильного замкнутого магнитного спектрометра мюонов, преимущества которой относительно традиционной схемы заключается в том, что она обеспечивает:

- почти вдвое большую светосилу при прочих равных условиях;
- возможность одновременного исследования как вертикального, так и горизонтального потока мюонов;
- возможность повторного измерения импульса одной и той же частицы, что повышает точность определения импульса в $\sim 1,4$ раза и достоверность определения заряда мюонов;
- высокую технологичность при создании крупных светосильных спектрометров.

2. На основе предложенной схемы разработан и в настоящее время сооружается на в/с "Арагац" светосильный магнитный спектрометр в составе экспериментального комплекса "АНИ" для всестороннего исследования мюонного компонента ШАЛ и мюонов горизонтального потока.

3. Предложен новый способ определения интеграла по полю в больших объемах ферромагнетиков светосильных замкнутых спектро-

метров, основанный на использовании вертикального потока мюонов космического излучения. Показано, путем моделирования, что в условиях спектрометра "АНИ" с объемом ферромагнетика ~ 360 м³ этот способ обеспечивает точность определения интеграла по полю не хуже 10%.

4. Показано, что при пространственном восстановлении траекторий частиц, генерируемых с большой множественностью и регистрируемых многослойными координатно-чувствительными детекторами, наряду с истинными возникают и ложные траектории. Впервые получены аналитические зависимости числа ложных траекторий от параметров детектирующей системы, от плотности потока частиц, а также от взаимного расположения детекторов как для двухмерного, так и для трехмерного случаев. С использованием полученных результатов к магнитному спектрометру "АНИ" даны конкретные рекомендации по выбору параметров детектирующей системы спектрометра (количество и взаимное расположение слоев) для заданных значений координатной точности детекторов и допустимой величины доли ложных траекторий.

5. Показаны экспериментальные возможности светосильного широкоапертурного магнитного спектрометра "АНИ" по исследованию пространственно-энергетических характеристик мюонов ШАЛ. Показано, что экспериментальные возможности спектрометра "АНИ" позволяют исследовать также ряд других вопросов:

- определение зенитного угла оси ШАЛ при помощи траектории наиболее энергичного мюона;
- определение эффективной массы частиц, ответственных за образование пар прямых мюонов;

- определение сечения неупругого взаимодействия протонов с энергией $\sim 10^3$ ТэВ с ядрами воздуха.

Публикации по материалам диссертации

1. Данилова Т.В., Дунаевский А.М., Ерлыкин А.Д., ..., Мнацаканян Э.А. и др. Проект эксперимента по исследованию взаимодействий адронов в области энергий $10^3 - 10^5$ ТэВ (эксперимент "АНИ"). - Изв.АН Арм.ССР, сер.физ., 1982, т.17, вып.3-4. с. 129-231.
2. Danilova T.V., Erlykin A.D., Asatiani T.L., ..., Mnatsakanian E.A. et al. On the possibility of investigating the EAS muon energy spectra on the "ANI" magnetic spectrometer - Proc. 18th ICRC, Bangalore, 1983, Vol. 8, p. 104.
3. Асатиани Т.Л., Иванов В.А., Мнацаканян Э.А. Магнит мюонного спектрометра эксперимента "АНИ". - Вопросы атомной науки и техники, сер.техн.физ.экспер., вып. 2(8), 1981, с.77
4. Asatiani T.L., Ivanov V.A., Mnatsakanian E.A. Large acceptance magnetic spectrometer for EAS investigation. - Proc. 17th ICRC, Paris, 1981, Vol. 8, p. 126.
5. Асатиани Т.Л., Иванов В.А., Мнацаканян Э.А. и др. Имитационная модель магнитного спектрометра "АНИМАГ". - ВАНТ, сер. техн.физ.экспер., 1983, вып.5(17), с.65-70.
6. Асатиани Т.Л., Иванов В.А., Мнацаканян Э.А. Магнитный спектрометр мюонов установки "АНИ". - ВАНТ, сер.техн.физ.экспер., 1981, вып. 2(8), с. 83-86.

7. Асатиани Т.Л., Иванов В.А., Мнацаканян Э.А. и др. Использование магнитного спектрометра "АНИ" для исследования горизонтального потока мюонов космического излучения. - ВАНТ, сер. техн.экспер., 1983, вып. I(13), с. 85-89.

8. Асатиани Т.Л., Иванов В.А., Мнацаканян Э.А., Тер-Антонян С.В. О возможной программе исследования мюонов в ШАЛ с энергиями $10^2 - 10^6$ ТэВ. - ВАНТ. 1982, вып.3(12), с. 79-89.

9. Мнацаканян Э.А., Тер-Антонян С.В., Мартirosян П.А. Об одной возможности определения интеграла по полю магнитных спектрометров мюонов. - Ереван, 1988. - 39 с. (Препринт/Ереванск. физич.ин-т: БФИ-1058(21)-88).

10. Мнацаканян Э.А. Возникновение ложных траекторий в многослойных детектирующих системах и их количественный анализ. Ереван, 1987. - 20 с. (Препринт/Ереванск.физич.ин-т: БФИ-986(36)-87).

11. Danilova E.V., Danilova T.V., Dunaevskii A.M., ..., Mnatsakanian E.A. et al. The ANI installation for the study of the interactions of hadrons and nuclei in the energy range $10^3 - 10^5$ TeV. - Proc. 18th ICRC, Bangalore, 1983, V.5, p.527.

12. Авакян В.В., Горяка А.П., Геворкян С.Р., ..., Мнацаканян Э.А. и др. Определение σ_{prod}^{p-air} в эксперименте "АНИ" для интеграла энергий протонов $10^3 - 10^5$ ТэВ. - ВАНТ, сер.техн.физ.экспер., 1986, вып.3(29), с.57-71.

Цитируемая литература

13. Нечин Ю.А., Христиансен Г.Б. О острой генерации мюонов при ядерном взаимодействии космических лучей сверхвысоких энер-

гий. Изв. АН СССР, сер. физ., 1980, т. 44, №3, с. 640-642.
14. Кочарян Н.М., Саакян Г.С., Айвазян М.Г. Энергетический
спектр μ -мезонов на высоте 3200 м над уровнем моря.-
ДАН АрмССР, 1957, 24, с. 49-167.

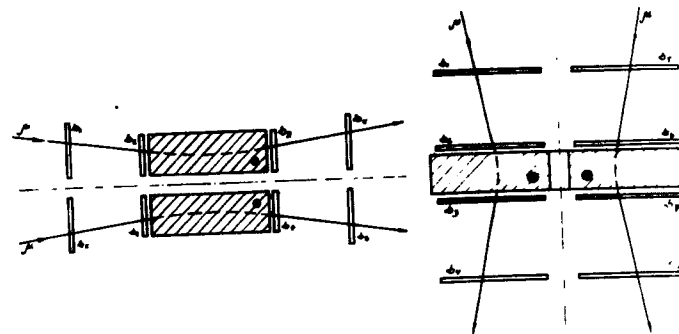


Рис. I Принципиальные схемы существующих магнитных спектрометров для исследования:

- а) горизонтального; б) вертикального потока мезонов.

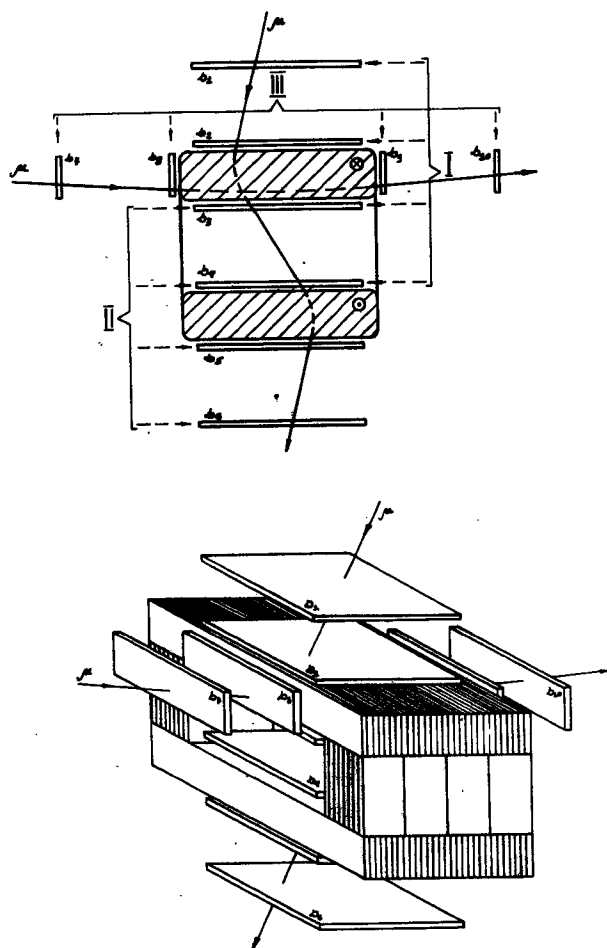


Рис. 2 Принципиальная схема светосильного широкоапертурного магнитного спектрометра

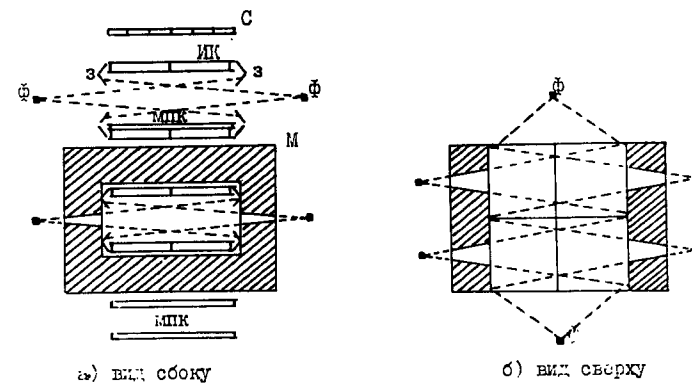


Рис. 3 Расположение детекторов спектрометра и система фотографирования (С - сцинтилляционные счетчики; ИК - искровые камеры; З - зеркала; Ф - фоторегистраторы; МПК - многопроволочные камеры; М - магнит)

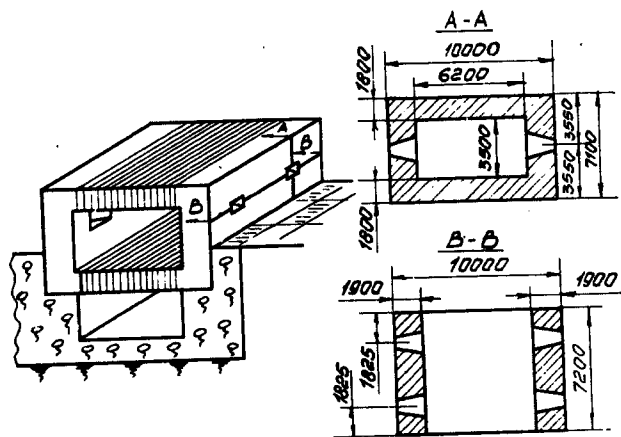


Рис. 4 Общий вид, сечения и размеры замкнутого магнита спектрометра

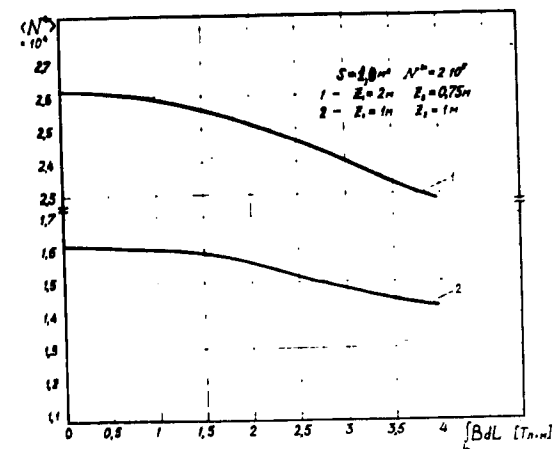
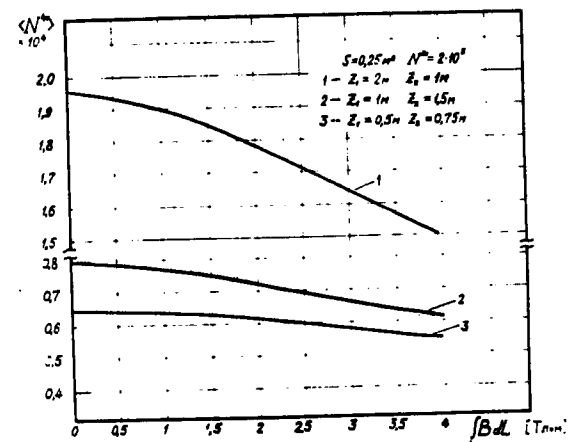


Рис. 5 Зависимости среднего числа четырехкратных комбинаций $\langle N^4 \rangle$ от величины интеграла по полю для различных значений S , N^2 , Z_1 , Z_2 .