

1-97-319

На правах рукописи
УДК 539.126.34

Я-418

ЯЗЬКОВ
Валерий Викторович

НАБЛЮДЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭФФЕКТА КУЛОНОВСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
В $\pi^+\pi^-$ -ПАРАХ ИЗ РЕАКЦИИ $p + Ta \rightarrow \pi^+ + \pi^- + X$
ПРИ ИМПУЛЬСЕ ПРОТОНОВ 70 ГэВ/с

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

Неменов Л.Л.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Е.М.Лейкин (НИИЯФ МГУ)

доктор физико-математических наук,
профессор

В.А.Никитин

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт физики высоких энергий (г. Протвино)

Защита диссертации состоится "18" сентября 1997 г. в

"___" часов на заседании Диссертационного совета

Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем,

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна,
Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "5" ноября 1997 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ю.А.Батусов

Общая характеристика работы

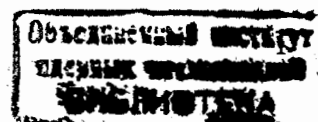
Актуальность проблемы. Кулоновское взаимодействие должно учитываться во всех процессах, где образуются заряженные частицы. Дифференциальное сечение образования пар противоположно заряженных частиц с малыми относительными импульсами в их системе центра масс $q \sim 2\mu\alpha$ (q – удвоенный импульс одной из частиц в системе центра масс пары, μ – приведенная масса пары, α – постоянная тонкой структуры) значительно увеличивается вследствие кулоновского взаимодействия в конечном состоянии в случае, если размер области генерации r_{gr} много меньше Боровского радиуса пары заряженных частиц в связанном состоянии r_B . Для $\pi^+\pi^-$ -пар $r_B \sim 1/\mu\alpha = 387$ фм.

Интерес к исследованию кулоновского взаимодействия в конечном состоянии вызван тем, что возможность описания распределения $\pi^+\pi^-$ -пар в области кулоновского эффекта важна для эксперимента по измерению времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома ($A_{2\pi}$), который позволяет проверить предсказания киральной теории. Кроме того, исследование кулоновских корреляций позволяет изучать распределение частиц по размеру области генерации в координатном пространстве, а также является экспериментальным основанием для вычисления кулоновских поправок для опытов по измерению Бозе-Эйнштейновских корреляций.

В диссертации описан эксперимент по наблюдению эффекта кулоновского взаимодействия в конечном состоянии. Подробно изложена процедура обработки и анализа экспериментальных данных, позволяющая описать экспериментальное распределение $\pi^+\pi^-$ -пар и определить соотношение $\pi^+\pi^-$ -пар, отличающихся по размеру области генерации.

Цель работы. Диссертация посвящена наблюдению и исследованию кулоновских корреляций в системе $\pi^+\pi^-$ -пар.

Научная новизна и практическая ценность. Осуществлено наблюдение кулоновских корреляций в системе $\pi^+\pi^-$ -пар. Разработана процедура аппроксимации распределения $\pi^+\pi^-$ -пар по относительному импульсу, учитывающая кулоновские корреляции, размер области генерации пар и влияние сильного взаимодействия в конечном состоянии. Показано, что предложенный метод позволяет описать экспериментальное распределение пар истинных совпадений при использовании экспериментального распределения пар случайных совпадений и точно вычисляемого значения кулоновской корреляционной функции.



Это необходимо для обоснования метода измерения времени жизни $A_{2\pi}$, оценки его статистических и систематических ошибок, а также применения эффекта кулоновских корреляций для изучения распределения заряженных частиц по размеру области генерации в координатном пространстве.

Апробация работы. В диссертации описаны результаты исследований, выполненных в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с 1987 по 1996 гг. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на научных семинарах ЛЯП и ЛВЭ ОИЯИ, на INTERNATIONAL WORKSHOP ON CORRELATION AND MULTIPARTICLE PRODUCTION (CAMP) в Марбурге (Германия) и опубликованы в периодических изданиях (препринты и сообщения ОИЯИ, статьи в журналах "Ядерная физика", "Приборы и техника эксперимента", "Physics Letters").

Публикации. Основные результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 6 работах.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения; она содержит 80 страниц, 16 рисунков, 9 таблиц и библиографический список литературы из 41 наименования.

Содержание работы

Во введении дается обзор экспериментальных и теоретических работ, показывающих необходимость учета кулоновского взаимодействия в конечном состоянии во всех процессах, где образуются заряженные частицы. Описано влияние кулоновского взаимодействия на дифференциальное сечение образования пар противоположно заряженных частиц с малыми относительными импульсами в их системе центра масс, если размер области генерации r_{gr} много меньше Боровского радиуса пары заряженных частиц в связанном состоянии r_B . Показано, что инклюзивные спектры $\pi^+\pi^-$ пар являются суммой событий двух видов, отличающихся размером области генерации $\pi^+\pi^-$ пар в сравнении с Боровским радиусом $r_B \sim 1/\mu\alpha = 387$ фм.

Пары первого типа состоят из π мезонов, образовавшихся в прямых процессах и при распаде короткоживущих резонансов ($\rho, \omega, \Delta, \dots$). В данном случае характерный размер области генерации $r_{gr} \sim 1 \div 20$ фм, много меньше r_B . Пионы в таких парах испытывают кулоновское и

сильное взаимодействие в конечном состоянии и именуются в диссертации "кулоновскими" парами.

Пары $\pi^+\pi^-$ мезонов второго типа – это события, в которых одна или обе частицы родились от долгоживущих источников ($\eta, K_S^0, \Lambda, \dots$). В этом случае характерный размер области генерации более 10^3 фм и, следовательно, эффекты кулоновского и сильного взаимодействий в конечном состоянии пренебрежимо малы. Такие пары именуются в диссертации "распадными" парами.

Дифференциальное сечение "кулоновских" пар может быть записано в факторизованном виде:

$$\frac{d\sigma_s}{d\vec{p}_1 d\vec{p}_2} = A_c(q) \frac{d\sigma_s^0}{d\vec{p}_1 d\vec{p}_2}, \quad (1)$$

где $d\sigma_s^0/d\vec{p}_1/d\vec{p}_2$ – сечение рождения $\pi^+\pi^-$ пар от короткоживущих источников без учета кулоновского взаимодействия в конечном состоянии, $A_c(q)$ – кулоновский фактор. Для противоположно заряженных частиц, нерелятивистских в их системе центра масс, он может быть записан в виде:

$$A_c(q) = -\frac{2\pi m\alpha/q}{1 - \exp(-2\pi m\alpha/q)}. \quad (2)$$

Во введении указаны работы, в которых проблема кулоновского взаимодействия была решена для произвольных реакций с образованием пар заряженных частиц в конечном состоянии, а также показано, что в случае $\pi^+\pi^-$ пар, релятивистских в системе остаточного ядра, кулоновское взаимодействие пионов с остаточным ядром незначительно.

Описана проблема измерения времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома (теоретическое предсказание $\tau = (3.7 \pm 0.3) \cdot 10^{-15}$ с) и ее значимость для проверки предсказаний киральной теории.

Показано, что для эксперимента по измерению времени жизни $\pi^+\pi^-$ -атома необходимо описать экспериментальное распределение $\pi^+\pi^-$ -пар в области кулоновского пика, так как $A_{2\pi}$ может быть обнаружен, практически, только при регистрации "атомных" пар ($\pi^+\pi^-$ -пар, образовавшихся при развале $A_{2\pi}$ в материале мишени). "Атомные" пары имеют малый относительный импульс $q < 3$ МэВ/с и, следовательно, в распределении по относительному импульсу находятся в области кулоновского пика.

В первой главе описана экспериментальная установка (рис. 1), детекторы, триггер и условия измерения.

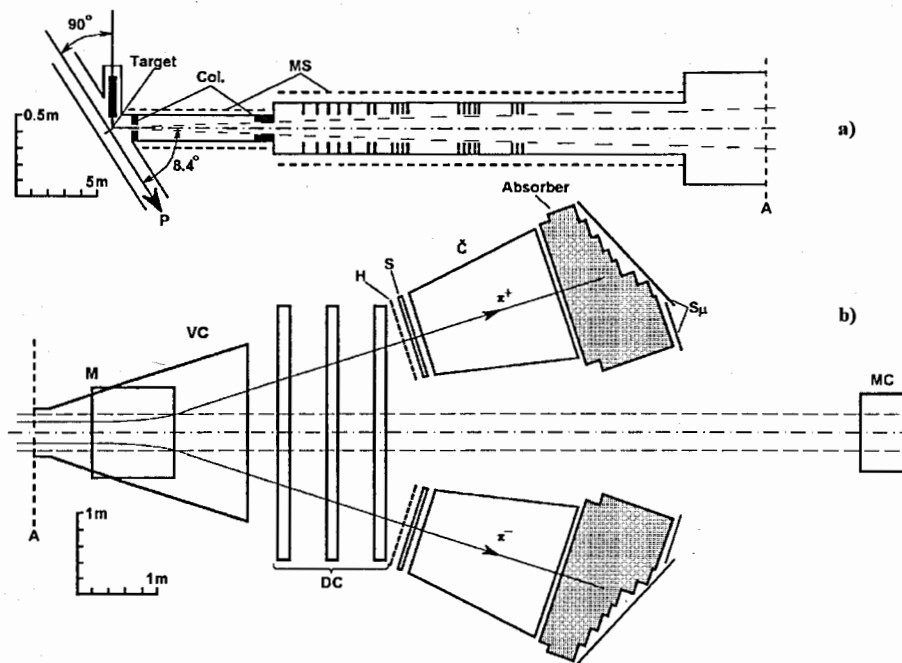


Рис. 1: Экспериментальная установка: а) – схема канала вторичных частиц: p – внутренний протонный пучок, Target – мишень, Col – коллиматор, MS – магнитная защита; б) – магнит и детекторы: M – полюса спектрометрического магнита, VC – вакуумная камера, DC – дрейфовые камеры, H – сцинтилляционные годоскопы, S, S_μ – сцинтилляционные счетчики. Č – газные черенковские счетчики, Absorber – чугунный поглотитель, MC – мониторные счетчики.

Пары $\pi^+\pi^-$ мезонов образовывались в танталовой мишени толщиной $8 \mu\text{m}$ (“толстая” мишень) или $1.4 \mu\text{m}$ (“тонкая” мишень), введенной во внутренний протонный пучок ускорителя, и поступали в вакуумный канал длиной 40 м (акцептанс $3.8 \cdot 10^{-5}$ sr), расположенный под углом 8.4° к протонному пучку. Канал соединялся с вакуумной камерой ускорителя без перегородок и был защищен от магнитного поля

Земли и рассеянных полей ускорителя. Канал заканчивался плоской вакуумной камерой, помещенной в зазоре спектрометрического магнита ($B = 0.85$ T).

Заряженные частицы регистрировались телескопами T_1 и T_2 , состоящими из дрейфовых камер, сцинтилляционных годоскопов, пороговых черенковских счетчиков и мюонных счетчиков, расположенных за чугунными поглотителями. Импульсный диапазон установки $0.8 \div 2.4$ ГэВ/с.

Мониторирование числа взаимодействий протонов с мишенью осуществлялось путем регистрации γ -квантов, прошедших через канал, телескопом сцинтилляционных счетчиков MC со свинцовым конвертером размером 2×2 см².

Триггер первого уровня формировался при совпадении сигналов с телескопов T_1 и T_2 ($H_1 S_1 \bar{C}_1 \bar{S}_{\mu_1}$) \times ($H_2 S_2 \bar{C}_2 \bar{S}_{\mu_2}$) (рис. 1). Триггер второго уровня вырабатывался при наличии положительного решения аппаратного процессора, отбравшего треки, имеющие малый угол в вертикальной плоскости с осью канала, и накладывавшего критерий на разность Y-координат в T_1 и T_2 $|Y_1 - Y_2|$ меньше 80 мм. За цикл ускорителя на магнитную ленту записывалось около 90 событий. Суммарный объем статистики, набранной на “толстой” и “тонкой” мишенях – $1.3 \cdot 10^7$ событий.

Наряду с π мезонами могли регистрироваться также другие заряженные адроны.

Количество срабатываний телескопа T_1 колебалось от сброса к сбросу в пределах 90–130 тыс., а телескопа T_2 в пределах 70–100 тыс. Количество триггеров второго уровня составляло 70–120 за сброс. Измерения показали, что количество событий, состоящих из частиц, родившихся не на мишени, не более 3% от общего числа событий.

Во второй главе описана процедура обработки данных. Рассмотрена геометрическая реконструкция событий, определено разрешение установки по координатам и импульсам частиц, а также по компонентам относительного импульса в с.ц.м. пар частиц. Подробно описано измерение разности времен рождения частиц в мишени.

При обработке данных осуществлялась пространственная реконструкция событий. Находились треки в дрейфовых камерах. Определялись импульсы частиц и координаты треков на входе в магнит с учетом влияния горизонтальной составляющей поля магнита и рассеянного магнитного поля в канале.

Измерения и моделирование позволили определить разрешение установки по импульсу π мезонов в лабораторной системе $\sigma_p/p = 0.008$ и координатам трека на входе в магнит $\sigma_x = 4$ мм, $\sigma_y = 1$ мм. Разрешение по углу между проекциями треков и их направлением на мишень в вертикальной плоскости $\sigma_{\phi_1} = \sigma_{\phi_2} = 1.2$ мрад и по углу раствора частиц перед магнитом $\sigma_{\theta_{1,2}} = 0.1$ мрад. Также были получены разрешения по проекциям относительного импульса $\pi^+\pi^-$ пары в с.ц.м. \vec{q} на направление среднего $\vec{p} = (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)/2$ импульса пары (q_L) и на плоскость, перпендикулярную \vec{p} (q_T): $\sigma_{q_L} = 1.26$ МэВ/с, $\sigma_{q_x} = 0.59$ МэВ/с, $\sigma_{q_y} = 0.58$ МэВ/с для "толстой" мишени и $\sigma_{q_L} = 1.26$ МэВ/с, $\sigma_{q_x} = 0.27$ МэВ/с, $\sigma_{q_y} = 0.24$ МэВ/с для "тонкой" мишени. Приведенные значения разрешения являются величинами, усредненными в интервале импульсов π мезонов $0.8 \div 2.4$ ГэВ/с.

Разность времен прохождения частиц через телескопы T_1 и T_2 измерялась с помощью сцинтилляционных годоскопов на ФЭУ-85. При обработке данных с годоскопов выполнялась коррекция разности времен прохождения двух частиц, учитывающая индивидуальные задержки сигналов от каждого счетчика и время собирания света в сцинтилляторах. Это позволило улучшить временное разрешение с $\sigma_t = 1,78$ нс до $\sigma_t = 0,81$ нс.

Для пар заряженных адронов, после введения коррекции разности времен прохождения частиц через годоскопы на время пролета частиц от мишени (масса частиц принималась равной массе π мезона), было получено распределение по разности времен образования частиц в мишени $t_{pr} = t_+ - t_-$ (рис. 2).

Распределение содержит пик истинных совпадений ($\sigma = 0.8$ нс) (это пары, состоящие из частиц, родившихся в одном протон-ядерном взаимодействии) и равномерную подложку фона случайных совпадений. Интервал $\Delta t_2 = 2.56$ нс использовался для получения суммы N_{in}/dq истинных и случайных совпадений, а интервалы $\Delta t_1 = \Delta t_3 = 8.0$ нс для получения распределений пар случайных совпадений N_a/dq . В интервале Δt_2 отношение числа событий истинных и случайных совпадений равно 0.36.

Более 97% от общего числа зарегистрированных пар истинных совпадений составляли $\pi^+\pi^-$ -пары, родившиеся в мишени. В парах случайных совпадений имелась значительная примесь $p\pi^-$ -пар ($\sim 40\%$).

Для эксперимента по измерению кулоновской корреляционной функции $\pi^+\pi^-$ пар одним из необходимых условий является высокое времен-

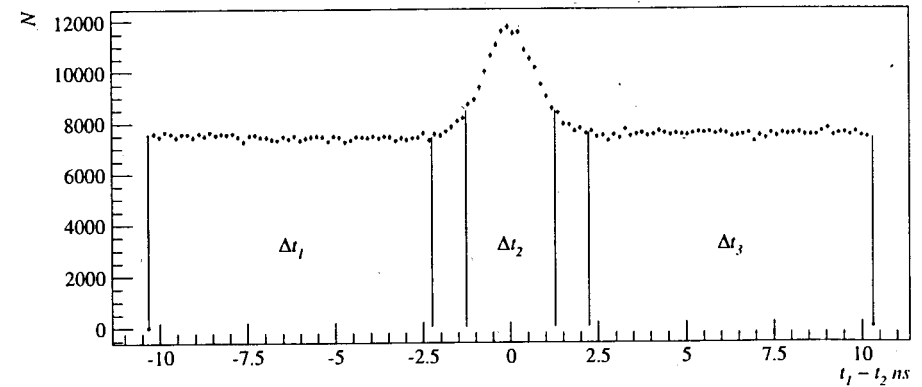


Рис. 2: Распределение событий по измеренной разности времен образования частиц в мишени.

ное разрешение установки. Для проверки возможности повышения разрешения широкоапертурного сцинтилляционного годоскопа, был исследован годоскоп на ФЭУ-143. Временное разрешение годоскопов на ФЭУ-143 исследовалось при запусках от e^+e^- - и $\pi^+\pi^-$ -пар.

На рисунке 3 приведены распределения по разности времен срабатывания двух годоскопов при регистрации e^+e^- - и $\pi^+\pi^-$ -пар после введения поправок на разброс задержек в каналах, после введения коррекции на время пролета и после учета зависимости времени от амплитуды. Эти поправки вводились при off-line обработке. После коррекции времени на зависимость от амплитуды сигнала были получены значения $\sigma = 224$ пс для e^+e^- -пар и $\sigma = 234$ пс для $\pi^+\pi^-$ -пар (рис. 3e,f).

Поскольку оба годоскопа идентичны, характерное временное разрешение σ_t одного годоскопа равно $\sigma_t = \sigma_{\Delta t}/\sqrt{2} = 224/\sqrt{2} = 158$ пс, что является достаточно высоким для счетчиков длиной 1400 мм.

Наряду с получением высокого временного разрешения, интерес представляют также амплитудные характеристики годоскопов, существенные для разделения пионов и протонов по ионизационным потерям. Это необходимо для измерения соотношения количества π^+ -мезонов и протонов в спектрах случайных совпадений, используемого

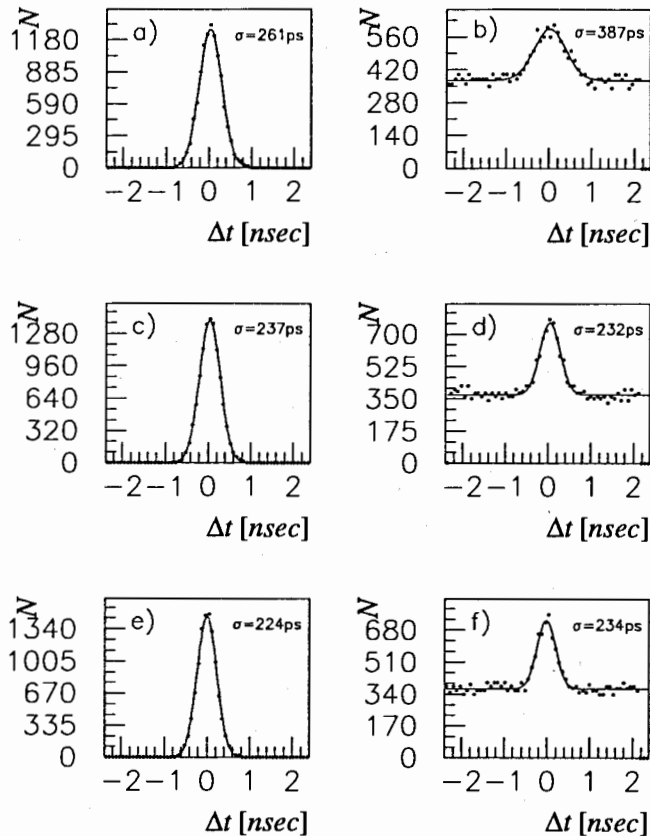


Рис. 3: Распределения по разности времен срабатывания двух годоскопов на ФЭУ-143: а и б – после коррекции только на разброс задержек между каналами для e^+e^- - и $\pi^+\pi^-$ -пар, соответственно; с и д – аналогичные распределения после введения коррекции на время пролета; е и ф – распределения после учета зависимости времени от амплитуды.

при анализе данных, и проверки предсказаний модели FRITIOF 6.0 для этого соотношения.

При запуске установки одним плечом спектрометра получены амплитудные спектры от положительных частиц при разных импульсах, измеренные годоскопом на ФЭУ-143 (рис. 4). Как видно из рисунка, при импульсах $p < 700$ МэВ/с спектры пионов и протонов полностью разделяются, в диапазоне $700 < p < 1000$ МэВ/с наблюдается частичное перекрытие спектров, а при более высоких импульсах разделить пионы и протоны практически невозможно из-за сильного наложения спектров. Доля протонов в импульсном интервале $0.8 \div 2.4$ ГэВ/с, вычисленная в модели FRITIOF 6.0, равна $N_p/N_{\pi^+} = 0.65$. Это отношение было измерено в настоящем эксперименте в области импульсов $0.8 \div 1.4$ ГэВ/с и совпало с расчетным с точностью 5%.

Полученные результаты показывают, что использование фотомножителей ФЭУ-143 позволяет создавать широкоапертурные годоскопы с хорошими временными и амплитудными характеристиками.

Осуществлено измерение эффективности пороговых черенковских счетчиков, предназначенных для подавления регистрации e^+ и e^- : $\epsilon_+ = 98.15 \pm 0.12\%$ и $\epsilon_- = 98.29 \pm 0.11\%$.

В третьей главе описана процедура анализа распределений $\pi^+\pi^-$ -пар по относительному импульсу q , учитывающая эффекты кулоновского и сильного взаимодействий в конечном состоянии, наличие “атомных” пар в области $q < 3$ МэВ/с, многократное рассеяние в мишени, отличие пар частиц по размеру области генерации.

Распределение пар истинных совпадений по относительному импульсу dN_t/dq найдено из соотношения (рис. 2):

$$\frac{dN_t}{dq} = \frac{dN_{ta}}{dq} - \left[\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_3} \right] \frac{dN_a}{dq} \quad (3)$$

Диапазон по относительному импульсу q был разделен на две части. В первой части ($q < 3$ МэВ/с) распределение пар истинных совпадений dN_t/dq содержит как “атомные” пары, так и пары $\pi^+\pi^-$ мезонов, родившихся в свободном состоянии. “Свободные” пары включают как “кулоновские”, так и “распадные”. Во второй части ($q > 3$ МэВ/с) содержатся практически только “свободные” пары.

Распределение dN_t/dq фитировалось в области $q > 3$ МэВ/с функцией, описывающей распределение “кулоновских” и “распадных” пар. После определения параметров аппроксимирующей функции находи-

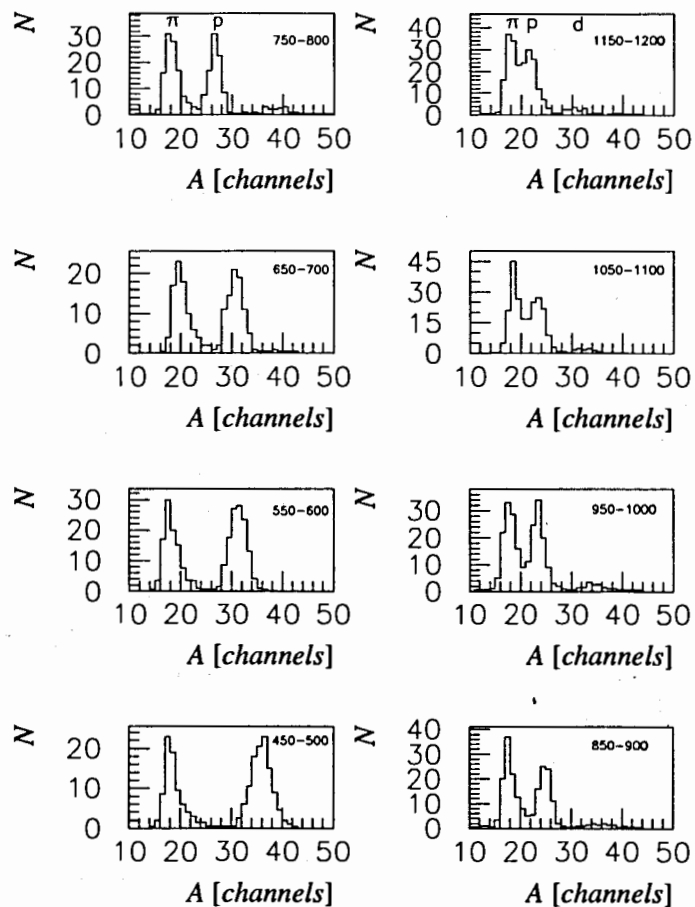


Рис. 4: Амплитудные спектры положительно заряженных частиц, измеренные годоскопом на ФЭУ-143. Числа указывают диапазон импульсов частиц в МэВ/с.

лось расчетное количество “кулоновских” N_C^f и “распадных” N_d^f пар в интервале $q < 2$ МэВ/с.

Экспериментальное количество “атомных” пар N_A было получено как разность наблюдаемого количества пар и расчетного количества пар, родившихся в свободном состоянии. Так как ожидаемое количество “атомных” пар N_A^f непосредственно связано с количеством “кулоновских” пар, разность между экспериментальным N_A и ожидаемым N_A^f количествами “атомных” пар определяется в основном точностью предсказания числа “кулоновских” пар в интервале $q < 2$ МэВ/с ($N_C^f \gg N_d^f$) и является одним из критериев правильности описания кулоновской корреляционной функции.

При построении фитирующей функции за основу бралось распределение пар случайных совпадений π^+ и π^- мезонов. Основанием для такого выбора является то, что распределение таких пар $W(\vec{p}_1, \vec{p}_2)$ и двойное дифференциальное сечение рождения пар истинных совпадений $d\sigma/d\vec{p}_1/d\vec{p}_2$ пропорциональны произведению одночастичных дифференциальных сечений. Различие между распределениями пар истинных и случайных совпадений вызвано только взаимодействием в конечном состоянии и корреляциями, возникающими в процессе генерации пар частиц, так как, в условиях данного эксперимента, влияние законов сохранения пренебрежимо мало, что было подтверждено сравнением импульсных спектров заряженных частиц из пар истинных и случайных совпадений. Эффективность регистрации истинных и случайных пар одинакова и определяется только импульсами частиц, составляющих пару. Это позволяет использовать распределение пар случайных совпадений π мезонов по относительному импульсу $\Phi(q)$ (“фазовый объем”) для описания аналогичного распределения пар истинных совпадений.

Распределение $\Phi(q)$ получено из распределения пар случайных совпадений заряженных частиц dN_a/dq введением для каждого события веса $W_{\pi\pi} = W_1(p_1) \cdot W_2(p_2)$. Здесь $W_1(p_1)$ ($W_2(p_2)$) – вероятность того, что положительно (отрицательно) заряженная частица является π^+ (π^-) мезоном.

$\Phi(q)$ является суммой распределений $\Phi(q)w_s(q)$ пар от короткоживущих источников и $\Phi(q)[1 - w_s(q)]$ пар от долгоживущих источников. Здесь $w_s(q)$ – вероятность того, что оба π мезона образованы короткоживущими источниками.

Соответствующее “кулоновским” парам распределение $\Phi(q)w_s(q)$ необходимо умножить на кулоновский фактор. Для адекватного описания кулоновского взаимодействия разработана процедура, учитывающая многократное рассеяние в мишени и точностные характеристики установки. В результате получено распределение $K(q) = A_c(q')\Phi(q)$ для пар с измеренными в условиях эксперимента параметрами частиц и модифицированным кулоновским фактором $A_c(q')$ (как и в случае пар истинных совпадений от короткоживущих источников).

Исследована возможная зависимость вклада “кулоновских” пар от относительного импульса q , которая может исказить форму кулоновской корреляционной функции, если эффективность регистрации $\pi^+\pi^-$ -пар, как функция q , изменяется при изменении p : $\varepsilon(p, q) \neq \varepsilon(p)\varepsilon(q)$. Такая зависимость может быть уменьшена при разделении экспериментальных данных на узкие интервалы Δp по среднему импульсу пары.

Анализ адронной корреляционной функции показал, что в интервале относительных импульсов $0 \leq q \leq 50$ МэВ/с ее значение изменяется не более, чем на $\sim 6\%$.

На практике экспериментальное распределение пар истинных совпадений фитировалось функциями двух типов, которые были построены на основе функций $\Phi(q)$ и $K(q)$, полученных из экспериментальных распределений пар случайных совпадений. Первая имела два свободных параметра n и w :

$$G(q) = n[wK(q) + (1 - w)\Phi(q)]. \quad (4)$$

Адронная корреляционная функция здесь не учитывалась.

Вторая функция использовалась для совместного фитирования распределений по q в нескольких интервалах по среднему импульсу π мезонов пары, что позволяет компенсировать зависимость соотношения “кулоновских” и “распадных” пар от относительного импульса. В каждом интервале функция определяется тремя параметрами — w_i ($i = 1, 2, \dots$), n и a . Последние два являются общими для всех интервалов:

$$G(q) = n[(1 - ap_i^m)w_iK(q) + (1 - w_i)\Phi(q)]. \quad (5)$$

Величина p_i^m — средний импульс π мезонов в i -том интервале. Параметр a отвечает за изменение количества пар от короткоживущих источников вследствие зависимости значения адронной корреляционной

функции при $q = 0$ от импульса в лабораторной системе. Зависимость адронной корреляционной функции от q не введена, так как анализ показал, что на данном экспериментальном материале она статистически не обоснована.

В четвертой главе описаны результаты анализа экспериментальных данных, полученных в эксперименте на ускорителе У-70.

Были проанализированы распределения $\pi^+\pi^-$ пар со средним импульсом π мезонов в лабораторной системе $800 < p_{1,2} < 2200$ МэВ/с. Общий диапазон по среднему импульсу π мезонов пары p был разделен на 8 интервалов шириной по 175 МэВ/с. Распределение пар истинных совпадений (экспериментальное распределение) по относительному импульсу фитировалось двухпараметрической аппроксимирующей функцией $G(q)$ (4) в каждом интервале, а также в интервалах, объединенных по два, по четыре и во всем диапазоне. Сравнение результатов показало, что, для данного уровня статистической точности, зависимость соотношения короткоживущих и долгоживущих источников от относительного импульса q не влияет на результаты в интервалах шириной $\Delta p < 700$ МэВ/с.

На рис. 5а – 5с показаны распределения событий по q и его проекциям q_L и q_T для интервала по среднему импульсу π мезонов пары $1500 < p < 1850$ МэВ/с, полученные на “толстой” мишени. Представленные распределения содержат пары с $q > 3$ МэВ/с, чтобы исключить “атомные” пары.

На рис. 5d – 5f те же данные представлены в виде корреляционных функций $R(q)$:

$$R(q) = \frac{1}{n} \frac{N(q)}{\Phi(q)}. \quad (6)$$

Здесь $N(q)$ — экспериментальное распределение, $\Phi(q)$ — “фазовый объем”, n — нормировочный коэффициент аппроксимирующей функции $G(q)$ (4).

На рис. 5g – 5l представлены аналогичные распределения, полученные на “тонкой” мишени.

Как следует из рисунка, корреляционная функция возрастает при уменьшении относительного импульса с 1.1 для $q = 15$ МэВ/с до 1.6 при $q = 3$ МэВ/с. Этот эффект соответствует по величине и зависимости от относительной скорости $\pi^+\pi^-$ мезонов в их системе центра

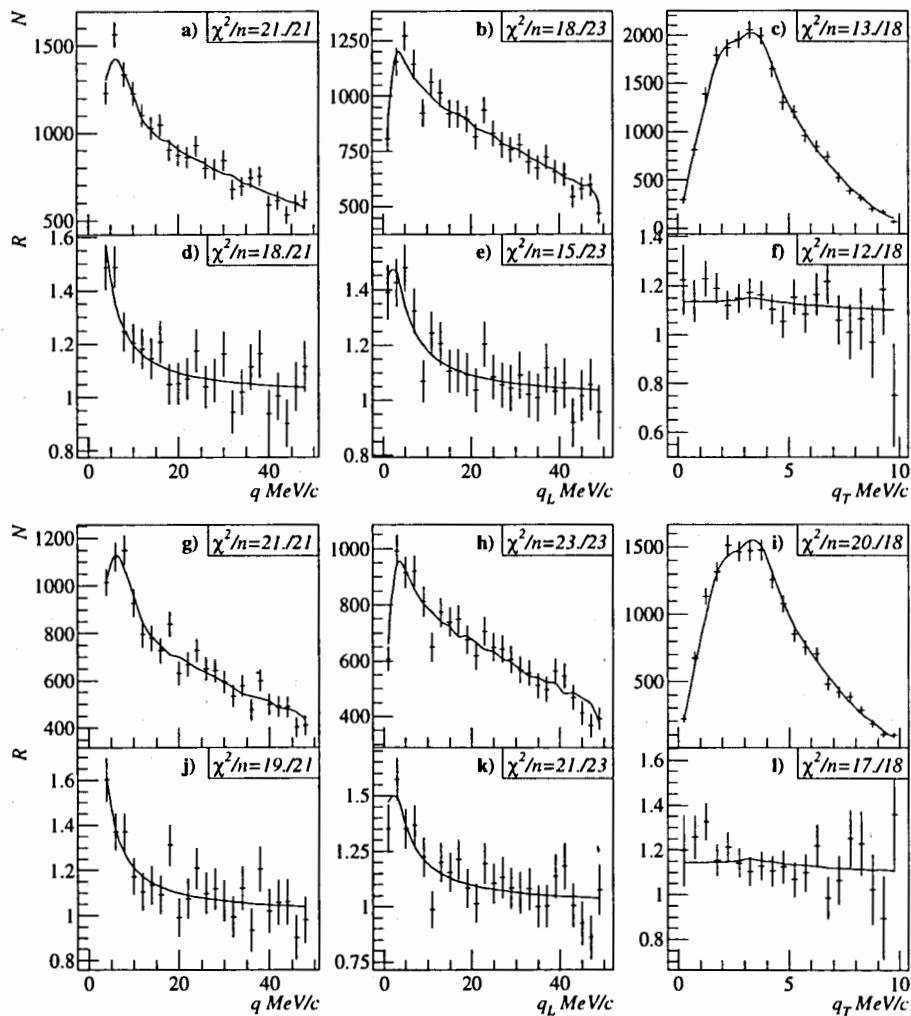


Рис. 5: Распределения событий по относительному импульсу q в интервале $3 < q < 50$ МэВ/с (а) и его проекциям q_L (б) и q_T (с), полученные на "толстой" мишени. Средний импульс пар $1500 < p < 1850$ МэВ/с. Аппроксимирующая функция представлена непрерывной кривой. На рисунках (д), (е), и (ф) те же данные представлены в виде корреляционных функций. Данные, полученные на "тонкой" мишени, представлены на рисунках (г-л), аналогичных (а-ф).

масс кулоновскому фактору, что позволило сделать вывод о наблюдении эффекта кулоновского взаимодействия в конечном состоянии.

На всех рисунках приведены также аппроксимирующие функции (4), полученные в результате процедуры фитирования распределения по q . Для распределений по q_L и q_T использовались значения параметров, определенные при фитировании распределений по q . Хорошее описание распределений по проекциям q подтверждает корректность процедуры описания экспериментальных данных.

Для того, чтобы исследовать зависимость качества описания экспериментального распределения от вида аппроксимирующей функции, было выполнено фитирование данных четырьмя различными функциями:

1. Моделированным распределением "кулоновских" пар $K(q)$.
2. Суммой распределений "кулоновских" $K(q)$ и "распадных" $\Phi(q)$ пар при соотношении, вычисленном в рамках модели Лунд.
3. Суммой распределений "кулоновских" и "распадных" пар. Их соотношение было определено фитированием в восьми импульсных интервалах независимо. Для получения корреляционной функции в полном импульсном диапазоне, значения аппроксимирующих корреляционных функций во всех интервалах были усреднены с учетом статистических ошибок.
4. Трехпараметрической функцией. Фитирование осуществлялось совместно в восьми интервалах с последующим усреднением значений корреляционных функций.

Как видно из рисунка 6, наилучшее согласие с экспериментом обеспечивает трехпараметрическая функция.

Количество "атомных" пар N_A , их ожидаемое число N_A^f и ошибка их разности $\sigma_{\Delta N}$ для двух толщин мишени S_i представлены в таблице 1. Из приведенных данных следует, что экспериментальное и ожидаемое количество "атомных" пар совпадают в пределах статистических ошибок как для "толстой", так и для "тонкой" мишеней. Это позволяет сделать вывод об адекватности описания распределения $\pi^+\pi^-$ пар с учетом кулоновского взаимодействия в конечном состоянии.

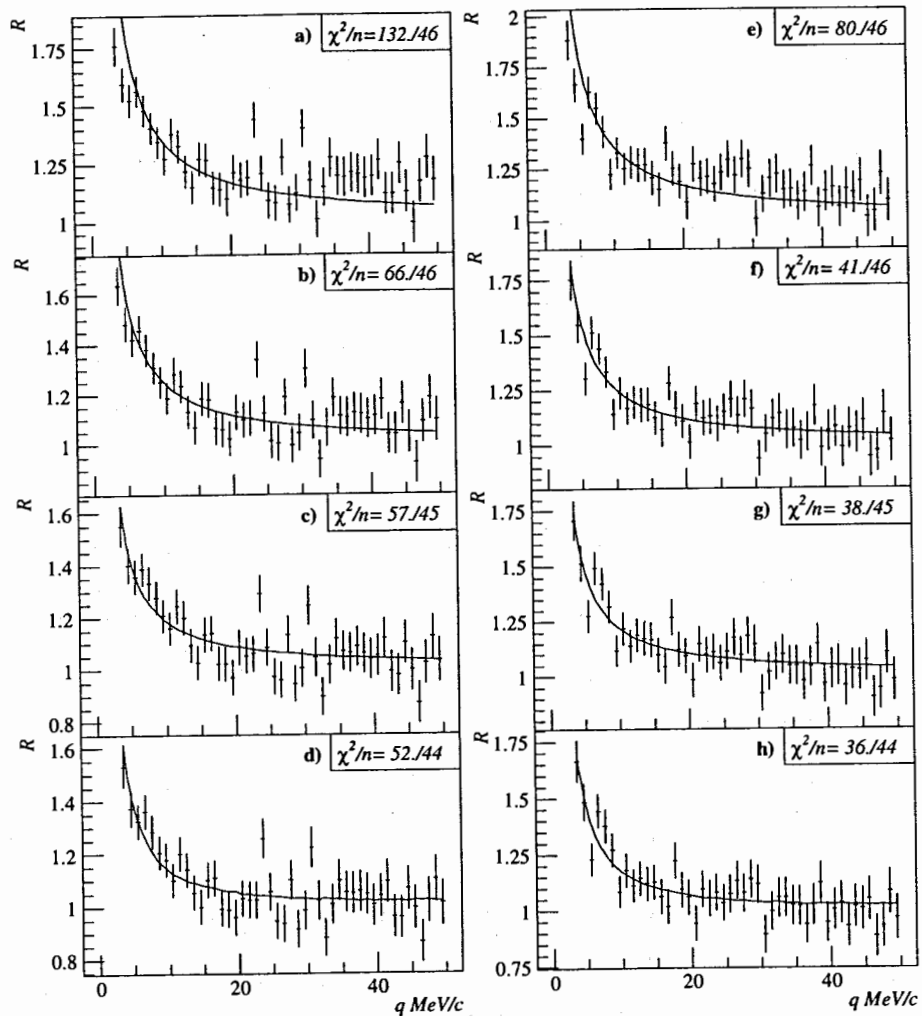


Рис. 6: Корреляционная функция по относительному импульсу для данных, полученных на "толстой" (a-d) и "тонкой" (e-h) мишенях, отфильтрованная аппроксимирующими функциями четырех типов (непрерывные кривые).

Таблица 1:

S_t μm	N_A	N_A^f	$\sigma_{\Delta N}$
8.0	$352. \pm 74.$	$209. \pm 16.$	89.
1.4	$54. \pm 65.$	$43. \pm 3.6$	68.

В таблице 2 приведено значение вклада пар от долгоживущих источников в восьми импульсных интервалах для "толстой" (l_{tk}) и "тонкой" (l_{tn}) мишеней, значение усредненное по обеим мишеням (l_{av}), а также значение, предсказанное в рамках модели FRITIOF 6.0 (l_L).

Таблица 2:

p_{min} MeV/c	p_{max} MeV/c	l_{tk} %	l_{tn} %	l_{av} %	l_L %
800.	975.	17.5 ± 9.2	$43. \pm 15.$	24.5 ± 7.8	47.8
975.	1150.	41.3 ± 7.8	33.7 ± 9.8	38.4 ± 6.1	43.1
1150.	1325.	35.6 ± 7.4	37.0 ± 9.3	36.1 ± 5.8	37.9
1325.	1500.	35.2 ± 7.5	31.1 ± 8.8	33.5 ± 5.7	33.1
1500.	1675.	35.0 ± 8.4	37.8 ± 9.2	36.3 ± 6.2	28.8
1675.	1850.	$63. \pm 11.$	$32. \pm 11.$	47.5 ± 7.8	25.0
1850.	2025.	$34. \pm 18.$	$17. \pm 18.$	$26. \pm 13.$	21.8
2025.	2200.	$47. \pm 49.$	$50. \pm 52.$	$48. \pm 36.$	19.2
800.	2200.	40.3 ± 4.4	33.2 ± 5.0	37.2 ± 3.3	31.3

Как следует из приведенных данных, экспериментально определенный вклад пар от долгоживущих источников определен с точностью 10% и соответствует, в пределах статистических ошибок, расчетным значениям.

Исследование влияния неопределенности разрешения установки по q и примесей e^+e^- и π^-p пар в распределении $\pi^+\pi^-$ -пар на измеренное количество "атомных" пар показало, что при данном уровне статистической точности перечисленные причины не вызывают значимых ошибок.

На основе проведенного анализа данных сделаны оценки необходимого времени набора информации в планирующемся эксперименте по измерению времени жизни $A_{2\pi}$ с точностью 10%: 7 недель при эффективности установки 50%. Реально потребуется большее время, так как для проверки достоверности результата потребуется провести измерения на мишенях, изготовленных из материалов с различными Z .

Также была проанализирована систематическая ошибка измеренного времени жизни димезоатома. Принимая за оценку максимального значения систематической ошибки времени жизни $A_{2\pi}$ арифметическую сумму систематических ошибок, вызванных различными причинами, было получено $S_{A_{2\pi}} \leq 5.5\%$.

В приложении описана процедура вычисления ошибок числа "атомных" пар и значения корреляционной функции. Показана необходимость учета корреляции содержания каналов экспериментального распределения и аппроксимирующей функции, основанной на распределениях пар случайных совпадений π^+ и π^- мезонов.

Основные результаты, полученные в диссертации.

1. Осуществлено наблюдение кулоновских корреляций в системе $\pi^+\pi^-$ -пар.
2. Разработана процедура аппроксимации распределения $\pi^+\pi^-$ -пар по относительному импульсу, учитывающая кулоновские корреляции, размер области генерации пар и влияние сильного взаимодействия в конечном состоянии.
3. Показано, что предложенный метод позволяет описать экспериментальное распределение пар истинных совпадений при использовании экспериментального распределения пар случайных совпадений и точно вычисляемого значения кулоновской корреляционной функции.
4. Обоснован метод измерения числа "атомных" и "кулоновских" пар в области $q < 2$ МэВ/с, что необходимо для измерения времени жизни $A_{2\pi}$ и оценки статистических и систематических ошибок этого метода.
5. Применение этого метода позволило определить число "атомных" пар: 352 ± 74 на "толстой" и 54 ± 65 на "тонкой" мишени.

6. При использовании эффекта, обусловленного кулоновским взаимодействием частиц в конечном состоянии, осуществлено измерение соотношения между числом пар от короткоживущих и долгоживущих источников. Тем самым осуществлено разделение пар заряженных π -мезонов по размеру области генерации в координатном пространстве.
7. Измерение корреляционной функции пар $\pi^+\pi^-$ мезонов экспериментально обосновывает введение кулоновских поправок для экспериментов по измерению Бозе-Эйнштейнских корреляций.
8. Исследованы характеристики широкоапертурного годоскопа на ФЭУ-143. Показана возможность создания на основе данных ФЭУ широкоапертурных годоскопов с хорошими временными и амплитудными характеристиками.

Материалы диссертации опубликованы в работах

1. Куликов А.В., Купцов А.В., Язьков В.В.,
Учет остаточных магнитных полей в канале вывода вторичных частиц, Сообщение ОИЯИ 9-87-838, Дубна, 1987.
2. Афанасьев Л.Г., Горчаков О.Е., Карпукхин В.В., Комаров В.И., Коломыйченко А.В., Круглов В.В., Куликов А.В., Купцов А.В., Куров А.П., Мкртчян Г.Г., Неменов Л.Л., Никитин М.В., Иванов М.А., Пустыльник Ж.П., Трусов С.В., Чвыров А.С., Шумаков М.Н., Фроликов С.М., Язьков В.В.,
Наблюдение эффекта кулоновского взаимодействия в пионных парах из реакции $p + Ta = \pi^+ + \pi^- + X$ при энергии протонов 70 ГэВ, ЯФ, 1990, т.52, с.1046-1058.
3. Afanasyev L.G., Chvyrov A.S., Frolikov S.M., Gorchakov O.E., Ivanov M.A., Karpukhin V.V., Kolomyichenko A.V., Komarov V.I., Kruglov V.V., Kulikov A.V., Kuptsov A.V., Kurov A.P., Neменов L.L., Nikitin M.V., Pustyl'nik Zh.P., Shumakov M.N., Trusov S.V., Yazkov V.V.,
Observation of the Coulomb interaction effect in pion pairs from the reaction $p + Ta = \pi^+ + \pi^- + X$ at 70 GeV, Phys. Lett., 1991, v.255B, p.146-148.

4. Афанасьев Л.Г., Иванов М.А., Карпухин В.В., Комаров В.И., Куликов А.В., Язьков В.В.,
Широкоапертурный сцинтилляционный годоскоп на ФЭУ-143, ПТЭ, 1994, 3, с.25-34.
5. B.Adeva, L.Afanasyev, M.Angeles Lopez, M.Benayoun, A.Chvyrov, C.Ciortea, D.Dumitriu, P.Gianotti, F.Gomes, O.Gorchakov, L.Groza, C.Guaraldo, N.Kalinina, V.Karpukhin, M.Kobayashi, V.Komarov, V.Kruglov, L.Kruglova, A.Kulikov, A.Kuptsov, K.Kuroda, A.Lanaro, Y.Le Bornec, Ph.Leruste, V.Lucherini, T.Maki, L.Micu, L.Montanet, R.Mozzetti, J.Narjoux, L.Nemenov, F.Nichitiu, M.Nikitin, M.Nupieri, K.Okada, T.Okusawa, V.Olshevsky, A.Pazos, M.Pentia, M.Petrascu, C.Petrascu, I.Piticu, M.Plo, T.Ponta, Zh.Pustyl'nik, D.Rjabkov, A.Rosca, J.Schacher, Yu.Scheglov, A.Selikov, Z.Szilagyi, F.Takeutchi, A.Tarasov, B.Tatischeff, S.Trusov, N.Willis, V.Yazkov, J.Yonnet, T.Yoshida, A.Zghiche, V.Zoran, P.Zrelov,
Lifetime measurement of $\pi^+\pi^-$ atoms to test low energy QCD predictions., Proposal to the SPSLC, CERN/SPSLC 95-1, SPSLC/P 284, Geneva 1995. p.20-22,91-95.
6. Afanasyev L.G., Gorchakov O.E., Karpukhin V.V., Komarov V.I., Kruglov V.V., Kulikov A.V., Kuptsov A.V., Nemenov L.L., Nikitin M.V., Pustyl'nik Zh.P., Chvyrov A.S., Trusov S.V., Yazkov V.V.,
Measurement of the Coulomb interaction effect in $\pi^+\pi^-$ pairs from the reaction $pTa \rightarrow \pi^+\pi^- X$ at 70 GeV, Preprint JINR E1-96-256, Dubna, 1996, to appear in Yad.Fiz.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 октября 1997 года.