

объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

Т 769

P1-90-79

Ю.А.Троян, А.В.Никитин, В.Н.Печенов,
Ю.Д.Безногих, А.Г.Дорошенко, А.П.Царенков

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗКИХ РЕЗОНАНСОВ
В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ СЕЧЕНИИ УПРУГОГО
ПРОТОН-ПРОТОННОГО РАССЕЯНИЯ
В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ $116 \div 199$ МэВ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1990

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы ведется интенсивный поиск узких резонансов в системе двух барионов.

Интерес к этой проблеме обусловлен двумя обстоятельствами. Вр-первых, сигналы от узких дибарионных резонансов обнаруживаются в очень широком диапазоне эффективных масс - почти от суммы масс двух протонов до значений, близких к $2,3 \text{ ГэВ}/c^2$. При этом плотность уровней возбуждений довольно высока. В квантовой хромодинамике в рамках сферического мешка не удается объяснить наблюдаемый спектр резонансов, особенно при массах ниже порога мезообразования. Для объяснения приходится использовать представления о струнах, дикварках и т.д. Во-вторых, ширины подавляющего большинства кандидатов в резонансы оказываются сравнимыми с экспериментальным разрешением по массам, и, следовательно, истинные ширины могут оказаться чрезвычайно малыми, что будет свидетельствовать о существовании новых, неизвестных пока, правил запрета для распада таких систем по сильному каналу. Экспериментальные указания на очень малые ширины резонансов /порядка $1 \text{ МэВ}/c^2$ / имеются в работах ⁷⁻¹⁰. В рамках мешкового подхода малые ширины дибарионных резонансов можно получить при больших размерах мешка ¹¹. Но тогда, по-видимому, снова придется вводить растущие с расстоянием потенциалы между кварками, т.е. переходить снова к струнной картине взаимодействий. При этом возникнут все проблемы, связанные с "запиранием" кварков, которое является теоретическим постулатом и выходит за рамки пертурбативной КХД.

Особенно интересны резонансы с массами, меньшими $2m_p + m_\pi$, которые характеризуются небольшими возбуждениями и ограниченным числом каналов распада /на 2 бариона и на 2 бариона плюс γ -кванты/. Можно думать, что из-за малого импульса, приходящегося на один кварк внутри такого дибариона, кварки, в среднем, находятся в такой системе на больших расстояниях друг от друга, и эти состояния могут служить хорошей лабораторией для изучения проблем конфайнмента.

С другой стороны, узкие нуклон-нуклонные резонансы с малыми возбуждениями могут возникать внутри ядер /энергии фермидвижения хватает для этого/ и существовать внутри них какое-то время, достаточно большое, однако, по сравнению с временем сильного взаимодействия адрона с ядром. Тогда для полного

понимания структуры ядра и картины адрон-ядерных взаимодействий необходимо учитывать эффекты от резонансов подобного рода.

О кварковых подходах для объяснения дибарионов имеется обширная литература. Мы укажем для ориентировки лишь на работы^{/1-4/} и на ссылки в них.

Вторая возможность, рассмотренная Ю.Е.Покровским, состоит в учете многомезонных обменов и возбуждения Δ -изобары в промежуточных состояниях при вычислении амплитуды нуклон-нуклонного взаимодействия^{/5/}. Предсказываемый ряд резонансов близок к экспериментально наблюдаемому.

Третья версия, объясняющая спектр pp -резонансов и их малые ширины, предложена недавно Б.А.Арбузовым с сотрудниками^{/6/}. Она заключается во введении релятивистского кулоновского квазипотенциала с поглощающей частью при положительных энергиях связи. Соответствующие расчеты дают как серию наблюдаемых особенностей в эффективных массах двух протонов, так и объясняют малые ширины этих резонансов, которые должны быть порядка электромагнитных. Привлекательность этого подхода состоит в отсутствии подгоночных параметров.

Все три объяснения наблюдаемых узких дибарионных резонансов имеют дело с непертурбативными эффектами в теории. Все они приходят к дальнему действию, учет которого существенно меняет наши представления о силах, действующих между частицами.

В данной работе мы сосредоточились на поиске резонансных эффектов в системе двух протонов при эффективных массах ниже порога мезообразования $M_{pp} < 2016 \text{ МэВ}/c^2$.

Существует ряд экспериментов по поиску эффектов узких нуклон-нуклонных резонансов в этой области масс $/7 \div 19/$.

Во всех этих экспериментах получены указания на существование особенностей в спектрах эффективных масс двух нуклонов / в основном, двух протонов/ с ширинами, меньшими $10 \text{ МэВ}/c^2$.

Необходимо отметить, однако, что во всех работах экспериментальное разрешение по массам составляет несколько $\text{МэВ}/c^2$, и при большой плотности резонансов желательно иметь лучшие точности.

Наблюдаемые эффекты превышают фон на $3 \div 4$ стандартных отклонения, и, следовательно, требуется дальнейшее увеличение статистики.

В данной работе мы предприняли попытку прецизионного измерения эффекта как в смысле достижения высокого энергетического разрешения, так и хорошего статистического обеспечения.

Если дибарионы с изотопическим спином $I = 1$ существуют и распадаются на два протона, то в сечении упругого pp -рассеяния следует ожидать особенностей. В случае одноканального

резонанса это сечение может достигать унитарного предела, который при энергиях $100 \div 200$ МэВ составляет несколько десятков миллибарн/20/. Эксперимент по измерению энергетической зависимости относительно дифференциального сечения упругого рр-рассеяния выполнен нами в области энергий первичных протонов $116 \div 199$ МэВ, что соответствует области эффективных масс двух протонов $1934 \div 1974$ МэВ/с², в которой рядом авторов получены указания на существование узких нуклон-нуклонных резонансов.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка расположена внутри линейного промежутка синхрофазотрона ОИЯИ. В качестве мишени используется тонкая пленка, изготовленная из сплава обычного и дейтерированного полиэтилена с примерно одинаковым содержанием водорода и дейтерия. Под заданным углом в лабораторной системе измеряется отношение $R = N_{\text{упр}}^{\text{р}} / N_{\text{М}}$ как функция энергии налетающих протонов. Здесь $N_{\text{упр}}^{\text{р}}$ - число упруго рассеянных в данный телесный угол протонов, пропорциональное сечению упругого рр-рассеяния; $N_{\text{М}}$ - число отсчетов мониторирующего процесса. В качестве мониторирующих выбирались случаи упругого рд-рассеяния или протоны из неупругих взаимодействий, связанные с процессами фрагментации в мишени. Независимость от светимости мишени легла в основу эксперимента.

Функция $R (M_{\text{pp}})$ исследуется с помощью двух телескопов из полупроводниковых детекторов T_{I} и T_{II} , расположенных под углом 73 и 71° к пучку в лабораторной системе координат. Каждый телескоп состоит из трех кремниевых детекторов. Первые два из них работают в режиме совпадений и идентифицируют частицы по ΔE - E -сигналам / ΔE - энергосодержание частицы в первом детекторе, E - во втором/; третий включен на антисовпадения с первыми двумя, что обеспечивает отбрасывание пролетных частиц. Телесный угол, покрываемый каждым телескопом, $\sim 10^{-4}$ ср.

Пучок наводится на мишень при спаде магнитного поля ускорителя от 800 до 400 Гс в течение 1 с. Вместе с сигналами от детекторов аппаратура фиксирует текущее значение магнитного поля, которое выдается индукционным интегрирующим датчиком с шагом 1 Гс. Долговременная нестабильность магнитного поля в течение сеанса не превышала 1 Гс. Она контролировалась измерением частоты ускоряющего электрического поля, когда магнитное поле достигает заданного значения, а пучок находится на орбите с заданным радиусом.

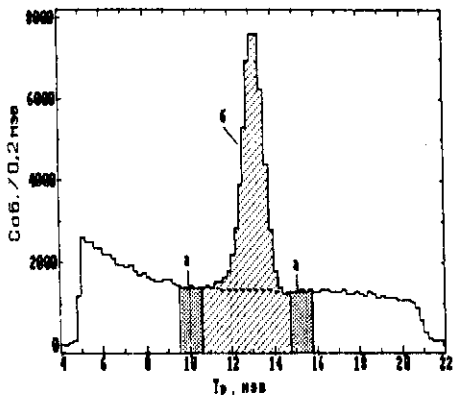


Рис. 1. Распределение протонов по кинетической энергии, зарегистрированных в первом телескопе, при полях $H = 695 \pm 697$: а - области, выбранные для определения фона под упругим пиком; б - область упругого пика.

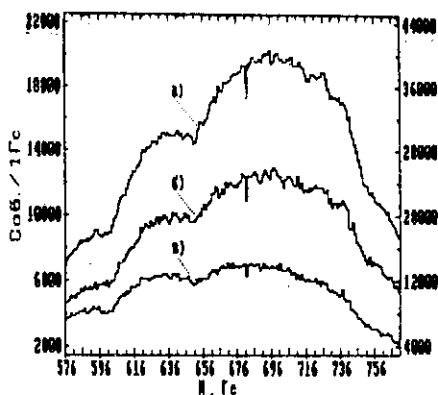


Рис. 2. Выход различных частиц с мишени как функция магнитного поля H : а - неупругие протоны /правая шкала/; б - упругие протоны; в - упругие дейтроны.

Шаг измерений по M_{pp} в середине исследуемого интервала эффективных масс составляет $0,2 \text{ МэВ}/c^2$. Полная ширина на полувысоте функции разрешения по массам $\Gamma_{\text{разр.}} \approx 0,26 \text{ МэВ}/c^2$. Основной вклад в эту величину вносит ширина интервала по магнитному полю $\Delta H = 1 \text{ Гс}$ дает полный разброс в измерении M_{pp} , равный $\approx 0,2 \text{ МэВ}/c^2$.

Более подробно об аппаратуре см. /21/. На рис. 1 в качестве примера показано распределение по кинетической энергии протонов, зарегистрированных в первом телескопе при полях $H = 695 \pm 697 \text{ Гс}$. Хорошо виден пик от упругого рассеяния. Выделение упругих событий производится вычитанием фоновых событий под упругим пиком. Число фоновых событий определяется линейной интерполяцией фона слева и справа от упругого пика /области "а"/ в область пика /область "б"/. При этом число упругих событий слабо зависит от границ, определяющих пик, но данный метод выделения может служить источником систематической ошибки.

Подобная картина наблюдается и для дейтронов.

На рис. 2 изображены распределения чисел неупругих, упругих протонов /а, б/ и упругих дейтронов /в/ в зависимости от магнитного поля в ускорителе. Отношение чисел неупругих и упругих протонов при полях $H = 592, 632, 692 \text{ Гс}$ одинаково в пределах ошибок $/3,17 \pm 0,05; 3,10 \pm 0,04; 3,14 \pm 0,03$ соот-

ветственно/, что говорит об отсутствии постороннего фона для протонов, идущего не от мишени. В то же время число неупругих протонов примерно в 6 раз больше, чем упругих дейтонов. Это позволяет произвести мониторинг упругого рр-рассеяния по неупругим протонам с лучшей точностью, чем по упруго рассеянным дейтонам.

Всего отобрано 3,38 млн протонов от упругого рр-рассеяния, 1,65 млн дейтонов от упругого рd-рассеяния и 10,83 млн случаев протонов от неупругих процессов в мишени.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛА

Для сопоставления результатов все распределения, обсуждающиеся в данном разделе, представлены в нормированном виде. С этой целью распределения аппроксимировались полиномами. Степень полинома выбирается так, чтобы значение $\bar{\chi}^2$ на одну точку распределения было минимальным, но не отличалось от 1 более чем на одну ошибку. Нормированное распределение получается путем деления физического распределения на соответствующий полином.

Для выделения систематических ошибок были построены распределения отношений чисел неупругих, упругих протонов и упругих дейтонов, зарегистрированных в первом и втором телескопах.

Таблица 1

	$\bar{\chi}_1^{-2}$	$\sqrt{D_{\chi_1^2}}$
$N_{pI}^{упр} / N_{pII}^{упр}$	0,94	1,25
$N_{dI}^{упр} / N_{dII}^{упр}$	1,04	1,35
$N_{pI}^{неупр} / N_{pII}^{неупр}$	0,95	1,22

Во второй колонке таблицы указано среднее значение $\bar{\chi}_1^2$ на одну точку распределения, в третьей - корень из дисперсии распределения. Ошибка в определении $\bar{\chi}_1^2$ равна $\approx 0,10$, ошибка в определении корня из дисперсии $\approx 0,07$ для числа точек $k = 195$. При отсутствии систематических ошибок в этих фоновых распределениях, где, конечно, нет никаких резонансных эффектов, $\bar{\chi}_1^2$ должно быть 1, а $\sqrt{D_{\chi_1^2}} = 1,41$. Из таблицы видно, что воз-

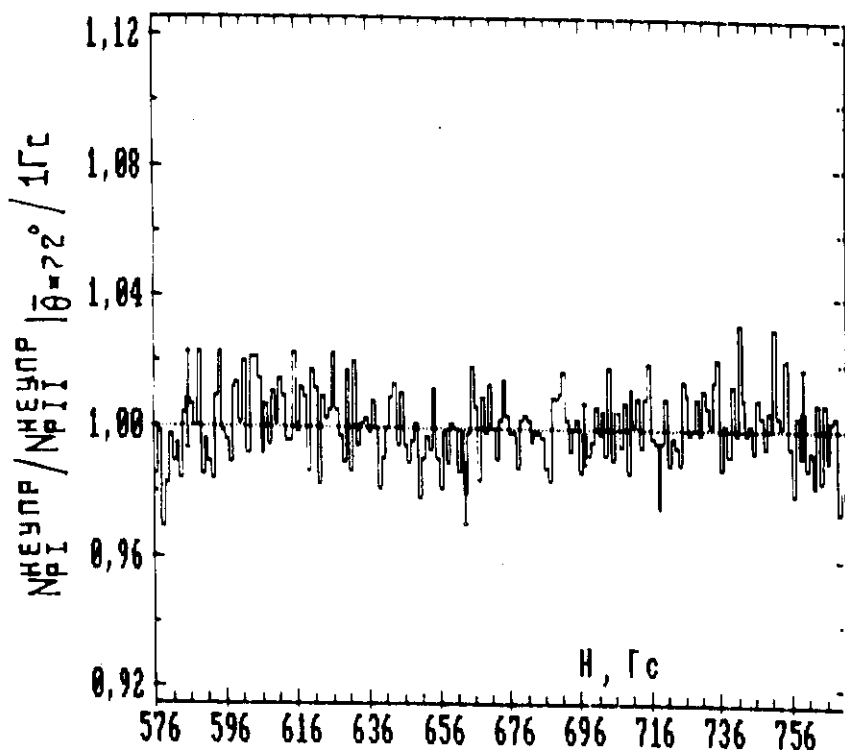


Рис. 3. Нормированное распределение отношений чисел неупругих протонов из первого и второго телескопов.

возможные систематические ошибки невелики и могут составлять около 5% от статистических. Это связано, как мы уже отмечали, с методом определения числа упругих событий и со способом выбора нормирующего полинома.

В качестве примера такого фонового распределения на рис. 3 приведено нормированное распределение отношения $N_{\text{неупр}}^{\text{I}} / N_{\text{неупр}}^{\text{II}}$ / третья строка табл. 1/.

На рис. 4 приведено распределение $N_{\text{упр}}^{\text{I}} / N_{\text{неупр}}^{\text{I}}$. Значения χ^2 и $\sqrt{D\chi^2}$ для этого распределения равны соответственно 0,95 и 1,31, что близко к чисто фоновым значениям /см. табл. 1/. Это еще раз свидетельствует об отсутствии каких-либо примесей в неупругие протоны от процессов, не происходящих в мишени во всем диапазоне магнитного поля.

Отметим, однако, сгущение точек в районе полей 687 и 752 Гс. Им соответствуют значения эффективных масс рd-систем-

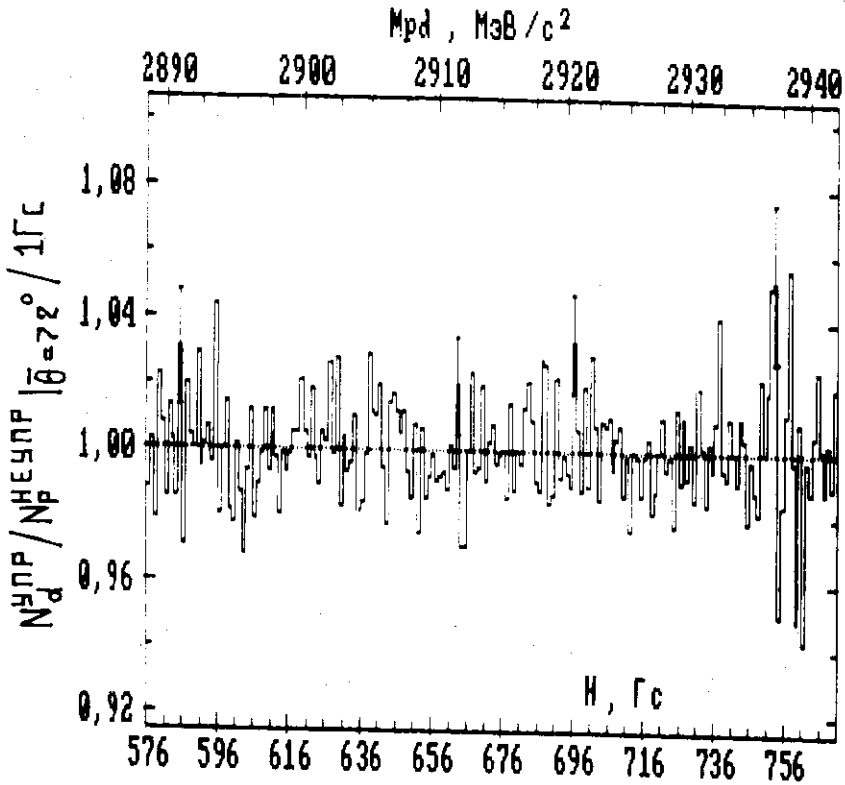


Рис. 4. Нормированное распределение отношений чисел упругих дейтронов и неупругих протонов.

мы, равные 2918 и 2937 МэВ/с². В работах /12,22/ наблюдались резонансы в трехнуклонных системах при очень близких значениях масс /2915 и 2940 МэВ/с²/. На имеющейся статистике мы не можем делать каких-либо заключений о существовании эффектов, но при мониторинговании по упругим дейтонам в отношениях $N_{упр}^d / N_{неупр}^p$ могут возникать нерегулярности, связанные с резонансами в pd -системе. Некоторые из них могут совпадать с положениями резонансов в pp -системе и ослабить искомые эффекты.

На рис. 5 показано распределение отношения $N_{упр}^d / N_{неупр}^p$. χ_1^2 и $\sqrt{D_{\chi_1^2}}$ равны, соответственно, 0,95 и 1,47. Отличие корня из дисперсии от среднего фонового уровня на 2,5 ошибки может свидетельствовать о существовании какого-то эффекта. При мас-

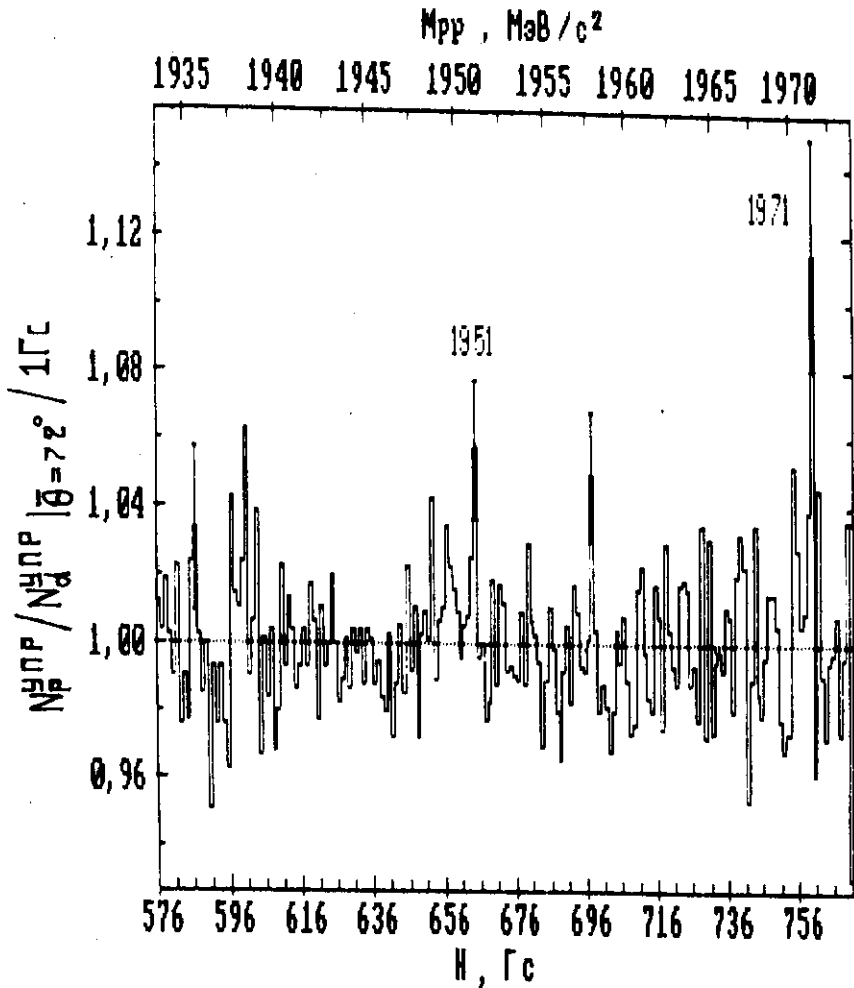


Рис. 5. Нормированное распределение отношений чисел упругих протонов и неупругих дейтронов.

сах системы двух протонов 1951 и 1971 МэВ/ c^2 видны сгущения. Если считать резонансами двухбинные выбросы в этом районе полей, то статистическая значимость эффектов равна 92 и 94% соответственно. Статистическая значимость определяется как $I-P$, где P - вероятность флуктуации фона в нескольких рядом расположенных бинах на число ошибок, полученных в этих бинах в любом месте распределения, содержащего 195 точек.

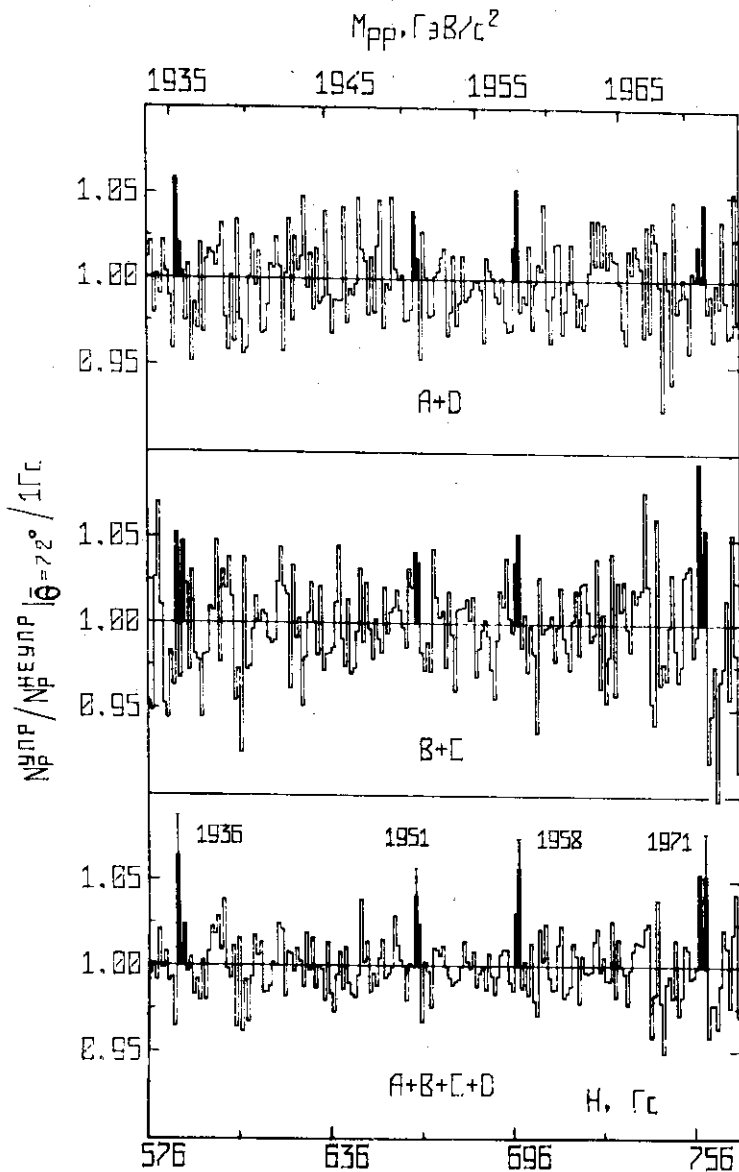


Рис. 6. Нормированное распределение отношений чисел упругих протонов и неупругих протонов для частот статистики $A + D$, $B + C$ и суммы $A + B + C + D$.

На рис. 6 представлено распределение отношения $N_{\text{пр}}/N_{\text{непр}}$. Верхнее распределение $/A + D/$ - для части статистики, среднее $/B + C/$ - для другой, независимой части статистики, нижнее - сумма двух верхних распределений. Из рисунка видно уменьшение случайных флуктуаций при увеличении статистики.

Для суммарного распределения $\bar{\chi}_1^2$ и $\sqrt{D_{\chi_2^2}}$ равны 1,02 и 1,62, соответственно, что довольно сильно отличается от фоновых уровней /см. строки 1 и 3 табл. 1/. При массах 1936, 1951, 1958 и 1971 МэВ/с² видны сгущения. Статистические значимости предполагаемых резонансов равны 93; 80; 99,4 и 97% соответственно.

Оценка ширины наблюдаемых особенностей дает величину 0,04 МэВ/с², если функция разрешения по массам имеет брейт-вигнеровский вид и 0,14 МэВ/с², если ее вид - гауссово распределение.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работах/23/ получены указания, что дибарионные резонансы с массами в районе 1936 и 1958 МэВ/с² распадаются также по каналам, содержащим γ -кванты. Наличие таких альтернативных каналов распада уменьшает вероятность распада на 2 протона и, с другой стороны, свидетельствует об очень малой ширине резонансов.

Проведем теперь сравнение представленных результатов с данными, полученными нами при исследовании спектров эффективных масс двух протонов в реакциях pp -взаимодействий в 1-метровой водородной пузырьковой камере ЛВЭ ОИЯИ. Часть из них опубликована в работах/7-10,24/.

На рис. 7 представлена часть распределения эффективных масс двух протонов из реакций $pp \rightarrow pp\pi^0$ и $pp \rightarrow pp\pi^+\pi^0$ при $P_{\text{п}} = 1,42; 1,73; 2,23; 3,83$ ГэВ/с /рис. 4 работы/24//. Из сравнения рис. 6 и 7 видно, что положения наблюдаемых особенностей в обоих экспериментах совпадают с точностью до 1 МэВ/с² /резонанс при массе 1965 из рис. 7 выглядит как сгущение точек на рис. 6/.

В табл. 2 приведено сравнение полученных в данной работе масс резонансов с предсказаниями упоминавшихся во введении моделей.

В первой колонке таблицы 2 приведены значения масс статистически значимых резонансов, полученных в данном эксперименте, в остальных - предсказания моделей, наиболее близкие к эксперименту. Ошибки, соответствующие значениям теоретических масс в КХД, характеризуют точность предсказаний.

Таблица 2

$\sigma_{\text{МЭВ}} = \Delta M_{\text{Э}} / \text{МЭВ}/\text{с}^2$	КХД ^{/6/}	КВ. яд. ^{/5/}	ВСОС ^{/4/}
1936 ± 0,3	1936 ± 0,5	1939	1936
1951 ± 0,3	1951 ± 0,6		1954
1958 ± 0,3	1958 ± 0,6	1956	1957
1971 ± 0,5	1971 ± 0,7		1975

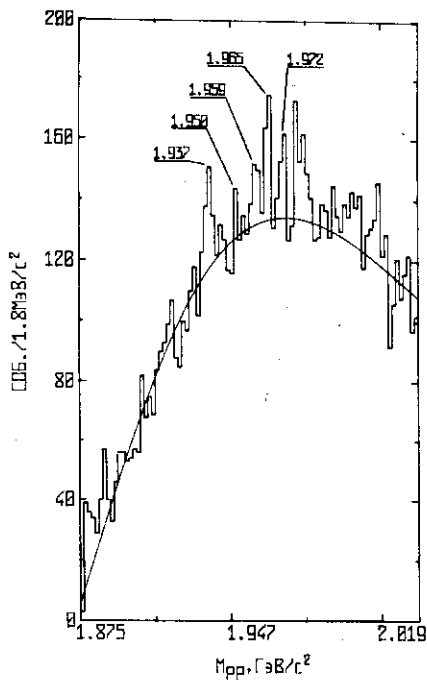


Рис. 7. Распределение эффективных масс pp из реакций $pp \rightarrow pp\pi^-$ и $pp \rightarrow pp\pi^-\pi^0$ при $P_{\text{п}} = 1,42; 1,73; 2,23$ и $3,83$ ГэВ/с /см. рис.4 работы/24//.

ВЫВОДЫ

Получены указания на существование узких /порядка $0,1$ МэВ/с²/ особенностей в дифференциальном сечении упругого pp -рассеяния на уровне 3 ± 4 стандартных отклонений над фоном. Положение особенностей близко к тому, что наблюдается с тем же уровнем значимости в неупругих реакциях $pp \rightarrow pp\pi^-$ и $pp \rightarrow pp\pi^-\pi^0$.

Весь имеющийся материал не дает оснований сделать выбор в пользу какого-то одного из трех теоретических объяснений наблюдаемых эффектов тем более, что ни в одной из моделей нет расчетов ожидаемых ширин резонансов. Однако ясно, что во всех случаях мы имеем дело с новым явлением в физике частиц, связанным, по-видимому, с проявлением не изученных пока непертурбативных эффектов.

Авторы благодарят сотрудников группы СЯО, обеспечивших получение на своей установке материала по упругому рр-рассеянию, все службы синхрофазотрона ОИЯИ, создавшие и поддерживавшие довольно сложный режим работы ускорителя в этом эксперименте, дирекцию ЛВЭ за поддержку данного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.И.Бажанский и др. - ОИЯИ, P2-88-501, Дубна, 1988.
2. С.М.Доркин и др. - ЯФ, 1982, 36, в.5/11/, с.1244.
3. L.A.Kondratyuk, A.V.Vasilets - ИТЕР, 128-88, М., 1988.
4. Ю.А.Троян - ОИЯИ, P2-86-35, Дубна, 1986.
5. Ю.Е.Покровский - ЖЭТФ, 1988, т.94, вып.10, с.55.
6. Б.А.Арбузов и др. - НИИЯФ МГУ, 89-1/78, М., 1989.
7. К.Бешлиу и др. - ОИЯИ, Д1-83-815, Дубна, 1983.
8. Ю.А.Троян и др. - Кр. сообщения ОИЯИ, №13-85, Дубна, 1985, с.12.
9. К.Бешлиу и др. - ОИЯИ, Д1-85-433, Дубна, 1985.
10. Ю.А.Троян и др. - ОИЯИ, Д1-88-329, Дубна, 1988.
11. А.А.Байрамов и др. - ЯФ, 1984, 39, с.44.
12. О.Б.Абдинов и др. - Кр. сообщения ОИЯИ №15-86, Дубна, 1986, с.34.
13. С.А.Азимов и др. - ЯФ, 1985, 42, вып.4, с.93.
14. S.A.Azimov et al. - PTI, 60-80, ИТЕР, Tashkent, 1988.
15. Г.Н.Агакишиев и др. - ОИЯИ, 1-84-103, Дубна, 1984.
16. V.P.Andreev et al. - Z. Phys. A, Atomic Nuclei, 1987, 327, p.363.
17. B.Tatischeff et al. - Z. Phys. A, Atomic Nuclei, 1987, 328, p.147.
18. A.S.Esaulov et al. - Yad. Fiz., 1987, 45, p.410.
19. R.J.Arnold et al. - PRL, 1988, 61, p.806.
20. В.Л.Любошиц - ОИЯИ, P2-88-507, Дубна, 1988.
21. В.В.Авдейчиков и др. - ОИЯИ, P1-90-52, Дубна, 1990.
22. J.Kallne et al. - PR, 1983, C28, p.304.
23. О.Б.Абдинов и др. - ОИЯИ, P1-88-102, Дубна, 1988.
24. Ю.А.Троян и др. - ОИЯИ, P1-90-78, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 февраля 1990 года.