

817447

D₂-8844

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2007-42

На правах рукописи
УДК 539.172.12 + 539.128.2

ДЫМОВ
Сергей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВАЛА ДЕЙТРОНА
ПРОТОНАМИ 0,6–1,9 ГэВ С ИСПУСКАНИЕМ ВПЕРЕД
ПРОТОННОЙ ПАРЫ**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Объединенный институт
Дубна 2007
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзепелова
Объединённого института ядерных исследований.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Структура легчайших ядер на коротких расстояниях между нуклонами $r_{NN} < 0.5$ фм, то есть при высоких относительных импульсах $q_{NN} \sim 1/r_{NN} > 0.4$ ГэВ/с, и NN -взаимодействие на малых расстояниях являются одной из фундаментальных проблем ядерной физики. Дейтрон, как простейшее ядро, представляет в этом аспекте первостепенный интерес. Электромагнитные взаимодействия являются наиболее простым инструментом для теоретической интерпретации экспериментов в этой области, и при переданных импульсах $Q = 2q_{NN} < 1$ ГэВ/с описание процессов как взаимодействия барионов, обменивающихся мезонами, находится в разумном согласии с экспериментальными данными¹. Однако при $Q \gtrsim 1$ ГэВ/с возрастает роль мезоно-обменных токов (МЕС) и неопределённостей в их теоретическом описании. Отсутствие достаточной информации о возбуждённых состояниях нуклонов не позволяет в рамках традиционных ядерных моделей описать данные по фото-дезинтеграции $\gamma d \rightarrow np$ уже при энергии фотона $E_\gamma \geq 1$ ГэВ². Эти сложности могут служить индикатором необходимости непосредственного рассмотрения кварковой структуры адрона при описании данных, получаемых в экспериментах при высоких передаваемых импульсах.

Реакции с адронами в качестве инициирующих частиц могут служить важным дополнительным источником информации как ввиду проблемы МЕС, так и потому, что электрон-ядерные взаимодействия чувствительны только к кварковому составу ядра и не затрагивают непосредственно глюонного поля. Первостепенный интерес при этом вызывает область промежуточных энергий, обеспечивающая диапазон значений относительного импульса нуклонов в дейтроне $q = 0.3 - 0.6$ ГэВ/с, где механизм однонуклонного обмена (спектаторный механизм) может служить первым приближением. Это имеет место потому, что основной вклад в полное сечение адрон-дейтронного взаимодействия дают процессы взаимодействия инициирующего адрона с одним из нуклонов дейтрона, тогда как другой нуклон испускается в конечном состоянии с

¹M. Garcon and J. W. Van Orden Adv. Nucl Phys 26(2001) 293;

F. Gilman and F. Gross, Journ. of Physics G28(2002) R37.

²C. Boncha et al., Phys. Rev. Lett.81(1998) 4576;

V. Grishina, L. Kondratyuk, Eur. Phys. J A10(2001) 355

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
В. И. Комаров

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Л. С. Ажгирей

доктор физико-математических наук
Л. А. Кондратюк

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
ядерной физики МГУ

Защита состоится " 2 " октября 2007 г. в ____ ч. ____ мин. на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединённом институте ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединённого института ядерных исследований.

Автореферат разослан " 11 " апреля 2007 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Ю. А. Батусов

импульсом, равным его величине в дейтроне в момент соударения (спектаторный нуклон). Однако интерпретация существующих экспериментальных данных в этой области осложнена вкладом N^* и Δ -резонансов в промежуточном состоянии, для возбуждения которых большие передачи импульса не требуются. Поэтому для изучения должен быть выбран процесс, в котором амплитуды образования резонансов были бы подавлены, с тем, чтобы обеспечить доминирование механизмов, чувствительных к свойствам NN -взаимодействия на коротких расстояниях. В качестве такого процесса для данной работы был выбран процесс безмезонного развала дейтрона протоном с испусканием протонной пары под малыми углами к протонному пучку: $pd \rightarrow (pp)n$ ^{3,4}. Такой процесс при промежуточных энергиях ранее экспериментально не исследовался. Один из наиболее развитых подходов к описанию этого процесса представлен моделью $ONE+\Delta+SS$ (обмен нуклоном + возбуждение Δ -изобары + однократное рассеяние). Согласно этой модели³, при образовании протонных пар в 1S_0 конечном состоянии, амплитуда возбуждения Δ -изобары оказывается подавлена, а однократное рассеяние имеет малую относительную вероятность. Поэтому процесс развала при энергиях 0.5 – 2.0 ГэВ, за исключением области около 0.7 ГэВ, определяется механизмом однонуклонного обмена (ONE). Амплитуда ONE, в свою очередь, непосредственно связана с потенциалом NN -взаимодействия. Выделение протонных пар в 1S_0 состоянии достигается отбором пар с малой относительной энергией $E_{pp} < 3$ МэВ. При этом регистрация протонных пар, вылетающих вперёд, обеспечивает большую величину переданного импульса в механизме ONE, а коллинеарная кинематика позволяет провести полный поляризационный эксперимент при измерении дифференциального сечения, тензорной анализирующей способности T_{20} и коэффициента спин-спиновой корреляции $C_{Y,Y}$.

Цель работы.

Целью диссертационной работы является экспериментальное изучение реакции безмезонного развала дейтрона протонами $p + d \rightarrow (pp) + n$ при большой передаче импульса протонной паре, имеющей малую относительную

энергию в конечном состоянии, при энергии пучка (0.6 – 1.9 ГэВ).

Работа включает в себя первый этап исследования реакции — получение энергетической зависимости дифференциального сечения /1, 2/ и измерение векторной анализирующей способности A_Y^p под углами вылета протонной пары, близкими к $0^\circ / 3/$. (Последнее измерение является также подготовкой к измерению T_{20} и $C_{Y,Y}$.) Результаты эксперимента сравниваются с предсказанием, полученным в рамках модели $ONE+SS+\Delta$. Такое сравнение может показать, достаточно ли описание процесса в изучаемом диапазоне переданных импульсов в терминах взаимодействия нуклонов, или кварк-глюонные степени свободы, проявляющиеся в отклонении полученных данных от нуклонной картины, начинают вносить существенный вклад.

Научная новизна.

Проведённое измерение является первым экспериментом по эксклюзивному изучению реакции $p + d \rightarrow (pp)_s + n$ при углах вылета протонной пары в интервале $0^\circ - 10^\circ$ сцм и энергиях пучка выше ~ 0.3 ГэВ. Эксперимент проводился на спектрометре ANKE, установленном на внутреннем пучке протонного синхротрона COSY (Юлих, ФРГ), и являлся одним из первых на этом спектрометре. Поэтому введение в строй одного из основных детекторов спектрометра — переднего детектора, было необходимой задачей, в решение которой автором внесён решающий вклад. Полученное дифференциальное сечение процесса чувствительно к высокоимпульсной структуре дейтронной волновой функции и, в отличие от других исследований pd -взаимодействия в этой области переданного импульса, в данной постановке эксперимента удаётся существенно снизить роль механизмов, маскирующих эту структуру.

Полученная энергетическая зависимость дифференциального сечения демонстрирует явную предпочтительность использования современного высокоточного CD-Вопп NN -потенциала⁵ перед Reid Soft Core⁶ и парижским⁷ потенциалами в области передаваемых импульсов 0.3 – 0.6 ГэВ/с и вне массовой поверхности. Этот потенциал обладает относительно низкой, по сравнению с другими (RSC, парижским) потенциалами, высокоимпульсной компонентой в волновых функциях $^3S_1 - ^3D_1$ и 3S_0 состояний. В этом отношении

³Имамбеков О., Узиков Ю.Н., Ядерная физика 52, (1990) 1361

Смирнов А., Узиков Ю.Н., Ядерная физика 61, (1998) 421

Узиков Ю.Н., ОИЯИ Е-200-149, Дубна 2000

⁴Beam time request to COSY proposal No. 20, spokesman V. Komarov (1999);

<http://www.fz-juelich.de/ikp/anke/en/proposals.shtml>

⁵R. Machleidt, Phys. Rev. C61 (2001) 024001

⁶J. R. V. Reidt, Ann. Phys. (NY) 50 (1968) 411

⁷M. Lacombe et al., Phys. Lett. C21 (1980) 861.

описываемый эксперимент уникален, так как опыты по рассеянию нуклонов в свободном состоянии дают информацию только о поведении нуклонов, находящихся на массовой поверхности.

Поведение дифференциального сечения качественно описывается расчётом в рамках модели ONE+ Δ +SS, что не говорит о явной необходимости учёта кварк-глюонных степеней свободы в исследуемой области переданных импульсов. Однако более определённый вывод о влиянии этих степеней свободы должен быть сделан по результатам полного поляризационного эксперимента. На первом этапе этого эксперимента, в ходе данной работы была впервые получена векторная анализирующая способность A_y^p в процессе $pd \rightarrow (pp)_s n$ при энергиях пучка 0.5 и 0.8 ГэВ и углах вылета протонной пары, близких к 0° .

Практическая ценность работы.

В ходе диссертационной работы введён в строй передний детектор спектрометра ANKE (COSY – Юлих, Германия). Детектор позволяет регистрировать вылетающие вперёд положительно заряженные вторичные частицы, определять их тип, траекторию и импульс. Он используется при проведении большинства экспериментов на ANKE. Отработаны методики инструментального определения положения координатных детекторов, а также уточнения их положения с использованием экспериментальных данных, методики определения и учёта эффективности детекторной системы.

Создана система обработки данных в переднем детекторе ANKE, применяемая для получения результатов в экспериментах на ANKE, использующих передний детектор. Разработаны и адаптированы для ANKE методы восстановления импульса, поиска треков, калибровки импульсной шкалы и др. Эти методы используются в обработке данных нескольких детекторных систем ANKE и могут быть применены в экспериментах на других установках.

Отработана методика поляризационных измерений с протонным пучком на ANKE, необходимая для последующих измерений T_{20} и $C_{Y,Y}$ в процессе $pd \rightarrow (pp)_s(0^\circ)n$. Существенное расхождение измеренной векторной анализирующей способности в этом процессе с предсказанием модели ONE+ Δ +SS дало толчок к поиску новых путей описания спиновой структуры процесса, в частности, вклада Δ -механизма. В связи с этим на ANKE предло-

жен поляризационный эксперимент по изучению процессов $pp \rightarrow (pp)_s \pi^0$ и $pn \rightarrow (pp)_s \pi^-$, результаты которого нужны для применения модели однопионного обмена (OPE) к процессу $p + d \rightarrow (pp)_s(0^\circ) + n$.

В целом, результаты и выводы диссертации могут быть использованы при планировании и проведении исследований процессов протон-ядерных взаимодействий с большой передачей импульса, а также в теоретических исследованиях свойств NN-взаимодействия.

На защиту выносятся:

1. Измерение дифференциального сечения процесса $p + d \rightarrow (pp)_s(\theta_{pp}) + n$, усреднённого в интервале углов θ_{pp}^{cm} от 0° до 8° при 6-ти энергиях протонного пучка (0.6, 0.7, 0.8, 0.95, 1.35 и 1,9 ГэВ).
2. Измерение векторной анализирующей способности A_y^p в процессе $\vec{p}d \rightarrow (pp)_s n$ при энергиях протонного пучка 0,5 и 0,8 ГэВ в диапазоне углов вылета нейтрона $\theta_n^{cm} = 166 - 180^\circ$.
3. Разработка алгоритмов и системы программ, включающих моделирование спектрометра ANKE, реконструкцию траекторий и 3-х импульсов регистрируемых частиц, определение эффективности пропорциональных камер и процедуры реконструкции событий, калибровки импульсной шкалы и годоскопов.
4. Разработка методики определения геометрических параметров спектрометра с использованием набора калибровочных реакций.
5. Разработка методики определения светимости при взаимодействии внутреннего пучка ускорителя COSY со струйной кластерной мишенью спектрометра ANKE.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 100 наименований и приложения. Полный объём диссертации 125 страницы, включая 58 рисунков и 8 таблиц.

Апробация работы.

Материалы диссертации основаны на работах [1-6], опубликованных в журналах "Physics Letters", "Physical Review Letters", "Nuclear Instruments and

Methods", "Physica Scripta" и "Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра" ("Письма в ЭЧАЯ"). Результаты работы докладывались на международных конференциях CHEP'98 и STORI'02, ERICE'02, научных семинарах ЛЯП ОИЯИ и заседаниях немецкого физического общества.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты и описана структура диссертации.

В первой главе описана проблема взаимодействия протонов с дейтронами при высоких передаваемых импульсах и изучения структуры NN -взаимодействия на малых расстояниях. В ней проведён обзор экспериментальной ситуации в изучении pd -столкновений в кумулятивной области и изложено обоснование нового экспериментального подхода к этой проблеме.

Основной проблемой при изучении структуры ядра на малых расстояниях в pd -взаимодействиях является разделение эффектов, связанных с ядерной структурой на коротких расстояниях, и эффектов, вызываемых механизмами взаимодействия, слабо чувствительными к этой структуре (возбуждение N^* и Δ -резонансов в промежуточном состоянии).

Главными направлениями предшествовавших экспериментов в этой области были: инклюзивное и полуйнклюзивное изучение развала дейтрона при столкновении с протонами и ядрами, изучение упругого pd -рассеяния назад и эксклюзивное исследование безмезонного развала дейтрона в кинематике квазиупругого NN -рассеяния. В целом, определённой информации о высокоимпульсной структуре дейтрона при $q > 0,3$ ГэВ/с получено не было. В изучаемых процессах присутствует несколько эффектов, маскирующих структуру дейтрона в области перекрытия нуклонов: при увеличении q быстро возрастает роль немассовых эффектов в NN -рассеянии; кроме того, как SS , так и возбуждение Δ -изобары могут приводить к испусканию быстрого нуклона в конечном состоянии без использования высокоимпульсной компоненты дейтронной волновой функции.

Для описания упругого pd -рассеяния назад Л. А. Кондратюком, Ф.

М. Львом, Л. В. Шевченко⁸, Ю. Н. Узиковым и др.⁹ была разработана модель $ONE+\Delta+SS$, с помощью которой удаётся качественно воспроизвести энергетическую зависимость дифференциального сечения процесса в диапазоне энергии протонного пучка 0.2 – 3.0 ГэВ и T_{20} в диапазоне 0.2 – 0.4 ГэВ. Коллинеарная кинематика реакции $pd \rightarrow (pp)_s(0^\circ)n$ очень близка к кинематике pd -рассеяния назад, следовательно, одни и те же механизмы могут рассматриваться при описании обоих процессов. Преимущество изучения развала дейтрона в такой кинематике состоит в подавлении амплитуд возбуждения Δ , N^* на изотопический фактор 1/3, что повышает относительный вклад однонуклонного обмена, чувствительного к ядерной структуре на коротких расстояниях¹⁰. Использование этого преимущества встречает значительные трудности при постановке соответствующих экспериментов. Предсказываемая теорией величина сечения примерно на два порядка ниже сечения упругого pd -рассеяния назад, в то время как само это сечение составляет 200 – 2 мкбн/ср при энергиях 0.6 – 2.0 ГэВ, соответственно. Так как дифракционное рассеяние протонов дейтронами, образующее основной поток протонов под малыми углами к пучку, имеет сечение около 100 мбн/ср, выделение протонов интересующего процесса должно происходить в сопровождении потока протонов в $5 \times 10^4 - 5 \times 10^6$ большей интенсивности. Кроме того, изучение процесса требует разрешающей способности эксперимента по относительной энергии протонов в паре на уровне 0.1 – 0.3 МэВ при регистрации протонов с энергией в интервале от 260 до 940 МэВ. Это объясняет, почему наблюдаемый процесс никогда не наблюдался ранее до настоящего эксперимента.

Во второй главе дано описание синхротрона COSY¹¹ и частей установки ANKE¹², использованных для получения представляемых результатов. В ней также приводятся условия и методика проведённого эксперимента.

Ускоритель COSY обеспечивает пучки неполяризованных и поляризованных протонов и дейтронов с импульсом 294 – 3700 МэВ/с. Спектрометр ANKE расположен на внутреннем пучке COSY, его система спектрометрических магнитов позволяет проводить измерения во всём диапазоне энергий

⁸Л. Кондратюк, Л. Шевченко, ЯФ 29(1979) 792; Л. Кондратюк и др. ЯФ 33(1981) 1208

⁹О. Imambekov et al. Z. Phys. A332(1989) 349; Ю. Узиков, ЭЧАЯ, 29(1998) 1405

¹⁰Yu. N. Uzikov, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 28(2002) B13

¹¹R. Maier, NIM A390(1997) 1

¹²S. Barsov et al., NIM A462(2001) 364.

COSY. В измерении развала дейтрона был использован передний детектор ANKE (рис. 1), регистрирующий положительно заряженные частицы с импульсом, большим 0.4 ГэВ/с, под малыми ($< 15^\circ$) углами к пучку /4/. Детектор включает 3 быстрых пропорциональных камеры с шагом 1.05 мм, годоскоп сцинтилляционных счётчиков, служащий для выработки триггера, измерения времени регистрации частиц и потерь энергии, и годоскоп черенковских счётчиков. Камеры позволяют восстанавливать траекторию и импульс частиц, отклонённых полем спектрометрического магнита D2.

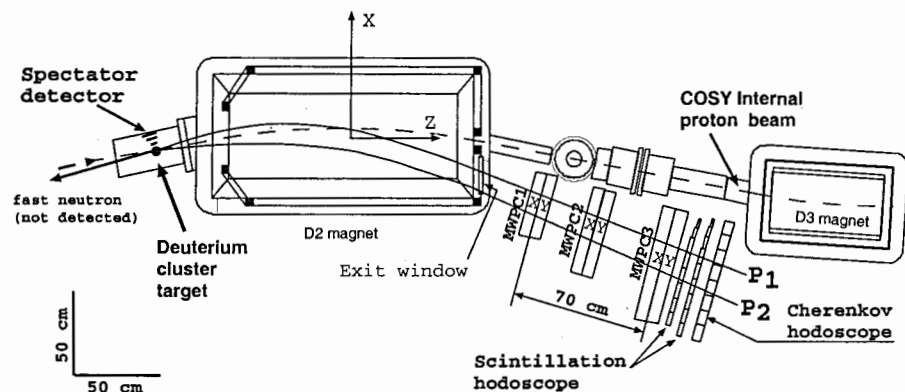


Рис. 1. Схема регистрации процесса $pd \rightarrow (pp)_s n$ в переднем детекторе ANKE. Дейтериевая струя кластерной мишени направлена (сверху вниз) по нормали к плоскости рисунка.

Спектрометр ANKE предоставляет уникальные возможности для изучения интересующей реакции:

- отклонение частиц, испускаемых мишенью, в поле магнита D2 существенно снижает загрузки детекторов,
- использование струйной мишени в вакуумной камере ускорителя позволяет полностью избежать фона, возникающего в конструктивных элементах (стенках, окнах) жидкодейтериевых мишеней на выведенном пучке,
- передний детектор ANKE позволяет регистрировать процесс вплоть до нулевых значений полярного угла суммарного импульса протонной пары,

- спектрометр обладает достаточно высокой разрешающей способностью при восстановлении 3-х импульса вторичных протонов,
- светимость и акцептанс, достигаемые в установке, позволяют набирать статистику для процесса с сечением $1 - 0.01$ мкбн/ср,
- поляризованный протонный пучок COSY обеспечивает в настоящее время измерение векторной анализирующей способности реакции, а при введении в строй создаваемой на ANKE поляризованной мишени в дальнейшем будет возможным измерение тензорной анализирующей способности и параметров спин-спиновых корреляций.

Измерение дифференциального сечения происходило в феврале 2001 г. с использованием дейтериевой кластерной мишени. Использовались энергии пучка 0.6, 0.7, 0.8, 0.95, 1.35 и 1.9 ГэВ, что позволило исследовать районы предполагаемых минимума (~ 0.8 ГэВ) и плато (> 1 ГэВ) сечения. На ленту было записано 60 – 140 миллиона событий при каждой энергии, при светимости $0.35 - 0.5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Векторная анализирующая способность была измерена при энергиях пучка 0.5 и 0.8 ГэВ в июле 2003 г. Использовалась дейтериевая кластерная мишень и поляризованный пучок протонов, меняющий направление спина каждые 10 мин. Поляризация пучка при энергии 0.8 ГэВ определялась с помощью упругого pd -рассеяния. Цикл ускорителя состоял из трёх плато с энергией 0.8, 0.5 и снова 0.8 ГэВ. Это позволило применить методику экспорта поляризации¹³ для определения поляризации пучка при 0.5 ГэВ. Найденная таким образом величина поляризации составила 0.548 при 0.5 ГэВ и 0.578 при 0.8 ГэВ с ошибкой, не превышающей 0.01.

Третья глава посвящена описанию системы обработки данных в переднем детекторе спектрометра ANKE, применяемой в большинстве экспериментов на этой установке. В этой главе представляются методы обработки и наиболее характерные примеры их применения к данным, полученным с помощью переднего детектора ANKE. Описание системы обработки приведено в работе /5/.

¹³R.E. Pollack et. al., Phys.Rev. E55(1997) 7606

Программа моделирования, созданная на основе библиотеки GEANT3, включает детальное описание установки и использует измеренные и рассчитанные трёхмерные карты поля спектрометрических магнитов ANKE. Она применялась как при планировании эксперимента по развалу дейтрона, так и в ходе обработки экспериментальных данных. В результате моделирования были получены разрешения по восстановленному импульсу, недостающей массе и энергии возбуждения протонной пары в реакции $pd \rightarrow (pp)_s(0^\circ)n$, а также рассчитан геометрический аксептанс установки. Импульсное разрешение (RMS) спектрометра при поле в D2, равном 1.6 Т, составляет $\sigma(\Delta p)/p = 0.5 - 1\%$ для протонов с импульсами 0.5 – 3.0 ГэВ/с. Разрешение по недостающей массе равно 15 – 20 МэВ, в зависимости от энергии пучка, а энергия возбуждения пары может быть восстановлена с точностью $\sigma(E_{pp}) < 0.4$ МэВ при $E_{pp} = 0 - 3$ МэВ, что делает возможным выделение событий в этом диапазоне E_{pp} . Величины разрешения, полученные с помощью моделирования, хорошо совпадают с экспериментально наблюдаемыми.

Для восстановления импульса в переднем детекторе автором адаптирован "полиномиальный" метод, в котором каждая компонента 3-х импульса представляется в виде многочлена третьей степени от параметров измеренного трека. Показано, что неточность такой аппроксимации в 5-10 раз меньше экспериментального размытия восстановленного импульса. Кроме того, для условий ANKE был реализован метод восстановления импульса с помощью интегрирования траектории частицы в магнитном поле (метод Рунге-Кутты), включающий в себя аналитическое вычисление матрицы производных и учёт энергетических потерь в веществе. В отличие от распространённого варианта этого метода, в котором интегрирование производится вдоль одной из осей, в данной реализации такое упрощение не делалось, что позволило применять метод ко всем детекторам ANKE. Этот метод кратко описан в работе /6/. Аналитическое вычисление производных существенно повышает скорость расчёта и позволяет применять этот метод к достаточно большим ($\sim 10^6$ событий) массивам отобранных событий.

Эффективность пропорциональных камер оказалась ниже 100% (от 80 до 100% на каждой чувствительной плоскости), при этом неоднородной по поверхности и нестабильной во времени. Для учёта этого эффекта была раз-

вита методика расчёта поверхностных карт эффективности, проводимого с использованием экспериментальных данных. Карты рассчитывались для каждого промежутка времени, в течении которого эффективность была стабильна. Поправка на неэффективность вводилась как индивидуальный вес трека, зависящий от пересекаемой им области камеры.

Чтобы повысить трековую эффективность, в особенности для интересующих нас двухтрековых событий, использовался алгоритм поиска треков, не требующий срабатываний на каждой плоскости и не использующий опорных плоскостей. Для оценки качества трека в нём используются предварительно полученные карты эффективности. Благодаря комбинаторному поиску, общая эффективность восстановления двухтрековых событий составила 90%. Также была реализована детальная процедура оценки эффективности восстановления близких треков в событиях из процесса $pd \rightarrow (pp)_s(0^\circ)n$, показавшая, что существенные (> 20%) потери при восстановлении близких треков начинаются только в области $E_{pp} < 0.2$ МэВ.

В связи с тем, что позиции координатных детекторов не могли быть измерены с необходимой точностью ($\sim 100\mu$), была разработана методика подстройки геометрических констант установки при помощи экспериментальных данных. В ней использовались "калибровочные" реакции с полностью восстанавливаемой кинематикой, при этом координаты детекторов варьировались для достижения наименьшего отклонения величин недостающих масс в этих реакциях. Остаточные отклонения не превышали 11 МэВ/с², что позволило уверенно использовать недостающую массу в качестве критерия для выделения процесса $pd \rightarrow ppn$. Возмущение восстановленной энергии возбуждения протонной пары при таком смещении, как показало моделирование, пренебрежимо.

В четвёртой главе изложена процедура получения энергетической зависимости дифференциального сечения и векторной анализирующей способности процесса безмезонного развала дейтрона протоном с испусканием вперёд протонной пары с малой относительной энергией. Полученные результаты сравниваются с предсказаниями модели ONE+ Δ +SS.

Основным критерием выделения процесса $pd \rightarrow ppn$ служила величина недостающей массы для регистрируемой протонной пары. При всех энерги-

ях пучка распределение недостающих масс содержит пик с шириной около 20 МэВ, расположенный вблизи величины массы нейтрона. Анализ кинематики сопровождающих реакций с регистрацией двух положительно заряженных частиц в переднем детекторе: $pd \rightarrow pd\pi^0$, $pd \rightarrow prp^0n$, $pd \rightarrow prp^-p$, $pd \rightarrow dn\pi^+$, $pd \rightarrow pn\pi^+n$ и $pd \rightarrow {}^3H\pi^+$ показал, что события ни одной из них не могут образовывать такого пика в акцептансе переднего детектора ANKE, в том числе и при неверной идентификации частиц. При этом вклад событий от ближайших сопровождающих реакций $pd \rightarrow pd\pi^0$, $pd \rightarrow prp^0n$ и $pd \rightarrow prp^-p$ в подложку под пиком может быть учтён, наряду с фоном случайных совпадений, процедурой вычитания. В событиях, в которых две частицы попадали в разные счётчики годоскопа, было возможно определение типа частиц в паре с помощью измеренной разницы времён пролёта. Такое определение подтверждает, что пик вблизи величины массы нейтрона действительно образован событиями, в которых регистрируются протонные пары. Фоновая подложка под пиком незначительна при энергии 0.6 ГэВ, но нарастает с ростом энергии пучка, так что отношение эффект/(эффект+фон) изменялось от 0.94 при энергии пучка 0.6 ГэВ до 0.62 при 1.9 ГэВ.

Светимость при измерении дифференциального сечения была получена с использованием протонов, упруго и квазиупруго рассеянных на малые лабораторные углы от 5 до 10°, при этом было использовано сечение малоуглового $pd \rightarrow pX$ рассеяния, рассчитанное¹⁴ в приближении полноты теории Глаубера-Франко¹⁵. Сравнение такого расчёта с экспериментальными данными привело к оценке точности (RMS) сечения на уровне 7%.

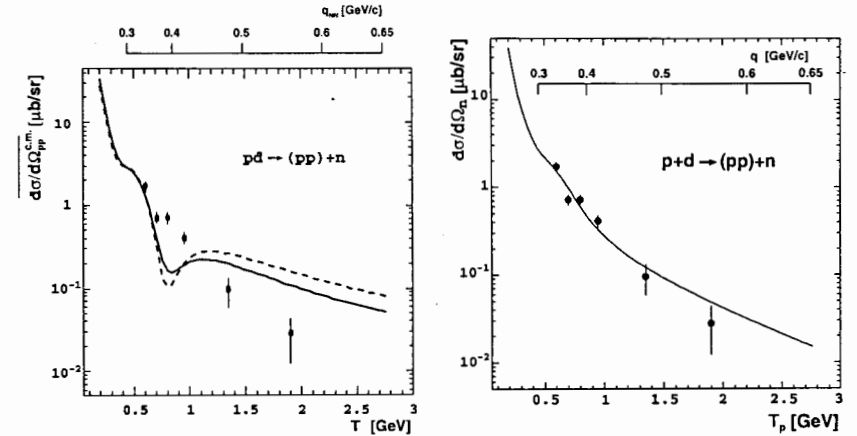
Форма распределения событий $pd \rightarrow (pp)n$ по величине энергии E_{pp} относительного движения в паре хорошо ($\chi^2/\text{n.d.f} = 0.99$) описывается произведением фазового объёма и фактора Мигдала-Ватсона взаимодействия в конечном состоянии в S -волне. Фазовый объём при малых значениях E_{pp} имеет зависимость $\sqrt{E_{pp}}$, а взаимодействие в конечном состоянии в приближении Мигдала-Ватсона параметризуется как

$$|T(E_{pp})|^2 = \frac{1}{|C(\eta)|^2} \left(\frac{\sin \delta}{k} \right)^2,$$

¹⁴Yu. Uzikov, Diffraction pd -scattering at COSY energies, ANKE-COSY Internal report, Jülich, 2001.

¹⁵V. Franco, R. J. Glauber, Phys. Rev. **142**(1966) 1195.

где T — матрица упругого pp -рассеяния, $|C(\eta)|^2$ — кулоновский фактор, вычисляемый при $\eta = \sqrt{E_{pp}/m_p}$, а δ — совместный кулон-ядерный фазовый сдвиг. Распределение событий по косинусу азимутального угла в системе пары протонов при $E_{pp} < 3$ МэВ не противоречит изотропии ($\chi^2/\text{n.d.f} = 1.03$), допуская примесь неизотропного вклада в дифференциальном сечении на уровне нескольких процентов. Таким образом, данные соответствуют предположению о том, что наблюдаемые протонные пары находятся преимущественно в 1S_0 -состоянии.



(a) Reid Soft Core (пунктир) и парижский (сплошная линия) потенциалы

(b) CD Bonn потенциал

Рис. 2. Дифференциальное сечение $pd \rightarrow (pp)_s(0^0)n$ в сравнении с расчётом ONE+SS+ Δ модели с использованием различных NN-потенциалов.

Чтобы представить энергетическую зависимость сечения процесса во всём измеренном диапазоне энергий, трижды дифференциальное сечение было проинтегрировано по интервалу $0 < E_{pp} < 3$ МэВ и усреднено по интервалу угла вылета протонной пары в системе центра масс реакции $0 < \vartheta_{pp}^{c.m.} < 8^\circ$. Основной ($\sim 10\%$) составляющей неопределённости сечения при низких энергиях была систематическая ошибка, в которой доминировала погрешность расчёта светимости. При высоких энергиях возрастает роль статистической ошибки (до 30 % при 1.9 ГэВ).

На рис. 2(а) показано измеренное дифференциальное сечение процесса

$pd \rightarrow (pp)_s(0^\circ)n$ как функция энергии пучка /1, 2/. Там же приведены результаты расчёта в ONE+SS+ Δ модели с использованием Reid Soft Core и парижского потенциалов. Провал, ожидаемый при ~ 0.8 ГэВ, не наблюдается, падение сечения при $T_p > 1$ ГэВ происходит значительно быстрее, чем предсказывается. Однако последние расчёты с использованием CD Вопп потенциала, который соответствует относительной малости высокоимпульсной компоненты волновой функции NN-системы в $^3S_1 - ^3D_1$ и 1S_0 состояниях, позволяют достигнуть разумного согласия с экспериментом (Рис. 2(b))¹⁶.

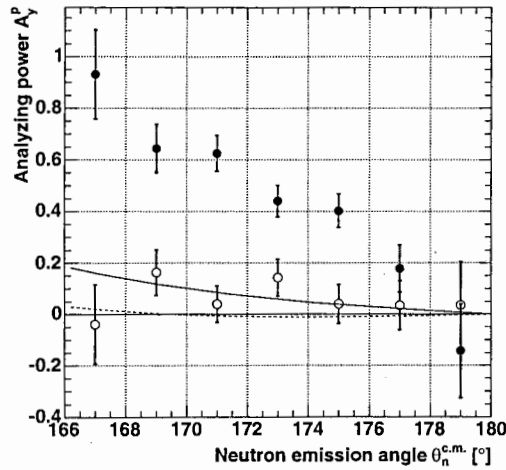


Рис. 3. Угловая зависимость анализирующей способности при $T_p = 0,5$ ГэВ (заполненные кружки) и 0,8 ГэВ (пустые кружки) в процессе $\bar{p}d \rightarrow (pp)n$. Сплошной линией показано предсказание модели ONE+SS+ Δ для $T_p = 0,5$ ГэВ, полученное с использованием CD Вопп NN-потенциала, прерывистой — для $T_p = 0,8$ ГэВ.

На Рис. 3 приведен результат измерения векторной анализирующей способности A_y^p при энергиях 0,5 и 0,8 ГэВ /3/. Там же показано сравнение с расчётом в рамках модели ONE+SS+ Δ , проведённым с использованием CD Вопп NN-потенциала. Модель воспроизводит знак A_y^p и уменьшение её величины при переходе от 0,5 к 0,8 ГэВ, но совершенно не описывает значение

A_y^p при энергии 0,5 ГэВ. Возможным объяснением этому может быть то, что спиновая структура Δ -механизма, существенно проявляющаяся в районе узла ONE, при этих энергиях, несмотря на включение вклада Δ^{++} , не полностью учтена в модели. Возможный путь для улучшения теоретического описания может заключаться в использовании механизма однопионного обмена (OPE) для определения вклада Δ . Эта модель была предложена ранее¹⁷ и использовалась для описания дифференциального сечения рассеяния $pd \rightarrow dp$, однако для её применения к процессу $pd \rightarrow (pp)_s(0^\circ)n$ необходимы данные по процессам $pp \rightarrow (pp)_{^1S_0}\pi^0$ и $pn \rightarrow (pp)_{^1S_0}\pi^-$ в соответствующих кинематических областях. Эксперименты, планируемые к проведению на ANKE, включают получение таких данных, а также измерение тензорной анализирующей способности T_{20} и других поляризационных наблюдаемых в процессе $pd \rightarrow (pp)_{^1S_0}n$.

В заключении суммируются результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Впервые проведены измерение и анализ данных по дифференциальному сечению процесса $p + d \rightarrow (pp)_s(\theta_{pp}) + n$ в диапазоне энергий протонного пучка $T_p = 0,6-1,9$ ГэВ. Получена энергетическая зависимость дифференциального сечения, проинтегрированного по интервалу относительной энергии в протонной паре от 0 до 3 МэВ и усреднённого в интервале углов θ_{pp}^{cm} от 0° до 8° . Зависимость позволяет сделать вывод о явной предпочтительности использования на малых расстояниях и вне массовой поверхности CD Вопп NN-потенциала перед Парижским и Reid Soft Core потенциалами. Это свидетельствует об относительной малости высокоимпульсной компоненты волновой функции NN-системы в $^3S_1 - ^3D_1$ и 1S_0 состояниях.
2. Впервые измерена векторная анализирующая способность A_y^p в процессе $\bar{p}d \rightarrow (pp)_sn$ при энергиях протонного пучка 0,5 и 0,8 ГэВ в диапазоне углов вылета нейтрона $\theta_n^{cm} = 166 - 180^\circ$. В ходе этого измерения разработана методика поляризационных pd -экспериментов на ANKE, необходимая для дальнейшего получения T_{20} и $C_{y,y}$. Неожиданно большая

¹⁷N.S.Craigie, C.Wilkin, Nucl. Phys. **B14**, (1969)477;
В. М. Колыбасов, Н. Я. Смородинская, Яд. Физ. **17**(1973)1211;
A. Nakamura, L. Satta, Nucl. Phys. **A445**(1985)706

¹⁶J. Haidenbauer, Yu. N. Uzikov, Phys. Lett. **B562**(2003) 227

величина A_y^p при 0,5 ГэВ привела к необходимости использования новых теоретических подходов к описанию этого процесса и мотивировала изучение на ANKE процессов $pp \rightarrow (pp)_{1S_0}\pi^0$ и $pn \rightarrow (pp)_{1S_0}\pi^-$ в той же кинематике.

3. Создана система обработки данных, получаемых с помощью переднего детектора спектрометра ANKE (COSY, Юлих, Германия). Система включает в себя определение эффективности регистрации, калибровки импульсной шкалы и годоскопов счётчиков, восстановление траекторий и импульсов заряженных частиц, а также процедуры on-line контроля процесса измерения.
4. Разработана методика определения геометрических параметров спектрометра с использованием набора калибровочных реакций.
5. Создана методика определения светимости при взаимодействии внутреннего пучка ускорителя COSY со струйной кластерной мишенью спектрометра ANKE.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

- [1] V. Komarov, S. Dymov et al., *Proton-induced deuteron breakup at GeV energies with forward emission of a fast proton pair*, Phys. Lett. B **553**, 179 (2003).
- [2] S. Dymov et al., *Physica Scripta* Vol. T **104**, 26 (2003).
- [3] S. Yaschenko, S. Dymov et al., *Measurement of the analyzing power in $\bar{p}d \rightarrow (pp)n$ with a fast forward 1S_0 -diproton*, Phys. Rev. Lett., **94**, 072304 (2005).
- [4] B. Chiladze, S. Dymov et al., *The forward detector of the ANKE spectrometer. Scintillation and Cherenkov hodoscopes.*, Письма в журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра". No. **4[113]**, 95 (2002).
- [5] S. Dymov et al., *The forward detector of the ANKE spectrometer. Tracking system and its use in the data analysis.*, Письма в журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра", No. **2[119]**, 40 (2004).
- [6] Dymov S. N. , Kurbatov V. S., Silin I. N., Yaschenko S. V., *Constrained minimization in C++ environment*, NIM A **440**, 431 (2000).

Получено 19 марта 2007 г.