

Б-399

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



69/2-78

2/1-78  
P1 - 10944

Г.Г.Безногих, В.А.Будилов, П.Девенски,  
Л.Ф.Кириллова, Н.К.Жидков, В.А.Никитин, А.Буяк,  
П.Зелински, В.Скверес, М.Шавловски,  
Т.Щепанковски, В.В.Авдейчиков,  
Е.А.Ганза, Ю.А.Мурин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
ПО ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДРА УГЛЕРОДА  
РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ДЕЙТОНАМИ  
И АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

**1977**

P1 - 10944

Г.Г.Безногих, В.А.Будилов, П.Девенски,  
Л.Ф.Кириллова, Н.К.Жидков, В.А.Никитин, А.Буяк,<sup>1</sup>  
П.Зелински,<sup>1</sup> В.Скверес,<sup>1</sup> М.Шавловски,<sup>1</sup>  
Т.Щепанковски,<sup>1</sup> В.В.Авдейчиков,<sup>2</sup>  
Е.А.Ганза,<sup>2</sup> Ю.А.Мурин<sup>2</sup>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
ПО ФРАГМЕНТАЦИИ ЯДРА УГЛЕРОДА  
РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ДЕЙТОНАМИ  
И АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

Сотрудничество Дубна - Варшава - Ленинград

*Направлено в ЯФ*

---

<sup>1</sup> ИЯИ, Варшава, ПНР.

<sup>2</sup> РИ, Ленинград.



Безногих Г.Г. и др.

P1 - 10944

Экспериментальные результаты по фрагментации ядра углерода релятивистскими дейтонами и альфа-частицами

Получены дифференциальные сечения образования изотопов H, He, Li и Be в реакции  $d + {}^{12}\text{C}$  при энергиях дейтона 1,1; 1,5; 1,9; 2,0; 2,4; 3,1; 3,7; 4,6 ГэВ/нукл. и в реакции  $\alpha + {}^{12}\text{C}$  при энергии  $\alpha$ -частиц 2,5 ГэВ/нукл. под углом  $\theta_{\text{лаб.}} = 90^\circ$ . Отмечаются некоторые закономерности параметров дифференциальных сечений и относительных выходов фрагментов.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Beznogikh G.G. et al.

P1 - 10944

Experimental Results on Fragmentation of Carbon Nucleus by Relativistic Deuterons and Alpha-Particles

Differential cross sections of isotopes H, He, Li and Be have been obtained in the reaction  $d + {}^{12}\text{C}$  at deuteron energies 1.1; 1.5; 2.0; 2.4; 3.1; 3.7; 4.6 GeV/nucleon and in the reaction  $\alpha + {}^{12}\text{C}$  at  $\alpha$ -particle energy 2.5 GeV/nucleon at an angle  $\theta_{\text{lab}} = 90^\circ$ . Some regularities for differential cross section parameters and for relative fragment yields are noted.

The investigations has been performed at the Laboratory on High Energy Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение явления фрагментации начинает занимать важное место в экспериментальных программах на ускорителях релятивистских ядер. Работы ведутся в двух направлениях: изучение фрагментации налетающих ядер <sup>/1/</sup> и фрагментации ядер-мишеней <sup>/2/</sup>. Для теоретической интерпретации экспериментальных результатов разработан ряд модельных представлений, использующих как традиционные для ядерной физики методы анализа <sup>/3,15/</sup>, так и аппарат физики элементарных частиц <sup>/4,16/</sup>.

Современное состояние теории ядро-ядро-взаимодействий при высоких энергиях не дает возможности достаточно полно описать процесс и, следовательно, получить однозначную информацию о структуре сталкивающихся ядер. Можно полагать, что выявление общих закономерностей в процессе образования фрагментов может иметь существенное значение для понимания характера взаимодействия. На таком пути уже достигнут значительный прогресс, например обнаружены следующие явления: ядерный скейлинг, кумулятивное образование продуктов реакций <sup>/4/</sup> и изотопные эффекты <sup>/15/</sup> фрагментации ядер-мишеней.

Наличие пучков релятивистских дейтонов и альфа-частиц достаточной интенсивности на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ и разработанная ранее методика внутренней мишени <sup>/5/</sup> дают возможность получить более полную экспериментальную информацию о фрагментации ядер-мишеней.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по фрагментации ядер углерода релятивистскими дейтонами и альфа-частицами.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился на синхрофазотроне ЛВЭ ОИЯИ /Дубна/, на внутренней полиэтиленовой мишени  $(\text{CH}_2)_n$  толщиной от 1 до 5 мкм и пучках первичных ядер дейтерия и гелия с энергией  $E_0$  в интервале от 1 до 4,6 ГэВ/нукл.

Вторичные заряженные частицы фрагментирующей мишени регистрировались системой из  $(\Delta E - E)$  -телескопов на расстоянии трех метров от мишени. Телескопы состояли из полупроводниковых кремниевых детекторов толщиной  $20 \pm 3000$  мкм. Коллимированная рабочая площадь детекторов составляла около  $1 \text{ см}^2$ . Характерное энергетическое разрешение детекторов определялось по линии  $E_\alpha = 5,5 \text{ МэВ}$  и составляло  $50 \pm 80 \text{ кэВ}$ .

Абсолютное мониторирование достигалось с помощью двух полупроводниковых детекторов, регистрирующих протоны отдачи от упругого рассеяния частиц пучка на водороде мишени. Экспериментальная информация накапливалась ЭВМ БЭСМ-4. Подробное описание работы аппаратуры дано в работе <sup>6</sup>.

Точность разделения фрагментов по массе и заряду для изотопов водорода и гелия оценивается в 1%. Качество идентификации для энергии продуктов реакций, равной 6 МэВ, приведено на рис. 1. Светимость пучка мишени определялась со статистической точностью 5% с использованием экспериментальных данных по упругому рассеянию. Максимальная систематическая ошибка в определении абсолютных дифференциальных сечений фрагментации оценивается в 10% и в основном определяется неточностью калибровки мониторирующих детекторов и неточностью данных по упругому рассеянию. Отношение фоновых событий к полезным не превышает 3%. Эта оценка следует из отношения масс мишени и кварцевых нитей подвески с учетом полных сечений

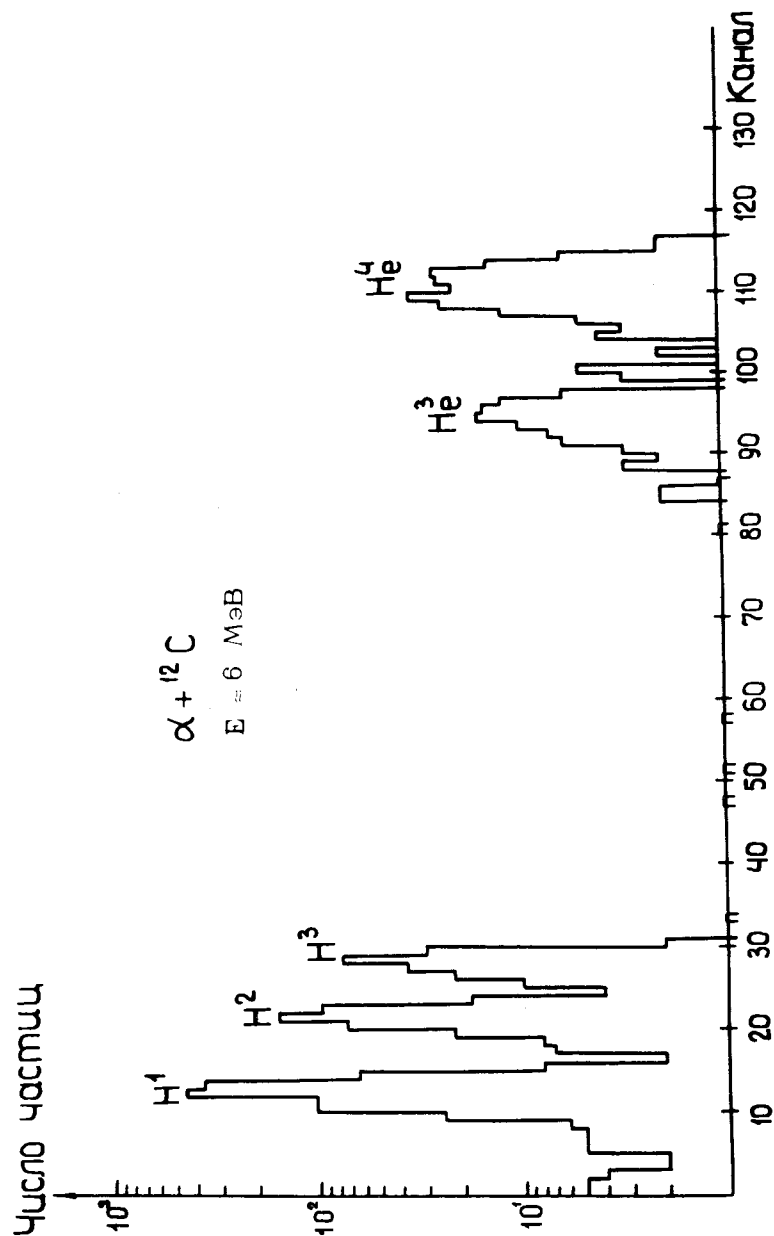


Рис. 1. Идентификация продуктов реакции  $d + {}^{12}\text{C}$ .

образования вторичных частиц на кварце и углеводе полиэтиленовой мишени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дифференциальные сечения изотопов H, He, Li и Be измерялись под углом  $90^\circ$  к направлению пучка налетающих частиц в интервале энергий от 5 до 70 МэВ. На пучках дейтонов измерения проводились при кинетической энергии дейтонов  $E_0 = 1,1; 1,5; 1,9; 2,0; 2,4; 3,1; 3,7$  и  $4,6$  ГэВ/нукл., а на пучке альфа-частиц -  $2,5$  ГэВ/нукл. Характерный вид инвариантных дифференциальных сечений, полученных на пучке дейтонов,

$2E_{\Pi} \frac{d^3\sigma}{dp^3}(E)$ , показан на рис. 2 и 3 ( $E_{\Pi}$ , E - полная

и кинетическая энергии фрагмента). Аналогично выглядят дифференциальные сечения, полученные на пучке альфа-частиц. На рисунках указаны только статистические ошибки. Энергетический диапазон, в котором регистрируются продукты реакций, условно можно разделить на две области:  $5 \pm 30$  МэВ и  $30 \pm 70$  МэВ/см. табл. 1/. В каждой из областей спектры достаточно хорошо описываются зависимостью

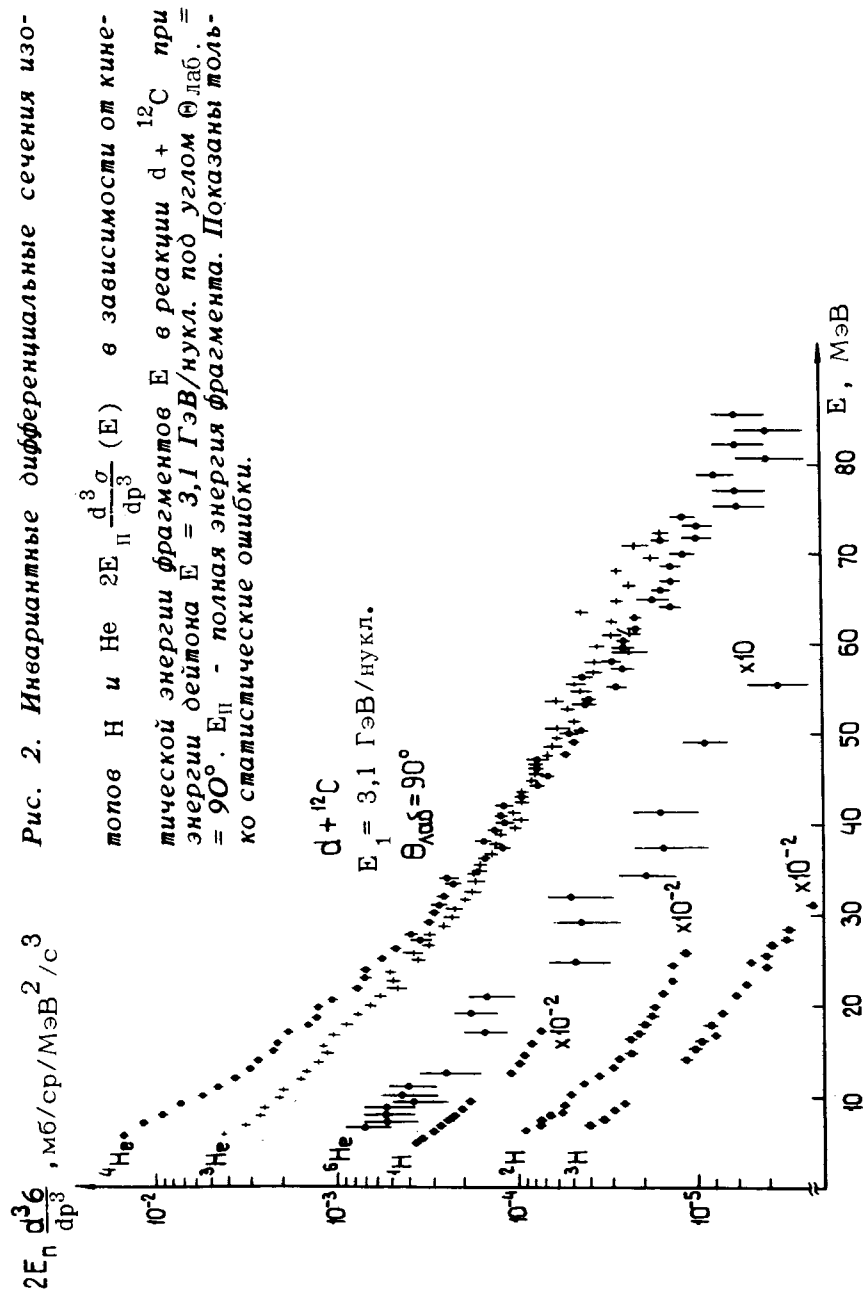
$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = a \cdot \exp\left(-\frac{E}{b}\right). \quad /1/$$

Параметру b обычно приписывается смысл эффективной ядерной температуры, поскольку энергетические спектры имеют квазимаксвелловскую форму, следующую из испарительной теории фрагментации.

Инвариантные дифференциальные сечения мы аппроксимировали зависимостью

$$2E_{\Pi} \cdot \frac{d^3\sigma}{dp^3} = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{B}\right), \quad /2/$$

отдельно для каждой из двух областей энергетического спектра. С удовлетворительным  $\chi^2$  удается описать по формуле /2/ только высокоимпульсную компоненту.



образования вторичных частиц на кварце и углеводе полиэтиленовой мишени.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дифференциальные сечения изотопов H, He, Li и Be измерялись под углом  $90^\circ$  к направлению пучка налетающих частиц в интервале энергий от 5 до 70 МэВ. На пучках дейтонов измерения проводились при кинетической энергии дейтонов  $E_0 = 1,1; 1,5; 1,9; 2,0; 2,4; 3,1; 3,7$  и  $4,6$  ГэВ/нукл., а на пучке альфа-частиц -  $2,5$  ГэВ/нукл. Характерный вид инвариантных дифференциальных сечений, полученных на пучке дейтонов,

$2E_{\Pi} \frac{d^3\sigma}{dp^3}(E)$ , показан на рис. 2 и 3 ( $E_{\Pi}$ , E - полная

и кинетическая энергии фрагмента). Аналогично выглядят дифференциальные сечения, полученные на пучке альфа-частиц. На рисунках указаны только статистические ошибки. Энергетический диапазон, в котором регистрируются продукты реакций, условно можно разделить на две области:  $5 \pm 30$  МэВ и  $30 \pm 70$  МэВ/см. табл. 1/. В каждой из областей спектры достаточно хорошо описываются зависимостью

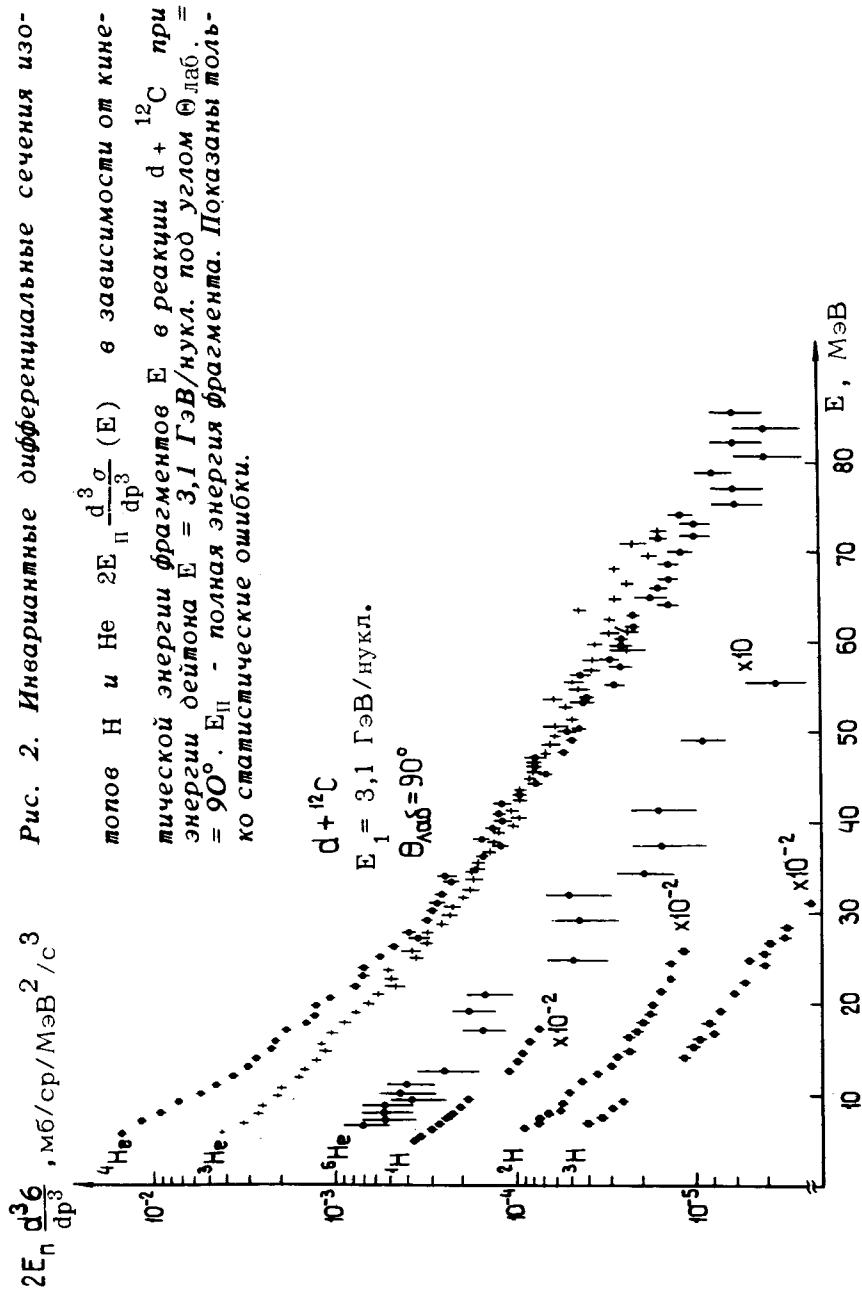
$$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = a \cdot \exp\left(-\frac{E}{b}\right). \quad /1/$$

Параметру b обычно приписывается смысл эффективной ядерной температуры, поскольку энергетические спектры имеют квазимаксвелловскую форму, следующую из испарительной теории фрагментации.

Инвариантные дифференциальные сечения мы аппроксимировали зависимостью

$$2E_{\Pi} \cdot \frac{d^3\sigma}{dp^3} = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{B}\right), \quad /2/$$

отдельно для каждой из двух областей энергетического спектра. С удовлетворительным  $\chi^2$  удается описать по формуле /2/ только высокоимпульсную компоненту.



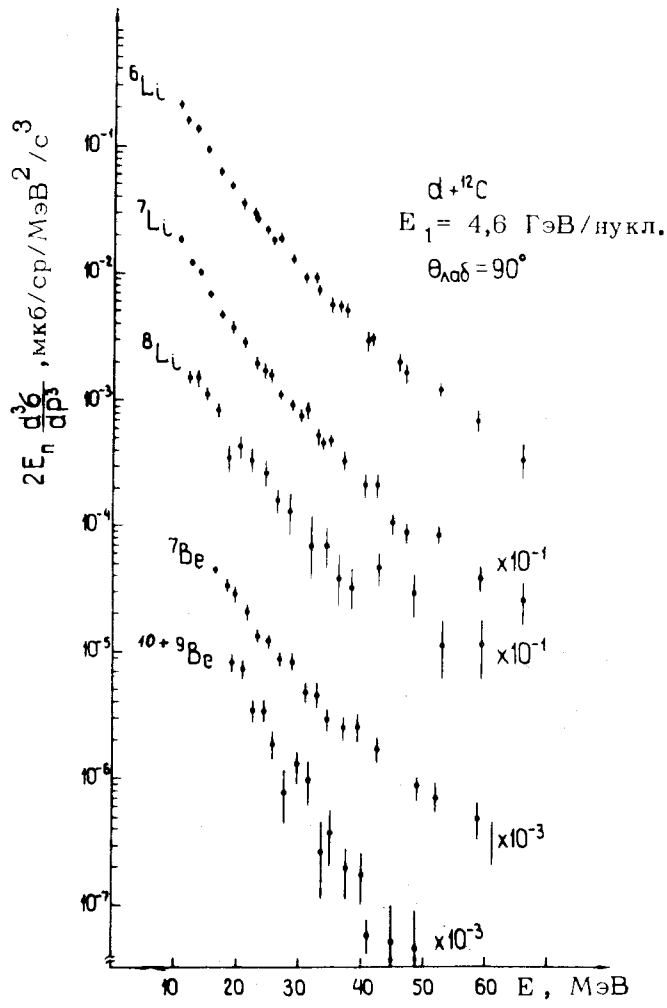


Рис. 3. Инвариантные дифференциальные сечения изотопов Li и Be  $2E_{\Pi} \frac{d^3\sigma}{dp^3}(E)$  в зависимости от кинетической энергии фрагментов  $E$  в реакции  $d + {}^{12}\text{C}$  при энергии дейтона  $E_0 = 4,6$  ГэВ/нукл. под углом  $\Theta_{\text{лаб.}} = 90^\circ$ .  $E_{\Pi}$  - полная энергия фрагментов. Указаны только статистические ошибки.

8

Таблица I

Значения параметров  $a, b, A, B$  для реакции  $d + {}^{12}\text{C}$ ,  
 $E_0 = 3,1$  ГэВ/нукл.,  $\Theta_{\text{лаб.}} = 90^\circ$

фрагмент	Энергетический интервал, МэВ	$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = a \cdot \exp(-\frac{E}{b})$		Энергетический интервал, МэВ	$2E_{\Pi} \frac{d^3\sigma}{dp^3} = A \cdot \exp(-\frac{E}{B})$
		$a$ , мб/ср/МэВ	$b$ , МэВ		
${}^1\text{H}$	5 - 17	$2,64 \pm 0,10$	$12,1 \pm 0,5$	38 - 72	$17,9 \pm 0,6$
${}^2\text{H}$	6 - 26	$0,91 \pm 0,04$	$15,3 \pm 0,5$	44 - 84	$14,6 \pm 0,5$
${}^3\text{H}$	7 - 29	$0,61 \pm 0,02$	$12,4 \pm 0,3$	44 - 63	$9,9 \pm 1,1$
${}^3\text{He}$	6 - 31	$0,548 \pm 0,016$	$12,6 \pm 0,3$	45 - 65	$9,3 \pm 0,3$
${}^4\text{He}$	6 - 26	$3,26 \pm 0,80$	$7,4 \pm 1,1$	42 - 66	$11,7 \pm 1,8$
${}^6\text{He}$	8 - 31	$(2,2 \pm 0,2) \times 10^{-2}$	$9,0 \pm 0,4$	34 - 60	$16,0 \pm 5,2$
${}^6\text{Li}$	10 - 31	$(12,4 \pm 0,7) \times 10^{-2}$	$8,0 \pm 0,2$	43 - 69	$13,6 \pm 3,1$
${}^7\text{Li}$	11 - 31	$(13,5 \pm 0,8) \times 10^{-2}$	$7,3 \pm 0,2$		
${}^8+9\text{Li}$	12 - 28	$(1,8 \pm 0,4) \times 10^{-2}$	$7,4 \pm 0,6$		
${}^7\text{Be}$	18 - 33	$(8,6 \pm 1,6) \times 10^{-2}$	$7,9 \pm 0,5$		
${}^9+10\text{Be}$	19 - 57	$(8,2 \pm 2,7) \times 10^{-2}$	$5,5 \pm 0,3$		

9

Параметры, входящие в формулы /1/ и /2/, для реакции  $d + {}^{12}\text{C}$  при энергии дейтона 3,1 и 4,6 ГэВ/нукл. приведены в табл. 1. Аналогичные параметры для реакции  $\alpha + {}^{12}\text{C}$  даны в табл. 2. Видимо, каждая из компонент энергетического спектра связана с определенным механизмом образования фрагментов. На рис. 4 показаны значения параметра  $b$  для изотопов водорода и гелия

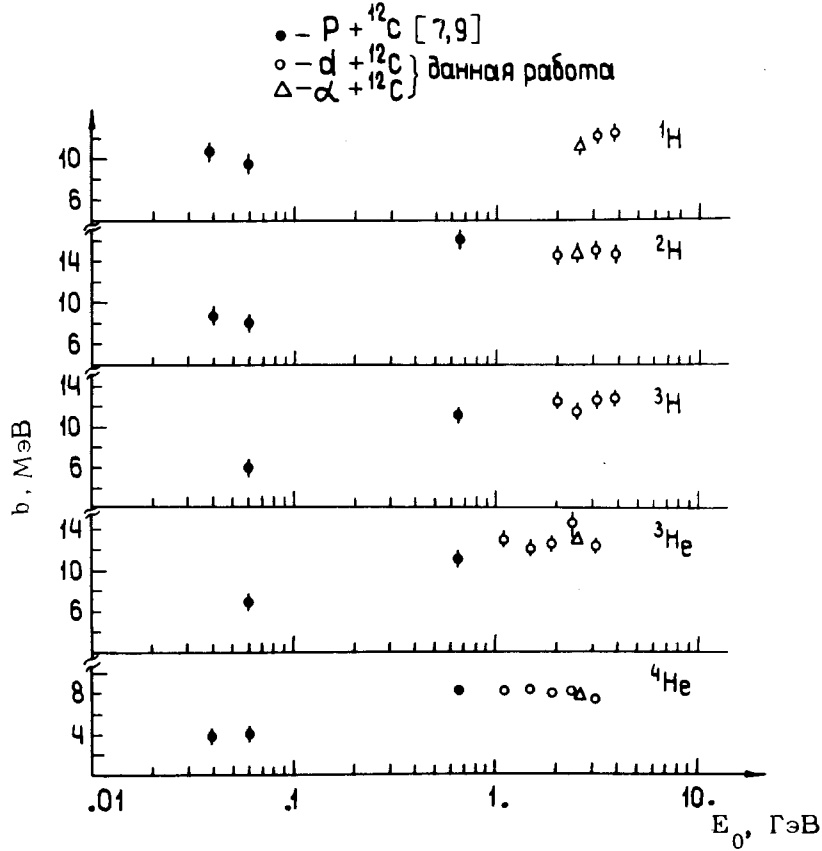


Рис. 4. Зависимость параметра  $b$  /формула /1 // для низкоэнергетической компоненты дифференциальных сечений изотопов H и He от энергии  $E_0$  первичных частиц  $X(p, d, \alpha)$  в реакции  $X + {}^{12}\text{C}$  под углом  $\Theta_{\text{лаб.}} = 90^\circ$ .

Таблица 2

Значения параметров  $a, b, A, B$  для реакции  $\alpha + {}^{12}\text{C}$ ,  $E_0 = 2,5$  ГэВ/нукл.,  $\Theta_{\text{лаб.}} = 90^\circ$ .

фрагмент	Энергетический интервал, МэВ	$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = a \cdot \exp(-\frac{E}{b})$	$\frac{d^2\sigma}{dE d\Omega} = A \cdot \exp(-\frac{E}{B})$	Энергетический интервал, МэВ	$2E_n \frac{d^3\sigma}{dp^3} = A \cdot \exp(-\frac{E}{B})$
		$a, \text{ мб/ср/МэВ}$	$b, \text{ МэВ}$		$A \cdot 10^3, \text{ мб/ср/МэВ}^2 / \text{с}^3 \text{ В, МэВ}$
${}^1\text{H}$	4 - 9	$3,60 \pm 0,14$	$11,4 \pm 0,7$		
${}^2\text{H}$	5 - 15	$1,22 \pm 0,04$	$14,7 \pm 0,6$		
${}^3\text{H}$	6 - 17	$0,81 \pm 0,04$	$11,5 \pm 0,6$		
${}^3\text{He}$	6 - 36	$0,66 \pm 0,02$	$13,3 \pm 0,3$		
${}^4\text{He}$	7 - 30	$3,32 \pm 0,10$	$7,9 \pm 0,1$	42 - 64	$1,0 \pm 0,4$
${}^6\text{He}$	7 - 32	$(1,6 \pm 0,5) \times 10^{-2}$	$8,5 \pm 1,1$		$18,7 \pm 2,2$



в зависимости от энергии падающих частиц. Приведены также результаты выполненного нами аналогичного описания экспериментальных данных [7.9], полученных на пучках протонов.

В интервале энергий от 600 МэВ до 4 ГэВ/нукл., в пределах ошибок, значения параметра  $b$  постоянны и не зависят от сорта налетающих частиц ( $p, d, \alpha$ ).

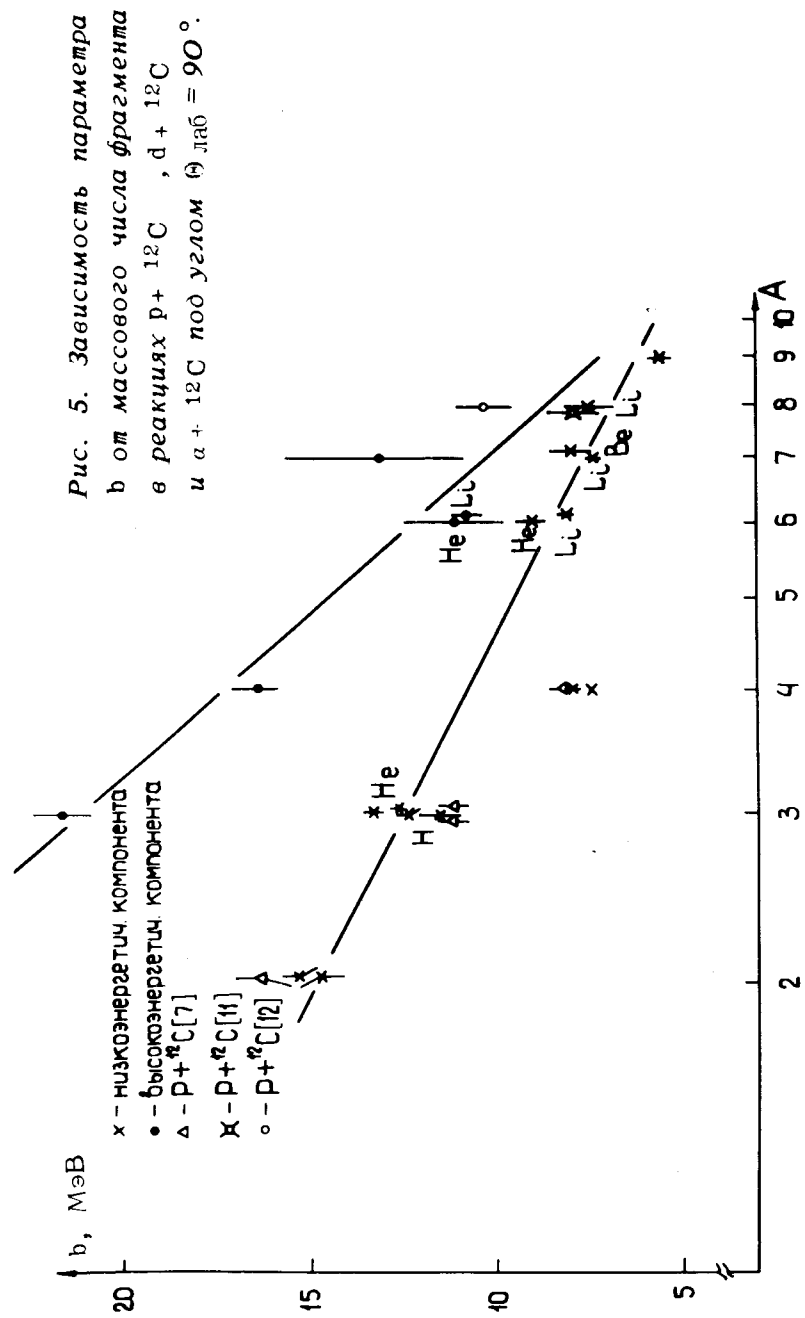
Достижение параметром  $b$  своего предельного /и постоянного/ значения при энергии первичных частиц  $E_0 > 0,6$  ГэВ/нукл. можно интерпретировать, в рамках представлений об испарительной природе фрагментации, как достижение предельной эффективной ядерной температуры или как своеобразный "ядерный скейлинг" в низкоэнергетической области спектра фрагментов. Утверждение о независимости параметра наклона в высокоэнергетической компоненты инвариантных дифференциальных сечений от энергии и сорта налетающих частиц ( $p, \pi, \gamma$ ) сделано в работе [10] и определено как эффект ядерного скейлинга. В настоящем опыте энергии фрагментов ограничены величиной  $E \leq 70$  МэВ, что не позволяет нам проверить утверждение авторов работы [10].

Зависимость  $b$  от массового числа фрагмента  $A$  для низкоэнергетической и высокоэнергетической компоненты спектров приведена на рис. 5. Значения  $b(A)$  для низкоэнергетической компоненты для всех фрагментов, за исключением  ${}^4\text{He}$ , удовлетворяют линейному закону

$$b = a + \beta \ln A \quad /3/$$

и не зависят от заряда фрагмента. Функция  $b(A)$  для высокоэнергетических компонент спектров имеет подобный характер, но больший наклон  $\beta$ . При  $A \approx 6-7$  параметры для обеих компонент становятся близкими.

Дифференциальные выходы  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$  и  ${}^4\text{He}$  данной работы совпадают в пределах ошибок с выходами тех же частиц в реакции  $p + {}^{12}\text{C}$  при  $E_0 = 0,66$  ГэВ [7], что указывает на их независимость от энергии и типа налетающих частиц. В случае фрагментации ядра-мишени  ${}^{238}\text{U}$  выход  ${}^4\text{He}$  увеличивается в 30-40 раз при переходе от протонов с  $E_0 = 0,8$  ГэВ к  $\alpha$ -частицам с  $E_0 = 2,1$  ГэВ/нукл. [2], что указывает на различный



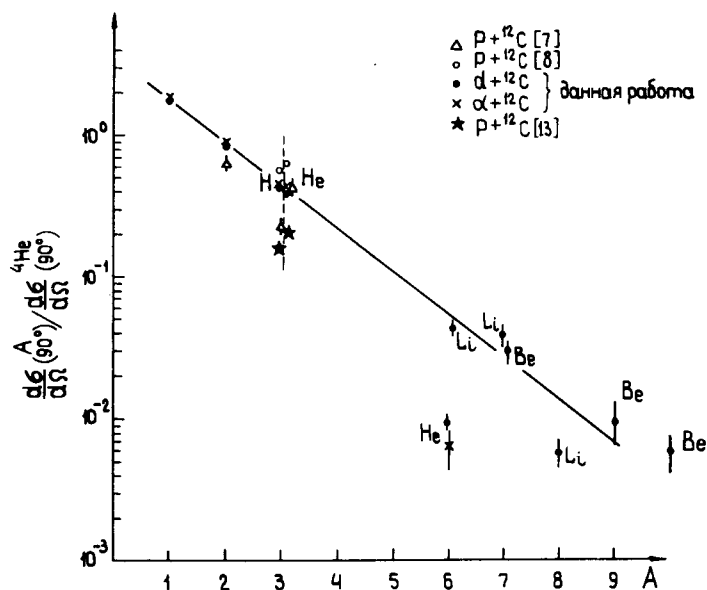


Рис. 6. Относительные выходы фрагментов

$\frac{d\sigma^A}{d\Omega}(90^\circ) / \frac{d\sigma^{4\text{He}}}{d\Omega}(90^\circ)$  в зависимости  
 от массового числа A.

механизм образования фрагментов на легких и тяжелых ядрах.

Для того чтобы исключить систематические погрешности абсолютных измерений, следует рассматривать относительные выходы разных фрагментов, которые в эксперименте получаются с гораздо большей точностью. Интегральные выходы фрагментов под углом  $90^\circ$  получались интегрированием формулы /1/ с параметрами из табл. 1 и 2 в границах по энергии от 5 МэВ до бесконечности. Относительные выходы получались делением интегральных выходов фрагментов на интегральный выход альфа-частиц низкоэнергетической компоненты дифференциальных сечений. Вместе с некоторыми результатами работ /7,8,13/ они показаны на рис. 6 в зависимости от A.

Надо отметить пониженный выход  $^3\text{H}$  за пределами ошибок в реакции p +  $^{12}\text{C}$  /7/. Выходы легких фрагментов логарифмически убывают с возрастанием A. Сильное отклонение от такой простой зависимости наблюдается для ядер с большим избытком нейтронов:  $^6\text{He}$  (z=2),  $^8\text{Li}$  (z=3). Однако не наблюдается такого же отклонения для  $^3\text{H}$  (z=1) в реакции d +  $^{12}\text{C}$ . Отметим, что данные для изотопов Be на рис. 6 приведены с учетом относительного сечения образования  $^9\text{Be}$  и  $^{10}\text{Be}$ , полученного в работе /14/.

Результаты данной работы заполняют пробел в экспериментальной информации о фрагментации легкого ядрами релятивистскими дейтонами и альфа-частицами и указывают на ряд особенностей этого процесса.

Авторы благодарят В.И.Богатина и О.В.Ложкина за предоставление значений дифференциальных сечений из работы /7/.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Greiner D.E. e.a. *Phys.Rev.Lett.*, 1975, 35, p.152.  
Heckman H.H., Greiner D.E. e.a. *Phys. Rev.Lett.*, 1972, 28, p.926.
- Zebelmann A.M. e.a. *Phys. Rev.*, 1975, 11, p.1280;  
Poskanzer A.M. e.a. *Phys. Rev.Lett.*, 1975, 35, p.1701.
- Abul-Magd A., Hüfner T. *Z.Phys.*, 1976. A277, p.379.
- Балдин А.М. ЭЧАЯ, 1977, т.8, с.429.
- Bekker V. e.a. In: *Proc. of High Energy Conf. CERN*, 1962, p.582.  
Никитин В.А. и др. ОИЯИ, 1084, Дубна, 1962.  
Кириллова Л.Ф. и др. ОИЯИ, Д-1329, Дубна, 1963.
- Будилов В.А. и др. ОИЯИ, 13-8898, Дубна, 1975.
- Авдейчиков В.В., Богатин В.И., Ложкин О.В. *ЯФ*, 1977, 25, с.3.
- Alard S.T. e.a. *Nuovo Cimento*, 1975, 30A, p.320.
- Bertrand F.E., Pelle R.W. ORNL-4799, 1973.
- Leksin G.A. *Preprint IТEP-147*, 1976.
- Азимов С.А. и др. *ЯФ*, 1969, 10, с.1145.
- Katcoff S. *Phys.Rev.*, 1959, 114, p.905.
- Kruger S.T., Heymann D. *Phys. Rev.*, 1973, C7, p.2079.

14. *Raisbeck G.M., Yiou F. Phys. Rev.Lett., 1975, 35, p.155.*
15. *Яковлев Ю.П. ЭЧАЯ, 1977, т.8, вып. 3, с.255.*
16. *Mekjan A. Phys. Rev.Lett., 1977, 38, p.640.*

*Рукопись поступила в издательский отдел  
2 сентября 1977 года.*