

М. Т. Айвазян

Импульсный спектр дейтронов в вертикальном потоке космического излучения

В работах Поуэла и сотрудников [1] было установлено, что в звездах ядер фотонумульсий, наряду с мезонами и нуклонами, появляются и дейтроны, которые составляют заметную часть среди ядерных осколков.

В работах Алиханяна и Марикиана [2, 3] было изучено рождение дейтронов нуклонами космического излучения в свинцовых поглотителях.

Однако до сих пор не имеется непосредственных экспериментальных работ, устанавливающих относительное число дейтронов в равновесном воздушном потоке протонов. С целью исследования этого вопроса нами на высоте 3200 м над уровнем моря были произведены специальные эксперименты с помощью магнитного спектрометра.

1. Описание установки

Для измерений применялся магнитный спектрометр [4, 5] значительно усовершенствованный и дополненный пропорциональными счетчиками. Принципиальная схема магнитного спектрометра представлена на рис. 1.

В зазоре электромагнита, имеющего прямоугольные полюсы размером 65×20 см, расположенные на расстоянии 10 см друг от друга, создавалось магнитное поле напряженностью в 7100 ое.

Счетчики Гейгера — Мюллера, сгруппированные в ряды, располагались так, как это показано на рис. 1. С помощью двойных рядов счетчиков K_1 , K_2 и K_4 , расположенных в зазоре, вдоль магнитных силовых линий, определялся импульс частиц по искривлению их пути в магнитном поле. Ряд K_3 (расположенный также в зазоре) служил для контроля достоверности траекторий.

Импульсы частиц $P = 0,4, 0,8, 1, 2, 5$ и $10 \frac{\text{Бэв}}{\text{с}}$ измерялись, соответственно, с неточностями 5, 4,5, 5, 9, 25 и 50%.

По срабатываниям в нижних шести двойных рядах счетчиков Гейгера — Мюллера, чередуемых с медными поглотителями с общей поверхностной плотностью 178 г/см^2 определялись места остановок частиц в веществе. Эти поглотители давали возможность разделить потоки протонов от потоков μ -мезонов, останавливающихся в них.

стояло в поглощении электронно-фотонной компоненты космического излучения.

Применявшийся пропорциональный счетчик конструкции Харитонов В. М. представлял собой прямоугольную коробку, изготовленную из дюралюминия, разделенную на две части медной фольгой толщиной в 0,2 мм. Толщина наружных стенок была 3,5 мм. Толщина каждого счетчика равнялась 3,9 см, длина — 44 см, ширина — 11 см. В центре каждого пропорционального счетчика была натянута молибденовая проволока диаметром 0,1 мм, служащая анодом. В медной перегородке имелись отверстия, вследствие чего давление газовой смеси в обоих счетчиках было одинаковым. Пропорциональные счетчики были наполнены смесью 25% аргона и 75% метана до давления 40 см ртутного столба. Пропорциональные счетчики со всех сторон были окружены счетчиками Гейгера — Мюллера, дающими возможность отбирать только те частицы, которые не сопровождались ливнями. Пропорциональные счетчики работали при напряжении 2600 вольт и имели газовое усиление порядка 100.

Усилительно-регистрирующие каналы обоих пропорциональных счетчиков были совершенно одинаковыми и состояли из:

1. Предварительного широкополосного усилителя, охваченного сильной отрицательной обратной связью с катодным повторителем на выходе; коэффициент усиления усилителя равнялся 100;
2. Промежуточного широкополосного усилителя с регулируемым коэффициентом усиления в пределах от 5 до 100, также охваченного обратной связью;
3. Затягивателя и инвертора с общим усилением порядка 40.

Импульсы с инвертора подавались непосредственно на отклоняющие пластины осциллографической трубки, с одного канала на горизонтально отклоняющие пластины, с другого на вертикально отклоняющие. Таким образом, отклонение луча на экране осциллографической трубки представляло собой векторную сумму отклонений в отдельных каналах. Зная наклон и длину следа луча, мы могли определить величину отклонения в каждом канале отдельно.

Все лампы каналов, а также и электроды осциллографической трубки питались от соответствующих стабилизированных источников питания.

При испытании системы было установлено, что завал амплитудной характеристики при отклонении луча на весь экран осциллографической трубки не превышал 2%.

При срабатывании установки одновременно со вспышками неоновых лампочек происходило и подсвечивание луча осциллографической трубки. Луч автоматически фотографировался на кадре киноленты.

Регистрация частицы происходила только в случае ее прохождения через ряды счетчиков K_1 , K_2 и K_4 и остановки в одном из нижних поглотителей.

Таким образом, установка давала возможность для каждой зарегистрированной частицы получать сведения о ее импульсе, пробеге в веществе и ионизирующей способности.

2. Градуировка пропорциональных счетчиков

Для градуировки системы пропорциональных счетчиков, из числа зарегистрированных частиц, отбирались две группы протонов с импульсами в пределах $0,58 \leq P \leq 0,71$ и $0,71 \leq P \leq 0,90 \frac{\text{БэВ}}{c}$ остановившихся в поглотителях Π_3 и Π_4 , благодаря только ионизационным потерям энергий.

Дейтроны, ионизационно остановившиеся в тех же поглотителях, имели значительно большие импульсы и, следовательно, не могли попасть в отобранный поток протонов.

В число отобранных протонов не вошли также те, которые сопровождалась разрядом в счетчиках рядов T_2 и дополнительными разрядами в счетчиках рядов B_1 и K_1 . Наличие этих разрядов указывало на существование ливневого сопровождения. Не брались также протоны, не вызвавшие разрядов в счетчиках ряда B_1 , то есть генерированные нейтронами в стенках пропорциональных счетчиков.

Таким образом, в результате отбирались только ионизационно остановившиеся протоны, не имеющие видимого сопровождения вторичными частицами при прохождении через объемы пропорциональных счетчиков. За время эксперимента нам удалось отобрать из числа зарегистрированных протонов 678 со средним импульсом $\bar{P} = 0,64 \frac{\text{БэВ}}{c}$ и

835 протонов с $\bar{P} = 0,80 \frac{\text{БэВ}}{c}$. За то же время эксперимента были зарегистрированы 645 μ -мезонов с импульсами в пределах $0,18 \leq P \leq 0,19 \frac{\text{БэВ}}{c}$ и 1335 μ -мезонов с импульсами $0,35 \leq P \leq 0,37 \frac{\text{БэВ}}{c}$.

Эти μ -мезоны остановились ионизационно в поглотителях Π_3 и Π_6 и отбирались по тому же методу, что и протоны. Средние импульсы этих мезонов соответственно были $P = 0,185$ и $P = 0,36 \frac{\text{БэВ}}{c}$.

На рис 2. представлена градуировочная линия канала нижнего пропорционального счетчика, на основании данных которого и составлена приводимая работа. Градуировка произведена по данным о ионизирующей способности отобранных четырех групп частиц. По оси абсцисс отложены теоретические значения ионизации $\bar{Q}$ в электронвольтах, рассчитанные по формуле Бете—Блоха [6,7] для нашего счетчика. По оси ординат средние длины следов луча $\bar{l}$ на экране осциллографической трубки в условных единицах. Величина средней длины луча для каждой группы частиц рассчитывалась по формуле

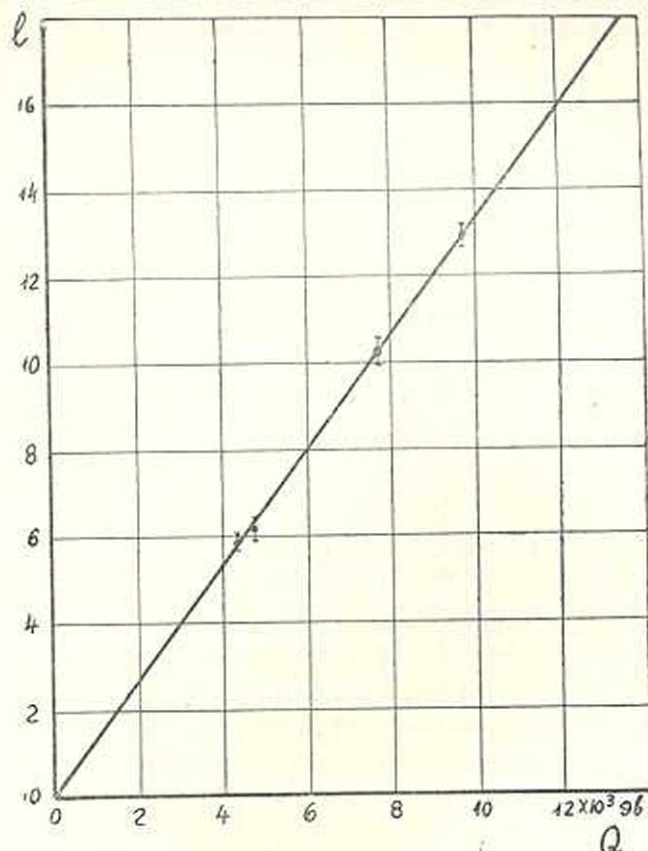


Рис. 2. Градуировочная линия канала нижнего пропорционального счетчика. По оси абсцисс отложены теоретические значения ионизаций, а по оси ординат — длины следов луча в условных единицах.

$$\bar{l} = \frac{\int_0^{\infty} l N(l) dl}{\int_0^{\infty} N(l) dl},$$

где N — число частиц в интервале $l \div l + dl$.

На рисунке приведены среднеквадратичные ошибки.

Как видно из рис. 2, зависимость $\bar{l} = f(Q)$ получается прямой линией. Это естественно, так как пропорциональный счетчик работал при малом значении коэффициента газового усиления, а амплитудная характеристика всего канала усиления была прямолинейной.

3. Результаты измерений

После получения градуировочной кривой из всего потока частиц, зарегистрированных магнитным спектрометром, отбирались только те, которые останавливались в поглотителях P_2 и P и при этом имели

импульсы в пределах, соответствующих ионизационным и ядерным остановкам дейтронов в этих поглотителях, т. е. для поглотителя P_2 с импульсами $P \geq 0,7 \frac{B_{эв}}{c}$ и P_3 с импульсами $P \geq 0,8 \frac{B_{эв}}{c}$. Нами не проводилось исследование дейтронов, остановившихся в поглотителях P_1 и $P_4 - P_6$ из-за большого фона других частиц. В число таким образом отобранных частиц могли попасть, кроме дейтронов, протоны и π -мезоны, остановившиеся в этих поглотителях благодаря ядерным взаимодействиям. Число π -мезонов в воздухе весьма незначительно по сравнению с протонами. Однако π -мезоны с такими импульсами могут рождаться в поглотителе P_0 , но благодаря малой поверхностной плотности этого поглотителя (32 г/см^2) число их будет незначительным.

Таким образом, можно заключить, что отобранные частицы являются в основном протонами с некоторой примесью дейтронов.

Затем все отобранные частицы группировались по интервалам импульсов, для отдельных интервалов подсчитывалась средняя величина длины следа луча $\bar{L}$, и средняя величина импульса $\bar{P}$. По формуле Бете — Блоха подсчитывались величины средних ионизаций $\bar{Q}_P$ и $\bar{Q}_D$ для протонов и дейтронов, обладающих средними значениями импульсов, а по градуировочной линии рис. 2 определялись соответствующие значения $\bar{I}$. Все результаты расчетов сведены в столбцы 1—5 таблицы.

$\bar{P}$ Бэв с	Протон		Дейтрон		Поглотитель				z		Nr	$\frac{N_D}{N_P}$
	$\bar{Q}_P$ эв	$\bar{I}_P$	$\bar{Q}_D$ эв	$\bar{I}_D$	P_2		P_3		погло- тит. P_2	погло- тит. P_3		
					N_2	$\bar{I}_2$	N_3	$\bar{I}_3$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,75	8160	10,8	21700	28,9	55	11,7	—	—	0,05	—	410	0,0074
0,85	7200	9,6	18050	24,1	52	12,7	72	9,2	0,214	—0,03	520	0,021
0,98	6300	8,4	14870	19,8	46	10,6	69	10,5	0,191	0,193	595	0,046
1,16	5670	7,5	11730	15,6	41	10,2	67	10,1	0,333	0,321	541	0,08
1,6	4900	6,5	8110	10,8	52	6,3	82	7,0	—0,05	0,116	670	0,022
											(825)	

В столбцах 6—9 приведены числа частиц и экспериментальные значения $\bar{I}$, в условных единицах.

Из таблицы видно, что экспериментальные значения в большинстве случаев оказываются больше, чем следовало ожидать для чистого потока протонов. Это особенно наглядно видно из рис. 3 и 4, на которых изображены кривые зависимости средней ионизации $\bar{I}$, в условных единицах от теоретического значения средней ионизации $\bar{Q}_P$.

Прямая линия на обоих рисунках является градуировочной линией.

Так как среди взятых частиц не могло быть других частиц кроме дейтронов, то ясно, что этот избыток ионизации вызван примесью дейтронов в потоке рассматриваемых протонов. На основании этого можно написать

$$\bar{I}_3 = \alpha \bar{I}_D + (1 - \alpha) \bar{I}_P,$$

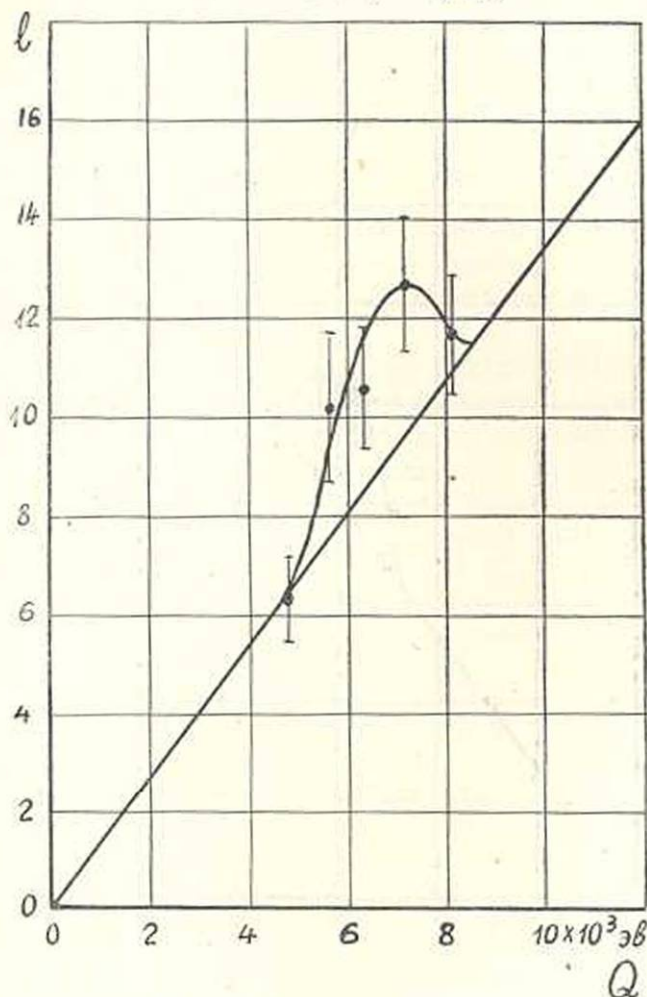


Рис. 3. Кривая зависимости средней ионизации $\bar{I}_3$ в условных единицах от теоретического значения средней ионизации $\bar{Q}$ для частиц дейтронной области, остановившихся в поглотителе Π_2 .

где α — относительная доля дейтронов в потоке рассматриваемых частиц, остановившихся в поглотителях Π_2 и Π_3 . В 10 и 11 столбцах таблицы приводятся значения α , рассчитанные по этой формуле.

Для определения относительного числа дейтронов в истинном вертикальном потоке протонов, нами за это же время измерений были найдены числа протонов тех же импульсов, зарегистрированных Известия IX, № 3—7

магнитным спектрометром. Числа этих протонов даны в 12 столбце таблицы. Число 825, взятое в скобки, есть исправленное число протонов с импульсом $\bar{P} = 1,6 \frac{\text{БэВ}}{\text{с}}$. Исправление произведено на число протонов, которые могли выйти из нижнего поглотителя без ядерно-

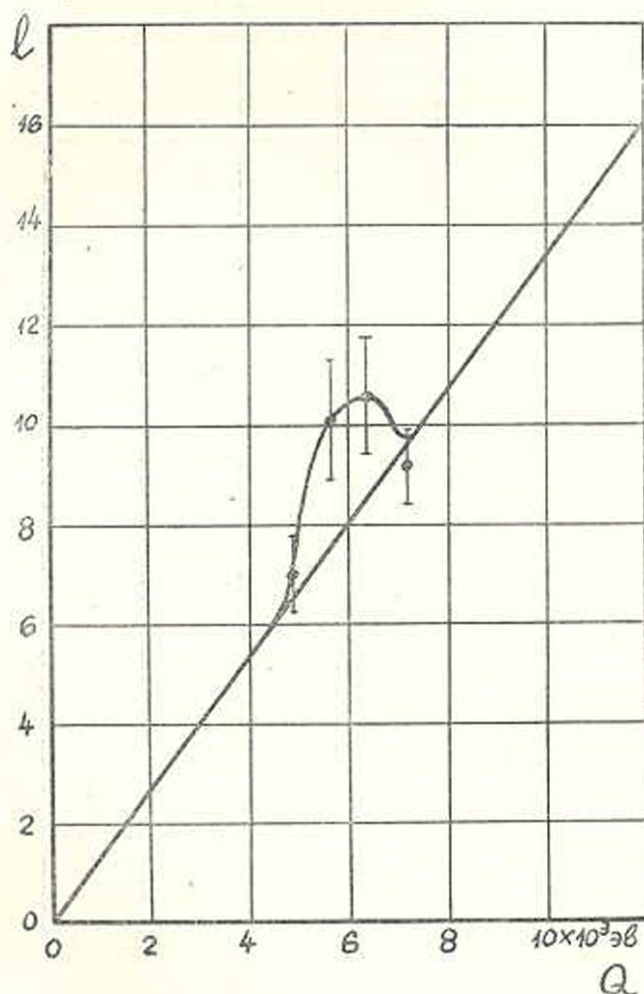


Рис. 4. Кривая зависимости средней ионизации $\bar{l}$ в условных единицах от теоретического значения средней ионизации $\bar{Q}$ для частиц дейтронной области, остановившихся в поглотителе Π_3 .

го взаимодействия и, вследствие наличия антисовпадения, не регистрировались. Истинное число протонов этого импульса приблизительно может быть подсчитано по формуле

$$N = \frac{N_p}{1 - e^{-\frac{x}{\lambda}}}$$

где N_p — число протонов, зарегистрированных магнитным спектрометром,

x — общая поверхностная плотность всех медных поглотителей равная 178 г/см^2 ,

λ — величина ядерного пробега взаимодействия протонов в меди.

Для получения истинных относительных чисел дейтронов различных импульсов в вертикальном потоке протонов, нами вводились поправки на числа дейтронов ионизационно останавливающихся в поглотителях Π_2 и Π_3 и за счет дейтронов со средним импульсом $\bar{P} = 1,6 \frac{\text{Бэв}}{\text{с}}$, останавливающихся в поглотителях Π_2 и Π_3 только бла-

годаря ядерным взаимодействиям. Часть первых не доходила до поглотителей Π_2 и Π_3 , а последних — проходила поглотители Π_2 и Π_3 без взаимодействий. Найденные истинные относительные числа дейтронов приведены в 13 столбце таблицы.

На рис. 5 приведены импульсные спектры протонов и дейтронов на глубине атмосферы 700 г/см^2 . Спектр протонов взят из работы Кочаряна [8], а спектр дейтронов построен на основании данных 13 столбца таблицы и приводимого спектра.

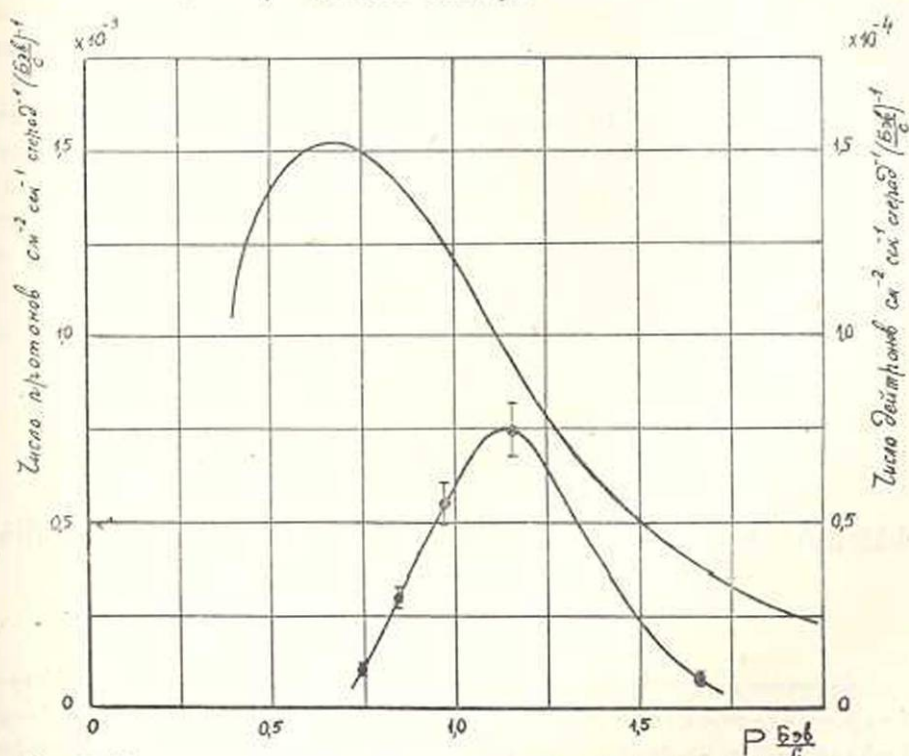


Рис. 5. Импульсные спектры протонов и дейтронов на глубине атмосферы 700 г/см^2 . По оси абсцисс отложены импульсы P в $\frac{\text{Бэв}}{\text{с}}$, а по оси ординат интенсивности в $\text{см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стер}^{-1} \left(\frac{\text{Бэв}}{\text{с}} \right)^{-1}$. Верхняя кривая соответствует протонам, нижняя дейтронам.

Максимум спектра дейтронов, по сравнению с максимумом спектра протонов заметно смещен в сторону больших импульсов. Этот результат естественен, так как спад кривой в спектре частиц в области малых импульсов обусловлен ионизационными потерями энергии, а при заданном импульсе ионизационные потери дейтронов больше, чем для протонов.

Фактически нами определены относительные числа дейтронов и протонов не в воздухе, а под свинцовым поглотителем P_0 с поверхностной плотностью 32 г/см^2 . Выясним роль этого поглотителя.

Отметим, что роль ионизационных потерь энергии несущественно сказывается на виде спектра дейтронов. Действительно, наличие поглотителя P_0 в смысле ионизационных потерь энергии приблизительно эквивалентно увеличению глубины атмосферы на 20 г/см^2 . Это не изменяет вида спектра, так как отношение чисел дейтронов и протонов на больших глубинах атмосферы слабо зависит от глубины, т. е. является равновесным.

Оценим роль ядерных процессов, происходящих в поглотителе P_0 . Величина ядерного пробега дейтронов в свинце равна приблизительно 100 г/см^2 . Следовательно, часть дейтронов, равная $1 - e^{-0.32} = 0,27$, поглотится в свинце. Но это уменьшение воздушного потока дейтронов пополняется дейтронами, рожденными в звездах ядер свинца, вызванных нуклонами больших энергий. Ядерный пробег нуклонов в свинце имеет порядок 160 г/см^2 . Величина пробега взаимодействия нуклонов с образованием звезд больше этого значения. Но не в каждой звезде образуются дейтроны, т. е. вероятность образования дейтронов меньше $1/6$. Ясно, что основная часть дейтронов, наблюдаемых нами, идет из воздуха. И возможно, что немногим более 0,27 от воздушного потока образуется в свинце.

Институт физики
АН Армянской ССР

Поступило 28 XII 1955 г.

Մ. Տ. Այվազյան

ԴԵՅՏՐՈՆՆԵՐԻ ԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ՍՊԵԿՏՐԸ ԿՈՍՄԻԿԱԿԱՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՈՒՂՂԱՁԻԳ ՇՈՒՔՈՒՄ

Ա. Մ. Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աշխատության մեջ համեմատական հաշվիչի և մագնիսական սպեկտրոմետրի զուգորդման օգնությամբ չափված է դեյտրոնների աղղաձիգ հոսքի ինտենսիվությունը ծովի մակարդակից 3200 մ բարձրության վրա: Որոշված է դեյտրոնների բաշխումն ըստ իրենց իմպուլսների $0,7 \leq P \leq 1,7 \frac{\text{ԵՅՎ}}{\text{գ}}$ տիրույթում: Այդ բաշխումը $P = 1,15 \frac{\text{ԵՅՎ}}{\text{գ}}$ իմպուլսի համար ունի խիստ ար-

տաճարային մաքրում: Նշված իմպուլսի համար զեյտրոնների և պրոտոնների ինտենսիվությունների հարաբերությունը հավասար է 0,08-ի: Ավելի փոքր և մեծ իմպուլսների համար այդ հարաբերությունն արագ նվազում է, ձգակալով դրոշի:

ЛИТЕРАТУРА

1. Поуэл К. Ф., Камерини У. и др. УФН, 43, 54, 1951.
2. Марисян Г. А. ДАН СССР, 85, 305, 1952.
3. Алиханян А. И. и Марисян Г. А. ДАН СССР, 87, 191, 1952.
4. Алиханян А. И., Алиханов А. И. и Вайсенберг А. О. ДАН АрмССР, 5, 129, 1946.
5. Алиханян А. И., Алиханов А. И. и Вайсенберг А. О. ЖЭТФ, 18, 301, 1948.
6. Rossi B. High-Energy Particles. N. J., 1952.
7. Росси Б. и Грейзен К. Взаимодействие космических лучей с веществом. Москва, 1948.
8. Кочарян Н. М. ЖЭТФ, 28, 160, 1955.