

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

16-85-35

В. П. Бамблевский

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА  
И УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АДРОНОВ  
ИЗ ТОЛСТОЙ МЕДНОЙ МИШЕНИ  
ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ ЯДРАМИ  ${}^4\text{He}$  И  ${}^{12}\text{C}$   
С ЭНЕРГИЕЙ 3,65 ГэВ/НУКЛОН

Направлено на 17 Симпозиум  
по физике радиационной защиты  
/Дрезден, 1985 г./

1985

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и эксплуатация ускорителей релятивистских ядер требует надежных методов расчета размеров радиационной защиты. Целью данной работы, как и работ<sup>1,2/</sup>, является получение экспериментальных данных для проверки методов расчета /см<sup>2</sup>, например, <sup>3,4/</sup> / основных источников вторичного излучения - мишеней и деталей оборудования, облучаемых ускоренными ядрами. Важными характеристиками таких источников излучения являются полный выход и угловое распределение вторичных частиц. Так же как и в<sup>1/</sup>, эксперименты проводились на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в пучках ускоренных ядер <sup>4</sup>He и <sup>12</sup>C с энергией 3,65 ГэВ/нуклон, которые падали на медную мишень размером  $\phi 100 \times 130$  мм<sup>2</sup>. Геометрия эксперимента показана на рис.1. Используемые реакции активации для адронов и их характеристики указаны в табл.1. С помощью активационных детекторов установлено, что на расстояниях от 0,4 до 2 м от центра мишени нарушается "закон  $\frac{1}{r^2}$ " не наблюдается и около 90% первичных частиц падает в центральный круг мишени радиусом 1,5 см.

Дифференциальный выход адронов  $y$  [адрон/ядро] из мишени определяли двумя путями: зависимость  $y^\theta$  от угла  $\theta$  -  $y_a^\theta$  [адрон/ядро <sup>4</sup>He/ср],  $y_c^\theta$  [адрон/ядро <sup>12</sup>C/ср] и распределение  $y^t$  по поверхности мишени -  $y_a^t$  [адрон/ядро <sup>4</sup>He],  $y_c^t$  [адрон/ядро <sup>12</sup>C] /см.рис.1/. Детекторы 1,8 регистрируют первичные ядра <sup>4</sup>He и <sup>12</sup>C пучка и адроны, вылетающие с торцов мишени площадью  $S_1 = S_8 = 78,5^2$  см<sup>2</sup>; детекторы 2-7 регистрируют адроны с боковой поверхности мишени площадью 408 см<sup>2</sup>, а каждый из детекторов 2-7 - адроны с площади  $S_2 = S_3 = \dots S_7 = 68$  см<sup>2</sup>. Одновременно с детекторами на мишени и в 60 см от нее в качестве мониторов потоков первичных частиц облучались детекторы из алюминия и углеродсодержащие в падающих пучках <sup>4</sup>He и <sup>12</sup>C, что позволило свести к минимуму систематические ошибки, связанные с временными поправками и определением отношений активностей.

## 1. ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИЙ АКТИВАЦИИ

С помощью телескопа из двух счетчиков<sup>21/</sup> с пластическими сцинтилляторами 5x5x0,5 см<sup>3</sup> при пониженной интенсивности пучка (~10<sup>4</sup> ядер/цикл) измерялись сечения реакций активации <sup>12</sup>C(<sup>4</sup>He, x)<sup>1</sup>Si <sup>12</sup>C(<sup>12</sup>C, x)<sup>11</sup>C. При этом счетчики работали в режиме совпадений, и облучались два углеродсодержащих детектора,

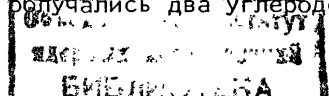


Таблица 1. Характеристики реакций для адронов

РЕАКЦИЯ	j	Порог реакции		$\sigma_a^j$ [мб]	$E_a$ [МэВ]	Литера- тура
		МэВ	Литера- тура			
$^{12}\text{C}(\alpha, x)^{11}\text{C}$	1	≈ 20	5	25	≥ 20	5, 6, 7
$^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{18}\text{F}$	2	≈ 45	12	7	≥ 45	12, 13, 14, 15, 16
$^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{24}\text{Na}$	3	≈ 6	8	77	≤ 20	8
				10	> 20	9, 10, 11

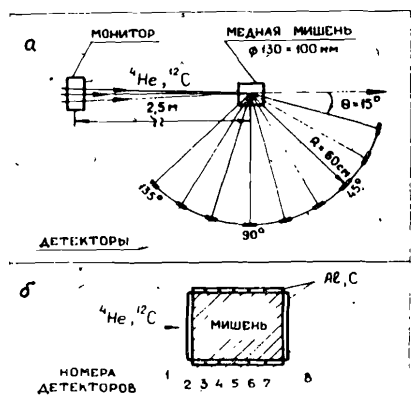


Рис. 1. Геометрия эксперимента /а/ и схема расположения детекторов /б/.

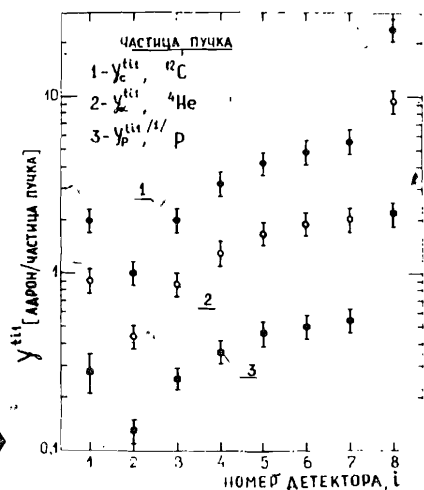


Рис. 2. Распределение выхода адронов  $Y^{111}$  с поверхности мишени для различных частиц пучка.  $E_a \geq 20$  МэВ; реакция  $^{12}\text{C}(\alpha, x)^{11}\text{C}$ .

укрепленных на каждом из сцинтилляторов и имеющих одинаковые с ними размеры. Активность измерялась на низкофоновой установке  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений с двумя кристаллами  $\text{NaJ}(\text{Tl}) \phi 150 \times 120$  и  $\phi 150 \times 100$  мм по регистрации двух аннигиляционных  $\gamma$ -квантов

энергией 511 кэВ. Ошибка измерения активностей изотопа  $^{11}\text{C}$  при этом не превышала 5%. Примесь других заряженных частиц (p, d) в пучке  $^4\text{He}$  и p, d,  $^4\text{He}$  в пучке  $^{12}\text{C}$  была незначительна /не более 5%/ и учитывалась при определении сечений реакций активации. Облучения углеродсодержащих детекторов проводились не менее 5 раз при различных интенсивностях  $/2-6/x10^4$  ядер/цикл, что исключало случайную ошибку и позволяло сделать вывод об отсутствии просчетов телескопа, по крайней мере, при интенсивностях  $\leq 5 \cdot 10^4$  ядер/цикл.

Измеренные значения сечения  $\sigma_a^{01}$  и  $\sigma_c^{01}$  соответственно реакций активации  $^{12}\text{C}(\alpha, x)^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}(\alpha, x)^{11}\text{C}$  при энергиях налетающих ядер 3,65 ГэВ/нуклон оказались равными  $/42 \pm 3/$  мб и  $/57 \pm 4/$  мб. В [17, 18] измеренные  $\sigma_a^{01}$  и  $\sigma_c^{01}$  при энергиях ядер  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  2,1 ГэВ/нуклон оказались равными  $/43,5 \pm 3,5/$  мб и  $/60,9 \pm 0,6/$  мб соответственно. В этих же работах систематизированы данные указанных реакций при меньших энергиях и сделан вывод о том, что при энергиях  $\geq 0,5-1$  ГэВ/нуклон указанные сечения имеют слабую энергетическую зависимость. Полученные нами результаты подтверждают этот факт.

Для других используемых реакций  $^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{18}\text{F}$ ,  $^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{24}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{18}\text{F}$ ,  $^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{24}\text{Na}$  соответствующие сечения активации  $\sigma_a^{02}, \sigma_a^{03}, \sigma_c^{02}, \sigma_c^{03}$  определены с помощью уже известных сечений  $\sigma_a^{01}$  и  $\sigma_c^{01}$ . Для этого стопка из углеродсодержащих и алюминиевых детекторов одновременно облучалась в пучках  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$ .

Таблица 2. Сечения реакций активации для ядер  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 ГэВ/нуклон

РЕАКЦИЯ	$^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{18}\text{F}$	$^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{24}\text{Na}$
НОМЕР, j	2	3
$\sigma_a^{0j} / \sigma_a^{01}$	$0,29 \pm 0,02$	$0,40 \pm 0,03$
$\sigma_a^{0j}$ [мб]	$12,2 \pm 1,2$	$16,8 \pm 1,7$
РЕАКЦИЯ	$^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{18}\text{F}$	$^{27}\text{Al}(\alpha, x)^{24}\text{Na}$
НОМЕР, j	2	3
$\sigma_c^{0j} / \sigma_c^{01}$	$0,30 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,03$
$\sigma_c^{0j}$ [мб]	$17,1 \pm 1,7$	$25,0 \pm 2,5$

$^{*}\sigma_a^{01} = (42 \pm 3) \text{ мб}, \sigma_c^{01} = (57 \pm 4) \text{ мб}$

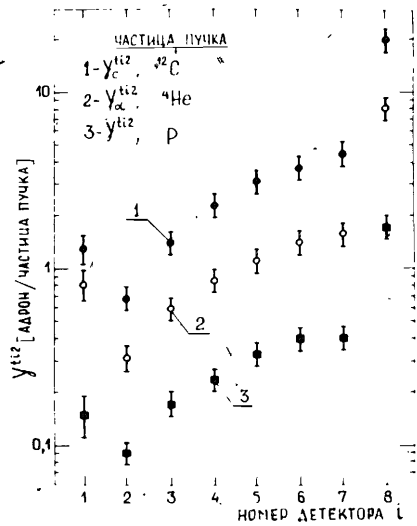


Рис.3. Распределение выхода адронов  $Y^{ti2}$  с поверхности мишени для различных частиц пучка.  $E_a \geq 45$  МэВ; реакция  $^{27}\text{Al}(a, x)^{18}\text{F}$ .  $6 \leq E_a \leq 20$  МэВ; реакция  $^{27}\text{Al}(a, x)^{24}\text{Na}$ .

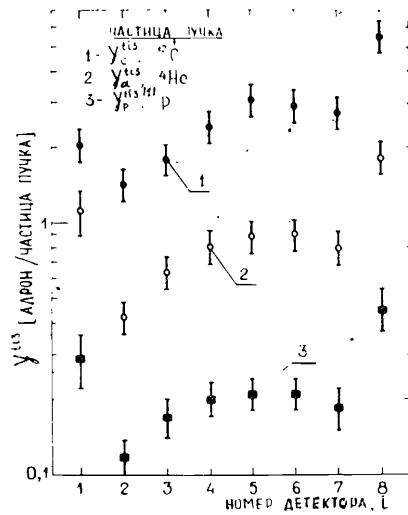


Рис.4. Распределение выхода адронов  $Y^{ti3}$  с поверхности мишени для различных частиц пучка.

После облучения и определения активностей изотопов  $^{11}\text{C}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{24}\text{Na}$  определялись отношения сечений относительно сечений  $\sigma_a^{01}$  и  $\sigma_c^{01}$ . Активности изотопов в этом случае определялись с помощью тщательно отградуированного на протяжении нескольких лет однокристалльного сцинтилляционного гамма-спектрометра с кристаллом  $\text{NaI}(\text{Tl})$  размером  $\phi 120 \times 100$  мм  $^{719}$ ; измерение активностей изотопов  $^{11}\text{C}$  и  $^{18}\text{F}$  проводилось также на установке  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений. Полученные отношения указаны в табл.2. На основании этих отношений определены сечения реакций активации для ядер  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 ГэВ/нуклон, значения которых и указаны в табл.2.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫХОДА АДРОНОВ

После облучения детекторов, указанных на рис.1, измерений активности каждого детектора определялись величины  $q_a^{tij}$  и  $q_c^{\theta j}$  [расп/с/ядро  $^4\text{He}$ /с]

$$q_a^{tij} = (A_a^{tij} - A_a^{0j} K) \cdot \sigma_a^{0j} / A_a^{0j} \cdot S_0, \quad i = 1, 2, \dots = 8, \quad j = 1, 2, 3; \quad /1/$$

$$q_c^{\theta j} = A_c^{\theta j} \cdot \sigma_c^{0j} / A_c^{0j} \cdot S_0, \quad \theta = 15^\circ, 30^\circ, \dots = 135^\circ, \quad j = 1, 2, 3, \quad /2/$$

где  $A_a^{0j}$ ,  $A_a^{tij}$ ,  $A_c^{\theta j}$  [расп/с/ядро] - активности при бесконечном времени облучения на одно ядро детектора, облученного соответ-

ственно в пучке ядер  $^4\text{He}$ , на мишени и на расстоянии  $R = 60$  см от нее;  $S_0$  [см $^2$ ] - площадь детектора в пучке ядер  $^4\text{He}$ ;  $K$  - коэффициент, учитывающий вклад от пучка  $^4\text{He}$  в активности детекторов №1,8 / $K = 0$  для всех остальных детекторов/. Значение  $K$  для детекторов №1 равно 1, а для детекторов №8  $K$  вычислялось на основании данных  $^{20}$  о сечении неупругого взаимодействия ядер  $^4\text{He}$  с энергией  $\sim 4$  ГэВ/нуклон и в предположении экспоненциального убывания первичных ядер  $^4\text{He}$  по длине вдоль мишени. С заменой индексов "a" на "c" формулы /1/ и /2/ становятся справедливыми для случая облучения мишени пучком ядер  $^{12}\text{C}$  с аналогичными объяснениями всех входящих в них величин.

По данным  $q_a^{tij}$  и  $q_c^{\theta j}$  определялись выходы адронов с поверхности мишени  $y_a^{tij}$  [адрон/ядро  $^4\text{He}$ ] и угловое распределение выхода адронов  $y_a^{\theta j}$  [адрон/ядро  $^4\text{He}$ /ср]

$$y_a^{tij} = q_a^{tij} \cdot S_i / \sigma_a^j, \quad i = 1, 2, \dots 8; \quad j = 1, 2, 3; \quad /3/$$

$$y_a^{\theta j} = q_c^{\theta j} \cdot R^2 / \sigma_a^j, \quad \theta = 15^\circ, 30^\circ, \dots 135^\circ, \quad j = 1, 2, 3, \quad /4/$$

где  $S_i$  [см $^2$ ] - площадь  $i$ -й поверхности мишени, с которой регистрирует адроны  $i$ -й детектор;  $R = 60$  см;  $\sigma_a^j$  указаны в табл.1. Заменяв индексы "a" в /3/, /4/ на "c", получим соответствующие выходы для случая облучения мишени ядрами  $^{12}\text{C}$ .

В формулах /1/-/4/ индекс  $j$  указывает номер используемой реакции /см.табл.1,2/, индексы  $i$ ,  $\theta$  - соответственно номер детектора на мишени и угол вылета адронов из мишени /рис.1/.

Значения сечений для используемых реакций активации для частиц пучка  $\sigma_a^{0j}$ ,  $\sigma_c^{0j}$  / $j = 1, 2, 3$ / приведены в п.1 и в табл.2. Суммируя значения  $y_a^{tij}$  и численно интегрируя  $y_a^{\theta j}$ , получим интег-

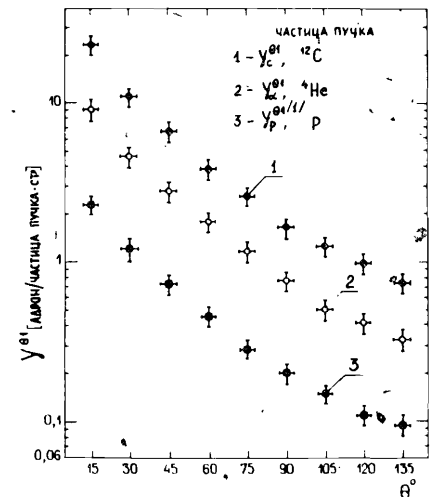


Рис.5. Угловое распределение адронов  $y^{\theta 1}$  из мишени для различных частиц пучка.  $E_a \geq 20$  МэВ; реакция  $^{12}\text{C}(a, x)^{11}\text{C}$ .

ральные значения выходов адронов  $Y_a^{tj}$ ,  $Y^{tj}$  и  $Y_a^{\theta j}$ ,  $Y^{\theta j}$  соответственно в углы  $4\pi$  и  $3,57\pi$  на одну первичную частицу /частицу пучка/.

Значения  $Y^{tj}$  и  $Y^{\theta j}$  для адронов в интервале 6-20 МэВ определены из  $q^{tj3}$  и  $q^{\theta j3}$  для реакций  $^{27}\text{Al}(a,x)^{24}\text{Na}$  с вычетом вклада адронов с энергией  $E_a \geq 20$  МэВ; значения  $q^{tj3}$   $> 20$  МэВ/ и  $q^{\theta j3}$   $> 20$  МэВ/ определены из  $q^{tj1}$  и  $q^{\theta j1}$  для реакции  $^{12}\text{C}(a,x)^{11}\text{C}$ .

В большинстве случаев мониторингирование потока частиц пучка  $I^0$  [первичная частица/с] проводилось также с помощью ионизационной камеры  $^{21}$ /рис.1/. Сравнение  $I^0$  с величинами  $(\sigma_a^{oj}/A_a^{oj} \cdot S_0)^{-1}$ ,  $(\sigma_c^{oj}/A_c^{oj} \cdot S_0)^{-1}$  в формулах /1/, /2/ обнаруживало расхождение не более 5-10%. Значения  $Y^{tj}$ ,  $Y^{\theta j}$ ,  $Y^{tj}$ ,  $Y^{\theta j}$  представлены на рис.2-5 и в табл.3.

Таблица 3. Значения выходов адронов  $Y^{tj}$  [адрон/частица пучка·4 $\pi$ ] и  $Y^{\theta j}$  [адрон/частица пучка·3,57 $\pi$ ] с энергией  $E_a$  из медной мишени  $\phi 100 \times 130$  мм, облучаемой протонами, ядрами  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 ГэВ/нуклон

частица пучка	РЕАКЦИЯ, j	$^{12}\text{C}(a,x)^{11}\text{C}, 1$	$^{27}\text{Al}(a,x)^{24}\text{F}, 2$	$^{27}\text{Al}(a,x)^{24}\text{Na}, 3$
	$E_a, \text{МэВ}$	$\geq 20$	$\geq 45$	$6 \div 20$
P /1/	$Y_p^{tj} \left[ \frac{\text{адрон}}{\text{протон} \cdot 4\pi} \right]$	$4,7 \pm 0,7$	$3,5 \pm 0,5$	$1,8 \pm 0,4$
	$Y_p^{\theta j} \left[ \frac{\text{адрон}}{\text{протон} \cdot 3,57\pi} \right]$	$4,8 \pm 0,7$	$3,8 \pm 0,6$	$1,4 \pm 0,3$
$^4\text{He}$	$Y_d^{tj} \left[ \frac{\text{адрон}}{^4\text{He} \cdot 4\pi} \right]$	$18,7 \pm 2,8$	$14,6 \pm 2,2$	$7,3 \pm 1,1$
	$Y_d^{tj}/Y_p^{tj}$	$4,0 \pm 0,8$	$4,2 \pm 0,8$	$4,1 \pm 0,8$
	$Y_d^{\theta j} \left[ \frac{\text{адрон}}{^4\text{He} \cdot 3,57\pi} \right]$	$18,3 \pm 2,7$	$12,1 \pm 1,8$	$5,9 \pm 0,9$
	$Y_d^{\theta j}/Y_p^{\theta j}$	$3,8 \pm 0,8$	$3,2 \pm 0,6$	$4,0 \pm 0,8$
$^{12}\text{C}$	$Y_c^{tj} \left[ \frac{\text{адрон}}{^{12}\text{C} \cdot 4\pi} \right]$	$47 \pm 7$	$36,3 \pm 5,4$	$22 \pm 4$
	$Y_c^{tj}/Y_p^{tj}$	$10 \pm 2$	$10,4 \pm 2,1$	$12,2 \pm 2,5$
	$Y_c^{\theta j} \left[ \frac{\text{адрон}}{^{12}\text{C} \cdot 3,57\pi} \right]$	$44 \pm 7$	$32 \pm 5$	—
	$Y_c^{\theta j}/Y_p^{\theta j}$	$9,2 \pm 1,8$	$8,5 \pm 1,7$	—

х/ Результат данной работы.

## ВЫВОДЫ

Значения выходов  $Y^{t1}$  в угол  $4\pi$  с энергией  $\geq 20$  МэВ увеличились в  $/4,0 \pm 0,8/$  раза для ядер  $^4\text{He}$  и в  $/10 \pm 2/$  раза для ядер  $^{12}\text{C}$  с энергией  $3,65$  ГэВ/нуклон по сравнению с выходом адронов для протонов с энергией  $3,65$  ГэВ /табл.3/.

Для рассматриваемых в данной работе условий облучения мишени /толщина по пучку  $116 \text{ г/см}^2/$  выходы адронов с энергией  $\geq 20$  МэВ на одно неупругое взаимодействие частицы пучка оказались равными: для протонов -  $8,3 \pm 1,3$  [адрон/протон], для ядер  $^4\text{He}$  -  $25 \pm 4$  [адрон/ядро  $^4\text{He}$ ] и для ядер  $^{12}\text{C}$  -  $55 \pm 8$  [адрон/ядро  $^{12}\text{C}$ ]. Данные о сечениях неупругого взаимодействия частиц пучка с ядром мишени определены из  $^{20,22}$ .

В  $^{23}$  проводится дальнейшее обоснование и совершенствование метода эквивалентных протонов /МЭП/.

Как видно из рис.2-5, относительное распределение выхода адронов с поверхности мишени и форма углового распределения приблизительно одинаковы для ядер-снарядов P,  $^4\text{He}$ ,  $^{12}\text{C}$ . Это свидетельствует о корректности предположения в МЭП подобия формы угловых распределений тех или иных характеристик поля излучения вторичных частиц от протонов, ядер  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$ .

Угловые распределения  $Y^{\theta j}$ , полученные в данной работе, более изотропны, чем угловые распределения заряженных частиц  $^{21}$ .

Полученные в данной работе значения сечений реакций активации на алюминии и углероде для ядер  $^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}$  могут быть использованы для мониторингирования частиц пучка при решении других вопросов в области физики защиты и дозиметрии, а также других прикладных задач.

В заключение автор выражает благодарность М.М.Комочкову за постановку задачи и постоянную поддержку работы, Г.Н.Тимошенко за помощь в определении сечений реакций активации. Автор также благодарит В.Е.Алейникова, Бе Ен Гвана и А.Н.Резуника за помощь в проведении экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алейников В.Е. и др. В кн.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1983, т.2, с.192.
2. Алейников В.Е. и др. В кн.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1983, т.2, с.189.
3. Комочков М.М. ОИЯИ, P16-83-190, Дубна, 1983.
4. Gabriel T.A., Bishop B.L., Lillie R.A. ORNL/TM-8952, Oak Ridge, 1984.
5. Bizard G. et al. Nucl.Instr. and Meth., 1975, 129, p.569.

6. Charalambus St. et al. CERN, DI/HP 90, Geneva, 1966.
7. Cumming J.B. Ann.Rev.Nucl.Sci., 1963, 13, p.261.
8. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С., Тихонов Е.Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. Атомиздат, М., 1976.
9. Patterson H.W., Thomas R.H. Accelerator Health Physics. Academic Press, New York and London, 1973.
10. Bayhurst B.P. et al. Phys.Rev., 1975, C12, p.451.
11. Cumming J.B. et al. Nucl.Instr.and Meth., 1981, 180, p.37.
12. Williams I.R., Fulmer C.B. Phys.Rev., 1967, 162, p.1055.
13. Friendlander G. Phys.Rev., 1955, 99, p.263.
14. Денисов Ф.П., Мехедов В.Н. Ядерные реакции при высоких энергиях. Атомиздат, М., 1972.
15. Parikh V. Nucl.Phys., 1960, 18, p.638.
16. Cumming J.B. et al. Phys.Rev., 1962, 128, p.2396.
17. Geaga J.V. et al. Phys.Rev.Lett., 1980, 45, p.1993.
18. Smith A.R., McCaslin J.B., Geaga J.V. Phys.Rev., 1983, C28, p.1614.
19. Бамблевский В.П., Гречко В.В. ОИЯИ, Б2-16-12123, Дубна, 1978.
20. Ставинский В.С. ОИЯИ, 2-80-66, Дубна, 1980.
21. Алейников В.Е., Тимошенко Г.Н. ОИЯИ, 16-83-359, Дубна, 1983.
22. Барашенков В.С., Тонеев В.Д. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 января 1985 года.

Бамблевский В.П. 16-85-35  
Определение выхода и углового распределения адронов из толстой медной мишени при бомбардировке ядрами  ${}^4\text{He}$  и  ${}^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 ГэВ/нуклон

Определены выходы и угловые распределения адронов из толстой медной мишени при бомбардировке ядрами  ${}^4\text{He}$  и  ${}^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 ГэВ/нуклон. Выходы адронов измерены активационными детекторами с использованием реакций  ${}^{12}\text{C}(a, x){}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{27}\text{Al}(a, x){}^{18}\text{F}$ ,  ${}^{27}\text{Al}(a, x){}^{24}\text{Na}$  в диапазонах энергий адронов  $E_a \geq 20$  МэВ,  $E_a \geq 45$  МэВ и  $6 \leq E_a \leq 20$  МэВ. Проведено сравнение с результатами аналогичного эксперимента на протонах с энергией 3,65 ГэВ. Измерены также сечения реакций активации  ${}^{12}\text{C}({}^4\text{He}, x){}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{12}\text{C}({}^{12}\text{C}, x){}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{27}\text{Al}({}^4\text{He}, x){}^{18}\text{F}$ ,  ${}^{27}\text{Al}({}^{12}\text{C}, x){}^{18}\text{F}$ ,  ${}^{27}\text{Al}({}^4\text{He}, x){}^{24}\text{Na}$ ,  ${}^{27}\text{Al}({}^{12}\text{C}, x){}^{24}\text{Na}$  для ядер  ${}^4\text{He}$  и  ${}^{12}\text{C}$  с энергией 3,65 ГэВ/нуклон.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Bamblevskij V.P. 16-85-35  
Determination of the Yield and Angular Distribution of Hadrons from Thick Copper Target Irradiated by  ${}^4\text{He}$  and  ${}^{12}\text{C}$  at 3.65 GeV/Nucleon

The yields and angular distributions of hadrons from thick copper target irradiated by  ${}^4\text{He}$  and  ${}^{12}\text{C}$  at 3.65 GeV/nucleon have been determined. The hadron yields have been measured with activation detectors using reactions  ${}^{12}\text{C}(a, x){}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{27}\text{Al}(a, x){}^{18}\text{F}$  and  ${}^{27}\text{Al}(a, x){}^{24}\text{Na}$  in the energy range of hadrons  $E_a \geq 20$  MeV,  $E_a \geq 45$  MeV and  $6 \leq E_a < 20$  MeV. Comparison has been made with the results of similar experiment on 3.65 GeV protons. The absolute cross sections for activation reactions  ${}^{12}\text{C}({}^4\text{He}, x){}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{12}\text{C}({}^{12}\text{C}, x){}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{27}\text{Al}({}^4\text{He}, x){}^{18}\text{F}$ ,  ${}^{27}\text{Al}({}^{12}\text{C}, x){}^{18}\text{F}$ ,  ${}^{27}\text{Al}({}^4\text{He}, x){}^{24}\text{Na}$ ,  ${}^{27}\text{Al}({}^{12}\text{C}, x){}^{24}\text{Na}$  have been also measured for nuclei  ${}^4\text{He}$  and  ${}^{12}\text{C}$  at 3.65 GeV/nucleon.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Researches, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985