

На правах рукописи

Жабицкий Михаил Вячеславович

**ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ  $\pi^+\pi^-$ -АТОМОВ  
НА УСТАНОВКЕ DIRAC**

01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:

Москва — 2008

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова  
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Язьков Валерий Викторович  
НИИЯФ МГУ, г. Москва

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Курепин Алексей Борисович  
ИЯИ РАН, г. Москва

доктор физико-математических наук,  
профессор  
Никитин Владимир Алексеевич  
ЛФВЭ ОИЯИ, г. Дубна

Ведущая организация: Государственный научный центр РФ —  
Институт физики высоких энергий,  
г. Протвино

Защита состоится 17 декабря 2008 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.130.07 при Московском инженерно-физическом институте по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31, телефон: (495)3248498.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ и библиотеке ОИЯИ.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” ноября 2008 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

С. Е. Улин

## Общая характеристика работы

Диссертационная работа основана на результатах исследований, выполненных при участии автора в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований в рамках эксперимента DIRAC, проводимого в Европейском центре ядерных исследований (CERN), Женева, Швейцария.

## Объект исследования

Основной задачей эксперимента DIRAC<sup>1</sup> является измерение времени жизни пиония ( $A_{2\pi}$ ) — водородоподобного атома, состоящего из противоположно заряженных пионов. Свойства пиония (размер, взаимодействие с внешними полями) в основном определяются кулоновским взаимодействием составляющих его пионов. Однако время жизни пиония определяется аннигиляцией по каналу сильного взаимодействия ( $A_{2\pi} \rightarrow \pi^0 \pi^0$ ) и составляет всего несколько фемтосекунд ( $\approx 3 \cdot 10^{-15}$  с). Время жизни пиония связано с длинами пион-пионного рассеяния — одного из фундаментальных процессов квантовой хромодинамики при низких энергиях.

Экспериментальный метод основан на наблюдении  $\pi^+ \pi^-$ -пар, возникших в результате ионизации<sup>2</sup> пиония, движущегося в кулоновском поле атомов мишени<sup>3</sup>. Процесс ионизации  $\pi^+ \pi^-$ -атома является конкурирующим по отношению к аннигиляции пиония, следовательно, вероятность ионизации пиония в мишени (т. е. вероятность образования свободной пары  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов на выходе из мишени) является однозначной функцией его времени жизни. Следует особо отметить, что используемый экспериментальный метод определения времени жизни пиония не зависит от моделей квантовой хромодинамики.

## Актуальность темы исследования

Пион-пионное рассеяние является простейшим примером взаимодействия двух адронов. Эксперименты по пион-пионному рассеянию приводят

---

<sup>1</sup>*B. Adeva et al.* DIRAC proposal. CERN-SPSLC-95-1. SPSLC-P-284. 1995.

<sup>2</sup>Словосочетание “ионизация пиония” будет использоваться наряду с “развалом пиония” в соответствии с терминологией, применяемой для описания аналогичных процессов с участием позитрония.

<sup>3</sup>*Л. Л. Немецков*// ЯФ. 1985. Т. 41. С. 980.

к лучшему пониманию механизмов и количественных характеристик взаимодействия адронов. В течение последних 15 лет было проведено несколько экспериментов по определению  $S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния в различных процессах:  $K_{e4}$ -распад, время жизни пиония, наблюдение каспа в распаде  $K \rightarrow 3\pi$ . Благодаря последним экспериментальным работам точность определения  $S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния улучшилась с  $\sim 20\%$  до  $\approx 5\%$ . В настоящее время проводятся эксперименты, ставящие целью повышение точности этих измерений до 2–3 процентов.

Метод определения длин пион-пионного рассеяния путем измерения времени жизни пиония имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с конкурирующими методами. В пионии начальным состоянием аннигиляции  $\pi^+\pi^- \rightarrow \pi^0\pi^0$  является кулоновски связанное состояние двух противоположно заряженных пионов — атом, свойства которого хорошо известны. Боровский радиус пиония — 387 фм. Аннигиляция происходит только в том случае, если пионы могут сблизиться на расстояние порядка нескольких фм, характеризующее радиус сильных взаимодействий. Таким образом, в пионии аннигиляция происходит преимущественно из  $nS$ -состояний, причем время жизни пиония зависит от главного квантового числа  $n$  известным образом:  $\tau_{nS} = \tau_{1S} \cdot n^3$ , где  $\tau_{1S}$  — время жизни пиония в основном состоянии. Так как  $nS$ -состояния обладают нулевым моментом, то аннигиляция пиония определяется  $S$ -волновыми длинами пион-пионного рассеяния. На сегодняшний день точность определения  $S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния по методу времени жизни пиония ограничена в основном экспериментальными неопределенностями, в то время как в других методиках доминируют теоретические неопределенности.

С теоретической точки зрения описание низкоэнергетического пион-пионного взаимодействия осуществляется посредством эффективных теорий поля. Способ построения эффективной теории поля, совместимой с КХД, был сформулирован Вайнбергом<sup>4</sup> в 1979 г.: для вычисления физической амплитуды необходимо построить лагранжиан самого общего вида, учитывающий все необходимые степени свободы, совместный с требовани-

---

<sup>4</sup>*S. Weinberg* // *Physica A*. 1979. V. 96. P. 327. См. также: *С. Вайнберг*. Квантовая теория поля. Т. 1–2. М.: Физматлит. 2003.

ями теории относительности и квантовой механики и учитывающий симметрии процесса. При вычислениях матричных элементов должны быть учтены все члены, дающие вклад в данном порядке теории возмущений.

В качестве параметров разложения в квантовой хромодинамике при низких энергиях обычно выбирают импульсы и массы псевдоскалярных мезонов. С использованием этой техники была сформулирована киральная теория возмущений (КТВ)<sup>5</sup>, в рамках которой построен полный эффективный лагранжиан для октета псевдоскалярных мезонов с точностью до шестого порядка по импульсам и массам мезонов. Значения постоянных, возникающих в эффективном лагранжиане, определялись по экспериментальным данным. В рамках КТВ предсказаны значения длин пион-пионного рассеяния с точностью  $\approx 2,5\%$ . Таким образом, экспериментальное измерение длин пион-пионного рассеяния с сопоставимой точностью является проверкой современного понимания квантовой хромодинамики при низких энергиях.

## Цель работы

Диссертационная работа посвящена измерению времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атомов на установке DIRAC. В работе рассматриваются следующие проблемы, относящиеся к используемому в эксперименте DIRAC методу:

- прямое вычисление вероятности ионизации пиония на выходе из тонкой никелевой мишени;
- способ идентификации пар заряженных частиц по их ионизационным потерям в многослойном сцинтилляционном детекторе;
- экспериментальное определение формы дифференциального сечения рождения пар заряженных пионов с малым относительным импульсом в  $pNi$ -столкновениях;
- создание программного обеспечения, описывающего взаимодействие пиония с атомами мишени и кинематические характеристики фоновых процессов, приводящих к образованию  $\pi^+\pi^-$ -пар;

---

<sup>5</sup> *J. Gasser and H. Leutwyler // Ann. Phys. 1984. V. 158. P. 142; Nucl. Phys. B. 1985. V. 250. P. 465. G. Colangelo, J. Gasser and H. Leutwyler // Nucl. Phys. B. 2001. V. 603. P. 125.*

- получение оценки времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атомов в основном состоянии на основании статистики, набранной в 2001–2003 гг. в эксперименте DIRAC на никелевых мишенях различной толщины.

## Научная новизна

Приведенное в диссертации вычисление вероятности развала  $\pi^+\pi^-$ -атома на выходе из мишени с учетом сечений ионизации налетающего пиония является первым прямым вычислением вероятности развала  $\pi^+\pi^-$ -атома в результате его взаимодействия с веществом мишени.

Полученная оценка времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атомов в основном состоянии базируется на экспериментальной статистике, увеличившейся более чем в 2 раза по сравнению с ранее опубликованным результатом [17]. Благодаря дополнительным измерениям существенно сокращена систематическая ошибка. Полная неопределенность приводимого в диссертационной работе результата на  $\approx 40\%$  меньше погрешности ранее полученной оценки времени жизни.

## Практическая значимость

Предложенный в диссертационной работе метод прямого вычисления вероятности ионизации  $\pi^+\pi^-$ -атома является достаточно общим, в частности, он применим для вычисления вероятности образования различных типов конечных состояний, возникающих в результате последовательных взаимодействий налетающих релятивистских атомов любого типа ( $A_{2\pi}$ ,  $A_{\pi K}$  и т. д.) с веществом мишени.

Модельно-независимым способом определено время жизни  $\pi^+\pi^-$ -атомов в основном состоянии с относительной точностью  $\approx 11\%$ . Полученный результат может быть использован для проверки предсказаний квантовой хромодинамики при низких энергиях.

На основании измеренного времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атомов в основном состоянии оценена разность  $|a_0^0 - a_0^2|$   $S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния с изотопическим спином 0 и 2 с относительной точностью лучше 6%. Полученные точность и величина оценки накладывают ограничения на интервалы допустимых значений параметров эффективных теорий, исполь-

зуемых для описания квантово-хромодинамических процессов при низких энергиях. В частности, на основе полученной оценки можно сделать вывод, что более предпочтительными являются эффективные теории, в которых величина кваркового конденсата  $|\langle 0|\bar{u}u|0\rangle|$  предполагается большой.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Прямое, основанное на сечениях ионизации вычисление вероятности развала  $\pi^+\pi^-$ -атома в результате его электромагнитного взаимодействия с веществом мишени. С учетом ионизации пиония обоснован математический подход к решению системы кинетических уравнений, которая описывает эволюцию заселенности уровней релятивистского  $\pi^+\pi^-$ -атома при его прохождении сквозь мишень. В рамках подхода определены верхняя и нижняя границы значений вероятности развала, что позволило определить зависимость вероятности ионизации пиония на выходе из мишени от его времени жизни с относительной точностью лучше 1% /1/.

2. Создание реалистичной модели, описывающей отклик сцинтилляционного ионизационного годоскопа как на экспериментальные, так и на моделированные события. Реализация и применение при обработке данных процедуры автоматических калибровок параметров годоскопа. Ионизационный годоскоп позволил идентифицировать пары заряженных частиц с малым относительным импульсом путем эффективного отделения сигналов, возникших в сцинтилляторе в результате ионизационных потерь при прохождении двух пространственно близких частиц, от фона сигналов одиночных частиц. Фон от одиночных частиц подавлялся в 50 раз при регистрации более чем 80% двухтрековых событий /7, 8/.

3. Определение формы двойного дифференциального инклюзивного сечения рождения  $\pi^+\pi^-$ -пар с малым относительным импульсом ( $\lesssim 10$  МэВ/с) в реакции  $p + Ni \rightarrow \pi^+\pi^- + X$  при импульсах налетающего протона в 20 и 24 ГэВ/с в кинематическом диапазоне спектрометра DIRAC: полный импульс пары заряженных пионов  $P \in [3; 8,4]$  ГэВ/с, полярный угол вылета пары относительно направления налетающих протонов  $\Theta \in [80; 120]$  мрад /9/.

4. Создание программного обеспечения — кинематического генератора DIPGEN, в рамках которого выполнены расчеты и моделирование методом Монте-Карло процесса прохождения  $\pi^+\pi^-$ -атомов через вещество мишени. В генераторе также реализовано моделирование фоновых процессов, приводящих к образованию  $\pi^+\pi^-$ -пар /13/.

5. Определение времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атомов в основном состоянии /18/ по результатам анализа данных, набранных в 2001–2003 гг. в эксперименте DIRAC на никелевых мишенях:

$$\tau_{1S} = \left(2,77^{+0,31}_{-0,30}\right) \cdot 10^{-15} \text{ с.}$$

Приведенное значение времени жизни соответствует разности  $S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния с изотопическим спином 0 и 2:

$$|a_0^0 - a_0^2| = \left(0,271^{+0,016}_{-0,014}\right) \cdot m_{\pi^+}^{-1}.$$

## **Вклад автора**

Автором осуществлено первое прямое вычисление вероятности ионизации  $\pi^+\pi^-$ -атома в мишени как функции его времени жизни. Автором определены основные характеристики сцинтилляционного ионизационного годоскопа. Он отвечал за настройку и калибровку детектора. Автором проработана методика и осуществлено определение формы двойного дифференциального инклюзивного сечения рождения  $\pi^+\pi^-$ -пар с малым относительным импульсом в реакции  $p + \text{Ni} \rightarrow \pi^+\pi^- + X$ . Им создано программное обеспечение — кинематический генератор DIPGEN. На завершающем этапе анализа данных автором сделан значительный вклад в определение времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атомов на основе статистики, набранной при различных экспериментальных условиях.

## **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались автором на научно-методическом семинаре и семинаре по физике высоких энергий Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, семинаре Отделения экспериментальной физики Института физики



высоких энергий. Также по поручению коллаборации DIRAC результаты были представлены автором на следующих конференциях:

- 34-я Международная конференция по физике высоких энергий (34th International Conference on High Energy Physics ICHEP08) в Филадельфии в 2008 г. /19/.

- Международная конференция по физике экзотических атомов и смежным проблемам (International Conference on Exotic Atoms and Related Topics EXA05) в Вене в 2005 г. /15/.

- Международный рабочий семинар по физике адронных атомов (International Workshop on Hadronic Atoms HadAtom05) в Берне в 2005 г. /16/.

- Научные конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ в Дубне: II /4/ (1998), III /5/ (1999) и XI /3, 12/ (2007).

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, были удостоены Первой премии ОИЯИ для молодых ученых за научно-исследовательские экспериментальные работы в 2006 г.

По тематике эксперимента DIRAC у автора 19 публикаций, включая 6 статей в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК: «Ядерная физика» /1/, «Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics» /14/, «Physics Letters B» /17/ и 3 публикации в «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment» /6, 7, 10/.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах /1, 2, 3, 4, 5/, /6/(раздел 6), /7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19/.

## **Содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Список цитируемой в диссертации литературы содержит 104 наименования. Работа изложена на 126 страницах, содержит 44 графика и 15 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы и сформулированы основные задачи диссертационной работы. Кратко описываются различные экспериментальные методы по определению

$S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния, и дается обзор имеющихся экспериментальных результатов. Во введении дается понятие об эффективных теориях, используемых для описания квантово-хромодинамических процессов при низких энергиях. Особое внимание уделено киральной теории возмущений (КТВ), в рамках которой получено предсказание величин длин пион-пионного рассеяния с точностью в несколько процентов. В конце введения описана структура диссертации.

**В первой главе** излагаются теоретические основы метода определения разности  $|a_0^0 - a_0^2|$  длин пион-пионного рассеяния путем измерения времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атома<sup>6</sup>.

В первом разделе приведены основные характеристики пиония (размер, энергия связи заряженных пионов, боровский импульс). Приведена формула, связывающая ширину распада пиония, находящегося в основном состоянии, на два  $\pi^0$ -мезона с разностью  $|a_0^0 - a_0^2|$   $S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния с изотопическим спином 0 и 2.

В следующем разделе рассмотрен процесс рождения  $\pi^+\pi^-$ -атомов в протон-ядерных столкновениях, в частности, приведена формула, связывающая вероятность образования пиония с двойным дифференциальным сечением инклюзивного рождения  $\pi^+\pi^-$ -пар с малым относительным импульсом. На основе этой формулы получены относительные вероятности образования пиония в различных квантовых состояниях. Обсуждаются поправки, обусловленные сильным взаимодействием между составляющими атом пионами, которое модифицирует кулоновские волновые функции при относительных расстояниях между пионами порядка нескольких ферми. Далее рассмотрены различные процессы, приводящие к образованию пар  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов.

В последнем разделе первой главы рассмотрен процесс взаимодействия налетающего релятивистского  $\pi^+\pi^-$ -атома с веществом мишени. На примере борновского приближения показан метод вычисления переходных сечений, т. е. сечений процессов, в которых налетающий пионий переходит из начального связанного состояния  $|i\rangle$  в связанное состояние  $|f\rangle$ , и сече-

---

<sup>6</sup>Л. Л. Неменов // ЯФ. 1985. Т. 41. С. 980.

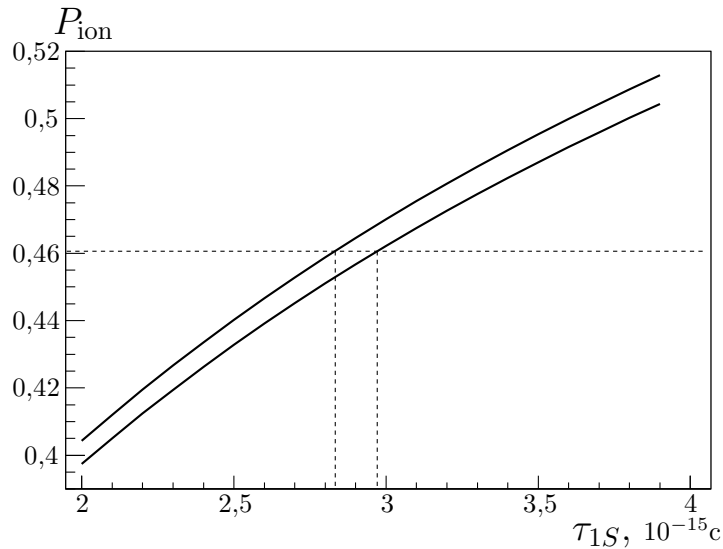


Рис. 1. Верхнее и нижнее ограничения вероятности ионизации пиония  $P_{\text{ion}}$  в никелевой мишени толщиной 95 мкм как функции времени жизни пиония в основном состоянии. Импульс пиония  $P = 4,6 \text{ ГэВ}/c$ . Штриховыми линиями показаны расчетные неопределенности в определяемом значении времени жизни вблизи теоретически предсказанного времени жизни пиония /1/

ний ионизации налетающего пиония в результате его электромагнитного взаимодействия с атомом мишени.

Динамика взаимодействия релятивистского  $\pi^+\pi^-$ -атома с мишенью представляет собой цепочку последовательных столкновений пиония с атомами мишени. Одновременно пионий может аннигилировать в соответствии с временем его жизни, зависящим от квантовых чисел состояния пиония. С учетом вероятностей осуществления вышеприведенных процессов построена система дифференциальных (кинетических) уравнений, описывающих относительную вероятность того, что атом находится в заданном квантовом состоянии после прохождения в мишени расстояния  $\Delta s$ . Формально система кинетических уравнений содержит бесконечное число уравнений, соответствующих бесконечному числу уровней кулоновского атома. В рамках вероятностного формализма показано, как математически строго получить верхнее и нижнее ограничения на вероятность ионизации  $\pi^+\pi^-$ -атома на выходе из мишени. Таким образом, получена однозначная зависимость вероятности ионизации  $\pi^+\pi^-$ -атома на выходе из мишени как функция его времени жизни в основном состоянии с точностью около 1% (рис. 1) /1/.

**Во второй главе** описана экспериментальная установка DIRAC /6/, на которой было зарегистрировано более 13000  $\pi^+\pi^-$ -пар, возникших в результате развала пиония в тонкой никелевой мишени. Установка DIRAC представляет собой двухплечевой магнитный спектрометр, оптимизированный для регистрации пар заряженных частиц с малыми относительными импульсами. Импульсное разрешение спектрометра составляет  $\sigma(P)/P \approx 3 \cdot 10^{-3}$ . Результирующее разрешение по компонентам относительного импульса пары частиц — около 0,5 МэВ/с, т. е. оно сопоставимо с боровским импульсом пиония.

Далее в этой главе приведены характеристики ионизационного годоскопа — многослойного сцинтилляционного детектора, используемого для идентификации пар заряженных частиц по их ионизационным потерям в сцинтилляционных слоях /7, 8/. Детектор состоит из четырех плоскостей, составленных из 16 сцинтилляционных палочек толщиной 1 мм. Несмотря на малую радиационную толщину и, соответственно, малые ионизационные потери в сцинтилляторе годоскоп позволяет эффективно отделять по величине ионизационных потерь сигналы, вызванные двумя близкими треками, от фона сигналов одиночных частиц (рис. 2 и 3).

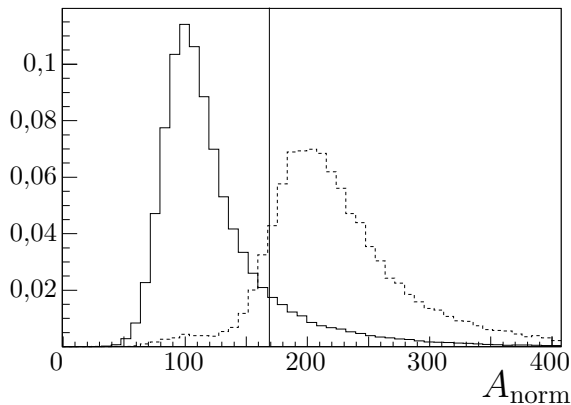


Рис. 2. Амплитудные спектры для одиночных (сплошная линия) и двойных (штриховая) треков. Площади под спектрами нормированы на единицу. Вертикальная линия соответствует предлагаемому критерию для выделения двухтрековых событий-кандидатов при обработке /7/

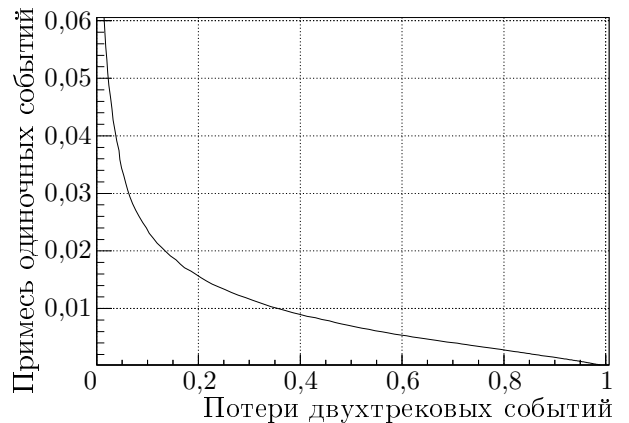


Рис. 3. Вероятность примеси одиночных событий как функция вероятности потери двухтрековых событий при условии, что критерий на ионизационные потери применен в обеих плоскостях с одинаково ориентированными сцинтилляционными пластинами /7/

**Третья глава** посвящена анализу экспериментальных данных, набранных на установке DIRAC. Основным методом является анализ распределения инклюзивных  $\pi^+\pi^-$ -пар по относительному импульсу  $Q$  в системе центра масс пары.

Анализ основывается на полном моделировании по методу Монте-Карло интересующих нас физических процессов. Особое внимание в диссертации уделено специализированному кинематическому генератору DIPGEN /13/, в рамках которого осуществлено численное моделирование динамики взаимодействия пиония с веществом мишени. В рамках этого программного обеспечения также смоделирована кинематика фоновых событий, приводящих к образованию  $\pi^+\pi^-$ -пар. Дальнейшее прохождение заряженных частиц через поле спектрометрического магнита и детекторы смоделировано при помощи программного обеспечения GEANT-DIRAC, базирующегося на реалистичной модели спектрометра DIRAC. Конечным итогом моделирования по методу Монте-Карло является имитация сигналов в детекторах, опирающаяся на их физические характеристики. Смоделированные события обрабатываются тем же способом, что и экспериментальные данные.

Следующий раздел третьей главы посвящен экспериментальному определению формы двойного дифференциального сечения рождения  $\pi^-$ -мезонов в инклюзивной реакции  $p + \text{Ni} \rightarrow \pi^- X$  при импульсе протонов 24 ГэВ/с в кинематическом диапазоне спектрометра DIRAC. На основе моделирования по методу Монте-Карло, описанного выше, получено полное 3-мерное описание аксептанса установки как функции импульса и типа налетающей частицы. При помощи функции аксептанса на основе экспериментальных данных получена оценка формы спектров выхода отрицательных пионов в диапазоне импульсов  $p \in [1,5; 5,0]$  ГэВ/с в интервале углов  $\Theta \in [80; 120]$  мрад к направлению налетающего протона /11/. Форма спектра представлена в виде простой лоренц-инвариантной параметризации, удобной для дальнейших расчетов и численного моделирования.

В последнем разделе показано, что при анализе данных без вершинных детекторов аксептанс установки для пар  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов определя-

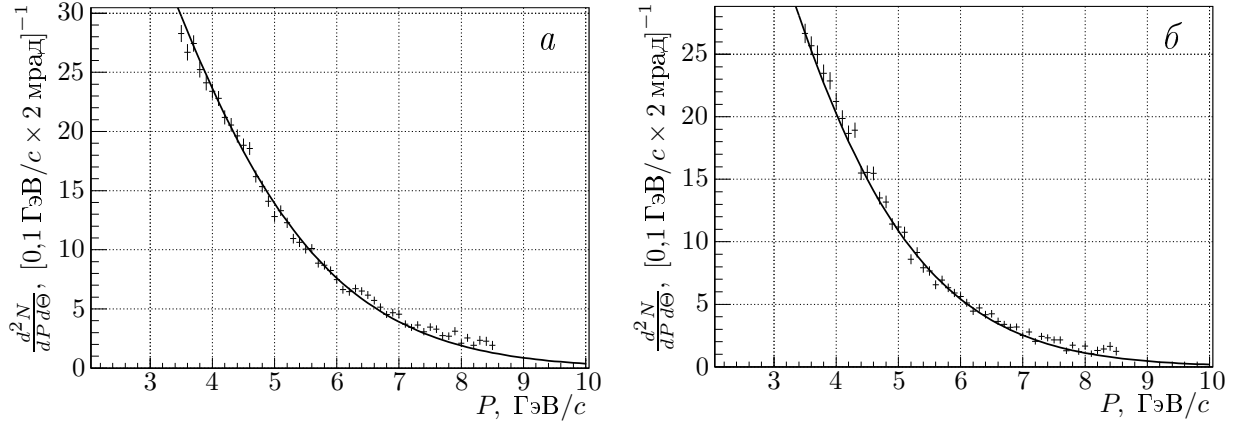


Рис. 4. Форма распределения  $\frac{d^2 N}{dP d\Theta}$  ( $p + \text{Ni} \rightarrow \pi^+ \pi^- X$ ) при фиксированных полярных углах вылета  $\pi^+ \pi^-$ -пары  $\Theta$ : 0,089 (а), 0,108 (б) /9/

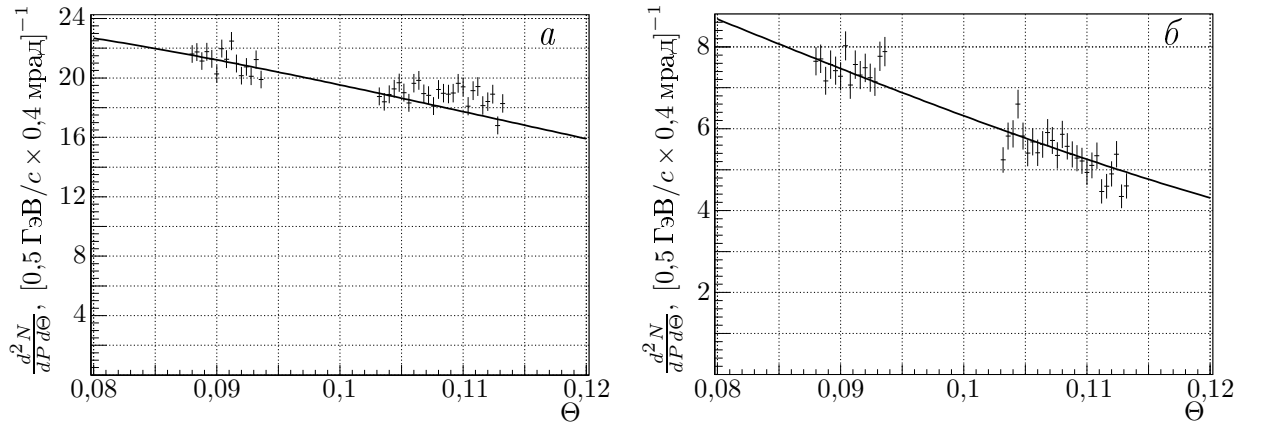


Рис. 5. Форма распределения  $\frac{d^2 N}{dP d\Theta}$  ( $p + \text{Ni} \rightarrow \pi^+ \pi^- X$ ) при фиксированных импульсах  $\pi^+ \pi^-$ -пары  $P$ : 4,2 ГэВ/с (а), 6 ГэВ/с (б) /9/

ется как свертка одночастичных функций акцептанса. Это позволило экспериментально определить форму двойного дифференциального сечения  $dN/(dP d\Theta)$  выхода  $\pi^+ \pi^-$ -пар с малым относительным импульсом /9/ в инклюзивных реакциях  $p + \text{Ni} \rightarrow \pi^+ \pi^- X$  (рис. 4 и 5), где  $P$  — импульс пары в лабораторной системе,  $\Theta$  — полярный угол вылета пары к направлению налетающего протона. Полученный спектр использован при моделировании событий по методу Монте-Карло. Следует также отметить, что достаточно точное знание спектра импульсов  $\pi^+ \pi^-$ -пар необходимо для определения времени жизни пиония  $\tau$  на основе экспериментальной оценки вероятности его ионизации  $P_{\text{ion}}$ . Последняя в первом приближении является функцией произведения импульса пиония  $P$  на его время жизни:  $P_{\text{ion}} \approx P_{\text{ion}}(P \cdot \tau)$ .

В четвертой главе приведено описание измерения относительных выходов анализируемых физических процессов при исследовании экспериментальных данных по относительному импульсу  $Q$ . В частности, определено отношение количества  $n_A$  зарегистрированных  $\pi^+\pi^-$ -пар, возникших в результате развала пиония, к числу  $N_{CC}$  инклюзивных пионных пар с малым относительным импульсом  $Q \in \Omega_Q$ , испытавших кулоновское взаимодействие в конечном состоянии. Полученное отношение пропорционально усредненной по импульсу  $P$  вероятности ионизации пиония

$$P_{\text{ion}} = \frac{n_A}{k(\Omega_Q)N_{CC}(\Omega_Q)},$$

где  $k(\Omega_Q)$  — известный фактор, зависящий от отношения сечений рождения пиония к сечению рождения кулоновских  $\pi^+\pi^-$ -пар с малым относительным импульсом  $Q \in \Omega_Q$  и учитывающий отношение эффективностей их регистрации.

В течение 2001–2003 гг. экспериментальная статистика набиралась на двух никелевых мишенях различной толщины при импульсах налетающих протонов 20 или 24 ГэВ/с. Каждому набору экспериментальных параметров поставлена в соответствие известная теоретическая зависимость  $P_{\text{ion}} = P_i(\tau)$ . В рамках обобщенного метода наименьших квадратов получе-

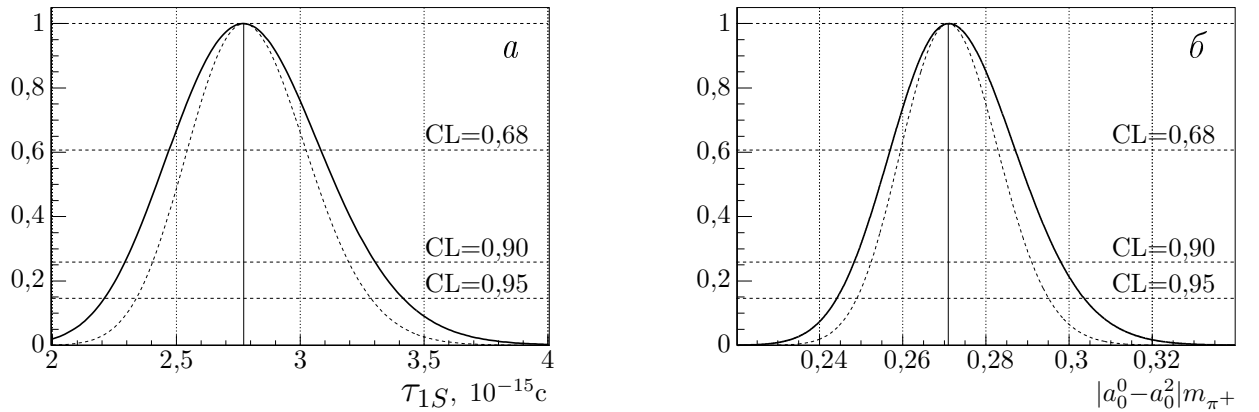


Рис. 6. Функции правдоподобия  $L(\tau)$  (а) и  $L(a_0^0 - a_0^2)$  (б) совокупности экспериментальных измерений вероятности ионизации для оценки времени жизни пиония и разности  $S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния соответственно. Распределения нормированы на единицу при наиболее вероятном значении параметра. Сплошной линией показаны функции правдоподобия с учетом статистических и систематических неопределенностей отдельных измерений, штриховой линией — с учетом только статистических ошибок /18/

на оптимальная оценка времени жизни пиония в основном состоянии /18/ для совокупности экспериментальных измерений вероятности ионизации пиония /19/. При этом учтены статистические неопределенности отдельных измерений и их корреляции из-за систематических ошибок. Для найденного времени жизни  $\pi^+\pi^-$ -атомов приведены соответствующие доверительные интервалы (рис. 6).

На основе измерения времени жизни пиония определена разность  $|a_0^0 - a_0^2|$   $S$ -волновых длин пион-пионного рассеяния с изотопическим спином 0 и 2. Проведено сравнение найденного значения с имеющимися экспериментальными результатами, полученными другими методами.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе (они приведены выше, на с. 5 настоящего автореферата).

Диссертационная работа содержит **3 приложения**. В первом приложении приведено значение квадрата модуля кулоновской волновой функции в нуле. Во втором приложении определены кинематические переменные, используемые в диссертационной работе. Здесь компоненты относительного импульса в системе центра масс пары частиц выражены через векторы частиц в лабораторной системе, получен определитель якобиана перехода из лабораторной системы в систему центра масс пары. В последнем приложении приведена параметризация лоренц-инвариантных дифференциальных сечений, используемая для описания двойного дифференциального инклюзивного сечения рождения  $\pi^+\pi^-$ -пар с малым относительным импульсом в протон-ядерных столкновениях.

В конце диссертационной работы приведен **список цитируемой литературы**.

### **Список публикаций Жабицкого М. В. по теме диссертации**

- [1] *М. В. Жабицкий*. Direct calculation of the probability of ponium ionization in the target// ЯФ. 2008. Т. 71, № 6. С. 1066–1073; Phys. At. Nucl. 2008. V. 71. P. 1040–1047; arXiv:0710.4416 [hep-ph].



- [2] *M. Zhabitsky*. Direct calculation of the probability of ponium ionization in the target. DIRAC note<sup>7</sup> 2007-10. 11 pp. CERN. 2007.
- [3] *М. Жаблицкий*. Прямое вычисление вероятности ионизации  $\pi^+\pi^-$ -атомов при взаимодействии с веществом. Труды XI научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна: ОИЯИ, 2007. С. 31. ISBN 5-9751-0038-0.
- [4] *М. Жаблицкий*. Вычисление заселенностей уровней  $\pi^+\pi^-$ -атома при движении в веществе. Труды Второй открытой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Д-98-224. Дубна: ОИЯИ, 1998. С. 18–20.
- [5] *М. Жаблицкий*. Взаимодействие  $\pi^+\pi^-$ -атомов с веществом. Труды Третьей научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Д-99-94. Дубна: ОИЯИ, 1999. С. 139–141.
- [6] *B. Adeva, . . . , M. Zhabitsky et al. (DIRAC collaboration)*. DIRAC: a high resolution spectrometer for ponium detection// Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 515. P. 467–496; hep-ex/0305022.
- [7] *G. Bitsadze, V. Brekhovskikh, . . . , and M. Zhabitsky*. The ionisation hodoscope of the DIRAC experiment// Nucl. Instr. and Meth. A. 2004. V. 533. P. 353–360.
- [8] *V. Brekhovskikh, . . . and M. Zhabitsky*. New Ionisation Hodoscope: design and characteristics. DIRAC note 2002-09. 18 pp. CERN. 2002.
- [9] *M. Zhabitsky*. Parametrization of  $\pi^+\pi^-$  pairs spectra at the DIRAC kinematic range. DIRAC note 2007-01. 18 pp. CERN. 2007.
- [10] *A. Kulikov and M. Zhabitsky*. Dead time losses and their measurement in DIRAC// Nucl. Instrum. Meth. A. 2004. V. 527. P. 591–597; JINR Preprint E13-2003-243. Dubna. 2003.
- [11] *M. Zhabitsky*. Parametrization of single particle spectra at the DIRAC kinematic range. DIRAC note 2006-06. 24 pp. CERN. 2006.

---

<sup>7</sup>DIRAC notes размещены в свободном доступе на [http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/i\\_notes.html](http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/i_notes.html)

- [12] *M. Жаблицкий*. Оценка формы спектров отрицательных пионов и  $\pi^+\pi^-$ -пар с малым относительным импульсом в  $p\text{Ni}$ -столкновениях при 24 ГэВ/с. Труды XI научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна: ОИЯИ, 2007. С. 28-30. ISBN 5-9751-0038-0.
- [13] *M. Zhabitsky*. DIPGEN (DIRAC Pairs Generator). DIRAC note 2007-11. 8 pp. CERN. 2007.
- [14] *B. Adeva, ..., M. Zhabitsky et al. (DIRAC collaboration)*. Detection of  $\pi^+\pi^-$  atoms with the DIRAC spectrometer at CERN// J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2004. V. 30. P. 1929–1946; hep-ex/0409053.
- [15] *M. Zhabitsky (on behalf of the DIRAC collaboration)*. DIRAC latest results. Proc. of EXA05 Intern. Conf. on Exotic Atoms and Related Topics. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2005. P. 155–164. ISBN 3-7001-3616-1.
- [16] *M. Zhabitsky (on behalf of the DIRAC collaboration)*. The DIRAC experiment at CERN. Proc. of HadAtom05 Intern. Workshop on Hadronic Atoms. Bern, 2005. P. 7; hep-ph/0508193.
- [17] *B. Adeva, ..., M. Zhabitsky et al. (DIRAC collaboration)*. First measurement of the  $\pi^+\pi^-$  atom lifetime// Phys. Lett. B. 2005. V. 619. P. 50–60; hep-ex/0504044.
- [18] *D. Drijard and M. Zhabitsky*. How to extract the lifetime of ponium and  $|a_0^0 - a_0^2|$  from the measurements of the ponium ionization probability. DIRAC note 2008-07. 8 pp. CERN. 2008.
- [19] *M. Zhabitsky (on behalf of the DIRAC collaboration)*. Measurement of the ponium lifetime. Proc. of the 34th Intern. Conf. on High Energy Physics (ICHEP08). Philadelphia, 2008. 4 pp.; arXiv:0809.4963[hep-ex].