

На правах рукописи

Осипов Александр Витальевич

**Исследование образования π^- - мезонов на
тензорно-поляризованных дейтронах**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в *НИИ ядерной физики Томского политехнического университета.*

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Стибунов Виктор Николаевич*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук,
профессор,
Потылицын Александр Петрович
доктор физико-математических наук,
профессор,
Кунашенко Юрий Петрович*

Ведущая организация: *Институт ядерной физики им.
Г. И. Будкера СО РАН*

Защита состоится “ 23 ” декабря 2009г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций *Д212.269.05* при *Томском политехническом университете*, расположенном по адресу: *634050, г. Томск, пр. Ленина, 2а*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ТПУ.*

Автореферат разослан “____” ноября 2009г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
*кандидат физико-математических
наук, доцент*

Кожевников А. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы Изучение образования мезонов на нуклонах и ядрах в электромагнитных взаимодействиях остается важным источником сведений о физике адронов, свойствах ядерных систем, структуре нуклонов и их возбужденных состояний, свойствах адронов в ядерной среде. Исследования процессов образования мезонов реальными и виртуальными фотонами на нуклонах и ядрах выполняются с начала 50 годов прошлого столетия. Значимость и надежность фундаментальных физических результатов, полученных в исследованиях этих реакций, обусловлена в первую очередь тем, что электромагнитные взаимодействия хорошо изучены. Важно также, что фотоны средних энергий могут проникать в ядро и взаимодействовать как с отдельными нуклонами, так и коррелированными парами нуклонов. Использование в исследованиях простейшей ядерной системы - дейтрона в качестве мишени позволяет изучать образование пиона на нейтроне и извлекать уникальную информацию о ΔN - взаимодействии, о роли ненуклонных степеней свободы.

Для описания процесса фоторождения π -мезонов на дейтроне требуется 12 комплексных спиральных амплитуд. Чтобы получить полную информацию о процессе $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$, необходимо измерить не менее 23 независимых наблюдаемых величин. В число этих наблюдаемых обязательно входят величины, которые можно получить только в экспериментах на тензорно-поляризованных дейтронах. Поляризационные наблюдаемые — это квадратичные формы различных комбинаций действительных и мнимых частей амплитуды реакции, в то время как неполяризационные выражаются суммой квадратов модулей амплитуд реакций. Поэтому проявление динамических эффектов, дающих малый вклад в амплитуду сложно наблюдать в дифференциальных и полных сечениях из-за определяющего вклада лидирующих амплитуд. Как

следствие, поляризационные наблюдаемые оказываются предпочтительными при выявлении и изучении малых, но важных и, как правило, недостаточно изученных динамических эффектов, таких как ΔN - взаимодействие, роль обменных токов, возбуждение мультикварковых резонансных состояний в процессах электромагнитного образования пионов, исследования проблем перехода от мезон-нуклонного описания процессов к кварк-глюонному.

Экспериментальные данные о тензорных наблюдаемых одиночного фотообразования пи-мезона на поляризованном дейтроне являются важнейшим тестом для современных теоретических моделей физики адронов средних энергий. Однако экспериментов по исследованию реакций электромагнитного образования пионов на тензорно поляризованных мишенях не было, так как неоднократные попытки создания криогенной тензорно-поляризованной дейтериевой мишени, имеющей необходимые параметры, оказывались безуспешными.

Цель диссертационной работы

Основная цель диссертационной работы заключалась в проведении измерений тензорной асимметрии дифференциального сечения, получении T_{20} -, T_{21} - и T_{22} - компонент тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow p p \pi^-$ и сравнении полученных данных с теоретическими предсказаниями. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- разработать методику проведения измерений тензорной асимметрии дифференциального сечения реакции фотообразования π^- - мезонов на дейтроне;
- разработать методику определения T_{20} -, T_{21} - и T_{22} - компонент анализирующей способности реакции из экспериментальных данных;
- разработать и создать детектирующие системы для регистрации прото-

нов из реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$ на совпадении и измерения их кинематических характеристик;

- разработать комплекс программ для первичной обработки данных и кинематической реконструкции зарегистрированных событий;
- разработать процедуру энергетической калибровки детекторов и программное обеспечение для ее реализации;
- разработать программное обеспечение для моделирования реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$ на основе теоретических моделей;

Научная новизна

Впервые разработана и реализована методика экспериментального исследования фотообразования π^- -мезонов на тензорно-поляризованных дейтронах.

Впервые выполнены измерения асимметрии дифференциального сечения реакции фотообразования π^- -мезонов на тензорно-поляризованных дейтронах.

Впервые экспериментально получены T_{20} -, T_{21} - и T_{22} - компоненты тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$ в широком интервале изменения основных кинематических переменных процесса.

Научная и практическая ценность работы

Полученные в работе данные о компонентах тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$ послужат для проверки теоретических моделей процессов электромагнитного образования π^- -мезонов на ядрах и, в первую очередь, на дейтроне. Разработанная методика экспериментального исследования фотообразования π^- -мезонов на тензорно поляризованных дейтронах дает возможность измерения компонент тензорных анализирующих способностей других каналов реакции одиночного фотообразования мезонов

на дейтроне. Созданный комплекс программ, позволяет проводить на ЭВМ расчеты дифференциального сечения, тензорной асимметрии и компонент тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$ для энергии фотонов (300-900) МэВ в модели спектатора с учетом и без учета взаимодействия в конечном состоянии (ВКС). Эти программы могут быть использованы для оптимального планирования и анализа данных экспериментов, в которых исследуются другие каналы одиночного электромагнитного образования пионов на тензорно поляризованных дейтронах. Разработанная процедура энергетической калибровки детектора применима для калибровки других многослойных пробежных детекторов заряженных частиц.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

- методика проведения измерений тензорной асимметрии дифференциального сечения реакции фотообразования π^- - мезонов на дейтроне;
- методика определения T_{20} -, T_{21} - и T_{22} - компонент анализирующей способности реакции из экспериментальных данных;
- результаты измерения T_{20} -, T_{21} - и T_{22} - компонент тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$.
- процедура энергетической калибровки детектора с использованием нормализованных световых выходов

Апробация работы Основные результаты работы опубликованы в статьях и сборниках докладов конференций, докладывались на ряде Российских и Международных конференций: “Structure of Baryons”, Baryons’98, Бонн, Германия; “14th International Conference on Particles and Nuclei”, PANIC’96, Вильямсбург, США; “14th International spin physics symposium”, SPIN’2000, Оса-

ка, Япония; “16 International spin physics symposium”, SPIN’2004, Триест, Италия; “International spin physics symposium”, SPIN’2008, Шарлоттсвилль, США; “16th European Conference on Few-Body Problems in Physics”, Аутранс, Франция; 5th Workshop on “Electromagnetically Induced Two-Hadron Emission”, Лунд, Швеция; ЯДРО 2008, “Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики”, Россия, Москва.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [A1, A2, A3, A4, A5] и 7 статей в сборниках трудов конференций [A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12].

Личный вклад автора Изложенные в работе результаты получены автором лично или в соавторстве при его участии.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 99 листах, содержит 4 таблицы и 23 рисунка. Список литературы содержит 68 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассматриваются базовые теоретические положения процесса электромагнитного образования одиночного π -мезона на тензорно-поляризованном дейтроне. Рассматривается связь дифференциальных сечений электро- и фоторождения пионов на дейтроне с регистрацией двух протонов. Обсуждаются возможности и способы измерения тензорных поляризационных наблюдаемых величин процесса.

Экспериментальные исследования фотоядерных процессов проводятся как на пучках тормозных фотонов, так и на пучках электронов с использованием концепции виртуальных фотонов. Идея виртуальных фотонов восходит еще к Ферми и широко используется в исследовании электромагнитных процессов [1]. Рассматриваемые в работе эксперименты по исследованию образования π^- -мезонов проводились на внутренней тензорно-поляризованной дейтериевой мишени электронного накопителя ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН с регистрацией двух конечных протонов на совпадении. Образование пи-мезонов в реакции $ed \rightarrow e'pp\pi^-$ в однофотонном приближении интерпретировалось как образование пи-мезонов виртуальными γ -квантами — $\gamma^*d \rightarrow pp\pi^-$.

В приближении рассеяния электрона вперед, когда переданный импульс Q^2 стремится к нулю, вклад в сечение электророждения пиона от поперечных виртуальных фотонов становится преобладающим. Это является основой для связи сечений электро- и фоторождения пиона:

$$\frac{d\sigma_e}{dE_1 dE_2 d\Omega_1 d\Omega_2} = J \frac{N_e}{\omega_0} \frac{d\sigma_\gamma}{dE_1 d\Omega_1 d\Omega_2} \quad (1)$$

где N_e — спектр виртуальных фотонов, J — кинематический множитель, ω_0 — энергия виртуального фотона, $E_{1,2}$ и $\Omega_{1,2}$ — энергии и телесные углы протонов, соответственно.

Описание амплитуды реакции фоторождения π^- -мезонов основывалось на модели, учитывающей взаимодействие в конечном состоянии [2]. Учитывался вклад диаграммы спектаторной модели и диаграмм нуклон-нуклонного и пион-нуклонного перерассеяния. При этом был учтен вклад таких же диаграмм с перестановкой тождественных нуклонов конечного состояния.

Сечение фоторождения пионов на тензорно-поляризованных дейтронах неполяризованными фотонами определяется четырьмя компонентами анализирующей способности реакции: векторной T_{11} и тремя тензорными — T_{20} , T_{21} и T_{22} . Для реакции с тремя частицами в конечном состоянии это комплекс-

ные величины, а для компланарной кинематики, они становятся либо чисто мнимыми, либо чисто вещественными, тогда сечение реакции имеет вид:

$$\frac{d\sigma}{dp_1 d\Omega_1 d\Omega_2} = \frac{d\sigma_0}{dp_1 d\Omega_1 d\Omega_2} \left(1 + \sqrt{3} P_z T_{11} \sin \theta_H \sin \varphi_H + \frac{\sqrt{2}}{2} P_{zz} \left(T_{20} \frac{(3 \cos^2 \theta_H - 1)}{2} - \sqrt{\frac{3}{2}} T_{21} \sin 2\theta_H \cos \varphi_H + \sqrt{\frac{3}{2}} T_{22} \sin^2 \theta_H \cos 2\varphi_H \right) \right), \quad (2)$$

где углы θ_H и φ_H задают направление оси ориентации; P_z , P_{zz} — степени векторной и тензорной поляризации. Все наблюдаемые величины являются функциями пяти кинематических параметров.

Измерив азимутальные зависимости поперечного сечения (2) и зная поперечное сечение на неполяризованном дейтроне, можно получить информацию о величинах компонент анализирующей способности. Обычно измеряют не саму величину поперечного сечения, а асимметрию, которая определяется следующим образом:

$$A = \frac{d\sigma^+ - d\sigma^-}{d\sigma^+ + d\sigma^-}, \quad (3)$$

где $d\sigma^+(d\sigma^-)$ - величина сечения для соответствующих знаков тензорной поляризации мишени. Измеряя асимметрии сечения в специально подобранных экспериментальных условиях, можно получить все компоненты анализирующей способности этой реакции.

Во второй главе приводится описание экспериментального оборудования, которое использовалось в двух проведенных экспериментах — ускорительно-накопительный комплекс ВЭПП-3, внутренняя поляризованная газовая мишень, описаны детектирующие системы и системы сбора и накопления данных.

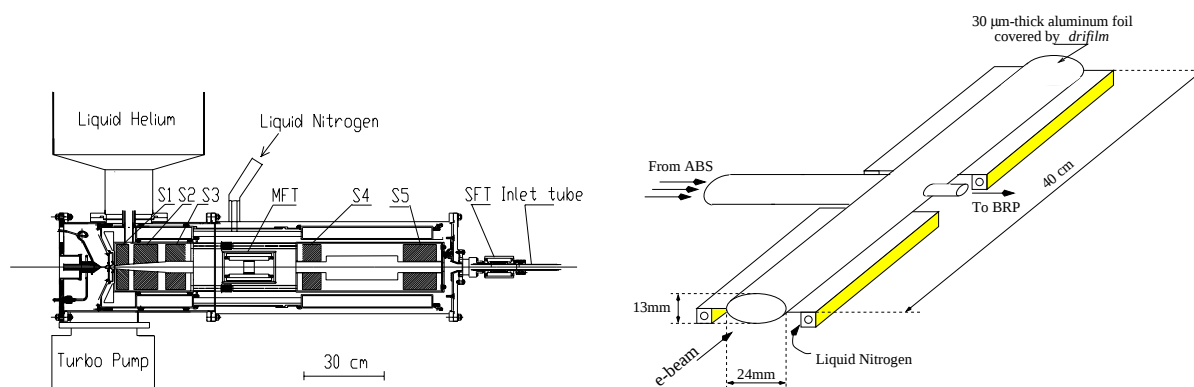


Рис. 1: Слева: источник поляризованных атомов. S1-S5 - сверхпроводящие шестиполюсные магниты; MFT - блок ВЧ переходов в среднем поле; SFT - блок ВЧ переходов в сильном поле; Inlet Tube - инжекционная трубка накопительной ячейки; Turbo Pump - турбомолекулярный насос. Справа: накопительная ячейка, охлаждаемая жидким азотом.

Одним из основных узлов оборудования является внутренняя газовая мишень из поляризованных атомов дейтерия. Мишень включает в себя источник поляризованных атомов (ИПА) и накопительную ячейку. Принцип действия источника основан на эффекте сверхтонкого расщепления энергетических уровней атома дейтерия в сильном магнитном поле и пространственном разделении атомов с различными магнитными моментами при их движении в сильном неоднородном магнитном поле. Струя поляризованных атомов дейтерия из ИПА попадает в накопительную ячейку, представляющую из себя Т-образную трубку. Накопительная ячейка была применена для увеличения толщины мишени. Во втором эксперименте использовалась ячейка эллиптического сечения 24×13 мм и длиной 40 см, охлаждаемая жидким азотом. Схема ИПА и общий вид накопительной ячейки показаны на рис. 1.

Детектирующие системы обоих экспериментов состояли из двух пар плеч регистрации частиц (рис. 2). В первом эксперименте это были две пары плеч регистрации адронов, медианные плоскости которых были повернуты относительно друг друга на 90° . Адронные годоскопы - плечи детекторов, были включены на совпадения. Каждый адронный годоскоп состоял из системы дрейфовых камер и трех сцинтилляционных пластмассовых счетчиков сум-

марной толщины 24 мм. Кроме этого, в двух годоскопах, установленных ниже медианной плоскости накопителя, за пластмассовыми счетчиками размещались по 2 слоя из $NaJ(Tl)$ -сцинтилляционных счетчиков, толщиной 5 см и 11 см. За пластмассовыми счетчиками каждого из верхних двух годоскопов на расстоянии 170 см от мишени был установлен слой из трех пластмассовых сцинтилляционных счетчиков, каждый размером $20 \times 20 \times 100 \text{ см}^3$. Система дрейфовых камер использовалась для восстановления траектории частиц и измерения углов вылета частиц из мишени с точностью не хуже $0,5^\circ$. Детектор обеспечивал регистрацию протонов, вылетающих в интервале полярных углов $64^\circ - 84^\circ$ и азимутальных $\pm 16^\circ$. Нижние годоскопы регистрировали протоны с энергией от 46 МэВ до 264 МэВ, а верхние годоскопы – от 55 МэВ до 180 МэВ.

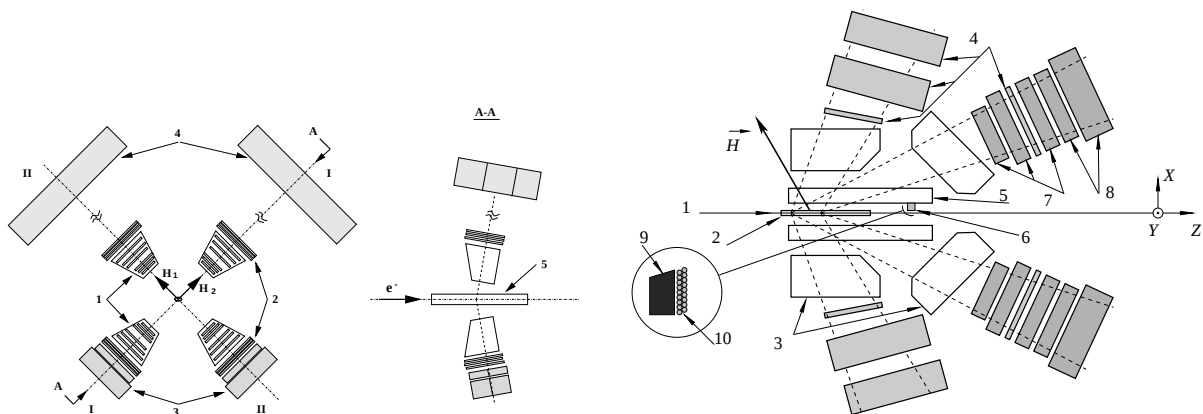


Рис. 2: Слева: детектирующая система первого эксперимента. 1 - дрейфовые камеры; 2 - тонкие пластмассовые сцинтилляционные счетчики; 3 - $NaI(Tl)$ сцинтилляционные счетчики; 4 - толстые пластмассовые сцинтилляционные счетчики; 5 - накопительная ячейка-мишень; $\mathbf{H}_1$ и $\mathbf{H}_2$ - направления вектора индукции ведущего магнитного поля. Справа: детектирующая система второго эксперимента. 1 - пучок электронов накопителя ВЭПП-3; 2 - накопительная ячейка-мишень; 3 - дрейфовые камеры годоскопов; 4 - пластмассовые сцинтилляционные счетчики; 5 - вершинная дрейфовая камера; 6 - электронное плечо поляриметра; 7 - $CsJ(Tl)$ сцинтилляционные спектрометры электронных плечей; 8- $NaJ(Tl)$ сцинтилляционные спектрометры адронных плечей; 9 - вольфрамовый радиатор; 10 - сцинтилляционные волокна детектора электронов; $\mathbf{H}$ - направление вектора индукции ведущего магнитного поля.

Вектор напряженности магнитного поля $\mathbf{H}$ был направлен под углом $\theta_H =$

90° к оси пучка электронов. Азимутальный угол вектора напряженности периодически изменялся. Для одного плеча — $\varphi_{H1} = 90^\circ, \varphi_{H2} = 0^\circ$, для другого — $\varphi_{H1} = 0^\circ, \varphi_{H2} = 270^\circ$. Энергетическое разрешение адронных телескопов зависит от энергии протонов и меняется в пределах $(8 \div 10)\%$ для протонов с энергиями от 50 МэВ до 264 МэВ. Разрешение детектора по эффективной массе pp -системы приведено в таблице:

$M_{pp}, \text{ MeV}/c^2$	2000	2030	2160	2090	2120	2150
$\sigma_{M_{pp}}, \text{ MeV}/c^2$	4.2	5.4	5.8	6.9	7.7	8.1

Детектирующая система второго эксперимента состояла из двух идентичных двухплечевых систем. Системы были повернуты относительно друг друга на 180°. Каждая система состояла из сцинтилляционного калориметра в электронном плече и адронного годоскопа в адронном плече. Адронные годоскопы использовались для регистрации протонов на совпадении и определения их энергии. Для регистрации треков частиц использовались дрейфовые камеры, которые располагались перед сцинтилляционными детекторами по обе стороны от накопительной ячейки. Детектор обеспечивал регистрацию протонов в диапазоне полярных углов $\theta_{1,2} = 44^\circ \div 88^\circ$ и диапазоне азимутальных углов $\Delta\varphi = \pm 30^\circ$. Диапазон кинетической энергии регистрируемых протонов составлял $E_{1,2} = 50\text{МэВ} \div 240 \text{ МэВ}$. Энергетическое разрешение детектора по инвариантной массе pp -системы изменялось в диапазоне $\sigma_{M_{pp}} = 2 \div 7 \text{ МэВ}/c^2$ для инвариантных масс от 1980 МэВ/ c^2 до 2190 МэВ/ c^2 . Вектор напряженности магнитного поля **H** был направлен вверх в медианной плоскости детектора под углом $\theta_H = 120^\circ$ к оси пучка электронов. В этом эксперименте направление вектора напряженности магнитного поля не изменялось.

Применение накопительной ячейки увеличивает толщину мишени. Степень поляризации атомов инжектируемых из ИПА в ячейку обычно высока —

$\sim 98\%$ и более. Однако, внутри ячейки поляризация газа заметно уменьшается из-за различных деполяризующих факторов. Во втором эксперименте на накопителе ВЭПП-3 для оперативного измерения степени поляризации атомов в ячейке использовался поляриметр, основанный на измерении асимметрии мишени (A^t) в упругом ed -рассеянии при малых переданных импульсах ($Q^2 \sim 3\text{фм}^{-2}$). При таких Q^2 основной вклад в асимметрию A^t дает T_{20} компонента анализирующей способности $T_{20} \approx -(\sqrt{2}/3)Q_d \times Q^2$, где Q_d - квадрупольный момент дейтрона. Различные теоретические модели предсказывают в этой области мало отличающиеся друг от друга величины T_{20} ($\pm 2-3\%$). Поляриметр регистрировал рассеянные электроны на совпадениях с дейтронами отдачи. Дейтроны отдачи регистрировались адронным плечом №2 основного детектора. В этом плече дейтроны идентифицировались и определялись их энергия и углы. Электронное плечо поляриметра состояло из двух слоев сцинтилляционных волокон, перед которыми стоял вольфрамовый конвертер для подавления низкоэнергетического фона. Конструкция электронного плеча позволяла определять x -координату рассеянного электрона. Кинетическая энергия дейтронов отдачи не превышала 60 МэВ и они останавливались в первом пластмассовом счетчике толщиной 20 мм. Этот счетчик был оснащен двумя ФЭУ, имеющими хорошее временное и амплитудное разрешение. Угловой захват по полярному углу составлял $\Theta \approx 4^\circ$ и по азимутальному $\approx \pm 30^\circ$.

Третья глава посвящена процедуре обработки экспериментальных данных. Описаны процедуры восстановления координат вершины события и идентификации частиц. Подробно рассмотрена энергетическая калибровка детектора с использованием нормализованных световых выходов. Описан комплекс программ, созданных для обработки экспериментальных данных.

В процессе обработки событий определялись треки частиц, проводился отбор событий, соответствующий регистрации двух протонов, вычисление

энергии протонов и других кинематических переменных. Первичный отбор событий проводился на основе восстановленной вершины события (координат вылета частиц из мишени).

Для восстановления трека частицы, вылетающей из накопительной ячейки, использовалась информация, полученная с дрейфовых камер.

В протонном плече первой экспериментальной установки имелось шесть дрейфовых камер. Три из них регистрировали x -координату пересечения траектории протона с плоскостями дрейфовых камер, а три других регистрировали y -координату. В наиболее благоприятном случае мы будем иметь шесть показаний дрейфовых камер, три из которых соответствуют x -координатам, а три оставшиеся соответствуют y -координатам. Трек пролетающей частицы восстанавливался методом наименьших квадратов в случае, если сработали три камеры по одной из координат. Если сработали две камеры, то трек проводился через две точки. Таким образом определялись проекции траектории протона на плоскости xz и yz .

Во втором эксперименте, в связи с изменением и усложнением конструкции камер, алгоритм обработки был изменен. Для каждой частицы вычислялись проекция трека на плоскость, параллельную средней плоскости детектора, что позволяет определить угол θ и проекция на плоскость, перпендикулярную оси пучка электронов, что позволяет определить угол φ . Для восстановления трека использовалась информация от 3-х до 6-и плоскостей, в которых произошло срабатывание одной и более проволочек. После преобразования времени дрейфа в расстояние дрейфа для данной проволочки в позиции X_{wire} остается лево-правая неопределенность, т.к. мы знаем только расстояние до проволочки, но не сторону с которой пролетела частица. Поэтому мы имеем две координаты $X = (X_{wire} + x_{drift}$ и $X = (X_{wire} - x_{drift}$ где частица может пересечь плоскость проволочек. Перебирая все возможные комбинации координат, мы можем иметь до 64-х треков. Наилучший трек

определялся рекурсивным алгоритмом по критерию χ^2 .

В проведенных экспериментах для идентификации частиц и выделения реакции использовался $\Delta E, E$ -метод. Известно, что в нерелятивистском случае величина ионизационных потерь энергии при одной и той же энергии с хорошей точностью пропорциональна массе и квадрату заряда частицы. На плоскости $\Delta E, E$ распределение величин сигналов отображается семейством гипербол, каждая из которых соответствует частице с определенным значением массы и заряда. Использование величины Mz^2 в качестве параметра идентификации позволяет из семейства гипербол на плоскости $\Delta E, E$ отобрать ту, которая соответствует частице с массой M и зарядом z . Для идентификации частиц использовался телескоп сцинтилляционных детекторов, состоящий из тонкого “прострельного” ΔE детектора, в котором измеряются удельные ионизационные потери энергии, и толстого детектора полного поглощения, в котором измеряется энергия частицы.

Одним из самых важных этапов обработки экспериментальных данных является определение энергии зарегистрированных протонов. Из-за отсутствия в наших условиях моноэнергетических пучков протонов нет возможности провести прямые калибровочные измерения. Поэтому для калибровки детектора применялся расчетный метод. Суть калибровки заключалась в расчете энергетических потерь протонов проходящих через слои детектора и вычислении световых выходов в чувствительных слоях. Далее по характерным точкам в распределениях амплитуд сигналов в последовательных слоях проводилось сопоставление с расчетными значениями и вычислялись калибровочные коэффициенты.

Световой выход в i -ом слое детектора находится по формуле:

$$\Delta L_i = \int_{E_i - \Delta E_i}^{E_i} \frac{dL}{dE} d\varepsilon, \quad (4)$$

где величина dL/dE для пластмассовых сцинтилляторов определялась формулой:

$$\frac{dL}{dE} = S \left[1 + kB \left(\frac{dE}{dx} \right) + C \left(\frac{dE}{dx} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (5)$$

Здесь dL - количество испущенного света, когда заряженная частица с энергией E теряет энергию dE вдоль пути dx , ΔE_i — потери энергии частицы в i -ом слое детектора. В NaI кристаллах за величину световыхода принимались потери ΔE_i . Поскольку преобразование световыхода в амплитуду с помощью ФЭУ и АЦП осуществлялось линейно, то измеренный световыход в слое определялся как:

$$\Delta L_i(E) = \frac{A_i - A_0}{k_i}, \quad (6)$$

где A_i - измеренная амплитуда сигнала от ФЭУ, A_0 - пьедестал АЦП, k_i - коэффициент преобразования. Коэффициенты преобразования k_i определялись путем подгонки. Для определения энергии протона использовались амплитуды того слоя сцинтиллятора, в котором протон останавливался. Для этого слоя строилась зависимость $E = f(\Delta L_i)$, которая аппроксимировалась полиномом.

Во втором измерительном сеансе увеличение углового диапазона регистрации привело к тому, что появилась дополнительная зависимость световыходов в слоях сцинтилляторов от углов вылета протона, т.к. “эффективная” толщина слоев по направлению движения протона уже заметно изменяется. Поэтому в процедуре калибровки были использованы нормализованные световыходы:

$$\mathcal{L} = L/P_{\mathcal{L}}(\theta_p, \varphi_p) \quad (7)$$

где $P(\theta_p, \varphi_p) = \sum_{i=0, j=0}^N k_{ij} \theta_p^i \varphi_p^j$ — двумерный полином, θ_p и φ_p — полярный и азимутальный углы вылета протона. Коэффициенты k_{ij} вычислялись для каждого слоя сцинтиллятора путем подгонки. Для преобразования световыходов

ход–энергия также использовалось нормализованное соотношение:

$$E_p = \mathcal{E}_p P_{\mathcal{E}}(\theta_p, \varphi_p) = f(\mathcal{L}) P_{\mathcal{E}}(\theta_p, \varphi_p), \quad (8)$$

где E_p и $\mathcal{E}_p$ истинная и нормализованная начальная энергия протона, $f(\mathcal{L})$ - полином четвертой степени.

В четвертой главе представлены результаты проведенных измерений и их анализ, описан процесс моделирования реакции образования пионов, проведено сравнение полученных результатов с теоретическим предсказанием. Показано, что поведение компонент анализирующей способности реакции не описывается моделью импульсного приближения с учетом взаимодействия в конечном состоянии.

Пользуясь выражением (2) и располагая набором экспериментальных выходов N_{jk}^i в каждый детектор i для двух знаков $P_{zz} - j$ и двух направлений $-k$ ведущего магнитного поля, можно получить величины компонент анализирующей способности:

$$T_{20} = -\frac{\sqrt{8}}{|P_{zz}|} \frac{[\sum N_{j+}^i - \sum N_{j-}^i]}{N}; \quad T_{22} = -\frac{4k_{\varphi}}{\sqrt{3}|P_{zz}|} \frac{\sum_{i,j=1,2} (-1)^{\delta_{ij}} [N_{j-}^i - N_{j+}^i]}{N},$$

где k_{φ} – поправка, учитывающая интервал регистрации по азимутальному углу, N – просуммированный по всем состояниям выход реакции. Использование этих комбинаций позволяет свести систематические ошибки измерений к минимуму [3].

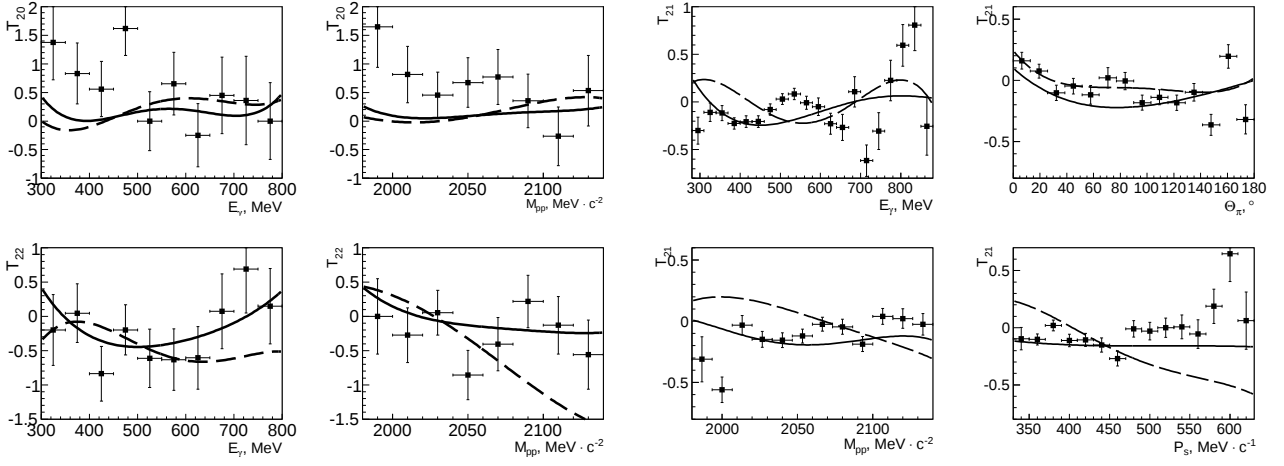


Рис. 3: Поведение T_{20} -, T_{22} - и T_{21} -компонент анализирующей способности реакции в зависимости от различных кинематических переменных. Сплошная кривая — теоретические расчеты с учетом ВКС, штриховая — без учета ВКС.

Во втором эксперименте векторная поляризация мишени была близка к нулю и переключался только знак тензорной поляризации. В этих условиях экспериментальная асимметрия сечения по отношению к смене знака поляризации имеет вид:

$$a^T = \sqrt{2} \frac{N^+ - N^-}{P_{zz}^+ N^- - P_{zz}^- N^+}, \quad (9)$$

где P_{zz}^+ и P_{zz}^- — параметры поляризации, N^+ и N^- — скорости счета событий, соответствующие двум знакам поляризации. Измеряя два значения асимметрии сечения, когда “медленный” протон попадает в верхнее или нижнее адронное плечо, что соответствует двум значениям среднего угла между плоскостью реакции и направлением ведущего поля $\varphi_H = 0^\circ$ или $\varphi_H = 180^\circ$, определяется величина T_{21} - компоненты тензорной анализирующей способности реакции:

$$T_{21} = \frac{k_\varphi}{\sqrt{2} P_{zz}^+ k_{21}} (a_{(\varphi_H=0)}^T - a_{(\varphi_H=180)}^T), \quad (10)$$

где $a_{(\varphi_H=0)}^T, a_{(\varphi_H=180)}^T$ — асимметрии для двух значений углов, $k_{21} = \sqrt{3/2} \sin 2\theta_H$, k_φ — коэффициент усреднения по $\cos \varphi_H$.

Тензорные наблюдаемые величины зависят от пяти независимых кинематических переменных. Экспериментально полученные значения наблюдаемых величин представляются как функции одной, максимум двух, кинематических переменных, по остальным переменным проводится суммирование в пределах фазового объема, определенного детектором. Для корректного сопоставления с экспериментально измеренными теоретические значения этих величин были получены таким же образом. Для этого процесс $\gamma d \rightarrow p p \pi^-$ моделировался методом Монте-Карло. Наборы “теоретических” событий были получены для тех же условий, в которых проведены эксперименты. Было проведено интегрирование теоретических значений наблюдаемых величин по всем кинематическим переменным, кроме тех, от которых исследуется зависимость.

Сравнение измеренных значений тензорных наблюдаемых величин с теоретически предсказанными показывает, что учет взаимодействия в конечном состоянии приводит к лучшему согласию с экспериментальными данными и качественно отражают измеренные зависимости компонент тензорной анализирующей способности от основных кинематических параметров реакции. Следует отметить, что в локальных областях изменения кинематических переменных наблюдается значительное разногласие между экспериментальными данными и результатами расчетов.

В заключении представлены основные результаты полученные в ходе выполнения работы:

- разработана и реализована методика экспериментального исследования фотообразования π^- -мезонов на тензорно поляризованных дейтронах. Методика основана на использовании внутренней сверхтонкой газовой мишени в электронном накопителе и регистрации частиц на совпадении;
- разработана методика определения T_{20} -, T_{21} - и T_{22} - компонент анализи-

- рующей способности реакции из экспериментальных данных;
- созданы и отлажены детекторы для корреляционных исследований реакции фотообразования π^- - мезонов на тензорно-поляризованных дейтронах в резонансной области энергий;
 - разработана процедура энергетической калибровки многослойных пробных детекторов заряженных частиц, обеспечивающая точность измерения энергии протонов ± 5 МэВ в диапазоне энергий $(50 \div 250)$ МэВ;
 - впервые выполнены измерения тензорной асимметрии дифференциального сечения реакции фотообразования π^- -мезонов на тензорно-поляризованных дейтронах;
 - впервые экспериментально получены T_{20} -, T_{21} - и T_{22} - компоненты тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$ в диапазонах углов вылета протонов $\theta_{p_{1,2}} = 46^\circ \div 96^\circ$, $\varphi = \pm 16^\circ, \pm 30^\circ$ и диапазона импульсов $p_{1,2} = 370 \text{ МэВ}/c \div 640 \text{ МэВ}/c$;
 - впервые получены зависимости компонент тензорной анализирующей способности реакции фотообразования π^- - мезонов на дейтронах от различных кинематических переменных;
 - создан пакет программ первичной обработки данных и кинематической реконструкции зарегистрированных событий;
 - создан комплекс программ, позволяющих проводить моделирование, а также вычисления дифференциального сечения, тензорной асимметрии и компонент тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$, используя теоретические модели процесса;

- проведено сопоставление экспериментальных результатов с теоретическими предсказаниями. Показано, что наблюдается качественное описание экспериментальных данных. Однако, в некоторых кинематических условиях проявляется значительное разногласие между экспериментальными данными и результатами расчетов.

Список публикаций

- [A1] А. Ю. Логинов, А. В. Осипов, А. А. Сидоров и др. Исследование реакции $\mathbf{D}(e, pp)e'\pi^-$ на тензорно-поляризованной дейтериевой мишени при больших величинах импульсов протонов // *Письма в ЖЭТФ*. — 1998. — Т. 67, № 10. — С. 730 – 736.
- [A2] M. V. Dyug, L. G. Isaeva ..., A. V. Osipov et al. Internal polarized deuterium target with cryogenic atomic beam source // *Nucl. Instr. and Meth. A*. — 2002. — Vol. 495. — P. 8.
- [A3] M. V. Dyug, B. A. Lazarenko ..., A. V. Osipov et al. Deuterium target polarimeter at the VEPP-3 storage ring // *Nucl. Instr. and Meth. A*. — 2005. — Vol. 536. — P. 344.
- [A4] Л. М. Барков, А. Ю. Логинов ..., А. В. Осипов и др. Анализирующая способность реакции фоторождения отрицательных пионов в области дельта(1232)-резонанса // *Известия вузов. Физика*. — 2007. — Т. 50, № 10/2. — С. 24–29 (73399013).
- [A5] В. В. Гаузитейн, А. Ю. Логинов, А. В. Осипов и др. Образование отрицательных пионов виртуальными фотонами на дейтроне // *Известия вузов. Физика*. — 2009. — Т. 52, № 11/2. — С. 10.

- [A6] *D. M. Nikolenko, A. V. Osipov, S. G. Popov et al.* Study of the Exclusive ed -scattering at VEPP-3 // PANIC'96, Proceedings of the 14th International Conference on Particles and Nuclei / Ed. by C. E. Carlson. — World Scientific, 1997. — Williamsburg, Virginia, USA 22 - 28 May, 1996. — Pp. 276 – 278.
- [A7] *D. M. Nikolenko, A. V. Osipov, I. A. Rachev et al.* Tensor Target Asymmetry in the $\mathbf{d}(e,pp)e'\pi^-$ -reaction at High Proton Momenta // Baryons'98, Proceedings of the 8th International Conference on the Structure of Baryons / Ed. by D. W. Menze. — World Scientific, 1999. — Bonn, Germany 22 - 26 September 1998. — Pp. 567 – 570.
- [A8] *D. M. Nikolenko, A. V. Osipov, I. A. Rachev et al.* The Reaction $D(e,pp)e'\pi^-$ on Polarized Deuteron at High Proton Momenta // Few-Body Problems in Physics, Proceedings of the 16th European Conference on Few-Body Problems in Physics / Ed. by W. Plessas. — Vol. 10. — Springer-Verlag/Wien, 1999. — June 1 - 6, 1998, Autrans, France. — Pp. 507 – 510.
- [A9] *M. V. Dyug, B. A. Lazarenko ..., A. V. Osipov et al.* Results and Status of Inelastic ed -scattering Experiments at the Internal Polarized Deuterium Targets of VEPP-3 // SPIN 2000, 14th international spin physics symposium / Ed. by K. Hatanaka. — Vol. 570. — AIP, New York, 2001. — Osaka, Japan 16 - 21 October, 2000. — Pp. 586 – 590.
- [A10] *M. V. Dyug, S. I. Mishnev ..., A. V. Osipov et al.* MEASUREMENT OF THE TENSOR TARGET ASYMMETRY COMPONENTS OF THE $\vec{D}(e,pp)e'\pi^-$ REACTION AT THE VEPP-3 STORAGE RING // Fifth Workshop on “Electromagnetically Induced Two-Hadron Emission” / Ed. by P. Grabmayr. — Lund, Sweden:

<http://www.maxlab.lu.se/kfoto/2nconf/2n/cdrom/2nconf/PDF/osipov.pdf>,
2001. — 13 - 16 June, 2001. — Pp. 124 – 127.

- [A11] *L. M. Barkov, V. F. Dmitriev ..., A. V. Osipov et al.* Tensor Analyzing Power in Exclusive π^- Photoproduction on Deuteron // SPIN 2004, 16th international spin physics symposium / Ed. by F. Bradamante. — Triest, Italy: World Scientific, 2005. — 10 - 16 October, 2004. — Pp. 593 – 596.
- [A12] *L. M. Barkov, B. A. Lazarenko ..., A. V. Osipov et al.* The Tensor Analyzing Power Component T_{21} of Exclusive π^- -meson Photoproduction on Deuteron in the Resonance Region // SPIN 2008, 18th international spin physics symposium / Ed. by D. G. Grabb. — Vol. 1149. — AIP, New York, 2009. — Charlottesville, Virginia, USA 6 - 11 October, 2008. — Pp. 699 – 702.

Цитированная литература

- [1] *R. H. Dalitz, D. R. Yennie.* Pion Production in Electron-Proton Collisions // *Phys. Rev.* — 1957. — Vol. 105, no. 5. — P. 1598.
- [2] *А. Ю. Логинов, А. А. Сидоров, В. Н. Стибунов.* Влияние перерасеяния на поляризационные наблюдаемые реакции $\gamma d \rightarrow pp\pi^-$ в Δ -резонансной области // *Ядерная Физика.* — 2000. — Т. 63, № 3. — С. 478.
- [3] *S. I. Mishnev, D. M. Nikolenko, S. G. Popov et al.* Measurement of the analyzing power components in photodisintegration of the polarized deuteron // *Phys. Lett. B.* — 1993. — Vol. 302. — Pp. 23 – 28.