

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



20/VI-77

P1 - 10502

A-646

2349 / 2-77

Н. Ангелов, С. Бацкович, В. Г. Гришин, С. В. Джмухадзе,
Л. А. Диденко, И. А. Ивановская, Т. Я. Иногамова, Т. Канарек,
Е. Н. Кладницкая, В. Б. Любимов, Н. Н. Мельникова, Ю. Надь,
Р. М. Назаргулов, В. Ф. Никитина, В. М. Попова,
А. Н. Соломин, Х. Семерджиев, М. И. Соловьев,
М. К. Сулейманов, Д. Тувдендорж, Э. Т. Цивцивадзе,
Л. М. Щеглова

ИССЛЕДОВАНИЕ

ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ТОЖДЕСТВЕННЫХ ЧАСТИЦ

В π^+p -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 40 ГэВ/С

1977

P1 - 10502

Н. Ангелов, С. Бацкович,¹ В. Г. Гришин, С. В. Джмухадзе,²
Л. А. Диденко,³ И. А. Ивановская, Т. Я. Иногамова, Т. Канарек,
Е. Н. Кладницкая, В. Б. Любимов, Н. Н. Мельникова, Ю. Надь,
Р. М. Назаргулов, В. Ф. Никитина, В. М. Попова,³
А. Н. Соломин,³ Х. Семерджиев, М. И. Соловьев,
М. К. Сулейманов,⁴ Д. Тувдендорж, Э. Т. Цивцивадзе,²
Л. М. Щеглова³

ИССЛЕДОВАНИЕ
ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ТОЖДЕСТВЕННЫХ ЧАСТИЦ
В $\pi^+ p$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 40 ГэВ/С

Направлено в ЯФ

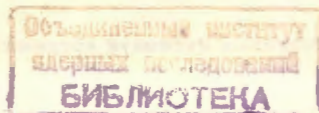
ЯФ, т. 26, вып. 4, 1977, стр. 673

¹ Институт физики, Белград.

² Тбилисский государственный университет.

³ Физический факультет и Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ.

⁴ Институт физики, Баку.



Ангелов Н. и др.

P1 - 10502

Исследование интерференции тождественных частиц
в π^-p -взаимодействиях при 40 ГэВ/с

Показано существование интерференции тождественных π^- -мезонов, рожденных в π^-p -взаимодействиях при импульсе 40 ГэВ/с. Получена оценка размера области генерации и длительности процесса образования вторичных частиц: $R = (1,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-13}$ см и $\tau = (2,6 \pm 1,7) \cdot 10^{-24}$ с.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Angelov N. et al.

P1 - 10502

Investigation of the Interference
of Identical Particles in π^-p Interactions
at 40 GeV/c

The existence of the interference of the identical π^- -mesons produced in π^-p interactions at 40 GeV/c has been shown. The values have been obtained for the generation region dimension and for the duration of the secondary particle production process: $R = (1.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-13}$ m and $\tau = (2.6 \pm 1.7) \cdot 10^{-24}$ sec.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

§1. Введение

В последние годы на ускорителях интенсивно исследуются множественные процессы, которые доминируют при высоких энергиях. Интерес к этим процессам связан с поиском общих закономерностей, необходимых для создания теории сильных взаимодействий. В частности, представляется перспективным изучение интерференции тождественных частиц в области малых разностей импульсов этих частиц, для которой имеются определенные теоретические предсказания ^{/1/}. Изучение интерференции тождественных частиц в принципе позволяет определить пространственно-временные характеристики области их генерации ^{/2,3/}. Так, в переменных, предложенных Копыловым и Подгорецким в работе ^{/2/},

$$q_0 = |E_1 - E_2|, \quad \vec{q}_\perp = |\vec{q} - n(\vec{q}n)|, \quad /1/$$

где

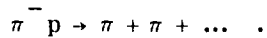
$$\vec{q} = \vec{p}_1 - \vec{p}_2, \quad n = \frac{\vec{p}_1 + \vec{p}_2}{|\vec{p}_1 + \vec{p}_2|},$$

и E_i, \vec{p}_i - энергии и импульсы вторичных пионов в системе центра инерции, было получено следующее соотношение:

$$\frac{N_{\text{тожд.}}(q_0, q_\perp^2)}{N_{\text{фон}}(q_0, q^2)} = 1 + \frac{(2J_1(q_\perp R)/q_\perp R)^2}{1 + q_0^2 \tau^2}. \quad /2/$$

Здесь $N_{\text{тожд.}}$ - плотность пар тождественных пионов, $N_{\text{фон}}$ - плотность пар частиц, не испытывающих интерференции, J_1 - функция Бесселя первого порядка. Формула /2/ получена в рамках статистической модели Померанчука в предположении, что вторичные пионы испускаются независимо с поверхности сферы радиуса R в течение времени τ .

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования интерференции вторичных пионов, генерируемых во взаимодействиях π^- -мезонов с импульсом 40 ГэВ/с с водородом в двухметровой пропановой камере



Для настоящего анализа были отобраны измеренные события с множественностью заряженных частиц $n_{\pm} > 6$ /3760 событий/. Работы по методической части эксперимента были опубликованы ранее /4,5/. Здесь отметим, что из $\pi^- p$ -взаимодействий были исключены такие события, у которых $M_x^2 + 2\Delta M_x^2 < 0$, где M_x - недостающая масса ко всем заряженным частицам. Использование этого условия позволяет исключить примесь $\pi^- \pi^+ \pi^-$ взаимодействий /~8% всех событий/, которая связана со взаимодействиями на нескольких нуклонах ядра углерода /6/.

§2. Фоновые распределения

Суть рассматриваемого эффекта интерференции состоит в том, что квадрат волновой функции двух тождественных бозонов с близкими импульсами больше, чем квадрат волновой функции пары нетождественных частиц /фон/. Фоновое распределение может быть получено двумя способами: во-первых, можно взять распределение пар нетождественных π -мезонов; во-вторых - распределение тождественных частиц, но взятых из различных событий.

При использовании обоих методов имеются трудности методического характера. Если брать в качестве фона распределения пар нетождественных π -мезонов, необходимо учитывать то влияние, которое могут оказать

резонансы (ρ, ω, f, \dots) , сечением генерации которых пренебречь нельзя /7,8/. Влияние может оказать и примесь $e^+ e^-$ -пар от конверсии γ -квантов вблизи звезды. Наконец, при использовании в качестве фона распределения тождественных частиц, взятых из разных событий, нарушаются связи, накладываемые на импульсы частиц законами сохранения энергии и импульса. Поэтому необходим анализ фоновых распределений для более правильного определения параметров R и τ .

Для исследования влияния резонансов и кинематических ограничений мы сравнили распределения тождественных и нетождественных пионов с фоновыми распределениями в зависимости от эффективной массы пар π -мезонов. Отметим, что область малых q_0 и q_1^2 пары пионов соответствует малым значениям их эффективной массы и наоборот.

На рис. 1 приведено отношение распределений $\pi^+ \pi^-$ -мезонов к тождественным пионам, взятым из разных

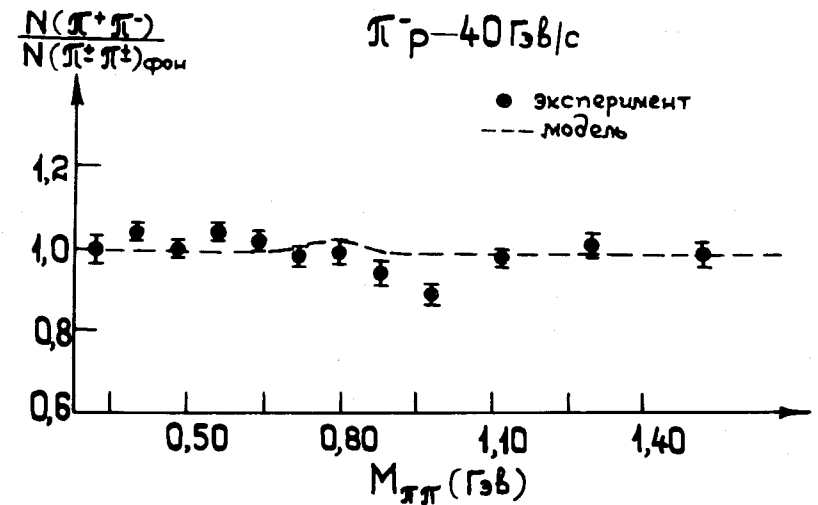


Рис. 1. Зависимость $N(\pi^+ \pi^-)/N(\pi^\pm \pi^\pm)_{\text{фон}}$ от эффективной массы двух пионов. Фоновое распределение получено для пар пионов, взятых из разных событий. Пунктирная кривая - отношение $N(\pi^+ \pi^-)/N(\pi^\pm \pi^\pm)_{\text{фон}}$, рассчитанное по мультипериферической модели.

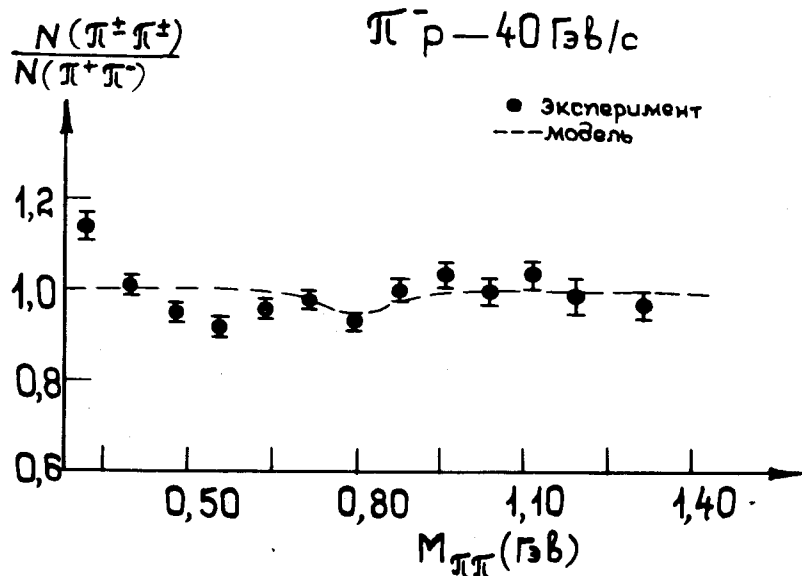


Рис. 2. Отношение $N(\pi^\pm \pi^\pm)/N(\pi^+ \pi^-)$ в зависимости от эффективной массы $M_{\pi\pi}$.

событий, в зависимости от эффективной массы. Видно, что в пределах ошибок в области малых значений масс поведение обоих фоновых распределений одинаково. На рис. 2 и 3 показаны отношения распределений тождественных π -мезонов к обоим фоновым распределениям в зависимости от эффективной массы пары пионов. Пунктиром на рисунках изображены аналогичные отношения, рассчитанные по мультипериферической модели /9/. Эта модель удовлетворительно описывает экспериментальные данные по рождению π -мезонов и резонансов, однако в ней не учитывается интерференция тождественных частиц.

Из рис. 2 и 3 видно увеличение выхода тождественных частиц в области малых масс по сравнению с фоном. В модели такого увеличения в области малых значений масс не наблюдается.

Влияние резонансов может косвенно проявляться в силу процедуры нормировки на одинаковую площадь распределений по $M(\pi\pi)$. В этом случае в области малых значений эффективных масс может уменьшиться плотность пар $\pi^+ \pi^-$ -мезонов из-за увеличения ее в области резонансов. Но, с одной стороны, в области резонансов мы не видим значительного возрастания плотности $\pi^+ \pi^-$ -пар над фоном /рис. 1/, а, с другой стороны, сама около-резонансная область масс находится вдали от области, где и проявляется интерференция. На рис. 4 приведено отношение $N(\pi^+ \pi^-)$ к $N(\pi^+ \pi^-)$ фон для мезонов, взятых из разных событий. Никакого уменьшения отношения в области малых масс не наблюдается.

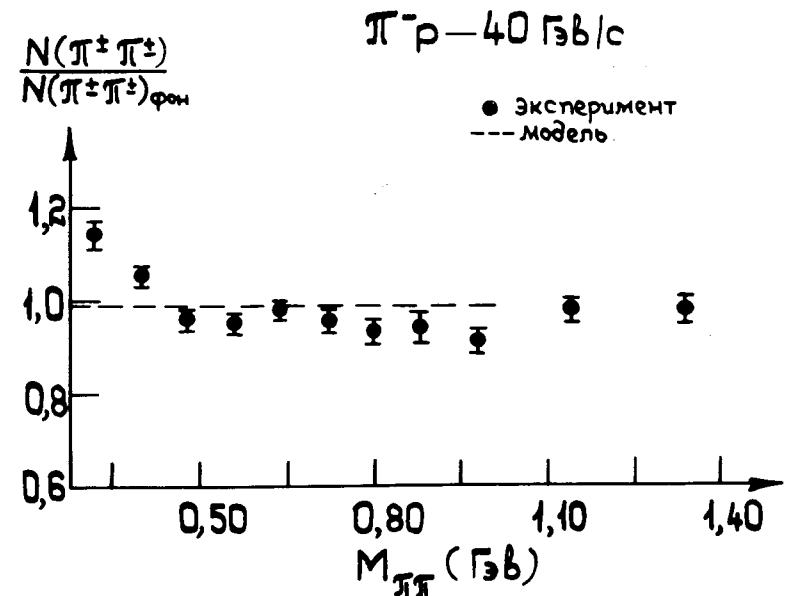


Рис. 3. Зависимость $N(\pi^\pm \pi^\pm)/N(\pi^\pm \pi^\pm)_{\text{фон}}$ от $M(\pi\pi)$. Фоновое распределение получено для пар пионов из разных событий.

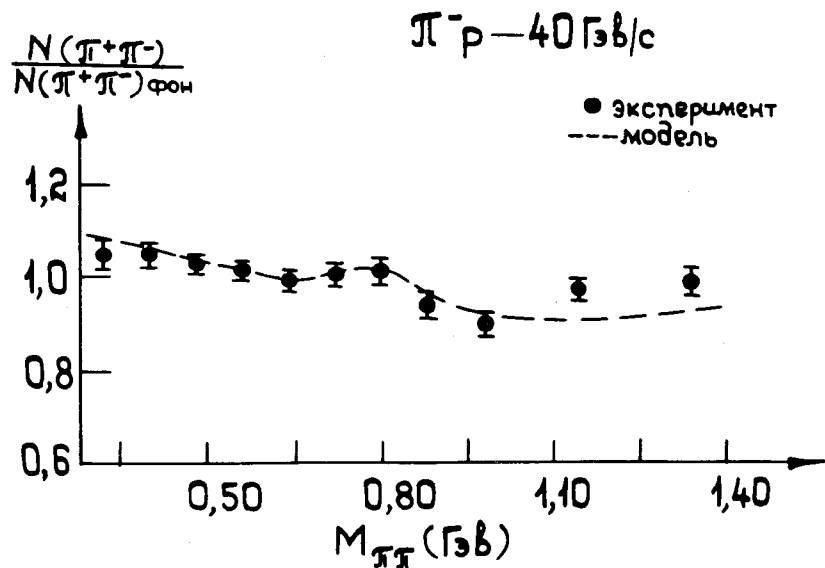


Рис. 4. Зависимость $N(\pi^+\pi^-)/N(\pi^+\pi^-)_{\text{фон}}$ от $M(\pi\pi)$. Фоновое распределение получено для пар пионов из разных событий.

Поведение экспериментальных и теоретических распределений, представленных на рис. 3 и 4, показывает, что процедура перепутывания пионов из разных событий существенно не нарушает кинематической связи между π -мезонами для области значений масс вблизи $M \approx 2m_\pi$. Возможно, это связано с тем обстоятельством, что область малых значений эффективных масс в основном соответствует частицам, генерируемым в центральной области, где, как известно, кинематических корреляций не наблюдается /10/.

Таким образом, анализ приведенных распределений показывает, что тождественные пионы чаще генерируются с малыми разностями импульсов по сравнению с нетождественными пионами. Такое различие нельзя объяснить прямым влиянием рождения и распадом известных резонансов. Объяснение этого эффекта возможно на

основе существования интерференции тождественных частиц, которая в случае π -мезонов /бозонов/ дает положительную корреляцию.

§3. Определение пространственно-временных характеристик процесса множественной генерации

На рис. 5 и 6 представлены отношения распределений $N(\pi^-\pi^-)/N(\pi^-\pi^+)$ по переменным q_\perp^2 и q_0 с ограничениями по q_0 и q_\perp^2 соответственно, и видно, что в области малых значений q_0 , q_\perp^2 есть превышение плотности пар частиц с одинаковыми зарядами по сравнению с плотностью пар с противоположными зарядами. С увеличением q_0 или q_\perp^2 это различие уменьшается.

Превышение лучше наблюдается в распределении по q_\perp^2 , чем по q_0 . Отметим, что в наших первых работах по исследованию интерференции /11, 12/ были выбраны слишком малые интервалы по q_0 и q_\perp^2 , поэтому экспериментальные точки имели недостаточный статистический вес. Кроме того, примесь e^+e^- -пар от конверсии γ -квантов вблизи звезды составляла значительную долю в фоновом распределении / ~ 20%/, что приводило к уменьшению наблюдаемого эффекта. В настоящем анализе интервалы по q_0 , q_\perp^2 увеличены настолько, что примесью e^+e^- -пар можно пренебречь, и, кроме того, используется существенно большее число π^-p -взаимодействий.

Кривые на рис. 5 и 6 представляют собой результат фитирования экспериментальных точек по формулам:

$$f(q_\perp^2) = A_1 + A_2 \exp(-q_\perp^2 R^2 / 4), \quad /3/$$

$$f(q_0) = A_3 + A_4 / (1 + q_0^2 r^2), \quad /4/$$

которые являются удовлетворительным приближением к /2/. В результате получено, что

$$R = /1,7 \pm 0,3/ \cdot 10^{-13} \text{ см} \text{ и } \tau = /2,6 \pm 1,7/ \cdot 10^{-24} \text{ с}.$$

Полученное значение параметра R устойчиво относительно ограничений по q_0 .

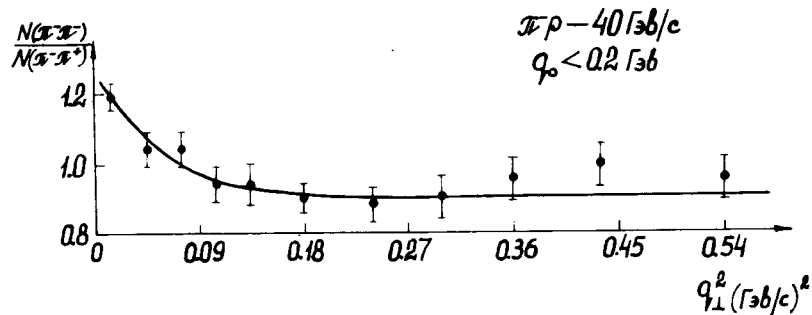


Рис. 5. Отношение $N(\pi^- \pi^-)/N(\pi^- \pi^+)$ в зависимости от q_{\perp}^2 для $q_0 \leq 0,2 \text{ ГэВ}$. Кривая - результат фитирования по формуле /3/ с $R = 1,7 \cdot 10^{-13} \text{ см}$.

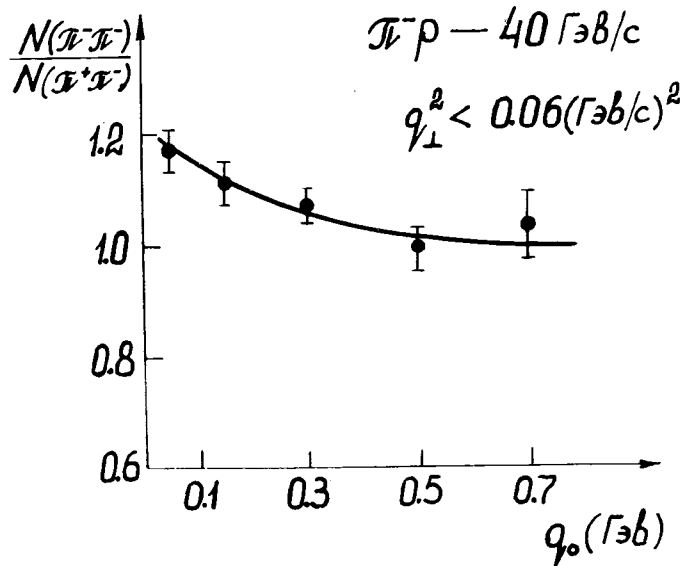


Рис. 6. Отношение $N(\pi^- \pi^-)/N(\pi^+ \pi^+)$ в зависимости от q_0 для $q_{\perp}^2 \leq 0,06 (\text{ГэВ/с})^2$. Кривая - результат фитирования по формуле с $\tau = 2,6 \cdot 10^{-24} \text{ с}$.

Если использовать в качестве фона распределение пар тождественных π -мезонов, взятых из разных событий, то в пределах ошибок фитируемые параметры R и τ оказываются такими же.

Для дополнительной проверки того, что резонансы не влияют на распределения в рассматриваемой области разности импульсов, из распределений по q_0 и q_{\perp}^2 /рис. 7/ исключены те $\pi^+ \pi^-$ -мезоны, эффективная масса которых находится в области ρ^0 -мезона $M_{\pi^+ \pi^-} = /0,77 \pm 0,08/ \text{ ГэВ}$. Фитируемые параметры R и τ при этом оказались в пределах ошибок теми же самыми.

Формулы /3/ и /4/ получены в предположении малости углов между частицами. Поэтому мы дополнительно исследовали распределения по q_0 и q_{\perp}^2 в зависимости от угла между мезонами. На рис. 8 приведено распре-

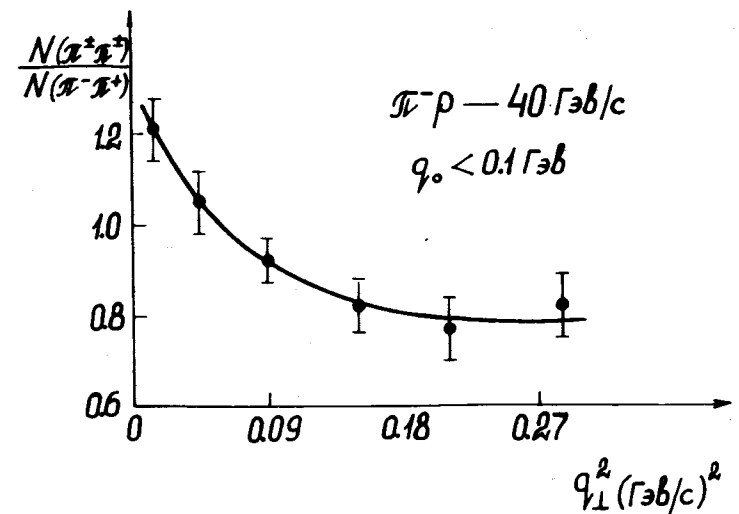


Рис. 7. Отношение $N(\pi^+ \pi^+)/N(\pi^- \pi^-)$ в зависимости от q_{\perp}^2 с $q_0 \leq 0,1 \text{ ГэВ}$. Из распределений исключены π^+ -и π^- -мезоны, эффективная масса которых находится в пределах ρ^0 -мезона: $M_{\pi^+ \pi^-} = /0,77 \pm 0,08/ \text{ ГэВ}$. Кривая - результат фитирования по формуле /3/ с $R = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ см}$.

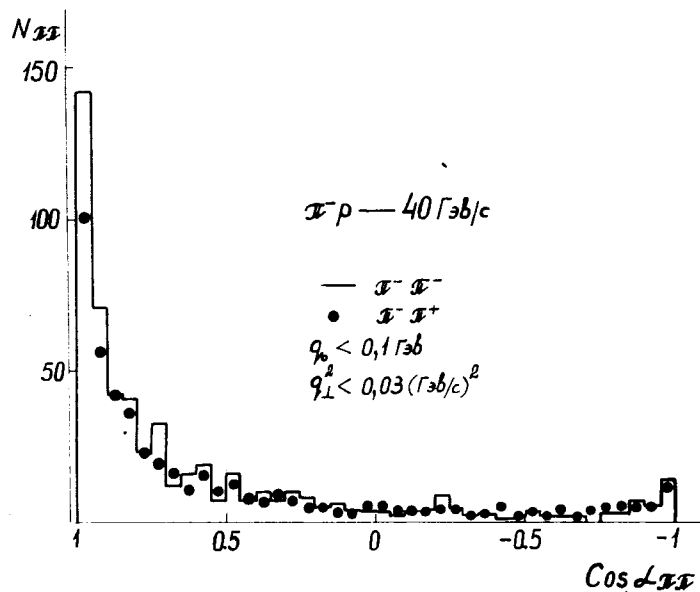


Рис. 8. Распределение $N(\pi^-\pi^-)/\text{сплошная гистограмма/}$ и $N(\pi^-\pi^+)$ (●) по косинусу угла в системе центра масс между π -мезонами при $q_0 \leq 0,1 \text{ ГэВ}$ и $q_1^2 \leq 0,03 \text{ ГэВ}^2/\text{с}^2$.

деление по косинусу угла в системе центра масс между π -мезонами, импульсы которых удовлетворяют условиям $q_0 \leq 0,1 \text{ ГэВ}$ и $q_1^2 \leq 0,03 \text{ ГэВ}^2/\text{с}^2$. Из рисунка видно, что пары сконцентрированы в основном в области малых углов, где и наблюдается эффект превышения тождественных π -мезонов над нетождественными.

Далее мы рассмотрели отношения распределений $N(\pi^-\pi^-)/N(\pi^+\pi^-)$ по q_0 , q_1^2 , удовлетворяющих условию малости угла между частицами ($\cos \alpha > 0,9$). В пределах ошибок эти отношения не отличаются от соответствующих отношений без ограничений на углы.

§4. Попытка определения формы области генерации

Область генерации π -мезонов в системе центра масс может, вообще говоря, не иметь сферической формы.

В этом случае наблюдение пар, вылетающих под определенным углом, дает информацию о размере области генерации в плоскости, перпендикулярной направлению наблюдения. Такой анализ уже проводился ранее /см. /13/. Мы сделали попытку оценить поперечный R_\perp и продольный R_\parallel по отношению к оси столкновения радиусы области генерации, выбирая пары пионов, испускаемых под углами $|\cos \theta| > 0,5$ и $|\cos \theta| < 0,5$ соответственно. Здесь θ - угол между суммарным импульсом частиц $\vec{p}_1 + \vec{p}_2$ и осью столкновения в системе центра масс. Такой отдельный анализ уменьшает статистическую обеспеченность распределений, поэтому результаты могут рассматриваться лишь как указание на тенденцию. Более строгие выводы требуют существенного увеличения статистики.

На рис. 9 представлено отношение $N(\pi^-\pi^-)/N(\pi^-\pi^+)$ в зависимости от q_1^2 для пар мезонов с $|\cos \theta| > 0,5$. Кривая - результат фитирования по формуле /3/ с $R_\perp = /1,9 \pm 0,4/ \cdot 10^{-13} \text{ см}$. В том случае, если рассматриваются все тождественные π -мезоны ($\pi^\pm \pi^\pm$), $R_\perp = /2,3 \pm 0,5/ \cdot 10^{-13} \text{ см}$. Аналогично для пар с $|\cos \theta| < 0,5$ /рис. 10/ мы получаем информацию о продольных размерах области генерации: $R_\parallel = /1,1 \pm 0,4/ \cdot 10^{-13} \text{ см}$.

§5. Выводы

1. В π - p -взаимодействиях при 40 ГэВ/с наблюдается эффект интерференции тождественных пионов.

2. Наблюдаемый эффект позволяет оценить параметры $R = /1,7 \pm 0,3/ \cdot 10^{-13} \text{ см}$ и $\tau = /2,6 \pm 1,7/ \cdot 10^{-24} \text{ с}$, являющиеся пространственно-временными характеристиками множественной генерации пионов. Эти значения в пределах ошибок не зависят от выбранного фона.

3. Получено указание на то, что размер области генерации пионов вдоль оси столкновения меньше, чем в поперечном направлении.

Мы признательны Г.И. Копылову, М.И. Подгорецкому, Н.Г. Фадееву за полезные обсуждения. Мы также благодарны участникам Сотрудничества по обработке событий с двухметровой пропановой камеры ЛВЭ ОИЯИ за помощь в работе.

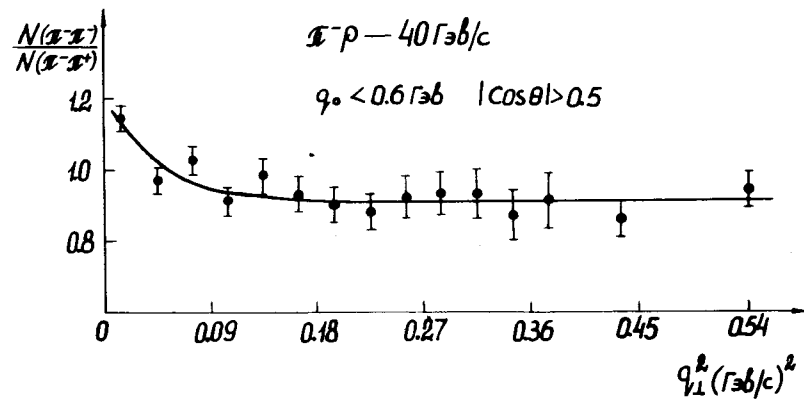


Рис. 9. Отношение $N(\pi^-\pi^-)/N(\pi^-\pi^+)$ в зависимости от q_{\perp}^2 при $q_0 \leq 0,6$ ГэВ и $|\cos\theta| > 0,5$. Кривая - результат фитирования по формуле /3/ с $R_{\perp} = 1,9 \cdot 10^{-13}$ см.

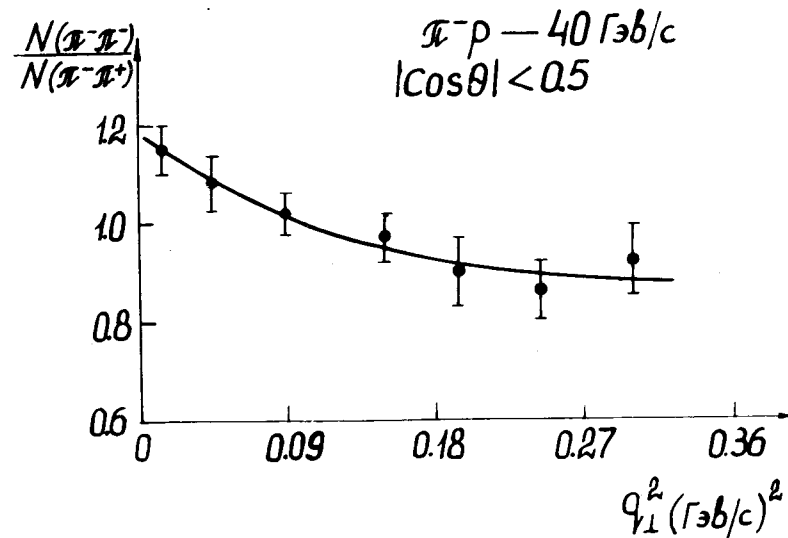


Рис. 10. Отношение $N(\pi^-\pi^-)/N(\pi^-\pi^+)$ в зависимости от q_{\perp}^2 при $q_0 \leq 2$ ГэВ и $|\cos\theta| < 0,5$. Кривая - результат фитирования по формуле /3/ с $R_{\parallel} = 1,1 \cdot 10^{-13}$ см.

Литература

1. Гришин В.Г., Копылов Г.И., Подгорецкий М.И. ЯФ, 1971, 13, с.116; 1971, 14, с.600.
2. Копылов Г.И., Подгорецкий М.И. ЯФ, 1973, 15, с.392; 1973, 18, с.656.
3. Hanbury-Brown R., Twiss R. Q. Phil. Mag., 1954, 45, p.633.
4. Абдурахимов А.У. и др. ОИЯИ, 1-6967, Дубна, 1973.
5. Абдурахимов А.У. и др. ЯФ, 1973, 18, с.545.
6. Назаргулов Р.М. ОИЯИ, P1-10218, Дубна, 1976.
7. Ангелов Н. и др. ЯФ, 1977, 25, с.117.
8. Шляпников П.В. В кн.: Труды XVIII Международной конференции по физике высоких энергий. Тбилиси, 1976. ОИЯИ, Д1,2-10400, том. 1, стр. А2-42, Дубна, 1977.
9. Комаров С.Н. и др. ОИЯИ, 1-8501, Дубна, 1974.
10. Whitmore J. Phys.Rep., 1976, 27C, p.187.
11. Гришин В.Г. В кн.: IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Множественные процессы. ОИЯИ, Д1,2-9224, 11, 1975.
12. Ангелов Н. и др. ОИЯИ, P1-10177, Дубна, 1976.
13. Подгорецкий М.И. В кн.: Труды XVIII Международной конференции по физике высоких энергий. Тбилиси, 1976. ОИЯИ, Д1,2-10400, том 1, стр. А2-27, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 марта 1977 года.