

ЕФИ-710(25)-84

индекс 3624

---

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИНФОРМАЦИИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО АТОМНОЙ НАУКЕ И ТЕХНИКЕ  
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

Л.И.КОЗЛИНЕР, А.К.ПОГОСЯН, С.В.ТЕР-АНТОНЯН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МЮОНОВ ЧЕРЕЗ  
АРАГАЦКИЙ МАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР



ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЕРЕВАН-1984

Мюонные потоки космических лучей имеют атмосферное происхождение и обусловлены взаимодействием первичной компоненты с веществом атмосферы. Следовательно, интенсивность, зарядовый состав, угловое распределение и энергетический спектр мюонов целиком определяются характером взаимодействий и составом первичного пучка. Задаваясь какой-либо теоретической моделью генерации и сравнивая её с измеренным энергетическим спектром мюонов, можно делать выводы о процессах взаимодействия между первичным адроном и ядрами молекул воздуха [1-3].

Логарифмическое изменение плотности атмосферы с высотой приводит к зависимости среднего свободного пробега и вероятности распада вторичных частиц от зенитного угла. Особенный интерес представляют области энергий  $10^{11}$  -  $10^{12}$  эВ, когда распадный фактор пионов и каонов становится сравним с вероятностью их взаимодействия и сравнение энергетических спектров мюонов под разными зенитными углами дает информацию о процессах их образования ( $K/\pi$  - отношений) [3-4].

Измерение энергетического спектра мюонов ведется как прямым

методом — с помощью магнитного спектрометра [5,6] —, так и косвенным, по спектру вторичных частиц, созданных при прохождении мишеней калориметра [4,7].

Несмотря на кажущуюся простоту метода магнитного спектрометра, когда энергия частицы определяется по её отклонению в магнитном поле, при восстановлении падающего энергетического спектра по измеренному встречаются значительные трудности.

Обычно при анализе используют не импульсный спектр, а связанный с ним спектр отклонений. Этот спектр корректируется с учетом характеристик спектрометра и поправок и сравнивается с каким-либо теоретическим спектром, характеризуемым параметром  $\chi$  [8,9]. Выбранное значение  $\chi$  должно соответствовать лучшему совпадению спектров.

Учет всех искажений, вносимых в измеряемый энергетический спектр Арагацким магнитным спектрометром (МС), достаточно сложная задача. Наиболее эффективным методом корректного учета влияния параметров установки нам представлялся метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). Арагацкий МС состоит из электромагнита со сплошным железным сердечником, выделяющей системы и четырех искровых камер (по две камеры до и после магнита) [10-11].

#### Структура программы

Программа написана для ЭВМ БЭСМ-6 и обладает быстродействием при малом объеме занимаемой памяти. При создании программы учитывалась как специфика генерации частиц под большими зенитными углами, так и специфика работы с БЭСМ-6. Поэтому система координат, используемая для имитационного эксперимента, была

выбрана в виде, представленном на рис. I. Используемые параметры были связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} m &= R \cos \vartheta & \rho &= R \sin \vartheta & \sin \varphi &= \cos \vartheta / \sin \vartheta' \\ \cos \vartheta' &= h/R = \sin \vartheta \cdot \cos \varphi' & & & \varphi' &= 270^\circ - \varphi \\ L &= R \sin \vartheta & m &= R \cdot \cos \vartheta & h &= L \cdot \cos \varphi' \end{aligned}$$

Зенитно-угловая зависимость падающего потока представлялась так:

$$W(\vartheta) \quad J(\vartheta) = J_0(\vartheta_{min}) \cos^p \vartheta \quad (\vartheta_{min} = 80^\circ)$$

Тогда вероятность прихода мюона под углом  $\theta$

$$W(\vartheta) d\vartheta = \cos^p \vartheta \cdot \sin \vartheta \cdot d\vartheta. \quad (I)$$

Значение параметра  $p$  находится в интервале  $0 \leq p \leq 1$  и было определено методом последовательных приближений.

Алгоритм программы был составлен следующим образом:

1. Блок начальных данных.
2. Генерация мюонов.
3. Прохождение мюонов через МС с учетом потерь энергии в веществе магнита и многократное рассеяние.
4. Влияние ошибок эксперимента.
5. Восстановление траектории прохождения мюонов через МС и контроль событий по критериям отбора (критерии непрерывности траектории в двух проекциях)
6. Накопление данных.
7. Статистический анализ.

Рассмотрим подробнее этапы программы.

1. В блоке данных задавались следующие величины (которые можно легко менять, что делает программу универсальной): размеры магнита, размеры искровых камер, расстояния между отдельными узлами МС, значение индукции магнитного поля, пределы измене-

ния углов  $\vartheta$  и  $\varphi$ , координат  $x$  и  $y$ , энергия мюонов  $E_\mu$ , а также координаты уровней и количество вещества. Для упрощения программы прохождение мюонов через спектрометр интерпретировалось как прохождение через 10 уровней, отличающихся друг от друга веществом и наличием поля.

2. Моделирование параметров падающих на МС мюонов осуществлялось по алгоритму фон Неймана с использованием генератора случайных чисел с равномерным распределением (RNDM) [12]. Генератор зенитных углов был основан на соотношении

$$\xi = \int_{\vartheta_{\min}}^{\vartheta} W(\vartheta) d\vartheta / \int_{\vartheta_{\min}}^{\vartheta_{\max}} W(\vartheta) d\vartheta \quad (\vartheta_{\max} = \pi/2),$$

это выражение легко разрешается относительно  $\vartheta$ :

$$\cos \vartheta = \left[ \xi \cos^{\rho+1} \vartheta_{\min} \right]^{1/(\rho+1)}$$

3. Прохождение мюонов через МС моделировалось следующим образом. Исходя из пространственных параметров  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $\vartheta_i$ ,

$\varphi_i$  на уровне первого детектора для каждого  $i$ -го ( $i = 1, \dots, n$ ) из  $n$  мюонов, определялись траектории до магнитного объема и координаты входа в магнитный объем в двух проекциях - в плоскости магнитного отклонения ( $XOY$ ) и в перпендикулярной плоскости ( $YOZ$ ).

Параметры траекторий мюонов на выходе из магнитного объема рассчитывались с учетом потерь энергии и многократного рассеяния в железе магнита следующим образом.

По известному импульсу  $P_i$  и углу входа  $\alpha_{i1}$   $i$ -го мюона определялся угол выхода  $\alpha_{i2}$  из магнита в плоскости отклонения  $XOY$  из соотношения

$$[P_i (P_i - \varepsilon)]^{1/2} = 300 \cdot B_{xy} \cdot q \cdot L / \cos \gamma_i (\sin \alpha_{i1} - \sin \alpha_{i2}), \quad (2)$$

где

$\varepsilon = -\frac{dP}{d\varepsilon} L = \text{const}$  - среднее значение потерь энергии мюона в магните,

$L$  - длина магнита по оси спектрометра ( $OY$ ) [см],

$B_{xy}$  - напряженность поля (21,1 кГс) в плоскости отклонения

$$\gamma_i = \arccos (P_{xz} / |\vec{P}_i|)$$

$P_{xy}$  - проекция вектора  $\vec{P}_i$  на плоскости  $XOY$ ,

$q$  - заряд мюона ( $\pm 1$ ),

Далее определялся угол выхода из магнита с учетом многократного рассеяния:

$$\alpha_{i2} = \alpha_{i2}^M + \vartheta_x, \quad (3)$$

где  $\vartheta_x$  - случайная реализация нормального распределения  $n(\vartheta_x) d\vartheta_x$  со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_\vartheta = 0,021 \sqrt{2L/L_0 \cdot \sqrt{P_{xz}(P_{xz} - \varepsilon)}}$  где  $L_0$  - радиационная единица длины (см). Смещение траектории из-за потерь в магните и многократного рассеяния определялось согласно

$$\Delta x_i = \text{tg} [(\alpha_{i2}^M + \alpha_{i1})/2] \cdot L + \Delta x_{\text{расс}}, \quad (4)$$

где  $\Delta x_{\text{расс}}$  - случайная реализация нормального распределения  $n(\Delta x) d\Delta x$  со среднеквадратичным отклонением

$$\sigma_{\Delta x_{\text{расс}}} = L \cdot \sigma_\vartheta / \sqrt{6}. \quad (5)$$

В перпендикулярной плоскости ( $YOZ$ ) на траектории мюонов магнитное поле не действовало и в программе учитывалось лишь влияние многократного рассеяния. Ошибка среднегеометрического

приближения (I). (3), применяемого нами для учета энергетических потерь, равна 7 - 5 % для энергий 5 - 10 ГэВ и пренебрежимо мала при более высоких энергиях. После определения угла выхода из магнита рассчитывались точки пересечения и углы мюонов в искровых камерах, расположенных после магнитного объема.

4. Прежде чем перейти к имитации треков в искровых камерах, в программе предусматривался учет ошибок, связанных с пространственным восстановлением событий. С этой целью к полученным значениям координат треков суммировались случайные гауссовы ошибки, связанные с точностью регистрации треков  $b_x$  и  $b_y$  в искровых камерах. После этого мюон, прошедший через МС, считался зарегистрированным.

5. При использовании искровых камер в качестве детекторов определяются два параметра линейной траектории: угол и координата. Восстановление прямой по известным значениям этих параметров для камер, расположенных на расстоянии  $l$  друг от друга, осуществлялось с помощью следующих выражений

$$z = \operatorname{tg} \alpha_{i1}^{(1,2)} \left( x - \frac{c}{2} \right) + (x_{i1,1} + x_{i1,2}) / 2 \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{i1}^{(1,2)} = c_1 \frac{\operatorname{tg} \alpha_{i1,1} + \operatorname{tg} \alpha_{i1,2}}{2} + c_2 \frac{(x_{i1,1} - x_{i1,2})}{l} \quad (7)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha_{i1}^{(1,2)}$  - тангенс угла восстановленной траектории  
 $c_1 + c_2 = 1$ ,  $c_1 = 1 / (1 + 3l^2 / 4d^2)$

$d$  - полуширина зазора искровой камеры,

$x_{ij}, \alpha_{i,j}$  - координаты и углы траектории  $i$ -го мюона.

Полученные выражения дают возможность восстанавливать уравнения прямых методом наименьших квадратов в обеих проекциях до

и после магнита. Импульс мюона  $P_i$  определялся согласно (2) по вычисленным значениям  $\alpha_{ij}$ . Ожидаемое значение координат на выходе из магнитного объема без учета многократного рассеяния и ошибок измерения определялось на основе входных параметров и вычисленного импульса. Траектория мюона считалась идентифицированной, если удовлетворялись следующие критерии отбора:

$$\begin{aligned} 1. \quad & \delta_x < 3b_x \\ 2. \quad & \delta_y < 3b_y, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\delta_x$  и  $\delta_y$  - параметры "сшивания" в плоскостях XOY и XOZ, соответственно. Сшивание представляло собой разность между координатами реальной и ожидаемой траекторий, вычисленных в выходной камере МС. Распределения  $\delta_x$  и  $\delta_y$  - являются гауссовыми с дисперсиями  $b_{\delta_x}^2$  и  $b_{\delta_y}^2$ . Число зарегистрированных мюонов ( $n$ ), удовлетворивших критериям сшивания (8) с соответствующими пространственно-энергетическими параметрами, запоминалось для дальнейшей статистической обработки.

Результат имитационного эксперимента

Реализация  $IC^4$  прохождений одиночных мюонов через Арагацкий МС позволила получить следующие характеристики установки: зенитное и азимутальное распределения потока регистрируемых мюонов, распределение координат падающего потока на уровне  $i$ -го детектора, регистрируемый дифференциальный энергетический спектр, а также исследовать возможность регистрации множественных проникающих частиц.

Одним из важнейших параметров МС является максимально измеримый импульс  $P_{max}$  — это значение импульса, при котором ошибка в определении отклонения мюона в магнитном поле  $b_y/\varphi$  равна углу  $\varphi$ , на который он отклоняется, т.е. когда  $b_y/\varphi = 1$ . Переход к спектру отклонений связан с тем, что ошибки, возникающие при определении угла отклонения мюона в магнитном поле, подчиняются гауссовому распределению, что позволяет получать не только численные, но и аналитические решения. Таким образом, основным фактором, влияющим на величину  $P_{max}$ , является точность определения координат  $x_i$  и  $y_i$ . На рис.2 приведены три значения  $P_{max}$ , в зависимости от точности пространственного восстановления трека в обоих плечах МС. Для Арагацкого МС реально достижимые значения  $x_i = 0,2$  мм, а  $y_i = 4$  мм, таким образом, ожидаемое значение  $P_{max} = 5$  ТэВ.

Большой интерес представляет величина показателя спектра  $\rho$ , входящая в выражение (I). Численное значение  $\rho$  было получено методом последовательных приближений к экспериментальному распределению зарегистрированных зенитных углов  $\vartheta$ . Для Арагацкого МС  $\bar{\vartheta} = 84,46^\circ$  и соответствующее значение  $\rho = 0,76 \pm 0,05$  (рис.3).

В заключение авторы выражают благодарность Асатиани Т.Л. за полезные обсуждения.

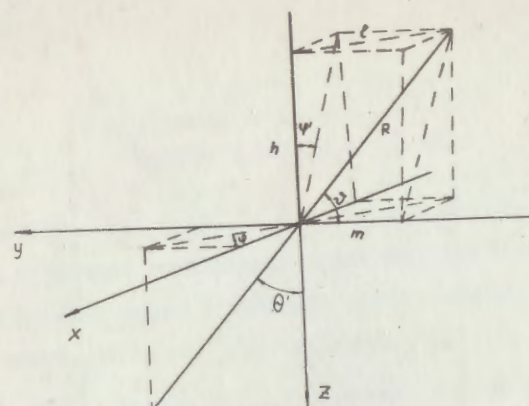


Рис.1 Система координат имитационного эксперимента.

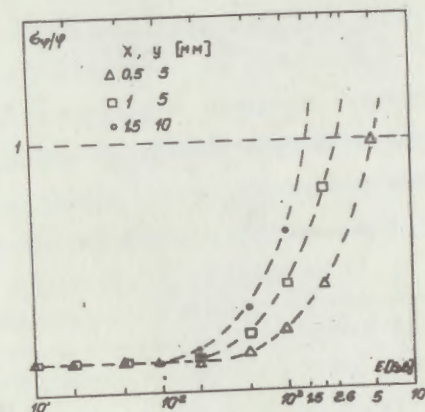


Рис.2 Максимально измеримый импульс спектрометра при разных точностях восстановления траектории мюонов.

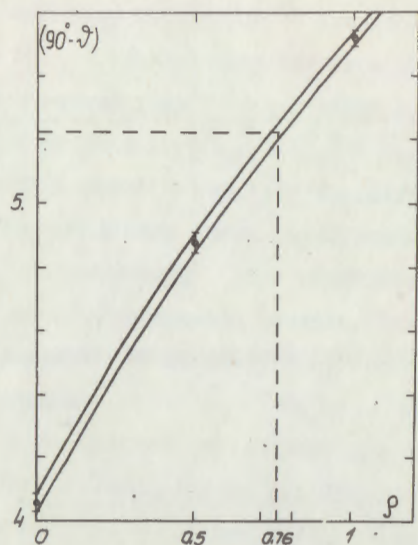


Рис.3 Значение показателя спектра  $\rho$  для данного среднего зенитного угла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилова Т.В., Ерлыкин А.Д. Метод исследования химического состава первичных космических лучей на установке АНИ. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента. 1983, вып. I/13/, Ереван, с.13-19.
2. Асатиани Т.Л., Иванов В.А., Мнацаканян Э.А. и др. О возможной программе исследования мюонов в широких атмосферных ливнях с энергиями  $10^2 - 10^6$  ТэВ. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техника физического эксперимента 1982, вып.3/12/, Ереван, с.79-90.
3. Бугаев Э.В., Котов Ю.Д., Розенталь И.Л. Космические мюоны и нейтрино. М.: Атомиздат, 1970, с.3-128.
4. Петрухин А.А. Исследования процессов генерации и взаимодействия мюонов космических лучей в области энергий  $10^{11} - 10^{13}$  эВ. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва, 1974.
5. Muraki Y., Kawashima Y., Kitamura et al. "Measurement of the cosmic-ray muon spectrum and charge ratio at large zenith angles in the momentum range 100 GeV/c to 10 TeV/c using a magnet spectrometer" Phys.Rev.D., vol.28, N.1, p.40-48, 1983.
6. Allkofer O.C., Carstensen K., Bella G. et al. Muon Spectra from Deutscher to 7 TeV 17-th ICRC, Paris 1981, MV2.1-1 vol.10, p.321-324

7. Nakamura I., Kitamura T., Mitsui K. et al. A measurement of the high energy muon spectrum by pair meter 16-th ICRC, Japan 1979, MN 1-8, vol.10, p.19-23.
8. Hayman P.J., Wolfendale A.W. Proc.Phys.Soc., 1962, vol.10. p.710.
9. Асатиани Т.Л., Тер-Антонян С.В. Учет спектра при определении энергии мюонов многослойными установками. Препринт ЕФИ-653(43)-83, Ереван, 1983.
10. Asatiani T.L., Abrahamian A.V., Alchudjian S.V. et al. The investigation of the cosmic muon energy spectrum, charge ratio and UAS with the Aragats complex installation 18-th ICRC, India 1983, MN 1.2-14, vol.7, p.47-50.
11. Асатиани Т.Л., Алчуджян С.В., Козлинер Л.И. и др. Импульсный спектр и зарядовое отношение космических мюонов с энергией до 1 ТэВ. Препринт ЕФИ-661(71)-83, Ереван, 1983.
12. Мазный Г.Л. Программирование на БЭСМ-6 в системе "Дубна", М.: Наука, 1976, с.270.

Рукопись поступила 9 февраля 1984 г.

Заказ 697

ВФ-06045

Тираж 299

Препринт ЕФИ

Формат издания 60x84/16

Подписано к печати 6/УП-84г. I, 0 уч.-изд. л. Ц. 15 к. Индекс 3624

Издано Отделом научно-технической информации  
Ереванского физического института, Ереван 36, Маршаряна 2