

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



И/Х-76

B-529

P1 - 9843

3979/2-76

Н.М.Вирясов, Р.М.Лебедев, В.П.Хен

АНАЛИЗ РОЖДЕНИЯ ρ^0 -МЕЗОНА
И Δ^{++} -ИЗОБАРЫ В РЕАКЦИИ $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^-$
ПРИ 5 ГэВ/с
ПРИ ПОМОЩИ ОКРУЖНОСТЕЙ
В ПРОСТРАНСТВЕ СКОРОСТЕЙ ЛОБАЧЕВСКОГО

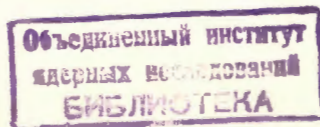
1976

P1 - 9843

Н.М.Вирясов, Р.М.Лебедев, В.П.Хен

АНАЛИЗ РОЖДЕНИЯ ρ^0 -МЕЗОНА
И Δ^{++} -ИЗОБАРЫ В РЕАКЦИИ $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^-$
ПРИ 5 ГэВ/с
ПРИ ПОМОЩИ ОКРУЖНОСТЕЙ
В ПРОСТРАНСТВЕ СКОРОСТЕЙ ЛОБАЧЕВСКОГО

Направлено на XVIII Международную конференцию
по физике высоких энергий (Тбилиси, 1976)



S U M M A R Y

The velocities of all particles of the reaction $\pi^- p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^-$ are represented as a system of six points in the three-dimensional Lobachevsky velocity space^{/4/}. Based on such a kinematic representation, the ρ^0 -meson and Δ^{++} -isobar production in the reaction is investigated. In order to select these resonances, we have used two invariants of the Lorentz group built by means of a flat line of rotation in the Lobachevsky velocity space. The proposed method allows ρ^0 -meson and Δ^{++} -isobar production to be selected both at low and high values of four-momentum transfers. This is shown by the analysis of standard characteristics of the selected event groups and the calculations by the OPER model^{/7/}.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе^{/5/} показаны некоторые возможности анализа реакции

$$\pi^- p_t \rightarrow p \pi^+ \pi_1^- \pi_2^- \quad /1/$$

при импульсе 5 ГэВ/с методом пространства скоростей Лобачевского^{/12/}. Здесь мы приводим результаты анализа образования ρ^0 -мезона и Δ^{++} -изобары в таком же подходе в следующих каналах реакций /1/:

$$\pi^- p_t \rightarrow p \pi^- \rho^0 \quad /2/$$

└─ $\pi^+ \pi^-$

$$\pi^- p_t \rightarrow \Delta^{++} \pi_1^- \pi_2^- \quad /3/$$

└─ $p \pi^+$

Для выделения каналов /2/, /3/ были использованы два инварианта группы Лоренца, построенные при помощи плоской линии вращения в пространстве скоростей Лобачевского. Это позволило выделить ρ^0 -мезон и Δ^{++} -изобару как с малыми, так и большими значениями квадратов переданных им 4-импульсов /от пучковой частицы и мишени соответственно/.

II. КИНЕМАТИКА И ГЕОМЕТРИЯ ЛОБАЧЕВСКОГО

В пространстве скоростей Лобачевского /1-3/ введем декартову систему координат XYZ с началом в некоторой точке c , изображающей скорость /3/ системы центра масс реакции /1/. Вектор скорости i -ой частицы реакции /1/ в этой системе координат определяется проекциями x_i, y_i, z_i на координатные оси X, Y, Z. Проекции скоростей (x_i, y_i, z_i) , называемые бельтрамиевыми координатами в пространстве скоростей Лобачевского /2,4/, можно вычислять по формулам:

$$x_i = \frac{P_i^x}{E_i}, y_i = \frac{P_i^y}{E_i}, z_i = \frac{P_i^z}{E_i}, i = \pi_b^-, p, \pi^+, \pi_1^-, \pi_2^- \quad /4/$$

где P_i^x, P_i^y, P_i^z, E_i - компоненты импульса и полная энергия i -ой частицы в с.ц.м. реакции /1/.

На рис. 1а показано представление кинематики реакции /1/ в пространстве скоростей Лобачевского. Точка c с координатами $x_c = y_c = z_c = 0$ представляет скорость

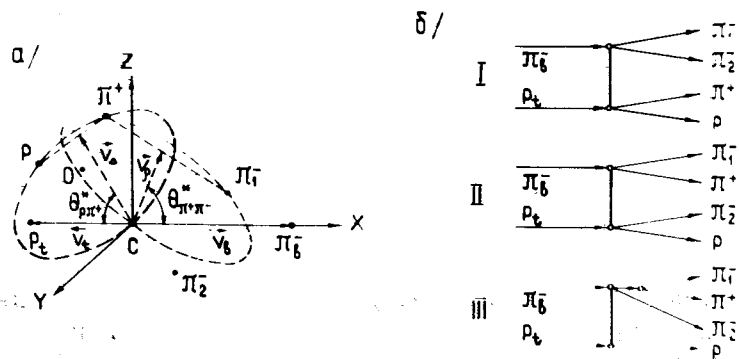


Рис. 1. а/ Кинематика реакции $\pi_b^- p_1^+ \rightarrow p \pi^+ \pi_1^- \pi_2^-$ в пространстве скоростей Лобачевского. б/ I, II - диаграммы, описывающие реакцию /1/ в модели ОРЕР; III - диаграмма, учитывающая образование A_2 -мезона.

с.ц.м. реакции /1/. Точками $\pi_b^-, p_1^+, p, \pi^+, \pi_1^-, \pi_2^-$ изображены концы векторов скоростей соответствующих частиц, заданных в с.ц.м. реакции /1/.

В таком представлении кинематики рассмотрим известную величину $\theta_{\pi^+ \pi^-}^*$ - угол между вектором скорости V_b пучка π_b^- и вектором суммарной скорости V_p пары $(\pi^+ \pi^-)$ /рис. 1а/. Угол $\theta_{\pi^+ \pi^-}^*$ является лоренц-инвариантной функцией бельтрамиевых координат точек c, π^+, π^- . Следовательно, величина угла $\theta_{\pi^+ \pi^-}^*$ характеризует взаимное расположение этих точек, далее называемое словом "структура". Если пары $(\pi^+ \pi^-)$ являются продуктами распадов ρ^0 -мезонов, то, как известно, в распределении по $\theta_{\pi^+ \pi^-}^*$ наблюдается концентрация вылета этих пар в области малых углов. В этой особенности должны проявляться корреляции в структуре точек c, π^+, π^- , вызванные рождением ρ^0 -мезона.

Вместо угла $\theta_{\pi^+ \pi^-}^*$ структуру точек c, π^+, π^- можно характеризовать следующим инвариантом группы Лоренца. Три точки c, π^+, π^- в пространстве скоростей Лобачевского определяют плоскую линию вращения, через них проходящую. В бельтрамиевых координатах эта линия представляется эвклидовым эллипсом /6/ /пунктирная линия на рис. 1а/. Линия вращения характеризуется кривизной $K(c, \pi^+, \pi^-)$, однозначно определяемой по координатам точек c, π^+, π^- . Величина кривизны $K(c, \pi^+, \pi^-)$ зависит, помимо прочего, от направления прямой распада $\pi^+ \pi^-$ относительно точки c /рис. 1а/.

Те же соображения справедливы для образования Λ^{++} -изобары. Три точки c, p, π^+ , от которых зависит угол $\theta_{p \pi^+}^*$ между векторами V_1 и V_Λ /рис. 1а/, опре-

^x Взаимное расположение этих точек в пространстве скоростей Лобачевского не зависит от выбора системы координат XYZ, в которой определяются их координаты. Например, величина расстояния ρ_{jk} между точками j и k не изменится при переносе начала координат с системы XYZ в точку p_i /лабораторную систему отсчета/. Поэтому расстояние ρ_{jk} в пространстве скоростей Лобачевского является лоренц-инвариантным. В физике его называют быстротой.

деляют плоскую линию вращения, через них проходящую. Вместо угла $\theta_{p\pi^+}$ структуру этих точек будем характеризовать инвариантом

$$\gamma_{\perp} = (1 - x_0^2)/(1 - x_0^2 - y_0^2 - z_0^2), \quad /5/$$

где x_0, y_0, z_0 - координаты центра O этой линии вращения χ рис. 1а/.

Ниже приводятся результаты применения предложенных инвариантов $K(c\pi^+\pi^-)$ и γ_{\perp} к исследованию каналов /2/ и /3/.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Канал с ρ^0 -мезоном

На рис. 2 приведено распределение для 3200 событий реакции /1/ по кривизне $K(c\pi^+\pi^-)$ /ступенчатая гистограмма/. Кривая, изображаемая точками, показывает распределение моделированных событий реакции /1/ /события моделировались согласно статистической гипотезе по методу Монте-Карло - программа FOWL /11/ /. Видно, что при $K(c\pi^+\pi^-) = 0$ минимуму фазовой кривой соответствует пик в экспериментальном распределении.

Мы исследовали гипотезу о том, что этот эффект обусловлен образованием ρ^0 -мезона в реакции /1/. Для проверки этой гипотезы были сделаны теоретические расчеты по модели OPER /7/, в рамках которой реакции /1/ соответствует пара диаграмм I, II /рис. 1б/. Штрих-пунктирная линия на рис. 2 представляет расчет по этой модели. Видно, что модель OPER качественно воспроизводит экспериментальный эффект в области $K(c\pi^+\pi^-) \approx 0$.

^x Выбор инварианта γ_{\perp} обусловлен тем, что среди точек c, p, π^+ имеется барион p , одночастичные распределения которого в пространстве скоростей Лобачевского отличаются от распределений π -мезонов.

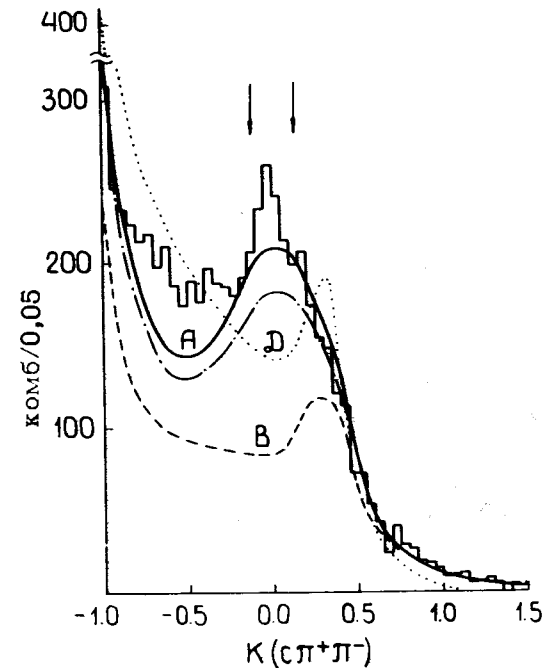


Рис. 2. Распределение по кривизне $K(c\pi^+\pi^-)$ плоской линии вращения, проходящей через точки c, π^+, π^- в пространстве скоростей Лобачевского; --- модель OPER; ——— модель OPER с учетом Λ_2 -мезона; - - - - вклад фона по модели OPER с учетом Λ_2 -мезона; - фазовая кривая.

Для лучшего описания экспериментальных данных к модели OPER была добавлена диаграмма III /рис. 1б/, описывающая рождение Λ_2^- -мезона в реакции /1/ с распадом $\Lambda_2^- \rightarrow \rho^0\pi^-$. Расчет по модели OPER с учетом Λ_2 -мезона (OPER + Λ_2) показан сплошной линией А на рис. 2. Видно, что учет Λ_2 -мезона улучшает согласие с экспериментальным спектром. Широкий пик в области $K(c\pi^+\pi^-) \approx 0$ обусловлен рождением ρ^0 -мезона /см. диаграммы II, III/. Это следует из сравнения кривой А с кривой В, представляющей распределение вклада фоновых комбинаций /фоновыми комбинациями являются комбинации $(\pi^+\pi_2^-)$ / в диаграммах II, III и комбинации

Таблица

Резонанс	Отбор	$\frac{\chi^2}{\text{NDE}}$	Параметры		Доля резонанса (%)
			M_0 (ГэВ)	Γ_0 (ГэВ)	
ρ^0	(6) $-0.15 < K(\pi^+\pi^-) < 0.1$	$\frac{55}{32}$	0.763 ± 0.003	0.108 ± 0.008	68 ± 4
	(8) $ \tau_{\pi^+\pi^-} < 0.4 \text{ ГэВ}^2$	$\frac{71}{52}$	0.760 ± 0.050	0.178 ± 0.016	57 ± 3
Δ^{++}	(7) $1.0 < \chi_1 < 1.7$	$\frac{29}{22}$	1.206 ± 0.002	0.050 ± 0.006	47 ± 4
	(9) $ \tau_{\rho\pi^+} < 0.4 \text{ ГэВ}^2$	$\frac{53}{41}$	1.210 ± 0.003	0.063 ± 0.010	40 ± 5

$(\pi^+\pi_2^-)$, $(\pi^+\pi_1^-)$ в диаграмме I/. Таким образом, расчеты по модели (OPER + A2) не противоречат гипотезе о том, что в области $K(\pi^+\pi^-) \approx 0$ доминирует образование ρ^0 -мезона. В соответствии с этим в распределении по $K(\pi^+\pi^-)$ была выделена область с границами

$$-0,15 < K(\pi^+\pi^-) < 0,10, \quad /6/$$

которая исследовалась более детально. На рис. 3а приведен спектр масс $M(\pi^+\pi^-)$ событий из области /6/. В спектре введен четкий пик в районе ρ^0 -мезона. Спектр фитировался суммой распределения Брейта-Вигнера /в форме Джексона /9/ / и пунктирной фоновой кривой, вычисленной по модели (OPER + A2). Результаты фитирования приведены в табл. 1, из которой видно, что подобранные значения массы M_0 и ширины Γ_0 хорошо согласуются с общепринятыми /10/.

На рис. 3б показано распределение событий из области /6/ по квадрату 4-импульса $t_{\pi^+\pi^-}^2$, переданного от пучка π_b^- к паре $(\pi^+\pi^-)$. Это распределение хорошо описывается суммой двух экспонент ($\chi^2/\text{NDF} = 75/75$) с параметрами наклонов $b_1 = /10,5 \pm 2,0/ \text{ ГэВ}^{-2}$ и $b_2 = /2,0 \pm 0,3/ \text{ ГэВ}^{-2}$. Подобранная кривая изображена точками на рис. 3б. Как видно, в кинематической области /6/ наблюдается образование ρ^0 -мезонов как с малыми, так и с большими $t_{\pi^+\pi^-}^2$ /пунктирной кривой на рис. 3б показано распределение фона, вычисленного по модели (OPER + A2)/. На рис. 3в приведено угловое распределение событий из области /6/ / θ_{12} - угол между векторами импульсов частиц π_b^- и π^+ в системе покоя пары $(\pi^+\pi^-)$ /. Это распределение согласуется с видом, характерным для распада ρ^0 -мезона.

2. Канал с Δ^{++} -изобарой

В распределении по $y_{\perp}/\text{см.}$ формулу /5// событий реакции /1/ при $y_{\perp} \approx 1,3$ наблюдается превышение числа событий над фазовой кривой /распределение не приведено/. Расчеты по модели OPER не противоречат ги-

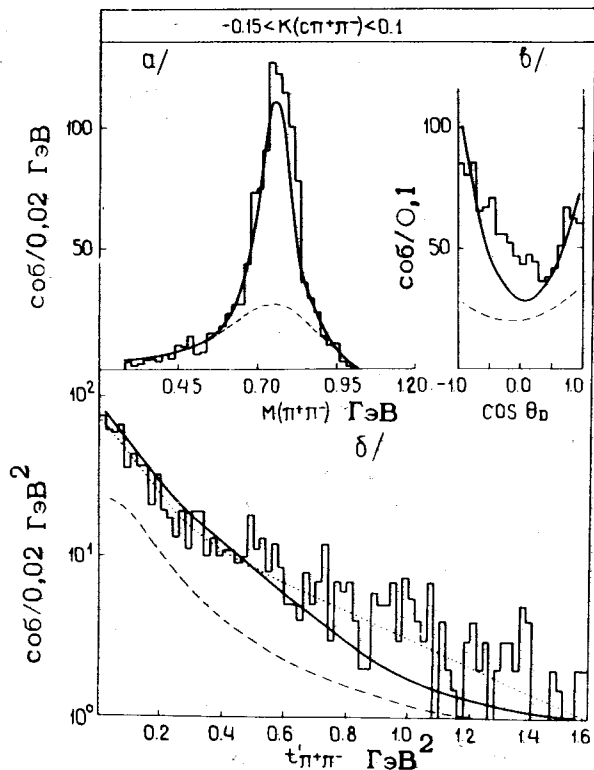


Рис. 3. Характеристики событий в области $-0,15 < K(\pi^+\pi^-) < 0,1$; а/ спектр масс $M(\pi^+\pi^-)$, — модель (OPER+A2), - - - вклад фона по модели (OPER+A2); б/ спектр передач $t_{\pi^+\pi^-}^2$, — модель (OPER+A2), фит спектра суммой $A \exp(-b_1 t_{\pi^+\pi^-}^2) + B \exp(-b_2 t_{\pi^+\pi^-}^2)$; в/ распределение по $\cos \theta_D$, — модель (OPER+A2), - - - вклад фона по модели (OPER+A2).

потезе о том, что этот эффект вызван образованием Δ^{++} -изобары. Этот вывод подтверждается при анализе характеристик событий из области эффекта.

На рис. 4б показан спектр эффективных масс $M(p\pi^+)$ в области эффекта, выделенного границами

$$1,0 < \gamma_{\perp} < 1,7.$$

/7/

Пунктирной линией выделен вклад фоновой комбинации ($p\pi^+$) от диаграммы II /рис. 1б/. Результаты фитирования этого спектра суммой распределения Брейта-Вигнера /в форме Джексона/ и пунктирной фоновой кривой приведены в таблице. На рис. 5а показано распределение событий в области /7/ по передаче $t_{p\pi^+}^2$ от протона p мишени к паре ($p\pi^-$). Распределение хорошо описывается суммой двух экспонент ($\chi^2/NDF = 30/35$) с параметрами наклонов $b_1 = /11,3 \pm 1,6/ \text{ГэВ}^{-2}$ и $b_2 = /2,2 \pm 0,3/ \text{ГэВ}^{-2}$. Подобранная кривая показана сплошной линией на рис. 5а. Как видно, имеются указания на то, что в кинематической области /7/ наблюдается образование Δ^{++} -изобар как с малыми, так и с большими $t_{p\pi^+}^2$. На рис. 5б приведено угловое распре-

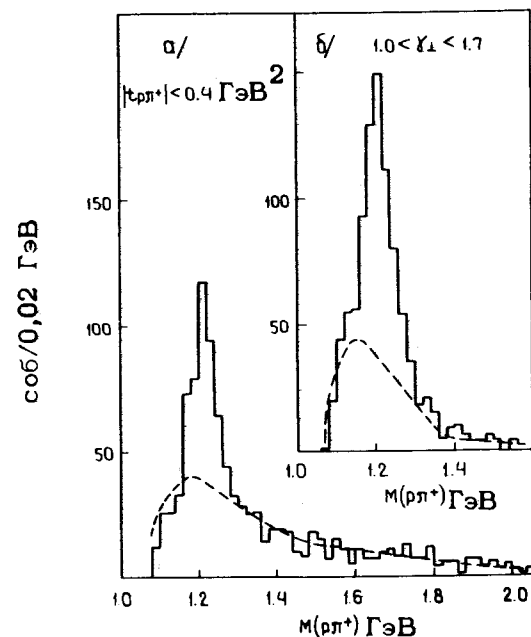


Рис. 4. Спектры $M(p\pi^+)$, полученные отбором а/ по передаче $|t_{p\pi^+}| < 0,4 \text{ГэВ}^2$ и б/ отбором по инварианту $1,0 < \gamma_{\perp} < 1,7$; - - - вклад фона по модели OPER.

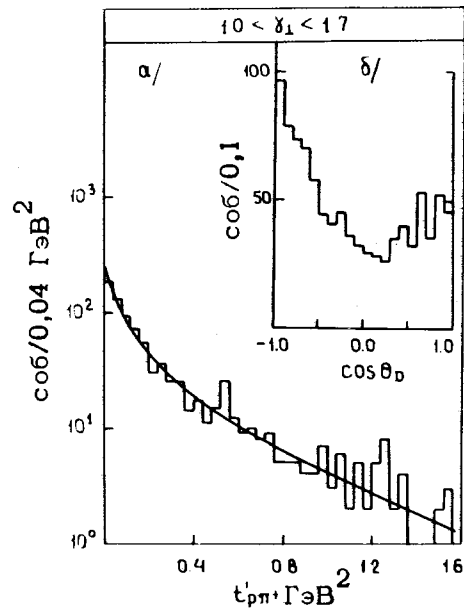


Рис. 5 а/. Распределение событий из области $1,0 < \gamma_{\perp} < 1,7$ по передаче $t_{p\pi^+}$; ———— фит выражением $A \exp(-b_1 t_{p\pi^+}) + B \exp(-b_2 t_{p\pi^+})$. б/. Распределение событий из области $1,0 < \gamma_{\perp} < 1,7$ по $\cos \theta_D$.

деление событий из области /7/ θ_D - угол между векторами импульсов частиц p_t и π^+ в системе покоя пары $(p\pi^+)$. Это распределение не противоречит виду, характерному для распада Δ^{++} -изобары.

Таким образом, метод пространства скоростей Лобачевского может быть использован для выделения каналов /2/, /3/ реакции /1/. Более того, этот метод дает возможность исследовать рождение ρ^0 -мезонов и Δ^{++} -изобар в области больших передач /13/. Как было показано выше, каждый из спектров передач на рис. 3б, 5а описывается суммой двух экспонент с резко различными параметрами наклонов. Такой вид спектров передач можно понять, предполагая два механизма образования ρ^0 -мезонов и Δ^{++} -изобар. Именно, прямой и каскадный*

* Например, $A_2 \rightarrow \rho^0 \pi^-$ и $N(1688) \rightarrow \Delta^{++} \pi^-$.

механизмы образования этих резонансов. Очевидно, что в области больших передач можно ожидать заметный вклад каскадного механизма. Если критерии отбора /6/, /7/ действительно выделяют и каскадные ρ^0 - и Δ^{++} -резонансы, то их вклады должны проявиться в спектрах эффективных масс $M(\pi^+\pi^-\pi^-)$ и $M(p\pi^+\pi^-)$. Эти спектры показаны на рис. 6. Как видно, в спектре $M(\pi^+\pi^-\pi^-)$ /рис. 6а/ виден четкий пик в районе A_2^- -мезона, а в спектре $M(p\pi^+\pi^-)$ /рис. 6б/ наблюдается пик в районе тяжелой изобары $N(1688)$.

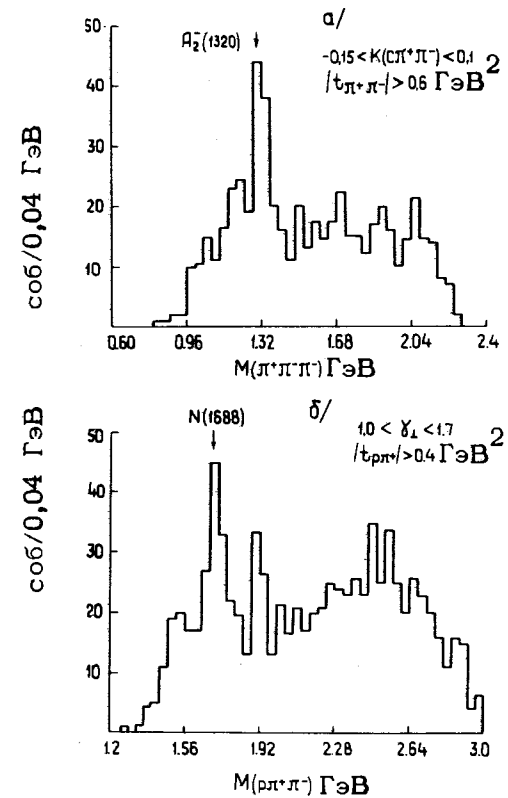


Рис. 6. а/ Спектр масс $M(\pi^+\pi^-\pi^-)$; полученный обрезаниями: $-0,15 < K(\pi^+\pi^-\pi^-) < 0,10$ и $|\tau_{\pi^+\pi^-}| > 0,6 \text{ ГэВ}^2$. б/ Спектр масс $M(p\pi^+\pi^-)$, полученный отбором: $1,0 < \gamma_{\perp} < 1,7$ и $|\tau_{p\pi^+}| > 0,4 \text{ ГэВ}^2$.

IV. СРАВНЕНИЕ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВА СКОРОСТЕЙ ЛОБАЧЕВСКОГО С МЕТОДОМ ОБРЕЗАНИЯ ПО ПЕРЕДАЧЕ

Известным методом выделения каналов /2/, /3/ является обрезание по передаче /8/. Поэтому представляется важным сравнение этого метода с предложенными критериями /6/, /7/ отбора каналов /2/, /3/.

На рис. 5а показан спектр $M(\rho\pi^+)$, полученный обрезанием по передаче

$$|t_{\rho\pi^+}| < 0,4 \text{ ГэВ}^2 \quad /8/$$

Пунктирной линией показано распределение фона, рассчитанного по модели OPER. На рис. 7 приведен спектр $M(\pi^+\pi^-)$, полученный обрезанием

$$|t_{\pi^+\pi^-}| < 0,4 \text{ ГэВ}^2 \quad /9/$$

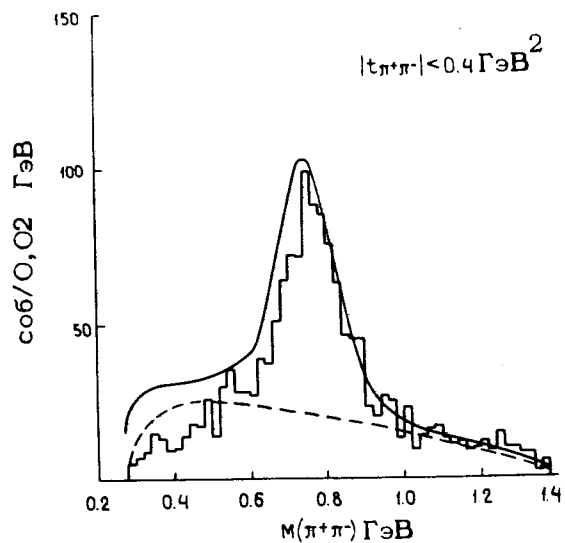


Рис. 7. Спектр масс $M(\pi^+\pi^-)$, полученный обрезанием $|t_{\pi^+\pi^-}| < 0,4 \text{ ГэВ}^2$; — — — модель (OPER+A2); — — — фон по модели (OPER+A2).

Пунктирной линией показано распределение фона, рассчитанное по модели (OPER + A2). Результаты фитирования каждого из этих спектров суммой распределения Брейта-Вигнера /в форме Джексона/ и соответствующей фоновой кривой приведены в таблице. В этой же таблице приведены результаты фитирования спектров масс $M(\pi^+\pi^-)$, $M(\rho\pi^+)$, полученные отборами /6/, /7/.

Из таблицы видно, что методом пространства скоростей Лобачевского удастся выделить каналы /2/, /3/ не хуже, чем обрезанием по передаче. Наглядной иллюстрацией качества выделения в реакции /1/ ρ^0 -мезона и Λ^{++} -изобары при помощи критериев отбора /6/, /7/ являются спектры, показанные на рис. 8. Здесь заштрихованными гистограммами представлены распределения по $M(\pi^+\pi^-)$ и $M(\rho\pi^+)$ событий, отброшенных критериями отбора /6/, /7/.

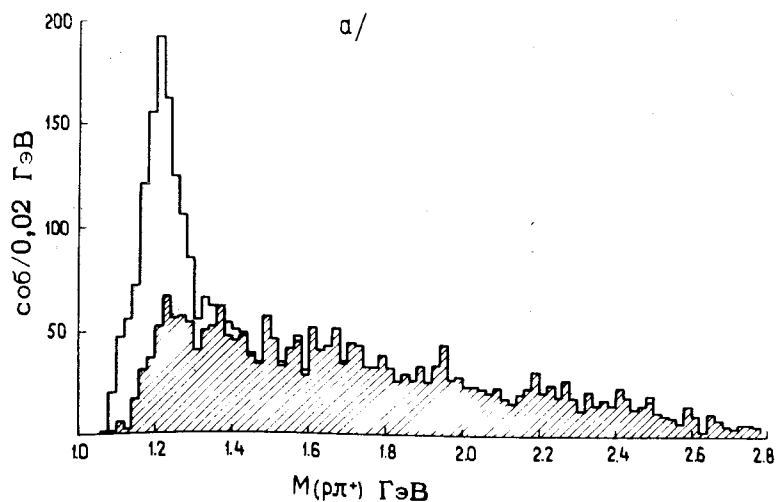


Рис. 8а. Заштрихован спектр масс $M(\rho\pi^+)$ для событий, не попавших в область $1,0 < y_{\perp} < 1,7$.

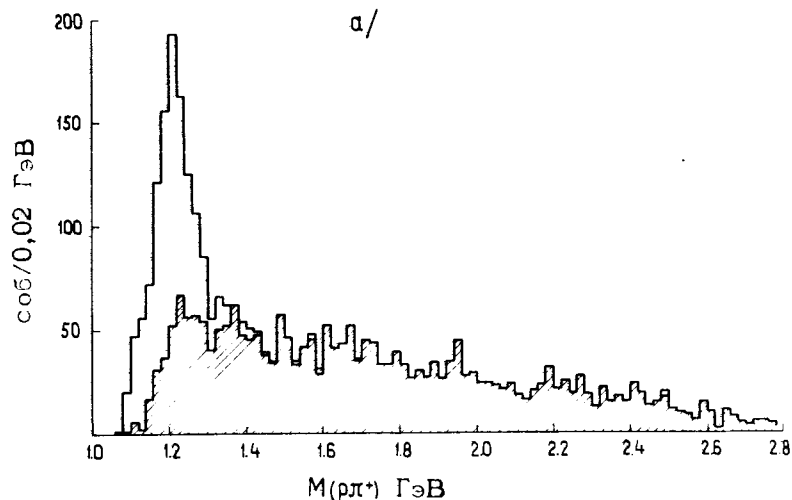


Рис. 86. Заштрихован спектр масс $M(\pi^+\pi^-)$ для событий, не попавших в область $-0,15 < K(\pi^+\pi^-) < 0,10$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом пространства скоростей Лобачевского выделены группы событий, соответствующие образованию ρ^0 -мезона и Λ^{++} -изобары в реакции /1/.

В заключение авторы считают своим долгом поблагодарить участников сотрудничества Дубна - Берлин - Кошице - Улан-Батор, предоставивших возможность опробовать новый метод на своем материале.

Мы также выражаем благодарность В.А.Белякову, Э.Г.Бубелеву, М.И.Подгорецкому, И.С.Сайтову, П.А.Темникову и Б.А.Шахбазяну за полезные советы и критические замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.П.Котельников. Принцип относительности и геометрия Лобачевского. Сб. "In memoriam N.I.Lobachevsky", 2, 37, Изд. КГУ, Казань, 1927.

2. В.А.Фок. Теория пространства, времени и тяготения. ГИТТЛ, М., 1955.
3. Н.А.Черников. Научные доклады высшей школы. Физ.-мат. серия, 2, 158, 1958; Препринт ИТФ-68-44, Киев, 1968.
4. Н.А.Черников. Физика элементарных частиц и атомного ядра. Т. 4, вып. 3, 773, 1973.
5. Н.М.Вирясов и др. ОИЯИ, P1-9258, Дубна, 1975.
6. В.П.Хен. ОИЯИ, P1-9100, Дубна, 1975.
7. Л.А.Пономарев. Физика элементарных частиц и атомного ядра, т. 7, вып. 1, 186, 1976.
8. К.Г.Боресков и др. ОИЯИ, P1-8163, Дубна, 1974.
9. J.D.Jackson. Nuovo Cim., 33, 906, 1964.
10. Particle Data Group. Phys.Lett., 39B, 1, 1972.
11. F.James. FOWL. A Monte-Carlo Event Generation Program. CERN Program Library, W505.
12. В.А.Беляков, Э.Г.Бубелев, Е.С.Кузнецова. Письма в ЖЭТФ, 8, 4, 197, 1968.
13. В.В.Глаголев и др. ОИЯИ, 1-9842, Дубна, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июня 1976 года.