

Т-529
9286

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



642/2-76

23/11-76
P1 - 9286

К.Д.Толстов

НЕУПРУГИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ДЕЙТРОНОВ И α -ЧАСТИЦ
С ЯДРАМИ

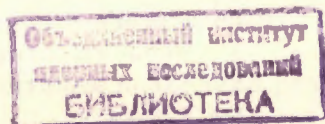
1975

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.



Толстов К.Д.

P1 - 9286

Неупругие взаимодействия релятивистских дейтронов и α -частиц с ядрами

При исследовании неупругих взаимодействий дейтронов с импульсом 9,4 ГэВ/с и α -частиц с импульсом 17 ГэВ/с с ядрами (C, N, O), (Ag, Br) и Pb получены величины сечений неупругих взаимодействий, данные по генерации частиц, фрагментации налетающих ядер и распаду ядер мишеней.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1975

Tolstov K.D.

P1 - 9286

Inelastic Interactions of Relativistic
Deuterons and Particles with Nuclei

In studying inelastic interactions of 9.4 GeV/c deuterons and 17 GeV/c α -particles with (C, N, O); (Ag, Br) and Pb nuclei there have been obtained the values of inelastic interaction cross sections; data on particle generation, incident nuclei fragmentation and target nuclei desintegration.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research
Dubna 1975

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 $1 \text{ см}^3 \cdot 10^{22}$						Первичная 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	$26,9 \pm 0,6$
II БР-2 + этилен-гликоль (CH ₂ OH)	2,75	5,31	1,90	0,140	1,74	0,36	0,362	d	$19,5 \pm 0,3$
II БР-2 + 50% раствор глюкозы (C ₆ H ₁₂ 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_I , λ_{II} , λ) связаны соотношением

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

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

где σ и n — сечения и число ядер в 1 см^3 наполнителя. Принимая согласно [13] $\sigma_n = 100 \text{ мб}$, 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 ± 40	1500 ± 70	
α	100	500 ± 30	1910 ± 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:

$$\langle \sigma_{\text{стр}} \rangle = 200 \pm 45 \text{ мб.}$$

Дифференциальные сечения стриппинга показаны на рис. 1.

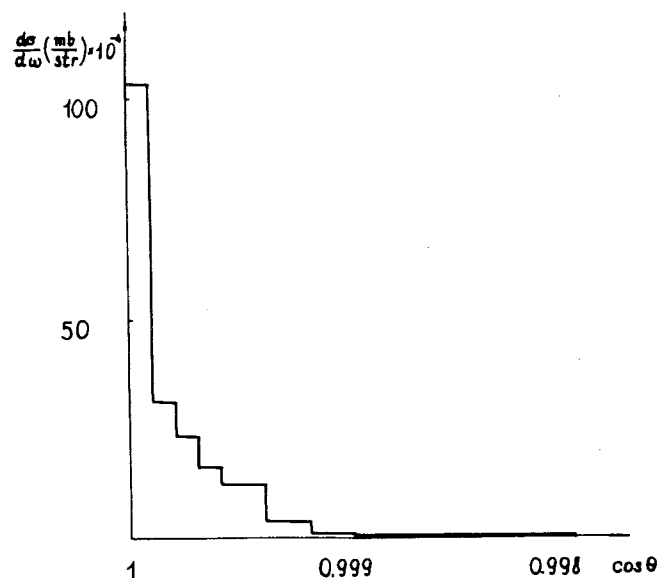


Рис. 1. Дифференциальное сечение стриппинга дейтронов.

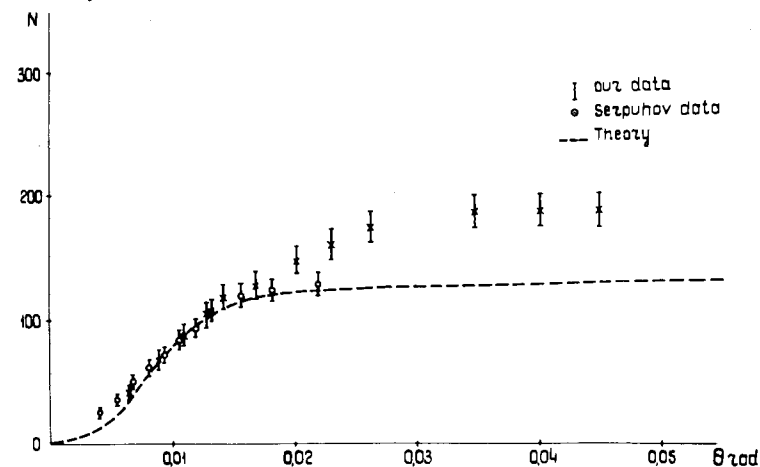


Рис. 2. Интегральное угловое распределение стриппинга.

На рис. 2 приведены интегральное угловое распределение стриппинга дейтронов 9,4 ГэВ/с и для сравнения - распределение стриппинга антидейтронов 13,3 ГэВ/с на ядрах углерода по данным 14 нормированные при угле 10,5 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: $\sigma^{z=1}(C, O) = 203 \pm 52$ мб; $\sigma^{z=1}(Ag, Br) = 570 \pm 160$ 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: $\sigma^{z=2}(C, O) = 37 \pm 12$ мб; $\sigma^{z=2}(Ag, Br) = 130 \pm 54$ 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 "центральному" 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 взаимодей.	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	$5,78 \pm 0,10$

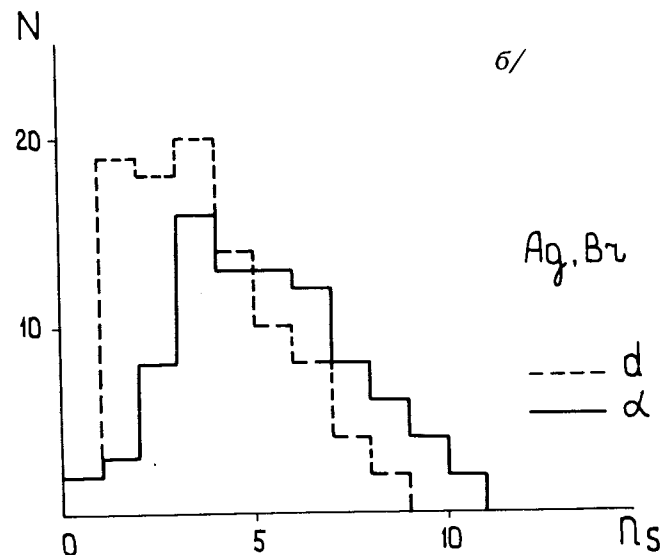
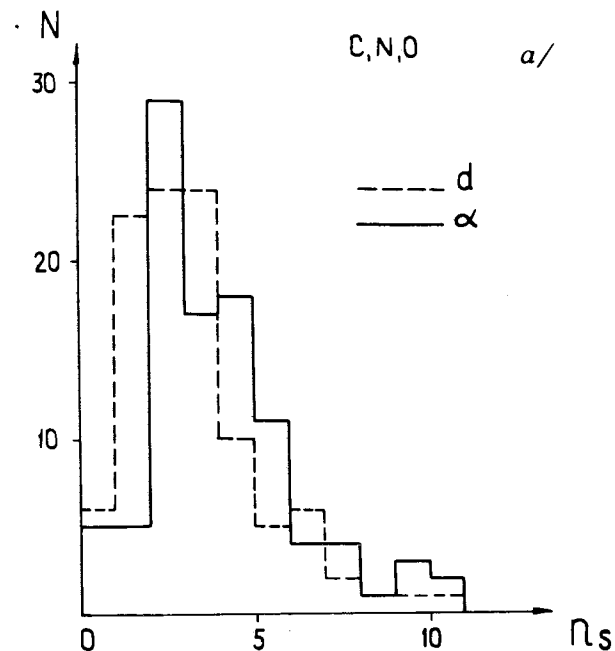
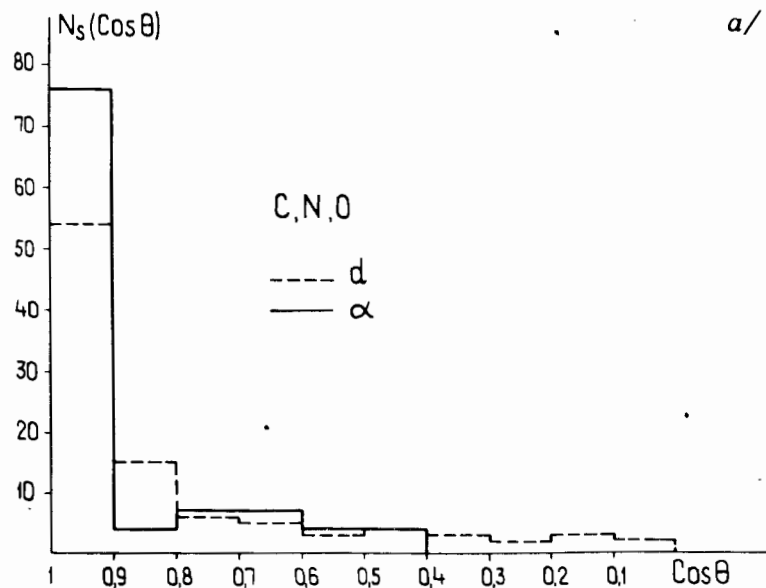
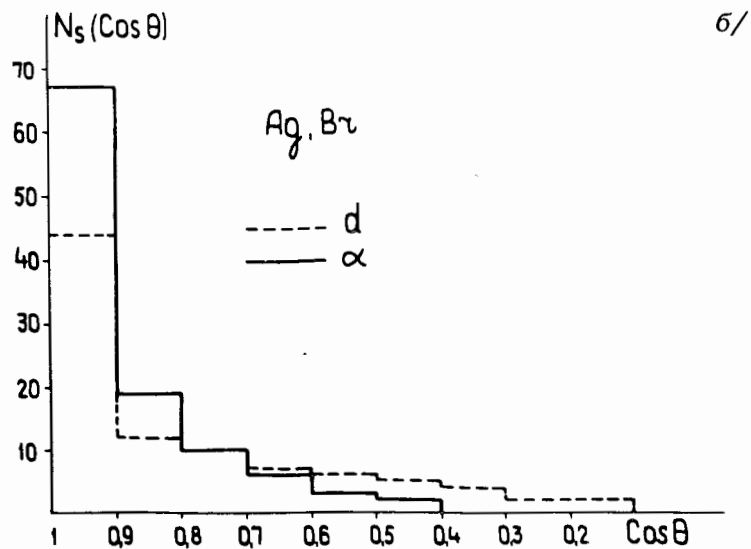


Рис. 3. Распределение s-частиц от взаимодействия дейтронов и α -частиц с ядрами: а/ C, N, O; б/ Ag, Br.



а/



б/

Рис. 4. Угловое распределение s -частиц от взаимодействия дейтронов и α -частиц с ядрами: а/ С, 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 - 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 С, О 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 (С, 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	$\langle \sqrt{h} \rangle$	$\langle n_d \rangle$	$\langle n_\alpha \rangle$
d	все	С, 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	С, O	$2,97 \pm 0,13$		
	все	Ag, Br	$11,66 \pm 0,26$		
	фрагм. $\bar{z}=1$	Н, С, O	$2,04 \pm 0,10$		
	" - "	Ag, Br	$7,40 \pm 0,19$		
	фрагм. $\bar{z}=2$	Н, С, O	$2,97 \pm 0,16$		
Центральные	" - "	Ag, Br	$4,51 \pm 0,29$		
		Н, С, O	$2,89 \pm 0,18$		
		Ag, Br	$15,32 \pm 0,35$		

Таблица 5

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

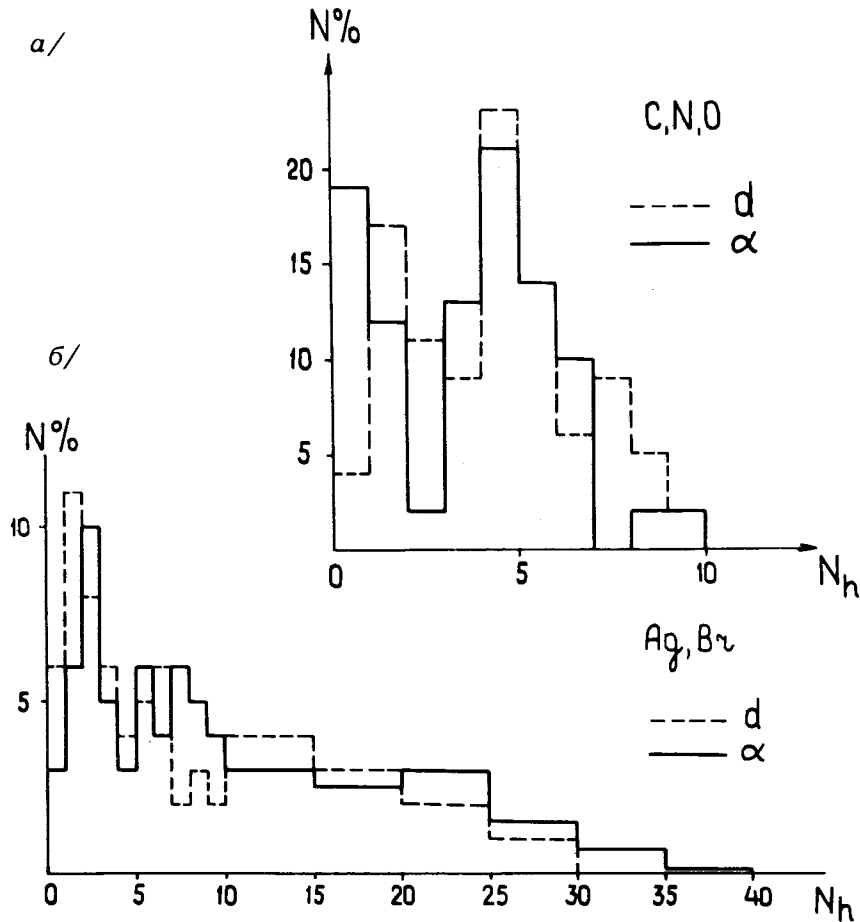


Рис. 5. Распределение звезд во взаимодействиях дейтронов и α -частиц с ядрами: а/ C, N, O; б/ Ag, Br.

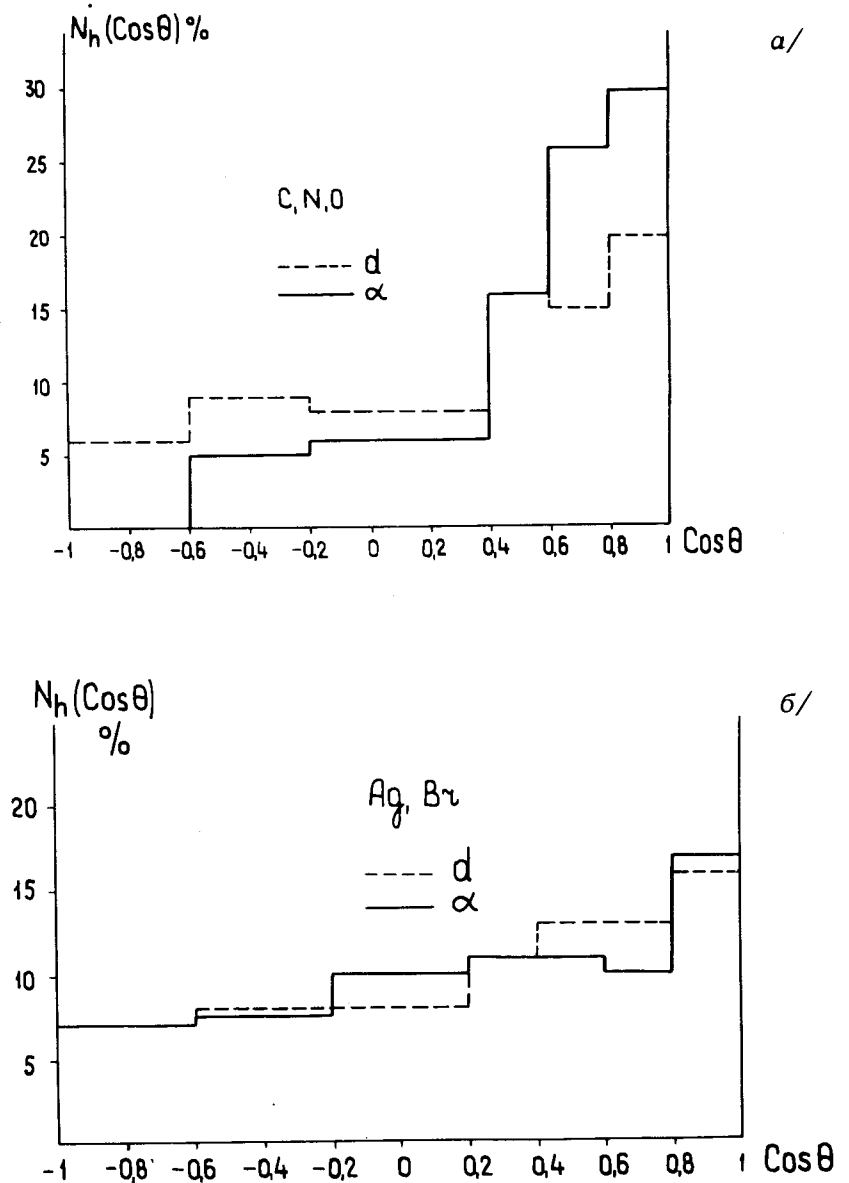


Рис. 6. Угловое распределение h-частиц от взаимодействия дейтронов и α -частиц с ядрами: а/ C, N, O; б/ Ag, Br.

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/
$3 \leq \chi \leq 5$	Спектр космических лучей	$9,3 \pm 2,9$	/22/
$6 \leq \chi \leq 9$		$7,8 \pm 1,5$	/22/
$10 \leq \chi \leq 15$		$11,7 \pm 3,7$	/22/
$16 \leq \chi \leq 26$		$13,0 \pm 6,3$	/22/

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 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, Br и Pb

Полное разрушение ядер Ag, Br 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, Br.

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

Данные по исследованию полного разрушения Ag, Br и Pb /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, Br или Pb под действием α -частиц, а также аналогичные распределения для всех взаимодействий протонов 9,6 ГэВ/с и дейтронов

Таблица 7

Падающая частица	Ядро	$\langle n_s \rangle$	$\theta_s, \frac{1}{2}$	$\langle N_h \rangle$	$\langle n_g \rangle$	$\theta_g, \frac{1}{2}$	$\langle n_c \rangle$	$\theta_c, \frac{1}{2}$
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.

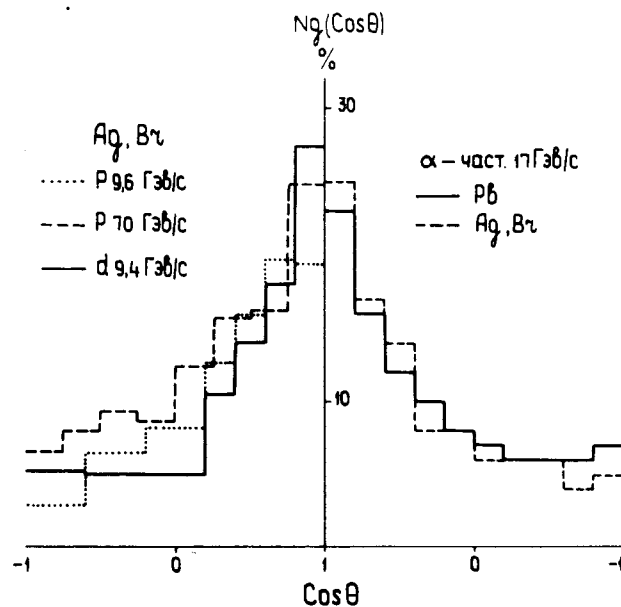


Рис. 7. Угловое распределение g -частиц при полном разрушении α -частицами ядер Ag, Br и Pb; при взаимодействии с ядрами Ag, Br протонов с импульсом 9,6 ГэВ/с, дейтронов с импульсом 9,4 ГэВ/с и при полном разрушении ядер протонами с импульсом 70 ГэВ/с.

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 $\langle n_g \rangle$ для протонов 6,2 ГэВ/с и 70 ГэВ/с и дейтронов 9,4 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/ $a \approx (0,15 \pm 0,3) C$, 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.Lepikhin, B.B.Simonov et al. Nucl. Phys., A208, 626 (1973).
4. X.M.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-Provance, 1973.*
6. N. Dalkhazhav, G.S. Shabratoва, 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, Б1-1-8927, 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. Barshay 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.