

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Г-611

12/11-76

P1 - 9402

1341/2-76

Б.М.Головин, В.М.Королев, Ф.Ш.Хамраев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕАКЦИИ $pd \rightarrow ppn$
ПРИ ЭНЕРГИИ ОКОЛО 650 МЭВ

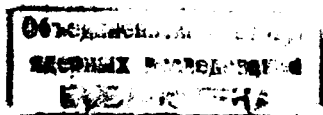
1975

P1 - 9402

Б.М.Головин, В.М.Королев, Ф.Ш.Хамраев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕАКЦИИ $pd \rightarrow ppn$
ПРИ ЭНЕРГИИ ОКОЛО 650 МЭВ

Направлено в ЯФ



Введение

В работах /1-4/ было показано, что возможно выделить такие кинематические области, где спектр протонов - продуктов реакции $pd \rightarrow ppp$ при энергиях 600-650 МэВ в основном формируется за счет либо однократных NN-соударений, либо двукратных перерассеяний нуклонов нуклонами. Форма спектра существенно зависит от того, принимаются ли во внимание взаимодействия нуклонных пар в конечном состоянии /ВКС//4/.

Как показали расчеты /4/ /см. рис. 1/, при углах вылета вторичных протонов $\theta_1 \cong \theta_2 \geq 50^\circ$ л.с. эффекты ВКС проявляются в той части спектра $100 \text{ МэВ} \leq T_p \leq 200 \text{ МэВ}$, где велика роль двукратного перерассеяния нуклонов. При этом роль ВКС после однократных NN-соударений относительно невелика и сечение в основном формируется за счет двойных перерассеяний нуклонов и ВКС после них. Реакция $pd \rightarrow ppp$ в таких кинематических условиях до сих пор не изучалась*, и это послужило основанием к проведению ее экспериментального исследования при энергии около 650 МэВ.

* Отметим, что при энергиях $200 < T_0 < 1000 \text{ МэВ}$ реакция $pd \rightarrow ppp$ исследовалась лишь в двух работах /5,6/, причем в первой измерения сечений $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1$ проводились лишь в симметричной кинематике ($\theta_1 = \theta_2, T_1 = T_2$), а во второй - при таких условиях, когда ВКС после однократных NN-рассеяний играют основную роль.

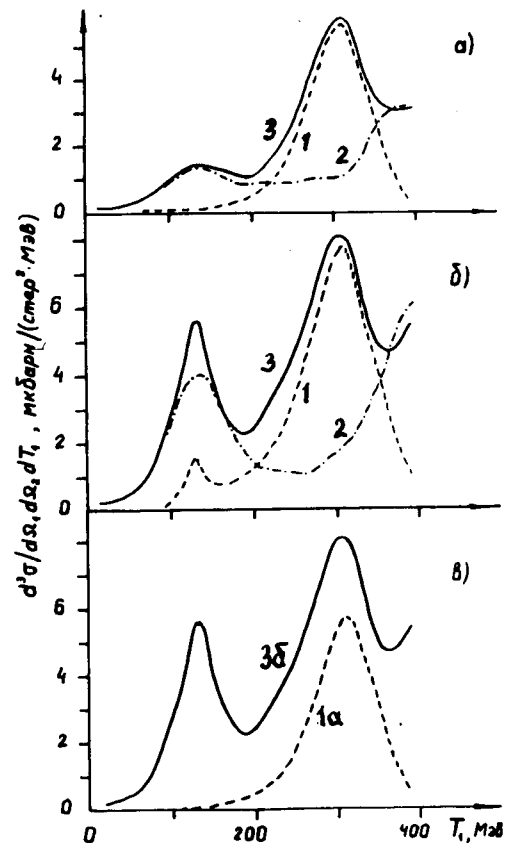


Рис. 1. Спектр протонов от реакции $pd \rightarrow pnn$ при $T_0 = 650$ МэВ, $\theta_1 = \theta_2 = 50^\circ$. Кривая 1 - учет только однократных NN -рассеяний, кривая 2 - учет только двукратных NN -рассеяний, кривая 3 - совместный учет одно- и двукратных NN -рассеяний. а/ Без учета ВКС; б/ с учетом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

Измерение спектра протонов

Эксперименты проводились на пучке протонов синхротрона Лаборатории ядерных проблем, имеющих энергию около 650 МэВ.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Она содержит две группы проволочных искровых камер, запуск которых производится сцинтилляционными счетчиками $C_1 \div C_4$, 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 $\Delta\Omega_1 = 4,4 \times 10^{-3}$ ср и $\Delta\Omega_2 = 2,5 \times 10^{-3}$ ср. Счетчики AC_1 и AC_2 включались на антисовпадения со счетчиками $C_1 \div C_4$.

Между искровыми камерами первого направления могли устанавливаться фильтры из алюминия или меди, длина пробега частиц в которых использовалась для определения их энергии. На втором направлении две

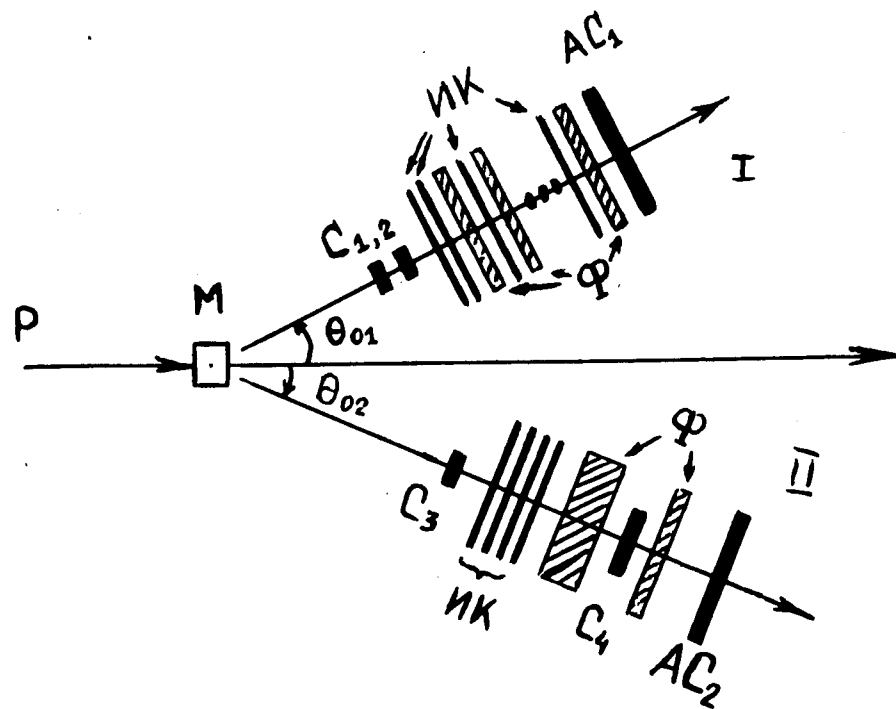


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования реакции $pd \rightarrow pnn$.

группы фильтров помещались соответственно между счетчиками $C_3 + C_4$ и между счетчиками $C_4 + AC_2$. Подбирая толщины этих фильтров, мы могли выделить среди частиц, летящих по второму направлению, такие, пробег которых лежит в заданном интервале.

Информация с искровых камер считывалась электронным устройством, описание которого приведено в работе/7/. Данные о зарегистрированных событиях по линиям связи передавались на ЭВМ НР-2116С или "Минск-22", где частично обрабатывались в режиме "on-line" и записывались на магнитную ленту для последующего анализа. Программное обеспечение этого эксперимента описано в работах/8,9/.

Более подробное описание экспериментальной системы содержится в работе/12/.

Установка испытывалась при регистрации протонов от упругого pp -рассеяния /мишень CH_2 /. Обработка полученных данных по программам/8,9/ дала среднее значение угла разлета протонов $\theta_1 + \theta_2 = 82^\circ \pm 0,5^\circ$ и разность азимутальных углов $\phi_2 - \phi_1 = 180^\circ \pm 1,5^\circ$. Эти цифры хорошо согласуются с ожидаемыми величинами $(\theta_1 + \theta_2)_{\text{ожид}} = 81,6^\circ$, $(\phi_2 - \phi_1)_{\text{ожид}} = 180^\circ$.

При исследованиях реакции $pd \rightarrow ppp$ использовались мишени CD_2 , C , содержавшие равные количества углерода / $\phi = 40$ мм, $l_{CD_2} = 9,65$ мм, $l_C = 4,7$ мм/.

Общий вид спектра протонов, продуктов этой реакции при $T_0 = 650 \pm 1$ МэВ*, $\theta_1 = 50^\circ \pm 2^\circ$ и $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$, приведен на рис. 3А. В связи с тем, что наиболее интересным для нас является участок спектра, соответствующий эффектам перерассеяния нуклонов, дальнейшие опыты были посвящены детальному изучению области $100 \leq T_p \leq 200$ МэВ. Результаты измерения этого участка спектра с разбиением его на более узкие энергетические интервалы приведены на рис. 3Б.

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/10/. Оказалось, что

* Авторы приносят свою благодарность В.П.Зрелову и его сотрудникам, представившим данные о величине энергии протонного пучка.

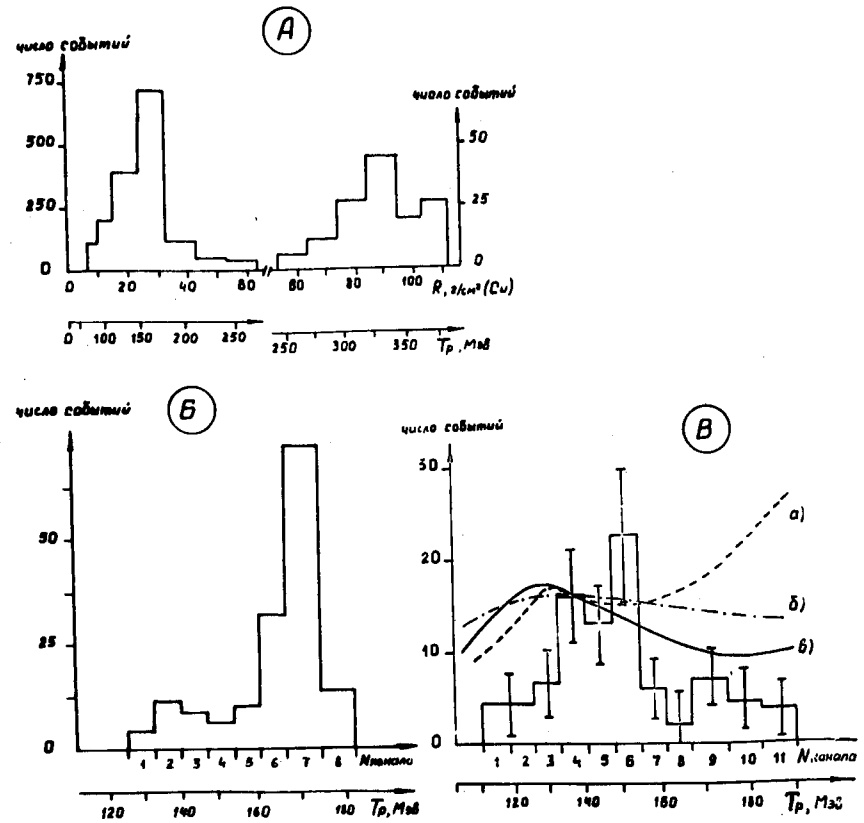


Рис. 3. Спектр вторичных протонов от pd -соударений. А - общий вид спектра при $T_0 = 650 \pm 1$ МэВ, $\theta_1 = 50^\circ \pm 2^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$; Б - участок спектра протонов, соответствующий эффектам перерассеяния нуклонов при $T_0 = 640 \pm 1$ МэВ, $\theta_1 = 50^\circ \pm 2^\circ$, $\theta_2 = 50^\circ \pm 1,5^\circ$; В - участок спектра протонов, соответствующий эффектам перерассеяния нуклонов 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, выполненных на основании гипотез /а, б, в/ соответственно /см. стр. 12/.

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.3А и 3Б/ соответствуют энергиям $T_p \approx 325 \text{ МэВ}$ и $T_p \approx 170 \text{ МэВ}$. Положение и форма первого из этих пиков / $T_p \approx 325 \text{ МэВ}$ / удовлетворительно совпадают с предсказаниями, основанными на представлениях об основной роли в формировании этой части спектра однократного NN -рассеяния.

Природу пика при $T_p \approx 170 \text{ МэВ}$ 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 $T_0 \approx 240 \text{ МэВ}$ /равному пробегу протонов с энергией $\approx 170 \text{ МэВ}$ /, может служить репером при определении энергий регистрируемых частиц. Результаты измерения той же области спектра протонов / $T_p = 100 \div 200 \text{ МэВ}$ / 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 на рис. 3В в виде гистограммы. Видно, что пик, соответствующий пробегу протонов с энергией $\approx 170 \text{ МэВ}$ /дейтроны с энергией $\approx 240 \text{ МэВ}$ /, 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 счета протонов от реакции $pd \rightarrow ppp$ и протонов от упругого pp -рассеяния, сечение которого известно.

Дифференциальное сечение $d^3\sigma/d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1$, усредненное

по интервалу энергий ΔT и интервалу углов $\Delta\Omega_{1,2}$, перекрываемых телескопами /1,2/, связано с сечением упругого pp -рассеяния выражением

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1}\right)_{\text{л.с.}} = \frac{N_{pd}}{N_{pp}} \cdot \frac{J_{pp}}{J_{pd}} \cdot \frac{K}{\Delta\Omega_2 \cdot \Delta T_1} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_1}\right)_{\text{с.ц.м.}}$$

Аналогичная связь для сечения вылета протонов, проинтегрированного по всем возможным значениям их энергий, имеет вид:

$$\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2}\right)_{\text{л.с.}} = \frac{N_{pd}}{N_{pp}} \cdot \frac{J_{pp}}{J_{pd}} \cdot \frac{K}{\Delta\Omega_2} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_1}\right)_{\text{с.ц.м.}}$$

Здесь N_{pp} , N_{pd} - количество зарегистрированных протонов соответственно от упругого pp -рассеяния и от реакции $pd \rightarrow ppp$; J_{pp} , J_{pd} - счет монитора за время регистрации протонов соответственно от pp- и pd-рассеяния; K - коэффициент перевода сечения упругого pp -рассеяния из с.ц.м. в л.с. В нашем случае $T_0 = 640 \text{ МэВ}$ / $K/\theta = 90^\circ$ / =

$$= 3,1; \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{с.ц.м.}} - \text{сечение упругого pp -рассеяния в систе-}$$

ме центра масс.

Измерения проводились с помощью двух включенных на совпадения телескопов, каждый из которых состоял из 4 последовательно расположенных счетчиков. Вырезаемые телескопами телесные углы имели значения $\Delta\Omega_1 = 1,25 \times 10^{-3} \text{ ср}$, $\Delta\Omega_2 = 2,69 \times 10^{-3} \text{ ср}$.

После первого и после третьего счетчиков могли устанавливаться фильтры из алюминия или меди. Используемая в работе электронная схема позволяла выделять такие события, которые соответствовали регистрации обоими телескопами частиц с пробегом, большим толщин первых фильтров и меньшим суммарных толщин фильтров, установленных в каждом из телескопов.

При установке в телескопах фильтров соответствующих толщин это давало возможность определить число коррелированных пар частиц, пробег которых лежит в пределах выбранной части диаграммы рассеяния исследуемой реакции.

Поправки на потери частиц в поглотителях за счет многократного рассеяния, ядерных взаимодействий и неэффективности счетчиков оценивались в опытах с протонами известной энергии /использовались протоны от упругого pp -рассеяния/.

При определении сечения реакции $pd \rightarrow ppp$, как и при измерении спектра протонов ее продуктов, применялись мишени CD_2 , C . При измерениях потока протонов от упругого pp -рассеяния использовались мишени CH_2 и C , удалялись фильтры и телескопы располагались под углами $\theta_1 = \theta_2 = 40,5^\circ$ л.с. относительно направления пучка, что соответствовало углу рассеяния в с.ц.м. $\theta = 90^\circ$. Энергия начального пучка протонов при этих измерениях равнялась 640 ± 1 МэВ*.

Дифференциальное сечение упругого pp -рассеяния

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{с.ц.м.} = /2,07 \pm 0,03/ \text{ мбарн/ср}$$

было взято из работы /11/, выполненной при $T_0 = 657$ МэВ.

Проведенные нами измерения показали, что интегральное по энергиям сечение вылета протонов от pd -соударений при $\theta_1 = 40,5^\circ \pm 1^\circ$, $\theta_2 = 40,5^\circ \pm 1,5^\circ$ имеет величину

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

Дифференциальное сечение реакции $pd \rightarrow ppp$, усредненное по энергиям $130 \leq T_p \leq 160$ МэВ при углах вылета протонов $\theta_1 = 51,5^\circ \pm 1^\circ$, $\theta_2 = 51,5^\circ \pm 1,5^\circ$ было найдено равным

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

* См. примеч. на стр. 6.

Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов

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

Сравнение расчетной величины сечения вылета прото-

тонов на углы $\theta_1 = \theta_2 = 40,5^\circ$ $\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2}\right)_{теор.} = 275 \text{ мбарн/ср}^2$,

усредненного по угловому разрешению экспериментальной установки с экспериментальным его значением

$\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2}\right)_{эксп} = /272 \pm 7/ \text{ мбарн/ср}^2$, свидетельствует о хо-

рошем теоретическом описании этого эксперимента.

Ранее мы отмечали /1/, что измеренные при $T_0 = 600$ МэВ /5/ дифференциальные сечения $\left(\frac{d^3\sigma}{d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1}\right)$

в области квазиупругого NN -рассеяния хорошо описываются простым импульсным приближением. Об этом говорит и качественное согласие положения и формы измеренного нами пика однократного NN -рассеяния с результатами теоретических расчетов /см. стр. 8 и рис. 3А/.

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

Изучение pd -соударений при углах вылета протонов $\theta_1 = \theta_2 \geq 50$ соответствует таким кинематическим усло-

виям, когда значительно различаются результаты расчетов, основанных на допущениях, что главную роль в механизме реакции $p d \rightarrow p p n$ при выбранной кинематике играют:

- а/ однократные NN-рассеяния и ВКС после них,
- б/ однократные и двойные NN-рассеяния без ВКС,
- в/ однократные и двойные NN-рассеяния и ВКС как после однократных, так и после двойных 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 с энергией $T = 130 \div 160$ МэВ на углы $\theta_1 = 51,5^\circ \pm 1^\circ$, $\theta_2 = 51,5^\circ \pm 1,5^\circ$

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

2. Измеренный нами энергетический спектр протонов /см. рис. 3В/, 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: $\Sigma_1 = N_1 + N_2 + N_3$, $\Sigma_2 = N_4$, $\Sigma_3 = N_5$, $\Sigma_4 = N_6$, $\Sigma_5 = N_7 + N_8$, $\Sigma_6 = N_9 + N_{10} + N_{11}$.

3. Дифференциальные сечения $d^3 \sigma / d\Omega_1 d\Omega_2 dT_1$, измеренные при $T_0 = 600$ МэВ/5/. Качественное сравнение этих данных с нашими вычислениями проводилось в работе/4/. 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/5/ сечения вылета протонов на углы $\theta_1 = \theta_2 = 28^\circ \div 38^\circ$, $44^\circ \div 56^\circ$.

При обсуждении данных, полученных в работе/6/ / $T_0 = 585$ МэВ/, мы отмечали/4/, что эти измерения выполнены в такой кинематике, которая требует включения в теоретическую модель процессов типа "подхвата" налетающей частицей одного из нуклонов дейтрона. Посколь-

ку в использованных нами моделях эти эффекты не учитываются, мы считаем нецелесообразным проводить количественное сопоставление этих данных с нашими расчетами.

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

Расчетные формы спектра протонов от реакции $p d \rightarrow p p n$ для гипотез /а,б,в/ показаны на рис. 3В /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 таблицы видно, что экспериментальные данные лучше всего согласуются с расчетами, выполненными на основе гипотезы /в/, т.е. в предположении, что в механизме $p d$ -соударений важную роль играют однократные и двукратные NN-соударения и взаимодействия нуклонных пар в конечном состоянии.

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.

Авторы выражают свою искреннюю благодарность за постоянный интерес к работе, помощь при ее выполнении и многочисленные полезные обсуждения В.П.Джелепову и Л.И.Лалидусу.

Мы глубоко благодарны Н.И.Солнцеву, П.В.Симонову, Л.В.Черкасовой, в сотрудничестве с которыми были проведены описанные измерения, Г.И.Лыкасову, Л.А.Пермяковой, М.Б.Голубевой, участвовавшим в выполнении важных этапов работы, коллективам измерительного центра и отдела синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем, помощь которых обеспечила возможность проведения этого исследования.

Таблица 1

Гипотеза	а	б	в
$d^3 \sigma / d\Omega_1, d\Omega_2, dT_1,$ мкбарн/(ср ² · МэВ)	0,5	1,3	3,5

Таблица 2

Результаты сопоставления теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными нами при энергии около 650 МэВ и в работе /5/ 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 /5/)	15	15	48,7	42,0	23,2
сумма	22	21	73,0	52,7	26,9
η			<< 1%	<< 1%	17%

1. Б.М. Головин, Г.И. Лыкасов, А.М. Розанова, А.В. Тарасов. ЯФ, 16, 1096 /1972/.
2. Б.М. Головин, Г.И. Лыкасов, А.М. Розанова, Ф.Ш. Хамраев. ОИЯИ, Р2-6858, Дубна, 1973; ЯФ, 18, 333 /1973/.
3. Б.М. Головин, И.К. Кульджанов, Г.И. Лыкасов, Ф.Ш. Хамраев. ЯФ, 19, 820 /1974/.
4. Б.М. Головин, Г.И. Лыкасов, Ф.Ш. Хамраев. ЯФ, 22, 312 /1975/.
5. G.F. Perdrisat et al. Phys.Rev., 187, 1201 (1969).
6. M. Furic et al. Phys.Lett., 47B, 241 (1973).
7. В.В. Вишняков и др. ОИЯИ, 10-5804, 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; ОИЯИ, Б1-10-8250, Дубна, 1974.
10. D.R.F. Cochran et al. Phys.Rev., 6D, 3087 (1972).
11. Н.П. Богачев, И.К. Взорев. ДАН, 99, 971 /1954/.
12. Б.М. Головин, В.М. Королев, Ф.Ш. Хамраев. ОИЯИ, 13-9449, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 декабря 1975 года.