

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



P1 - 9286

К.Д.Толстов

НЕУПРУГИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ДЕЙТРОНОВ И α -ЧАСТИЦ
С ЯДРАМИ

1975

P1 - 9286

К.Д.Толстов

НЕУПРУГИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ДЕЙТРОНОВ И α -ЧАСТИЦ
С ЯДРАМИ

Доложено на IV Международном семинаре по проблемам физики высоких энергий, Дубна, 5-11 июня 1975 года.

В настоящей работе изложены основные результаты, полученные Лабораторией высоких энергий ОИЯИ совместно с лабораториями Варшавы, Еревана, Кошице, Ленинграда, Москвы, Ташкента, Улан-Батора при исследовании взаимодействий релятивистских дейтронов и α -частиц с ядрами ¹⁻¹⁰.

Исследования начались с пионерских работ ЛВЭ^{11,12}, когда в 1970 г. на синхрофазотроне были получены дейтроны с импульсом 11 ГэВ/с. Данное сообщение содержит следующие разделы:

1. Сечения неупругих взаимодействий.
2. Стриппинг дейтронов и фрагментация α -частиц.
3. Генерация частиц на группах ядер (C,N,O) и (Ag,Br).
4. Распад ядер C,N,O и Ag, Br.
5. Полное разрушение ядер Ag, Br и Pb.

В исследованиях применялись ядерные фотоэмульсии. Целесообразность этого метода в настоящих исследованиях обусловлена тем, что при столкновениях релятивистских ядер мы имеем дело с большим числом генерированных частиц и частиц от распада ядер мишени с широким спектром по энергии, массам и зарядам. Использовались фотоэмульсии БР-2, а также БР-2, наполненные легкими ядрами и ядрами свинца по разработанной в ЛВЭ технологии.

В табл. 1 приведены ядерный состав фотоэмульсий, коэффициент "К", показывающий увеличение объема при наполнении фотоэмульсии БР-2 легкими ядрами, и средний пробег неупругого взаимодействия.

Применение фотоэмульсий с различным составом ядер и процедуры вычитания позволило разделить взаимодействия на группе легких ядер C,N,O и ядрах Ag, Br.

Таблица 1

Фотоэмульсия и наполнитель	коэфф. увелич. объема	Число ядер в $1 \text{ см}^3 \cdot 10^{22}$						Первичн. частица	Средний пробег
		H	C	N	O	Br	Ag		
I БР-2	I	3,15	1,41	0,396	0,965	1,031	1,036	d	$26,9 \pm 0,6$
								d	$19,5 \pm 0,3$
II БР-2 + этилен- гликоль (CH_2OH)	2,75	5,31	1,90	0,140	1,74	0,36	0,362	d	$39,6 \pm 2$
II БР-2 + 50% раствор глюкозы ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)	2,68	5,23	1,29	0,147	2,38	0,385	0,387	d	28 ± 1
II БР-2 + 70% раствор глицерина	2,3	5,12	1,51	0,172	1,99	0,448	0,45	d	$26,3 \pm 0,5$

1. Сечения неупругих взаимодействий

На основании закона аддитивности средние пробеги частиц при взаимодействии с ядрами: эмульсии БР-2, БР-2, наполненной легкими ядрами, и наполнителя (λ_1 , λ_{II} , λ) связаны соотношением

$$\frac{1}{\lambda_{II}} = \frac{1}{\lambda} \frac{k-1}{k} + \frac{1}{\lambda_1} \cdot \frac{1}{k},$$

$$\frac{1}{\lambda} = \sigma_n n_n + \sigma_c n_c + \sigma_0 n_0,$$

где σ и n есть сечения и число ядер в 1 см^3 наполнителя. Принимая согласно^{/13/} $\alpha_n = 100 \text{ мб}$, используя закон $A^{2/3}$ для связи сечений $\sigma_c - \sigma_0$ и $\sigma_{Br} - \sigma_{Ag}$ и данные табл. 1, мы получим сечения взаимодействия дейтронов и α -частиц с ядрами кислорода и серебра. Они являются пока единственными экспериментальными результатами в этой области энергии и приведены в табл. 2, где помещены для сравнения сечения p -ядро и сечения, рассчитанные в^{/13/} для взаимодействия α -частиц с энергией 4,2 ГэВ с ядрами кислорода и циркония.

Таблица 2

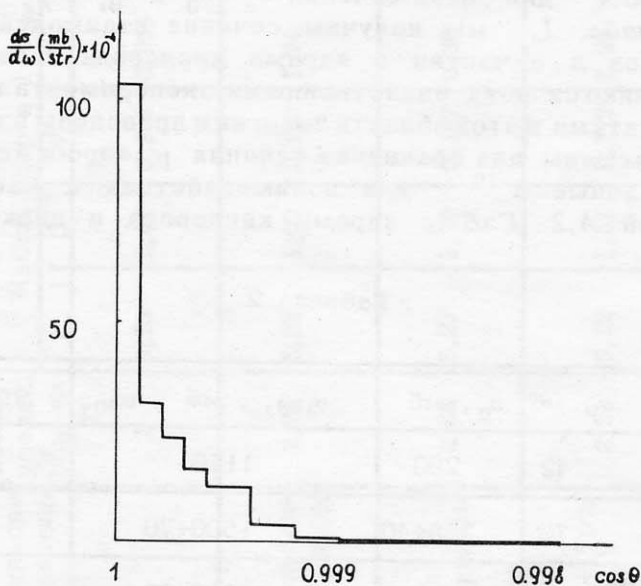
	σ_p , мб	σ_0 , мб	σ_{108Ag} , мб	σ_{90Zr} , мб
p	42	290	1170	
d	70	385 \pm 40	1500 \pm 70	
α	100	500 \pm 30	1910 \pm 70	
$\alpha^{/13/}$		680		1660

2. Стриппинг дейтронов и фрагментация α - частиц

К ядерному стриппингу дейтронов с вылетом протонов были отнесены звезды, в которых только нейтрон дейтрона испытывал неупругое взаимодействие. Они характеризуются узким угловым распределением протонов, обусловленным в основном фермиевским движением нуклонов в дейтроне. Импульсное распределение протонов имело максимум при половине импульса дейтрона. Вероятность стриппинга на всех ядрах эмульсии БР-2 была найдена равной $W = 0,18 \pm 0,04$.

Из табл.1 и 2 следует, что вероятность взаимодействия дейтрона с легкими ядрами - 0,26, в соответствии с этим среднее эффективное ядро имеет атомный вес $\langle A \rangle = 72$ и сечение $\langle \sigma \rangle = 1100 \pm 50$ мб, откуда получим:
 $\langle \sigma_{\text{стр}} \rangle = 200 \pm 45$ мб.

Дифференциальные сечения стриппинга показаны на рис. 1.



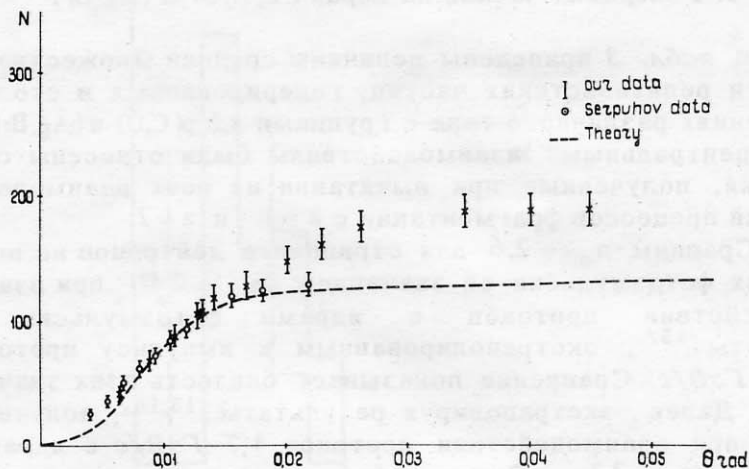


Рис. 2. Интегральное угловое распределение стриппинга.

На рис. 2 приведены интегральное угловое распределение стриппинга дейтронов $9,4 \text{ ГэВ/с}$ и для сравнения - распределение стриппинга антидейтронов $13,3 \text{ ГэВ/с}$ на ядрах углерода по данным 14 , нормированные при угле $10,5 \text{ мрад}$, а также расчетная кривая. Несовпадение при больших углах, возможно, связано с перерассеянием протонов на более тяжелых ядрах.

События фрагментации α -частиц с вылетом фрагментов под углами $\theta \leq 3^\circ$ к первичному пучку разделяются по зарядам на две группы: с $z=1$ и с $z=2$.

Импульсное распределение для фрагментов с $z=1$ показывает, что вероятности вылета p , d и T относятся, как $2 : 2 : 1$. Сечения фрагментации $\sigma^{z=1}$ на группах ядер получены равными: $\sigma^{z=1}(\text{C}, \text{O}) = 203 \pm 52 \text{ мб}$; $\sigma^{z=1}(\text{Ag}, \text{Br}) = 570 \pm 160 \text{ мб}$.

Вылет частиц с $z=2$, т.е. фрагментация с образованием He^3 , или же сохранение α -частицы после неупругого взаимодействия происходят на группах ядер с сечениями $\sigma^{z=2}$, равными: $\sigma^{z=2}(\text{C}, \text{O}) = 37 \pm 12 \text{ мб}$; $\sigma^{z=2}(\text{Ag}, \text{Br}) = 130 \pm 54 \text{ мб}$.

3. Генерация частиц на ядрах (C, N, O) и (Ag, Br)

В табл. 3 приведены величины средней множественности релятивистских частиц, генерированных в столкновениях различного типа с группами ядер (C, O) и (Ag, Br). К "центральным" взаимодействиям были отнесены события, полученные при вычитании из всех взаимодействий процессов фрагментации с $z = 1$ и $z = 2$.

Сравним $\langle n_s \rangle = 2,6$ для стриппинга дейтронов на всех ядрах фотоэмульсии со значением $\langle n_s \rangle = 2,47$ при взаимодействии протонов с ядрами фотоэмульсии из работы /15/, экстраполированным к импульсу протона $4,7 \text{ ГэВ/с}$. Сравнение показывает близость этих значений. Далее, экстраполируя результаты /15,16/, получим, что при взаимодействии протонов $4,7 \text{ ГэВ/с}$ с ядрами Ag, Br $\langle n_s \rangle = 2,7$. Следовательно, сравнение с данными табл. 3 показывает, что $\langle n_s \rangle$ для дейтронов и α -частиц сильно отличается от ожидаемого при аддитивности взаимодействия с ядрами нуклонов налетающих частиц. В соответствии с этим можно оценить вероятность взаимодействия двух нуклонов дейтрона с ядрами Ag, Br, ко-

Таблица 3

Частица	Тип взаимодейд.	Мишень	$\langle n_s \rangle$	
d	все	C, O	$2,57 \pm 0,31$	
	все	Ag, Br	$3,31 \pm 0,30$	
	стриппинг	все ядра	$2,6 \pm 0,10$	
α	все	C, O	$3,90 \pm 0,13$	
	все	Ag, Br	$4,81 \pm 0,08$	
	фрагмент, $z = 1$	H, C, O	$3,55 \pm 0,10$	
	- " - $z = 1$	Ag, Br	$3,94 \pm 0,06$	
	- " - $z = 2$	H, C, O	$0,75 \pm 0,16$	
	- " - $z = 2$	Ag, Br	$1,38 \pm 0,10$	
	Центральные	C, O		$4,17 \pm 0,20$
		Ag, Br		$5,78 \pm 0,10$

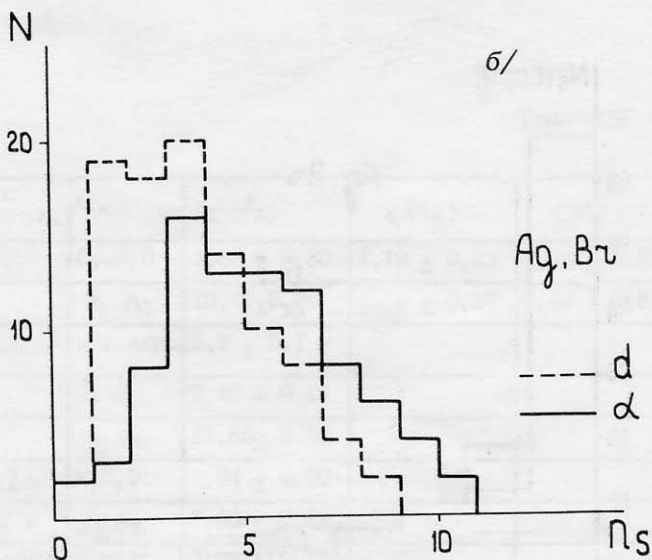
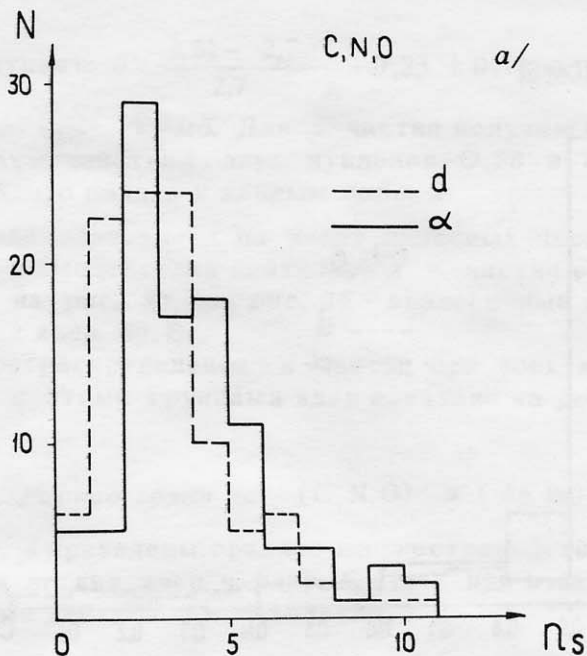


Рис. 3. Распределение s -частиц от взаимодействия дейтронов и α -частиц с ядрами: а/ C, N, O; б/ Ag, Br.

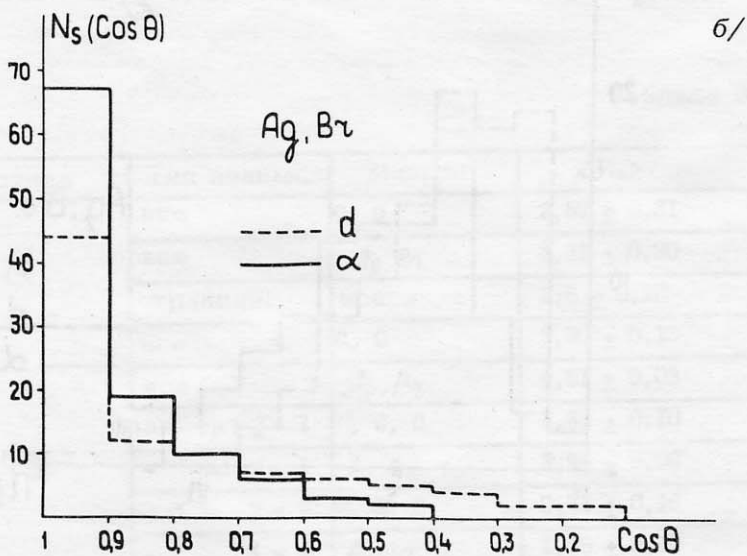
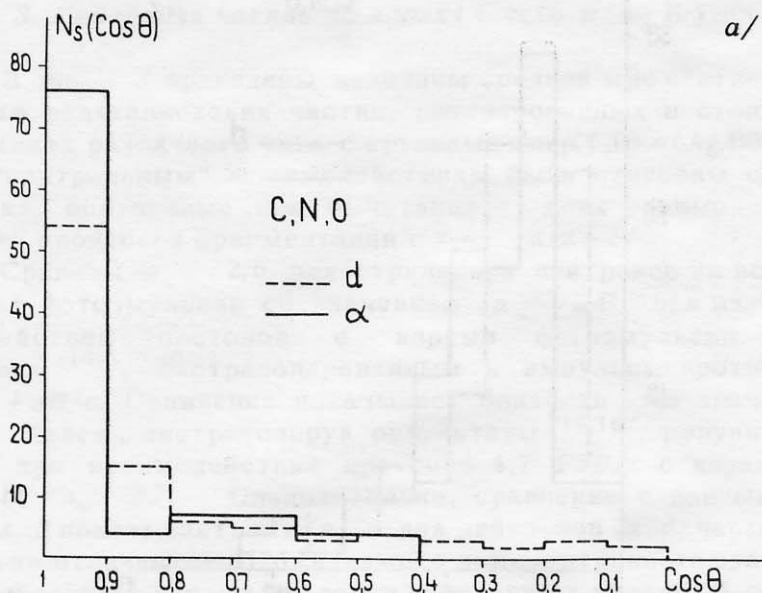


Рис. 4. Угловое распределение s -частиц от взаимодействия дейтронов и α -частиц с ядрами: а/ C, N, O ; б/ Ag, Br .

торая составит: $\omega = \frac{3,31 - 2,7}{2,7} = 0,23 \pm 0,13$, а сечение

$\sigma_{Ag,d} = 1,23 \sigma_{Ag,p} = 1460$ мб. Для α -частиц получим вероятность взаимодействия двух нуклонов $\sim 0,78$ и сечение ≈ 2050 мб, что близко к данным табл. 2.

Распределение звезд по числу ливневых частиц n_s для всех взаимодействий дейтронов и α -частиц с ядрами C, O дано на рис. 3а, на рис. 3б - аналогичные распределения для ядер Ag, Br.

Угловое распределение s -частиц при всех взаимодействиях с этими группами ядер показано на рис. 4а, б.

4. Распад групп ядер (C, N, O) и (Ag, Br)

В табл. 4 приведены средние множественности частиц от распада легких ядер и ядер Ag, Br при взаимодействии с ними дейтронов и α -частиц.

Таблица 4

Частица	Тип взаимодействия	Мишень	$\langle \sqrt{h} \rangle$	$\langle n_g \rangle$	$\langle n_l \rangle$
α	все	C, N, O	$3,88 \pm 0,30$	$1,19 \pm 0,23$	$2,69 \pm 0,21$
	все	Ag, Br	$10,49 \pm 0,60$	$2,12 \pm 0,27$	$7,42 \pm 0,51$
	стриппинг	все ядра	$5,1 \pm 0,1$		
α	все	C, O	$2,97 \pm 0,13$		
	все	Ag, Br	$11,66 \pm 0,26$		
	фрагм. $\xi=1$	H, C, O	$2,04 \pm 0,10$		
	- " -	Ag, Br	$7,40 \pm 0,19$		
	фрагм. $\xi=2$	H, C, O	$2,97 \pm 0,16$		
	- " -	Ag, Br	$4,51 \pm 0,29$		
Центральные		H, C, O	$2,89 \pm 0,18$		
		Ag, Br	$15,32 \pm 0,35$		

Ядра	Заряд			$\langle E_p \rangle$, МэВ	$\langle E_\alpha \rangle$, МэВ
	1	2	≥ 3		
C, N, O	$1,75 \pm 0,15$	$0,88 \pm 0,12$	0,06	8,2	28,5
Ag, Br	$5,27 \pm 0,3$	$2,75 \pm 0,22$	$0,35 \pm 0,1$	10,7	36,3

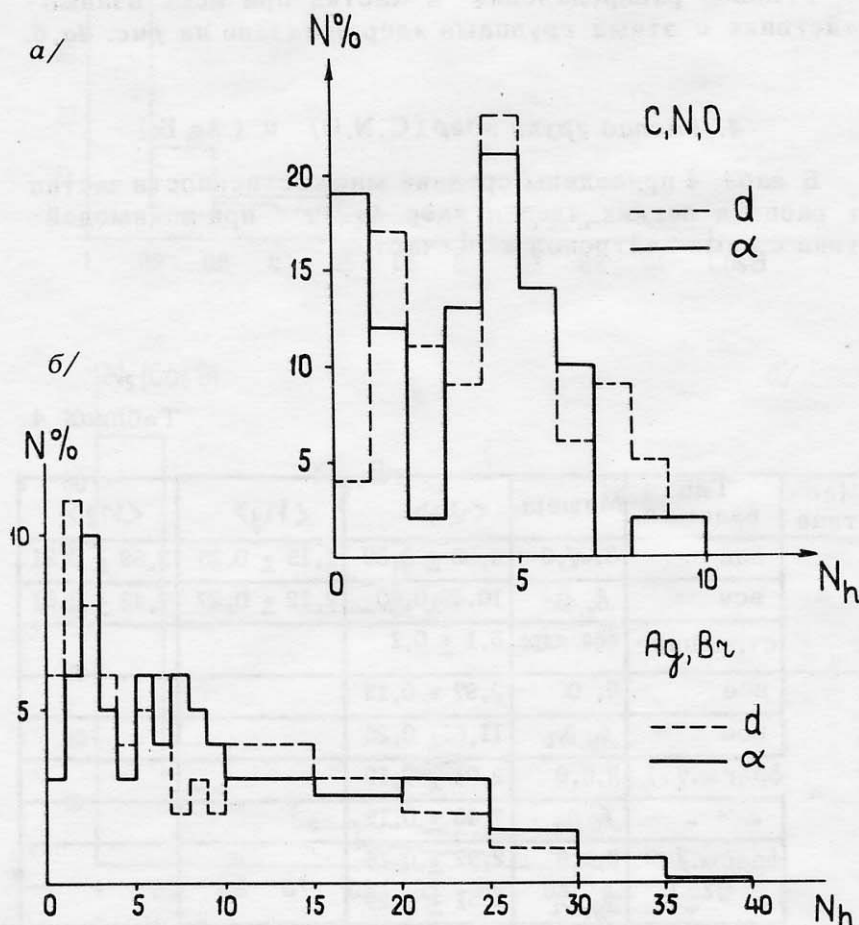


Рис. 5. Распределение звезд во взаимодействиях дейтронов и α -частиц с ядрами: а/ C, N, O; б/ Ag, Br.

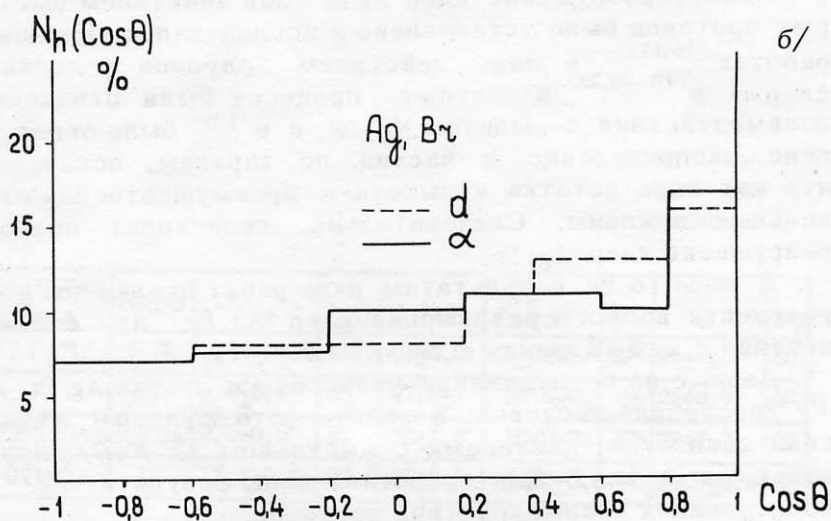
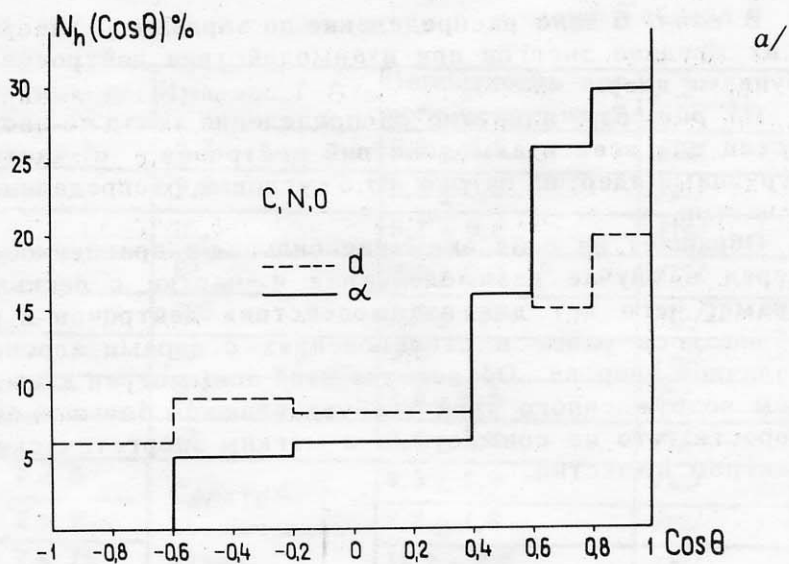


Рис. 6. Угловое распределение h -частиц от взаимодействия дейтронов и α -частиц с ядрами: а/ C, N, O; б/ Ag, Br.

В табл. 5 дано распределение по зарядам β -частиц и их средние энергии при взаимодействии дейтронов с группами ядер.

На рис. 5а,б показано распределение звезд по числу частиц для всех взаимодействий дейтронов и α -частиц с группами ядер, на на рис. 6а,б - угловые распределения h -частиц.

Обращает на себя внимание сильная направленность вперед в случае взаимодействия α -частиц с легкими ядрами, чего нет для взаимодействия дейтронов и не наблюдалось ранее в столкновениях с ядрами адронов различной энергии. Объяснение этой асимметрии движением возбужденного ядра требует слишком большой его скорости, что не совместимо с мягким энергетическим спектром β -частиц.

5. Полное разрушение ядер Ag, Вг и Рь

Полное разрушение ядер Ag, Вг под действием быстрых протонов было установлено и исследовалось в наших работах ^{/16,17/} и под действием адронов и легких ядер - в ^{/18-20,22/}. К этому процессу были отнесены взаимодействия с вылетом $N_h \geq 28$, а в ^{/17/} было определено распределение h -частиц по зарядам, показано, что нет ядра-остатка и вылетают преимущественно отдельные нуклоны. Следовательно, происходит полное разрушение ядер Ag, Вг.

В табл. 6 по результатам ряда работ приведены вероятности полного разрушения ядер Ag, Вг при столкновении с ними адронов и легких ядер.

Данные по исследованию полного разрушения Ag, Вг и Рь /последние вводились в жидкую фотозмульсию в виде соли свинца/ α -частицами с импульсом 17 ГэВ/с приведены в табл. 7. Для сравнения даны результаты ^{/17/} исследования взаимодействий протонов.

На рис. 7 приведены угловые распределения g -частиц при полном разрушении ядер Ag, Вг или Рь под действием α -частиц, а также аналогичные распределения для всех взаимодействий протонов 9,6 ГэВ/с и дейтронов

Таблица 6

Частица	Импульс, ГэВ/с	Вероятность полного разрушен., %	Ссылки
P	6,2	$2,1 \pm 0,5$	/18/
-"	9,6	$3,1 \pm 0,6$	/17/
-"	22,5	$3,1 \pm 0,8$	/18/
-"	69	$3,0 \pm 0,8$	/17/
-"	200	$2,2 \pm 0,5$	см./22/
П	60	3,0	/20/
d	9,4	$2,5 \pm 0,5$	/3/
α	17	$6,4 \pm 1,0$	/7/
$3 \leq \xi \leq 5$	Спектр космических лучей	$9,3 \pm 2,9$	/22/
$6 \leq \xi \leq 9$		$7,8 \pm 1,5$	/22/
$10 \leq \xi \leq 15$		$11,7 \pm 3,7$	/22/
$16 \leq \xi \leq 26$		$13,0 \pm 6,3$	/22/

Таблица 7

Падающая частица	Ядро	$\langle n_s \rangle$	$\theta_{s, 1/2}$	$\langle \mathcal{N}_k \rangle$	$\langle n_g \rangle$	$\theta_{g, 1/2}$	$\langle n_e \rangle$	$\theta_{e, 1/2}$
d, 17 ГэВ/с	Ag, Br	$7,34 \pm 0,35$	45°	$33 \pm 0,9$	$18 \pm 0,7$	60°	$15 \pm 0,6$	80°
-"	Pb	$8,9 \pm 0,4$	53	$47,6 \pm 1,1$	$25,6 \pm 0,7$	66	$22 \pm 0,7$	86
P, 9,6 ГэВ/с	Ag, Br	$4,0 \pm 0,5$	53	$32 \pm 1,4$	$10 \pm 0,8$	63	$22 \pm 1,2$	85
P, 70 ГэВ/с	-"	$17,1 \pm 0,8$	30,6	$30 \pm 1,2$	$14,2 \pm 0,8$	70	$15,8 \pm 0,5$	80

9,4 ГэВ/с с ядрами Ag, Br и при полном разрушении этих ядер протонами 70 ГэВ/с.

Из этих рисунков и величин $\theta_{g,1/2}$ в табл. 7 следует разительное постоянство углового распределения g -частиц в широком диапазоне энергии и массы налетающих частиц и массы ядер от легких до свинца.

В работе /23/ на основе каскадного механизма были объяснены результаты /17/ полного разрушения ядер Ag, Br протонами 70 ГэВ/с, когда в первом столкновении протона в ядре велика множественность генерированных частиц. Как следует из табл. 7, этого нет в случае α -частиц. В работе /24/ и в ряде ей предшествовавших /см. ссылки в /24/ / рассматривается испускание частиц из предравновесного состояния.

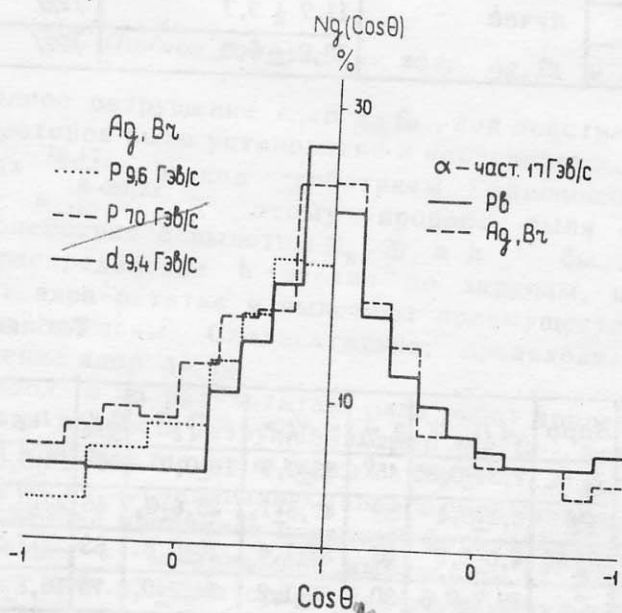


Рис. 7. Угловое распределение g -частиц при полном разрушении α -частицами ядер Ag, Br и Pb; при взаимодействии с ядрами Ag, Br протонов с импульсом 9,6 ГэВ/с, дейтронов с импульсом 9,4 ГэВ/с и при полном разрушении ядер протонами с импульсом 70 ГэВ/с.

В работе^{/25/} объяснение полного разрушения ядер было дано на основе модели ударной волны, образуемой в ядре адронным кластером, рожденным в первом центральном столкновении быстрого протона. Большое различие в величинах $\langle n_s \rangle$ для протонов $6,2 \text{ ГэВ/с}$ и 70 ГэВ/с и дейтронов $9,4 \text{ ГэВ/с}$ или α -частиц 17 ГэВ/с , с одной стороны, указывает на то, что процессы распада и полного разрушения ядер не обусловлены числом s -частиц; с другой стороны, рождение адронного кластера не ожидается для α -частиц с такой энергией. Однако модель ударной волны впервые была рассмотрена в^{/26/} для самой падающей быстрой частицы. Она предполагает вылет частиц в направлении нормали к фронту волны. Угол этой нормали с вектором скорости v падающей частицы θ есть $\arccos a/v$, где a - скорость звука, т.е. скорость, с которой распространяется в ядре возмущение плотности. По оценкам^{/26/}, $a \approx (0,15 \pm 0,3) \text{ С}$, следовательно, $\theta \approx 70^\circ$. Фермиевское движение нуклонов в ядре сильно изменяет их углы вылета, т.к. скорость этого движения сравнима со скоростью звука $-a$. Передний фронт ударной волны с уплотнением ядерной материи движется со скоростью налетающей частицы, и, следовательно, существует переходная область со скоростями u в диапазоне $a < u < v$. Это, возможно, обуславливает вылет g -частиц с различными углами и скоростями.

Дальнейшие эксперименты и анализ данных в сопоставлении с адрон-ядерными столкновениями позволят продвинуться в выяснении сложных вопросов взаимодействия ядер при высокой энергии.

Литература

1. М.И.Адамович, Н.Далхажав, В.Г.Ларионова и др. Сообщение ОИЯИ, P1-6386, Дубна, 1972.
2. Н.П.Богачев, К.Д.Толстов, Г.С.Шабратова и др. Сообщение ОИЯИ, P1-6877, Дубна, 1972.
3. J.A.Galstyan, F.G.Lepekhin, B.B.Simonov et al. Nucl. Phys., A208, 626 (1973).
4. Х.М.Абдо, Н.Далхажав, Дж.А.Саломов и др. Сообщение ОИЯИ, P1-7217, Дубна, 1973.

5. K. M. Abdo, N. Dalkhazhav, R. A. Khoshmukhamedov et al. *Inelastic Inter. of Relativistic Deutrons and α -Particles with Nuclei*. Int. Conf. Ax-en-Provence, 1973.
6. N. Dalkhazhav, G. S. Shabratova, K. D. Tolstov et al. *Nucl. Phys.*, A222 (1974).
7. К. Д. Толстов и др. Сообщение ОИЯИ, P1-8313, Дубна, 1974.
8. И. Рафиев и др. Сообщение ОИЯИ, P1-8926, Дубна, 1975.
9. О. Ахроров и др. Сообщение ОИЯИ, B1-1-8927, Дубна, 1975.
10. А. М. Балдин. Сообщение ОИЯИ, P7-5808, Дубна, 1971.
11. А. М. Балдин и др. Сообщение ОИЯИ, P1-5819, Дубна, 1971;
12. А. М. Балдин, В. К. Бондаренко, Н. Гиордэнеску и др. Сообщение ОИЯИ, 1-8249, Дубна, 1974;
A. M. Baldin et al. *Particles and Fields Am. Inst. of Phys.* (1971).
13. S. Varshay et al. *Phys. Rev.*, C, v. 11, 2, p. 360 (1975).
14. И. П. Горин, С. П. Денисов и др. ЯФ, 13, 344 /1971/.
15. H. Winzeler. *Nuovo Cimento*, 27, 6 (1963).
16. В. С. Барашенков, В. А. Беляков, Ван-Шу-фень. Препринт ОИЯИ, P-331, Дубна, 1959.
17. К. Д. Толстов, Р. А. Хошмухамедов. Сообщение ОИЯИ, P1-6897, Дубна, 1973.
18. H. Winzeler. *Nucl. Phys.*, 69, 661 (1965).
19. R. Kaczarowski and E. Makowska. *Nucl. Phys.*, 74, 348 (1965).
20. Ю. Ф. Гагарин, Н. С. Иванова. Изв. АН СССР, 38, 988 /1974/.
21. B. Anderson, J. Otterlund, K. Kristiansson. *Arkiv Fisik*, 31, 527 (1966).
22. B. Jakobsson, R. Kulberg, J. Otterlund. *Pion and Proton Emission in Inter. Induced by Relativistic Heavy Nuclei with $Z > 12$* .
23. В. Д. Тонеев, С. Е. Чигринов. Сообщение ОИЯИ, P4-7479, Дубна, 1973.
24. К. К. Гудима, Г. А. Ососков, В. Д. Тонеев. ЯФ, 21, 260 /1975/.
25. Б. Н. Калинин, В. Л. Шмонин. Сообщение ОИЯИ, P2-7871, Дубна, 1974.
26. A. E. Glassgold, W. Heckrotte, K. Watson. *Annals of Phys.*, v. 6, 1 (1959).

Рукопись поступила в издательский отдел
11 ноября 1975 года.