

© 1991 г.

АКИМОВ Ю. К., ГАЙСАК И. И., ГОРНОВ М. Г.¹⁾,
ГОСТКИН М. Г., ГУРОВ Ю. Б.¹⁾, КРУГЛОВ С. П.²⁾,
МЕРЗЛЯКОВ С. И., ОГАНЕСЯН К. О., ПАСЮК Е. А., ПОРОХОВОЙ С. Ю.,
РУДЕНКО А. И., СТРАКОВСКИЙ И. И.²⁾, ШИШКОВ А. В.¹⁾

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $\pi^+ + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + p + X$ ПРИ ЭНЕРГИЯХ ПИОНОВ 26–39 МэВ

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ДУБНА

(Поступила в редакцию 15 августа 1990 г.)

Получены первые экспериментальные результаты по поглощению π^+ -мезонов с энергиями 26–39 МэВ на ядре ${}^{12}\text{C}$ с испусканием двух протонов. Результаты свидетельствуют о том, что основным механизмом для данного процесса является поглощение пиона на квазидейтроиной паре в ядре. При энергии около 28 МэВ наблюдается резонансная особенность в энергетической зависимости полного сечения с шириной меньше 3 МэВ по энергии падающих пионов.

1. Введение

В понимании процессов поглощения пионов ядрами до настоящего времени остается много вопросов, несмотря на то что эти реакции интенсивно изучаются несколько десятилетий, начиная с появления первых пучков пионов на ускорителях.

Теоретический интерес к процессам поглощения пионов связан с возможностью получения информации о ненуклонных степенях свободы в ядрах (мезонных и Δ -изобарных), а также желанием выйти на уровень кваркового описания взаимодействия адронов с ядрами, следствием которого может быть обнаружение дибарионных или мультибарионных резонансов в ядрах.

Наиболее интенсивно исследовались реакция $\pi^+ d \rightarrow pp$ и обратная ей $pp \rightarrow \pi^+ d$, которые являются основными каналами поглощения и рождения пионов при промежуточных энергиях. Однако наиболее полные наборы экспериментальных данных имеются в области энергий пионов, близкой к резонансной (100–250 МэВ). Значительно меньше исследовано поглощение при $T_\pi < 100$ МэВ. На рис. 1 представлена сводка данных по полным сечениям реакции $\pi^+ d \rightarrow pp$ [1]. Имеющиеся данные зачастую противоречивы. Тем не менее обращает на себя внимание указание на наличие структуры (провала) в области $T_\pi \approx 28$ МэВ ($\sqrt{s} = 2,04$ ГэВ/ c^2).

Для процессов поглощения π^+ -мезонов на других ядрах при энергиях $T_\pi < 60$ МэВ экспериментальные данные отсутствуют, хотя с точки зрения исследования ядерной структуры пионы низких энергий обладают определенным преимуществом. Дело в том, что сечения взаимодействия пионов в этой области энергий относительно малы. Эта особенность позволяет почувствовать более глубокие области ядра по сравнению с пионами более высоких энергий, в особенности вблизи резонанса, где большая часть взаимодействий происходит на поверхности ядра.

Описанная ситуация стимулировала проведение исследований поглощения π^+ -мезонов ядрами при энергиях пионов 20–60 МэВ. В настоящей работе представлены первые результаты, полученные на ядре ${}^{12}\text{C}$. Иссле-

¹⁾ Московский инженерно-физический институт.

²⁾ Ленинградский институт ядерной физики АН СССР.

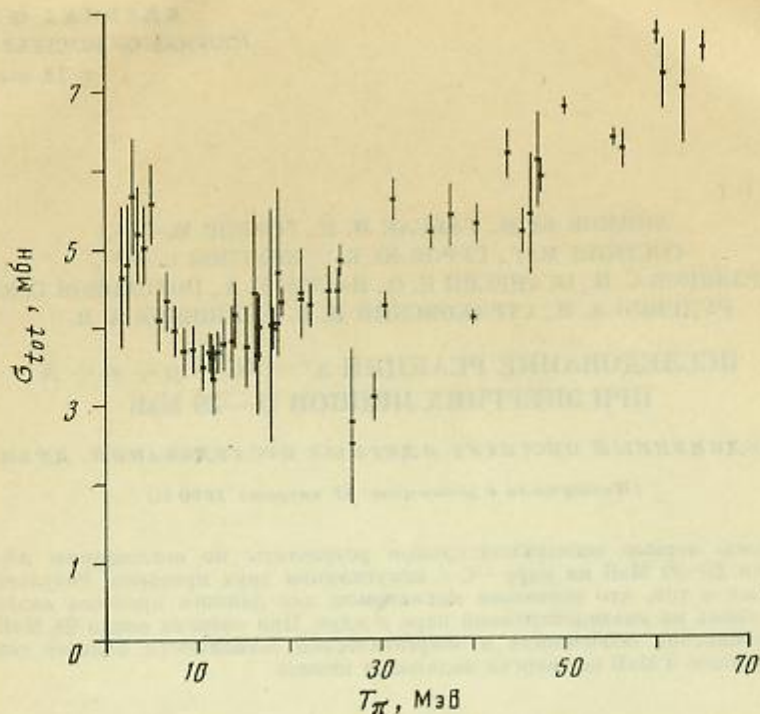


Рис. 1. Сводка данных [1] по полным сечениям реакции $\pi^+d \rightarrow pp$

довалась реакция $\pi^+ + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + p + X$ с выделением канала с образованием двух протонов в конечном состоянии при энергиях падающих пионов 26, 28, 30, 32, 36 и 39 МэВ.

1. Постановка эксперимента

Измерения проводились на канале пионов низких энергий П2 синхротрона ЛИЯФ [2]. Использовалась мезонообразующая мишень из Ве. Захват частиц в канал происходит под углом 60° к протонному пучку. Канал обладает сравнительно малой длиной, около 8 м, что важно при работе с пионами малых энергий. В канале имеются два поворотных магнита: один — в начале, другой — в конце. Это дает возможность снизить примесь мюонов в пучке. В середине канала в промежуточном фокусе располагается коллиматор, определяющий импульсный разброс пучка. Для уменьшения примеси позитронов мишень устанавливалась так, чтобы ее толщина в направлении канала была минимальна. Состав пучка определялся по времени пролета [3]. В качестве старта использовался сигнал со сцинтилляционного детектора на выходе канала, в качестве стопового сигнала — радиочастота ускорителя. На рис. 2 приведен пример времяпролетного спектра. Спектр фитировался суммой трех гауссианов, и по результатам фита вычислялся состав пучка. Точность определения доли пионов в пучке составляла $\leq 1,5\%$. В диапазоне энергий 26–39 МэВ доля пионов изменялась от 63 до 78%. Состав пучка контролировался во время измерений непрерывно.

Для точного определения энергетических параметров пучка использовалась методика, описанная в работе [4]. Идея метода состоит в том, что в канале присутствуют тяжелые заряженные частицы (p, d, t, \dots) с тем же самым импульсом, что и пионы, но с малым пробегом. Их энергии можно измерить с помощью тонкого полупроводникового детектора по полному поглощению. Эта методика позволяет измерять энергию пучка с точностью ≤ 200 кэВ. Импульсный разброс в пучке определяется шириной коллиматора. Канал позволяет получать $\Delta p/p \approx 2,5\%$. В данном эксперименте использовался режим с $\Delta p/p \approx 5\%$. Уменьшение импульсного разброса приводит к существенному уменьшению интенсивности пучка.

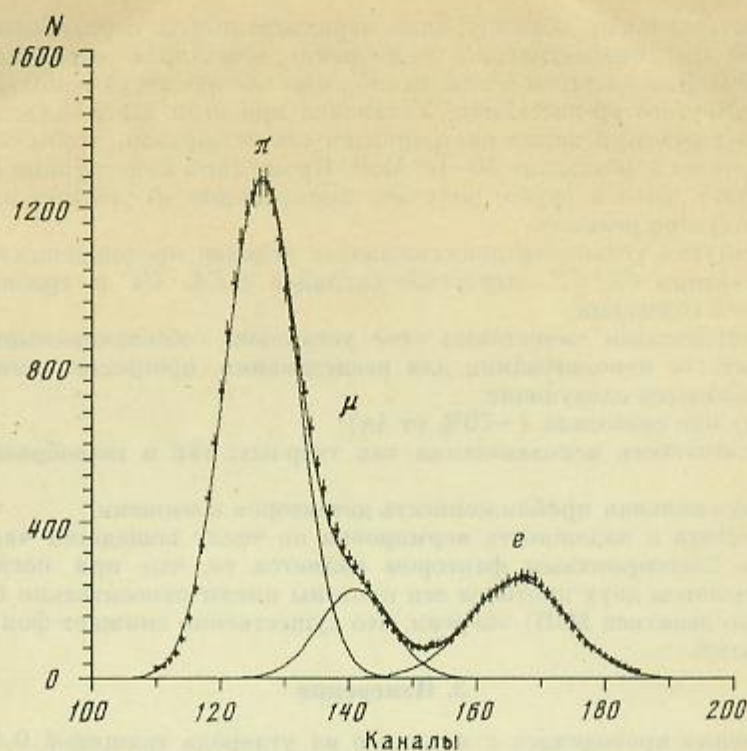


Рис. 2. Времяпролетный спектр пучка

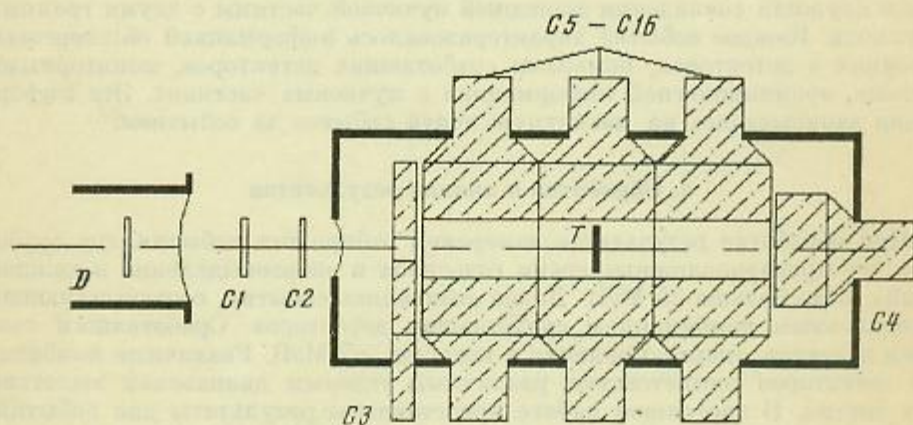


Рис. 3. Схема установки

В описываемых условиях интенсивность пионного пучка составляла $10^3 - 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Эксперимент проводился с помощью широкоапертурного сцинтилляционного годоскопа-спектрометра [5]. На рис. 3 приведена схема установки. Установка состоит из пучковых детекторов $C1$, $C2$, которые используются для измерения состава пучка во времени пролета, а также в комбинации со счетчиками антисовпадений $C3$ (с отверстием $3 \times 3 \text{ см}^2$) и $C4$ (торцевой) для триггера установки и измерения входящего потока частиц для нормировки. В вакуумной камере канала помещен полупроводниковый детектор D для измерения энергии пучка. Годоскоп-спектрометр состоит из двенадцати детекторов $C5 - C16$ из пластикового сцинтиллятора, которые помещены в герметичную камеру. Камера может наполняться газами (H_2 , D_2 , He) при работе с газовыми мишенями или откачиваться в случае работы с твердой мишенью внутри и при фоновых измерениях без мишени. Детекторы объединены в три секции по четыре в каждой и обра-

зуют чувствительный объем в виде параллелепипеда с размерами $100 \times 100 \times 600$ мм³. Энергетическое разрешение детекторов составляло величину $\sim 10\%$. Для энергетической калибровки спектрометра использовалась реакция упругого *pp*-рассеяния. Установка при этом заполнялась газообразным водородом, а канал настраивался таким образом, чтобы он захватывал протоны в диапазоне 50–60 МэВ. Кроме того, конструкция годоскопа позволяет, хотя и грубо, получать информацию об угловом распределении продуктов реакции.

Для запуска установки использовалось условие прохождения частицы через детекторы *C1*, *C2*, отсутствие сигналов с *C3*, *C4* и срабатывание двух граней годоскопа.

Отличительными качествами этой установки, обеспечивающими эффективность ее использования для исследования процессов поглощения пионов, являются следующие:

- а) большая светосила ($\sim 70\%$ от 4л);
- б) возможность использования как твердых, так и газообразных мишеней;
- в) максимальная приближенность детекторов к мишени;
- г) простота и надежность нормировки по числу вошедших частиц.

Также благоприятным фактором является то, что при поглощении пиона с вылетом двух протонов эти протоны имеют относительно большие (несколько десятков МэВ) энергии, что существенно снижает фон при отборе событий.

3. Измерения

Измерения проводились с мишенью из углерода толщиной 0,42 г/см², которая помещалась в центре установки. Установка при этом откачивалась. Для измерения фона мишень удалялась из камеры. Триггером установки служили совпадения вошедшей пучковой частицы с двумя гранями годоскопа. Каждое событие характеризовалось информацией об энерговыделениях в детекторах, номерами сработавших детекторов, мониторными счетами, времяпролетной информацией о пучковых частицах. Эта информация записывалась на магнитную ленту событие за событием.

4. Обработка и анализ результатов

При обработке результатов измерений отбирались события, где сработали две противоположные грани годоскопа и энерговыделение в каждой из них было больше 25 МэВ. Далее отбирались события, соответствующие определенным комбинациям сработавших детекторов. Сработавшим считался детектор, энерговыделение в котором > 5 МэВ. Различные комбинации детекторов соответствуют различным угловым диапазонам вылетающих частиц. В настоящей работе представлены результаты для событий, когда оба протона попадают в центральную секцию годоскопа. Это соответствует угловому диапазону $37-132^\circ$, при этом угол разлета протонов больше 90° . Полный телесный угол для рассматриваемой комбинации детекторов составлял $0,7 \cdot 4\pi$ ср. Для отобранных событий строились спектры суммарного энерговыделения двух протонов с вычетом фона. Величина фона составляла $\sim 5\%$ при суммарном энерговыделении двух протонов > 60 МэВ и $< 1\%$ при ограничении на энергию в 110 МэВ. Для всех энергий падающих пионов спектры имеют форму четко выраженных пиков, которые естественно предположить связанными с механизмом поглощения пиона на двухнуклонной паре. На рис. 4 представлен один из спектров, полученный при энергии $T_\pi = 39$ МэВ. На представляемой в настоящей работе стадии исследований не ставилась задача детального количественного анализа положения максимумов спектров и их ширины. Качественная оценка, использующая предположение о механизме реакции поглощения пиона на квазидейтронной паре нуклонов с переходом ядра ^{12}C в основное состояние ядра ^{10}B и учет потерь энергии в мишени, показывает близость расчетных значений энергий для максимумов спектров с полученными экспериментальными значениями. Другим аргументом, подтверждающим

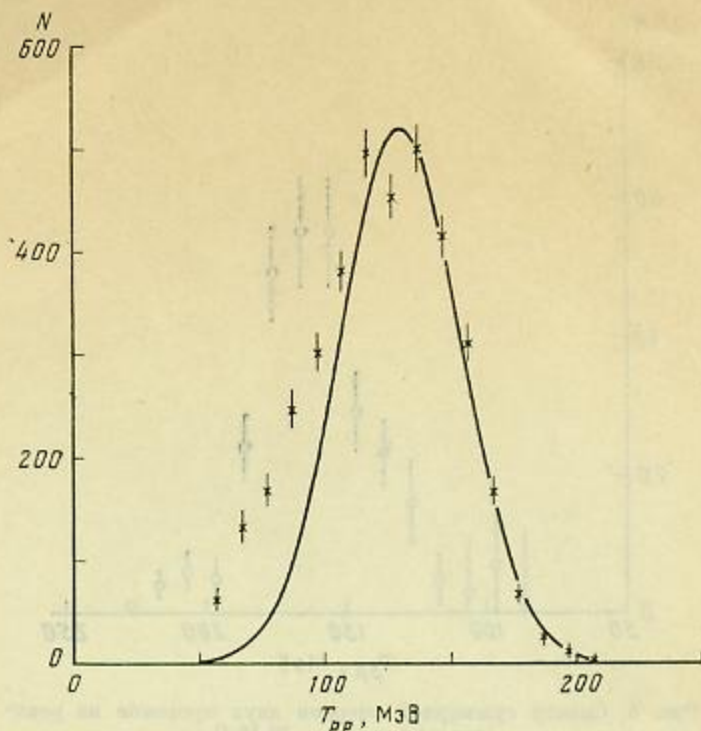


Рис. 4. Спектр суммарной энергии двух протонов из реакции $\pi^+ + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + p + X$, $T_\pi = 39$ МэВ

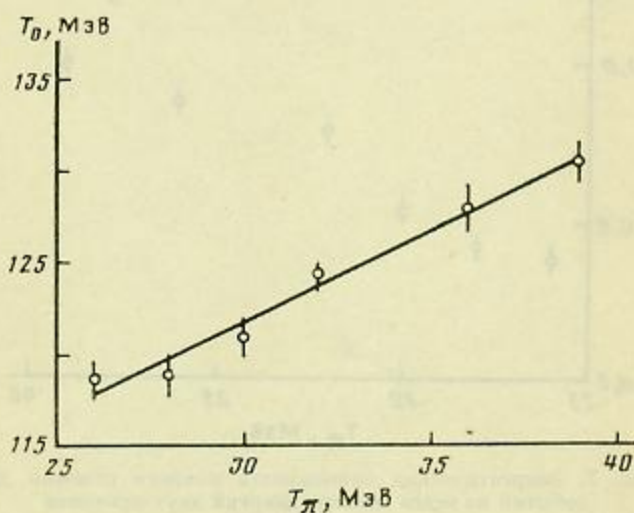


Рис. 5. Зависимость положения максимума спектра энергий двух протонов от энергии пиона

квазидейтронный механизм реакции, может служить представленная на рис. 5 зависимость положения максимума спектра энергий двух протонов от энергии падающих пионов. Линейная зависимость с наклоном, близким к единице ($k=0,98 \pm 0,11$), свидетельствует о том, что вся кинетическая энергия пиона распределяется между двумя вылетающими протонами. Измеренные спектры по сумме энергий двух протонов имеют асимметричную форму. Можно предположить, что события в районе максимума в основном связаны с квазидейтронным механизмом поглощения пиона, а относительно меньшая доля событий в области меньших энергий соответствует другим механизмам, например с вылетом нейтрона, не зарегистрированного установкой и др.

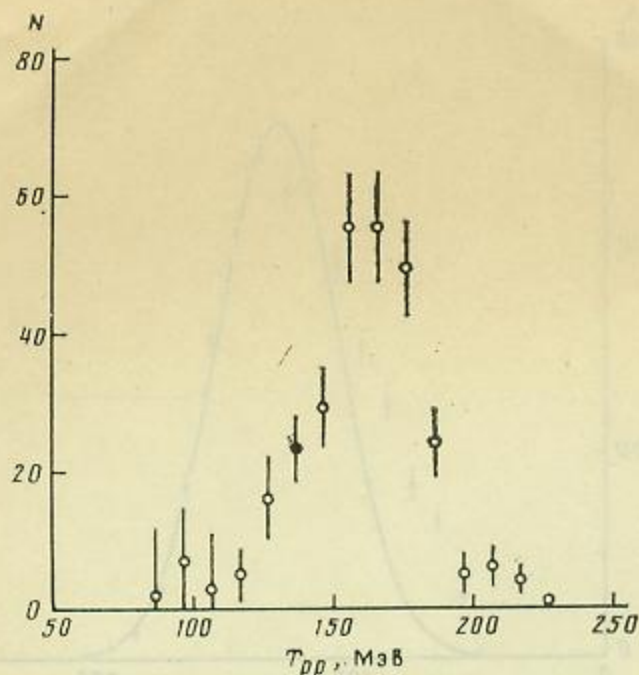


Рис. 6. Спектр суммарной энергии двух протонов из реакции $\pi^+ d \rightarrow pp$, $T_\pi = 32$ МэВ

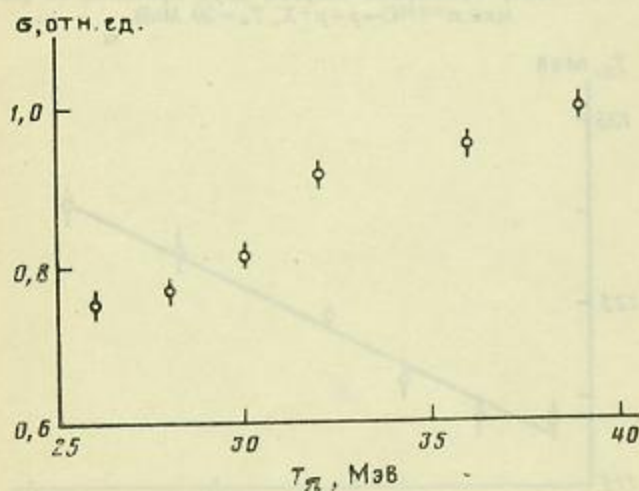


Рис. 7. Энергетическая зависимость полного сечения для событий из всего спектра энергий двух протонов

Правомерность такой интерпретации можно проиллюстрировать одним из полученных нами предварительных результатов по поглощению π^+ -мезонов дейтронами. На рис. 6 приведено распределение по сумме энергий двух протонов, полученное для пионов с энергией 32 МэВ в идентичных условиях с заполнением камеры установкой газообразным дейтерием. Представленное распределение так же, как и для углерода, соответствует событиям, когда оба протона попадают в центральную секцию годоскопа. Критерии отбора событий использовались те же, что и в случае углерода. Симметричность формы и положение максимума пика соответствуют ожидаемому и свидетельствуют о допустимости предложенной методики анализа данных по поглощению на углеродной мишени.

На рис. 7 представлена энергетическая зависимость полного сечения реакции (в угловом диапазоне, определяемом центральной секцией установки) в относительных единицах, определенного для всех событий с сум-

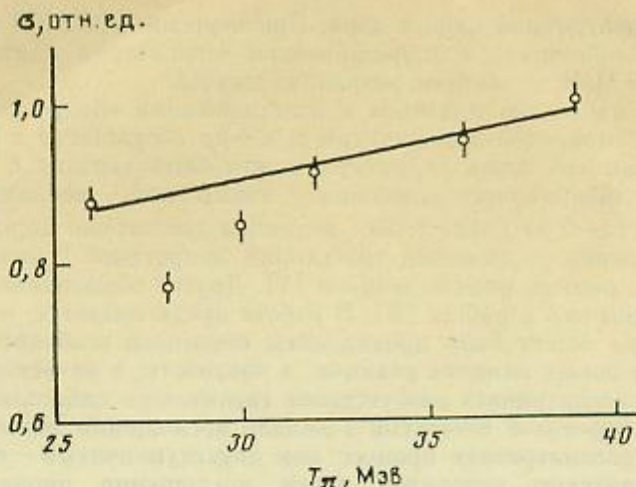


Рис. 8. То же, что и рис. 7, но для событий из выделенной под пиком части

марным энерговыделением двух протонов, большим 60 МэВ. При определении относительных значений сечений учитывались: доля пионов в пучке в зависимости от энергии, поправки на распад пиона, значения эффективного телесного угла для каждой энергии пучка. Зависимость на рис. 7 указывает на возможную особенность (минимум) при энергиях пионов 28–30 МэВ. С увеличением порога обрезания по суммарной энергии протонов минимум проявляется сильнее. Для более четкого выявления особенности представляется целесообразным выделение симметричной области в районе максимума и построение энергетической зависимости сечений для событий из этих областей, которые, очевидно, должны в большей степени соответствовать кваздейтронному механизму поглощения. Процедура выделения была такова: экспериментальный спектр фитировался гауссианом, причем точки левее максимума отбрасывались. Пример такого фита показан на рис. 4. На рис. 8 представлена энергетическая зависимость сечения для выделенной таким образом части событий. Прямая на рис. 8 есть результат фита линейной функцией по четырем точкам (данные при 28 и 30 МэВ исключены). Для этого фита получено значение $\chi^2=0,95$, тогда как при фите всех шести точек значение χ^2 получается равным 13,8. Отклонения от линейной зависимости в точках 28 и 30 МэВ составляют 4–5 стандартных отклонений. Положение особенности можно оценить как $28,5 \pm 0,5$ МэВ. Ширина видимой структуры составляет 3 МэВ. Энергетический разброс пучка также составляет величину ~ 3 МэВ, следовательно, собственная ширина структуры < 3 МэВ.

Таким образом, резонансное поведение имеет место для событий, соответствующих преимущественно кваздейтронному механизму. Если сопоставить эту зависимость с данными для процесса $\pi^+d \rightarrow pp$ (рис. 1), то наблюдается строгое соответствие относительного поведения сечений этих процессов. Последнее обстоятельство можно считать еще одним подтверждением кваздейтронного происхождения событий из выделенной симметричной области спектра энергий двух протонов. Оценка абсолютного значения полного сечения при энергии 39 МэВ составляет 24 ± 4 мбн. Ошибка в абсолютной нормировке в основном связана с неточностью знания акцептанса установки. Относительные ошибки в энергетической зависимости составляют 3%.

5. Выводы

Получены первые экспериментальные результаты по поглощению π^+ -мезонов с энергиями 26–39 МэВ на ядре ^{12}C с испусканием двух протонов. Показано, что основным механизмом поглощения является поглоще-

ние на квазидейтронной паре в ядре. При энергии ~ 28 МэВ обнаружена резонансная особенность в энергетической зависимости полного сечения с шириной < 3 МэВ по энергии падающих пионов.

Возможно несколько подходов к интерпретации обнаруженного явления. Один из вариантов для реакции $\pi^+d \rightarrow pp$ обсуждался в работе [6]. Было показано, что такая структура может быть связана с возможным наблюдением дибарионного резонанса с квантовыми числами 3P_2 при $T_n = 28$ МэВ ($v = 2,04$ ГэВ/ c). Эта величина достаточно хорошо согласуется с положением реджевской траектории дипротонов с изоспином $I=1$ в точке $J=2$ в рамках модели мешков [7]. Другое объяснение этого явления рассматривается в работе [8]. В работе предполагается, что наблюдаемая структура может быть проявлением пороговой особенности (касна) при открытии новых каналов реакции, в частности, в качестве такого канала можно рассматривать возбуждение гигантского дипольного резонанса. Усиление пороговой аномалии в канале поглощения может быть объяснено, если рассматривать процесс как двухступенчатый — сначала возбуждение гигантского резонанса, затем поглощение пиона. В таком подходе энергия пиона попадает в область < 5 МэВ, где имеет место резкий, как $1/v$, рост сечения поглощения. В этой работе дается оценка величины возможного эффекта 3 мбн, что близко к наблюдаемому. Еще один вариант интерпретации связан с возможным проявлением пионных степеней свободы в ядре. Эта идея была предложена в работе [9]. Предполагается, что низкоэнергетический пион может образовать с группой нуклонов в ядре связанное состояние. При этом можно ожидать, что образование такого состояния будет приводить к вылету фрагментов из ядра. В данном случае при поглощении пиона энергия передается преимущественно той группе нуклонов, которая и образует с пионом указанное состояние. Этот эффект должен быть лучше виден на легких ядрах, так как на более тяжелых ядрах ферми-движение нуклонов будет скрадывать его проявление.

Очевидно, что для подтверждения резонансного явления и более точного определения его характеристик требуются дальнейшие измерения, в частности требуется большее число точек в районе видимой структуры. Такие измерения в настоящее время проводятся нами в том числе и для других ядер, и в первую очередь измерения элементарного процесса $\pi^+d \rightarrow pp$ в этой области энергий.

Литература

1. Дантев А. Б., Страковский И. И. Компиляция экспериментальных данных для процесса $pp \leftrightarrow d\pi^+$. Л.: ЛИЯФ, 1985.
2. Волченков В. А. и др. Препринт ЛИЯФ № 612. Л., 1980.
3. Гайсак И. И. и др. Сообщение ОИЯИ 13-87-820. Дубна, 1987.
4. Гайсак И. И. и др. // ПТЭ. 1988. № 1. С. 22.
5. Акимов Ю. К. и др. // ПТЭ. 1980. № 4. С. 24.
6. Страковский И. И., Пасюк Е. А. // Тр. IV семинара по программе исследований на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР. М., 1986. С. 241.
7. Кондратюк Л. А. // Тр. 2-го симпозиума по NN- и nA -взаимодействиям при промежуточных энергиях. Л., 1984. С. 402.
8. Khankhasaev M. Kh. JINR Preprint E4-89-821. Dubna, 1989.
9. Rowe G., Vogt E. // Nucl. Phys. 1978. V. A302. P. 511.

AKIMOV Yu. K., HAYSACK I. I., GORNOV M. G., GOSTKIN M. G.,
GUROV Yu. B., KRUGLOV S. P., MERZLYAKOV S. I., OGANESYAN K. O.,
PASYUK E. A., POROKHOVOY S. Yu., RUDENKO A. I., STRAKOVSKY I. I.,
SHISHKOV A. V.

STUDYING $\pi^+ + {}^{12}\text{C} \rightarrow p + p + X$ REACTION AT PION ENERGIES 26 — 39 MeV

First experimental results on absorption of positive pions with 26–39 MeV energy in carbon accompanied by emission of two protons are obtained. Absorption on the quasiduetron pair in the nuclei is shown to be the dominant absorption mechanism. Resonance-like singularity is observed in the energy dependence of the total cross section for 28 MeV pion energy, the width of the structure being less than 3 MeV.