

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ ПРИ ИМПУЛЬСАХ $P_0 > 3$ ГэВ/с

А. П. Иерусалимов\*, С. Г. Аракелян, А. В. Беляев,  
В. П. Ладыгин, А. Ю. Троян

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Реакция  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  исследовалась при импульсах налетающего нейтрона  $P_0 = 3,83$  и  $5,20$  ГэВ/с. Рассчитаны вклады различных диаграмм в сечение реакции при импульсах от порога до  $12$  ГэВ/с. Показано, что основные вклады в реакцию  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  при импульсах выше  $P_0 > 3$  ГэВ/с вносят диаграммы модели реджезованного  $\pi$ -мезонного обмена (OPER). Для изучения спиновых эффектов была выделена реакция  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$ . Показано, что для описания матрицы спиновой плотности  $[\rho_{ij}]$  необходимо учитывать диаграмму  $\rho$ -мезонного обмена. Реакция  $np \rightarrow np\rho^0$  выделялась методом вычитания фона. Исследование показало, что рождение  $\rho^0$ -мезона описывается «повешенными» диаграммами OPER-модели.

The reaction  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  was studied at the momenta of incident neutrons  $P_0 = 3.83$  and  $5.20$  GeV/c. The contributions of various diagrams into the reaction cross section at the momenta from the threshold up to  $12$  GeV/c were calculated. It was shown that the main contributions into the reaction  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  at the momenta above  $P_0 > 3$  GeV/c are provided by the diagrams of the reggeized  $\pi$  exchange model (OPER). The reaction  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$  was selected to study the spin effect for  $\Delta$ -resonance decay. It was shown that the satisfactory description of spin density matrix  $[\rho_{ij}]$  could be provided taking into account the diagram of  $\rho$ -meson exchange. The reaction  $np \rightarrow np\rho^0$  was selected using the background subtraction. The study showed that the observed  $\rho^0$  production is provided by the “hanged” diagram of the OPER model. The obtained results are in agreement with world data.

PACS: 12.40.Nn; 13.30.eg; 13.60.Le; 13.75.Cs; 14.20.Gk; 14.40.Cs

### ВВЕДЕНИЕ

Особенный интерес вызывает изучение возбуждения барионов и их последующий распад в  $NN$ -взаимодействиях при промежуточных энергиях (область резонансов):

- $\Delta_{1232} \rightarrow N\pi$ ,  $N_{1440}^* \rightarrow \Delta\pi$ ,  $N_{1440}^* \rightarrow N\sigma$ ,  $N_{1440}^* \rightarrow N\rho$ ;
- $\Delta\Delta$ -рождение;
- спиновые эффекты в  $\pi$ - $N$ - и  $NN$ -взаимодействиях.

\* E-mail: jerus@jinr.ru

Рождение дипионов в  $NN$ -взаимодействиях является одним из способов получить информацию относительно  $NN$ -,  $\pi N$ - и  $\pi\pi$ -состояний, включая:

- дибарионы;
- дипионы (узкий  $\sigma$ -мезон, состояние с  $I = 2$ );
- «пропущенные резонансы» и т. д.

Важной задачей является проверка моделей рождения пионов в  $NN$ -взаимодействиях:

- валенсийская модель [1];
- модель Ху Сао [2];
- OPER-модель [3] и др.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Нейтрон-протонные взаимодействия изучались в жидководородной 1-м камере ЛВЭ ОИЯИ, облученной квазимонохроматическими ( $P_0 < 2,5\%$ ) нейтронными пучками, полученными на синхрофазотроне

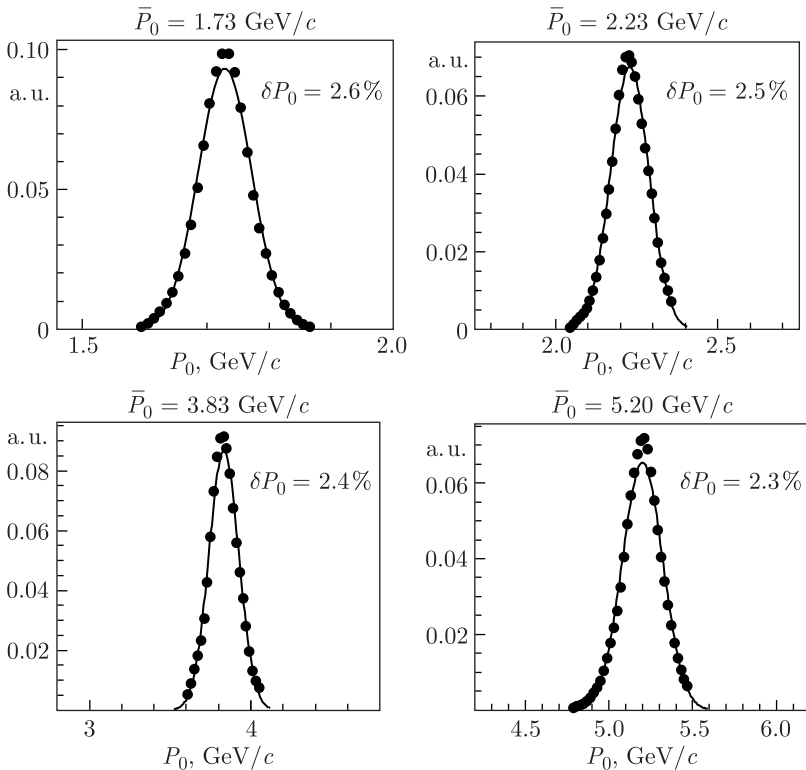


Рис. 1. Импульсные спектры налетающих нейтронов

в результате стриппинга ускоренных дейтронов. Полученные уникальные по своей полноте и точности данные позволили провести детальное исследование неупругих  $np$ -взаимодействий в широком диапазоне энергий в условиях  $4\pi$ -геометрии.

Реакция  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  исследовалась при четырех значениях импульсов налетающих нейтронов от  $P_0 = 1,73$  до  $P_0 = 5,20$  ГэВ/с. Спектры налетающих нейтронов показаны на рис. 1. Импульсы и углы вторичных заряженных частиц восстанавливались с точностью  $\sigma_p/p \sim 2\%$  и  $\sigma_\Theta \sim 10$  мрад соответственно. Разделение каналов реакций проводилось с помощью стандартной  $\chi^2$ -процедуры, использующей соответствующие уравнения связи. Подробное описание процесса обработки данных и разделения каналов приведено в [4].

### РЕАКЦИЯ $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$

Ранее реакция  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  изучалась нами при  $P_0 = 1,73$  и  $2,20$  ГэВ/с. Результаты исследований приведены в [5].

Реакция  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  описывается следующими диаграммами однопионного (OPER) и однобарионного (OBE) обменов (рис. 2).

Величины вкладов различных диаграмм в зависимости от импульса налетающего нейтрона приведены на рис. 3. Видно, что при импульсах налетающего нейтрона  $P_0 > 3$  ГэВ/с вкладами однобарионного обмена (OBE) можно пренебречь.

На рис. 4 приведены распределения по эффективным массам  $\pi N$ -,  $\pi\pi N$ - и  $\pi\pi$ -комбинаций и угловые распределения вторичных частиц. Очевидно, что OPER-модель хорошо описывает физические характеристики реакции  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$ .

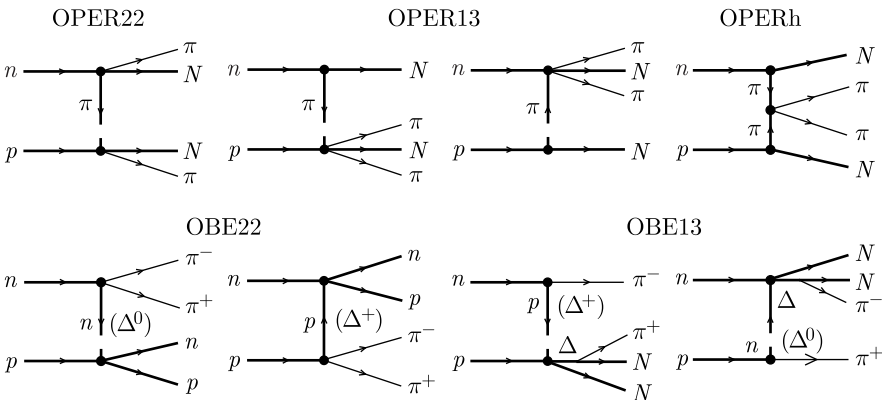


Рис. 2. Диаграммы реакции  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$

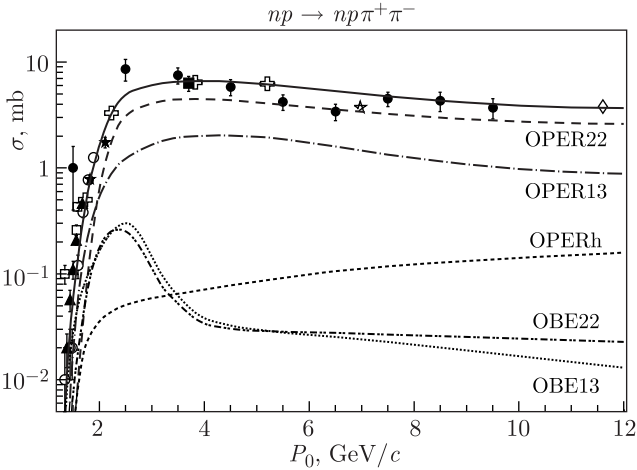


Рис. 3. Вклады различных диаграмм в реакцию  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$

При  $P_0 = 3,83$  ГэВ/с также получается хорошее описание характеристик реакции.

### РЕАКЦИЯ $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$

Реакция  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$  детально исследовалась в [6–8]. Следует отметить, что в этих работах выделение реакции  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$  проводилось методом вырезки по эффективным массам  $r\pi^+$ - и  $n\pi^-$ -комбинаций, что приводило к потерям в области малых и больших масс  $\Delta$ -резонансов.

Мы использовали другой метод выделения реакции  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$ , предложенный в [9]. При таком подходе вычислялись углы  $\Theta_J^{++}$  и  $\Theta_J^-$  как углы между вылетающим и налетающим протоном и, соответственно, вылетающим и налетающим нейтроном в системе Готтфрида–Джексона для  $r\pi^+$ - и, соответственно для  $n\pi^-$ -комбинаций. Тогда критерий  $\cos \Theta_J^{++} < 0$  и  $\cos \Theta_J^- < 0$  уменьшает вклад фона в отобранные таким образом события реакции  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$  до 4–5%. Очевидно, что распределения по  $\cos \Theta_J^{++}$  и  $\cos \Theta_J^-$  должны быть симметричны относительно 0. Таким образом, отобранные события реакции  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$  составляют 1/4 всей статистики данной реакции. На рис. 5 приведены 2-мерный плот (рис. а) и гистограмма (рис. б) распределений эффективных масс  $r\pi^+$ - и  $n\pi^-$ -комбинаций. Показано полное распределение (Total), отобранные события, умноженные на 4, и теоретическая кривая, рассчитанная для диаграммы OPER22 (см. рис. 2). Видно, что OPER-модель хорошо описывает массы  $\Delta^{++}$ - и  $\Delta^-$ -резонансов. Вычисленные сечения реакции  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$  оказались равными  $(2,50 \pm 0,13)$  мб

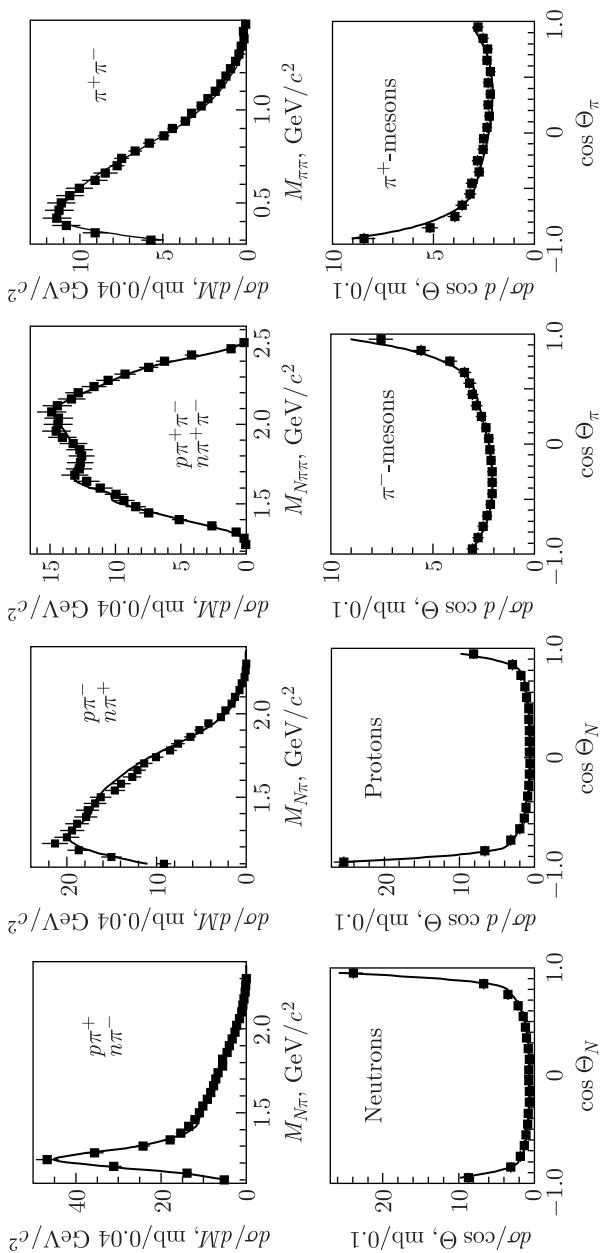
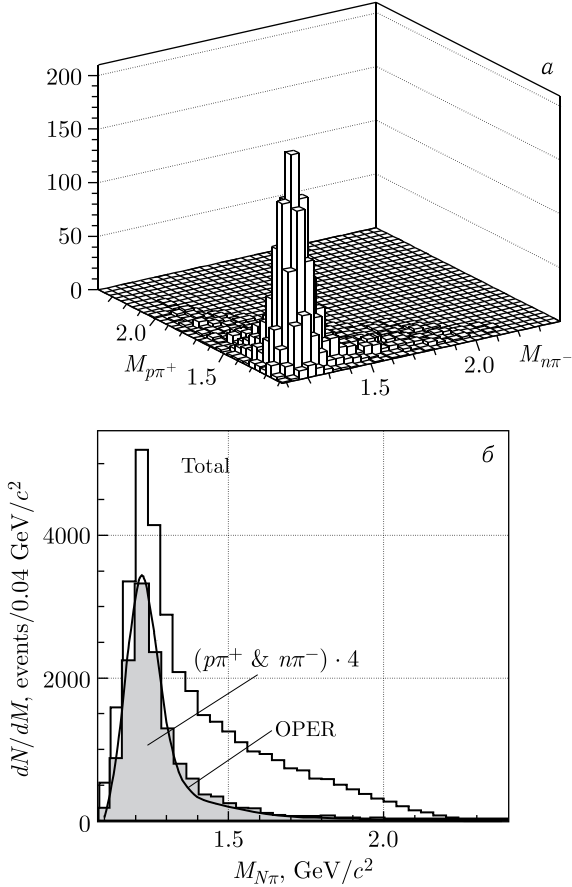


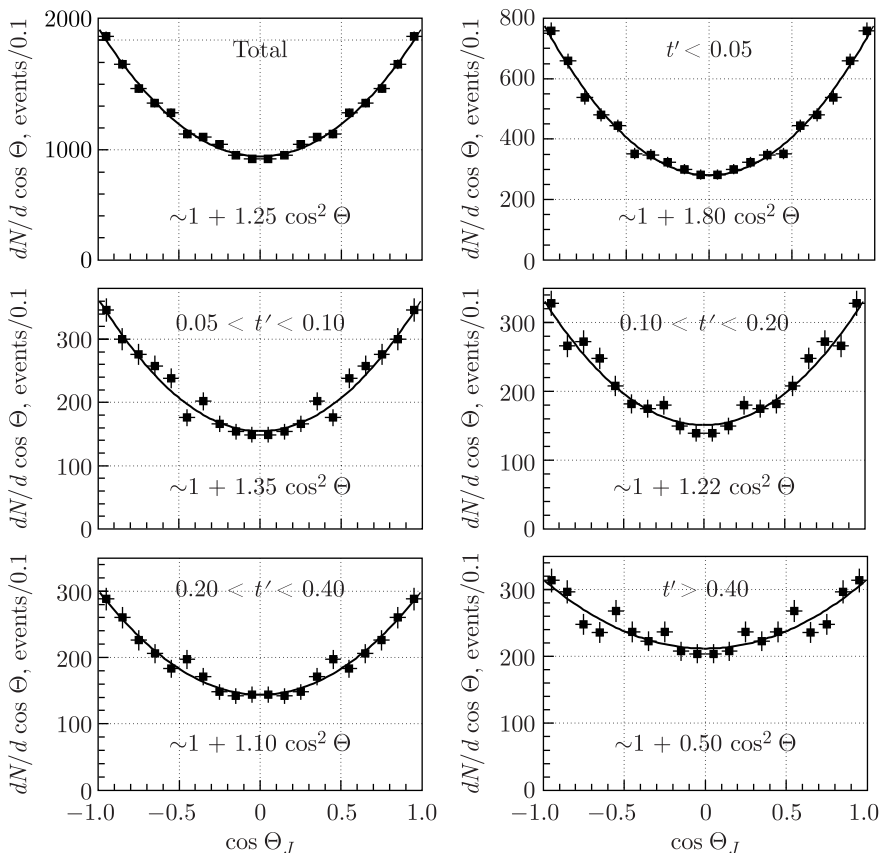
Рис. 4. Массовые и угловые распределения при  $P_0 = 5,20$  ГэВ/с


 Рис. 5. Распределения по массам  $\Delta^{++}\Delta^{-}$ 

для  $P_0 = 5,20$  ГэВ/с и  $(2,64 \pm 0,19)$  мб для  $P_0 = 3,83$  ГэВ/с, что находится в хорошем согласии с данными из работ [6–8].

Для отобранных таким образом событий были исследованы спиновые характеристики распадов  $\Delta$ -резонансов, и с этой целью рассчитаны элементы матрицы спиновой плотности. В системе покоя  $\Delta$ -резонанса вычислялись «углы Адера» [10]  $\Theta^A$  и  $\phi^A$  (см. также [11], (6.61), (6.62б) и (6.67)). На рис.6 приведены распределения по  $\cos \Theta^A$  для  $P_0 = 5,20$  ГэВ/с при различных интервалах переменной  $t' = t - t_{\min}$ .

Распределение продуктов распада  $\Delta$ -резонанса имеет вид  $W_{\Delta}(\Theta, \varphi) = (3/(4\pi))\{\rho_{33} \sin^2 \Theta + \rho_{11}(1/3 + \cos^2 \Theta) - (2/\sqrt{3}) \text{Re } \rho_{3-1} \times \sin^2 \Theta \cos 2\varphi - (2/\sqrt{3}) \text{Re } \rho_{31} \sin 2\Theta \cos \varphi\}$  при  $\rho_{33} + \rho_{11} = 0,5$ .

Рис. 6. Распределение по  $\cos \Theta^A$  для  $P_0 = 5,20$  ГэВ/с

В частности, распределение по  $\cos \Theta^A$ :

$$W(\Theta) = \frac{3}{2} \left\{ \left( \frac{1}{6} + \frac{2}{3} \rho_{33} \right) + \left( \frac{1}{2} - 2\rho_{33} \right) \cos^2 \Theta \right\}.$$

Фитируя распределения  $W(\Theta^A)$ , получаем величины  $\rho_{33}$  для различных интервалов  $t' = t - t_{\min}$ , а затем, фитируя распределения по  $\phi^A$ , получаем матрицы спиновой плотности  $\rho_{3-1}$  и  $\rho_{31}$ , которые приведены на рис. 7.

Однако в рамках OPER-модели  $\rho_{33} = \rho_{3-1} = \rho_{31} = 0$  и распределение по  $\Theta^A$  имеет вид  $W(\Theta) = (1/8\pi)(1 + 3\cos^2 \Theta)$ , что не согласуется с данными, показанными на рис. 6. Мы предположили, что реакция  $pn \rightarrow pn\Delta^{++}\Delta^-$  обусловлена не только обменом  $\pi$ -мезоном, но и имеется некоторый вклад с обменом другим мезоном.  $\Delta$ -резонанс может рождаться не только в процессах  $\pi N \rightarrow \pi N$ , но и, в частности, в процессе  $\rho N \rightarrow \pi N$  (рис. 8).

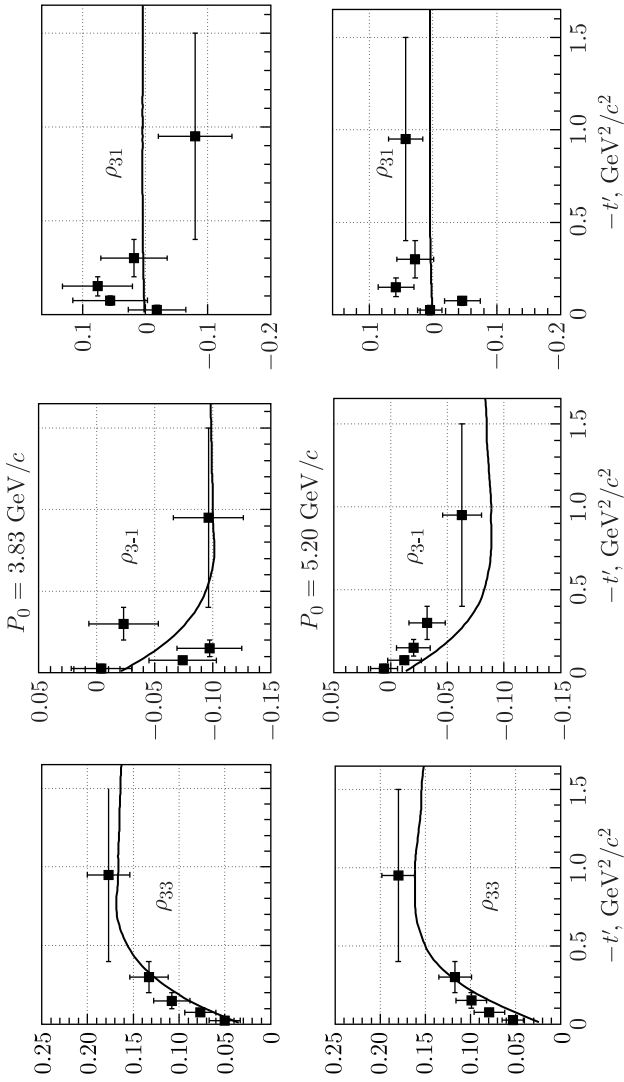
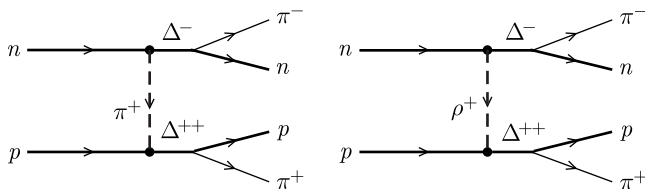


Рис. 7. Элементы спиновой матрицы плотности для  $P_0 = 3.83$  (верхний ряд) и  $5.20 \text{ GeV}/c$  (нижний ряд)



Рис. 8. Диаграммы  $\Delta^{++}\Delta^{-}$ -рождения

В последнем случае угловое распределение по  $\Theta^A$  будет иметь вид

$$W(\Theta) = \frac{1}{16\pi}(5 - 3 \cos^2 \Theta).$$

Матричный элемент реакции  $np \rightarrow n\rho\Delta^{++}\Delta^{-}$  с обменом  $\rho$ -мезоном записывался в таком же виде, как и для обмена  $\pi$ -мезоном. Вклад  $\rho$ -мезонного обмена оказался равен  $\sim 20\%$ . Вычисленные теоретические кривые элементов матрицы спиновой плотности, учитывающие обе диаграммы из рис. 8, удовлетворительно согласуются с экспериментальными значениями.

В работах [7, 8] для описания элементов матрицы спиновой плотности использовалась модель  $\pi$ -мезонного обмена с поглощением. Ее недостатком, на наш взгляд, является большое количество свободных параметров.

### РЕАКЦИЯ $np \rightarrow n\rho\rho^0$

Рождение  $\rho^0$ -мезона в  $np$ -взаимодействиях может описываться следующими диаграммами, приведенными на рис. 9.

Диаграммы *a* и *б* описывают рождение  $N^*$  или  $\Delta^*$  с последующим распадом по каналу  $N\rho^0$ . Возникающие при этом  $\rho$ -мезоны характеризуются сильной периферичностью (рис. 9, распределение по  $Y_{\pi\pi}^*$  в с. ц. м. реакции). Расчеты показали, что такие диаграммы сильно подавлены формфактором матричного элемента, и их вкладом можно пренебречь. Диаграмма *в* описывает прямое рождение  $\rho$ -мезона в центральной области  $Y_{\pi\pi}^*$ , ее вклад составляет  $\sim 1\%$  (см. рис. 3, вклад OPERh).

Вследствие малости вклада диаграммы *в* не наблюдается четкого сигнала от  $\rho$ -мезона в распределениях по эффективной массе  $M_{\pi^+\pi^-}$  (см. рис. 4). Поэтому необходимо уменьшить фон в распределении по  $M_{\pi^+\pi^-}$ . Ранее, по критерию  $\cos \Theta_J^{++} < 0$  и  $\cos \Theta_J^- < 0$ , были отобраны события для исследования реакции  $np \rightarrow n\rho\Delta^{++}\Delta^-$ . То есть был выбран только 1 квадрант из распределения по  $\cos \Theta_J$ , составляющий 1/4 статистики реакции. Поэтому для учета фона от реакции  $np \rightarrow n\rho\Delta^{++}\Delta^-$  был сконструирован набор событий, содержащий не только реальные события реакции из выбранного квадранта, но и дополненный искусственными событиями. С этой целью для каждого реального события в системе

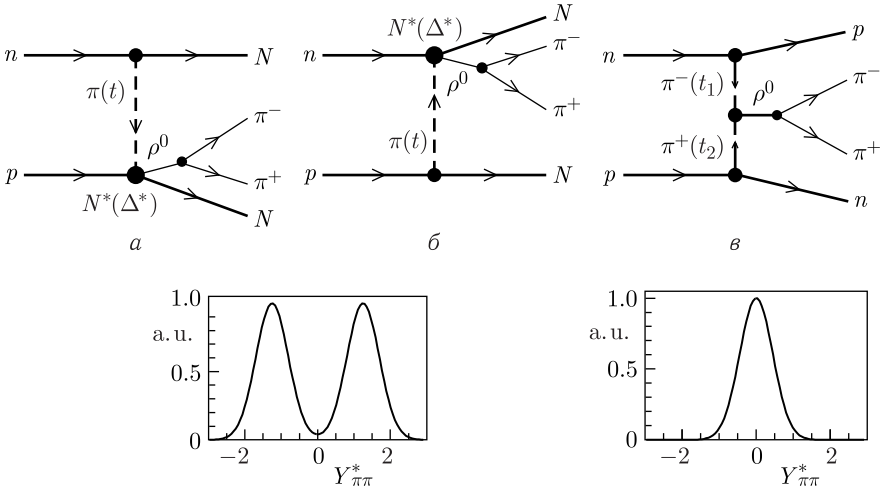


Рис. 9. Диаграммы рождения  $\rho^0$ -мезона

покоя  $\Delta$ -резонанса направления вылета вторичных частиц были заменены на противоположные: т. е.  $\mathbf{P}_N \rightarrow -\mathbf{P}_N$  и  $\mathbf{P}_\pi \rightarrow -\mathbf{P}_\pi$ . Это позволило смоделировать остальные 3 квадранта реакции  $np \rightarrow n\rho^0\pi^+\pi^-$ . При последующей обработке такие фоновые события вычитались из распределений. Дополнительно были наложены следующие ограничения для выделения событий реакции  $np \rightarrow n\rho^0\pi^+\pi^-$ :

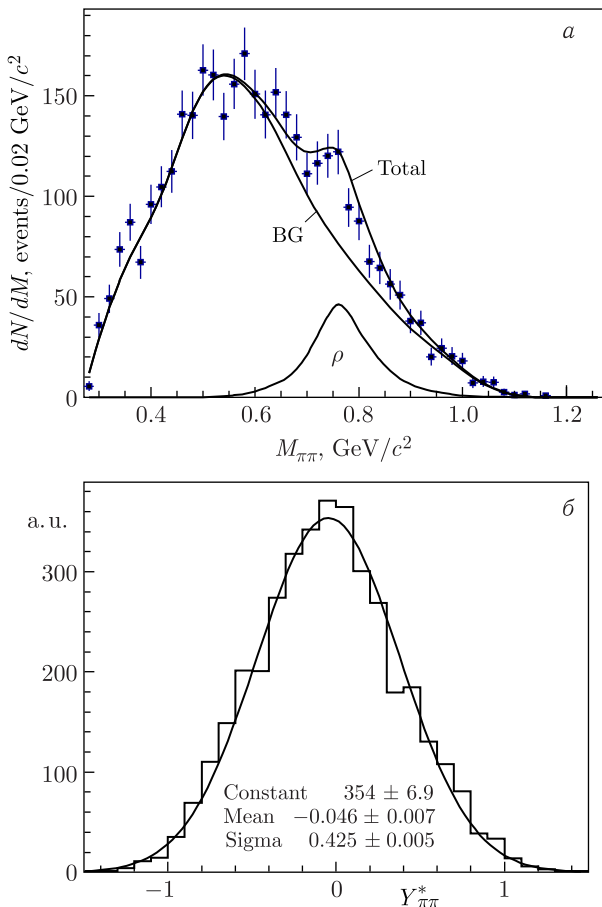
$$\begin{aligned} t(0 \rightarrow n) &< 1,0 \text{ ГэВ}^2/c^2, \\ t(T \rightarrow p) &< 1,0 \text{ ГэВ}^2/c^2, \\ 1,50 &< M_{N\pi\pi} < 2,30 \text{ ГэВ}/c^2, \\ 2,30 &< M_{np} < 2,94 \text{ ГэВ}/c^2. \end{aligned}$$

На рис. 10,а показаны распределения по эффективным массам  $\pi^+\pi^-$ -комбинаций после вычета фона от реакции  $np \rightarrow n\rho^0\pi^+\pi^-$  и с учетом наложенных ограничений. Кривая ВГ — оставшийся фон. На рис. 10,б показано распределение по быстройте  $Y^*$  для  $\pi^+\pi^-$ -комбинаций. Видно, что рождение  $\rho^0$ -мезона соответствует «подвешенной» диаграмме в из рис. 9. Сечение рождения  $\rho^0$ -мезона в реакции  $np \rightarrow n\rho^0\pi^+\pi^-$  оказалось равным  $\sigma = (61 \pm 4) \text{ мкб}$ .

Реакция  $np \rightarrow n\rho^0\pi^+\pi^-$  ранее исследовалась только в работе [12].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реакции  $np \rightarrow n\rho^0\pi^+\pi^-$  при  $P_0 > 3 \text{ ГэВ}/c$  характерно обильное рождение  $\Delta$ -резонанса и сильная периферичность вторичных частиц. Экспериментальные распределения удовлетворительно описываются OPER-моделью [3].

Рис. 10. Распределения по массе и  $Y_{\pi\pi}^*$  для  $\rho^0$ -мезона

Вычислены сечения реакции  $np \rightarrow np\Delta^{++}\Delta^-$  и матрица спиновой плотности распада  $\Delta$ -резонанса. Показано, что для описания спиновых эффектов необходимо привлечь механизм обмена  $\rho$ -мезоном.

С помощью специальной процедуры вычитания фона выделена реакция  $np \rightarrow np\rho^0$  и определено ее сечение. Показано, что рождение  $\rho$ -мезона описывается «подвешенной» диаграммой  $\pi$ -мезонного обмена.

Полученные результаты находятся в хорошем согласии с мировыми данными.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alvarez-Ruso L., Oset E., Hernandez E. Theoretical Study of the  $NN \rightarrow NN\pi\pi$  Reaction // Nucl. Phys. A. 1998. V. 633, No. 3. P. 519–543.

2. *Xu Cao, Bing-Song Zou, Hu-Shan Xu.* Phenomenological Analysis of the Double Pion Production in Nucleon–Nucleon Collisions up to 2.2 GeV // *Phys. Rev. C.* 2010. V. 81, No. 6. P. 065201–065236.
3. *Пономарев Л. А.* Описание эксклюзивных процессов в модели реджезованного однопионного обмена // *ЭЧАЯ.* 1976. Т. 7, вып. 1. С. 186–248.
4. *Бешлиу К., Груя С., Иерусалимов А. П., Которобай Ф., Мороз В. И., Никитин А. В., Троян Ю. А.* Сечения каналов реакций  $np$ -взаимодействий при  $P_0 = 1-5$  ГэВ/с // *ЯФ.* 1986. Т. 43, № 3. С. 565–568.
5. *Jerusalimov A. P., Belyaev A. V., Ladygin V. P., Kurilkin A. K., Troyan A. Yu., Troyan Yu. A.* Study of the Reaction  $np \rightarrow np\pi^+\pi^-$  at 1.0 and 1.5 GeV // *Eur. Phys. J. A.* 2015. V. 51, No. 7. P. 83–92.
6. *Cohn H. O., McCulloch R. D., Bugg W. M., Condo G. T.* Inelastic  $pn$  Interactions at 3.7 GeV/c // *Nucl. Phys. B.* 1972. V. 21, No. 2. P. 505–514.
7. *Shapira A., Yecutieli G., Yaffe D., Toaff S., Ronat E. E., Lyons L., Karshon U., Haber B., Eisenberg Y.*  $\Delta^{++}(1236)\Delta(1236)$  Production in  $pn$  Collisions at 6.98 GeV/c // *Nucl. Phys. B.* 1970. V. 23, No. 3. P. 583–595.
8. *Hochman D., Eisenberg Y., Karshon U., Shapira A., Ronat E. E., Yaffe D., Yecutieli G., Hammerman I., Goldberg J.* Two-Pion Production in  $pn$  Collisions at 11.6 GeV/c // *Nucl. Phys. B.* 1974. V. 80, No. 2. P. 189–205.
9. *Van Apeldoorn G. W., Harting D., Holthuisen D. J., Pijlgroms B. J., Rijsenbeek M. M. H. M., Warmerdam-de Leeuw L. M.* Study of Diffraction Dissociation and Double Resonance Production in the Final State  $\bar{p}p\pi^+\pi^-$  at 7.2 GeV/c // *Nucl. Phys. B.* 1979. V. 156, No. 1. P. 111–125.
10. *Ader J. P., Meyers C., Bonnier B.* Model-Independent Analysis of Density-Matrix Element Measurements in Multiparticle Reactions // *Nucl. Phys. B.* 1972. V. 47, No. 2. P. 397–421.
11. *Фелд Б.* Сохранение углового момента // *Фелд Б.* Модели элементарных частиц: Пер. с англ. М.: Мир, 1971. С. 85–118.
12. *Yecutieli G., Yaffe D., Shapira A., Ronat E. E., Lyons L., Karshon U., Eisenberg Y.*  $\rho^0$  Production in  $pn$  Collisions at 6.98 GeV/c // *Phys. Lett. B.* 1971. V. 34, No. 1. P. 101–104.