

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



3/41-75

P1 - 8926

Д-154

Н. Далхажав, И. Рафиев, Дж. А. Саломов,  
К. Д. Толстов, Р. А. Хошмухамедов, Г. С. Шабратова

4263/2-75

СПЕКТР МЕДЛЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРОТОНОВ  
С ИМПУЛЬСОМ 70 И ДЕЙТОНОВ 9,4 ГЭВ/С  
С ЯДРАМИ С, N, O И Ag, Br

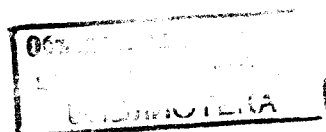
**1975**

P1 - 8926

Н.Далхажав, И.Рафиев, Дж.А.Саломов,  
К.Д.Толстов, Р.А.Хошмухамедов, Г.С.Шабратова

СПЕКТР МЕДЛЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРОТОНОВ  
С ИМПУЛЬСОМ 70 И ДЕЙТОНОВ 9,4 ГЭВ/С  
С ЯДРАМИ C,N,O И Ag, Br

*Направлено в ЯФ*



## Введение

Исследование энергетического и зарядового спектров частиц от распада ядер различного атомного веса при столкновении с быстрыми частицами дает сведения для выяснения механизма их взаимодействия с ядрами. Это взаимодействие начинается столкновением налетающей частицы с нуклонами ядра и в ряде теоретических работ последнего времени /1-4/ подчеркивается интерес к исследованиям столкновений с ядрами для выяснения генерации частиц в адронных столкновениях.

Интересно сопоставление результатов взаимодействия с ядрами одного нуклона и двух слабо связанных, например, дейтона.

Энергетический спектр частиц от распада ядер /в особенности, его мягкая часть/ описывался в более ранних работах на основе каскадно-испарительной модели. Однако при этом обнаружился ряд трудностей: наличие очень медленных /подбарьерных/ частиц и тяжелых фрагментов, растянутый "хвост" частиц с большой энергией. Это обусловило появление работ /5-10/, в которых рассматриваются неравновесные процессы, т.е. испускание частиц раньше достижения состояния статистического равновесия.

В работе /11/ коллективное возбуждение ядерной материи быстрой частицей приводит к распространению ударной волны, на основе чего в /12/ объясняется вылет частиц с  $Z > 3$ . Дальнейшая разработка модели ударной волны /13-15/ позволила авторам /15/ описать экспериментальные результаты /16/.

В настоящей работе сообщаются данные по энергетическому и зарядовому спектрам медленных частиц при взаимодействии с группами ядер С, N, O и Ag, Вг протонов при 70 ГэВ/с и дейтонов при 9,4 ГэВ/с. Проводится сопоставление с другими данными и моделями взаимодействия.

### Проведение эксперимента

Для исследования взаимодействия протонов с импульсом 70 и дейтонов 9,4 ГэВ/с с легкими и тяжелыми ядрами в опытах использовались фотоэмульсии двух типов: 1 - стандартная эмульсия БР-2 и 2 - эмульсия БР-2, пропитанная этиленгликолем  $(\text{CH}_2\text{OH})_n$ .

Методика разделения взаимодействий на группах ядер описана в работе<sup>/17/</sup> и в Приложении 1.

На рис. 1 показаны кривые зависимости пробега протонов от энергии для эмульсий 1 и 2.

Классификация частиц в звездах на s, g и b частицы /релятивистские, серые и черные/ производилось с помощью измерений  $J/J_0$ , причем за эталон бралось  $J_0$  - число сгустков на следах первичных частиц.

В табл. 1 приведена зависимость средних величин, характеризующих генерацию частиц для отдельных групп ядер и их распад для взаимодействия протонов и дейтонов.

Все медленные b-частицы прослеживались до остановки в эмульсии и проводилась дискриминация b-частиц по зарядам  $Z = 1; 2$  и  $Z \geq 3$  визуально по следующим критериям: по толщине следа, сужению следа в конце, наличию разрывов в самом конце следа вследствие уменьшения заряда при захвате орбитальных электронов. Частицы с  $Z \geq 3$  отличаются более сильным выражением этих признаков, а также специальными признаками, например,  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^8\text{Be}$  дают молоткообразные следы, а распад  ${}^8\text{Be}$  дает пару  $\alpha$ -частиц с приблизительно одинаковыми пробегами, летящими почти в одном направлении. Однозарядные частицы считались протонами, а двухзарядные -  $\alpha$ -частицами.

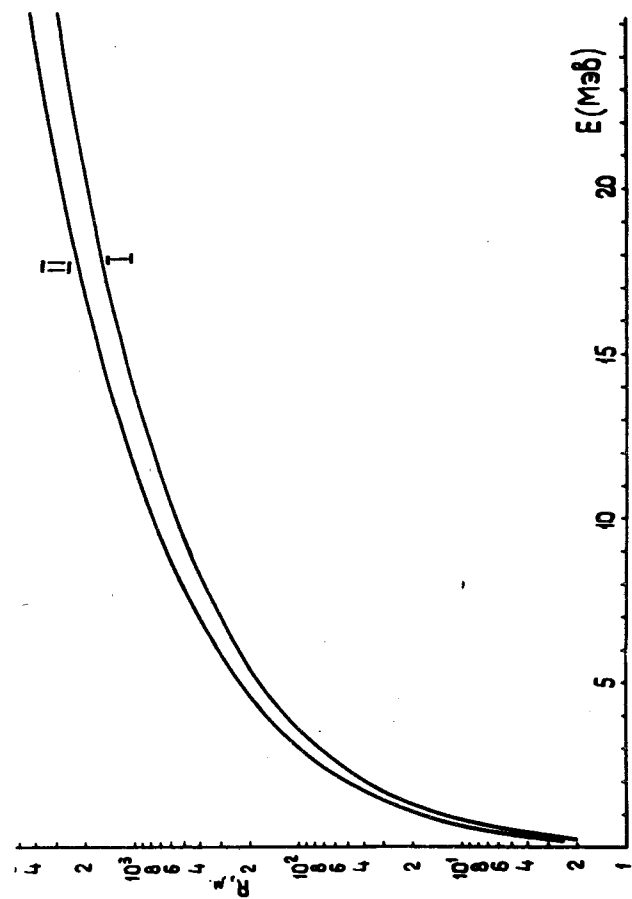


Рис. 1. Зависимость пробега протонов от энергии для эмульсий 1 и 2.

Таблица I

Ядра	Частица и ее импульс в ГэВ/с	$\langle n_x \rangle$	$\langle n_y \rangle$	$\langle n_z \rangle$
C, N, O	Протоны 70	7,53±0,27	0,90±0,05	2,57±0,13
	Дейтоны 9,4	2,57±0,31	1,19±0,23	2,69±0,21
Ag, Br	Протоны 70	10,59±0,48	2,98±0,10	7,1±0,50
	Дейтоны 9,4	3,31±0,30	2,12±0,27	7,42±0,51

Для контроля надежности этой дискриминации из всей совокупности частиц с зарядом  $z=2$  была выделена группа частиц с углом наклона к плоскости эмульсии  $\alpha \leq 31^\circ$ . Число таких частиц составило 234, а сумма статвесов - 436. Сумма всех частиц с  $z=2$  без ограничения по углу наклона равна 560. Отсюда следует, что с увеличением угла наклона к плоскости эмульсии разделение протонов и частиц с  $z=2$  ухудшается /наблюдается присклет протонов к частицам с  $z=2$ /.

После разделения частиц по зарядам, используя кривую рис. 1, произвели пересчет пробегов частиц из эмульсии 2 в эмульсию 1. На рис. 2а,б приведено распределение по пробегам в эмульсиях 1 и 2 для протонов и дейтонов, нормированное на одинаковое число частиц. Если взять отношение числа частиц, находящихся в интервале 0-100  $\mu$  к полному числу частиц, то для протонов 70 ГэВ/с получим: для эмульсии 2 - 0,36±0,02 для 1 - 0,27±0,02, для дейтонов - 0,38 и 0,28, соответственно.

На рис. 3 для протонов при 70 ГэВ/с приведено распределение по пробегам частиц в области  $R \leq 100 \mu$  на ядрах C, O; Ag, Br и Ag, Br с  $N_h \leq 6$ . Среднее число частиц с пробегом  $R \leq 100 \mu$  в звездах на легких и тяжелых ядрах составляет:  $n_{C,O} = 1,0 \pm 0,1$ ;  $n_{Ag, Br} = 2,0 \pm 0,15$ . Если на ядрах Ag, Br отобрать звезды  $N_h \leq 6$ , то получим:  $n_{Ag, Br} = 1,06 \pm 0,15$ . Для столкновения дейтонов:  $n_{C,O} = 1,0 \pm 0,15$ ;  $n_{Ag, Br} = 1,9 \pm 0,2$ .

/В Приложении 2 приведен другой расчет этих величин, приводящий к тем же результатам/.

Эти данные, а также рис. 2,3 указывают на невозможность разделения взаимодействия на группах тяжелых и легких ядер, по критерию  $R \leq R_{\min}$ , что предполагалось на основе оценки кулоновского барьера ядер.

Перейдем к энергетическому спектру частиц.

Энергия частиц с известной массой и зарядом связана с пробегом соотношением  $E = aR^m$ . Для протонов в стандартной эмульсии  $a = 0,251$ ,  $m = 0,581$ , а в загруженной  $a = 0,227$ ,  $m = 0,568$ . Для взаимодействия протонов на рис. 4а дан энергетический спектр однозарядных частиц на группе ядер C, N, O, а на рис. 4б спектр  $z=2$  для ядер C, N, O и Ag, Br. Для взаимодействия

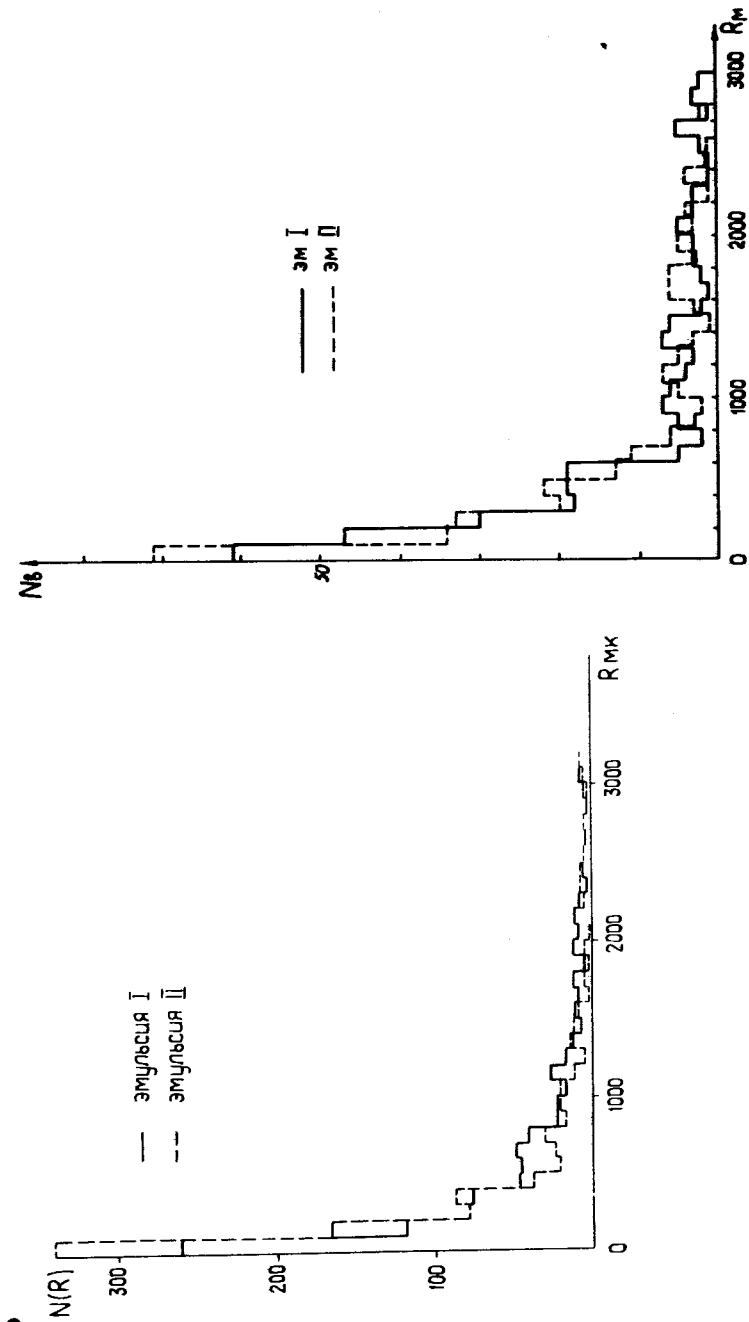


Рис. 2. Распределение по пробегам в эмульсиях I и 2. а/ для взаимодействия протонов, б/ для взаимодействия дейтронов.

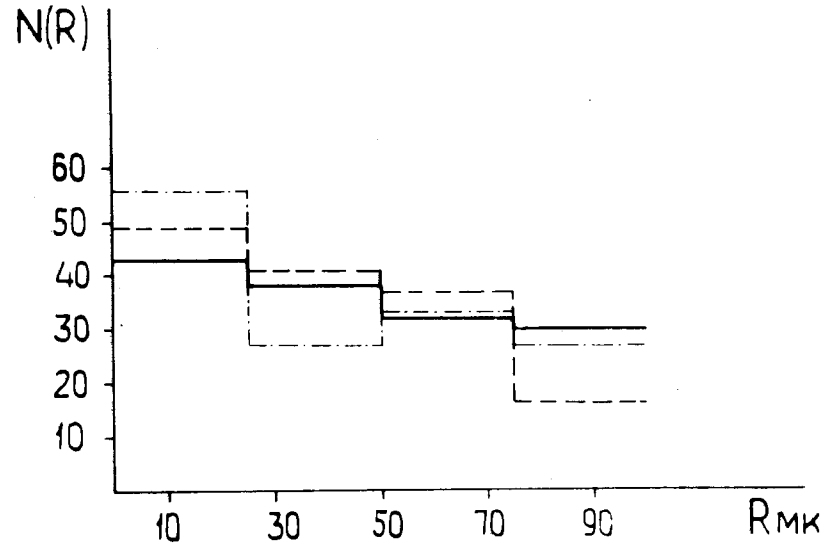


Рис. 3. Распределение по пробегам частиц в области  $R \leq 100$  для взаимодействия протонов. — взаимодействия с Ag, Br; - - - взаимодействия с C, O; - · - · - взаимодействия с Ag, Br ( $N \leq 6$ ).

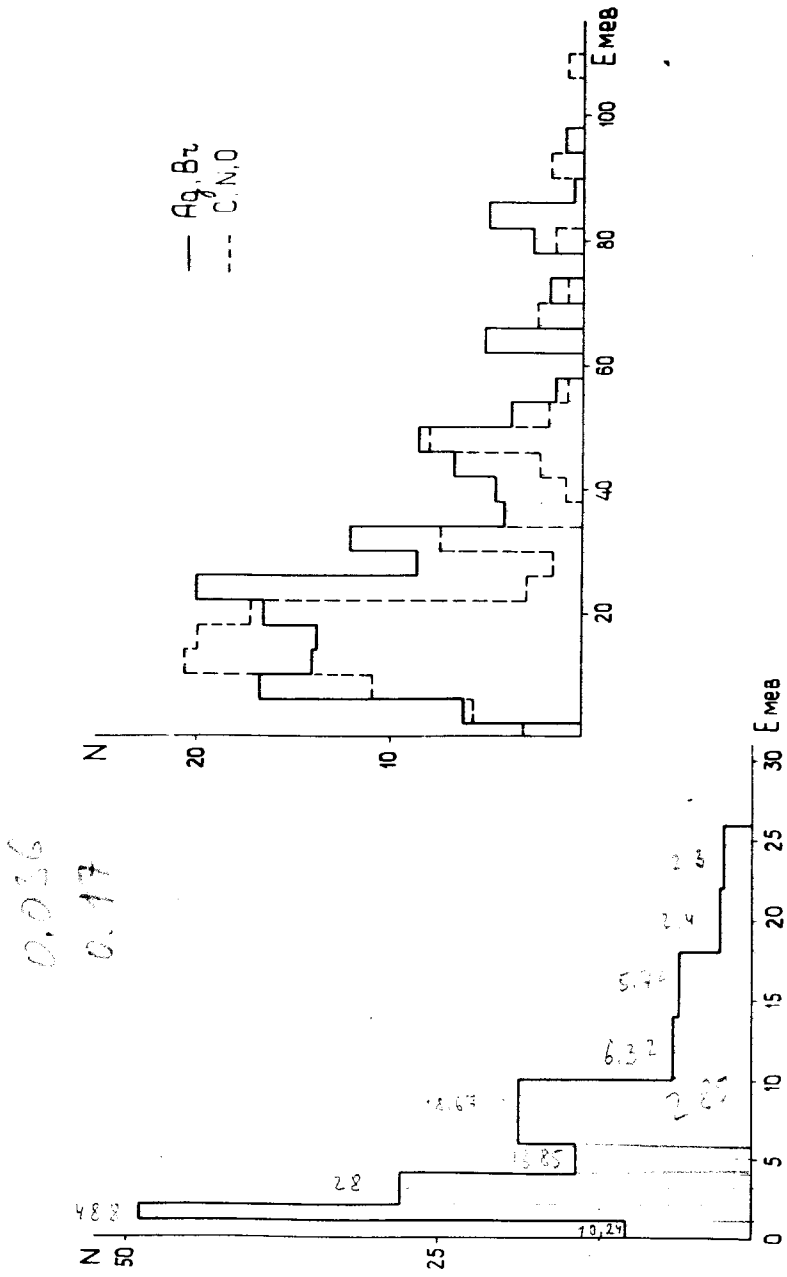


Рис. 4. Энергетический спектр для взаимодействия протонов на группах ядер:  $a/z = 1$  для ядер C, N, O.  $b/z = 2$  для ядер C, N, O и Ag, Br.

дейтонов на рис. 5а дан спектр однозарядных частиц, на рис. 5б спектр  $z = 2$ .

В табл. 2 приведены средние величины энергий и распределений по зарядам для взаимодействия протонов и дейтонов с группами ядер.

На основании данных таблицы проведем сопоставление расчетов по испарительной модели с опытными результатами по спектру протонов. Энергия возбуждения:  $E = \sum n_i \langle E_i \rangle + \sum Q_i n_i$ , где  $n_i$  - число частиц с зарядом  $i$  /учитывая также нейтроны/,  $\langle E_i \rangle$  - средняя кинетическая энергия,  $Q_i$  - энергия связи. Кинетическая энергия нейтрона принималась равной  $\langle E_n \rangle = \langle E_p \rangle - 3 \text{ МэВ}$ , где 3 МэВ - кулоновский барьер для возбужденных ядер  $A \approx 100$ , число нейтронов  $n_n \sim 1,3 n_p$ .

Энергетический спектр одиночных протонов при испарении из ядра с температурой  $T$  дается формулой:

$$N(E) dE = \frac{E - v}{T^2} e^{-\frac{E - v}{T}} \quad /1/$$

где  $v$  - кулоновский барьер. Для среднего атомного веса ядер Ag, Br = 94, исходя из определенной энергии возбуждения температура  $T$  составляет  $\approx 4 \text{ МэВ}$ .

В случае последовательного испарения частиц Ле-Крутер дает следующую формулу для спектра протонов:

$$N(E) dE = (E - v)^{\ell - 1} \frac{dE}{\Gamma(\ell) \tau^\ell} e^{-\frac{E - v}{\tau}} \quad /2/$$

где  $\tau = \frac{11}{12} T$ ;  $\ell = \frac{16}{11}$ ;  $\Gamma(\ell)$  - гамма функция. Расчеты спектра протонов на основе формул /1/ и /2/ для  $T = 4 \text{ МэВ}$  и  $v = 3 \text{ МэВ}$  приведены соответственно для взаимодействия протонов и дейтонов с Ag, Br на рис. 6а,б совместно с экспериментальными данными. Как видно из спектра, максимум распределения протонов по энергии находится в области 4 МэВ, а кривая вычисленная по испарительной модели сдвинута, т.е. из рис. 6 видно, что расчетные кривые в целом не описывают экспериментальный спектр.

Таблица 2

Частица и ее импульс в ГэВ/с	Ядра		Заряд		$\langle E_p \rangle$ МэВ		$\langle E_d \rangle$ МэВ		$\langle E_p \rangle$ МэВ		Энергия возбуд. МэВ
	I		2		3		4		5		
	среднее число	среднее число	среднее число	среднее число	среднее число	среднее число	среднее число	среднее число	среднее число	среднее число	
Протон 70	$C, N, C$	$1,57 \pm 0,10$	$0,90 \pm 0,07$	$0,22 \pm 0,03$	7,84	48,73	24,25	100,2			
Протон 70	$A_9, B_2$	$3,17 \pm 0,16$	$3,19 \pm 0,16$	$0,74 \pm 0,02$	9,55	32,25	26,68	294,48			
Дейтроны 9,4	$C, N, C$	$1,75 \pm 0,15$	$0,88 \pm 0,12$	0,06	8,2	28,5	66	45			
Дейтроны 9,4	$A_9, B_2$	$5,27 \pm 0,3$	$2,75 \pm 0,22$	$0,35 \pm 0,1$	10,7	56,27	48,8	374			

Частица и ее импульс в ГэВ/с	$C, N, O$		$A_9, B_2$		Интер-тура
	Огранич. по $N_h$	Критерий пробега	Огранич. по $N_h$	Критерий пробега	
Протоны (9)	$N_h \leq 4$	-	$N_h \geq 7$	-	/17/
Протоны (60 и 67)	$I \leq N_h \leq 6$	Есть след с $R \leq 80$ МК	$N_h \geq 7$ $N_h \leq 6$ $N_g = 0, N_g \geq 2$	нет следа с $R \leq 80$ МК	/18/
П- мезоны (17)	-	-	-	-	/18/
П- мезоны (60)	$I \leq N_h \leq 7$	Есть след с $R \leq 65$ МК	$N_h \geq 8$ $I \leq N_h \leq 7$	нет следа с $R \leq 65$ МК	/19/
Дейтроны (9,4)	$0 < N_h < 9$	Нет следа с $R \leq 100$ МК	$N_h \geq 9$ $0 < N_h < 9$	есть след с $R \leq 100$ МК	/20/
Косм. лучи (250)	$0 < N_h \leq 6$	Есть след с $R \leq 65$ МК	$N_h \geq 7$ $0 \leq N_h \leq 6$	Нет следа с $R \leq 65$ МК	/21/



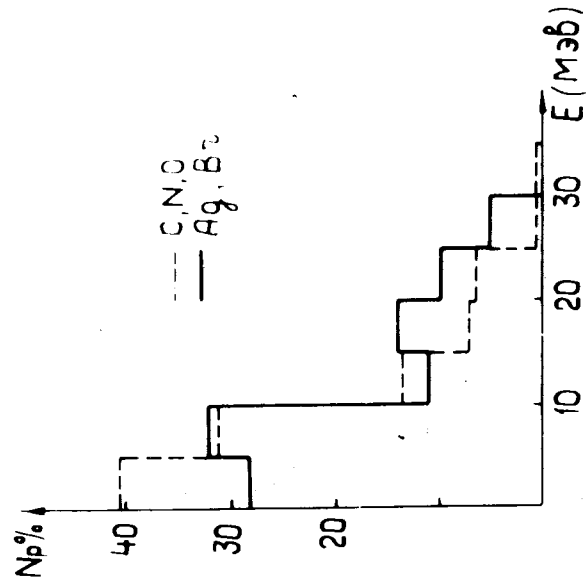
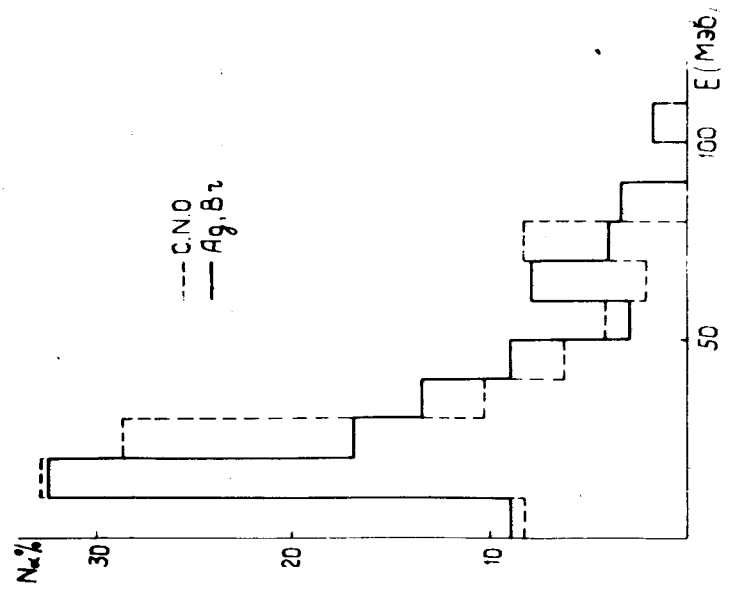


Рис. 5. Энергетический спектр для взаимодействия дейтронов. а/ спектр однозарядных частиц; б/ спектр частиц с  $Z=2$ .

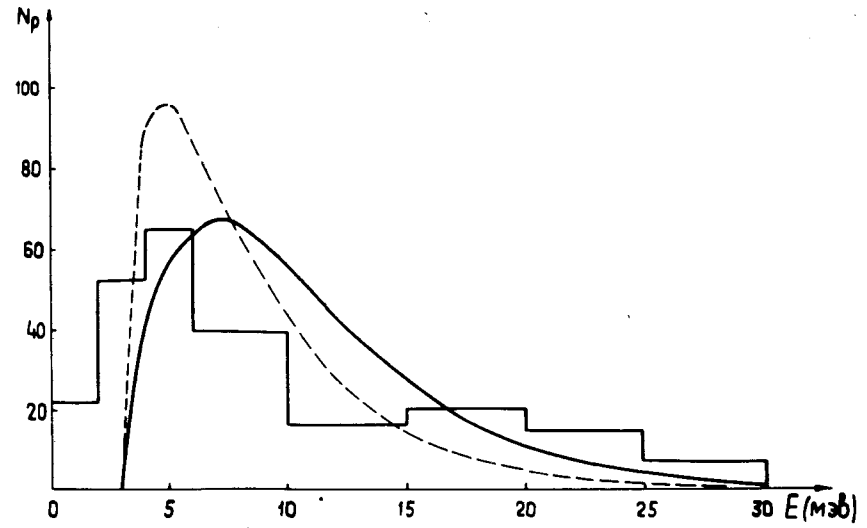
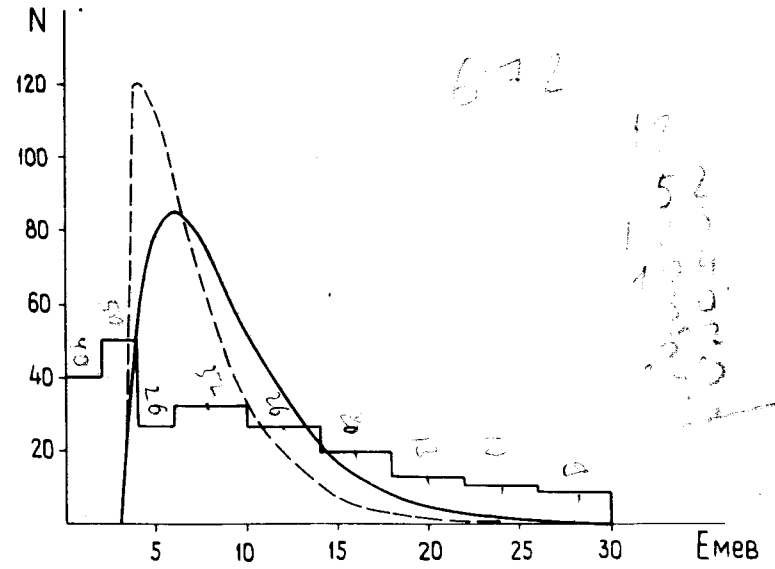


Рис. 6. Энергетический спектр протонов при взаимодействии с ядрами Ag, Br. а/ протонов. б/ дейтронов. Расчетные кривые - сплошная - по формуле /1/; пунктир - по формуле /2/.



## Заключение

Из таблиц 1 и 2 следует близость величин  $\langle N_h \rangle$  при взаимодействии с группами ядер протонов  $70 \text{ ГэВ}$  и дейтонов  $9,4 \text{ ГэВ/с}$ . Далее наблюдается подобие энергетических спектров и распределений по зарядам  $z=1$  и  $z=2$ , а также одинаковая доля частиц с малой энергией  $/R < 100 \text{ мк/}$ , т.е. вылет подбарьерных частиц для ядер  $\text{Ag}$  и  $\text{Вг}$ . Все эти факты не могут быть трактованы с помощью модели испарения. Объяснение нужно искать в моделях, когда вылет не только  $g$ -частиц, но и более медленных происходит из неравновесного состояния /т.е. нельзя говорить о возбужденном ядре со сниженным кулоновским барьером/. Близость величин  $\langle n_b \rangle$  зарядового и энергетического спектров частиц указывает /в обычном понимании/ на близкую "энергию возбуждения", однако большое различие в величинах  $\langle n_s \rangle$  для протонов  $70 \text{ ГэВ/с}$  и дейтонов  $9,4 \text{ ГэВ/с}$  указывает на то, что эта энергия не связана однозначно с числом  $S$ -частиц. Следовательно, она не обуславливается только передачей энергии ядру за счет  $S$ -частиц при их вылете из ядра по схеме обычного каскадного процесса. Возможно, что налетающая быстрая частица /протон или дейтон/, помимо генерации  $S$ -частиц, вносит в ядро близкую порцию энергии. Иллюстрацией может служить близость спектров и средних энергий протонов, а также  $\alpha$ -частиц как для протон-ядерных, так и для дейтон-ядерных взаимодействий. Интересно отметить близость этих характеристик аналогичным /16/ в случае полного разрушения ядер  $\text{Ag}$ ,  $\text{Вг}$  под действием протонов  $70 \text{ ГэВ}$  /  $\langle E_p \rangle = 11,3 \text{ МэВ}$ ,  $\langle E_\alpha \rangle = 31,6 \text{ МэВ}$  /, когда нет остаточного ядра, что необходимо для испарительной модели.

Таким образом, совокупность данных указывает на неравновесный характер процессов, формирующих спектр медленных частиц.

## Приложение 1

Известно, что из-за сложности ядерного состава эмульсии нельзя однозначно разделить взаимодействия на группах ядер. Вследствие этого для разделения взаимодействий на группах ядер  $\text{C}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{O}$  и  $\text{Ag}$ ,  $\text{Вг}$  в ряде работ /17-21/ были использованы различные и неоднозначные критерии. Как видно из таблицы, нижняя граница по  $N_h$  для тяжелых ядер изменялась от 6 до 9 включительно. Для выделения событий на группе ядер  $\text{C}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{O}$  использовался критерий минимального пробега, из-за большой величины кулоновского барьера у тяжелых ядер при их слабом возбуждении. Однако следует отметить, что при сильном возбуждении ядер происходит значительное снижение кулоновского барьера. Табл. 3 иллюстрирует эти различия и неоднозначности в ряде работ, где использовались эмульсии только стандартного состава.

В наших опытах, наряду со стандартной эмульсией БР-2, обозначаемой далее как 1, использовалась также эмульсия, обогащенная легкими ядрами /этиленгликолем, обозначаемая как 2/, что позволило уменьшить в единице объема  $\approx 2,7$  раза содержание ядер  $\text{Ag}$ ,  $\text{Вг}$ . Разделения взаимодействий на группы ядер производились по методике, предложенной в работе /22/, суть которой заключается в следующем. Сначала из общего числа звезд в эмульсиях 1 и 2 по общепринятым критериям исключаются взаимодействия с нуклонами и когерентные взаимодействия. Затем строится распределение числа звезд от  $N_h (N = f(N_h))$  для обоих типов эмульсии, соответственно нормированные как на одинаковую длину следов, так и на одинаковый объем. Далее, вычитая из распределений для эмульсии типа 2 распределения для эмульсии 1, можно получить распределение по составу лучей  $N_h$  для ядер  $\text{C}$ ,  $\text{O}$ . Таким же образом, методом вычитания можно получить распределение для ядер  $\text{Ag}$ ,  $\text{Вг}$ . Этот способ разделения взаимодействия на группах ядер свободен от всех условностей, которые использовались прежде.

## Приложение 2

Среднее число частиц на группах ядер C, N, O и Ag, Br с пробегом  $R \leq 100$  мк можно определить по результатам измерений пробегов частиц в эмульсии I и 2, не производя предварительного разделения звезд по этим группам ядер.

Прежде всего найдем долю числа частиц с  $R < 100$  в звездах на ядрах C, O от числа всех черных частиц на этих ядрах. Эту долю обозначим  $k(C, O)$

$$k(C, O) = \frac{N_{R \leq 100}^{II} - N_{R \leq 100}^I / k}{N^{II} - N^I / k},$$

где  $k$  - коэффициент увеличения объема эмульсии I после пропитки ее наполнителем.  $N^{II, I}$  - число частиц в гистограмме для 2 и 1 эмульсий, соответственно.  $N_{R \leq 100}^{II, I}$  - число частиц с  $R \leq 100$  для 2 и 1 эмульсий.

Подставляя данные из гистограмм, получаем  $k(C, O) = 0,41 \pm 0,05$ . Тогда среднее число частиц с  $R \leq 100$  в звездах на ядрах C, O будет равно

$$\langle n(C, O)_{R \leq 100} \rangle = \langle n(C, O) \rangle \cdot k(C, O) = 1,06 \pm 0,12.$$

Долю числа частиц с  $R \leq 100$  мк в звездах на ядрах Ag, Br от числа всех черных частиц на этой группе ядер найдем следующим образом:

$$k(Ag, Br) = \frac{N_{R \leq 100}^I \left( 1 - \frac{\langle n_{C, O} \rangle}{\langle n^I \rangle} \cdot \eta \cdot k(C, O) \right)}{N^I \left( 1 - \frac{\langle n_{C, O} \rangle}{\langle n^I \rangle} \cdot \eta \right)},$$

где  $\langle n_{C, O} \rangle$  - среднее число черных частиц в звездах на ядрах C, O,  $\langle n^I \rangle$  - среднее число черных частиц в звездах эмульсии I,  $\eta$  - доля взаимодействий на легких ядрах C, N, O от всех взаимодействий в эмульсии I.

$$k(Ag, Br) = 0,29 \pm 0,02,$$

следовательно, среднее число частиц с  $R \leq 100$  в звездах на ядрах Ag, Br равно

$$\langle n(Ag, Br)_{R \leq 100} \rangle = \langle n(Ag, Br) \rangle \cdot k(Ag, Br) = 2,06 \pm 0,15.$$

## Литература

1. P.M.Fishbane, J.S.Trefil. *Phys.Rev.*, D8, 1467/1973/. *Nucl.Phys.*, B58, 261 /1973/.
2. K.Gottfried. *Phys.Rev.Lett.*, 32, 957 /1974/.
3. A.Dar, J.Vary. *Phys.Rev.*, D6, 2412 /1972/.
4. Б.Н.Калинкин, В.Л.Шмонин. *ЯФ*, 21, 628 /1975/.
5. J.J.Griffin. *Phys.Rev.Lett.*, 17, 478 /1966/.
6. M.Blann. *Phys.Rev.Lett.*, 21, 1375 /1968/.
7. M.Blann, C.K.Cline. *Nucl.Phys.*, A172, 225 /1971/.
8. G.M.Braga Marcazzan et al. *Phys.Rev.*, C6, 1398 /1972/.
9. G.D.Harp, J.M.Miller, B.J.Berne. *Phys.Rev.*, 165, 1166 /1968/.
10. К.К.Гудима, Г.А.Ососков, В.Д.Тонеев. *ЯФ*, 21, 260 /1975/.
11. A.E.Glassgold, W.Heckrotte, K.Watson. *Annals of Phys.*, 6, 1 /1959/.
12. Л.П.Раннопорт, А.Г.Крыловецкий. *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 28, 388 /1964/.
13. W.Greiner. *Phys.Rev.Lett.*, 32, 741 /1974/.
14. W.Greiner. *Phys.Rev.Lett.*, 34, 697 /1975/.
15. Б.Н.Калинкин, В.Л.Шмонин. *ОИЯИ, P2-7871*, Дубна, 1974.
16. К.Д.Толстов, Р.А.Хошмухамедов. *Сообщения ОИЯИ, P1-6897*, Дубна, 1973.
17. E.M.Friedlander. *Nuovo Cimento*, 14, 796 /1959/.
18. Н.В.Масленникова и др. *Proc. of the 8th inter. conf. on nucl. photg. and solid state track detectors*, p. 132 Bucharest /1972/.
19. З.В.Анзон, И.Я.Часников в кн. "Физика выс. энерг. и косм. луч." стр. 23, "Наука", Алма-Ата /1974/.
20. А.О.Вайсенберг и др. *ЯФ*, 18, 1239 /1973/.
21. E.Lohrmann and M.W.Teucher. *Nuovo Cimento*, 25, 957 /1962/.
22. K.M.Abdo et al. *JINR, E1-7548*, Dubna, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 июля 1975 года.