

ИМПУЛЬСНЫЙ СПЕКТР МЮОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ПОД БОЛЬШИМИ ЗЕНИТНЫМИ УГЛАМИТ. А. АСАТИАНИ, С. В. АЛЧУДЖЯН, К. А. ГАЗАРЯН, Л. И. КОЗЛИНЕР,
Г. С. МАРТИРОСЯН, С. В. ТЕР-АНТОНЯН

Приводятся данные по предварительному измерению импульсного спектра высокоэнергичных космических мюонов, идущих под большими зенитными углами. Измерения проводились с помощью магнитного спектрометра на высокогорной станции Арагац (3250 м над уровнем моря).

За последние годы исследования различных характеристик мюонного потока высоких энергий в космических лучах сильно расширились, что в значительной мере было стимулировано первыми результатами работ университета штата Юта, для объяснения которых привлекался механизм прямой генерации мюонов. Несмотря на то, что эти результаты в последующих работах тех же авторов не подтвердились, интерес к вопросу генерации высокоэнергичных мюонов полностью сохранился, и сооружение более светосильных установок с высоким энергетическим разрешением продолжается и по сей день [1, 2]. Это обусловлено тем, что наиболее интересная область энергий (10^{12} — 10^{13} эв) может быть исследована только в экспериментах с космическими лучами. В этом аспекте особый интерес представляет исследование энергетического спектра, зарядового отношения и углового распределения мюонов высоких энергий.

В настоящей работе приведены предварительные результаты по исследованию импульсного спектра мюонного потока под зенитными углами 80° — 90° , полученные на Арагацском магнитном спектрометре.

1. Спектрометр

Подробное описание установки приводится в работе [3]. На рис. 1 приведена схема спектрометра, расположенного на высокогорной станции Арагац. Его ось направлена на $S70^\circ E$. Телескоп сцинтилляционных счетчиков C_1 — C_4 выделяет мюоны, проходящие через магнит M . Отклонение частицы происходит в горизонтальной плоскости.

Траектории мюонов регистрируются с помощью двух широкоазорных оптических искровых камер $ИК1$ и $ИК2$, которые фотографируются соответственно фоторегистраторами $ФР1$ и $ФР2$. Для определения вертикальной проекции треков применена система оптических клиньев, которые отклоняют отрезки прямой на величину, пропорциональную расстоянию до фоторегистратора (рис. 2).

Светосила установки — $85 \text{ см}^2 \text{ стер}$. Расстояние между крайними сцинтилляторами C_1 — C_4 равно 660 см. Диапазон зенитных углов — от 80° до 90° , интервал азимутальных углов — 20° . Минимальная энергия мюонов, регистрируемых спектрометром, — 5 Гэв .

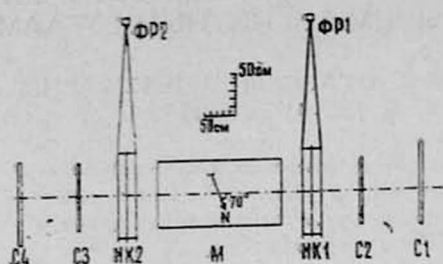


Рис. 1.

Рис. 1. Схема Арагацского спектрометра.

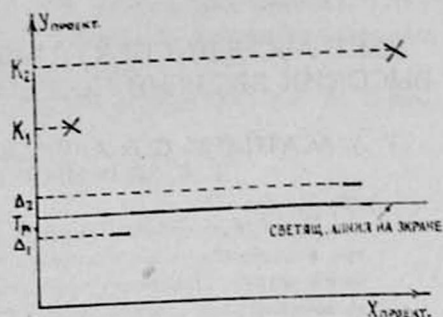


Рис. 2.

Рис. 2. Измерение координат трека на проекторе.

2. Сбор данных и методика обработки

За 267 часов работы спектрометра было зарегистрировано 2610 полезных случаев. Число срабатываний установки ~ 40 в час, из которых 65% вызвано наклонными широкими атмосферными ливнями. Аналогичное соотношение получается и на уровне моря. На больших высотах число ШАЛ растет на порядок по сравнению с уровнем моря, однако протяженность установки и используемая схема совпадений с высоким разрешением существенно уменьшила запуски от ШАЛ. Полярность магнитного поля в спектрометре периодически менялась, чтобы иметь возможность измерять любые систематические эффекты в юстировке.

После визуального отбора полезных событий предварительная обработка 2500 случаев была проведена на прецизионном проекторе. Пленка закреплялась в рамке, установленной на измерительном столике проектора. Рамка могла поворачиваться, а измерительный столик — перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи микровинтов. Изображение с пленки, увеличенное в 20 раз, проецировалось на экран, на котором расположена тонкая светящаяся линия, вдоль которой вращением рамки и перемещением столика выставлялось изображение трека. Линия на экране строго параллельна оси абсцисс измерительного столика проектора и, следовательно, трек параллелен оси абсцисс (рис. 2). Далее определялись координаты трека — $T_{1,2}$, двух изображений концов трека через оптические клинья — Δ_1 и Δ_2 (они служат для определения глубины) и реперных крестов — K_1 и K_2 . Взаимное расстояние между крестами измерялось с точностью ± 100 мкм. Расстояние между плоскостью пленки и плоскостью расположения реперных крестов измерялось оптическими приборами. Результаты этих измерений и другие постоянные спектрометра приведены в разделе 3. Скорость съема информации с пленки составляет $(4 \div 5)$ мин на событие (событие регистрируется на двух кадрах, соответствующих двум плечам спектрометра).

3. Геометрические и оптические параметры установки

Используется правая система координат. Ось x лежит в плоскости магнитного отклонения (горизонтальная плоскость), начало отсчета—репер 1. Ось y определяет глубину и отсчитывается от фоторегистраторов. Магнитное поле направлено по оси y . Ось z направлена по движению частицы и проходит через центральные реперы 1—4. Все реперы расположены в горизонтальной плоскости с точностью ± 50 мкм. Значения параметров следующие:

$l_{12} = 476200$	$l_{34} = 476200$	$\operatorname{tg} \gamma = 0,02422$
$l_{12}^- = 476200$	$l_{34}^- = 476200$	$y_{10} = 5381000$
$l_{1-2}^+ = 476100$	$l_{34}^+ = 476200$	$y_{20} = 5380900$
$l_{1-1} = 350000$	$l_{3-3} = 350100$	$f_1 = 200700$
$l_{1+1} = 349900$	$l_{3+3} = 350100$	$f_2 = 200900$
$l_{2-2} = 350100$	$l_{4-4} = 349900$	$f_0 = 217750$
$l_{2+2} = 349900$	$l_{4+4} = 349900$	$D = 1:11$
$l_{20} = 1290000$	$l_{30} = 1280000$	
$l_{14} = 3522200$	$l_{23} = 2569800$	

(все размеры — в мкм).

Здесь l_{ij} — расстояние между центральными реперами ($i, j = 1-4$) по оси z , $l_{ij}^\pm$ — расстояние между реперами по оси z , расположенными при положительном (+) и отрицательном (—) значениях x , $l_{i\pm j}$ — расстояние между реперами по оси x в положительном и отрицательном направлениях, l_{20} (l_{30}) — расстояние по оси z от репера 2 (3) до середины магнитного объема, γ — угол, под которым фоторегистратор видит треки в ИК через оптические клинья, y_{10} (y_{20}) — расстояние по оси y от плоскости реперов до плоскости пленки $\Phi P1$ ($\Phi P2$), f_1 и f_2 — фокусные расстояния объективов $\Phi P1$ и $\Phi P2$, f_0 — расстояние от объектива до плоскости пленки, D — диафрагма.

Фотографирование производилось на неперфорированную аэрофотопленку изопанхром, тип 15—800, шириной 50 мм. Светочувствительность—1000 ед. Гост—0,85, коэффициент контрастности—1,8.

4. Анализ данных

В результате обработки на проекторе получаем 5 отсчетов для входной траектории ($T_1, \Delta_1, \Delta_2, K_1, K_2$) и столько же для выходной. На основании этих данных на ЭВМ «Наири-2» вычисляются импульс P , зенитный угол и расхождение в центре магнитного поля δ , которое равно отрезку, заключенному между точками пересечения продолжения горизонтальных проекций треков частицы ИК1 и ИК2 навстречу друг другу с линией, параллельной оси ox , проходящей в середине магнита и лежащей в той же плоскости,

$$P = \frac{300 BL}{\sin \alpha - \sin \beta},$$

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \arctg \left[\frac{(y_1 + y_2) - (y_3 + y_4)}{2l_{23} + l_{12} + l_{34}} \right],$$

$$\delta = \frac{y_2(T_1 - K_2)l_{12}}{f_0 \sqrt{l_{12}^2 - (K_1 - K_2)^2}} + l_{20} \operatorname{tg} \alpha - \frac{y_3(T_2 - K_3)l_{34}}{f_0 \sqrt{l_{34}^2 - (K_3 - K_4)^2}} + l_{20} \operatorname{tg} \beta,$$

где B — напряженность магнитного поля, f_0 , l_{12} , l_{34} , l_{20} и l_{30} — геометрические постоянные спектрометра, их значения приведены в разделе 3; функции $y_i = y_i(\Delta_i, x_i)$ определены из калибровочных измерений [3].

Ортогональная проекция угла входа частицы в магнит на горизонтальную плоскость и аналогичный выходной угол определяются следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{K_1 - K_2}{\sqrt{l_{12}^2 - (K_1 - K_2)^2}} + \frac{2T_1 - K_1 - K_2}{4f_0 \operatorname{tg} \gamma} \left(1 - \frac{y_2}{y_1}\right),$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{K_3 - K_4}{\sqrt{l_{34}^2 - (K_3 - K_4)^2}} + \frac{2T_2 - K_3 - K_4}{4f_0 \operatorname{tg} \gamma} \left(1 - \frac{y_3}{y_4}\right).$$

Величина расхождения δ обусловлена кулоновским рассеянием, ошибками измерения, потерями энергии в сердечнике магнита и зависит также от азимутального угла. На рис. 3 приведено распределение этой величины.

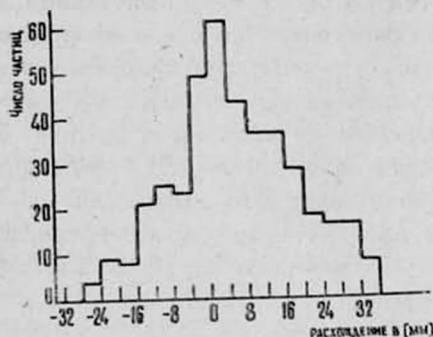


Рис. 3. Распределение δ -расхождения в центре магнитного поля.

Большая ширина этого распределения объясняется тем, что основной вклад идет от низкоэнергетических частиц, для которых существенны энергетические потери. Так, например, для частиц с импульсом $P=5$ Гэв/с на входе в магнит при азимутальном угле $\varphi=10^\circ$ расчет дает $\delta=26$ мм, а для $P=30$ Гэв/с — $\delta=0,6$ мм; если $\varphi=2,5^\circ$, для $P=5$ Гэв/с — $\delta=31$ мм, а для $P=30$ Гэв/с — $\delta=0,7$ мм. Если добавить вклад от многократного рассеяния и ошибки измерений, то становится понятной большая величина дисперсии $\sigma_\delta=11$ мм. При $\delta > 3\sigma_\delta$ случай приписывается несвязанным траекториям и в дальнейшем не рассматривается.

3. Максимально измеримый импульс

Максимально измеримый импульс определяется по формуле

$$P_{\text{max}} = \frac{C}{\sigma_{\varphi}},$$

где $C = 1,33$ — постоянная установки, а σ_{φ} — ложный угол, обусловленный, в основном, ошибками измерений, многократным рассеянием в сердечнике магнита и точностью следования трека в ИК по траектории частицы. Величину σ_{φ} можно представить в виде

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\sigma_{\alpha\beta}^2 + \sigma_{<\vartheta>}^2 + \sigma_{\tau}^2},$$

где $\sigma_{\alpha\beta}$ — ошибка в измерении траектории частицы в спектрометре, $\sigma_{<\vartheta>}$ — ошибка, вносимая многократным рассеянием, σ_{τ} — ошибка юстировки реперных меток.

Для определения σ_{τ} сквозь щели в сердечнике магнита были туго натянуты три струны из бериллиевой бронзы, которые фотографировались одновременно с крестами. Считая струну прямой линией, мы определяли расстояние крестов от струны и угол между линией, проходящей через K_1K_2 (или K_3K_4), и струной. В результате этих измерений было получено, что угол между K_1K_2 и K_3K_4 составляет $0,0003 \pm 0,0002$.

Для определения $\sigma_{<\vartheta>}$ учитывалось, что отношение проекции среднеквадратичного угла многократного рассеяния на плоскость отклонения к углу магнитного отклонения не зависит от импульса:

$$\frac{\langle \vartheta \rangle_x}{\varphi} = \frac{K_1 P^{-1/2} L^{1/2}}{K_2 P^{-1/2} L} \sim L^{-1/2} = 0,13.$$

Это отношение показывает, что ошибка из-за многократного рассеяния составляет 13% от магнитного отклонения, поэтому считаем, что

$$\sigma_{<\vartheta>} = 0,13 \sigma_{\alpha\beta}.$$

Величина $\sigma_{\alpha\beta}$ в свою очередь, есть

$$\sigma_{\alpha\beta} = \sqrt{\sigma_{\alpha_0}^2 + \sigma_{\beta_0}^2 + \sigma_{\text{н}}^2},$$

где σ_{α_0} , σ_{β_0} — ошибки в точности локализации трека в ИК1 и ИК2, $\sigma_{\text{н}}$ — ошибка измерения.

Предполагается, что $\sigma_{\alpha_0} = \sigma_{\beta_0}$. Для определения σ_{α_0} на проекторе измерялись углы α между треками в первом и во втором отсеках ИК1 для частиц, прошедших через всю установку, т. е. имеющих минимальный импульс ~ 5 Гэв/с. Угол многократного рассеяния в среднем электроде ИК1 для таких частиц равен $\sigma_{<\vartheta>} = 0,0003$.

σ_{α} можно записать в виде

$$\sigma_{\alpha}^2 = (\sigma'_{\alpha_0})^2 + (\sigma''_{\alpha_0})^2 + 2\sigma_{\text{н}}^2 + \sigma_{<\vartheta>}^2,$$

где σ'_{α_0} и σ''_{α_0} — ошибки в локализации трека в первом и во втором отсеках ИК1. Мы предполагаем, что $\sigma'_{\alpha_0} = \sigma''_{\alpha_0} = \sigma_{\alpha_0} \cdot \sigma_{\text{н}}$ определялась пу-

тем многократных измерений одного и того же трека разными наблюдателями. В результате было получено, что $\sigma_{\pi} = 0,00045$, а $\langle \varphi \rangle = 0,00009 \pm 0,00084$ (см. рис. 4). Согласно вышеизложенному получаем $\sigma_{\alpha_0} = 0,00032$, а $\sigma_{\varphi} = 0,00082$. Следовательно, максимальный импульс спектрометра есть $P_{\max} = 1630$ Гэв/с.

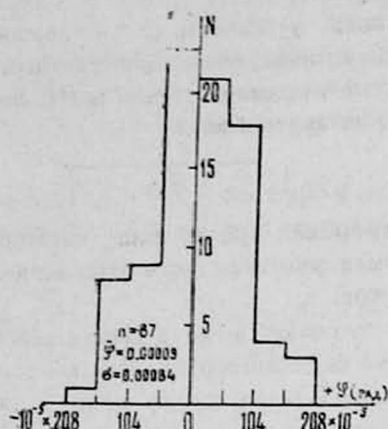


Рис. 4. Распределение ложных углов φ между двумя треками в первом и во втором отсеках ИК1.

Отметим, что наибольший вклад в σ_{φ} дает величина σ_{α_0} , состоящая, в основном, из ошибок измерения. При машинном обмере пленок точность измерений должна возрасти, что повысит максимально измеримый импульс установки.

6. Импульсный спектр мюонов

Обработанные описанным в пунктах 2 и 4 методом случаи были разделены на 41 импульсную ячейку для двух направлений магнитного поля ($H \uparrow$ и $H \downarrow$) и для частиц разного знака. Далее эти ячейки были сведены в 12 больших групп таким образом, чтобы, исключая группу высокоэнергичных частиц, в остальных группах было бы примерно равное количество частиц. Определялась относительная интенсивность I_r для каждой группы по формуле

$$I_r = \frac{N_r}{P_2 - P_1},$$

где N_r — число частиц в группе r , а P_1 и P_2 — импульсные границы группы. Вычислялись $\langle P \rangle$ — среднеарифметический импульс группы и статистическая ошибка интенсивности.

Далее была проведена коррекция интенсивности на аперттуру спектрометра. Для получения абсолютной интенсивности мы провели привязку к точке Аштона [4] при 50 Гэв — $I = 5,87 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1} [\text{Гэв/с}]^{-1}$ для зенитного угла 84° . Средневзвешенная величина зенитного угла наших данных равна $83,89^\circ$.

На рис. 5 приведен полученный дифференциальный импульсный спектр космических мюонов. Здесь же приведены результаты, полученные на горизонтальных спектрометрах [5—9]. Как видно из рис. 5, в области высоких импульсов наблюдается превышение полученной интенсивности над

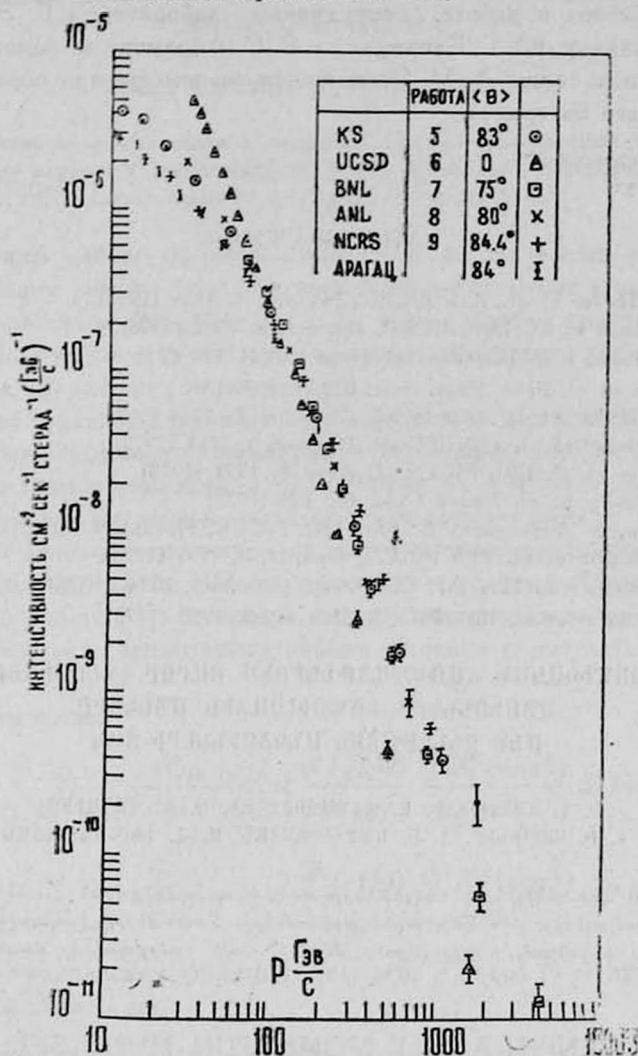


Рис. 5. Импульсный спектр горизонтального потока космических мюонов.

данными цитированных работ, однако для окончательных выводов требуется дальнейшее увеличение статистического материала.

Надо отметить, что в Советском Союзе также ведутся работы по измерению импульсного спектра и углового распределения мюонов, однако в этих работах преобладает иная методика. Так, работы, сделанные на ионизационных калориметрах в МИФИ [10] и ФИАНе [11], исследуют соответственно области энергий 3 и 10 Тэв, а оригинальная методика, связанная с применением стопок рентгеновских пленок и эмульсионных камер

[12], позволяет измерять импульсный спектр мюонов в области энергий до 30 Тэв.

В заключение авторы выражают благодарность С. Г. Матиняну за полезные советы и постоянное внимание, Э. А. Мамиджянну и В. В. Авакяну за содействие в работе, сотрудникам лаборатории Г. Э. Минасяну, А. В. Караханяну, Ю. Г. Капанцяну и Р. С. Абрамову за помощь при сборке установки, а также Л. М. Оганджян за помощь при обработке экспериментального материала.

Ереванский физический
институт

Поступила 29.V.1975

ЛИТЕРАТУРА

1. O. C. Allkofer et al. 12th PICCR, Hobart, 4, 1596 (1971).
2. T. Kitamura et al. 13th PICCR, Denver, 3, 1952 (1973).
3. Т. Л. Асатяни и др. Научное сообщение ЕФИ—129 (75).
4. F. Ashton et al. Proc. Phys. Soc., 87, 79 (1966).
5. O. C. Allkofer et al. 13th PICCR, Denver, 3, 1748 (1973).
6. T. H. Burnett et al. 13th PICCR, Denver, 3, 1764 (1973).
7. L. Leipuner et al. 13th PICCR, Denver, 3, 1771 (1973).
8. J. S. Ashbury et al. Nuovo Cim., 66, 169 (1970).
9. Y. Kamtya, S. Kawaguchi, S. Ida. 12th PICCR, Hobart, 4, 1354 (1971).
10. R. P. Kokoulin et al. 13th PICCR, Denver, 3, 1797 (1973).
11. А. Д. Ермичкин и др. Изв. АН СССР, сер. физ., № 5, 1084 (1974).
12. T. P. Amineva et al. 13th PICCR, Denver, 3, 1783 (1973).

ԿՈՍՄՈՍԿԱԿԱՆ ՀԱՌԱԳԱՅԹՆԵՐՈՒՄ ԲԱՐՁՐ ԷՆԵՐԳԻԱՅՈՎ ՄՅՈՒՆՆԵՐԻ ԻՄՊՈՒՍԱՅԻՆ ՍՊԵԿՏՐԸ ՄԵՍ ԶԵՆԻԹԱՅԻՆ ԱՆԿՅՈՒՆՆԵՐԻ ՏԱԿ

Թ. Լ. ԱՍԱԹԻԱՆԻ, Ս. Գ. ԱԼՉՈՒԶՅԱՆ, Կ. Ա. ԳԱԶԱՐԻԱՆ,
Լ. Ի. ԿՈՉԼԻՆԵՐ, Հ. Ս. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ, Ս. Վ. ՏԵՐ-ԱՆՏՈՆՅԱՆ

Բերվում են մեծ զենիթային անկյունների տակ եկող տիեզերական մյուոնների իմպուլսային սպեկտրի տվյալները բառ նախնական չափումների Չափումները կատարվել են բարձր էներգիային Արագած կայանում, բարձրությունը 3250 մ ձովի մակարդակից, մաշնիսական սպեկտրոմետրի վրա:

LARGE ZENITH ANGLE MOMENTUM MUON SPECTRUM OF HIGH ENERGY COSMIC RAYS

T. L. ASATIANI, S. B. ALCHUDZHYAN, K. A. GAZARIAN,
L. I. KOZLINER, G. S. MARTIROSYAN, S. V. TER-ANTONYAN

The preliminary results of the momentum spectrum measurements of high energy cosmic ray muons at large zenith angles ($80^\circ \div 90^\circ$) are presented. The measurements are made by means of Aragats magnetic spectrometer, located at 3250 m altitude.