

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Г 707

1-87-602

ГОРЧАКОВ
Олег Ефремович

НАБЛЮДЕНИЕ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ПОЗИТРОНИЕВ

**Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1987

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

А.В.Купцов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Е.М.Лейкин

доктор физико-математических наук

В.Н.Болотов

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт
физики высоких энергий (Серпухов).

Защита состоится "___" _____ 1987 г. в "___" часов
на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при
Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных
исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1987 г.

Ученый секретарь Специализированного совета

доктор физико-математических наук

Д.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Изучение свойств "экзотических" атомов, таких, как позитроний, мюоний, мезоатомы, адронные атомы и др., занимает заметное место в современной физике. Исследование этих атомов дало важные сведения об элементарных взаимодействиях, структуре атомного ядра и твердого тела.

Мюонные мезоатомы являются одним из средств для получения данных о распределении заряда в ядре. С помощью адронных атомов получают информацию об адрон-нуклонных взаимодействиях при очень низких энергиях, исследуют распределение вещества в ядре и определяют точные значения таких характеристик адрона, как, например, его масса и магнитный момент.

В настоящее время стали широко изучаться теоретически и экспериментально элементарные атомы, образующиеся в свободном состоянии как при низких, так и при высоких энергиях. Атомы позитрония и мюония в вакууме были использованы для проверки квантовой электродинамики.

На циклических ускорителях высоких энергий могут быть получены ультрарелятивистские позитронии с гамма-факторами $10^3 + 10^4$ и более. На ускорителях протонов они в основном образуются при распаде Λ^0 -мезона: $\Lambda^0 \rightarrow \gamma + \text{позитроний}$. Актуальным является наблюдение ультрарелятивистских позитрониев, исследование их взаимодействия с веществом и электромагнитным полем и проверка теории этих процессов.

В диссертации описывается эксперимент по наблюдению ультрарелятивистских позитрониев от распада Λ^0 -мезона, эффективные алгоритмы моделирования методом Монте-Карло распадов элементарных частиц и быстродействующая программа многомерного фитирования экспериментальных данных методом ортогональных полиномов. Создание быстродействующего программного обеспечения представляется также актуальным.

Цель работы. Диссертация посвящена наблюдению ультрарелятивистских позитрониев от распада Λ^0 -мезонов и разработке программного обеспечения эксперимента по регистрации этих атомов.

Научная новизна и практическая ценность. Зарегистрировано 185+30 ультрарелятивистских позитрониев и обнаружен самый редкий из

наблюдавшихся распадов – распад π^0 -мезона на γ -квант и позитроний. Наблюдение ультррелятивистских позитрониев открывает возможность постановки экспериментов по исследованию процессов взаимодействия ультррелятивистских атомов с веществом и электромагнитным полем.

Практическую ценность имеют также разработанные эффективные алгоритмы моделирования методом Монте-Карло распадов элементарных частиц и быстродействующая программа многомерного фитирования экспериментальных данных методом ортогональных полиномов.

Апробация работы. В диссертации описаны результаты исследований, выполненных в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с 1975 по 1984 гг. Результаты докладывались на семинарах ЛЯП ОИЯИ, на сессии Отделения ядерной физики АН СССР (Москва, 1982 г.), представлены на Рочестерскую конференцию (Париж, 1982 г.).

Публикации. Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в 6 работах.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения; она содержит 120 страниц, 37 рисунков, 1 таблицу и библиографический список литературы из 96 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных изучению образования элементарных атомов в свободном состоянии в процессах рекомбинации, в инклюзивных процессах и при распадах элементарных частиц.

Во введении описаны также основные характеристики атомного распада π^0 -мезона и основные свойства ультррелятивистских позитрониев (A_{2e}). Отношение ρ вероятности атомного распада π^0 -мезона к вероятности его распада на два γ -кванта равно: $\rho = 1,69 \cdot 10^{-9}$. При распаде π^0 -мезона позитронии образуются в триплетном состоянии с временем жизни, равным $1,4 \cdot 10^{-7}$ с. Позитронии с гамма-фактором $\sim 10^3$ имеют длину распада ~ 40 км, т.е. они являются практически стабильными. Позитроний, двигаясь в веществе, может развалиться. Длина развала релятивистского позитрония в углероде равна $\approx 0,14$ мкм. Позитроний также разваливается при движении в поперечном магнитном поле с напряженностью больше пороговой; для основного состояния $N_{\text{пор}} = 1,4 \cdot 10^5 / \gamma$ (э), где γ -гамма-фактор позитрония.

Из-за малой длины развала позитрониев в веществе необходимо использовать мишени такой толщины, при которой значительная часть образовавшихся π^0 -мезонов распадается вне мишени (π^0 -мезон с энергией

5 ГэВ имеет длину распада ≈ 1 мкм). Такую мишень необходимо устанавливать на внутреннем пучке ускорителя – тогда из-за многократного прохождения через нее коэффициент использования пучка (отношение числа провазимодействовавших протонов к числу прошедших через мишень) будет близок к единице. Для регистрации атомов использовалось свойство диссоциации их в поперечном магнитном поле.

В первой главе диссертации приведены результаты расчетов методом Монте-Карло интенсивностей и импульсных спектров позитрониев, образующихся в процессе $\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}$, для ряда циклических ускорителей протонов, в том числе для ускорителя ИФВЭ. Рассчитаны также интенсивности и импульсные спектры μ -атомов от распада K_L^0 -мезонов, и приведены эффективные алгоритмы моделирования методом Монте-Карло процессов распада элементарных частиц при малых телесных углах детекторов.

Для описания угловой и энергетической зависимости π^0 и K_L^0 -мезонов, образующихся в pp-соударениях, использовались эмпирические формулы для спектров адронов.

Некоторые результаты расчета интенсивностей и импульсных спектров позитрониев от распада π^0 -мезонов приведены на рис. 1 – 3^{1/1}.

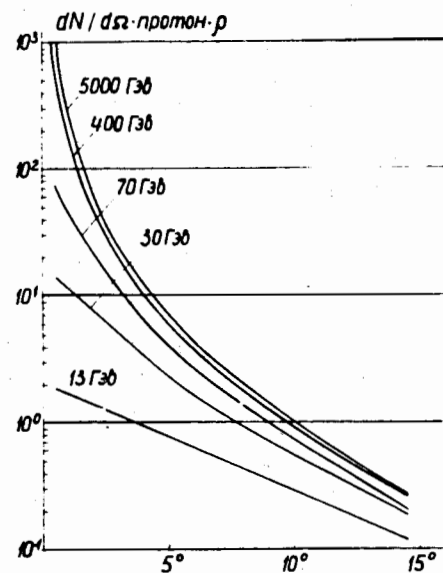


Рис. 1. Зависимость количества позитрониев (на один протон) от угла их вылета для ускоренных протонов с энергиями 13, 30, 70, 400 и 5000 ГэВ. Предполагается, что позитронии в мишени не разваливаются.

Зависимости количества позитрониев от угла их вылета для ускорителей протонов с энергиями 13, 30, 70, 400 и 5000 ГэВ приведены на рис. 1. При расчетах предполагалось, что позитронии в мишени не разваливаются. Число позитрониев, образующихся на ускорителе ИФВЭ в телесном угле 10^{-4} ср за 10 суток работы при сбросе 10^{12} протонов за цикл, для различных толщин мишени приведено на рис. 2 в

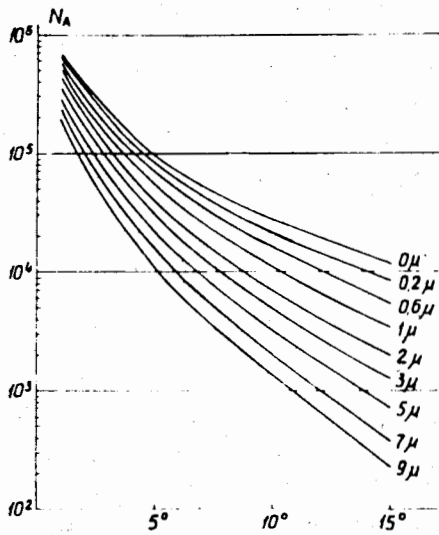


Рис. 2. Количество позитрониев, образующихся на ускорителе ИФВЭ в телесном угле 10^{-4} ср за 10 суток при сбросе 10^{12} протонов/цикл в зависимости от угла и толщины мишени.

зависимости от угла их вылета. Из рисунка следует, что за 10 суток в телесный угол установки "Позитроний" ($2,6 \cdot 10^{-5}$ ср), расположенной под углом $8,4^\circ$, при сбросе на мишень толщиной 1 мкм $3 \cdot 10^{11}$ протонов за цикл вылетает ≈ 1700 позитрониев.

Расчетные импульсные спектры позитрониев в зависимости от угла их вылета для ускоренных протонов с энергией 70 ГэВ приведены на рис. 3.

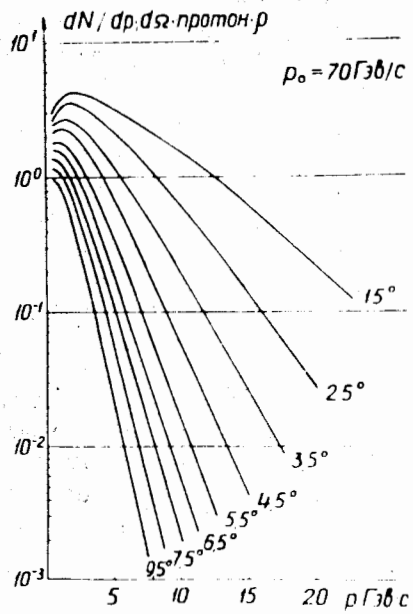


Рис. 3. Импульсный спектр позитрониев для ускоренных протонов с энергией 70 ГэВ.

На установке "Позитроний" основная часть A_{2e} имеет импульсы до 2 ГэВ/с.

На основании полученных результатов были выбраны апертура и угол канала установки "Позитроний".

Посредством моделирования в диссертации получена оценка статистической точности измерения времени жизни π^0 -мезона τ_{π^0} , которое может быть выполнено на установке "Позитроний". Способ измерения τ_{π^0} основан на том,

что число π^0 -мезонов, распавшихся вне мишени, а значит, и число регистрируемых позитрониев, зависит от величины τ_{π^0} . Из результатов моделирования следует [2], что на этой установке за 10 суток работы можно измерить τ_{π^0} со статистической точностью 4-5%.

В первой главе приведены также результаты расчетов интенсивностей и импульсных спектров $\pi\mu$ -атомов, образующихся в процессе $K_L^0 \rightarrow \pi\mu$ - атом + ν . На рис. 4 приведен выход $\pi\mu$ -атомов при сбросе 10^{12} протонов/цикл в зависимости от энергии протонов и от угла, под которым расположен канал длиной 50 м и сечением $0,2 \times 0,2$ м [3]. На выходе из канала установки "Позитроний" за 10 суток работы можно получить ~ 1200 $\pi\mu$ -атомов при сбросе пучка протонов на мишень $3 \cdot 10^{11}$ /цикл.

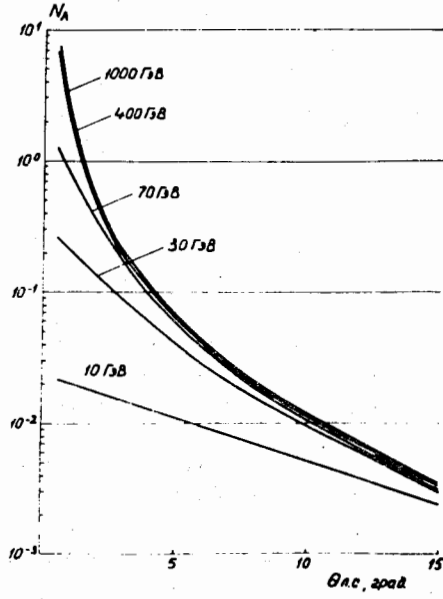
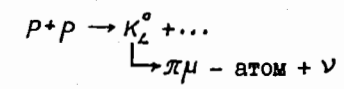


Рис. 4. Зависимость числа $\pi\mu$ -атомов (на 10^{12} проваимодействовавших протонов) от угла, под которым установлен канал, для энергий протонов 10, 30, 70, 400 и 1000 ГэВ. Длина канала - 50 м, сечение - $0,2 \times 0,2$ м.

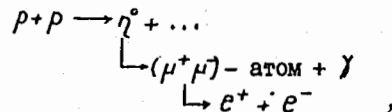
В этой же главе описаны эффективные алгоритмы моделирования распадов элементарных частиц в случае малой апертуры детекторов. Эти алгоритмы были использованы при моделировании атомных распадов π^2 , K_L^0 и η^0 -мезонов, где они повысили эффективность моделирования в десятки раз [4].

Первый алгоритм позволяет разыгрывать вылет $n-1$ частиц при n -частичном распаде точно в телесный угол детектора. Другой алгоритм относится к моделированию каскадного процесса с долгоживущей промежуточной частицей, в частности, процесса

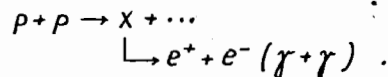


В этом алгоритме переменные $\cos \theta^*$, φ^* , p^* и l ($\cos \theta^*$ - азимутальный угол, φ^* - полярный угол, p^* - импульс K_L^0 -мезона в системе центра масс pp , l - расстояние от мишени до точки распада K_L^0 -мезона) разгруппируются с плотностью, равной $((x-x_0)^2 + \xi_x^2)^{-2}$, где $x = \cos \theta^*$, φ^* , p^* и l . Выбор параметров x_0 и ξ_x описывается.

Следующий алгоритм был разработан для моделирования процесса



в котором e^+ и e^- регистрируются двухплечевым детектором. Алгоритм основывается на том, что при известных значениях импульса γ^0 -мезона и направлении его вылета существует телесный угол Ω_0 , при вылете в который $(\mu^+ \mu^-)$ -атома возможно попадание e^+ и e^- в детекторы. Этот телесный угол Ω_0 тем меньше, чем меньше телесные углы детекторов. Способ определения Ω_0 описывается. Этот алгоритм можно использовать и при моделировании процесса



Во второй главе диссертации описывается экспериментальная установка для регистрации позитрониев от распада π^0 -мезонов, *off-line* программа обработки статистического материала с этой установки и быстродействующая программа многомерного фитирования методом ортогональных полиномов.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5. Эксперимент был поставлен на ускорителе ИФВЭ. Мишень из углерода толщиной $\sim 0,5$ мкм устанавливалась на внутреннем пучке. Вакуумный канал длиной 40 м был подсоединен к камере ускорителя без перегородок. Все участки канала, проходящие в рассеянных магнитных полях, экранировались. Вдоль канала на длине ~ 23 м перпендикулярно пучку было приложено магнитное поле напряженностью 56 Э. Это поле не разваливает позитронию с импульсами $p < 2,5$ ГэВ/с и выводит из канала заряженные частицы с импульсами $p < 3$ ГэВ/с. Канал заканчивается плоской вакуумной камерой, помещенной в зазор магнита СП-73. Выходное окно камеры сделано из алюминия толщиной 0,8 мм.

Позитроний на входе в магнит разваливается краевым полем на электрон и позитрон, далее электрон и позитрон разводятся магнитным полем и регистрируются двумя телескопами, состоящими из дрейфовых ка-

мер, сцинтилляционных счетчиков и газовых черенковских счетчиков. Установкой регистрировались позитронии с импульсами 800 - 2000 МэВ/с.

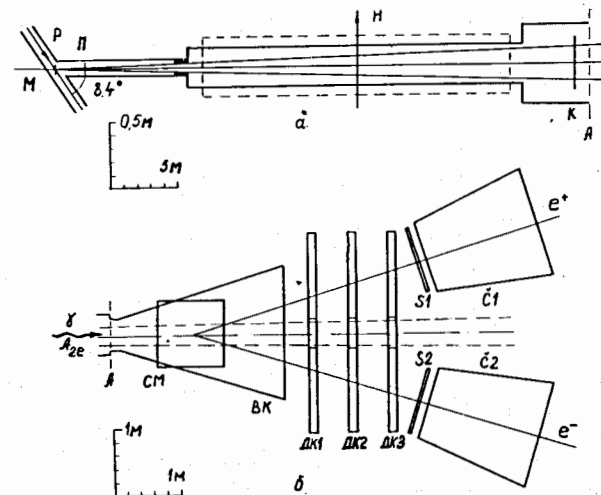


Рис. 5. Схема установки: а - схема канала: P - пучок протонов, M - пленочная мишень, Pi - пленка из лавана, K - коллиматор, H - горизонтальное магнитное поле, K - конвертор из плексигласа; б - схема расположения магнита и детекторов: CM - полюс магнита СП-73, BK - вакуумная камера, DK1, DK2, DK3 - пакеты дрейфовых камер, S1, S2 - сцинтилляционные счетчики, C1, C2 - газовые черенковские счетчики.

Мастер-импульс вырабатывался при совпадении сигналов от сцинтилляционных и черенковских счетчиков. При этом в блоки КАМАК записывалась информация о номерах сработавших проволок, времена дрейфа, амплитудно-временная информация от сцинтилляционных и черенковских счетчиков и показания мониторов. Затем процессор отбирал события, в которых треки электрона и позитрона лежали в одном горизонтальном слое высотой 4 см. Информация о событиях, отобранных процессором, передавалась в ЭВМ М-6000 и записывалась на магнитные ленты.

Во время набора статистики величина сброса пучка протонов на мишень составляла $(2 \div 3) \cdot 10^{11}$ /цикл. Полное число записанных на магнитные ленты триггеров составило $3,8 \cdot 10^6$. Было также набрано $1,2 \cdot 10^6$ фоновых событий. Для этого в начальную часть канала вводилась лавсановая пленка толщиной 10 мкм, которая разрушает позитронии.

Калибровочные измерения проводились на e^+e^- -парах от конверсии γ -квантов в плексигласовом конверторе толщиной 1 мм, который с этой целью вводился в канал. Эти события были использованы для определения точностных характеристик установки.

При *off-line* обработке позитронии выделялись по ряду характерных критериев, большая часть из которых определяется малой энергией связи e^+ и e^- в атоме:

1. Углы треков e^+ и e^- относительно горизонтальной плоскости θ_1 и θ_2 малы и равны между собой, а продолженные через магнит треки направлены в мишень.

2. Разность координат e^+ и e^- в горизонтальной плоскости (ΔX) на входе в магнит равна нулю.

3. Разность координат e^+ и e^- в вертикальной плоскости (ΔY) на выходном окне вакуумной камеры равна нулю.

4. Точка испускания e^+e^- -пары лежит в той части канала, где проходит пучок γ -квантов.

5. Импульсы p_{e^+} и p_{e^-} равны между собой.

В действительности приведенные выше характеристики треков электрона и позитрона верны лишь для средних значений этих величин, т.к. имеет место многократное рассеяние частиц в алюминиевой мембране, в дрейфовых камерах и в воздухе, а также из-за наличия горизонтальной составляющей поля магнита СП-73.

Импульсы и координаты вылета в магнит электрона и позитрона определялись из значений координат и направлений их вылета из магнита; эти зависимости были взяты полиномиальными. В большинстве программ многомерного фитирования полиномами (в том числе в стандартных библиотечных) используется метод ортогонализации Форсайта-Вайсфелда. В диссертации показано^{5/}, что метод ортогонализации Грамма-Шмидта обеспечивает в $M^{1-1/n}$ раз большее быстроедействие, чем метод Форсайта-Вайсфелда, где n - размерность фитируемых данных, M - число членов в полиноме (обычно $n \leq 10$ и $M \leq 60$), и описана реализация этого метода.

Основными функциями *off-line* программы обработки экспериментальной информации с установки "Позитроний" являются: чтение информации с ленты, распаковка этой информации, нахождение треков в дрейфовых камерах, вычисление импульсов и координат вылета e^+ и e^- в магнит и других характеристик, анализ событий.

В третьей главе диссертации проводится анализ экспериментальных данных^{6/}. Для выделения позитрониев использовалось распределение событий по величине $\epsilon = \ln(p_{e^+}/p_{e^-})$; в этом распределении продукты развала позитрониев должны группироваться в узкий пик в окрестности нуля.

События отбирались по критериям на величины ΔX , ΔY , $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$, где $\Delta\theta_1$ и $\Delta\theta_2$ - углы отклонения треков e^+ и e^- в вертикальной плоскости от направления на мишень. Значения критериев зависели от импульсов e^+ и e^- следующим образом:

$$|\Delta X| \leq A_1 \sqrt{p_1^{-2} + p_2^{-2}},$$

$$|\Delta Y| \leq A_2 + A_3 \sqrt{p_1^{-2} + p_2^{-2}},$$

$$|\Delta\theta_i| \leq A_4 + A_5/p_i, \quad i = 1, 2,$$

где $A_1 \div A_5$ - параметры. Было введено последовательно три набора критериев, которые при $p_{e^+} = p_{e^-} = 600$ МэВ/с равны:

$$|\Delta X| \leq 21 \text{ мм}, \quad |\Delta Y| \leq 18 \text{ мм}, \quad |\Delta\theta_i| \leq 10,5 \text{ млрд}, \quad (1)$$

$$|\Delta X| \leq 12 \text{ мм}, \quad |\Delta Y| \leq 7 \text{ мм}, \quad |\Delta\theta_i| \leq 8,3 \text{ млрд}, \quad (2)$$

$$|\Delta X| \leq 9 \text{ мм}, \quad |\Delta Y| \leq 3,4 \text{ мм}, \quad |\Delta\theta_i| \leq 6,5 \text{ млрд}. \quad (3)$$

Соответствующие распределения событий статистики приведены на рис. 6. В распределении на рис.6в в окрестности $\epsilon = 0$ имеется узкий пик, связанный с позитрониями. Ширина его равна 2,4%, что близко к расчетной величине импульсного разрешения установки по переменной ϵ .

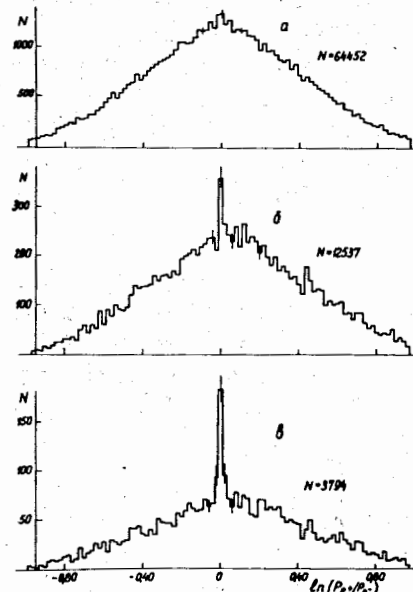


Рис. 6. Распределения (а, б и в) событий статистики, удовлетворяющих критериям (1), (2) и (3) соответственно по ϵ .

По таким же критериям отбирались и фоновые события, набранные с лавсановой пленкой (рис.7). Отсутствие пика в окрестности $\epsilon = 0$ объясняется развалом позитрония в пленке.

Пик в распределении по ϵ отсутствовал и для событий, удовлетворяющих критериям (2), но не удовлетворяющих хотя бы одному параметру критериев (3), и для событий, находящихся вне

области пучка γ -квантов, и для событий, генерированных на плексигласовом конверторе.

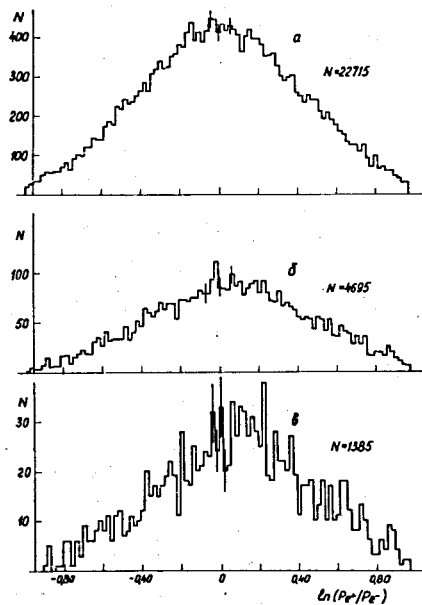


Рис. 7. Распределения (а, б, в) событий фона, удовлетворяющих критериям (1), (2) и (3) соответственно по \mathcal{E} .

Из приведенного анализа следует, что события в пике являются продуктами развала ультрарелятивистских позитрониев в поле магнита. Так как основной источник позитрониев — это распад $\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}$, то наблюдение позитрониев является вместе с тем обнаружением атомного распада π^0 -мезона.

Количество позитрониев было определено поканальным вычитанием из распределения (рис. 6в) фонового распределения (рис. 7в), нормированного на поток γ -квантов, соответствующий статистике. Разностное распределение (рис. 8) содержит в трех центральных каналах число позитрониев, равное 185 ± 30 .

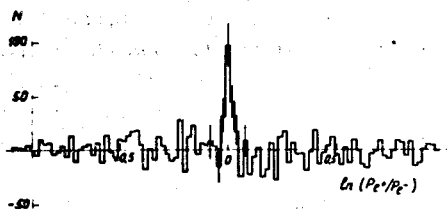
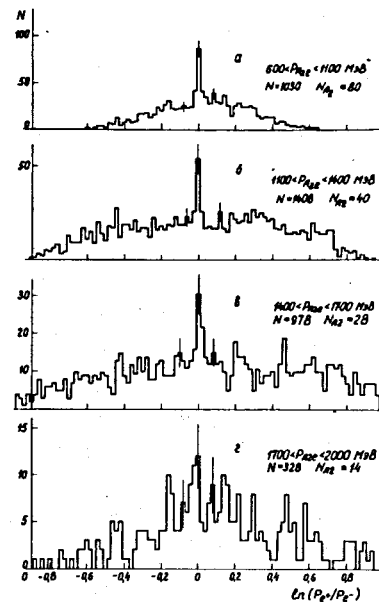


Рис. 8. Распределения событий статистики, удовлетворяющих критериям (3), после вычитания фона. Шаг по \mathcal{E} равен $0,01$.

Для нахождения импульсного спектра позитрониев под измеряемым углом события разбивались по величине $P_{e^+} + P_{e^-}$ на несколько интервалов и для каждого из них находилось распределение событий по переменной \mathcal{E} . На рис. 9 приведен пример в случае разбиения на четыре интервала. На рис. 10 приведен импульсный спектр A_{2e} в случае разбиения на шесть интервалов и с учетом зависимости эффективности установки от импульса позитрония. На этом же рисунке (пунктирная линия)



приведен спектр γ -квантов, полученный на событиях с конвертора. Эти два спектра из-за близкой кинематики процессов $\pi^0 \rightarrow \gamma + A_{2e}$ и $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ должны практически совпадать и они совпадают в пределах ошибок.

Рис. 9. Распределение событий статистики, удовлетворяющих критериям (3) для разных значений $P_{A_{2e}} = P_{e^+} + P_{e^-}$: а) $600 < P_{A_{2e}} < 1100$ МэВ/с, б) $1100 < P_{A_{2e}} < 1400$ МэВ/с, в) $1400 < P_{A_{2e}} < 1700$ МэВ/с, г) $1700 < P_{A_{2e}} < 2000$ МэВ/с.

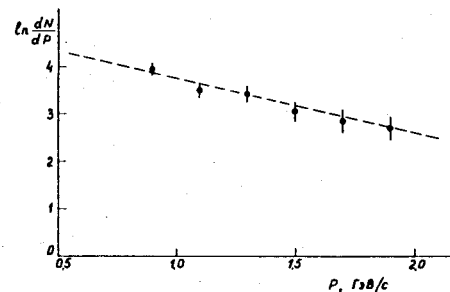


Рис. 10. Импульсные спектры A_{2e} (•) и γ -квантов (пунктир) в канале установки.

Полагая, что все фотоны и позитронии испускаются при распаде π^0 -мезонов, была оценена величина ρ отношения вероятности атомного распада π^0 -мезона к вероятности его распада на два γ -кванта. При этом были учтены эффективность установки и эффективность обработки. Основная неопределенность в оценке величины ρ связана с тем, что использованные в качестве мишеней углеродные пленки расслаивались, что приводило к дополнительному разрушению части позитрониев. Так как степень расслоения и развитие его в течение сеанса неизвестны, то оценка делалась как для мишени без расслоения, так и для полностью расслоенной мишени:

$$\rho = (1 \div 4) \cdot 10^{-9}$$

Основные результаты, полученные в диссертации:

1. Впервые осуществлено наблюдение ультрарелятивистских позитрониев с гамма-факторами от 800 до 2000 и зарегистрирован самый редкий из наблюдавшихся распадов - распад π^0 -мезона на γ -квант и позитроний.

2. Получена оценка отношения ρ вероятности атомного распада π^0 -мезона к вероятности его распада на два γ -кванта:

$$\rho = (1 + 4) \cdot 10^{-9}.$$

3. Создана программа реконструкции и анализа событий с установки "Позитроний", с помощью которой обработана полученная в эксперименте информация.

4. Методом Монте-Карло рассчитаны интенсивности и импульсные спектры позитрониев от распада π^0 -мезонов для ряда циклических ускорителей, в том числе для ускорителя ИФВЭ. На основе полученных результатов были выбраны угол и апертура канала установки "Позитроний".

Рассчитаны интенсивности и импульсные спектры $\pi\mu$ -атомов от распада K_L^0 -мезонов.

5. Посредством моделирования изучена возможность измерения времени жизни π^0 -мезона τ_{π^0} в эксперименте по регистрации его атомного распада. Показано, что на установке "Позитроний" величина τ_{π^0} может быть измерена со статистической точностью $\sim 4 + 5\%$.

6. Разработаны эффективные алгоритмы моделирования распадов элементарных частиц для детекторов с малой апертурой. Эти алгоритмы позволили повысить эффективность моделирования атомных распадов π^0 и K_L^0 -мезонов в десятки раз.

7. Показано, что применение метода ортогонализации Грамма-Шмидта повышает быстродействие программы многомерного фитирования в десятки раз по сравнению с обычно используемым методом Форсайта-Вайсфелда.

Создана универсальная быстродействующая программа многомерного фитирования методом ортогональных полиномов. Результаты, полученные посредством этой программы, были использованы в процедуре определения импульсов электрона и позитрона и их траекторий в магнитном спектрометре установки "Позитроний".

Материалы диссертации опубликованы в работах:

1. Горчаков О.Е., Кушцов А.В., Неменов Л.Л. Оценка интенсивности пучков релятивистских позитрониев на ускорителях высоких энергий. ЯФ, 1976, т.24, с.524.

2. Вертоградов Л.С., Горчаков О.Е., Кушцов А.В., Неменов Л.Л. Оценка точности измерения времени жизни π^0 -мезона по наблюдению его атомного распада. ОИЯИ, Р1-9181, Дубна, 1975.
3. Горчаков О.Е., Кушцов А.В., Неменов Л.Л. Оценка интенсивности пучков $\pi\mu$ -атомов на ускорителях высоких энергий. ЯФ, 1978, т. 27, с.1201.
4. Горчаков О.Е. Эффективные алгоритмы моделирования методом Монте-Карло некоторых процессов взаимодействия элементарных частиц. ОИЯИ, Р5-10715, Дубна, 1977.
5. Горчаков О.Е. Преимущества метода ортогонализации Грамма-Шмидта по сравнению с методом Форсайта при многомерной аппроксимации. ОИЯИ, Р11-84-188, Дубна, 1984.
6. Алексеев Г.Д., Барановский А.И., Горчаков О.Е., Губриенко К.И., Карлухин В.В., Котов В.И., Крутлов В.В., Куликов А.В., Кушцов А.В., Неменов Л.Л., Плотко В.М., Полбенников Е.М., Трусев С.В., Хавинс Д.М., Чыров А.С., Шумаков М.Н., Фроликов С.М. Наблюдение ультрарелятивистских позитрониев. ЯФ, 1984, т.40, с.139.