ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
XXIV 1957 3

ФИЗИКА

Г. С. Саакян, З. А. Киракосян и А. С. Алексанян

Энергетический спектр протонов на высоте 3200 м над уровнем моря

(Представлено А. И. Алиханяном 23. X. 1956)

В этой работе излагаются результаты трех независимых экспериментов по определению энергетического спектра протонов на высоте 3200 *м*.

Опыт I. В качестве первого источника, исходя из которого были определены три ординаты дифференциального спектра протонов, служил первичный экспериментальный материал Н. М. Кочаряна, любезно предоставленный в наше распоряжение. Мы имеем в виду его экспериментальный материал по определению энергетического распределения μ-мезонов (1). Описание установки приведено в цитированной работе. В этих измерениях над магнитным зазором не было вещества, за исключением легкого перекрытия из дерева и кровельного железа с общей толщиною 7 *г/см*^{2}. Под магнитным зазором находились шесть поглотителей $П_1$—$П_6$. $П_1$ был свинцовый (45,2 *г/см*^{2}), остальные были медными и имели толщины соответственно 8,9; 37,4; 16; 53,4 и 17,8 *г/см*^{2}. Импульс частиц, измеренный в единицах $\frac{\text{Бэв}}{c}$ был связан с их отклонением в магнитном поле соотношением $p = \frac{7}{\delta}$.

Проекции траекторий всех частиц были нанесены на трафареты (под трафаретом мы подразумеваем вертикальные разрезы установки, параллельный и перпендикулярный силовым линиям поля, начерченные в масштабе) и подвергались тщательному анализу. В результате удавалось установить, в каких случаях частицы испытывают неупругие ядерные взаимодействия в поглотителях $П_1$—$П_6$ и в каких случаях проходят без взаимодействия. В данном случае взаимодействия представляли собою: звезды, остановки частиц в поглотителях без видимого сопровождения и рассеяние на угол порядка 10° и больше. Взаимодействующие частицы с положительным знаком заряда отождествлялись с протонами и π^+-мезонами, а отрицательные — с π^--мезонами.

Измерения производились в течение 267 часов. В интервалах

импульсов $2{,}33<p<3{,}5$; $3{,}5<p<7$ и $7<p<\infty$ $\frac{\text{Бэв}}{c}$ было зарегистрировано соответственно 1650; 1715 и 1448 положительных частиц. Просмотром было установлено, что из них соответственно 160, 111 и 57 испытывали неупругие ядерные взаимодействия. В этих же интервалах импульсов было зарегистрировано соответственно 1086, 1212 и 768 отрицательных частиц, из которых соответственно 5, 9 и 6 испытывали неупругие ядерные взаимодействия. Разумно предположить, что на высотах гор число π-мезонов обоего знака заряда в воздухе равны. Поэтому разность чисел положительных и отрицательных взаимодействующих частиц представляет собою число протонов, претерпевших взаимодействие в поглотителях $П_1$—$П_6$. Согласно ([2-5]) при рассматриваемых здесь энергиях поперечное сечение неупругого взаимодействия нуклонов в тяжелых элементах составляет примерно 75 % от геометрического сечения ядер. Следовательно, вероятность взаимодействия нуклонов в поглотителях $П_1$—$П_6$ приблизительно равна $1-e^{-\frac{x}{\lambda}}=0{,}68$, где $x=45{,}2$ *г/см²* Pb + 133,5 *г/см²* Cu $=1{,}52\lambda_0$ суммарная толщина поглотителей (λ_0—пробег, соответствующий геометрическому сечению ядер); $\lambda=\frac{\lambda_0}{0{,}75}$ — средний пробег неупругого взаимодействия. Отношение чисел взаимодействующих протонов и вероятности взаимодействия 0,68 дает число протонов в рассматриваемом потоке μ-мезонов. Для отношения чисел протонов и μ-мезонов мы получили

$$\frac{N_p(p)}{N_\mu(p)}=\begin{cases}0{,}0354\pm0{,}0041 & \text{при } \bar{p}=14\ \frac{\text{Бэв}}{c}\\ 0{,}0546\pm0{,}0045 & \text{„ } 4{,}66 \text{ „}\\ 0{,}0917\pm0{,}0061 & \text{„ } 2{,}8 \text{ „}\end{cases} \qquad (1)$$

При этих значениях импульсов, в работе ([1]) для ординат дифференциального спектра μ-мезонов найдено соответственно $N_\mu(p)=4{,}7\cdot10^{-5}$; $6{,}4\cdot10^{-4}$ и $1{,}74\cdot10^{-3}$. Отсюда, с учетом (1) для ординат дифференциального спектра энергии протонов, находим

$$N_p(E)=\begin{cases}(1{,}66\pm0{,}23)\cdot10^{-6} & \text{при } \bar{E}=13 \text{ Бэв}\\ (3{,}57\pm0{,}36)\cdot10^{-5} & \text{„ } 3{,}9 \text{ „}\\ (1{,}68\pm0{,}14)\cdot10^{-4} & \text{„ } 2 \text{ „}\end{cases} \qquad (2)$$

Опыт II. Для определения полного дифференциального спектра на высоте 3200 *м* были произведены специальные измерения. В этих измерениях над магнитным зазором находился свинцовый поглотитель толщиною 32 *г/см²*, предназначенный для удаления фона позитронов из спектра протонов. Под магнитным зазором находились шесть медных поглотителей $П_1$ — $П_6$ с общей толщиною 178 *г/см²* $=1{,}65\lambda_0$.

За время $t = 1{,}77 \cdot 10^6$ сек. измерений было зарегистрировано 6852 протона с энергией большей 30 Мэв, остановившихся в $П_1 - П_6$. Распределение этих частиц по их энергиям приведено в пятом столбце табл. 1. Протоны с импульсами $p \lesssim 1 \frac{Бэв}{c}$ остановились в поглотителях благодаря ионизационным потерям энергии, а при $p > 1 \frac{Бэв}{c}$ они могли остановиться вследствие неупругих ядерных взаимодействий. Последний ряд счетчиков, расположенный под поглотителем $П_6$, был соединен с каналом антисовпадений, и поэтому регистрировались лишь те частицы, которые не проходили через этот ряд, т. е. частицы, остановившиеся в поглотителях $П_1 - П_6$.

Итак, по наблюденным числам протонов при $p < 1 \frac{Бэв}{c}$ можно непосредственно построить спектр этих частиц, а для распределения этого спектра в области импульсов $p > 1 \frac{Бэв}{c}$ необходимо знать вероятность остановки протонов в поглотителях $П_1 - П_6$ как функцию энергии. Эта вероятность, которую мы будем обозначать буквой W, была определена из первого опыта. Это оправдано тем, что физические условия в обоих экспериментах были одинаковыми, за исключением одной несущественной разницы, состоящей в том, что поглотитель $П_1$ в первом опыте был свинцовый, а во втором — медный. Общая толщина поглотителей $П_1 - П_6$, измеренная в единицах пробега λ_0, соответствующая геометрическому сечению ядер, в первом опыте равнялась 1,52, а во втором опыте — 1,65. Таким образом, в смысле ядерных взаимодействий и остановок частиц, физические условия были почти одинаковы. В рассматриваемом вопросе имеют значение и размеры поверхностей поглотителей, а также рядов счетчиков, расположенных между поглотителями. В этом отношении условия были совершенно одинаковые.

В первом опыте было найдено, что за все время наблюдения через установку прошло 84, 163 и 235 протонов с импульсами $7 < p < \infty$; $3{,}5 < p < 7$ и $2{,}33 < p < 3{,}5 \frac{Бэв}{c}$. Здесь мы не считаем нужным вычесть фон π-мезонов. Просмотром проекций траекторий взаимодействующих частиц на трафаретах было установлено, что соответственно в 12,37 и 71 случаях протон вместе со своими вторичными продуктами остановился в поглотителях $П_1 - П_6$. Отсюда находим, что при импульсах $\bar{p} = 14$; 4,7 и $2{,}8 \frac{Бэв}{c}$ вероятность остановки соответственно равна $0{,}143 \pm 0{,}044$; $0{,}227 \pm 0{,}041$ и $0{,}302 \pm 0{,}041$. Эта вероятность изображена на рис. 1. Теперь для вычисления ординат дифференциального энергетического спектра протонов, необходимо числа

Таблица 1

Распределение остановившихся в поглотителях протонов по их энергиям и импульсам

Интервал отклонений	Интервалы импульсов	Интервалы энергий	Средняя энергия	Число наблюденных частиц	Светосила	Вероятность остановки	Ординаты дифференциального спектра	
							импульсный $см^{-2}$ сек.$^{-1}$стер$^{-1}$	энергетический $см^{-2}$ сек.$^{-1}$стер$^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
26—21	0,245—0,303	0,03—0,05	0,04	105	0,732	1,00	42±4,1	150±15
21—17	0,303—0,376	0,05—0,07	0,06	228	0,815	1,00	65,4±4,3	193±13
17—14	0,376—0,455	0,07—0,10	0,08	369	0,87	1,00	93,2±4,9	221±11
14—12	0,455—0,531	0,10—0,14	0,12	436	0,905	1,00	103±5	234±11
12—11	0,531—0,579	0,14—0,16	0,15	281	0,92	1,00	110±6	220±13
11—10	0,579—0,636	0,16—0,19	0,18	398	0,93	1,00	128±6	252±13
10—9	0,636—0,707	0,19—0,24	0,21	506	0,94	1,00	129±6	208±9
9—8	0,707—0,795	0,24—0,29	0,26	617	0,95	1,00	126±5	209±8
8—7	0,795—0,91	0,29—0,37	0,34	731	0,96	1,00	114±6	162±9
7—6	0,91 —1,06	0,37—0,47	0,44	827	0,97	1,00	99,7±6,3	145±9
6—5	1,06 —1,27	0,47—0,64	0,60	772	0,98	0,91 0,04	70,2±6,2	87±6
5—4	1,27 —1,60	0,64—0,91	0,80	562	0,99	0,66—0,06	41,6±3,8	54,5±5,0
4—3	1,60 —2,10	0,91—1,38	1,20	503	1,0	0,46—0,05	37,3±3,5	39,5±4,4
3—2	2,10 —3,20	1,38—2,38	1,9	386	1,0	0,33—0,04	18,6±2,9	20,5±2,5
2—1	3,20 —6,36	2,38—5,50	3,9	108	1,0	0,23±0,04	2,53±0,46	2,56±0,44
1—0	6,36 —∞	5,50—∞	14	13	1,0	0,14±0,04	0,055±0,023	0,055±0,023

Таблица 2

К распределению протонов по их энергиям на высоте 3200 *м* над уровнем моря

Интервалы импульсов в Бэв/*с*	Средний импульс	Число взаимодействий в потоке		Средняя кинетическая энергия протонов	Вероятность взаимодействии	Число протонов		Отношение чисел протонов и μ-мезонов в воздухе	Ординаты дифференциального энергетического спектра протонов $см^{-2}сек\cdot^{-1}стер^{-1}$
		положительных частиц	отрицательных частиц			взаимодействующих	всех		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2,06—2,82	2,38	76	4	1,62	0,365	72 ± 7	197 ± 19	$0,071\pm0,007$	$(1,58\pm0,15)\cdot10^{-4}$
2,82—3,88	3,25	49	5	2,45	0,365	44 ± 6	121 ± 16	$0,049\pm0,006$	$(6,72\pm0,82)\cdot10^{-5}$
3,88—5,20	4,45	33	3	3,6	0,365	30 ± 5	82 ± 14	$0,047\pm0,008$	$(3,76\pm0,64)\cdot10^{-5}$
5,20—7,8	6,3	29	2	5,4	0,365	27 ± 4	74 ± 11	$0,043\pm0,006$	$(1,68\pm0,23)\cdot10^{-5}$
7,8 —16	10,5	18	4	9,6	0,365	14 ± 4	38 ± 11	$0,024\pm0,007$	$(3,12\pm0,91)\cdot10^{-6}$
16 —∞	32	15	(3)	31	0,48	12 ± 3	25 ± 6	$0,027\pm0,006$	$(2,7\pm0,7)\cdot10^{-7}$
33,2 —∞	66	7		65	0,48			$0,032\pm0,012$	$(4,5\pm1,7)\cdot10^{-8}$

остановившихся протонов, приведенные в пятом столбце табл. 1, разделить на величину

$$S\omega t\sigma f W(E)\Delta E = 5{,}88\sigma W(E)\Delta E \cdot 10^6, \qquad (3)$$

где ΔE — ширина рассматриваемого интервала энергии протонов, $t = 1{,}77 \cdot 10^6$ сек. — продолжительность наблюдений, S — площадь самого нижнего ряда счетчиков, ω — телесный угол установки, σ — светосила установки, $f = 0{,}78$ — эффективность регистрации частиц и $W(E)$ — вероятность остановки протонов в поглотителях $П_1 — П_6$. В этих измерениях $S \cdot \omega = 4{,}26$ *см*^{2} стерад. В столбцах 8 и 9 приведены соответственно ординаты дифференциального спектра импульсов и энергии протонов.

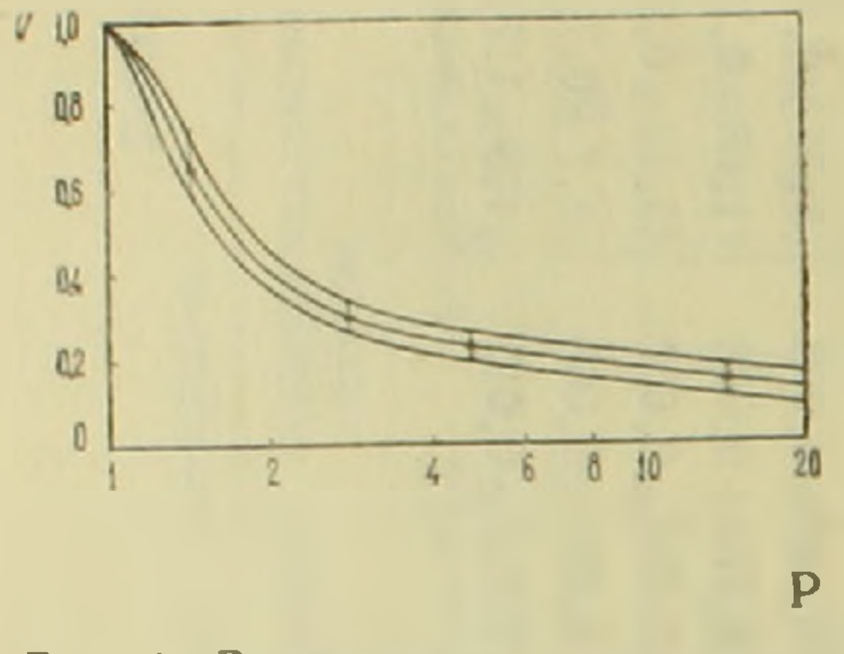

Рис. 1. Зависимость вероятности остановки протонов в поглотителях от импульса $\left(\text{в } \frac{\text{Бэв}}{c}\right)$.

Опыт III. В 1955—56 годах были произведены измерения по определению энергетического спектра μ-мезонов ([6]). В этих измерениях над усгановкой не было вещества и полученный экспериментальный материал позволяет определить энергетический спектр протонов. По сравнению с предыдущими измерениями, импульсы частиц в этих измерениях определялись с большой точностью. Все необходимые данные приведены в табл. 2. В первых двух столбцах указаны соответственно интервалы импульсов и средние импульсы частиц. В столбцах 3 и 4 дается число взаимодействующих частиц в потоках μ^+ и μ^--мезонов, прошедших через установку за время наблюдения. При этих измерениях под магнитным зазором находились пять графитовых поглотителей $П_1 — П_5$ с общей толщиною 43 *г/см*^{2}. Ядерные взаимодействия в поглотителях устанавливались путем тщательного просмотра проекций траекторий всех частиц на трафаретах. В шестом столбце дана вероятность взаимодействия протонов в поглотителях $П_1 — П_5$. Вероятность взаимодействия равна $W = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda}}$, где $x = 43$ *г/см*^{2} и λ — пробег неупругого взаимодействия протонов. В соответствии с работами ([3, 7, 8]) для первых пяти интервалов импульсов было принято $\lambda = 95$ *г/см*^{2} и соответственно $W = 0{,}365$. Для последних двух интервалов энергии ($E > 16$ Бэв) было предположено, что поперечное сечение неупругого ядерного взаимодействия протонов в графите равно геометрическому сечению ядра и соответственно было принято $\lambda = 67$ *г/см*^{2} и $W = 0{,}48$. Числа в столбце 7 представляют собою разность чисел положительных (столбец 3) и отрицательных (столбец 4) взаимодействующих частиц. Эти частицы отождествлялись с протонами. Общие числа протонов, имеющихся в потоке μ-мезонов, даны в восьмом столбце. Они получены делением чисел предыдущего столбца на вероятность W. В девятом столбце приведены отношения чисел протонов и μ-мезонов. Умножая эти

отношения на соответствующие ординаты дифференциального энергетического спектра μ-мезонов ([6]), получаем ординаты дифференциального энергетического спектра протонов (столбец 10). При импульсах $p > 33 \frac{\text{Бэв}}{c}$ установка не позволяла определить знак частиц. В этой области импульсов было наблюдено 388 μ-мезонов и 7 взаимодействий среди них. Отсюда находим, что отношение чисел протонов и π-мезонов к числу μ-мезонов в атмосфере равно 0,039 ± 0,005. В работе ([9]) определен энергетический спектр рождения π-мезонов в атмосфере. Из этого спектра было вычислено относительное число π-мезонов на высоте Арагаца, было найдено, что при энергии 66 Бэв отношение чисел π- и μ-мезонов на этой высоте равно приблизительно 0,007. Следовательно, отношение чисел протонов и μ-мезонов при $p = 66 \frac{\text{Бэв}}{c}$ равно 0,032 ± 0,005.

Энергетический спектр протонов изображен на рис. 2. Точки с обозначениями в виде прямоугольников, черных и светлых кружков

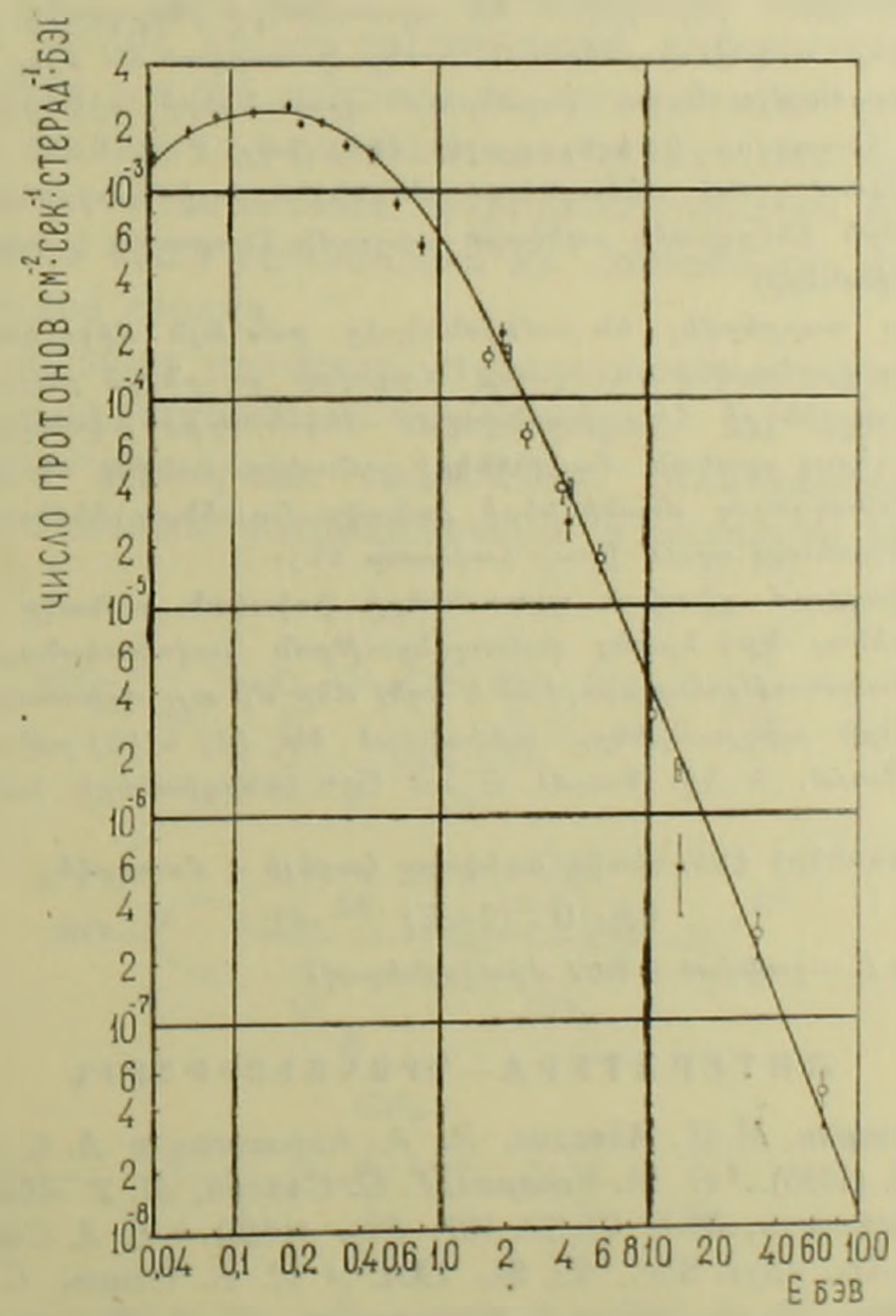

Рис. 2. Дифференциальный энергетический спектр протонов на высоте 3200 *м* над уровнем моря. По оси абсцисс отложена кинетическая энергия протонов в Бэв, а по оси ординат число протонов на 1 $см^{-2}$ сек$^{-1}$ стер$^{-1}$ Бэв$^{-1}$.

изображают соответственно результаты, полученные в опытах I, II и III. Полученный спектр при $E \gtrsim$ Бэв можно аппроксимировать формулой

$$4{,}6 \cdot 10^{-3} (2 + E)^{-2{,}8} dE, \qquad (4)$$

где E — кинетическая энергия.

В заключение выражаем благодарность С. Н. Вернову и Н. М. Кочаряну за ценное обсуждение работы.

Физический институт
Академин наук Армянской ССР

Գ. Ս. ՍԱՀԱԿՅԱՆ, Զ. Ա. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ ԵՎ Ա. Ս. ԱԼԵՔՍԱՆՅԱՆ

Պրոտոնների էներգետիկ սպեկտրը ծովի մակարդակից 3200 մ. բարձրության վրա

Այս աշխատանքում շարադրված են պրոտոնների էներգետիկ սպեկտրի չափման արդյունքները երեք անկախ փորձերում, որոնք կատարված են եղել 3200 մ. բարձրության վրա (Արագածում)։ Երկու փորձերում պրոտոնների դիֆերենցիալ էներգետիկ սպեկտրի տեսքը հնարավոր է եղել որոշել էներգիայի $E \lesssim 15$ Bev տիրույթի համար։

Երրորդ փորձում գծալի մեծացնելով մասնիկների իմպուլսների չափման ճշտությունը, պրոտոնների էներգետիկ սպեկտրի որոշումը հնարավոր է եղել տարածել մինչև $E \approx 65$ Bev էներգիաները։

Պրոտոնները տարբերվել են μ–մեզոններից ըստ այն միջուկային փոխազդեցությունների, որոնք փորձարկել են նրանք մագնիսի բևեռների բացվածքի տակ դրված կլանիչներում։ Պրոտոնների հետ խառնվող π+–մեզոններից ազատվելու համար, կլանիչներում փոխազդեցող դրական մասնիկների քանակից հանվել են լիցքի բացասական նշան ունեցող փոխազդեցող մասնիկների քանակը (այսինքն ենթադրվել է որ π+– և π−–մեզոնների քանակը օդում իրար հավասար են)։

Փորձի ընթացքում դիտված պրոտոնների իսկական քանակը գտնելու համար, անհրաժեշտ է գիտենալ նաև նրանց փոխազդեցության հավանականությունը կլանիչներում։ Այդ հավանականությունը որոշված է եղել մեր մի այլ աշխատանքում (7)։

Բոլոր փորձերի արդյունքները ամփոփված են (1) և (2) բանաձևերում, ազյուսակներ 1–ում և 2–ում, և նկ. 2–ում։ $E \gtrsim 3$ Bev էներգիաների համար նկար 2–ում պատկերված պրոտոնների էներգետիկ սպեկտրը կարելի է մոտարկել

$$4{,}6 \cdot 10^{-3} (2 + E)^{-2{,}8} \cdot dE$$

բանաձևով, որտեղ E —չափված է Bev միավորներով։

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *Н. М. Кочарян, М. Г. Айвазян, З. А. Киракосян* и *А. С. Алексанян.*, ДАН АрмССР. XX, 169, (1955). [2] *Н. М. Кочарян, Г. С. Саакян, М. Т. Айвазян, З. А. Киракосян* и *А. С. Алексанян*, ДАН СССР. 107, 668, (1956). [3] *Г. А. Сноу, Т. Кур, Д. А. Хилл* и др. Bull. Am. Phys. Soc., 29, 54, 1954. [4] *Л. В. Смит, С. Р. Ливит* и др., Bull. Am. Phys. Soc., 28, 15, 1953. [5] *Г. Фридлендер, Г. М. Миллер* и др., Phys. Rev, 94, 727, 1954. [6] *Н. М. Кочарян, Г. С. Саакян*, ДАН АрмССР (в печати). [7] *Н. М. Кочарян, Г. С. Саакян, А. С. Алексанян* и *Х. Б. Пачаджян*, Известия АН АрмССР (в печати). [8] *Т. Кур, Д. А. Хилл, В. Ф. Горняк, Л. В. Смит* и *Г. А. Сноу*. Phys. Rev., 98, 1369 1955. [9] *Г. С. Саакян*, ДАН АрмССР (в печати).