

X-187

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1 - 9398

ХАМРАЕВ
Фархад Шарипович

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $PD \rightarrow PPN$
ПРИ ЭНЕРГИИ 650 МЭВ

Специальность 01.04.01. - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1975

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

доктор физ.-мат. наук Б.М.Головин,
кандидат физ.-мат. наук Т.М.Муминов.

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук Р.М.Лебедев,
кандидат физ.-мат. наук С.Б.Нурушев.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Ленинградский институт ядерной физики АН СССР.

Автореферат разослан "___" _____ 197 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1976 г.
на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем
ОИЯИ, Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛЯП ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физ.-мат. наук

Ю.А.Батусов.

1 - 9398

ХАМРАЕВ
Фархад Шарипович

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $PD \rightarrow PPN$
ПРИ ЭНЕРГИИ 650 МЭВ

Специальность 01.04.01. - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

В настоящее время в результате исследований, осуществленных в ряде лабораторий, можно считать достаточно хорошо установленными основные характеристики упругого NN -рассеяния при энергиях вплоть до ~ 700 МэВ. Много известно и о взаимодействии нуклонов с ядрами, хотя экспериментальные данные об этих процессах значительно менее точны и подробны.

Исследования взаимодействия нуклонов с простейшим ядром — дейтроном представляет интерес с нескольких точек зрения.

Прежде всего, дейтрон является слабо связанной системой и поэтому образующие его протон и нейтрон в среднем находятся друг от друга на расстояниях, значительно превышающих область эффективного действия ядерных сил. Это обстоятельство дает основание считать нуклоны в дейтроне почти "свободными" и использовать его в качестве замены отсутствующей пока мишени, содержащей свободные нейтроны. Другими особенностями Nd -взаимодействия, привлекающими экспериментаторов к изучению этой проблемы, являются: возможность (по крайней мере, в принципе) определить характеристики NN -взаимодействия вне энергетической поверхности и возможность проверить некоторые представления о взаимодействии налетающей частицы с простейшей составной системой. Немалый интерес вызывает и дальнейшее изучение структуры дейтрона.

Одним из представлений о взаимодействиях частиц достаточно высоких энергий с дейтронами является модель многократных перерассеяний налетающей частицы на нуклонах этого ядра. Учет взаимодействия нуклонных пар в конечном состоянии является, по существу, способом описания той же модели. В области энергий $200 < T_p < 1000$ МэВ экспериментальные данные о реакции $pd \rightarrow pnp$ очень бедны. Это побудило нас провести цикл расчетно-теоретических и экспериментальных исследований указанной реакции при энергиях налетающих протонов $600 + 650$ МэВ.

Настоящая диссертация посвящена расчетно-теоретическому и экспериментальному исследованиям эффектов NN -перерассеяний в механизме реакции $pd \rightarrow pnp$ в указанной области энергий. Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Основные результаты опубликованы в работах [I+II] и докладывались на научных семинарах ЛЯП, ЛВГА ОИЯИ, на научных сессиях ОЯФ АН СССР (Тбилиси, 1972 г., Ленинград, 1974 г.). Диссертация состоит из введения, двух частей и заключения.

В первой части диссертации проводятся теоретический анализ и расчеты сечений реакции $pd \rightarrow ppp$ при промежуточных энергиях.

В §1 излагаются основные представления теории многократного рассеяния Ватсона^{/12/} и приводятся формулы для расчета сечений и поляризационных характеристик реакции $pd \rightarrow ppp$ с учетом одно- и двукратных NN -рассеяний, а также взаимодействия нуклонных пар в конечном состоянии (ВКС) как после однократных, так и после двукратных NN -рассеяний.

Следует отметить, что теория многократного рассеяния была впервые применена к анализу реакции $pd \rightarrow ppp$ при $T_0 = 150$ МэВ в работе^{/13/}, где указано на значительную роль этих процессов при больших углах рассеяния. Учет эффектов ВКС после однократных NN -рассеяний был проведен при анализе экспериментальных данных о pd -взаимодействии при энергии налетающих протонов 150 МэВ^{/14/}, 200 МэВ^{/15/} и 585 МэВ^{/16/}. Во всех случаях учет ВКС заметно улучшал согласие расчетных и экспериментальных данных.

Эффекты ВКС после двукратных NN -рассеяний, насколько нам известно, в литературе не рассматривались, хотя можно ожидать их существенного вклада при тех кинематических условиях, когда двукратные NN -рассеяния играют преобладающую роль. Это послужило поводом для проведения расчетов сечений реакции $pd \rightarrow ppp$ с учетом:

- спиновой структуры амплитуд NN -рассеяний,
- D -состояния дейтрона,
- одно- и двукратных NN -рассеяний,
- взаимодействия протона и нейтрона в конечном состоянии как после однократного, так и после двукратного NN -рассеяния.

Как было показано нами в работе^{/1/}, дифференциальное сечение реакции $pd \rightarrow ppp$ можно записать в виде:

$$\frac{d^3\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dT} = \frac{|\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2|}{16(2\pi)^2 |\vec{k}| E_c(\vec{p}_1 - \vec{p}_2)} S_p(M_{pd} \rho_{in} M_{pd}^+), \quad (1)$$

где \vec{p}_0 - импульс падающего протона, $E_c(\vec{p}) = (m(E+m)/2)^{1/2}$, E - полная энергия частицы, ρ_{in} - матрица плотности начального спинового состояния pd -системы, m - масса нуклона, M_{pd} - амплитуда pd -рассеяния:

$$M_{pd} = M_1 + M_2 + M_3 - M_4 + M_5 + M_6. \quad (2)$$

Перед четвертым слагаемым в (2) стоит знак минус, что обеспечивает антисимметризацию конечного состояния по тождественным частицам^{/13/}.

Члены M_1 и M_2 , входящие в (2), учитывают однократные NN -рассеяния и имеют вид:

$$M = 16\pi E_c(\vec{p}_0) \Phi_0(\vec{p}) f_{pN},$$

где $\Phi_0(\vec{p})$ - волновая функция дейтрона в импульсном представлении, f_{pN} - амплитуда свободного pN -рассеяния.

Члены $M_3 + M_6$ учитывают двукратные NN -рассеяния и представляются выражениями типа

$$M = 16 \sqrt{2\pi} i \frac{E_c(\vec{p}) \cdot E_c(\vec{k})}{|\vec{k}| m} \mathcal{J}(\vec{p}) f_{pN} f_{NN},$$

где \vec{k} - вектор, построенный из импульсов начальной и конечных частиц,

$$\mathcal{J}(\vec{p}) \sim \int_0^\infty \Phi_0(x) e^{i\alpha x} dx,$$

здесь α - величина, зависящая от импульсов участвующих в реакции нуклонов.

При учете ВКС волновую функцию взаимодействующих пар нуклонов следует представить в виде возмущенной волны Ψ_f . В качестве Ψ_f можно взять, например, функцию типа Мигдала-Ватсона^{/17,18/}, которую можно записать в виде суммы плоской волны и волновых функций синглетного и триплетного состояний, описывающих только взаимодействие нуклонов в конечном состоянии:

$$\Psi_f = (2\pi)^{-3/2} e^{-i\vec{k}\vec{r}} + {}^s\Psi + {}^t\Psi.$$

В §2 описывается программа расчета основных характеристик реакции $pd \rightarrow ppp$ при промежуточных энергиях^{/4/}. Программа позволяет вычислять дифференциальное сечение реакции, поляризацию любого из нуклонов в конечном состоянии и такие поляризационные параметры, как D_{pp} , K_{pp} и C_{pp} . При численных расчетах в качестве волновой функции дейтрона была использована функция Мак Ги^{/19,20/}. Амплитуды свободного NN -рассеяния брались из работы^{/21/}.

В §3 приводятся результаты выполненных нами расчетов и их сравнение с экспериментальными данными.

При промежуточных энергиях ($200 < T < 1000$ МэВ) реакция $pd \rightarrow ppp$ исследовалась лишь в двух работах^{/16,22/}, относящихся к энергии 585 и 600 МэВ. На рис.1 приведены результаты измерений сечения $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT$ в симметричной кинематике ($\Theta_1 = \Theta_2$, $T_1 = T_2$) при $T_0 = 600$ МэВ^{/22/}. На этом рисунке приведены также результаты расчетов, выполненных нами, и расчетов авторов работы^{/22/}. Как видно из рис.1, использованное нами приближение хорошо описывает экспериментальные данные во всем исследуемом диапазоне энергий.

дованном интервале углов. При сравнении результатов расчетов с экспериментальными данными по измерению сечения $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dP$ при $T_0 = 585$ МэВ и $\theta_1 = 41^\circ$, $\theta_2 = 61^\circ$ /16/ отмечено, что использованное нами приближение лучше описывает результаты измерений, чем приближение, использованное авторами работы /16/. Некоторые количественные расхождения между экспериментальными данными и нашими расчетами, возможно, связаны с тем, что использованный нами формализм не учитывает эффекты "подхвата" налетающей частицей одного из нуклонов дейтрона, которые при этих условиях могут играть заметную роль.

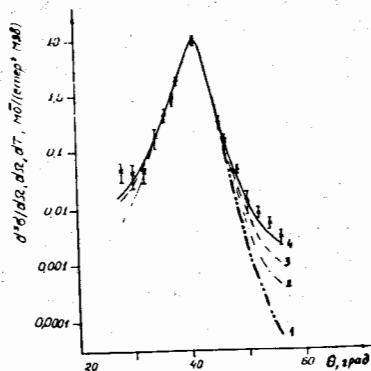


Рис.1 Спектр протонов от реакции $pd \rightarrow ppp$ в симметричной кинематике при $T_0 = 600$ МэВ. Экспериментальные данные взяты из работы /22/. Кривая 1-расчеты авторов работы /22/; 2-наши расчеты в приближении "а" и "в" (см.стр.2); 3-то же в приближ. "а" + "в"; 4-то же в приближ. "а" + "г"

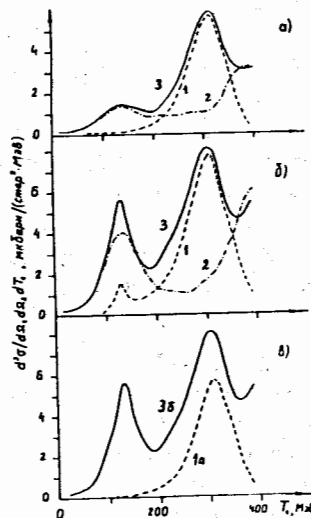


Рис.2 Спектр протонов от реакции $pd \rightarrow ppp$ при $T_0 = 650$ МэВ, $\theta_1 = \theta_2 = 50^\circ$. Кривая 1-учет только однократных NN -рассеяний, Кривая 2-учет только двукратных NN -рассеяний, Кривая 3-совместный учет одно- и двукратных NN -рассеяний. а)-без учета ВКС, б)-с учетом ВКС, в)-сравнение кривых 1а и 3б.

Расчитанные нами спектры протонов-продуктов реакции $pd \rightarrow ppp$ при энергии 650 МэВ и $\theta_1 = \theta_2 = 50^\circ$ л.с. приведены на рис.2. Из этого рисунка можно заключить, что существуют такие кинематические условия, когда однократные и двукратные NN -рассеяния формируют в основном различные участки энергетического распределения конечных частиц. Учет ВКС после двукратного NN -рассеяния приводит к тому, что результирующее сечение может стать в несколько раз больше сечения, связанного с ВКС после однократного NN -рассеяния.

В §4 изложены выводы из проведенных теоретико-расчетных исследований и высказываются соображения о проведении экспериментальных исследований спектра протонов-продуктов реакции $pd \rightarrow ppp$ с целью выявления эффектов перерассеяния нуклонов в pd -системе.

Вторая часть диссертации, состоящая из трех глав, посвящена экспериментальному исследованию реакции $pd \rightarrow ppp$ при энергии 650 МэВ.

В первой главе приводится общее описание экспериментальной установки и ее связи с ЭВМ. Схема установки приведена на рис.3. Она

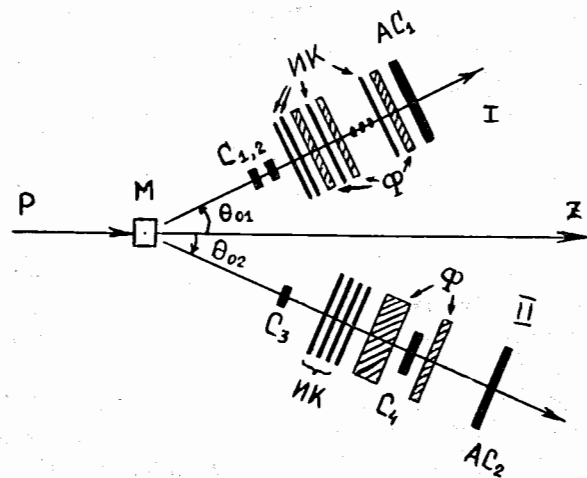


Рис.3 Схема экспериментальной установки для исследования реакции $pd \rightarrow ppp$.

содержит две группы проволочных искровых камер, запуск которых производится сцинтилляционными счетчиками C_1+C_4 , включенными на совпадения и регистрирующими заряженные частицы, вылетающие из мишени. Телесные углы, перекрываемые счетчиками первого направления (C_1, C_2) и второго направления (C_3, C_4) имели значения $\Delta\Omega_1 = 4,4 \times 10^{-3}$ стерад и $\Delta\Omega_2 = 2,5 \times 10^{-3}$ стерад. Счетчики AC_1 и AC_2 включались на антисовпадения со счетчиками C_1+C_4 . Между искровыми камерами первого направления могли устанавливаться фильтры из алюминия или меди, длины на пробеге частиц в которых использовалась для определения их энергии. На втором направлении две группы фильтров помещались соответственно между счетчиками C_3+C_4 и между счетчиками C_4+AC_2 . Подбирая толщину этих фильтров, мы могли выделить среди частиц, летящих по второму направлению, такие частицы, пробег которых лежит в заданном интервале. Искровые камеры этого направления использовались для определения углов вылета частиц.

Информация с искровых камер считывалась электронным устройством, перекодировалась и записывалась на анализатор АИ-4096. Накопленная в АИ-4096 информация по линиям связи передавалась на ЭВМ НР-2И16С или Минск-22, где частично обрабатывалась в режиме "На линии" и записывалась на магнитную ленту для последующего анализа.

Во второй главе описывается математическое обеспечение экспериментального исследования реакции $pd \rightarrow ppp$. Программы математического обеспечения реализованы на ЭВМ Минск-22, НР-2И16С и БЭСМ-6.

Программы отладочного режима^{/8/} и текущего контроля^{/9/} за работой установки написаны для ЭВМ Минск-22 и НР-2И16С. С помощью этих программ определяются эффективность, пространственное разрешение и востановочные поправки искровых камер, точность определения координат искрового пробоя, загрузка камер. Производится также визуализация треков частиц на экране дисплея ЭВМ НР-2И16С и осциллографической трубки АИ-4096.

Программа обработки данных (ISKAM)^{/10/} реализована на ЭВМ БЭСМ-6. С помощью программы ISKAM определяются: пространственные углы ($\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2$) прямых, аппроксимирующих треки частиц, кратчайшее расстояние между этими прямыми (d), которое может быть использовано для определения принадлежности зарегистрированных треков одному и тому же акту рассеяния, расстояние от начала координат

(геометрический центр мишени) до точки реакции (R), которое может быть использовано для выделения фоновых, не летящих из мишени частиц, а также квадрат недостающей массы

$$m^2 = (E_0 + M - E_1 - E_2)^2 - (\vec{p}_0 - \vec{p}_1 - \vec{p}_2)^2,$$

где E_0, E_1, E_2 - полные энергии налетающей частицы, первой и второй регистрируемых частиц соответственно; $\vec{p}_0, \vec{p}_1, \vec{p}_2$ - импульсы тех же частиц; M - масса ядра мишени.

Опробование программы ISKAM и получение некоторых, полезных для дальнейшей работы характеристик экспериментальной системы было выполнено на основе математического моделирования работы установки. Для этого задавались исходные данные: геометрия установки, материал и толщина фильтров между искровыми камерами, определенные опытным путем пространственные разрешения искровых камер, их эффективности, вероятность появления ложных искр на треке. Программа математического моделирования (MODEL)^{/10/} на основе метода Монте-Карло генерирует треки частиц и их энергии (с учетом кинематики реакции), разыгрывает смещения искровых пробоев от точек пересечения треков с плоскостями камер в соответствии с пространственными разрешениями последних, имитирует эффекты несрабатывания камер или появления ложных пробоев на продолжении трека. Полученные числовые данные (имитация событий) обрабатываются программой ISKAM. Найденные при этом характеристики треков сравниваются с их значениями, заданными при моделировании. Такое сравнение позволяет оценить погрешности в определении величин $\theta_1, \varphi_1, \theta_2, \varphi_2, d, R, m^2$.

Следует отметить, что большинство программ математического обеспечения может быть использовано для исследования любых реакций с регистрацией одной или двух заряженных частиц проволочными искровыми камерами.

В третьей главе описывается экспериментальное исследование реакции $pd \rightarrow ppp$ при энергии около 650 МэВ. Приводятся результаты измерений спектра протонов, дифференциальных сечений $d^2/d\Omega_1 d\Omega_2$ и $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT$. Здесь же проводится анализ экспериментальных данных и их сопоставление с предсказаниями теории.

На основе проведенных расчетно-теоретических работ задача экспериментального исследования реакции $pd \rightarrow ppp$ сформулирована

как изучение такой области спектра протонов, где сечение формируется в основном за счет эффектов двукратных NN -рассеяний и ВКС после таких перерассеяний. Показано, что с этой точки зрения наиболее подходящими являются углы вылета протонов, близкие к 50° . В этом случае эффекты перерассеяний нуклонов основной вклад дают в ту область энергетического распределения вторичных протонов, где они имеют энергию 100 ± 200 МэВ.

Эксперименты проводились на пучке протонов синхротрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, имеющих энергию около 650 МэВ. Работа установки испытывалась при регистрации протонов от упругого pp -рассеяния (мишень CH_2). Обработка полученных данных по программам математического обеспечения дала среднее значение угла разлета протонов $\theta_1 + \theta_2 = 82^\circ \pm 0,5^\circ$ и разность азимутальных углов $\varphi_2 - \varphi_1 = 180^\circ \pm 1,5^\circ$. Это хорошо согласуется с ожидаемыми величинами $(\theta_1 + \theta_2)_{\text{ожд.}} = 81,6^\circ$, $(\varphi_2 - \varphi_1)_{\text{ожд.}} = 180^\circ$. При испытании установки было найдено, что эффективность искровых камер лежит в интервале (95+99%), а их пространственное разрешение - в интервале $\sigma_x = (0,33 \pm 0,50)$ мм, $\sigma_y = (0,44 \pm 0,62)$ мм.

Измерение спектра протонов.

При измерениях использовались мишени CD_2 и C . Общий вид спектра протонов от pd -соударений при $T_0 = 650 \pm 1$ МэВ, $\theta_1 = 50^\circ \pm 2^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$ приведен на рис. 4А. В связи с тем, что наиболее инте-

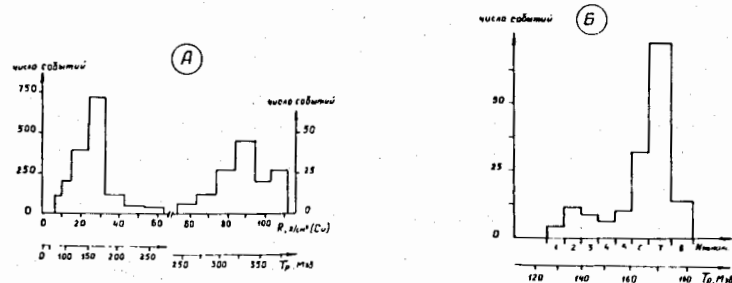


Рис. 4. Общий вид спектра (А) и участок спектра протонов, соответствующий эффектам перерассеяний нуклонов (Б) при $T_0 = 650 \pm 1$ МэВ (А), $T_0 = 640 \pm 1$ МэВ (Б) и $\theta_1 = 50^\circ \pm 2^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$.

ресным являлся участок спектра, соответствующий эффектам перерассеяний нуклонов, дальнейшие опыты были посвящены более детальному изучению области $100 < T_p < 200$ МэВ. Результаты измерения этого участка спектра с разбиением его на более узкие энергетические интервалы приведены на рис. 4Б.

Оценки суммарного вклада реакций мезообразования при pd -соударениях в число регистрируемых нами протонов от реакции $pd \rightarrow ppp$ были получены на основе экспериментальных данных работы [23]. Оказалось, что фон, создаваемый мезонными процессами, не превышает нескольких процентов от изучаемого нами эффекта.

Основываясь на этих данных и считая, что все зарегистрированные нами частицы являются протонами, найдем, что положения центров тяжести пиков (рис. 4) соответствуют энергиям $T_p = 325$ МэВ и $T_p = 170$ МэВ. Положение и форма первого из этих пиков ($T_p = 325$ МэВ) удовлетворительно совпадают с предсказаниями, основанными на представлениях об основной роли в этой части спектра однократного NN -рассеяния. Природу пика при $T_p = 170$ МэВ легко понять, если учесть, что выбранная геометрия частично перекрывается с геометрией упругого pd -рассеяния. Если это так, то при увеличении угла разлета регистрируемых частиц этот пик должен исчезать. Положение же его, соответствующее пробегу дейтронов с энергией $T_d = 240$ МэВ (=пробегу протонов с энергией ~ 170 МэВ), может служить репером при определении энергий регистрируемых протонов.

Результаты измерения той же области спектра протонов ($100 < T_p < 200$ МэВ) при углах их вылета $\theta_1 = 52,5^\circ \pm 1^\circ$ и $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$ (где упругое pd -рассеяние кинематически исключено), приведены в виде гистограммы на рис. 5. Видно, что пик, соответствующий пробегу протонов с энергией ~ 170 МэВ (дейтроны с энергией ~ 240 МэВ), исчез. Оставшаяся часть спектра обусловлена неупругим pd -рассеянием и относится к области, где основной вклад в формирование спектра вносят процессы двойного NN -рассеяния и ВКС после них.

Измерение абсолютной величины сечения эффектов перерассеяний.

Абсолютные величины сечений определялись на основе сравнения скоростей счетов протонов от реакции $pd \rightarrow ppp$ и протонов от упругого pp -рассеяния, сечение которого известно. Измерения проводились с помощью двух включенных на совпадения телескопов, каждый из которых состоял из 4 последовательно расположенных сцинтил-

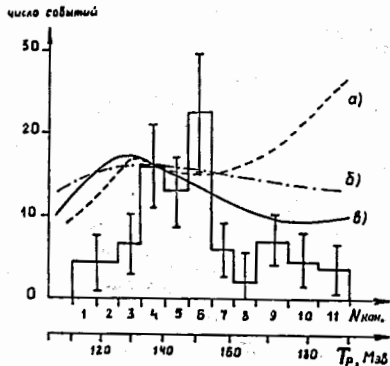


Рис.5 Спектр протонов-продуктов реакции $pd \rightarrow ppn$ при $T_0 = 640 \pm 1$ МэВ, $\theta_1 = 52,5^\circ \pm 1^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$. Кривые (а,б,в)-результаты теоретических расчетов в приближении (а,б,в) соответственно (см.стр.13).

ядерных взаимодействий и неэффективности счетчиков оценивались в опытах с протонами известной энергии (использовались протоны от упругого pp -рассеяния).

Результаты измерений показали, что интегральное по энергии сечение вылета протонов от pd -соударений при $T_0 = 640 \pm 1$ МэВ, $\theta_1 = 40,5^\circ \pm 1^\circ$, $\theta_2 = 40,5^\circ \pm 1,5^\circ$, равно

$$\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2}\right)_{\text{эксп}} = (272 \pm 7) \text{ мбарн/стер}^2.$$

Дифференциальное сечение реакции $pd \rightarrow ppn$, усредненное по интервалу энергий 130 + 160 МэВ при $T_0 = 640 \pm 1$ МэВ и углах вылета протонов $\theta_1 = 51,5^\circ \pm 1^\circ$, $\theta_2 = 51,5^\circ \pm 1,5^\circ$, было найдено равным

$$\left(\frac{d^3\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1}\right)_{\text{эксп}} = (3,0 \pm 0,7) \text{ мкбарн/(стер}^2 \cdot \text{МэВ)}$$

ляционных счетчиков. После первого и после третьего счетчиков каждого из телескопов могли устанавливаться фильтры. Вырезаемые телескопами телесные углы имели значения $\Delta\Omega_1 = 1,25 \times 10^{-3}$ стерад, $\Delta\Omega_2 = 2,69 \times 10^{-3}$ стерад. Используемая в работе электронная схема позволяла выделять такие события, которые соответствовали регистрации обоими телескопами частиц с пробегами, большими толщин первых фильтров и меньшими суммарных толщин фильтров, установленных в каждом из телескопов. При установке в телескопах фильтров соответствующих толщин это давало возможность определить число коррелированных пар частиц, пробеги которых лежат в пределах выбранной части диаграммы рассеяния исследуемой реакции.

Поправки на потери частиц в фильтрах за счет многократного рассеяния,

Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов.

Выше упоминалось, что в реакции $pd \rightarrow ppn$ при углах вылета протонов, соответствующих углам вылета частиц от упругого pp -рассеяния, основную роль играют процессы однократного рассеяния нуклонов. Учет двукратных NN -рассеяний и ВКС при такой кинематике почти не изменяет расчетной величины сечения исследуемой реакции. Сравнение полученных при такой кинематике экспериментальных данных с результатами теоретических предсказаний позволяет проверить правильность теоретического описания квазиупругого NN -рассеяния в используемой модели реакции.

Сравнение расчетной величины сечения вылета протонов на углы $\theta_1 = \theta_2 = 40,5^\circ$ ($d^2\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2$)_{теор} = 275 мбарн/стер², усредненного по угловому разрешению установки с экспериментальным его значением ($d^2\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2$)_{эксп} = (272 ± 7) мбарн/стер², свидетельствует о хорошем описании этого эксперимента используемыми нами моделями.

В работах [1+3] мы отмечали, что измерения при $T_0 = 600$ МэВ [22] дифференциальные сечения $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1$ в области квазиупругого NN -рассеяния хорошо описываются простым импульсным приближением. Об этом же говорит и качественное согласие положения и формы измеренного нами пика однократного NN -рассеяния с результатами теоретических расчетов (см.рис.4А и стр.11).

Все сказанное позволяет утверждать, что область, где преимущественно работает однократное NN -рассеяние, правильно отображается используемыми нами моделями.

Изучение pd -соударений при углах вылета протонов $\theta_1 = \theta_2 \geq 50^\circ$ соответствуют таким кинематическим условиям, когда значительно различаются результаты расчетов, основанных на допущениях, что главную роль в механизме реакции $pd \rightarrow ppn$ при выбранной кинематике играют:

- а) однократные NN -рассеяния и ВКС после них,
- б) однократные и двукратные NN -рассеяния без учета ВКС,
- в) одно- и двукратные NN -рассеяния и ВКС как после однократных, так и после двукратных NN -рассеяний.

Сопоставление экспериментальных данных с предсказаниями гипотез (а,б,в) проводилось на основе χ^2 -критерия. При вычислении χ^2 были использованы следующие экспериментальные данные:

1. Найденное нами сечение вылета протонов на углы $\theta_1 = 51,5^\circ \pm 1^\circ$, $\theta_2 = 51,5^\circ \pm 1,5^\circ$, усредненное по интервалу энергий $130 \leq T_p \leq 160$ МэВ,

$$\left(\frac{d^3\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1}\right)_{\text{эксп}} = (3,0 \pm 0,7) \text{ мкбарн/ (стер}^2 \cdot \text{МэВ)}.$$

2. Измеренный нами энергетический спектр протонов (рис.5), регистрируемых под углами $\theta_1 = 52,5^\circ \pm 1^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$ к начальному пучку. При расчетах из-за недостаточной статистики отдельные каналы гистограммы были объединены следующим образом: $\Sigma_1 = N_1 + N_2 + N_3$, $\Sigma_2 = N_4$, $\Sigma_3 = N_5$, $\Sigma_4 = N_6$, $\Sigma_5 = N_7 + N_8 + N_9$, $\Sigma_6 = N_{10} + N_{11}$.

3. Дифференциальные сечения $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1$, измеренные при $T_0 = 600$ МэВ^{/22/}. Качественное сравнение этих данных с нашими вычислениями проводилось в работе^{/3/}. В связи с тем, что при $\theta_1 = \theta_2 = 41^\circ$ предсказания гипотез (а, б, в) практически совпадают, для сравнения с теоретическими расчетами мы выбрали измеренные в работе^{/22/} сечения вылета протонов на углы $\theta_1 = \theta_2 = 28^\circ + 38^\circ, 44^\circ + 56^\circ$.

Теоретические значения измеренного нами дифференциального сечения $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1$, соответствующие упомянутым выше гипотезам, принимают значения, приведенные в табл.1.

Расчетные формы спектра протонов от реакции $pd \rightarrow ppp$ для гипотез (а, б, в) приведены на рис.5 (кривые а, б, в соответственно). Теоретические кривые нормированы на эксперимент в середине канала №4.

Результаты обработки данных вместе со степенью соответствия (η) каждой из гипотез экспериментальным данным приведены в табл.2, из которой видно, что экспериментальные данные лучше всего согласуются с расчетами, выполненными на основе гипотезы (в), т.е. в предположении, что в механизме pd -соударений важную роль играют однократные и двукратные NN -соударения и взаимодействия нуклонных пар в конечном состоянии.

Таблица 2. Результаты сопоставления теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными нами при энергии около 650 МэВ и в работе^{/22/} при энергии 600 МэВ.

Величина	число точек	число степ. своб.	χ^2 для гипотезы		
			а	б	в
$d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1$ (наши измерения)	1	1	12,8	5,9	0,5
спектр протонов (наши измерения)	6	5	11,5	4,8	3,2
$d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1$ (рез. работы ^{/22/})	15	15	48,7	42,0	23,2
сумма χ^2	22	21	73,0	52,7	26,9
η			$\ll 1\%$	$\ll 1\%$	17%

Основные результаты, изложенные в диссертации, сводятся к следующему:

1. Проведен цикл расчетно-теоретических исследований реакции $pd \rightarrow ppp$ и, впервые для энергий 600+650 МэВ, показано, что в спектре вторичных протонов существуют такие области, где сечение формируется преимущественно за счет эффектов перерассеяния нуклонов.

2. Впервые рассчитаны эффекты ВКС после двойных NN -перерассеяний, которые при некоторых кинематических условиях определяют форму спектра протонов, заметно увеличивая соответствующее сечение.

3. Сформулированы рекомендации о проведении экспериментальных исследований и указана область спектра протонов от реакции $pd \rightarrow ppp$ при $T_0 = 650$ МэВ, где наиболее ярко проявляются эффекты перерассеяния нуклонов. Эта область ($100 < T_p < 200$ МэВ, $\theta_1 = \theta_2 \approx 51^\circ$) четко отделена от области однократного NN -рассеяния ($250 < T_p < 350$ МэВ, при тех же углах). При этих условиях эффекты ВКС после однократного NN -рассеяния значительно меньше эффектов ВКС после двойных NN -рассеяний.

4. Создано математическое обеспечение экспериментального исследования реакции $pd \rightarrow ppp$, которое реализовано на ЭВМ НР-2116С, Минск-22 и БЭСМ-6. На основе метода Монте-Карло проведено математическое моделирование работы установки.

5. В ходе испытаний экспериментальной системы получены основные характеристики установки, состоящей из системы спинтлляционных счетчиков и двух групп проволочных искровых камер на линии связи с ЭВМ.

6. Измерен спектр протонов-продуктов реакции $pd \rightarrow ppp$ при $T_0 = 650 \pm 1$ МэВ, $\theta_1 = 52,5^\circ \pm 1,0^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$ и показано, что в спектре вторичных протонов наблюдается пик, расположенный при $130 \leq T_p \leq 160$ МэВ. Форма экспериментального пика значительно лучше согласуется с результатами теоретических расчетов, выполненных в предположении о существенной роли эффектов ВКС после двукратных NN -рассеяний, чем с представлениями, основанными на учете ВКС только после однократного NN -рассеяния.

7. Измерено дифференциальное сечение $d^2\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2$ при $T_0 = 640 \pm 1$ МэВ, $\theta_1 = 40,5^\circ \pm 1,0^\circ$, $\theta_2 = 40,5^\circ \pm 1,5^\circ$, т.е. в условиях, когда сечение формируется в основном однократными NN -рассеяниями. Показано, что экспериментальная его величина $(d^2\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2)_{\text{эксп}} = (272 \pm 7)$ мбарн/стер² хорошо согласуется с расчетной $(d^2\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2)_{\text{теор}} = 275$ мбарн/стер². Этот факт, вместе с качественным согласием формы и положения измеренного нами пика однократного рассеяния с расчетами и хорошим описанием сечений в области квазиупругого NN -рассеяния при $T_0 = 600$ МэВ /22/ простым импульсным приближением свидетельствует о том, что область, где преимущественно работает однократное NN -рассеяние, правильно отображается используемыми нами моделями.

8. Дифференциальное сечение $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT$ при $T_0 = 640 \pm 1$ МэВ, $\theta_1 = 51,5^\circ \pm 1,0^\circ$, $\theta_2 = 51,5^\circ \pm 1,5^\circ$ в области энергий вторичных протонов, соответствующей положению найденного нами пика ($130 \leq T_p \leq 160$ МэВ), оказалось равным $(d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT)_{\text{эксп}} = (3,0 \pm 0,7)$ мбарн/(стер²·МэВ). Эта величина близка к сечению, рассчитанному в приближении (в) (см. стр. 13) и сильно отличается от его величин, полученных на основе использования моделей (а и б) (см. табл. I).

9. На основе χ^2 -критерия проведено сопоставление экспериментальных данных, полученных нами при энергии около 650 МэВ и полученных в работе /22/ при энергии 600 МэВ с результатами теоретических расчетов, выполненных на основе гипотез (а, б, в). Показано, что экспериментальные данные лучше всего согласуются с результатами расчетов, выполненных на основе гипотезы (в), т.е. в предположении, что в механизме pd -соударений важную роль играют однократные и двукратные NN -рассеяния и взаимодействия нуклонных пар в конечном состоянии.

10. Впервые экспериментально установленный значительный вклад ВКС после двукратных NN -соударений указывает на желательность теоретического и экспериментального поиска таких кинематических условий, при которых окажется возможным выделить вклад NN -перерассеяний выше второго порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.М. Головин, Г.И. Лыкасов, А.М. Розанова, А.В. Тарасов, Ф.Ш. Хамраев. ФТИ АН УССР. В кн. "Вопросы атомной науки и техники". Серия "Физика высоких энергий и атомного ядра". Вып. I (3), Харьков, 1973, стр. 35-39.
2. Б.М. Головин, И.К. Кульджанов, Г.И. Лыкасов, Ф.Ш. Хамраев. ЯФ, 19, 820 (1974).
3. Б.М. Головин, Г.И. Лыкасов, Ф.Ш. Хамраев. ЯФ, 22, 312 (1975).
4. Б.М. Головин, Ф.Ш. Хамраев. ОИЯИ, Б1-2-8431, Дубна, 1974.
5. Б.М. Головин, Ф.Ш. Хамраев. "Библиотека СП на ФОРТРАНе для ЭВМ БЭСМ-6", СП Е-113, ОИЯИ, Б1-11-7200, Дубна, 1974.
6. Н.С. Заикин, М.И. Фоминых, Ф.Ш. Хамраев. ОИЯИ, 10-8369, Дубна, 1974.
7. В.В. Вишняков, Б.М. Головин, Н.И. Журавлев, В.М. Королев, Б.П. Осипенко, А.Н. Синаев, Ф.Ш. Хамраев. ОИЯИ, 13-6045, Дубна, 1971.
8. Б.М. Головин, Ф.Ш. Хамраев, ОИЯИ, Б2-10-6091, Дубна, 1971.
9. Б.М. Головин, М.Б. Голубева, В.М. Королев, Л.А. Пермякова, Ф.Ш. Хамраев. ОИЯИ, Б1-10-8259, Дубна, 1974.
10. Б.М. Головин, М.Б. Голубева, В.М. Королев, Л.А. Пермякова, Ф.Ш. Хамраев. ОИЯИ, Б1-10-8260, Дубна, 1974.
11. Б.М. Головин, В.М. Королев, Ф.Ш. Хамраев. ОИЯИ, Р1-9402, Дубна, 1975.

13. A. Everett. Phys.Rev., 126, 831 (1962).
14. F. Takeuchi et.al. Phys.Lett., 35B, 498 (1971).
15. Ch.N. Brown. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy (1968). Rochester, New-York.
16. M. Furic et.al. Phys.Lett. 47B, 241 (1973).
17. K.M. Watson. Phys.Rev. 88, 1163 (1952).
18. А.Б.Мигдал. ЖЭТФ, 22, 3 (1955).
19. K.H. Schmidt. Preprint DESY F23-70/1 (1970).
20. Jan J. McGee. Phys.Rev. 151, 772 (1966).
21. Б.М.Головин, А.М.Розанова. ОИЯИ, P-286I, Дубна, 1966.
22. G.F. Perdrisat et.al. Phys.Rev. 187, 1201 (1969).
23. D.R.F. Cochran et.al. Phys.Rev. 6D, 3087 (1972).

Рукопись поступила в издательский отдел
19 декабря 1975 года.