

11302

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



2416-2-78

P1 - 11302

А. М. Балдин, В. К. Бондарев, А. Н. Манятовский,
Н. С. Мороз, Ю. А. Панебратцев, А. А. Повторейко,
С. В. Рихвицкий, В. С. Ставинский, А. Н. Хренов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ И α -ЗАВИСИМОСТИ
КУМУЛЯТИВНОГО РОЖДЕНИЯ
БАРИОННЫХ СИСТЕМ

1978

P1 - 11302

**А.М. Балдин, В.К. Бондарев*, А.Н. Манятовский,
Н.С. Мороз, Ю.А. Панебратцев, А.А. Повторейко,
С.В. Рихвицкий, В.С. Ставинский, А.Н. Хренов**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ И α -ЗАВИСИМОСТИ
КУМУЛЯТИВНОГО РОЖДЕНИЯ
БАРИОННЫХ СИСТЕМ**

* Институт физики Ленинградского государственного университета.

Балдин А.М. и др.

P1 - 11302

Энергетические спектры и A -зависимости кумулятивного рождения барионных систем

Целью данной работы является детальное изучение энергетического спектра и A -зависимости сечений кумулятивного образования протонов, дейтронов и трития. В качестве мишеней применялись следующие ядра: ${}^6,7\text{Li}$, Be , C , Al , Si , ${}^{54,56,58}\text{Fe}$, ${}^{58,61,64}\text{Ni}$, Cu , ${}^{64}\text{Zn}$, ${}^{112,118,124}\text{Sn}$, ${}^{144,154}\text{Sm}$, ${}^{182,186}\text{W}$, Pb , U . Эксперимент проводился на выведенном пучке синхрофазотрона ЛВЭ (медленный вывод) при импульсе первичных протонов 8,6 ГэВ/с. Основные результаты работы: энергетические спектры для всех частиц и на различных ядрах имеют экспоненциальный характер и подобны между собой. Зависимость инвариантных сечений от заряда ядра носит регулярный характер, что является следствием независимости сечения образования протонов и, по-видимому, дейтронов от нейтронного избытка в ядрах. Вся совокупность экспериментальных данных позволяет определить параметры наклона спектров и показателя степеней в Z -зависимости для исследованных частиц.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий, ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1978

Baldin A.M. et al.

P1 - 11302

Energy Spectra and A -Dependence of Cumulative Production of Baryon Systems

The aim of this paper is to study in detail the energy and A -dependence of cumulative protons, deuterons and tritium. The following nuclei were used as targets: ${}^6,7\text{Li}$, Be , C , Al , Si , ${}^{54,56,58}\text{Fe}$, ${}^{58,61,64}\text{Ni}$, Cu , ${}^{64}\text{Zn}$, ${}^{112,118,124}\text{Sn}$, ${}^{144,154}\text{Sm}$, ${}^{182,186}\text{W}$, Pb , U . The experiment was performed on the extracted beam of the synchrophasotron of the High Energies Laboratory (slow extraction) at 8.6 GeV/c pulse of primary protons. The results indicate that the energy dependences for all particles and with various nuclei are exponential and similar to each other. The dependence of invariant cross section on a nuclear charge is regular due to the independence of the proton production cross sections and, probably, of that of deuterons upon neutron excess in nuclei. The data allows one to determine parameters of spectra slopes and degree indexes in Z -function.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает цикл исследований кумулятивного образования частиц ¹⁻⁷ в столкновениях релятивистских протонов с различными ядрами. Кумулятивное образование частиц наиболее чисто проявляется в области предельной фрагментации ядер.

Одночастичное инвариантное сечение $\rho = E_1 \frac{d\sigma}{d^3p_1}$ инклюзивной реакции

$$I + II \rightarrow 1 + \dots \quad /1/$$

в силу релятивистской инвариантности зависит от разности быстрот $y_I - y_{II}$, $y_I - y_1$, где $y_i = \frac{1}{2} \ln \frac{E_i + p_L^i}{E_i - p_L^i}$,

а E_i и p_L^i - энергия и продольная компонента импульса i -той частицы. Согласно гипотезе о предельной фрагментации, в области $|y_I - y_1| \ll |y_I - y_{II}| - 2$ /область фрагментации частицы I / инвариантное сечение зависит только от $|y_I - y_1|$:

$$\rho(y_I - y_{II}, y_I - y_1) \rightarrow \rho(y_I - y_1). \quad /2/$$

Зависимость от свойств частицы факторизуется, и основные особенности реакции определяются свойствами частицы I. Независимость ρ от $(y_I - y_{II})$ означает одновременно масштабную инвариантность инклюзивного сечения.

Взаимодействие частиц высоких энергий с ядрами ранее изучалось в области предельной фрагментации частиц, где свойства ядер проявляются очень слабо. В качестве основной закономерности взаимодействия элементарных частиц с ядрами обычно отмечалась слабая зависимость многих характеристик от атомного номера A , что находится в соответствии с идеей о предельной фрагментации.

В работах ^{1-4/} нами было предпринято изучение в области предельной фрагментации ядер. В результате были обнаружены необычные, сильные A -зависимости сечений, особенно существенно проявляющиеся в кумулятивной области, т.е. в области $y_1 - y_1$, кинематически запрещенной для однонуклонных столкновений. Наиболее эффективным методом оказалось изучение инклюзивного рождения частиц на ядрах под углом 180° к направлению первичного пучка. В качестве основной переменной была

$$\text{принята величина } b_{I1} = \frac{(p_I \cdot p_1)}{m_I} - m_I,$$

где $(p_I \cdot p_1)$ - скалярное произведение 4-векторов импульса частиц I и 1 . В системе координат, где ядро I покоится, $b_{I1} = T_1$ - кинетическая энергия частицы 1 . Через быстроты b_{I1} выражается для угла 180° следующим образом: $b_{I1} = m_I [\text{ch}(y_1 - y_1) - 1] \approx (y_1 - y_1)^2 m_I$. Функция ρ в кумулятивной области хорошо аппроксимировалась экспонентой вида

$$\rho = C \exp[-T_1 / T_0] = C_1 \exp \left\{ \frac{-m_I \text{ch}(y_1 - y_1)}{T_0} \right\}.$$

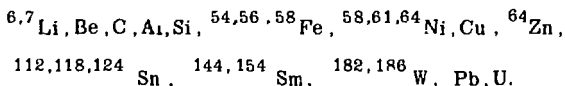
Основное внимание нами было уделено ^{1-4/} кумулятивному образованию пионов. При кумулятивном образовании барионных систем наблюдается существенная особенность, связанная с наличием полюса, обусловленного малостью энергии связи ядер ^{5/}. Полюсная зависимость

при малых b_{I1} функции $\rho \sim \frac{1}{(a + \frac{2}{m_I} b_{I1})^2}$ для барионных

систем доминирует и осложняет выделение предельной фрагментации ядер и кумулятивного эффекта.

Целью настоящей работы является изучение энергетических спектров и A -зависимостей сечений кумулятивного образования протонов, дейтонов, тритонов и π^+ -мезонов.

В качестве мишеней применялись следующие ядра:



Столь широкий набор исследуемых ядер определялся рядом причин. Поскольку исследуемые вторичные частицы /продукты фрагментации мишеней/ являются составными частями ядер, то естественным образом возникает вопрос - в какой мере их образование может зависеть от конкретного вида ядра. С другой стороны, если рассматривать ядро как реалистическую кварковую модель релятивистского протяженного объекта, то становится очевидным, что структура его известна хотя бы в нерелятивистском пределе и, кроме того, имеется возможность в широких пределах менять его квантовые числа. Последнее обстоятельство отмечалось в работе ^{7/8/}.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент проводился на выведенном лучке синхротрона ЛВЭ /медленный вывод/ при импульсе первичных протонов 8,6 ГэВ/с. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Первичный пучок фокусируется на исследуемую мишень дублетом линз 2OK100. Размер изображения на мишени ~10 мм.

Вторичные частицы (p, d, t), вылетающие из мишени под углом 180° , отклоняются секторным магнитом 2СП94 на угол 22° относительно направления первичного пучка и формируются дублетом линз МЛ15. Идентификация вторичных частиц осуществляется путем измерения времени пролета на базе 4м счетчиками S_1, S_2, S_3 . Для уменьшения уровня случайных совпадений полная время-пролетная база разбивается на две / $S_1 S_3$ и $S_2 S_3$ /.

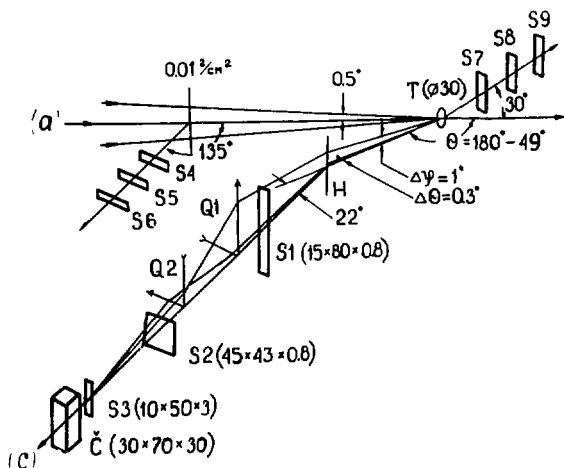


Рис. 1. Схема эксперимента.

С целью повышения надежности выделения полезных событий ведется измерение ионизационных потерь / ΔE -счетчик/ и скорости частиц /черенковский счетчик/. Функции ΔE -счетчика выполняет счетчик S_3 , имеющий сцинтиллятор толщиной 3 мм. Черенковский счетчик располагается непосредственно за счетчиком S_3 . На пути вторичных частиц от мишени до последнего счетчика расположен вакуумпровод, имеющий разрывы в местах установления счетчиков. Счетчики S_1 и S_2 имеют сцинтилляторы толщиной 0,8 мм, сопряженные с фотоумножителями ХР-1021. Разрешающее время спектрометра ~ 200 пс. Мишени, используемые в эксперименте, представляют собой диски $\phi 30$ мм и подразделяются на тонкие /0,5 г/см²/ и толстые /1,5-2,5 г/см²/, которые применяются соответственно при измерении малых /200-500 МэВ/с/ и больших / > 500 МэВ/с/ импульсов вторичных частиц. Исследуемые мишени заключены в обоймы из пенопласта и могут перемещаться в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Наведение пучка на мишень осуществляется

дистанционно по экрану телевизора при помощи сцинтилирующего экрана, установленного в одну из ячеек обоймы с мишенями. В процессе набора статистики прохождение пучка через мишень контролируется дополнительным мониторным телескопом M_{π} /рис. 1/, нацеленным на мишень и регистрирующим заряженные частицы, в основном π -мезоны и протоны, под углом 45° относительно направления первичного пучка. Мониторирование первичного пучка осуществляется телескопом сцинтилляционных счетчиков M_p /рис. 1/, который регистрирует частицы, идущие от майларового окна ионопровода под углом 135° относительно направления первичного пучка.

Отношение счета M_{π}/M_p для данной мишени служит показателем прохождения первичного пучка через мишень. Абсолютное значение интенсивности первичного пучка определяется по наведенной активности ¹⁹ с использованием реакции $^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$. Геометрия установки обеспечивает неопределенность в импульсе вторичных частиц $\pm 6\%$ и неопределенность в угле вылета ± 15 мрад, что соответствует максимальному перпендикулярному импульсу 15 МэВ/с /при регистрации под углом 180° /.

Регистрирующая аппаратура выполнена в стандарте КАМАК и работает на линии с ЭВМ БЭСМ-4. Для повышения быстродействия осуществлен режим работы двумя циклами КАМАК за один цикл ЭВМ. Общение с ЭВМ происходит посредством дисплея ВТ-340, который позволяет вводить необходимые данные в ЭВМ и следить за процессом набора статистики. В промежутках между циклами ускорения ЭВМ производит предварительную обработку информации. Окончательное выделение полезных событий достигается применением 5-мерного анализа.

Подробное описание экспериментальной установки /ДИСК-2/ содержится в работе ⁹.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЧАСТИЦ

Инвариантное сечение $E \frac{d\sigma}{d\vec{p}}$ выражается через наблюдаемые величины и параметры установки следующим образом:

$$E \frac{d\sigma}{d\vec{p}} = \left[\frac{N(A)}{M_p(A)} - \frac{N(\Pi)}{M_p(\Pi)} \right] \cdot \frac{k \cdot K}{\ell_A \cdot \epsilon_1} \cdot \frac{1}{q S_0} \cdot \left(\frac{M_p}{I_p} \right) \cdot \frac{E}{P^3}$$

$N(A)$ и $N(\Pi)$ - числа отсчетов от мишени A и от пустой мишени, $M_p(A)$ и $M_p(\Pi)$ - числа мониторных отсчетов соответственно для мишени A и для пустой мишени, k - коэффициент, учитывающий поправку на взаимодействие вторичных частиц в мишени B в веществе счетчиков, K - поправка на торможение частиц в мишени и в веществе, расположенном на пути вторичных частиц от мишени до последнего счетчика, ℓ_A - толщина мишени в обратных миллибарнах, ϵ_1 - поправка на рассеяние частиц в канале. Для определения этой величины производились специальные измерения с различными рассеивателями, различными толщинами сцинтилляторов для всех сортов регистрируемых частиц в диапазоне измеряемых импульсов.

В результате была получена эмпирическая зависимость:

$$\epsilon_1 = 1 - \exp[-(a)(p\beta)_1^2].$$

где p_1 и β_1 - соответственно импульс и скорость частиц в канале, коэффициент a приобретает значение 40 ± 5 в случае, когда сцинтилляторы имеют толщину $0,8$ мм, а между мишенью и последним счетчиком - вакуум, S_0 - светимость установки для несмещенной мишени, q - коэффициент, учитывающий изменение светимости в зависимости от положения мишени. Эта поправка связана с тем, что первичный пучок отклоняется магнитом ЗСП-94 тем сильнее, чем больший импульс вторичных частиц в канале, что влечет за собой смещение мишени в пределах ± 6 см /знак зависит от направления

магнитного поля в канале/, $(\frac{m_p}{I_p})$ - абсолютный отсчет
 мониторингового телескопа, E, p - полная энергия и им-
 пульс вторичных частиц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные данные представлены на *рис. 2-8*
 и сведены в *табл. 1-5*. Энергетическая зависимость
 инвариантных сечений показана на *рис. 2-4* соответствен-
 но для протонов, дейтронов и трития из ядер C, Cu, Pb ,

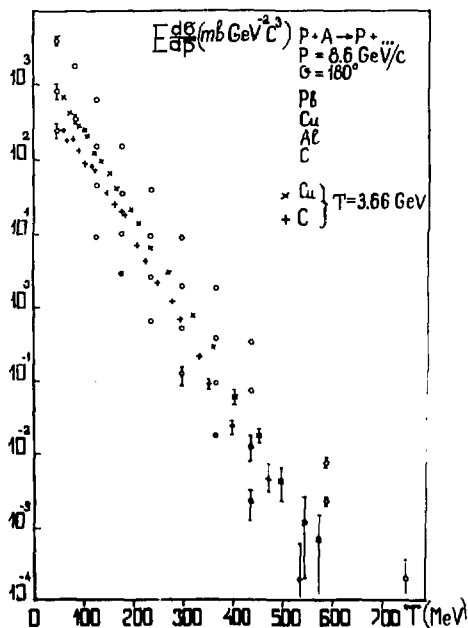


Рис. 2. Энергетическая зависимость протонов для ядер C, Al, Cu, Pb .

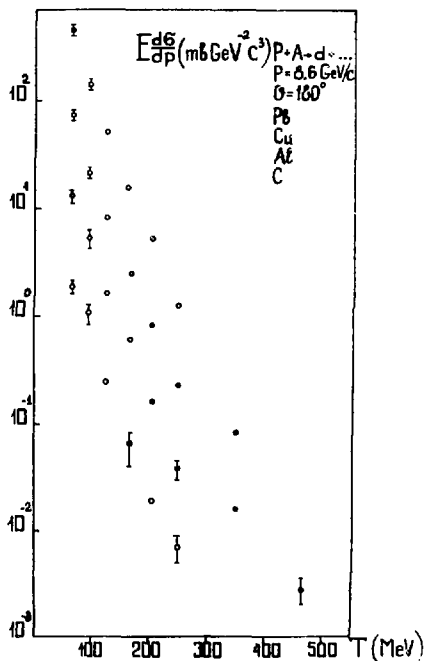


Рис. 3. Энергетическая зависимость дейтронов для ядер C, Al, Cu, Pb.

Al, Pb. На спектре протонов /рис. 2/ показаны также данные работы [10] для первичных протонов с энергией 3,66 ГэВ и угла вылета 137° для ядер Cu и C /практически совпадают с нашими данными для Al/. Ошибки измерений при малых энергиях вторичных частиц связаны, в основном, с неопределенностью поправки на многократное рассеяние, а при больших энергиях определяются статистикой. Там, где ошибки не указаны,

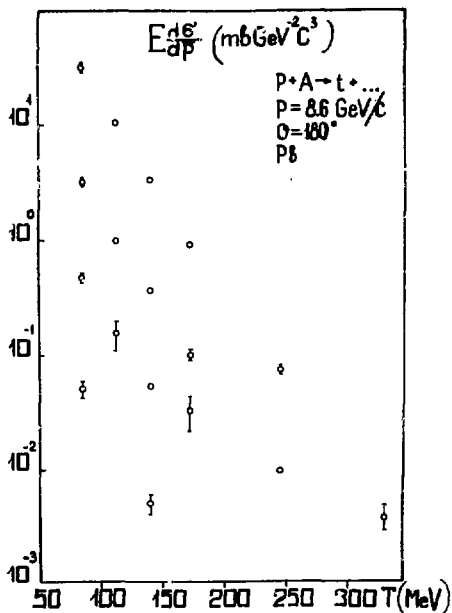


Рис. 4. Энергетическая зависимость кривия для ядер C, Al, Cu, Pb.

они заключены в пределах точек. Интересно отметить, что инвариантное сечение образования протонов, например, на ядре Pb, в указанном энергетическом диапазоне падает на 7 порядков. Спектры для всех частиц и на различных ядрах носят экспоненциальный характер и подобны между собой. Вывод о подобии спектров протонов ранее был сделан в работе [10].

На рис. 5-8 показана зависимость инвариантных сечений от заряда ядра, которая в таком представлении принимает более регулярный характер, что является

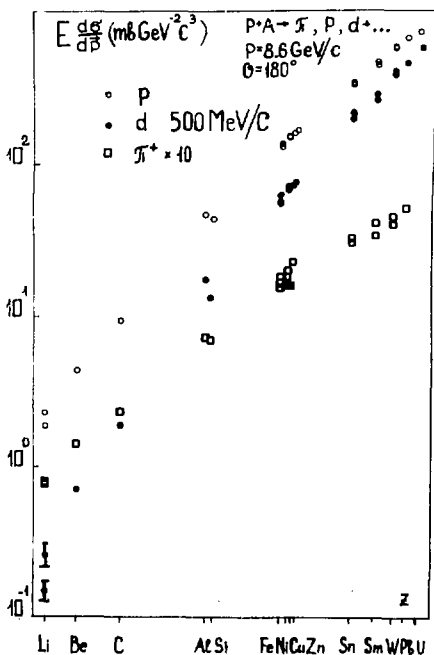


Рис. 5. Зависимость π^+ -мезонов, протонов и дейтронов с импульсом 500 МэВ/с от заряда ядра.

следствием независимости сечения образования протонов, и, по-видимому, дейтронов от нейтронного избытка в ядрах. Z-зависимость имеет разный характер для легких ядер /от лития до алюминия/ и для ядер тяжелее алюминия. Этот факт иллюстрируют рис. 5, 6. Погрешности измерений в Z-зависимости для протонов и дейтронов при импульсе 500 МэВ/с содержат только статистические ошибки. Вся совокупность экспериментальных данных позволяет с достаточной точностью определить параметры наклона спектров и показатели степени

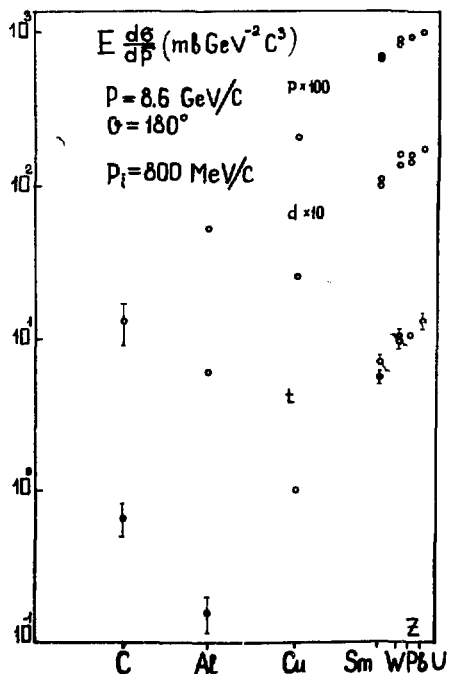


Рис. 6. Зависимость протонов, дейтронов и трития с импульсом 800 МэВ/с от заряда ядра.

в Z-зависимости для исследования частиц. Эти результаты будут опубликованы отдельно.

В заключение авторы благодарят О.Ю.Кульпину, В.Г.Перевозчикова за помощь в работе. Особую признательность мы выражаем В.П.Бочинну и В.С.Романову за действенную помощь при изготовлении мишеней из разделенных изотопов.

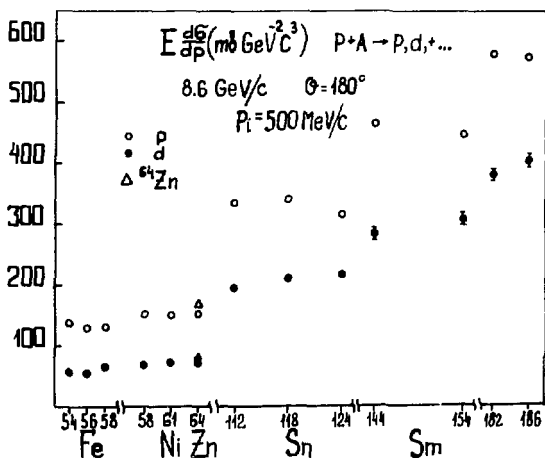


Рис. 7. Инвариантные сечения для протонов и дейтронов с импульсом 500 МэВ/с в функции нейтронного избытка в ядрах.

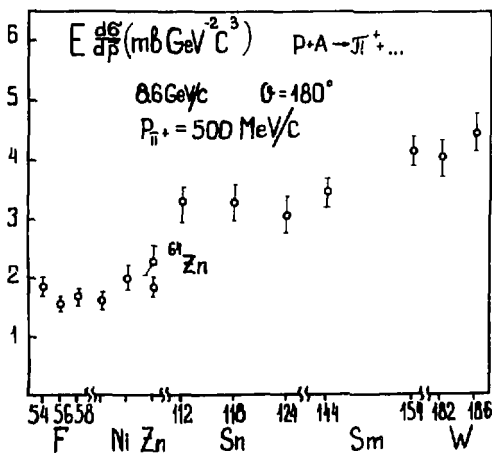


Рис. 8. Инвариантные сечения π^+ -мезонов с импульсом 500 МэВ/с в функции нейтронного избытка в ядрах.

Таблица 1

$$E \frac{d\sigma}{dp} / \text{мб ГэВ}^{-2} \text{с}^3 / \quad p+A \rightarrow p+\dots$$

$T_{(\text{MeV})}$	C	Al	Cu	Pb
47		258 ± 54	844 ± 177	3901 ± 390
82			351 ± 52	1768 ± 180
125	9.44 ± 0.58	47.3 ± 3	162 ± 8.7	665 ± 34
175	3.04 ± 0.20	10.4 ± 0.6	35.5 ± 2.3	151 ± 10
232	0.663 ± 0.034	2.75 ± 0.14	9.79 ± 0.49	40.5 ± 2.4
295	0.130 ± 0.041	0.527 ± 0.033	2.06 ± 0.11	9.17 ± 0.47
362	0.018 ± 0.001	0.096 ± 0.005	0.380 ± 0.02	1.84 ± 0.09
433	0.0023 ± 0.0010	0.013 ± 0.005	0.074 ± 0.005	0.325 ± 0.020
585			0.0023 ± 0.0003	0.0078 ± 0.0011
747				0.00019 ± 0.00018

Таблица 2.

$$E \frac{d\sigma}{dp} / \text{мб ГэВ}^{-2} \text{с}^3 / p+A \rightarrow d+\dots$$

T (MeV)	C		Al		Cu		Pb	
65	1.91	± 0.21	17.4	± 1.5	74.1	± 7.2	456	± 41
94	1.09	± 0.24	5.3	± 1.1	21.6	± 2.5	143	± 18
126	0.246	± 0.017	1.65	± 0.10	8.2	± 0.5	51.2	± 3
163	0.066	± 0.016	0.609	± 0.033	2.55	± 0.14	15.8	± 0.8
205	0.019	± 0.001	0.160	± 0.008	0.827	± 0.043	5.19	± 0.26
250	0.007	± 0.002	0.038	± 0.007	0.227	± 0.007	1.27	± 0.07
351					0.016	± 0.001	0.083	± 0.005
465							0.0028	± 0.0008

Таблица 3

$$E \frac{d\sigma}{d\vec{p}} / \text{мб ГэВ}^{-2} \text{с}^3 / \text{p+A} \rightarrow \text{t} + \dots$$

T (MeV)	C		Al		Cu		Pb	
86	0.051	± 0.008	0.476	± 0.048	3.24	± 0.29	31.7	± 2.3
112			0.158	± 0.041	1.01	± 0.07	10.4	± 0.7
141	0.005	± 0.001	0.054	± 0.003	0.374	± 0.022	3.39	± 0.18
173			0.033	± 0.011	0.1	± 0.01	0.923	± 0.081
246					0.0097	± 0.0009	0.073	± 0.007
330							0.004	± 0.001

Таблица 4.

$$E \frac{d\sigma}{dp} \quad / \text{мб ГэВ}^{-2} \text{с}^3 / \quad p+A \rightarrow \pi, p, d, \dots$$

$$500 \text{ МэВ/с}$$

A	\mathcal{F}^+	p	d
${}^6\text{Li}$	0.077 ± 0.005	1.87 ± 0.04	0.150 ± 0.038
${}^7\text{Li}$	0.079 ± 0.005	2.32 ± 0.05	0.263 ± 0.044
Be	0.143 ± 0.009	4.43 ± 0.08	0.708 ± 0.079
C	0.236 ± 0.012	9.4 ± 0.18	1.91 ± 0.13
Al	0.727 ± 0.089	47.1 ± 1.4	17.4 ± 1.2
Si	0.669 ± 0.056	44.6 ± 0.85	13.2 ± 0.6
${}^{54}\text{Fe}$	1.86 ± 0.16	138 ± 3.2	57.2 ± 2.3
${}^{56}\text{Fe}$	1.55 ± 0.13	130 ± 2.8	56.4 ± 2
${}^{58}\text{Fe}$	1.67 ± 0.14	131 ± 2.8	64.3 ± 2.3
${}^{58}\text{Ni}$	1.60 ± 0.16	149 ± 3.7	68.4 ± 2.7
${}^{61}\text{Ni}$	1.98 ± 0.20	151 ± 3.5	73.3 ± 2.9
${}^{64}\text{Ni}$	1.83 ± 0.15	153 ± 3.5	72.2 ± 2.7
Cu	1.58 ± 0.13	161 ± 3.8	74 ± 3
${}^{64}\text{Zn}$	2.28 ± 0.26	168 ± 4	76.8 ± 3.8
${}^{112}\text{Sn}$	3.24 ± 0.29	334 ± 10	196 ± 6
${}^{118}\text{Sn}$	3.27 ± 0.30	339 ± 7	210 ± 7
${}^{124}\text{Sn}$	3.06 ± 0.31	314 ± 6	215 ± 6
${}^{144}\text{Sm}$	3.44 ± 0.23	464 ± 15	284 ± 11
${}^{154}\text{Sm}$	4.15 ± 0.24	447 ± 12	258 ± 10
${}^{182}\text{W}$	4.04 ± 0.32	581 ± 12	378 ± 9
${}^{186}\text{W}$	4.48 ± 0.31	574 ± 12	404 ± 10
Pb	5.12 ± 0.39	670 ± 16	456 ± 11
U		722 ± 35	586 ± 28

Таблица 5.

$$E \frac{d\sigma}{dp} / \text{мб ГэВ}^{-2} \text{с}^3 / p+A \rightarrow p, d, t, \dots$$

800 МэВ/с

A	p	d	t
C	0.130 ± 0.041	0.066 ± 0.016	
Al	0.527 ± 0.033	0.609 ± 0.012	0.158 ± 0.041
Cu	2.06 ± 0.03	2.55 ± 0.05	1.01 ± 0.05
¹⁴⁴ Sm	6.83 ± 0.29	9.88 ± 0.40	5.65 ± 0.61
¹⁵⁴ Sm	6.48 ± 0.31	11.09 ± 0.49	6.98 ± 0.76
¹⁸² W	8.86 ± 0.38	15.88 ± 0.64	10.37 ± 1.07
¹⁸⁶ W	8.13 ± 0.34	13.67 ± 0.58	9.5 ± 1.0
Pb	9.17 ± 0.11	15.8 ± 0.8	10.4 ± 0.5
U	9.78 ± 0.61	17.23 ± 0.96	13.02 ± 1.59

ЛИТЕРАТУРА

1. А.М.Балдин и др. ОИЯИ, P1-5819, Дубна, 1971.
2. Балдин А.М. и др. ЯФ, 1974, 20, 12, с.1201.
3. Балдин А.М. и др. ЯФ, 1975, 21, 5, с.1008.
4. Балдин А.М. и др. IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975, с.176.
5. Baldin A.M. VI Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Los Alamos and Santa Fe, ed. American Institute of Physics, New York, 1975.
6. Ставинский В.С. Труды XVIII Международной конференции по физике высоких энергий, Тбилиси, 1976. ОИЯИ, Д1,2-10400, Дубна, 1977.
7. Baldin A.M. VII Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, Zurich, 1977.
8. Ефремов А.В. ЯФ, 1976, 24, 6, с.1208.
9. Аверчева Т.В. и др. ОИЯИ, 1-11317, Дубна, 1978.
10. Баюков Ю.Д. и др. ЯФ, 1973, 18, 6, с.1246; Изв. АН СССР, сер. физ., 1966, в. XXX, 3, с.521.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 февраля 1978 года.