

И-379

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 6494

Нго Куанг Зуй

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
 $A(p,dN)B$ И $A(p,d\pi)B$
ПРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 670 МЭВ

Специальность - 040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

1 - 6494

Нго Куанг Зуй

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

$A(p,dN)B$ И $A(p,d\pi)B$

ПРИ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ 670 МЭВ

Специальность - 040 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук В.И. Петрухин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Г.А. Лексин

кандидат физико-математических наук Л.В. Краснов.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Московский инженерно-физический институт.

Автореферат разослан " " 1972 года

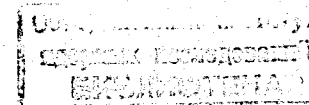
Защита диссертации состоится " " 1972 года на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

Ю.А. Батусов



Выяснение механизма прямых ядерных реакций является одной из важных задач ядерной физики. Особое место в этой проблематике занимают процессы квазиупругого рассеяния на ядрах ($p, 2p$), (p, dN), (p, N^3N) и т.п. Квазиупругое рассеяние протона на протоне ядра, — реакция ($p, 2p$) — достаточно хорошо изучена в области начальных энергий до 460 Мэв^{/1/}. Этот процесс оказался эффективным средством для изучения оболочечной структуры ядра. Более сложный процесс — рассеяние протона на двухнуклонных группах (p, dN) — дает информацию о более тонких деталях структуры ядра. Первое наблюдение и исследование этого процесса было выполнено в Дубне в 1957 году при энергии налетающих протонов 675 Мэв^{/2/} и повторено в Брукхейвене в 1967 году при энергии 1 Гэв^{/3/}. Анализ полученных экспериментальных данных позволил авторам^{/2,3/} сделать вывод о квазиупругом характере рассеяния налетающих протонов на квазидейтронных группах внутри ядра и получить некоторые характеристики квазидейтронных групп, такие, как их средняя энергия и энергия вырывания их из ядра. Что касается выбивания более сложных частиц из ядра протонами высоких энергий, то недавно в Дубне выполнена работа^{/4/}, в которой наблюдалось квазиупругое рассеяние протонов на трех- и четырехнуклонных ассоциациях в ядрах.

Экспериментальные результаты^{/1-4/} свидетельствуют о том, что механизм реакций выбивания в первом приближении одинаков для всех наблюдавшихся вторичных частиц. Ядерная реакция происходит таким образом, будто подструктуры из двух, трех и четырех нуклонов виртуально существуют в ядре, и взаимодействие налетающей частицы с ядром сводится в первом приближении к взаимодействию налетающей частицы с этими виртуальными ядерными подструкту-

рами. В этом представлении задача ядерного взаимодействия, являющаяся задачей многих тел, может быть рассмотрена как задача трех тел: налетающий протон взаимодействует с нуклонной ассоциацией и остальной частью ядра. Существует несколько методов для решения такой задачи. Одним из них является метод импульсного приближения с использованием плоских и искаженных волновых функций^{/1,5,6/}. В другом методе — дисперсионном или диаграммном^{/7,8/} — используются не волновые функции, а амплитуды реакций. Формализмом, отвечающим представлению о прямых процессах^{/7,8/}, являются фейнмановские диаграммы. Изучение прямых ядерных реакций сводится к отысканию особенностей фейнмановских диаграмм. В каждой области изменения кинематических переменных реакции рассматривается та диаграмма (или несколько диаграмм), которая выделена по сравнению с остальными положением своей особенности. Например, в ряде случаев прямой процесс хорошо описывается полусферой диаграммой, для которой область изменения кинематических переменных ограничена малыми передаваемыми импульсами.

Следует заметить, что в экспериментах^{/2-4/} был измерен лишь участок спектра легких ядер в высокоимпульсной области. Нами были выполнены измерения спектров дейтронов, ядер трития и гелия-3 при бомбардировке ряда ядер протонами с энергией 670 Мэв под несколькими углами к направлению первичного пучка в широкой области импульсов (700+1700 Мэв/с для дейтронов, 800-2000 Мэв/с для трития и 1100-2000 для гелия-3)^{/9-14/}. Помимо известного процесса квазиупругого рассеяния протонов на двух- и трехнуклонных группах, нами впервые наблюдался новый интенсивный канал реакций образования дейтронов с рождением π^- -мезонов. Настоящая диссертация посвящена исследованию механизмов образования быст-

рых дейтронов, испускаемых при взаимодействии протонов с энергией 670 Мэв с ядрами.

В главе I описывается постановка эксперимента. Схема опыта приведена на рис. 1. Выведенный из синхроциклотрона ОИЯИ пучок протонов с помощью квадрупольных линз К1 фокусировался на мишень. Вторичные частицы, испущенные из мишени под углом θ к направлению первичного пучка, выделялись коллиматором К1, анализировались с помощью магнита М по импульсу и, пройдя коллиматоры К2 и К3, попадали в регистрирующую аппаратуру. В условиях нашего эксперимента расходимость первичного пучка составляла $\sim \pm 0,5^\circ$, и разрешающая способность магнитного спектрометра $\frac{\Delta p}{p} = \pm 1,8\%$. Вторичные частицы регистрировались телескопом сцинтилляционных счетчиков $S_1 - S_4$, счетчики S_2 и S_4 , разнесенные на расстояние 5,6 м, служили "базовыми" для идентификации частиц по времени пролета. Спектрометр по времени пролета имел разрешение $2\tau = 0,9$ нсек^{/15/}. Типичный спектр по времени пролета вторичных частиц под углом $6,5^\circ$ показан на рис. 2. Процедура измерений сводилась к получению спектров вторичных частиц по времени пролета при различных значениях напряженности магнитного поля анализирующего магнита с мишенью и без мишени. Отсюда можно вычислить интенсивность выхода дейтронов с заданным значением импульса. При обработке дейтронных спектров учитывались поправки на просчеты регистрирующей аппаратуры, многократное рассеяние в мишени, в воздухе и в сцинтилляторах счетчиков. Диапазон импульсов, в котором проводились измерения, ограничен снизу значением $p = 700$ Мэв/с.

Одновременно с измерением импульсного спектра дейтронов от ядер в одинаковых экспериментальных условиях проводились измерения импульсного спектра дейтронов от реакции $p + p \rightarrow d + \pi^+$

Рис. 1. Схема опыта: КЛ - квадрупольная линза; K_1 , K_2 и K_3 - коллиматоры; М - магнит; $S_1 - S_7$ - спиртилляционные счетчики.

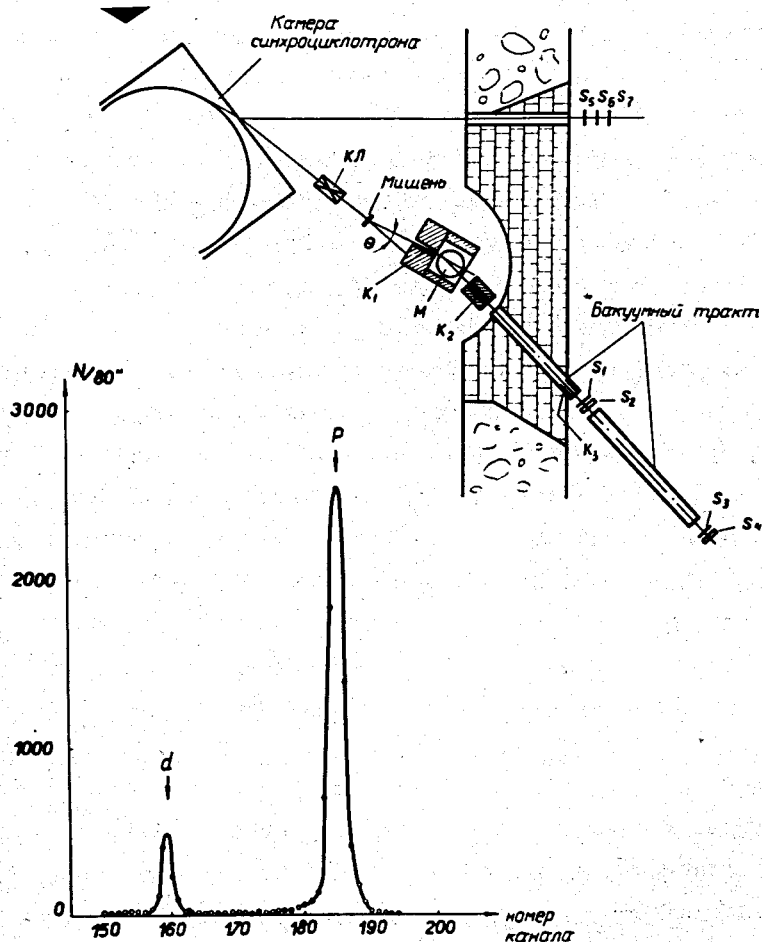
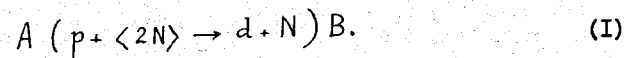


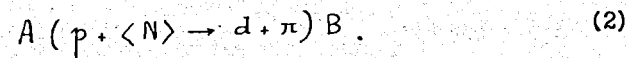
Рис. 2. Типичный спектр по времени пролета для вторичных частиц под углом $6,5^\circ$, $p = 1236$ Мэв/с. Левый пик обусловлен дейтронами, правый - протонами.

Результаты измерений реакций $p + p \rightarrow d + \pi^+$ на свободных протонах использовались для нахождения абсолютных значений дифференциальных сечений выхода дейтронов из ядер, а также служили для контроля калибровки импульсной шкалы.

В главе II изложены результаты измерений. Были получены импульсные спектры дейтронов, образуемых под углами $6,5^\circ$, $9,5^\circ$, $13,5^\circ$ и 16° к направлению первичного пучка при бомбардировке ядер H , D , Li^6 , Li^7 , C , Al , Cu , Rh и Pb протонами с энергией 670 Мэв. Значения толщин мишеней находились в интервале 1,2-1,8 г/см². На рис. 3 в качестве примера приведены импульсные спектры дейтронов, испускаемых под углами $6,5^\circ$, $9,5^\circ$, $13,5^\circ$ и 16° при взаимодействии протонов с ядрами углерода. Характерной особенностью спектра под углом $6,5^\circ$ (рис. 3а) является наличие двух пиков при значениях импульсов $p_d \approx 1600$ Мэв/с и $p_d \approx 1370$ Мэв/с. Пик при $p_d \approx 1600$ Мэв/с обусловлен квазиупругим рассеянием протонов на двухнуклонных ассоциациях в ядре, т.е. реакцией



Этот процесс наблюдался ранее в работах^{2,3/}. Пик в районе $p_d = 1370$ Мэв/с кинематически соответствует образованию дейтронов в реакции $p + \langle N \rangle \rightarrow d + \pi$ на связанных нуклонах ядра с вылетом дейтрона в с.ц.м. "вперед", т.е. реакцией



Пик, отвечающий реакции (2) с вылетом дейтронов в с.ц.м. "назад" (в районе импульса $p_d = 860$ Мэв/с), в спектре дейтронов не вы-

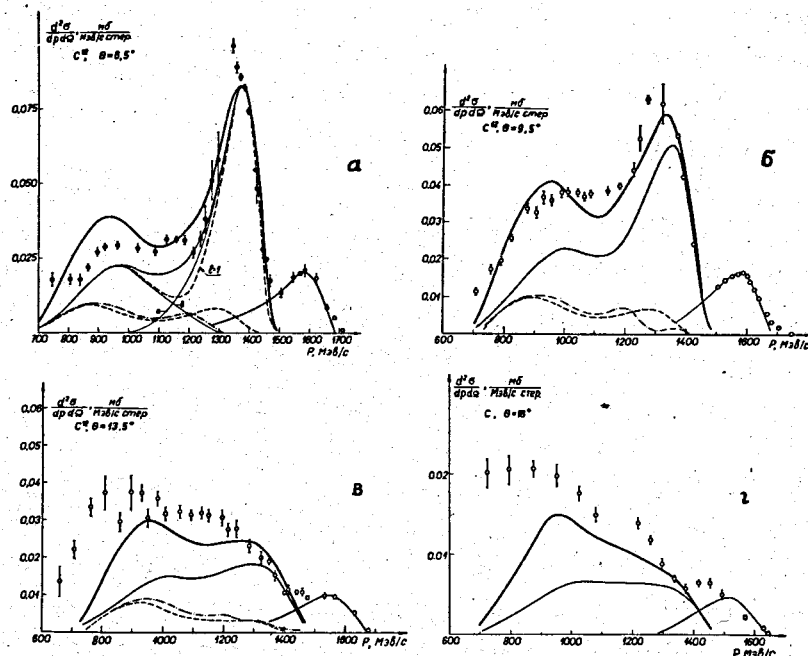


Рис. 3. Импульсные спектры дейтронов, образуемых при взаимодействии протонов с энергией 670 Мэв с ядром углерода под углами $6,5^\circ$, $9,5^\circ$, $13,5^\circ$ и 16° (рис. 3а, б, в, г соответственно).

Кривые на рисунках: результаты расчета по дисперсионной теории прямых ядерных реакций

- полюсная диаграмма
- полюсная + треугольная диаграммы
- - - - - треугольная диаграмма
- · - · - интерференция полюсной и треугольной диаграмм

Пунктирная кривая с индексом " $l=I$ " (рис. 3а) — полюсная диаграмма с учетом батлеровского формфактора ($l=I$).

деляется. Для углов вылета дейтронов $9,5^\circ$ (рис. 3б) в спектре дейтронов наблюдаются также два пика при $p_d \approx 1600$ Мэв/с и $p_d \approx 1300$ Мэв/с, отвечающие процессам (1) и (2) соответственно. По сравнению со спектром, измеренным под углом $6,5^\circ$, при $9,5^\circ$ наблюдаются уширение пика от реакции (2) и относительное увеличение вклада низкоимпульсных дейтронов. Это, по-видимому, обусловлено вкладом процесса перерассеяния π -мезонов, образующихся вместе с дейтронами в реакции $p + \langle N \rangle \rightarrow d + \pi$, на остаточном ядре. Этот механизм рассматривается в главе III. Для угла $13,5^\circ$, равного предельному углу испускания дейтронов в реакции $p + N \rightarrow d + \pi$ на свободных нуклонах при начальной энергии 670 Мэв, наблюдается широкий пик в низкоимпульсной области.

Для угла 16° , который больше предельного угла, импульсный спектр имеет вид монотонно спадающей с увеличением импульса дейтрона функции.

Для других ядер имеет место аналогичная ситуация. При этом для данного угла вылета дейтронов наблюдается относительное увеличение вклада низкоимпульсных дейтронов при увеличении массового числа ядра-мишени, что особенно заметно в случае тяжелых ядер (Cu, Rh и Pb). Последнее, по-видимому, обусловлено вкладом многочастичных, в том числе и каскадных процессов. В этой главе рассматриваются также угловые распределения дейтронов и зависимость от массового числа ядра-мишени дифференциальных сечений процессов (1) и (2). Значения $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ для обоих процессов монотонно падают примерно в 2 раза при увеличении угла от $6,5^\circ$ до 16° . При этом угловая зависимость сечения для процесса (1) подобна угловой зависимости сечения свободного p^d -рассеяния, тогда как поведение сечений реакции $p + N \rightarrow d + \pi$ на свобод-

ных и связанных нуклонах в рассматриваемой области углов различается. В частности, для реакции (2) не наблюдается подъема углового распределения вблизи предельного угла ($\theta_d \approx 13,5^\circ$), что имеет место в реакции $p + p \rightarrow d + \pi^+$. Зависимость от массового числа сечения обоих процессов хорошо описывается законом $\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim A^x$. Величина x для процесса (1) близка к значению $1/3$, для процесса (2) $x \approx 1/3$ в случае угла $6,5^\circ$ и растет до $x \approx 1/2$ с увеличением угла вылета до 16° .

Глава III посвящается теоретическому анализу полученных импульсных спектров дейтронов на основе дисперсионной теории прямых ядерных реакций^{7,8/}. Расчеты проводились с использованием полюсной и треугольной диаграмм^{II,12/}.

I. Реакция $p + A \rightarrow d + N + B$

Результаты расчета по полюсной диаграмме (рис. 4) с фактором, равным константе, для ядра углерода и углов $6,5^\circ$; $9,5^\circ$; $13,5^\circ$ и 16° , показаны на рис. 3. Расчетные кривые нормировались по экспериментальному спектру при импульсе ~ 1600 Мэв/с. Из рис. 3 видно, что теоретические кривые неплохо описывают экспериментальные данные для углерода. Для других ядер получено также хорошее согласие теории с экспериментом^{II/}.

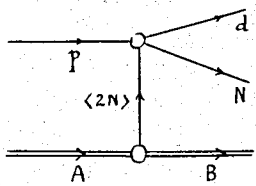


Рис. 4. Полюсная диаграмма реакции $A(p + \langle 2N \rangle \rightarrow d + N)B$

Аналогичные расчеты проводились и с учетом батлеровского фактора^{II/}. Сравнение спектров дейтронов, вычисленных с учетом фактора, с экспериментальными позволяет получить дейтронные приведенные ширины Θ_d^2 (в условиях нашего эксперимента они имеют смысл полных приведенных ширин). Значения приведенных ширин, вычисленные при углах $6,5^\circ$, $9,5^\circ$ и $13,5^\circ$, для углерода, составляют $4,4 \pm 0,8$, $4,6 \pm 0,9$ и $3,4 \pm 0,7$ соответственно. Полученные нами значения приведенных ширин согласуются в пределах ошибок с известными значениями $3,8 \pm 1,0$ и $2,7 \pm 0,7/16/$.

2. Реакция $p + A \rightarrow d + \pi + B$

Результаты расчетов по полюсной диаграмме (рис. 5а) для ядра углерода и углов $6,5^\circ$, $9,5^\circ$, $13,5^\circ$ и 16° , выполненных без учета фактора и в предположении, что конечное ядро находится в основном состоянии, показаны на рис. 3. Расчетные кривые нормировались к экспериментальному спектру для угла $6,5^\circ$ при импульсе ~ 1370 Мэв/с. Как видно из рис. 3а, при $\theta_d = 6,5^\circ$, расчетная кривая неплохо описывает экспериментальные данные. При том же угле для более тяжелых ядер согласие теории с экспериментом наблюдается только в области пика при импульсе ~ 1370 Мэв/с,

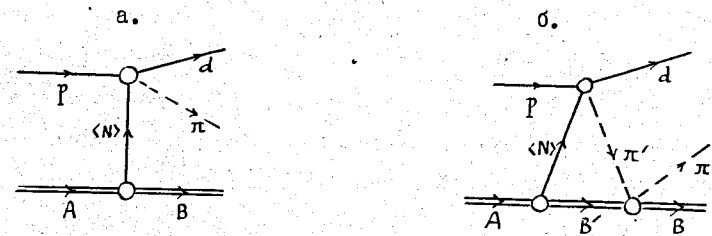


Рис. 5. Полюсная и треугольная диаграммы реакции $A(p + \langle N \rangle \rightarrow d + \pi)B$

в низкоимпульсной области расчетные кривые проходят ниже экспериментальных точек, причем это различие растет с увеличением массового числа ^{/II/}. Расчетные кривые для углов 9,5°, 13,5° и 16° (рис. 3б, в, г) систематически проходят ниже экспериментальных точек, особенно это заметно в случае более сложных ядер ^{/II/}.

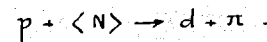
На рис. 3а показан результат расчета с учетом фактора (l = I) для углерода при $\theta_d = 6,5^\circ$. Аналогичные расчеты с учетом фактора дают возможность оценить протонные приведенные ширины для исследуемых ядер. Полученные значения ^{/II/} протонных приведенных ширин находятся в согласии с известными для легких ядер (D, Li, C) данными ^{/I7, I8/}.

Для того чтобы улучшить описание импульсных спектров дейтронов под большими углами, были проведены расчеты, учитывающие эффект перерассеяния π -мезонов на остаточном ядре. Вычисления производились на основе треугольной диаграммы рис. 5б. На рис. 3б и 3в показаны расчетные кривые для углерода при $\theta_d = 9,5^\circ$ и $13,5^\circ$. Видно, что учет перерассеяния π -мезона на остаточном ядре приводит к лучшему описанию экспериментальных данных. В обоих случаях вклад, обусловленный эффектом перерассеяния, составляет заметную величину (от 10% до 50% суммарного спектра дейтронов в низкоимпульсной области), тогда как для угла $\theta_d = 6,5^\circ$ (рис. 3а) эффект перерассеяния не играет существенной роли. Импульсные спектры дейтронов от дейтерия и лития также неплохо воспроизводятся в рамках этой модели ^{/II/}. Что касается более тяжелых ядер (Al, Cu, Rn, Pb), то даже с учетом эффекта перерассеяния расчетные кривые остаются ниже экспериментальных точек. Как уже отмечалось выше, здесь следует считаться с вкладом многочастичных процессов.

В эксперименте использовалась система связи с ЭВМ "Минск-22", при помощи которой производилась предварительная обработка результатов эксперимента и их запись на магнитную ленту. При обработке данных и проведении теоретических расчетов использовались ЭВМ БЭСМ-4 и БЭСМ-6. Некоторые математические детали расчетов приведены в приложениях А и Б. Основные результаты, изложенные в диссертации, сводятся к следующему:

1. При помощи магнитного спектрометра с разрешающей способностью по импульсу $\frac{\Delta p}{p} = \pm 1,8\%$ и спектрометра по времени пролета с временным разрешением $2\tau = 0,9$ нсек измерены спектры дейтронов, испускаемых под углами от $6,5^\circ$ до 16° к направлению первичного пучка при бомбардировке ядер (от дейтерия до свинца) протонами с энергией 670 Мэв. Спектры измерены в широкой области импульсов дейтронов от 700 Мэв/с до 1700 Мэв/с.

2. Помимо известного процесса квазиупругого рассеяния протонов на двухнуклонных группах в ядре $p + \langle 2N \rangle \rightarrow d + N$, обнаружен новый интенсивный канал реакций образования дейтронов с рождением π -мезонов на отдельных нуклонах ядра:



3. Изучено угловое распределение дейтронов. Получено, что дифференциальные сечения $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ для процессов $p + \langle 2N \rangle \rightarrow d + N$ и $p + \langle N \rangle \rightarrow d + \pi$ монотонно падают примерно в два раза при увеличении угла вылета дейтронов от $6,5^\circ$ до 16° .

4. Зависимость от массового числа ядра-мишени дифференциальных сечений обоих процессов хорошо описывается законом $\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim A^x$, где $x \approx 1/3$ для процесса $p + \langle 2N \rangle \rightarrow d + N$, для процесса $p + \langle N \rangle \rightarrow d + \pi$ $x \approx 1/3$ при угле $6,5^\circ$ и растет до $x \approx 1/2$ с увеличением угла до 16° .

Проведен теоретический анализ полученных импульсных спектров дейтронов на основе дисперсионной теории прямых ядерных реакций. Расчеты проводились с использованием полюсной и треугольной диаграмм. Результаты расчета показывают, что:

5. Процесс $p + \langle 2N \rangle \rightarrow d + N$ достаточно хорошо описывается полюсной диаграммой для исследованных углов и ядер.

6. Для процесса $p + \langle N \rangle \rightarrow d + \pi$ при угле вылета дейтронов $6,5^\circ$ главную роль играет полюсной механизм, а в случае больших углов ($9,5^\circ$ и $13,5^\circ$) большой вклад (до 50%) вносит эффект виртуального перерассеяния π - мезона на остаточном ядре.

7. Получены протонные и дейтронные приведенные ширины для исследованных нами ядер. Наши результаты согласуются с данными о приведенных ширинах, полученными другими авторами для некоторых из исследованных нами ядер (D, Li, C)/16-18/.

Материал, положенный в основу диссертации, опубликован в работах/10-12/ и докладывался на III Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Нью-Йорк, сентябрь 1969 г.) и IV международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Дубна, сентябрь 1971 г.), а также на научных семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (Дубна), института теоретической и экспериментальной физики (Москва) и Физического института АН СССР (Москва).

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Jacob, Th. A. J. Maris. Rev. Mod. Phys. 38, 121 (1966).
2. Л. С. Ажгирей, И. К. Взоров, В. П. Зрелов, М. Г. Мещеряков, Б. С. Неганов, А. Ф. Шабудин. ЖЭТФ 33, 1185 (1957).
3. R. J. Sutter, J. L. Friedes, H. Palevsky, G. W. Bennet, C. J. Igo, W. D. Simpson, G. C. Phillips, D. M. Corley, N. S. Wall, P. L. Stearns. Phys. Rev. Lett. 19, 1189 (1967).
4. В. И. Комаров, Г. Е. Косарев, О. В. Савченко. ЯФ II, 711 (1970).
5. V. V. Balashov, A. N. Boyarkina and J. Rotter. Nucl. Phys. 52, 417 (1964).
6. В. Г. Неудачин, Ю. Ф. Смирнов. Нуклонные ассоциации в легких ядрах. "Наука", 1969.
7. И. С. Шапиро. Теория прямых ядерных реакций. Госатомиздат, 1963.
8. И. С. Шапиро. УЭН, 92, 549 (1967).
9. Л. С. Ажгирей, З. В. Крумштейн, Нго Куанг Зуй, В. И. Петрухин, Д. М. Хазинс, З. Цисек. ЯФ 13, 6 (1971).
10. L. S. Azghirey, Z. V. Krumstein, Yu. P. Merekov, Z. Moroz, Ngo Quang Zui, V. I. Petrukhin, A. I. Ronzhin, D. M. Khazins and Z. Cisec. Proc. of III Int. Conf. on High Energy Physics and Nuclear Structure, New York, Sept. 1969. (см. доклад V. P. Dzhelelov, p. 278)
11. Л. С. Ажгирей, О. Д. Далькаров, З. В. Крумштейн, Ю. П. Мереков, З. Мороз, Нго Куанг Зуй, В. И. Петрухин, А. И. Ронжин, Г. А. Шелков, З. Цисек. Тезисы IV межд. конф. по физике высоких энергий и структуре ядра. Дубна, 1971, стр. 51. Препринт ОИЯИ Р1-6308, Дубна (1972).
12. О. Д. Далькаров, Нго Куанг Зуй. Сообщение ОИЯИ Р2-6325, (1972).

13. Б.Ю.Балдин, Л.С.Вертоградов, В.Клюге, П.Конц, Э.В.Круммштейн, Ю.П.Мереков, Нго Куанг Зуй, В.И.Петрухин, Д.Позе, Л.Поч, А.И.Ронжин, Г.А.Шелков, Э.Цисек. Тезисы IV межд. конф. по физике высоких энергий и структуре ядра. Дубна, 1971 (стр.52).
14. Б.Ю.Балдин, В.А.Васильев, Л.С.Вертоградов, В.Клюге, Э.В.Круммштейн, Ю.П.Мереков, Нго Куанг Зуй, В.И.Петрухин, Д.Позе, Л.Поч, А.И.Ронжин, Г.А.Шелков, Э.Цисек. Тезисы IV межд. конф. по физике высоких энергий и структуре ядра, Дубна, 1971 (стр. 53).
15. В.Г.Лапшин, В.И.Петрухин, Д.М.Хазинс, Э.Цисек. ПТЭ № 6, 48 (1968).
16. В.С.Борисов, Г.К.Бышева, Л.Л.Гольдин, Л.Н.Кондратьев, Н.Я.Сморodinская, Г.К.Туманов. Письма в ЖЭТФ 9, 667 (1969).
17. M.H. Macfarlane, J.V.French. Rev.Mod.Phys. 32, 567 (1960).
18. В.М.Колыбасов, Н.Я.Сморodinская. ЯФ 5, 777 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июня 1972 г.