



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

39

Л.М. Барков, М.С. Золоторев, П.К. Лебедев,
Л.А. Макарына, А.П. Мишакова, В.С. Охупкин,
В.П. Смахтин

ОБРАЗОВАНИЕ ЛЕГКИХ ЯДЕР
МАЛЫХ ИМПУЛЬСОВ
В ПРОТОН-ЯДЕРНЫХ СОУДАРЕНИЯХ
ПРИ ЭНЕРГИИ 70 ГэВ

ПРЕПРИНТ 85-129



НОВОСИБИРСК

АННОТАЦИЯ

В работе приводятся результаты измерения сечений образования ядер дейтерия, трития и гелия под нулевым углом в соударениях протонов с энергией 70 ГэВ с ядрами алюминия и вольфрама.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов образования легких ядер в соударениях адронов с ядрами представляется важным как для выяснения механизма их образования, так и для получения новой информации о строении ядра и, в частности, о его кластерной структуре (см. [1]). Однако, имеющаяся в настоящее время экспериментальная информация явно недостаточна для решения этих вопросов и желательны новые, дополнительные измерения.

В работе приводятся результаты измерения сечений образования ядер дейтерия, трития, гелия-3 и гелия-4 под нулевым углом к направлению протонного пучка в протон-ядерных соударениях при энергии 70 ГэВ. Работа является продолжением работ по измерению сечений образования вторичных частиц малых импульсов при энергии 70 ГэВ на ускорителе ИФВЭ [2, 3] и выполнена на магнитооптическом канале вторичных частиц низких энергий [4]. Для регистрации и идентификации рожденных в мишени канала ядер использовался метод ядерных фотоэмульсий. Измерения были проведены при значениях импульса однозарядных частиц, на который был настроен канал $P_{\text{кан}}$, равном 0,4 и 2 ГэВ/с. Таким образом, при измерениях в канал захватывались дейтоны и тритоны с этими значениями импульсов, а ядра гелия-3 и гелия-4 с импульсами — 0,8 и 4 ГэВ/с.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Канал вторичных частиц низких энергий ИФВЭ [4] представлял собой одноплечевой магнитный спектрометр, работавший от внешней мишени, располагавшейся на трассе быстрого вывода протонного пучка из ускорителя. В него захватывались вторичные частицы, рождавшиеся в мишени под нулевым углом к направлению протонного пучка в интервале углов в вертикальной плоскости ± 60 мрад, в горизонтальной плоскости ± 15 мрад и с разбросом по импульсу $\Delta P/P = \pm 1\%$. Для уменьшения рассеяния и поглощения вторичных частиц трасса канала вакуумировалась, а фольги, отделяющие канал от атмосферы, изготовлялись по возможности тонкими, так что полное количество вещества на пути вторичного пучка вне мишени составляло $0,15 \text{ г/см}^2$. Толщины W и Al мишеней равнялись соответственно 0,03 и 1,0 см.

Для определения размеров и положения протонного пучка перед мишенью располагалась вторично-эмиссионная камера. В ка-

честве детектора частиц вторичного пучка использовалась ядерная фотоэмульсия. Эмульсионный детектор состоял из одного фотослоя, так как засветка от непучковых частиц в месте расположения фотоэмульсии была мала. Слой фотоэмульсии типа БР-2 толщиной 500 мкм располагался на выходе канала под углом 10—15 градусов к оси пучка. При этом он полностью перекрывал пучок, и длина трека частиц была достаточной для проведения измерений, необходимых для идентификации ядер. Для контроля размеров вторичного пучка после фотоэмульсии располагалась пропорциональная камера.

При экспозиции каждого фотослоя из ускорителя на мишень канала выводилось такое количество протонов, чтобы максимальная плотность пучка релятивистских частиц в фотослое не превышала $(5-6) \cdot 10^5$ следов на см^2 . В этом случае в слое можно было проводить измерения плотности зерен, не перепутывая следы. Облучения проводились поочередно на Al и W мишенях без изменения режимов питания магнитных элементов канала при значениях импульса канала $P_{\text{кан}}$, равных 0,4 и 2 ГэВ/с.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕГКИХ ЯДЕР

Для определения сечений образования вторичных ядер необходимо измерить количество протонов, прошедших через мишень канала при экспозиции слоя, рассчитать величину эффективного акцептанса (светосилу) канала, а также определить число зарегистрированных ядер в облученном фотослое. Следует отметить, что в настоящем эксперименте при наименьших значениях импульса канала $P_{\text{кан}} = 0,4$ ГэВ/с нужно учитывать торможение ядер при прохождении мишени из-за потерь на ионизацию, и, следовательно, найденные значения сечений в этом случае являются средними в интервале импульсов ядер, соответствующем их вылету со входной и выходной поверхностей мишени.

Количество выведенных на мишень канала протонов определялось по интенсивности протонного пучка в ускорителе перед выпуском и эффективности выпуска пучка из ускорителя. Эффективный акцептанс канала определялся методом Монте-Карло с помощью вычислительной программы [5] с учетом параметров пучков протонов и ядер. Идентификация ядер в слоях фотоэмульсии проводилась как по соотношению пробег-энергия, так и по измерению плотности зерен и числа дельта-электронов на следах частиц [6, 7].

При импульсе канала $P_{\text{кан}} = 2$ ГэВ/с были измерены сечения образования дейтонов и тритонов при взаимодействии протонов с ядрами Al и W. Измерения проводились на части площади каждого из фотослоев, такой, чтобы вклад в ошибку измерения сечений из-за статистики был сравним с ошибками за счет других источников. Полное число ядер в слоях определялось пересчетом с учетом измерений профилей вторичного пучка в каждом слое. Каждый фотослой просматривался дважды. Первый раз с целью поиска следов и определения сечений образования дейтонов и второй раз — для поиска следов и определения сечений образования тритонов.

В первом просмотре при определении числа дейтонов производились поиск и регистрации следов с плотностью ионизации примерно в 1,3 раза большей, чем у протонов и других быстрых частиц вторичного пучка [8]. Такие следы достаточно надежно выделяются среди множества релятивистских следов в слое и составляют заметную часть пучка вторичных частиц. Эффективность поиска и счета таких следов определялась при независимом просмотре одного из слоев двумя микроскопистами. По результатам измерений эффективность просмотра каждого из микроскопистов оказалась близкой к единице. Для найденных следов с целью отделения возможных фоновых событий от взаимодействия вторичного пучка с веществом по трассе канала строились распределения по плотности зерен и по углам относительно релятивистских следов как в плоскости фотослоя, так и по глубине. Оказалось, что фон пренебрежимо мал.

Во втором просмотре при поиске тритонов отбирались следы частиц с плотностью зерен больше, чем у дейтонов. При импульсе 2 ГэВ/с плотность зерен на следах тритонов примерно в 1,6 раза больше, чем у релятивистских частиц. Затем на найденных следах измерялась плотность зерен и плотность числа дельта-электронов. Полученная гистограмма распределения найденных следов по плотности зерен и числу дельта-электронов приведена на рис. 1. Там же указаны расчетные значения для этих величин, найденные в предположении, что треки являются дейтонами и тритонами. Расчет плотности зерен и числа дельта-электронов производился в соответствии с работами [8] и [9]. Видно, что часть найденных треков на самом деле являются дейтонами. Сравнение количества тритонов и дейтонов, найденных в двух просмотрах, показало, что во втором визуальном просмотре след дейтона с вероятностью примерно 0,5% воспринимался, как след тритона.

При импульсе канала $P_{\text{кан}} = 0,4$ ГэВ/с были измерены сечения образования дейтонов, тритонов, ядер гелия-3 и гелия-4 во взаимодействии протонов с энергией 70 ГэВ с ядрами Al и W. Так же, как и в предыдущем случае, просматривалась только часть фотоэмульсионного слоя. Полное число частиц в слое определялось пересчетом с учетом измеренных профилей пучка вторичных частиц.

При этом импульсе дейтоны, тритоны и ядра гелия имеют плотность зерен на своих следах в несколько раз большую, чем у релятивистских частиц и легко выделяются при просмотре фотослоев. При этом тритоны и ядра гелия-4 останавливаются в фотослоях. Дейтоны и ядра гелия-3 проходят фотослой без остановки. Треки каждого сорта визуально разделялись по плотности зерен на «серые» и «черные» следы. Для идентификации частиц каждого сорта на части треков, отобранных при просмотре, измерялась плотность числа дельта-электронов. Полученное распределение как для проходящих, так и останавливающихся частиц приведено на рис. 2. Там же указаны средние значения плотности числа дельта-электронов на следах, рассчитанных по формуле, приведенной в [9]. Видно, что группы частиц достаточно хорошо отделяются друг от друга.

Измеренные в проведенном эксперименте сечения образования дейтонов, тритонов и ядер гелия приведены в табл. 1. Значения сечений учитывают поправку на поглощение и выбывание вторичных частиц из пучка из-за взаимодействия с веществом мишени и по трассе канала. Максимальная поправка равнялась примерно 5% (Al, $P_{\text{кан}} = 0,4$ ГэВ/с). Ошибка измерений сечений, указанная в табл. 1, определяется статистикой, неточностью определения интенсивности протонного пучка ($\sim 10\%$) и неопределенностью вычисления светосилы спектрометра ($\sim 10\%$).

В табл. 1 для каждого значения сечения приведены также границы интервалов импульсов ядер, соответствующие их рождению на входной и выходной поверхности мишени и средние значения импульсов ядер в этих интервалах. Необходимые для их определения расчеты ионизационных потерь ядер в Al и W рассчитывались по формуле из работы [10].

Из табл. 1. видно, что сечения образования дейтерия, трития и гелия на тяжелой (W) мишени примерно на порядок больше, чем на легкой (Al). Аналогичную тенденцию имеют данные работ [11] и [12], в которых изучалось рождение дейтерия, трития гелия под большими ($30-90^\circ$) углами с импульсами 1—5 ГэВ/с в соударениях протонов с энергией 30 ГэВ с ядрами бериллия и алюминия.

Наблюдаемое увеличение сечений образования легких ядер на тяжелой мишени можно объяснить ростом полного сечения неупругого взаимодействия налетающего протона с ядром ($\sim A^{2/3}$) и большей развитостью адронного каскада в тяжелом ядре ($\sim A^{1/3}$) [1].

Заметим также, что значения сечений образования легких ядер малых импульсов под нулевым углом на алюминии при энергии 70 ГэВ примерно в 2—3 раза больше, чем при энергии 30 ГэВ под большими углами [12]. Это превышение при учете слабой зависимости энергии возбуждения ядра—мишени от энергии соударения в этом диапазоне наиболее естественно объяснить зависимостью сечения образования от угла (см. [1]).

Интересно рассмотреть также отношение сечений образования ядер разного сорта на вольфрамовой и алюминиевой мишенях. На рис. 3 это отношение приводится для сравнения вместе с данными работы [11]. Видно, что при импульсе частиц 2 ГэВ/с отношения сечений образования тритонов и дейтонов, а также дейтонов и протонов (использованы также данные работ [2, 3]), как для вольфрама, так и для алюминия, сравнимы с такими же отношениями для алюминиевой мишени, полученными в работе [1]. При импульсе 0,4 ГэВ/с отношение сечений образования тритонов и дейтонов резко увеличивается, достигая 0,3. При этом отношение дейтонов и протонов не увеличивается и остается практически постоянным. По-видимому, такое поведение отношения выходов тритонов и дейтонов является следствием того, что при импульсе 0,4 ГэВ/с имеется значительный вклад в сечение за счет испарительных процессов, и для тяжелых рождающихся ядер он больше, чем для легких [1].

В заключение авторы выражают благодарность Р.А. Рзаеву и В.П. Сахарову за помощь при проведении облучений. Нам приятно выразить также признательность С.С. Герштейну, И.И. Гуревичу и В.И. Котову за интерес к работе и стимулирующие обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С. Барашенков, В.Д. Тонеев. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. — М.: Атомиздат, 1972.
2. Л.М. Барков и др. ЯФ, 35, 1486, 1982.
3. Л.М. Барков и др. ЯФ, 37, 1232, 1983.
4. В.И. Котов и др. Труды VII Всесоюз. совещ. ускор. заряж. частиц. Дубна, 1981.
5. K.L. Brown et al. Preprint CERN 74-2, 1974.
6. С. Пауэлл и др. Исследование элементарных частиц фотографическим методом. — М.: 1962.

7. А. Бонетти и др. Ядерные фотоэмульсии. М.: Физматгиз, 1961.
8. В.В. Огурцов. Диссертация. М.: 1971.
9. Д. Ритсон. Экспер. методы в физике выс. энергий. М.: Наука, 1964.
10. R.M. Steinheimer et al. Phys. Rev., B3, 3681, 1971.
11. A. Schwarzschild et al. Phys. Rev., 129, 854, 1963.
12. V.L. Fitch et al. Phys. Rev., 126, 1849, 1962.

Таблица 1.

Сечения образования легких ядер $\frac{d^2\sigma}{dpd\Omega} \Big|_{0^\circ}$ (барн/ГэВ/с·стер·ядро) при среднем значении их импульса \bar{p} (ГэВ/с) или в интервале импульсов от p_{\min} до p_{\max} (ГэВ/с).

| $p_{\text{кан}}$ | Мишень | Величина | Дейтоны | Тритоны | Гелий-3 | Гелий-4 |
|------------------|--------|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0,4 | W | $\frac{d^2\sigma}{dpd\Omega} \Big _{0^\circ}$ | $(6,96 \pm 1,11) \cdot 10^{-2}$ | $(2,15 \pm 0,43) \cdot 10^{-2}$ | $(1,73 \pm 0,35) \cdot 10^{-2}$ | $(9,0 \pm 2,3) \cdot 10^{-3}$ |
| | | \bar{p} | 0,415 | 0,435 | 0,83 | 0,86 |
| | | p_{\min} | 0,40 | 0,40 | 0,80 | 0,80 |
| | | p_{\max} | 0,43 | 0,47 | 0,86 | 0,91 |
| | Al | $\frac{d^2\sigma}{dpd\Omega} \Big _{0^\circ}$ | $(6,52 \pm 1,11) \cdot 10^{-3}$ | $(2,02 \pm 0,42) \cdot 10^{-3}$ | $(1,75 \pm 0,37) \cdot 10^{-3}$ | $(3,58 \pm 1,43) \cdot 10^{-4}$ |
| | | \bar{p} | 0,49 | 0,59 | 0,98 | 1,10 |
| 2,0 | W | $\frac{d^2\sigma}{dpd\Omega} \Big _{0^\circ}$ | $(2,79 \pm 0,59) \cdot 10^{-2}$ | $(1,54 \pm 0,31) \cdot 10^{-3}$ | — | — |
| | | \bar{p} | 2,0 | 2,0 | — | — |
| | | p_{\min} | — | — | — | — |
| | | p_{\max} | — | — | — | — |
| | Al | $\frac{d^2\sigma}{dpd\Omega} \Big _{0^\circ}$ | $(2,01 \pm 0,40) \cdot 10^{-3}$ | $(6,68 \pm 1,80) \cdot 10^{-5}$ | — | — |
| | | \bar{p} | 2,0 | 2,0 | — | — |
| | | p_{\min} | — | — | — | — |
| | | p_{\max} | — | — | — | — |

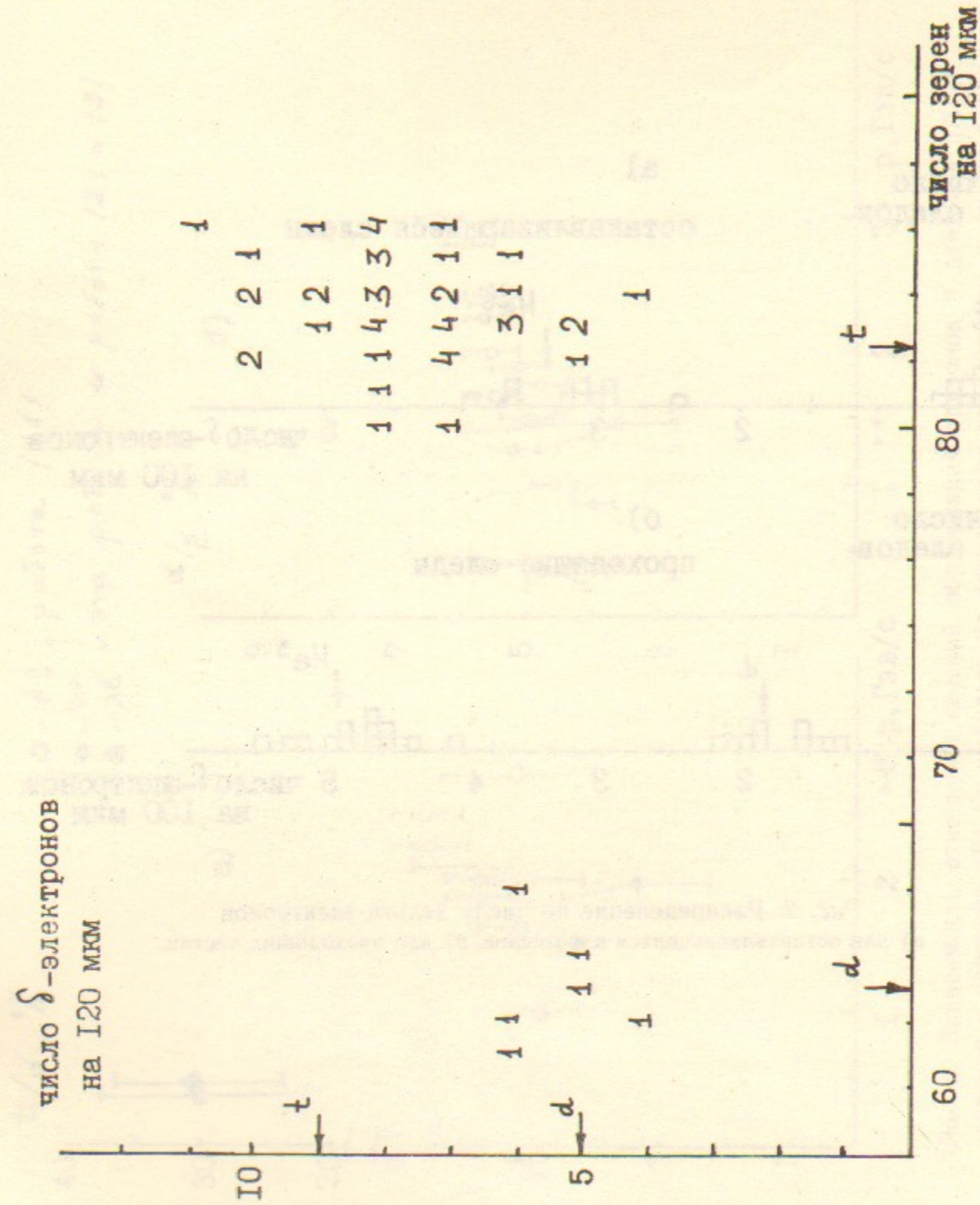


Рис. 1. Распределение отобранных при просмотре следов по плотности зерен и числу дельта-электронов. Импульс 2 ГэВ/с.

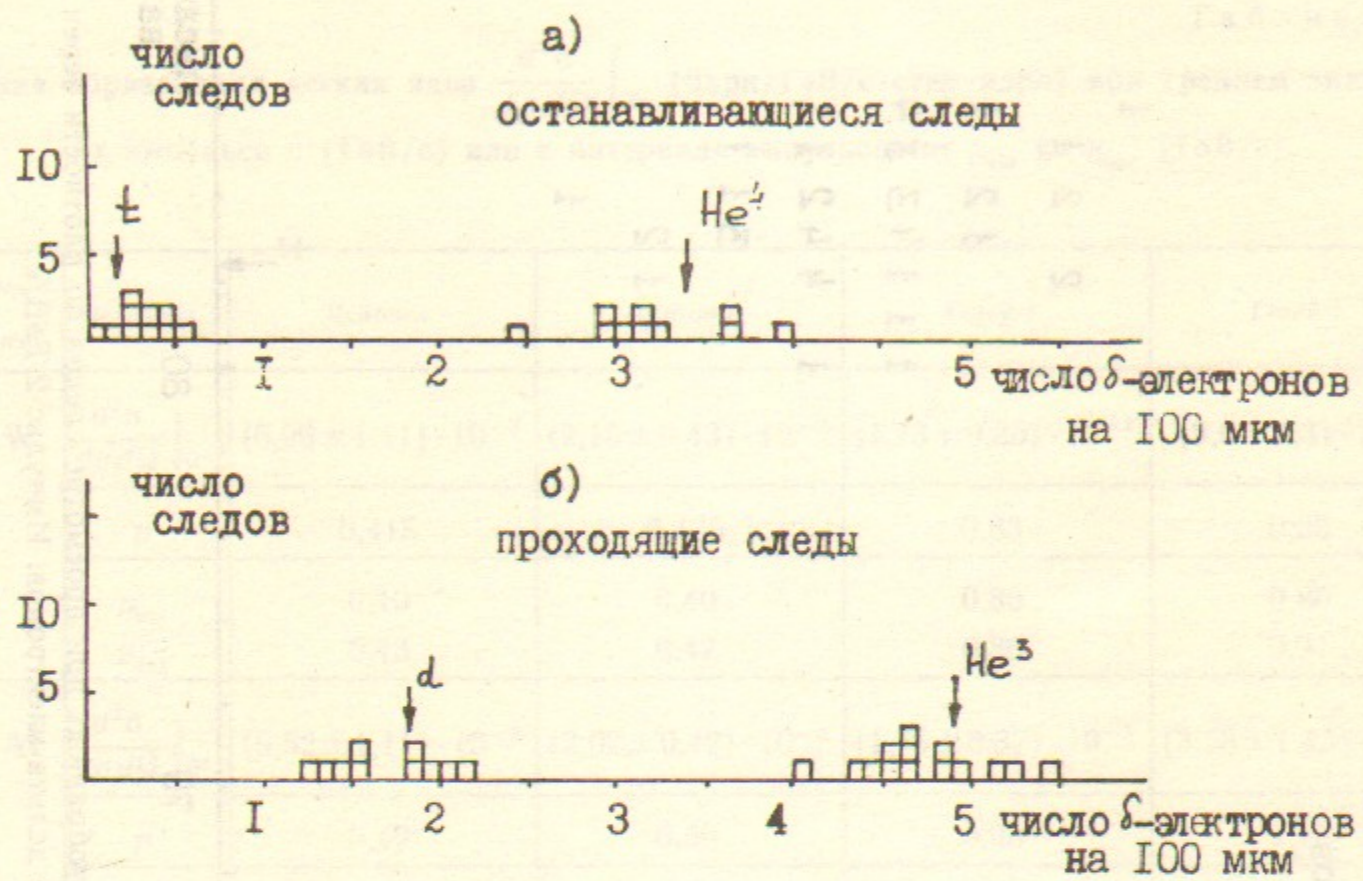


Рис. 2. Распределение по числу дельта-электронов
а) для останавливающихся в фотослое, б) для проходящих частиц.

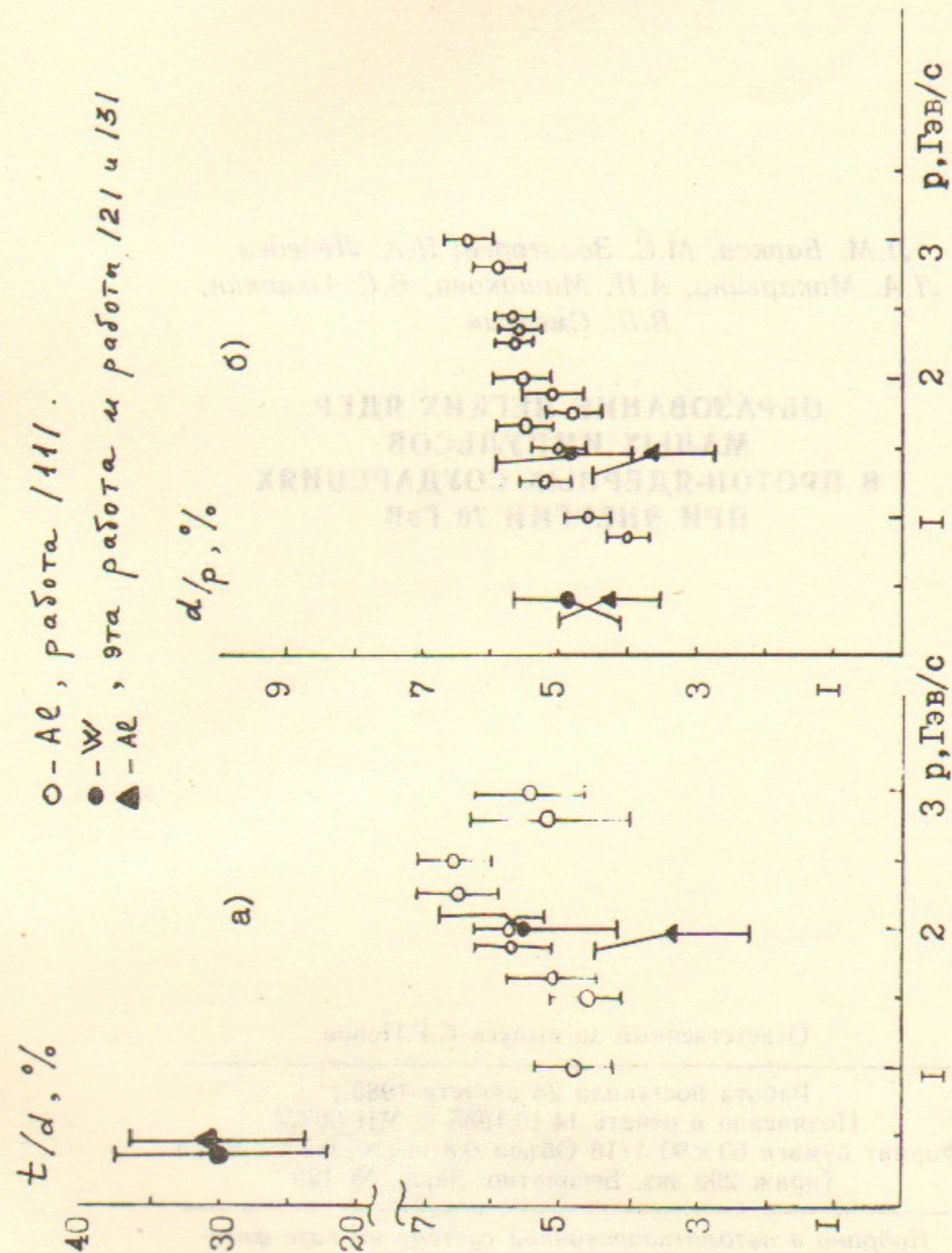


Рис. 3. Зависимость отношений сечений образования тритонов и дейтронов (А) и дейтронов и протонов (Б) от импульса по результатам этой работы, а также работ [2, 3] и работы [11].

*Л.М. Барксов, М.С. Золоторев, П.К. Лебедев,
Л.А. Макарына, А.П. Мишакова, В.С. Охапкин,
В.П. Смахтин*

**ОБРАЗОВАНИЕ ЛЕГКИХ ЯДЕР
МАЛЫХ ИМПУЛЬСОВ
В ПРОТОН-ЯДЕРНЫХ СОУДАРЕНИЯХ
ПРИ ЭНЕРГИИ 70 ГэВ**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 28 августа 1985 г.
Подписано в печать 14.10.1985 г. МН 06774
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0,8 печ.л., 0,7 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 129

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*