

С 346.2  
Т-769

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1 - 4055

Ю.А.Троян

НЕУПРУГИЕ  $np$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПРИ ЭНЕРГИИ ОТ 2 ДО 10 ГЭВ

Специальность № 040  
экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1968

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук М.И.Соловьев

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН СССР М.Г.Мещеряков,

доктор физико-математических наук В.Г.Шевченко.

Ведущее предприятие: Институт физики высоких энергий.

Автореферат разослан " " 1968 г.

Защита диссертации состоится " " 1968 года  
на заседании Ученого Совета Лаборатории высоких энергий  
ОИЯИ, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ.

Ученый секретарь Совета

А.А. Кузнецов

Ю.А.Троян

1 - 4055

НЕУПРУГИЕ  $np$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПРИ ЭНЕРГИИ ОТ 2 ДО 10 ГЭВ

Специальность № 040  
экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук

1155

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

В настоящее время нет еще, по-видимому, достаточного количества экспериментальных фактов, на основе которых можно было бы создать последовательную теорию взаимодействий элементарных частиц.

Поэтому цель исследований в физике высоких энергий, с одной стороны, — охватить возможно более широкий класс явлений, с другой, — получить точные количественные характеристики процессов.

Значительную долю взаимодействий составляют неупругие взаимодействия, при которых изменяются первоначальные внутренние характеристики частиц.

Если столкновения  $\pi$ -мезонов с нуклонами сравнительно хорошо изучены до энергий в несколько Гэв, то данные по неупругим нуклон-нуклонным процессам в этой области энергий до сих пор очень скудны. В основном они относятся к взаимодействиям протонов с протонами.

Работ, посвященных изучению нейтрон-протонных соударений, имеется очень мало, хотя исследование процессов с нуклонами, находящимися в разных зарядовых состояниях, может дать существенную дополнительную информацию о меха-

низме взаимодействий при высоких энергиях. Это объясняется, во-первых, отсутствием монохроматических пучков нейтронов, при работе с которыми можно было бы применять стандартные кинематические методы обработки, во-вторых, отсутствием детекторов, позволяющих с высокой эффективностью регистрировать вторичные нейтральные частицы.

Исследованию неупругих нейтрон-протонных взаимодействий в области энергий выше 1 миллиарда э.в. посвящено лишь несколько работ, выполненных камерной и фотоэмульсионной методиками.

Основные результаты этих работ - установление преимущественно периферического характера нуклон-нуклонных взаимодействий и получение указаний на образование нуклонных изобар в этих процессах.

Использованная нами для изучения неупругих  $p-p$  взаимодействий пропановая камера обладает рядом преимуществ, одним из которых является высокий процент содержания водорода в камере, что позволяет быстро набирать статистику нужных событий. Другое достоинство камеры состоит в относительно большой ( $\sim 10\%$ ) эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов.

Эти свойства пропановой пузырьковой камеры позволили нам осуществить исследования в области неупругих  $p-p$  взаимодействий и получить ряд новых физических результатов.

Диссертация состоит из четырех глав:

- I глава - методика эксперимента;
- II глава - разделение каналов реакций;
- III глава - определение спектра падающих на камеру нейтронов и сечений различных каналов  $p-p$  взаимодействий;

IV глава - исследование распределения эффективных масс  $N \pi \pi$ -комбинаций.

Ниже кратко излагается их содержание.

### 1. Методика эксперимента

В качестве мишени и детектора случаев  $p-p$  взаимодействий использовалась 24-литровая пропановая пузырьковая камера /1/. Камера располагалась в магните с полем напряженностью 15, 12 кгс на расстоянии 44,4 м от бериллиевой мишени, служившей источником нейтронов.

Мишень находилась внутри синхрофазотрона. Нейтроны выходили под углом  $0^\circ$  к траектории протонов в ускорителе. Пучок формировался стальными коллиматорами. Очистка пучка от заряженного фона производилась магнитным полем самого ускорителя. Дополнительная очистка от  $\gamma$ -квантов и электронов осуществлялась при помощи свинцового поглотителя. Для уменьшения потока нейтронов в канал был помещен брусок из легкого материала длиной 1 м. Специального окна для вывода нейтронов из вакуумной камеры ускорителя не делалось.

Загрузка камеры нейтронами регулировалась при помощи системы "обратной связи" /2/, которая осуществляла быстрый отвод пучка протонов от мишени, когда количество нейтронов, падающих на камеру, оказывалось равным заданному.

Определение направления пучка нейтральных частиц относительно координатных осей камеры производилось экспериментально по конверсионным электрон-позитронным парам

от  $\gamma$ -квантов, присутствующих в канале. Поглотитель  $\gamma$ -квантов при этом из канала убирался /3/.

Всего было получено 140000 фотографий. Просмотр их велся на просмотрных столах, а измерение событий - на полуавтоматах. Для данной работы использована лишь небольшая доля всего полученного материала.

Основные данные, относящиеся к этой главе, содержатся в работах /3,4/.

## II. Разделение каналов реакций

В диссертации изложены результаты анализа событий неупругих  $n p$ -взаимодействий, содержащих 3 и 5 заряженных следов. Реакции с образованием странных частиц здесь не изучались.

Все случаи  $n p$ -взаимодействий были разбиты на 4 класса:

1) класс "0", в котором все вторичные частицы зарегистрированы. Этот класс содержит только заряженные частицы. Среди них имеется два протона:  $n p \rightarrow p p \pi^-$ ;  $n p \rightarrow p p \pi^+ \pi^- \pi^-$ ;

2) класс " $\pi^0$ " - среди заряженных частиц присутствуют два протона. Образуются еще  $m = 1, 2, \dots \pi^0$ -мезонов. К таким реакциям относятся, например,  $n p \rightarrow p p \pi^- \pi^0$ ,  $n p \rightarrow p p \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$  и т.д.;

3) класс " $n$ ". В этом классе заряженные зарегистрированные частицы содержат один протон. Образуется один незарегистрированный нейтрон с  $m = 0, 1, 2, \dots \pi^0$ -мезонами (например,  $n p \rightarrow p p \pi^+ \pi^-$ ,  $n p \rightarrow p p \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$  и т.д.);

4) класс " $2n$ ". В этом случае вторичные заряженные частицы не содержат протонов. Образуются два незарегистрируемых нейтрона с  $m = 0, 1, 2, \dots \pi^0$ -мезонами (например,  $n p \rightarrow n n \pi^+ \pi^+ \pi^-$ ;  $n p \rightarrow n n \pi^+ \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$  и т.д.).

Выделение реакций класса "0" основано на методе минимизации функционала, составленного из параметров, характеризующих событие с последующим применением  $\chi^2$ -теста.

Выделение реакций классов " $\pi^0$ ", " $n$ ", " $2n$ " основано на исследовании решений относительно  $P_n$  уравнения

$$F(P_n) = \sqrt{P_n^2 + M_n^2} + M_p - \sum E_i - \sqrt{(P_n - \sum \vec{P}_i)^2 + M_0^2} = 0, \quad (1)$$

которое выражает закон сохранения энергии - импульса для этих классов. Здесь  $P_n$  - импульс налетающего нейтрона,

$P_i$  - импульс  $i$ -ой зарегистрированной частицы,  $E_i$  - ее энергия в определенном предположении о массе частицы,  $M_n$ ,  $M_p$ ,  $M_0$  - массы нейтрона, протона и улетевшей незарегистрированной частицы.

Для некоторых гипотез о принадлежности события к какому-либо классу реакций решения уравнения (1) могут оказаться вне физической области ( $P_n > P_{n \max} = 10,7$  Гэв/с). Такие гипотезы о событии отбрасываются.

При разделении гипотез применялись также различные способы идентификации частиц.

В работе /5/ нами получена формула, позволяющая сравнить вероятности осуществления двух гипотез в одном событии. Из нее следует, что гипотезе "0" надо отдать предпочтение перед гипотезами " $\pi^0$ ", " $n$ ", " $2n$ ", если  $\chi^2$  "0" лежит внутри некоторого, выбранного экспериментально, доверительного интервала.

Дальнейшее разделение гипотез основано на использовании того факта, что  $NN$ -взаимодействия при этих энергиях имеют ярко выраженный периферический характер. При этом нуклоны в с.ц.м. взаимодействия разлетаются в разные полусферы.

Если при импульсе нейтрона, определенном из решения уравнения (1), нуклоны летят в одну полусферу в с.ц.м., то требуется вылет большей, чем  $M_0$  массы нейтральной частицы. Следовательно, в данном событии образовались две нейтральные частицы, которые дают некоторую эффективную массу. Ее значение надо поставить в уравнение (1) и решить его снова относительно  $P_n$ . Значения  $P_n$  могут в этом случае получиться вне физической области. Такие гипотезы о событии отбрасываются при наличии других приемлемых гипотез.

Величины эффективных масс двух нейтральных частиц выбирались экспериментально из соответствующих распределений для заряженных частиц.

В событиях, где остаются приемлемыми несколько гипотез, разделение производилось путем использования соотношения, следующего из изотопической инвариантности для изучавшихся реакций:

$$\sigma[nr \rightarrow nn \pi^+ \pi^+ \pi^- (m \pi^0)] = \sigma[nr \rightarrow rr \pi^+ \pi^- (m \pi^0)] \quad (2)$$

$m = 0, 1, 2, \dots$

После применения всех изложенных методов разделения каналов реакций получено, что соотношение (2) хорошо выполняется в пределах статистических ошибок. Это указывает на правильность использованных способов выделения реакций различных типов.

Подробное изложение методов разделения каналов реакций в данном эксперименте содержится в работах /5,6,7,8/.

### III. Определение спектра падающих на камеру нейтронов и сечений различных каналов $nr$ -взаимодействий

Было просмотрено 4700 стереофотографий. На них найдено 1822 трех- и 546 пятилучевых звезд, удовлетворяющих просмотровым критериям для  $nr$ -взаимодействий. Часть этих событий отнесена к  $nC$ -взаимодействиям после кинематической обработки, а часть оказалась неизмеримой. При дальнейшем анализе использовано 1426 трехлучевых и 306 пятилучевых звезд. При определении сечений привлекался дополнительный материал (1925 пятилучевых звезд).

После применения всех способов выделения каналов реакций, описанных во второй главе, получены следующие количественные распределения событий по каналам.

Таблица 1  
3-лучевые звезды

$\chi^2 < 16$	"π <sup>0</sup> "		"π"		"2π"		Всего
	Всего	$N_{\pi^0}$	Всего	$N_{\pi^0}$	Всего	$N_{\pi^0}$	
98 (6,5%)	128 (9%)	118,5 ±86	988 (68,9%)	514 ±170	222 (15,6%)	101 ±82	1426

Таблица 2  
5-лучевые звезды

"0" $\chi^2 < 32$	"1"		"2"		"3"		Всего
	Всего	$N_{\pi^0}$	Всего	$N_{\pi^0}$	Всего	$N_{\pi^0}$	
74 (24,2%)	60 (19,6%)	50,5 $\pm 18,7$	143 (46,7%)	69 $\pm 35,4$	29 (9,5%)	7,25 $\pm 12,3$	306

Проценты в таблицах 1 и 2 представляют долю указанного канала в событиях данной множественности во всем диапазоне импульсов падающих нейтронов.

В графе  $N_{\pi^0}$  приведено число реакций в каком-либо канале, содержащих  $\pi^0$ -мезоны. Количество  $\pi^0$ -мезонов определяется по  $\gamma$ -квантам с учетом эффективности регистрации.

В каждом канале реакций можно построить распределение импульсов нейтронов, определенных из событий данного канала.

Суммируя количества событий из всех каналов в каком-либо импульсном интервале и учитывая распределения импульсов нейтронов из однолучевых звезд, которые оцениваются путем привлечения расчетов по статистической теории и соображений изотопической инвариантности, можно получить общий спектр нейтронов, падающих на камеру (рис.1). При этом предполагается, что полное сечение  $\sigma_{\text{взаимод.}}$  постоянно в области энергий от 2-х до 10 Гэв и что упругое сечение в этом интервале составляет 1/4 от полного /9,10/.

Сечения различных каналов получаются в результате деления импульсных распределений нейтронов из какого-либо конкретного канала на общий спектр падающих нейтронов. Они представлены на рис.2,3,4.

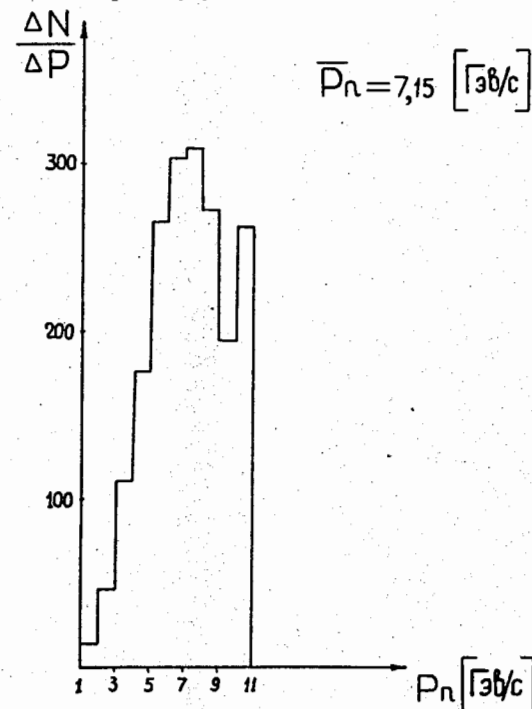


Рис.1.

В этой же главе проведен анализ влияния различных выборок, которые могут возникнуть из-за значительного количества неизмеримых событий. Анализ основан на исследовании угловых и импульсных распределений частиц в с.ц.м. взаимодействия. Показано, что никаких выборок, искажающих результат на величину, превышающую статистические ошибки, нет.

Исследованы величины погрешностей, возникающих из-за метода получения спектров нейтронов в различных каналах и из-за предположений, использованных при получении сечений. Учет всех этих погрешностей приводит к тому, что статистические ошибки, указанные на рис.2,3,4, необходимо увеличить в двух первых и двух последних импульсных интервалах в 1,5-2 раза.

При увеличении общего числа событий и увеличения эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов можно снизить не только статистические ошибки, но и погрешности метода получения сечений.

Материалы, относящиеся к главе III, можно найти в работах /4,11,12/.

#### IV. Исследование распределений эффективных масс $N\pi\pi$ -комбинаций

В различных экспериментах производился поиск нуклонной изобары с изотопическим спином  $T=5/2$ . Впервые на особенность в распределении эффективных масс  $p\pi^+\pi^+$ -комбинаций было указано в работе /13/, выполненной при облучении водородной пузырьковой камеры  $\pi^+$ -мезонами с импульсом 3,65 Гэв/с.

В дальнейшем эта особенность в  $\pi$ -мезонных облучениях была объяснена кинематическим эффектом /14/ одновременного образования изобары  $N_{1236}^{*++}$  и  $\rho^0$ -мезона в реакции

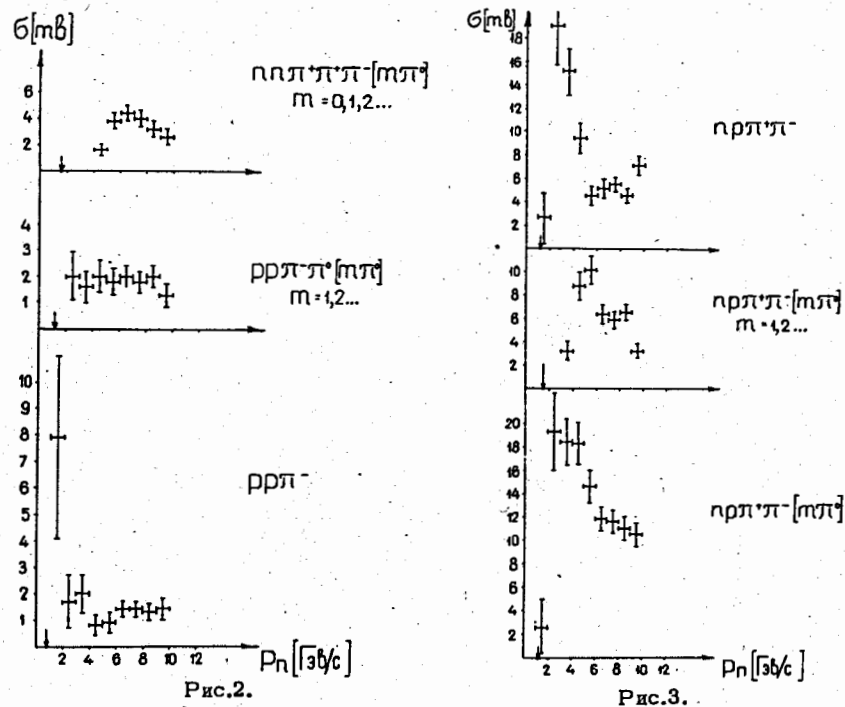
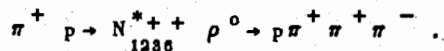


Рис.2.

Рис.3.

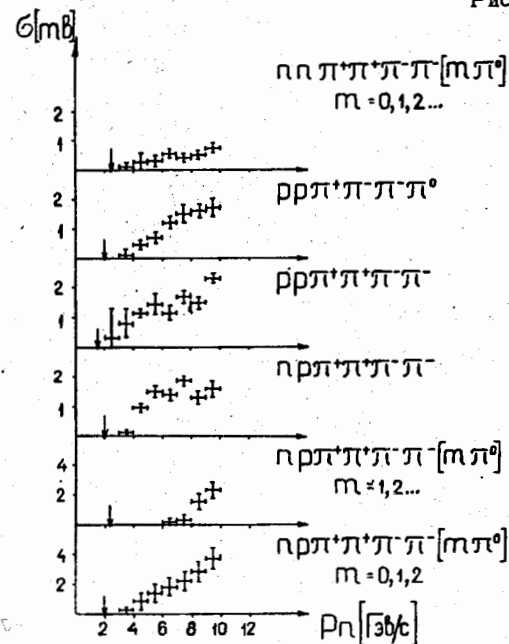
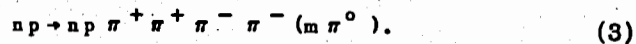


Рис.4.



Однако в NN-взаимодействиях не происходит заметного образования  $\rho^0$ -мезона и подобный эффект не существует. Отличия же от фазовой кривой наблюдаются во всех экспериментах, где изучались распределения эффективных масс  $p\pi^+\pi^+$ -комбинаций из реакции  $pp \rightarrow p\pi^+\pi^+\pi^-$ .

С целью выяснения причины возникновения особенностей в распределениях эффективных масс N $\pi\pi$ -комбинаций в данной работе было выполнено исследование реакции



Показано, что эта реакция происходит в основном через рождение нуклонных изобар  $N_{1236}^*$  в различных зарядовых состояниях. Относительная доля образования изобары  $N_{1236}^{*++}$  в реакции (3) мало меняется с увеличением импульса падающих нейтронов и составляет в среднем по спектру (44+5)%. Из изотопической симметрии реакции (3) следует, что так же рождается изобара  $N_{1236}^{*-}$   $\rightarrow p\pi^-$ . Образование изобары  $N_{1236}^{*0}$   $\rightarrow p\pi^-$  идет в (10+5)% случаев реакции (3).

Если учесть все каналы реакции (3) с образованием изобар, то можно получить удовлетворительное объяснение распределений эффективных масс  $p\pi^+\pi^+$ ,  $p\pi^+\pi^-$  и  $p\pi^-\pi^-$  без привлечения предположения об образовании изобары с

$T=5/2$ . Из нашей статистики следует, что верхний предел для образования изобары с изотопическим спином 5/2 равен 30 мкб. Из анализа распределений эффективных масс  $p\pi\pi$ -комбинаций можно оценить долю одновременного образования изобар  $N_{1236}^{*-}$   $\rightarrow p\pi^-$  и  $N_{1236}^{*+}$   $\rightarrow p\pi^+$ . Она близка к нулю.

Экспериментальные распределения эффективных масс  $p\pi\pi$ -комбинаций и результаты их описания представлены на рис.5. Функции  $F_i$  обозначают фазовые кривые, относящиеся к различным каналам реакций (3).

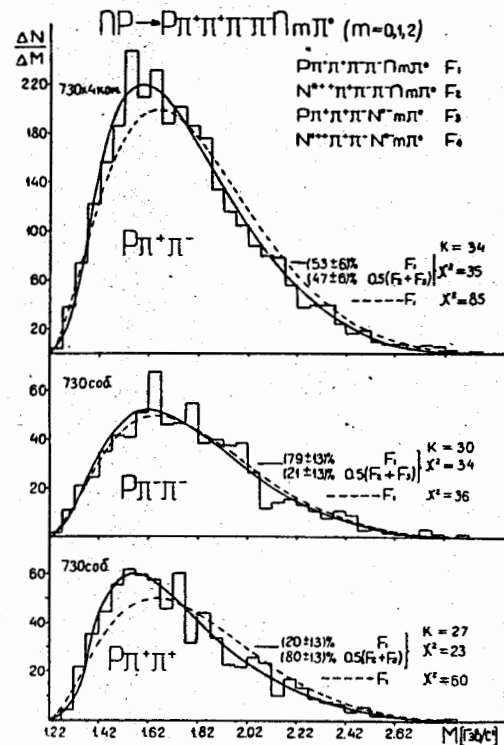
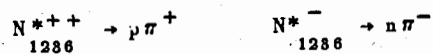


Рис.5.

Подобным образом получено объяснение вида распределений эффективных масс  $p\pi^+\pi^+$ -комбинаций во всех имеющихся в настоящее время экспериментах по  $pp$ -взаимодействиям /15,16,17/. Эти эксперименты относятся к реакции  $pp \rightarrow p\pi^+\pi^+\pi^-$  (4) и выполнены при различных энергиях падающих протонов. Нами найдено, что отличие от фазо-

вой кривой в  $p \pi^+ \pi^+$ -комбинациях можно объяснить в пределах наблюдавшейся статистики образованием изобар



Отметим, что при анализе как наших данных, так и данных других авторов учитывалась ширина изобары  $N_{1236}^*$ .  
Основные выводы главы IV опубликованы в /18,19/.

#### Краткие итоги диссертации

1. Создан канал высокоэнергичных нейтронов, практически свободный от примеси других частиц. Этими нейтронами облучена 24-литровая пропановая пузырьковая камера.

2. Разработан метод, позволивший произвести анализ неупругих  $p p$ -взаимодействий при энергии от 2 до 10 Гэв. В диссертации рассматривались взаимодействия без участия странных частиц, но этим же методом можно анализировать и события со странными частицами.

Общие идеи метода могут быть применены и к другим облучениям, использующим немонахроматические пучки нейтральных частиц.

3. Определен спектр нейтронов, вылетающих из бериллиевой мишени под углом  $\approx 0^\circ$  к траектории протонов в синхрофазотроне ОИЯИ.

Вычислены сечения различных каналов неупругих  $p p$ -взаимодействий в области энергий от 2-х до 10 Гэв. Получены зависимости этих сечений от энергии.

4. Получено удовлетворительное описание распределений эффективных масс  $p \pi \pi$ -комбинаций в реакции

$p p \rightarrow p \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^- n$  ( $n \pi^0$ ). Найдено, что отличия этих распределений от статистического фона объясняются эффектами рождения изобар  $N_{1236}^*$  в различных зарядовых состояниях. Верхний предел сечения образования нуклонной изобары с изотопическим спином  $T=5/2$ , распадающейся, в частности, по схеме  $N_{T=5/2}^{*++} \rightarrow p \pi^+ \pi^+$ , равен 30 мкб.

5. Проведен анализ всех имеющихся в настоящее время экспериментов по  $p p$ -взаимодействиям, где изучался вопрос о существовании изобары с  $T=5/2$ .

Делается заключение, что отличия от статистического фона в распределениях эффективных масс  $p \pi^+ \pi^+$  из реакции  $p p \rightarrow p \pi^+ \pi^+ \pi^- n$  при различных энергиях падающих протонов объясняются рождением изобар  $N_{1236}^*$  в системах  $(p \pi^+)$  и  $(n \pi^-)$ .

6. Установлено существенное влияние на результат анализа ширины изобары  $N_{1236}^*$ .

7. Во всех экспериментах по изучению  $NN$ -взаимодействий в пределах исследовавшейся статистики нет указаний на заметное образование нуклонной изобары с изотопическим спином, равным  $5/2$ .

Основные результаты диссертации содержатся в публикациях /3,4,5,6,7,8,11,12,18,19/.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ван Ган-чан, М.И.Соловьев, Ю.Н. Шкобин. ПТЭ 1,41 (1959).
2. Г.С.Казанский, А.Н.Михайлов, В.И.Мороз. ПТЭ 4,39 (1965).
3. Т.Бишлиу, В.Ф.Вишнеvский, М.Гаврилаш, А.Константинеску, А.Михул, В.Мороз, А.Никитин, Ю.Троян. Препринт ОИЯИ Р-2916, Дубна 1966 г.

4. В.И.Мороз, А.В.Никитин, Ю.А.Троян. Препринт ОИЯИ P1-3909, Дубна 1968.
5. В.И.Мороз, А.В.Никитин, Ю.А.Троян, Б.А.Шахбазян. Ядерная физика, 9, вып. 1, 90 (1967).
6. Р.М.Джабар-заде, В.И.Мороз, А.В.Никитин, А.И.Родионов, Э.Рупа, Ю.А.Троян, Б.А.Шахбазян. Препринт ОИЯИ-1957, Дубна, 1965.
7. В.И.Мороз, А.В.Никитин, А.И.Родионов, Ю.А.Троян. Препринт ОИЯИ P1-3145, Дубна 1967.
8. В.И.Мороз, А.В.Никитин, Ю.А.Троян. Препринт ОИЯИ P1-3881, Дубна, 1968.
9. D.V.Bagg, D.C.Salter and Y.H.Stafford. Phys. Rev., 146, 980 (1966).  
С.Пантуев, М.Н.Хачатурян, В.И.Чувило. Препринт ОИЯИ P-1625, Дубна 1964.
10. G.Alexander, O.Benary and U.Maor. Nucl. Phys., B5, 1 (1968).
11. В.Ф.Вишневский, Ду Юань-цай, А.Ф.Лукьянцев, В.И.Мороз, А.В.Никитин, Г.Н.Тентюкова, Ю.А.Троян, Цзян Шао-цзюн, Чжан Вэнь-юй, Б.А.Шахбазян, Янь У-гуан. Препринт ОИЯИ ОИЯИ P-1468, Дубна 1963.
12. Ю.Д.Зернин, В.И.Мороз, В.А.Никитин, В.А.Свиридов, Ю.А.Троян. Препринт ОИЯИ P-2424, Дубна 1965.
13. G.Goldhaber, S.Goldhaber et al., Proc. of the Intern. Conf. on High-Energy Physics, Dubna, p.480 (1964).
14. G.Goldhaber. UCRL-17388, 1967.
15. F.Conte, M.Dameri et al. Доклад на конференции по физике высоких энергий в Беркли, 1966.  
С.Caso, F.Conte et al., Nuovo Cim., LVA, N1,66(1968).
16. G.Alexander, O.Benary et al., Phys. Rev., 154, N5, 1284 (1967).

17. A.P.Colleraine and U.Nauenberg. Phys. Rev., 161, 1387 (1967).
18. В.Ф.Вишневский, В.И.Мороз, В.А.Никитин, Ю.А.Троян. Ядерная физика, 9, вып. 2; 336 (1967).
19. В.И.Мороз, А.В.Никитин, Ю.А.Троян. Препринт ОИЯИ E1-3940, Дубна 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 августа 1968 года.