

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В.П. ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



Цирков Дмитрий Алексеевич

**Реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$
с образованием 1S_0 дипротона
при промежуточных энергиях 0.35–0.8 ГэВ**

Специальность 01.04.16
«Физика атомного ядра и элементарных частиц»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна — 2021

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

Научный руководитель: **Комаров Владимир Иванович**,
доктор физико-математических наук,
Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Дзелепова,
Объединённый институт ядерных исследований,
главный научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Строковский Евгений Афанасьевич**,
доктор физико-математических наук,
Лаборатория физики высоких энергий, Объединённый институт ядерных исследований,
старший научный сотрудник

Платонова Мария Николаевна,
кандидат физико-математических наук,
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова,
научный сотрудник

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединённого института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу:

<https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Г.А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Понимание свойств нуклон-нуклонных взаимодействий необходимо для описания ядерной материи и ядерных реакций. На расстояниях $\gtrsim 1$ фм такие взаимодействия хорошо описываются моделями пионного обмена [14; 15], но при меньших расстояниях эти модели сталкиваются с трудностями, поскольку размер области взаимодействия соизмерим с характерным радиусом адронов. Описание взаимодействия путём обмена тяжёлыми мезонами не достигает количественного уровня и встречает серьёзные затруднения.

Становится очевидной необходимость учёта внутренней структуры адронов и, следовательно, кварк-глюонных степеней свободы [16—19]. Однако любой учёт кварк-глюонных степеней свободы в условиях передаваемых импульсов менее $\Lambda_{\text{QCD}} \approx 0.1$ ГэВ/с встречает принципиальную трудность вследствие непертурбативного характера взаимодействия. Строгая теория КХД для таких взаимодействий отсутствует, и их описание становится возможным в рамках различных феноменологических моделей [18—20] или в теориях эффективно-го поля [21—23], ограниченных использованием сравнительно невысоких действующих импульсов. Взаимодействия на расстояниях менее 0.5 ферми заведомо должны описываться в рамках квантовой хромодинамики, но изучение NN -взаимодействий на таких расстояниях в настоящее время определённо находится лишь на начальном этапе как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Центральные соударения нуклонов с прицельными параметрами менее 0.5 ферми при энергиях в области нескольких ГэВ являются, по существу, *terra incognita* в экспериментальном отношении, а применение КХД, исходящей из фундаментальных принципов, ограничено расчётами на решётке, которые в настоящее время действительно дают заключение о кварк-глюонном характере взаимодействия на таких экстра-малых расстояниях [24; 25].

Исследование взаимодействий на расстояниях порядка 0.5–1.0 фм представляет собой трудную задачу, поскольку здесь проявляются одновременно мезон-барионные и кварк-глюонные степени свободы [26]. Их взаимодействие и зависимость относительного доминирования от кинематических условий создают сложную картину, требующую для прояснения её динамики интенсивных теоретических и экспериментальных усилий. Типичные передаваемые импульсы в обсуждаемых процессах составляют примерно 200–400 МэВ/с. Они достижимы при энергиях протонных пучков в области одного-нескольких ГэВ — эту область традиционно называют областью физики промежуточных энергий. Её научный потенциал в настоящее время далеко не исчерпан даже в аспекте изучения нуклон-нуклонных взаимодействий.

Наиболее продуктивным здесь может оказаться исследование бинарных реакций, так как в них наблюдаются максимальные в данных условиях передаваемые импульсы, и, в то же время, бинарность облегчает фазовый анализ их амплитуд. Наиболее изученные бинарные реакции для нуклон-нуклонных соуда-

рений — реакции с образованием дейтрона $NN \leftrightarrow d\pi$ [14] и $NN \leftrightarrow d\gamma$ [27—30], как в прямом, так и в обратном канале.

Представляет интерес исследование и спин-изоспиновых партнёров этих реакций, $NN \rightarrow \{pp\}_s\pi$ и $NN \rightarrow \{pp\}_s\gamma$, где $\{pp\}_s$ — 1S_0 протонная пара, испытывающая взаимодействие в конечном состоянии. Для отбора протонных пар с доминированием 1S_0 -состояния обычно (в том числе в работах, рассматриваемых в диссертации) применяется ограничение на энергию возбуждения пары $E_{pp} < 3$ МэВ. Такая пара для краткости называется дипротоном.

Основное преимущество дипротонных каналов по сравнению с дейтронными — относительная простота волновой функции дипротона, значительно упрощающая фазовый анализ [31]. Различие изоспинов конечного состояния нуклон-нуклонной пары в дипротонных и дейтронных каналах предоставляет дополнительные возможности для изоспинового анализа нуклон-нуклонных взаимодействий.

Основную трудность при изучении дипротонных каналов представляет малость сечения реакций (по сравнению с дейтронными) и сложность идентификации 1S_0 дипротона. По этим причинам изучение дипротонных каналов при энергиях выше порога мезообразования было крайне ограниченным. Реакция $pn \rightarrow \{pp\}_s\pi^-$ изучалась на установке TRIUMF при энергиях $T_p = 353, 403$ и 440 МэВ. В эксперименте SACLAY [32; 33] исследовалась зарядовообменная реакция $pd \rightarrow \{pp\}_s n$ при энергиях от 200 МэВ до 2 ГэВ. Сечение реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ измерялось на установке PROMICE-WASA при нескольких энергиях в интервале от 310 до 425 МэВ [34]. Эксперименты по исследованию реакции с одновременным рождением дипротонов и гамма-квантов при энергиях выше порога мезообразования были неизвестны до начала наших экспериментов.

На установке ANKE [35], расположенной на синхротроне COSY (Jülich, Германия) [36], появилась возможность исследования реакций с рождением дипротонов [37], и была предложена программа, включающая измерение дифференциального сечения и векторной анализирующей способности реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ [38]. В околопороговой области изучение данного процесса послужило первым шагом в программе исследований применимости теории эффективного поля КХД при одиночном рождении пиона [39]. Также на ANKE были проведены первые измерения реакции в области возбуждения $\Delta(1232)$ бариона [40; 1], которые показали резонансный характер реакции около энергии 660 МэВ. Это мотивировало более подробное измерение сечений реакции в данной области и первое определение её векторной анализирующей способности, что позволило провести фазовый анализ амплитуд реакции. В процессе изучения канала $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ также оказалось возможным выделить сигнал реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\gamma$ и измерить её сечение. Результаты этих исследований положены в основу настоящей диссертации.

Целью работы является исследование свойств адронных взаимодействий на малых расстояниях при промежуточных энергиях путём изучения реакций

с образованием в конечном состоянии 1S_0 дипротона $\{pp\}_s$, а именно, $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ и $pp \rightarrow \{pp\}_s\gamma$. Так как 1S_0 дипротон является спин-изоспиновым партнёром дейтрона, другая структура переходов в дипротонных каналах по сравнению с дейтронными позволяет получить дополнительные сведения о динамике реакции.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Подготовлены и проведены эксперименты с неполяризованным и поляризованным протонным пучком и водородной кластерно-струйной мишенью на установке ANKE;
2. Разработана и отлажена методика и программное обеспечение для обработки экспериментальных данных реакций с образованием 1S_0 дипротона в конечном состоянии;
3. Получено дифференциальное сечение $d\sigma/d\Omega$ и векторная анализирующая способность A_y реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$;
4. Проведён парциально-волновой анализ реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$;
5. Получено дифференциальное сечение $d\sigma/d\Omega$ реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\gamma$;
6. Сделаны выводы из полученных результатов.

Научная новизна:

1. Впервые измерена анализирующая способность A_y реакции пионного рождения с образованием 1S_0 дипротона $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ при энергии возбуждения дипротона $E_{pp} < 3$ МэВ и энергии протонного пучка $T_p = 353$ МэВ в полном угловом интервале.
2. Впервые измерены энергетические и угловые зависимости дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ и анализирующей способности A_y для процесса $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ под малыми полярными углами в области возбуждения $\Delta(1232)$ -резонанса.
3. Впервые обнаружены нетривиальные особенности наблюдаемых реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$: выраженный пик в энергетической зависимости сечения в области возбуждения $\Delta(1232)$ -резонанса, минимум дифференциального сечения при нулевом угле, и значительные, доходящие в максимуме до ≈ 0.8 , значения анализирующей способности.
4. Впервые проведён парциально-волновой анализ реакции, который позволил уточнить параметры дибарионного резонансного состояния 3P_2d .
5. Впервые напрямую показан значительный вклад перехода 3P_2d в канал $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ при энергии протонного пучка $T_p = 353$ МэВ.
6. Впервые показано существование резонанса в переходе 3P_0s , измерены значения его массы и ширины.
7. Впервые зарегистрирована реакция излучения жёсткого гамма-кванта с образованием 1S_0 дипротона $pp \rightarrow \{pp\}_s\gamma$ при энергиях выше порога мезообразования и измерена энергетическая зависимость её дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ под малыми полярными углами при энергиях пучка от 353 до 800 МэВ.

Практическая значимость:

Полученные энергетические и угловые зависимости дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ и анализирующей способности A_y для процесса $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ при энергии протонного пучка $T_p = 353$ МэВ были необходимы для проведения совместного парциально-волнового анализа процессов $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ и $pn \rightarrow \{pp\}_s\pi^-$ при энергии 353 МэВ. Теоретики, работающие в рамках киральной эффективной теории возмущений, планируют использовать результаты этого анализа для определения низкоэнергетического параметра d контактного $(NN)2\pi$ взаимодействия в киральной эффективной теории поля. Уточнение параметров дибарионного резонансного состояния 3P_2d , а также параметры нового дибарионного резонансного состояния 3P_0s важны для дальнейшего развития теории дибарионных резонансов и их роли в адронных взаимодействиях на малых расстояниях. Измеренные сечения реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\gamma$ полезны для теоретического изучения динамики жёсткого гамма-излучения, в частности, для оценки интенсивностей мультипольных переходов, таких как $E1$, $E2$ и $M2$.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования реакции $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ при околороговой энергии $T_p = 353$ МэВ: измерение дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ и анализирующей способности A_y в полном угловом интервале; парциально-волновой анализ полученных данных, впервые напрямую показавший значительный вклад перехода 3P_2d в данный канал.
2. Результаты исследования реакции $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ при энергиях в области возбуждения $\Delta(1232)$ -резонанса: измерение дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ и анализирующей способности A_y под малыми полярными углами; характерное поведение этих величин; парциально-волновой анализ полученных данных; обнаруженный в результате новый дибарионный резонанс в переходе 3P_0s , значения его массы и ширины, уточненные параметры ранее известного дибарионного резонансного состояния 3P_2d .
3. Первое наблюдение реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\gamma$ при энергиях выше порога мезообразования; измерение энергетической и угловой зависимости её дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ под малыми полярными углами при энергиях от 353 до 800 МэВ; обнаруженное резонансное поведение сечения, показавшее ведущий вклад промежуточного состояния $\Delta(1232)N$ в сечение процесса при соответствующих энергиях.

Достоверность полученных результатов обеспечивается отработанной процедурой анализа, проверенной на многочисленных экспериментальных данных ANKE, в том числе не вошедших в диссертационную работу. Процедура анализа даёт согласующиеся результаты для сеансов с различными экспериментальными условиями. Кроме того, результаты, относящиеся к реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$, находятся в согласии с результатами других авторов — в тех случаях, когда такое сравнение возможно.

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись автором на следующих конференциях и научных мероприятиях:

1. ANKE/PAX workshop on spin physics, 2009, ОИЯИ, Дубна, Россия, Reaction $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ at intermediate energies, устный доклад;
2. 27th CANU and 4th FFE Workshop 2009, December 21–22, 2009, Physikzentrum Bad Honnef, Germany, Study of $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ gamma reaction at intermediate energies with ANKE, устный доклад;
3. DPG Spring Meeting, 15th–19th of March 2010, Bonn, Germany, Energy dependence of the cross section for $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ at intermediate energies with ANKE, секционный доклад;
4. SPIN2010 – 19th International Spin Physics Symposium, September 27 – October 2, 2010, Jülich, Germany, Vector analyzing power of $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at intermediate energies at ANKE, секционный доклад;
5. The 33th meeting of the JINR Programme Advisory Committee for Nuclear Physics, 20.01.2011–21.01.2011, ОИЯИ, Дубна, Россия, Vector analyzing power of $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at intermediate energies, стендовый доклад
6. DPG Spring Meeting, 21st–25th of March 2011, Münster, Germany, Vector analyzing power of $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at intermediate energies at ANKE, секционный доклад;
7. 29th CANU and 6th COSY-FFE Workshop, December 19 and 20, 2011, Physikzentrum Bad Honnef, Germany, Study of the $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at COSY energies, устный доклад;
8. The 35th meeting of the JINR Programme Advisory Committee for Nuclear Physics, 26.01.2012–27.01.2012, ОИЯИ, Дубна, Россия, Study of the $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at 353–700 MeV energies, стендовый доклад;
9. The 2012 European School of High-Energy Physics, 6–19.06.2012, Anjou, France, Study of the $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at ANKE/COSY, стендовый доклад;
10. SPIN2012 – 20th International Spin Physics Symposium, 17–22.09.2012, Дубна, Россия, Study of $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at COSY energies, секционный доклад;
11. XVIII научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ (ОМУС-2014), 24–28.02.2014, Дубна, Россия, Study of the $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ Reaction in the $\Delta(1232)$ Excitation Region at ANKE-COSY, секционный доклад;
12. XIX научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ (ОМУС-2015), 16–20.02.2015, Дубна, Россия, Observation of the isovector dibaryon resonance-like state with mass of $2.18 \text{ GeV}/c^2$, секционный доклад;
13. The 42th meeting of the JINR PAC for Nuclear Physics, 04–05.06.2015, ОИЯИ, Дубна, Россия, Observation of the isovector dibaryon resonance-like state with mass of $2.18 \text{ GeV}/c^2$, стендовый доклад;

14. IV школа-конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ (Алушта-2015), 6–13.06.2015, ОИЯИ, Алушта, Россия, Observation of the isovector dibaryon resonance-like state with a mass of 2195 MeV/c², устный доклад;
15. 3rd European Nuclear Physics Conference (EuNPC 2015), 31.08–04.09.2015, Groningen, Netherlands, Observation of isovector dibaryon resonance-like states with a mass of 2.2 GeV/c², секционный доклад;

а также рабочих совещаниях коллаборации ANKE.

Личный вклад. Автор участвовал в проведении экспериментов и наборе данных, обработка которых описывается в диссертационной работе. Группой с участием автора разработана методика обработки экспериментальных данных. Автор разработал методику разделения пиков $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ в спектре недостающих масс, а также написал программный код для надёжного выполнения данной задачи в случае частичного и значительного перекрытия пиков. Автор участвовал в написании программного обеспечения обработки экспериментальных данных, а именно, автором написан код для корректного учёта краевых эффектов акцептанса, код для финального этапа получения дифференциального сечения и векторной анализирующей способности изучаемых реакций, а также переработан код моделирования акцептанса с учётом особенностей установки. Автором произведена обработка всех приведённых в диссертационной работе данных согласно разработанной методике и написанному программному обеспечению, и получены дифференциальные сечения $d\sigma/d\Omega$ и векторные анализирующие способности A_y реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и дифференциальные сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$. Автор написал код для проведения парциально-волнового анализа реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и получил его результаты. Автор активно участвовал в написании публикаций [1–5] по теме диссертации в журналах, рекомендованных ВАК, а также написал работы [6–13].

Диссертационная работа выполнена при поддержке грантов BMBF (грант ANKE COSY-JINR), RFBR (09-02-91332), DFG (436 RUS 113/965/0-1) и COSY-FEE.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 статьях [1–13], 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, и проиндексированы базами Scopus, Web of Science и РИНЦ [1–5], 2 — вышли в тезисах докладов конференций [6; 7], остальные — в ежегодных отчётах коллаборации ANKE [8–13].

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 163 страницы, включая 63 рисунка и 19 таблиц. Список литературы содержит 210 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** излагается мотивация и цель экспериментов, приводится обзор научной литературы и актуальное состояние научных исследований по изучаемым проблемам.

Во **второй главе** приведено описание установки.

Все эксперименты, результаты которых изложены в диссертации, проводились на спектрометре ANKE, работающем на внутреннем пучке ускорителя COSY.

Ускоритель COSY (см. рис. 1) — протонный синхротрон с накопительным кольцом длиной 184 м, в вакуумной камере которого происходит накопление ускоренного пучка. COSY обеспечивает получение как поляризованных, так и неполяризованных протонных и дейтронных пучков с импульсами частиц 0.3–3.6 ГэВ/с, что соответствует энергиям протонов 0.45–2.8 ГэВ.

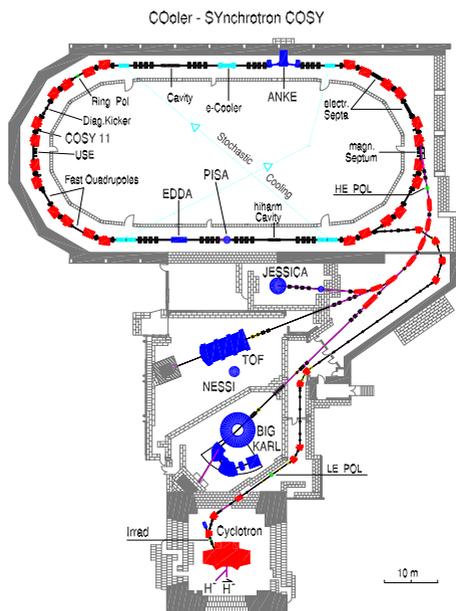


Рис. 1 — Схема ускорителя COSY [36].

Все сеансы, данные которых рассматриваются в диссертации, использовали схему с внутренним протонным пучком (неполяризованным либо поляризованным) и фиксированной водородной кластерно-струйной мишенью [41].

Спектрометр ANKE установлен на одной из прямых секций внутреннего пучка COSY и состоит из магнитной системы, внутренней мишени и несколь-

ких детекторных систем: боковых детекторов положительных и отрицательных частиц, переднего и вершинного детектора. Для регистрации процессов $pp \rightarrow \{pp\}_s X$ в данном эксперименте использовался передний детектор ANKE.

Магнитная система трёх дипольных магнитов D1, D2 и D3 — главная часть установки ANKE. Основная её задача состоит в отделении вылетающих из мишени частиц от циркулирующего пучка COSY, их идентификации и проведении импульсного анализа.

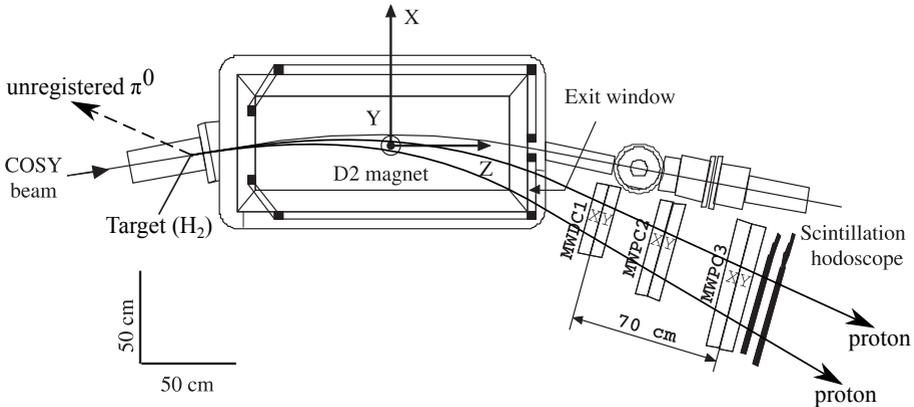


Рис. 2 — Схема регистрации процесса $pp \rightarrow pp\pi^0$ в переднем детекторе спектрометра ANKE, вид сверху.

На рис. 2 показаны части спектрометра ANKE, использовавшиеся для регистрации реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$: кластерная мишень, спектрометрический магнит D2 и передний детектор, который состоит из многопроволочной дрейфовой камеры (MWDC1), двух многопроволочных пропорциональных камер (MWPC 2–3) и годоскопа сцинтилляционных счётчиков (Scintillation hodoscope). Годоскоп состоит из двух плоскостей, включающих 8 и 9 счётчиков соответственно. Параметры переднего детектора приведены в статьях [42; 43]. При этом в 2006–2007 гг. была произведена замена системы камер; описание параметров новой системы доступно в [44]. Элементы детекторной системы собраны на подвижной платформе, перемещение которой при изменении угла α механически связано с перемещением платформы магнита D2.

Регистрация событий происходит, как показано на рис. 2: вторичные протоны, испущенные под малыми углами и с достаточно высокими импульсами, проходят через вакуумную камеру магнита D2 и вылетают через выходное окно (exit window), представляющее собой алюминиевую пластину толщиной 0.5 мм. Затем частицы попадают в передний детектор, где их регистрируют сцинтилляционные счётчики и пропорциональные камеры.

Триггерные сигналы формировались электроникой сцинтилляционных счётчиков. В рассматриваемых экспериментах использовались различные схемы

триггеров, предназначенных для предварительного отбора и записи однострековых и двухтрековых событий [45; 46].

В **третьей главе** описываются процедуры измерений и обработки данных.

Данные были набраны в нескольких сеансах, проводившихся с 2003 по 2013 г. В экспериментах использовался протонный пучок и водородная кластерно-струйная мишень [41]. В зависимости от сеанса пучок мог быть как неполяризованным, так и поляризованным, с поляризацией, чередующейся между состояниями «спин вверх» и «спин вниз» (перпендикулярно плоскости ускорителя). Единственным детектором, использовавшимся в экспериментах, был передний детектор FD.

Для поиска трека использовался алгоритм, разработанный С. Дымовым и подробно описанный в [47]. Трёхимпульсы и траектории частиц восстанавливались одношаговым методом интегрирования Рунге-Кутты 4-го порядка с использованием известной карты поля анализирующего магнита. При этом делалось предположение о точности источника, расположенного в центре объема взаимодействия мишени с пучком. Фитирование параметров трека для наилучшего соответствия отобранным кластерам осуществляется с помощью пакета минимизации квадратичных функционалов FUMILI [48; 49], реализованного на языке C++ и включающего ограничения в виде неравенств [50]. Система нахождения треков позволяла определять импульс с точностью $\sigma(p)/p \approx 1\%$ и полярный угол $\sigma(\theta) \approx 0.2^\circ$ для протонов с энергиями около 0.6 ГэВ/с.

Так как восстановленные импульсы весьма чувствительны к измеренным координатам составных частей установки, была разработана процедура подстройки геометрии путём минимизации отклонений для кинематических соотношений регистрируемых реакций (таких, как законы сохранения энергии-импульса или равенство квадрата недостающей массы известному значению).

Также для компенсации систематических ошибок, возникающих из-за неточностей координат, применялась техника кинематического фитирования при реконструкции событий, использующая метод минимизации со связями с использованием штрафующей функции [51].

Идентификация реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ начиналась с отбора протонных пар из всех зарегистрированных двухтрековых событий методом разности времён пролёта. Годоскоп сцинтилляционных счётчиков позволяет измерять разность времён пролёта Δt обеих частиц от точки взаимодействия до детектора с типичным разрешением менее 1 нс (RMS). Разность времен пролёта также можно рассчитать, используя измеренные импульсы и траектории частиц, если сделать предположения об их массах. В случае правильного предположения, оба значения Δt должны совпадать. Это позволило четко отделить pp -пары от $p\pi^+$ и $d\pi^+$ и однопроцентного фона случайных совпадений (см. рис. 3).

Разрешение RMS для энергии возбуждения дипротона E_{pp} составило 0.1–0.6 МэВ при малых E_{pp} , что позволило надёжно наложить ограничение на $E_{pp} < 3$ МэВ и, таким образом, отобрать протонные пары в конечном 1S_0 состоянии.

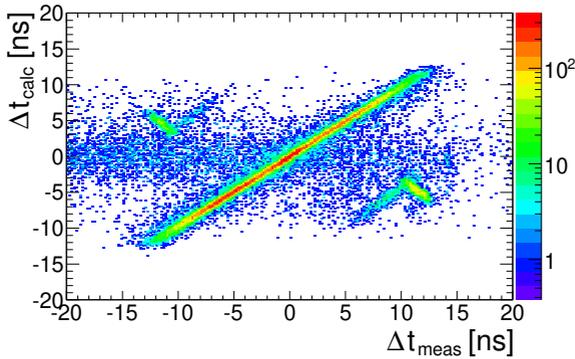


Рис. 3 — Двумерное распределение измеренной разности времён пролёта Δt_{meas} против рассчитанной Δt_{calc} для 700 МэВ. Видно, что протонные пары образуют диагональ, где разности времён равны. Пятна по краям соответствуют парам $d\pi^+$ и $p\pi^+$.

Информация об импульсах обоих конечных протонов позволяет поспособствовать полностью восстановить кинематику процесса $pp \rightarrow \{pp\}_s X$ для получения спектра недостающих масс M_X .

Спектр недостающих масс процесса $pp \rightarrow \{pp\}_s X$ (см. рис. 4) с RMS-разрешением для M_X в 6–40 МэВ/ c^2 (в зависимости от величины T_p) позволяет надёжно отделить пионный пик от двухпионного континуума и γ -пика низкой интенсивности. Угловой аксептанс установки обеспечивает регистрацию дипроTONов при углах вперёд (в СЦМ) от 0° до 20° – 120° при различных энергиях. Разрешение RMS для полярного угла протонной пары в СЦМ θ_{pp}^{cm} колебалось от 0.2° до 1° , в зависимости от T_p и θ_{pp}^{cm} .

Эффективный аксептанс для pp -пар в зависимости от их E_{pp} и θ_{pp}^{cm} определялся с помощью моделирования методом Монте-Карло, при этом учитывались геометрия установки, чувствительные области детекторов, эффективность работы пропорциональных камер и алгоритма реконструкции трека.

Для того, чтобы избежать возможных систематических неточностей, возникающих вблизи границ аксептанса, были наложены обрезания вблизи краёв выходного окна магнита спектрометра, одинаковые для экспериментальных данных и моделирования.

Число отобранных событий для реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ затем было скорректировано путём присвоения каждому событию весового коэффициента, зависящего от эффективного аксептанса, мертвого времени, и, для измерений с поляризованным пучком, относительной светимости L_\uparrow/L_\downarrow для противоположных поляризаций пучка.

Интегральная светимость была измерена при помощи упругого pp -рассеяния и реакции $pp \rightarrow d\pi^+$, которые регистрировались одновременно с изучаемой реакцией. Точность определения светимости при каждой энергии была оценена в 3–7% в зависимости от энергии. Она включает в себя неопределенность

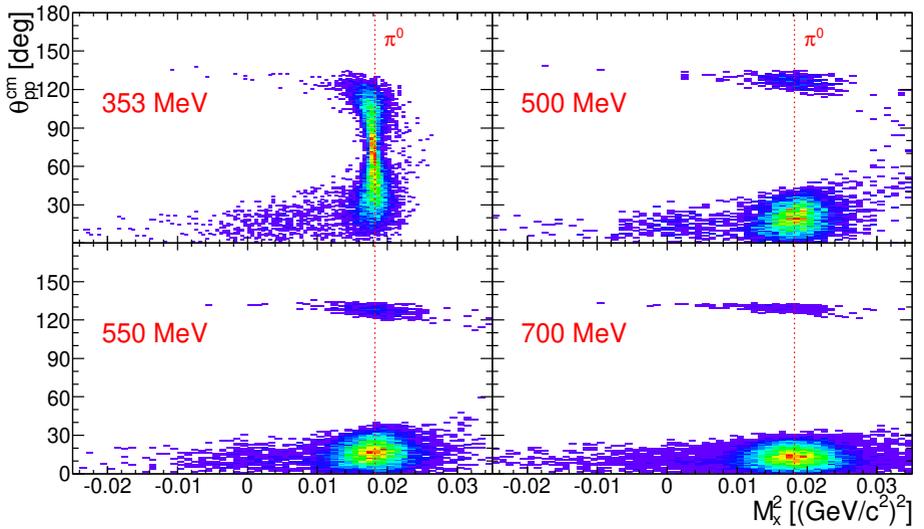


Рис. 4 — Двумерное распределение полярного угла 1S_0 дипротона в системе центра масс реакции θ_{pp}^{cm} относительно квадрата недостающей массы M_X^2 для событий $pp \rightarrow \{pp\}_s X$.

предсказаний SAID [52] для дифференциальных сечений, использованных для нормировки, и неточность определения эффективности регистрации.

При измерениях с поляризованным пучком анализирующая способность A_y была получена из поляризационной асимметрии

$$\epsilon = \frac{N_{\uparrow}/L_{\uparrow} - N_{\downarrow}/L_{\downarrow}}{N_{\uparrow}/L_{\uparrow} + N_{\downarrow}/L_{\downarrow}}, \quad (1)$$

где N_{\uparrow} и N_{\downarrow} — количество событий реакции со спином пучка вверх и вниз, с поправкой на мертвое время, а L_{\uparrow} и L_{\downarrow} — соответствующие светимости. Асимметрия ϵ связана с анализирующей способностью A_y как

$$A_y = \frac{\epsilon}{P \langle \cos \phi_{pp} \rangle}, \quad (2)$$

где P — поперечная поляризация пучка, а $\langle \cos \phi_{pp} \rangle$ — среднее по азимутальному угловому распределению дипротона. Так как акцептанс по $\cos \phi_{pp}$ сконцентрирован вблизи 1, все события в проанализированной области вносят полезный вклад в измерение A_y .

Для энергий в диапазоне 353–700 МэВ для определения поляризации пучка применялись асимметрии реакций $pp \rightarrow pp$ и $pp \rightarrow d\pi^+$, нормированные на решения SAID [52]. Результаты дали среднее значение, близкое к 0.68 ± 0.03 . Для энергии 800 МэВ использовался только $pp \rightarrow pp$ канал, и для нормализации были выбраны экспериментальные данные [53—55]. Этот анализ дал поляризацию 0.57 ± 0.01 .

В четвёртой главе рассматриваются результаты, полученные при анализе измерений дифференциального сечения и векторной анализирующей способности реакции $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ в околороговой области при 353 МэВ. Обе наблюдаемые можно описать в терминах s - и d -волнового рождения пиона и, используя информацию о фазах из упругого pp -рассеяния, получить однозначные решения для соответствующих амплитуд. Эта информация необходима для парциально-волнового разложения реакции-партнёра $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ и, как следствие, извлечения вклада p -волны.

Данные, анализ которых рассматривается в этой главе, были получены в сеансе апреля 2009 г. с поперечно поляризованным протонным пучком.

Неполяризованное сечение для рождения π^0 , и его произведение на анализирующую способность протона A_y , в предположении углового момента пиона $\ell < 4$, должны соответствовать выражениям [4]

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_0 &= \frac{k}{4p} \left(a_0 + a_2 \cos^2 \theta_\pi \right), \\ A_y \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_0 &= \frac{k}{4p} b_2 \sin \theta_\pi \cos \theta_\pi, \end{aligned} \quad (3)$$

где θ_π — угол вылета пиона в СЦМ относительно направления поляризованного протонного пучка. Здесь p — импульс исходного протона в СЦМ, а k — импульс конечного пиона.

Полученные дифференциальные сечения представлены на рис. 5, где они сравниваются с измерениями при 360 МэВ на установке CELSIUS [34]. С учётом десятипроцентной неопределённости светимости для этих данных, общее согласие является очень хорошим. Тем не менее, для данных CELSIUS в этой области энергий наблюдается небольшое отклонение в районе 90° . Это — особенность только их результатов при 360 МэВ, так как при других энергиях все линейные по $\cos^2 \theta_\pi$ фиты дают хорошие значения χ^2/NDF [34].

Результаты для анализирующей способности реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ приведены на рис. 6, где $A_y(d\sigma/d\Omega)$ показана на панели а) и A_y на панели б). Эти наблюдаемые должны быть антисимметричны относительно 90° , и переход результатов через нулевое значение в районе этого угла даёт определённое подтверждение нашей оценки L_\uparrow/L_\downarrow .

Наблюдаемые из уравнения (3) выражаются через амплитуды парциальных волн $^3P_0 \rightarrow ^1S_0 s$, $^3P_2 \rightarrow ^1S_0 d$ и $^3F_2 \rightarrow ^1S_0 d$, обозначенные соответственно M_s^P , M_d^P и M_d^F , как [4]

$$\begin{aligned} a_0 &= |M_s^P|^2 - \frac{2}{3} \text{Re} \left[M_s^P \left(M_d^P + \frac{3}{5} M_d^F \right)^* \right], \\ a_2 &= 2 \text{Re} \left[M_s^P \left(M_d^P + \frac{3}{5} M_d^F F \right)^* \right], \\ b_2 &= 2 \text{Im} \left[M_s^P \left(M_d^P - \frac{2}{5} M_d^F F F \right)^* \right], \end{aligned} \quad (4)$$

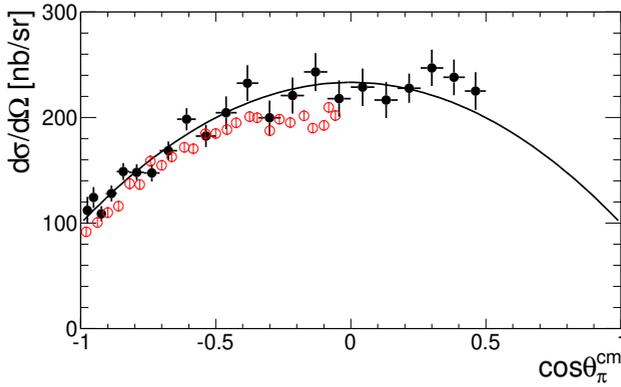


Рис. 5 — Дифференциальное сечение для реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ при 353 МэВ как функция косинуса полярного угла пиона в СЦМ. Заполненные чёрные кружки соответствуют результатам ANKE. Приведены статистические ошибки вместе с 4% систематическим вкладом неточности акцептанса в области $80^\circ < \theta_\pi < 100^\circ$. Общая систематическая неточность составляет около 4%.

Пустые красные кружки соответствуют данным CELSIUS, полученным при 360 МэВ [34]. Следует отметить, что данные CELSIUS являются усреднёнными по обоим полушариям. Кривая — фит данных линейной относительно $\cos^2 \theta_\pi$ функцией.

если пренебречь билинейными членами в d -волновых амплитудах.

Таким образом, данные обеспечивают только три соотношения между тремя комплексными амплитудами, которым соответствуют пять свободных параметров. Поэтому для однозначного парциально-волнового разложения нужна информация о фазах амплитуд. Фазы были зафиксированы путём использования теоремы Ватсона, которая приравнивает фазу взаимодействия в начальном состоянии к фазе упругого протон-протонного рассеяния [56; 57].

Парциально-волновой анализ путём фитирования угловых зависимостей сечения и анализирующей способности уравнениями (3)–(4) дал следующие результаты:

$$\begin{aligned}
 M_s^P &= (55.3 \pm 0.4) - (14.7 \pm 0.1)i \sqrt{\text{nb/sr}}, \\
 M_d^P &= -(26.6 \pm 1.1) - (8.6 \pm 0.4)i \sqrt{\text{nb/sr}}, \\
 M_d^F &= (5.3 \pm 2.3) \sqrt{\text{nb/sr}}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Важно отметить, что все ранее производившиеся расчёты для d -волновой амплитуды, как феноменологические [58], так и в рамках ChPT [59], дают гораздо меньшие значения, чем представлены в (5). Систематические исследования в рамках ChPT показывают, что эта величина очень чувствительна к потенциалу перехода $NN \rightarrow N\Delta$, который плохо определяется из данных упругого рассеяния. Таким образом, полученные нами результаты могут поставить жесткие ограничения на величину потенциала этого перехода.

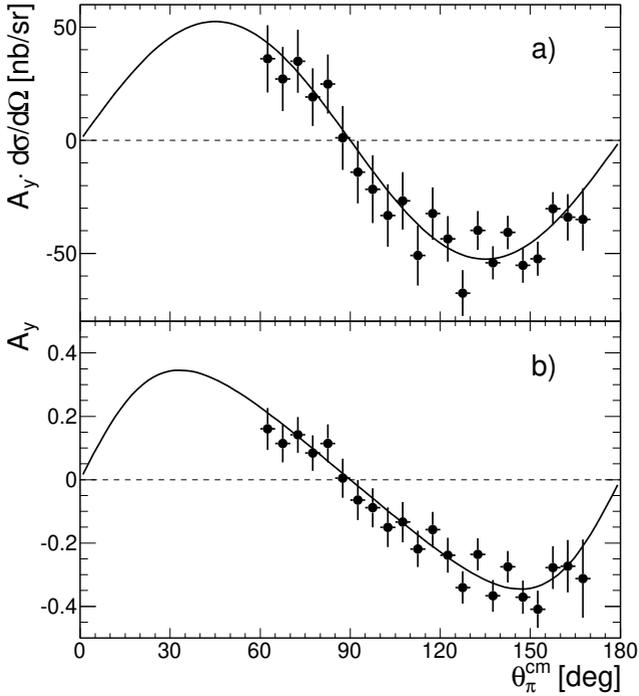


Рис. 6 — а) Произведение измеренных анализирующей способности и дифференциального сечения для реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$, с ошибками сечения такими же, как для рис. 5. Кривая представляет собой наилучший фит уравнением (3), с $b_2 = 1.82$ мкб/ср. б) Измеренные значения A_y для реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$. Приведённые ошибки — чисто статистические; общая систематическая ошибка составляет около 5%. Линия показывает частное наилучшего фита из панели а) и фита сечения из рис. 5.

Измерения дифференциального сечения и спиновых наблюдаемых при энергии пучка 353 МэВ были также проведены на ANKE для реакции $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ в тех же кинематических условиях, что описанные данные по $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ [44; 60—62]. Совместный анализ данных по $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ впервые позволил провести парциально-волновой анализ с учётом вклада пионных s -, p - и d -волн с точностью до дискретной неоднозначности [44]. Выделение из реакции $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ амплитуды перехода ${}^3S_1 \rightarrow {}^1S_0 p$, которая содержит низкоэнергетический параметр d киральной эффективной теории поля, связывающий рождение пионов с трёхнуклонным взаимодействием [63; 64], даёт необходимые основания для извлечения этого параметра из полученных данных.

Описанные в этой главе результаты исследования реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ являются первым шагом для решения этой задачи.

В **пятой главе** представлены результаты измерения дифференциального сечения и анализирующей способности реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ в области возбуждения $\Delta(1232)$ -изобары. Данные были набраны в ряде ускорительных сеансов, в части которых использовался неполяризованный, а в части — поляризованный протонный пучок. В сеансах с неполяризованным пучком были измерены угловые зависимости дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$, преимущественно при передних углах, от 0° до 24° – 120° , при различных энергиях. В сеансах с поляризованным пучком в дополнение к сечениям были также измерены угловые зависимости векторной анализирующей способности A_y .

В предположении, что угловой момент пиона $\ell < 4$, полученные зависимости можно описать формулами [5]

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left(1 + \kappa \sin^2 \theta_{pp}^{\text{cm}} \right), \\ A_y &= \frac{A_y^{\text{max}} \sqrt{1 + \kappa \sin^2 2\theta_{pp}^{\text{cm}}}}{1 + \kappa \sin^2 \theta_{pp}^{\text{cm}}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $d\sigma_0/d\Omega$ означает $d\sigma/d\Omega$ при нулевом угле, $\kappa = a_2/a_0$ — параметр наклона, а A_y^{max} — максимальное значение A_y , достигаемое при $\sin^2 \theta_{pp}^{\text{cm}} = 1/(2 + \kappa)$. Энергетические зависимости этих параметров, полученные из фита экспериментальных данных формулами (6), приведены на рис. 7.

Следует обратить внимание на следующие особенности полученных сечений и анализирующих способностей.

Угловая зависимость дифференциального сечения имеет минимум при нулевом угле. Это совпадает с результатами WASA [34] при низких энергиях, где минимум объяснялся как результат интерференции пионных волн s и d . Характерная особенность наших данных — существование этого минимума при всех рассматриваемых энергиях. Параметр углового наклона медленно изменяется от околороговой области до 800 МэВ. Другая примечательная особенность данных — значительная анализирующая способность, достигающая значения 0.8 при энергиях 500 и 550 МэВ.

Сечение $d\sigma_0/d\Omega$ показывает выраженный пик в районе 660 МэВ. Основная часть пика была профитирована простейшей формой Брейта-Вигнера с поправкой на фазовый объём. Среднее значение соответствующей массы резонанса, $E_P = 2181 \pm 2$ МэВ, близка к сумме масс нуклона и $\Delta(1232)$ бариона — 2170 МэВ. Ширина резонанса, $\Gamma_P = 101 \pm 7$ МэВ, близка к ширине свободной $\Delta(1232)$, 117 ± 3 МэВ [65]. Это наводит на мысль о возможном резонансе в системе $N\Delta(1232)$, который можно назвать двухбарионным резонансом.

Для изучения данного вопроса был проведён фазовый анализ реакции в предположении двух доминирующих переходов: ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0 s$ ($J^P = 0^-$) и ${}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0 d$ (2^-), с амплитудами M_s^P и M_d^P соответственно. Наблюдаемые можно выра-

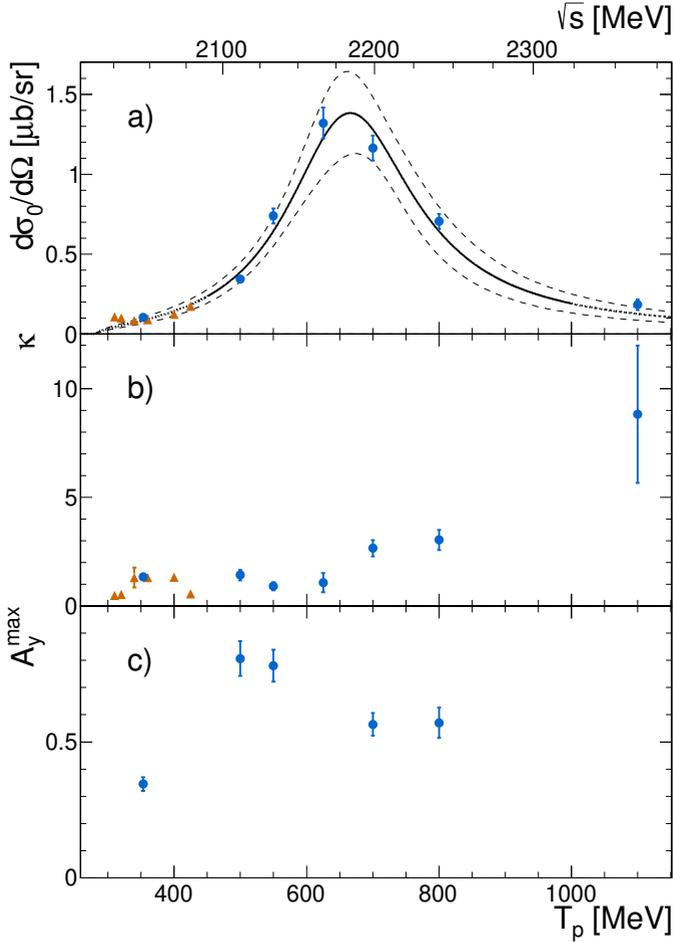


Рис. 7 — Энергетические зависимости параметров фита $d\sigma/d\Omega$ и A_y (сверху вниз): дифференциальное сечение вперёд $d\sigma_0/d\Omega$ (a), параметр наклона κ (b), максимум анализирующей способности A_y^{max} (c). \bullet — данные ANKE, \blacktriangle — данные WASA [34]. Ошибки включают статистические неточности и систематические неточности нормировок, использованных для определения светимости и поляризации. Кривая, аппроксимирующая $d\sigma_0/d\Omega$ — это фит функцией Брейта-Вигнера в диапазоне, где приведена сплошная линия. Коридор обозначает 68% доверительный интервал.

зять через амплитуды данных переходов как [5]

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{(\hbar c)^2}{64\pi^2 s} \frac{k}{p} \left[\left(|M_s^P|^2 + \frac{4}{3} |M_s^P| |M_d^P| \cos \phi + \frac{4}{9} |M_d^P|^2 \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(-2 |M_s^P| |M_d^P| \cos \phi - \frac{1}{3} |M_d^P|^2 \right) \sin^2 \theta_{pp}^{\text{cm}} \right], \quad (7) \\ A_y \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{(\hbar c)^2}{64\pi^2 s} \frac{k}{p} |M_s^P| |M_d^P| \sin \phi \sin 2\theta_{pp}^{\text{cm}}, \end{aligned}$$

где ϕ обозначает относительную фазу двух амплитуд, s — квадрат энергии системы в СЦМ, p — импульс налетающей частицы в СЦМ, и k — импульс конечного пиона.

Результаты фита экспериментальных данных уравнением (7) приведены на рис. 8. Видно, что обе амплитуды близки по величине и имеют резонансно-подобный характер. Амплитуда M_d^P соответствует известному резонансу ${}^3P_2 d(2^-)$ и, следовательно, её фаза должна быстро изменяться в резонансной области. Относительная фаза ϕ меняется довольно мало (121° – 148°) в области 450–800 МэВ, поэтому амплитуда ${}^3P_0 s(0^-)$ хорошо коррелирует с ${}^3P_2 d(2^-)$ и, следовательно, также должна иметь быстрое резонансно-подобное изменение фазы. Таким образом, амплитуду M_s^P можно считать резонансной на тех же основаниях, что и M_d^P . В результате, наблюдаемый пик в дифференциальном сечении реакции и минимум в угловых распределениях при нуле являются результатом когерентного вклада этих двух ведущих резонансных амплитуд. Энергетические зависимости амплитуд были описаны формулой Брейта-Вигнера, модифицированной, чтобы учесть близость к энергетическому порогу реакции, что дало для $|M_d^P|^2$ положение пика $E_R(2^-) = 2197 \pm 8$ МэВ и его ширину $\Gamma_R(2^-) = 130 \pm 21$ МэВ, а для $|M_s^P|^2 - E_R(0^-) = 2201 \pm 5$ МэВ и $\Gamma_R(0^-) = 91 \pm 12$ МэВ.

Полученные параметры резонанса ${}^3P_2 d$ практически совпадают с найденными в решении SAID S96 для реакции $pp \rightarrow d\pi^+$: $E_R(2^-)|_{d\pi^+} = 2192$ МэВ, $\Gamma_R(2^-)|_{d\pi^+} = 127$ МэВ. Следует отметить, что SAID использует для этого колоссальный объём данных различных экспериментов, но не даёт значения ошибок полученных величин.

Резонанс ${}^3P_0 s(0^-)$ ранее не наблюдался: соответствующий переход запрещен в реакции $pp \rightarrow d\pi^+$, а набор данных по $pp \rightarrow pp$, скорее всего, недостаточно чувствителен к этому резонансу из-за его небольшого брэнчинга в упругом канале. При этом масса 0^- резонанса равна массе 2^- резонанса с точностью 0.4%; ширина 0^- резонанса немного меньше ширины свободной $\Delta(1232)$ изобары, хотя совместима с ней в пределах ошибки; а разность фаз ϕ между волновыми амплитудами M_s^P и M_d^P при 1100 МэВ близка к 180° , что даёт основания ожидать нулевую анализирующую способность при этой энергии.

Процедура определения амплитуд была перепроверена с помощью альтернативного расчёта, «глобального фита», когда все экспериментальные данные по

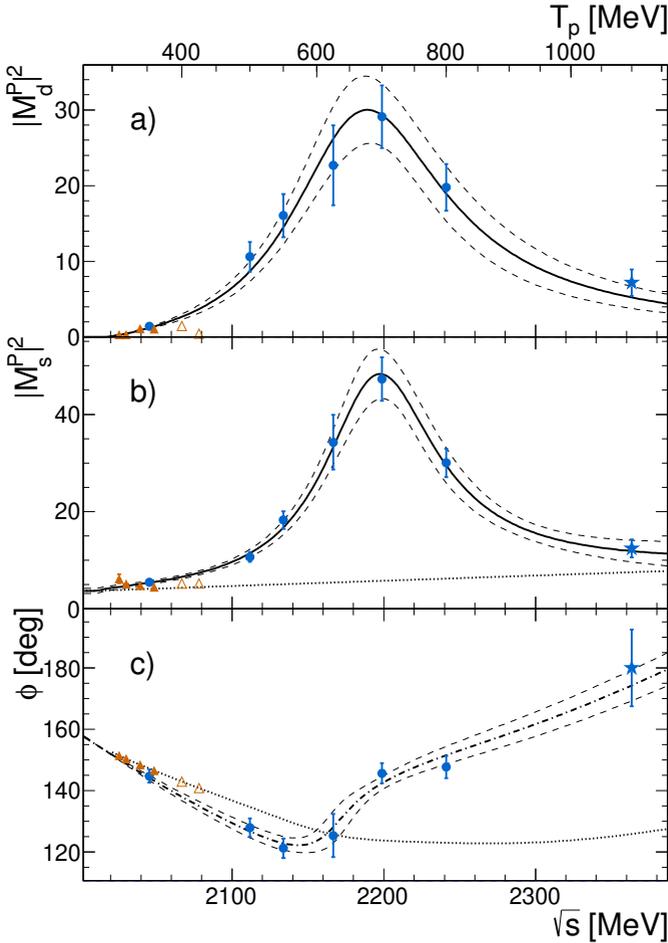


Рис. 8 — Энергетические зависимости квадратов амплитуд для переходов ${}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0d$ (a), ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0s$ (b) и их относительной фазы ϕ (c). Сплошными линиями показано описание значений $|M_d^P|^2$ (a) и $|M_s^P|^2$ модифицированными формами Брейта-Вигнера (b). Штриховая линия на (c) показывает описание значений ϕ эмпирической зависимостью. Диапазоны, обозначенные штриховой линией, показывают интервал 68% достоверности. Обозначения экспериментальных точек аналогичны рис. 7. Звёзды при энергии пучка $T_p = 1100$ МэВ соответствуют результатам фита с использованием сечения $d\sigma/d\Omega$ и экстраполяции $|M_d^P|^2$. Незаполненные треугольники исключены из фита по причинам, описанным в тексте. Источники ошибок те же, что на рис. 7. Пунктирная линия в (b) обозначает фон зависимости Брейта-Вигнера. Пунктирная линия в (c) показывает относительную фазу амплитуд 3P_0 и 3P_2 упругого $pp \rightarrow pp$ рассеяния.

анализирующей способности и дифференциальному сечению фитуруются одновременно. Итоги обоих анализов согласуются в пределах ошибок.

Энергетическое положение резонансов может быть качественно интерпретировано в предположении резонанса в P -волновом состоянии ΔN пары, что указывает на величину притягивающей силы в промежуточной P -волновой ΔN паре в 29 ± 9 МэВ/ c^2 для резонанса 0^- и 33 ± 11 МэВ/ c^2 для 2^- . Количественное описание полученных результатов требует соответствующих модельных расчетов с использованием адронных или QCD степеней свободы, а также взаимодействия обоих из них [66—68], чтобы получить лучшее представление о физической природе двухбарионных резонансных состояний.

В **шестой главе** рассматривается реакция $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ и получение для неё энергетической зависимости сечения в кинематике, близкой к коллинеарной: интервал угла протонной пары в СЦМ 0° – 20° (точки при энергиях 353, 500, 550, 625, 700 и 800 МэВ). Была получена также угловая зависимость сечения в том же интервале углов для энергий 353, 500, 550 и 700 МэВ. Рассматриваемые результаты получены при обработке данных: июля 2003 г. при энергии 800 МэВ, августа 2003 г. при энергии 625 МэВ, октября 2007 г. при энергиях 353, 500 и 550 МэВ и апреля 2009 г. при энергии 700 МэВ.

Для нахождения числа событий реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ распределения квадрата недостающей массы M_x^2 были профитированы суммой пиков, соответствующих рождению γ и π^0 , и линейного фона. Ширины пиков определяются точностью измерения трёхимпульса протонов в соответствующих экспериментальных сеансах, и, как правило, увеличиваются с ростом энергии пучка, что приводит при высоких энергиях к слиянию пиков γ и пиона. Основная трудность состоит в отборе небольшого количества γ -событий из общего распределения. Поэтому для разделения пиков $\{pp\}_s \pi^0$ и $\{pp\}_s \gamma$ требовалось как можно точнее найти форму соответствующих пиков.

Для того, чтобы как можно более надёжно определить формы пиков, для каждой энергии было проведено детальное моделирование методом Монте-Карло с учётом размытия, вызванное радиальным распределением пучка протонов в области мишени, многократного рассеяния на выходном окне вакуумной камеры и материалах детектора, фактической кластеризации сигналов в каналах электроники пропорциональных камер, сработавших в пропорциональных камерах, и угловой зависимости сечения реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$. Для исследования систематики были рассмотрены несколько методов фитирования экспериментальных распределений квадрата недостающей массы M_x^2 суммой пионного и гамма пиков, найденных моделированием. Результаты, полученные с помощью различных методов, были полностью совместимы.

Для изучения энергетической зависимости дифференциального сечения реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ от 353 до 800 МэВ сечение было усреднено по интервалу 0° – 20° угла вылета дипротона в СЦМ.

Для энергий 353, 500, 550 и 700 МэВ информация о зависимости дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции от полярного угла дипротона в СЦМ θ_{pp}^{cm}

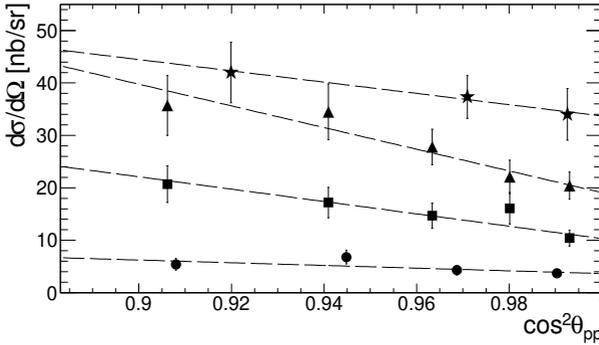


Рис. 9 — Угловая зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ для реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ при четырёх энергиях пучка [2; 3]. Кружками указаны значения для энергии пучка 353 МэВ, квадратами — для 500 МэВ, треугольниками — для 550 МэВ, звёздочками — для 700 МэВ. Приведённые ошибки соответствуют неточностям, вызванным статистикой и вычетом фона. Общие для всех точек ошибки нормировки, вызванные неточностями определения светимости, не приведены. Линии соответствуют линейному приближению уравнением (8) каждого из четырёх наборов данных.

была получена разбиением доступного углового акцептанса на несколько интервалов, результаты представлены на рис. 9. При всех энергиях данные показывают тенденцию к уменьшению сечения при малых углах, хотя для 700 МэВ она менее выражена, чем при более низких энергиях. Во всех случаях в измеренном ограниченном интервале углов дифференциальное сечение согласуется с линейной зависимостью от $x = \cos^2 \theta_{pp}^{\text{cm}}$.

Теоретические соображения [69] предполагают, что в рассматриваемом энергетическом диапазоне можно ограничиться тремя наименьшими мультиполями $E1$, $E2$ и $M2$. Более того, предсказывается [70], что величина $M2$ пренебрежимо мала при $E_\gamma \approx 0.25$ ГэВ, и невелика по сравнению с $E1$ и $E2$ в диапазоне 0.18 – 0.28 ГэВ. Поскольку переходы $E2$ и $E1$ не интерferируют, то, если ограничиться только этими двумя мультиполями, дифференциальное сечение имеет вид [2]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{pp}} = a[(1+x)\kappa + 10x(1-x)], \quad (8)$$

где $\kappa = \sigma(E1)/\sigma(E2)$ и $a = 3\sigma(E2)/16\pi$. Здесь $\sigma(EJ)$ — полное сечение реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ для мультиполя EJ . Фитирование данных этим уравнением (см. рис. 9) показывает, что мультиполи $E1$ и $E2$ имеют довольно близкую интенсивность — эта особенность была не очевидна из экспериментов с ${}^3\text{He}(\gamma, pp)n$ [71—73].

На рис. 10 показана зависимость измеренных значений усреднённого сечения $d\sigma/d\Omega_{(0-20)}$ от энергии протонного пучка. Она имеет широкий пик с максимумом около 650 МэВ и FWHM ~ 220 МэВ. Логично предположить, что это связано с возбуждением изобары $\Delta(1232)$. Хорошо известно, что этот резонанс

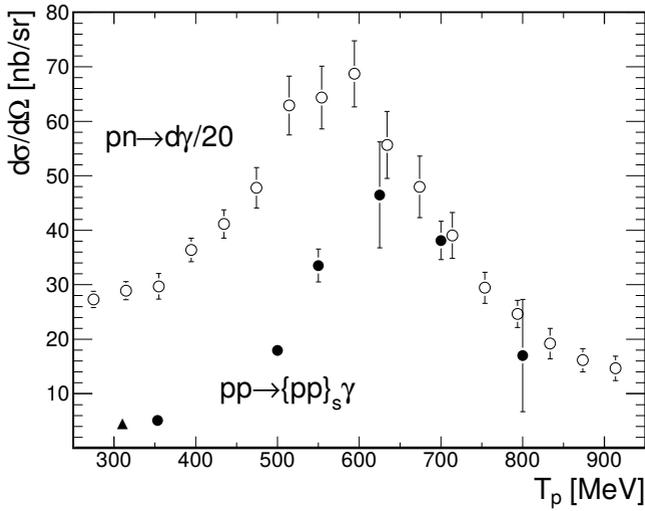


Рис. 10 — Энергетические зависимости дифференциального сечения реакций $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ и $pn \rightarrow d\gamma$. Чёрные кружки соответствуют данным ANKE-COSY для усреднённого дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega_{(0-20)}$ реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$, в то время как треугольник иллюстрирует результаты CELSIUS [74; 75] для тех же условий по E_{pp} и углам. Пустые окружности показывают значения дифференциального сечения реакции $pn \rightarrow d\gamma$ для угла дейтрона в СЦМ $\theta_d = 20^\circ$, измеренного относительно импульса протона, которые были получены из данных фоторасщепления дейтрона по работе [28] и отмасштабированы в двадцать раз.

играет ведущую роль для аналогичной реакции $pn \rightarrow d\gamma$, энергетическая зависимость которой для угла рождения дейтронов $\theta_d = 20^\circ$ относительно направления протонов также показана на этом рисунке в масштабе 1/20.

Важно отметить, что максимум сечения реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ наблюдается примерно на 80 МэВ выше, чем для $pn \rightarrow d\gamma$. Прямое возбуждение Δ -изобары доминирует в реакции $pn \rightarrow d\gamma$ в этом диапазоне энергий через переход $M1$ в промежуточное S -волновое состояние ΔN . Переход $M1$ запрещён для дипротонного случая [76], но сечение может быть обусловлено P -волновой конфигурацией ΔN , которая требует дополнительной энергии, чтобы преодолеть центробежный барьер. В дополнение к смещению положения пика $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ в сторону более высоких энергий, он заметно сужен по сравнению с $pn \rightarrow d\gamma$.

Важно отметить, что полное сечение поглощения фотона двумя связанными протонами в реакции ${}^3\text{He}(\gamma, pp)n$ [71] неуклонно падает по мере увеличения E_γ от 0.2 до 0.5 ГэВ, в качественном согласии с аргументами в пользу подавления Δ -изобары. Приводимые здесь результаты находятся в явном несогласии с этими выводами.

Пик энергетической зависимости дифференциального сечения реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$, обусловленный промежуточным состоянием ΔN , был получен в

работе [77] в рамках упрощённой модели однопионного обмена. Однако, в расчётах не учитывалась калибровочная инвариантность и вклады других промежуточных состояний.

В случае исследования реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ при энергиях, значительно превышающих область возбуждения $\Delta(1232)$, станет возможным провести сравнение с данными ${}^3\text{He}(\gamma, pp)n$ [72]. Начало пространственного скейлинга, наблюдаемое при больших поперечных импульсах в $\gamma d \rightarrow pn$ для $E_\gamma > 1$ ГэВ [78] и предполагаемое для ${}^3\text{He}(\gamma, pp)n$ [79], также может быть изучено в реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем.

Впервые в полном угловом интервале на протонном пучке с энергией $T_p = 353$ МэВ выполнено измерение анализирующей способности A_y реакции пионного рождения с образованием 1S_0 дипротона $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ с энергией возбуждения дипротона $E_{pp} < 3$ МэВ. В описанных условиях также выполнено измерение дифференциального сечения процесса $d\sigma/d\Omega$. Обзор более ранних работ в этой области показывает хорошую согласованность с полученными результатами. Значительный вклад перехода ${}^3P_2 d$ в динамику данного канала впервые показан напрямую путём парциально-волнового анализа анализирующей способности и сечения реакции. Результаты, полученные в ходе исследования, дают необходимый вклад в проведение совместного парциально-волнового анализа реакций $pn \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ и $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ при энергии 353 МэВ. Его результаты служат экспериментальной базой для планируемого определения низкоэнергетического параметра d контактного $(NN)2\pi$ взаимодействия в киральной эффективной теории поля.

Для процесса $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ впервые под малыми полярными углами в области возбуждения $\Delta(1232)$ -резонанса измерена анализирующая способность A_y , а также энергетические и угловые зависимости дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$. Выявлены нетривиальные особенности исследуемой реакции: достижение минимального значения дифференциальным сечением при угле, равном нулю; выраженное пиковое значение энергии сечения, соответствующее возбуждению $\Delta(1232)$ -резонанса; а также существенные (до ≈ 0.8 в максимуме) значения анализирующей способности. Полученные данные использованы для парциально-волнового анализа реакции. В результате уточнены параметры дибарионного резонансного состояния ${}^3P_2 d$. Различие спин-изоспиновыми состояний дейтрона и дипротона позволяет изучать новые переходы. Был обнаружен резонанс в переходе ${}^3P_0 s$ и определена его масса и ширина. Описанные выше особенности сечений и A_y объяснены интерференцией переходов ${}^3P_2 d$ и ${}^3P_0 s$.

Впервые зарегистрирован процесс излучения жёсткого гамма-кванта с образованием 1S_0 дипротона, $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$, при энергиях выше порога мезообразования. Для этой реакции измерена энергетическая зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ под малыми полярными углами при энергиях пучка в диапазоне 353–800 МэВ. Обратный во времени процесс $\gamma + \{pp\}_s \rightarrow pp$ изучал-

ся ранее в реакции фоторасщепления S -волнового дипротона, связанного в ядре, ${}^3\text{He}(\gamma, pp)n$, где исследование значительно затруднено высоким фоном от реакций pn - и многонуклонного фотопоглощения. Изучаемый в диссертации процесс $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$ свободен от такого фона. Это позволило наблюдать в энергетической зависимости дифференциального сечения реакции вперёд широкий пик, достигающий максимума около 650 МэВ. Этот пик можно связать с вкладом промежуточного состояния $\Delta(1232)N$. Эксперименты с реакцией $\gamma^3\text{He} \rightarrow pp + n_{\text{спект}}$ в той же области энергий показывали лишь монотонное падение сечения с энергией. Таким образом, впервые показано, что при фоторасщеплении S -волнового дипротона возбуждение $\Delta(1232)$ -изобары даёт основной вклад в сечение процесса при энергиях от 350 до 800 МэВ. Измеренная угловая зависимость сечений позволила в предположении малости мультиполя $M2$ оценить относительную интенсивность мультиполей $E1$ и $E2$.

В целом полученные результаты представляют определённый вклад в информацию о динамике короткодействующих протон-протонных взаимодействий.

Публикации автора по теме диссертации

1. Energy dependence of forward 1S_0 diproton production in the $pp \rightarrow pp\pi^0$ reaction / V. Kurbatov, ..., D. Tsirkov, [et al.] // Phys. Lett. B. — 2008. — Vol. 661, issue 1. — P. 22–27.
2. Observation of inverse diproton photodisintegration at intermediate energies / V. Komarov, ..., D. Tsirkov, [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Vol. 101, issue 10. — P. 102501.
3. Energy dependence of hard bremsstrahlung production in proton–proton collisions in the $\Delta(1232)$ region / D. Tsirkov [et al.] // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. — 2010. — Vol. 37, issue 10. — P. 105005.
4. Differential cross section and analysing power of the $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at 353 MeV / D. Tsirkov [et al.] // Phys. Lett. B. — 2012. — Vol. 712, issue 4/5. — P. 370–374.
5. Evidence for excitation of two resonance states in the isovector two-baryon system with a mass of 2.2 GeV/ c^2 / V. Komarov, D. Tsirkov, [et al.] // Phys. Rev. C. — 2016. — Vol. 93, issue 6. — P. 065206.
6. *Tsirkov D., ANKE collaboration.* Measurement of the vector analyzing power of the $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ reaction at intermediate energies at ANKE/COSY // Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — Vol. 295, no. 1. — P. 012079. — Proceedings of the 19th International Spin Physics Symposium (SPIN2010).

7. *Tsirkov D., ANKE collaboration.* Differential cross section and vector analysing power of the $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ reaction at 353–700 MeV // *Physics of Particles and Nuclei.* — 2014. — Vol. 45, no. 1. — P. 123–125. — Proceedings of the 20th International Spin Physics Symposium (SPIN2012).
8. Energy dependence of the cross section for $pp \rightarrow \{pp\}_s\gamma$ at intermediate energies at ANKE / D. Tsirkov [et al.] // IKP FZ-Jülich annual report 2008. — Jülich, 2008. — URL: http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/annual/annual_reports/08/D_Cyrkov.pdf.
9. Energy dependence of the $pp \rightarrow \{pp\}_s\gamma$ reaction cross section in the $\Delta(1232)$ -isobar range / D. Tsirkov [et al.] // IKP FZ-Jülich annual report 2009. — Jülich, 2009. — URL: http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/annual/annual_reports/09/D.Tsyrkov.pdf.
10. Vector analyzing power of the $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ reaction at intermediate energies at ANKE/COSY / D. Tsirkov [et al.] // IKP FZ-Jülich annual report 2010. — Jülich, 2010. — URL: http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/annual/annual_reports/10/D.Cyrkov.pdf.
11. Forward cross section energy dependence of the $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ reaction at COSY energies / D. Tsirkov [et al.] // IKP FZ-Jülich annual report 2011. — Jülich, 2011. — URL: http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/annual/annual_reports/11/CyrkovAnnRep12.pdf.
12. *Tsirkov D., Dymov S., Komarov V.* Cross section angular dependences of the $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ reaction at several energies in the $\Delta(1232)$ excitation region // IKP FZ-Jülich annual report 2013. — Jülich, 2013. — URL: http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/annual/annual_reports/13/CyrkovAnnRep13_new.pdf.
13. Evidence for excitation of two resonance states in the isovector two-baryon system with a mass of 2.2 GeV/c² / D. Tsirkov [et al.] // IKP FZ-Jülich annual report 2015. — Jülich, 2015. — URL: http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/annual/annual_reports/15/CyrkovAnnRep16.pdf.

Список литературы

14. *Эрикссон Т., Байзе В.* Пионы и ядра. — М.: Наука, 1991.
15. *Machleidt R., Holinde K., Elster C.* The Bonn meson-exchange model for the nucleon-nucleon interaction // *Phys. Rep.* — 1987. — Vol. 149, no. 1. — P. 1–89.
16. *Bakker B. L. G., Narodetskii I. M.* Multiquark systems in hadronic physics // *Adv. Nucl. Phys.* Vol. 21. — Springer, 1994. — P. 1–84.

17. *Mau R. V.* Quarks in the NN interaction // *Prog. Part. Nucl. Phys.* — 2003. — Vol. 50, no. 2. — P. 561–571.
18. *Кужулин В. И., Шихалев М. А.* Теоретико-полевой подход к дибарионной модели ядерных сил // *Ядерная физика.* — 2004. — Т. 67, № 8. — С. 1558—1580.
19. *Epelbaum E., Hammer H. W., Meißner U. G.* Modern theory of nuclear forces // *Rev. Mod. Phys.* — 2009. — Vol. 81, no. 4. — P. 1773–1825.
20. Quark-model study of few-baryon systems / A. Valcarce [et al.] // *Rep. Prog. Phys.* — 2005. — Vol. 68, no. 5. — P. 965–1041.
21. *Weinberg S.* Effective chiral Lagrangians for nucleon-pion interactions and nuclear forces // *Nucl. Phys. B.* — 1991. — Vol. 363, no. 1. — P. 3–18.
22. *Holstein B. R.* Effective interactions are effective interactions // *Prog. Part. Nucl. Phys.* — 2003. — Vol. 50, no. 2. — P. 203–215.
23. *Scherer S.* Recent developments in effective field theory // *Prog. Part. Nucl. Phys.* — 2008. — Vol. 61, no. 1. — P. 19–26.
24. *Richards D. G., Sinclair D. K., Sivers D.* Lattice QCD simulation of meson exchange forces // *Phys. Rev. D.* — 1990. — Vol. 42, no. 9. — P. 3191–3196.
25. *Ishii N., Aoki S., Hatsuda T.* Nuclear force from lattice QCD // *Phys. Rev. Lett.* — 2007. — Vol. 99, no. 2. — P. 022001.
26. *Platonova M. N., Kukuljin V. I.* Hidden dibaryons in one- and two-pion production in NN collisions // *Nucl. Phys. A.* — 2016. — Vol. 946. — P. 117–157.
27. *Zachariasen F.* Photodisintegration of the deuteron // *Phys. Rev.* — 1956. — Vol. 101, no. 1. — P. 371–376.
28. Two-body photodisintegration of the deuteron from 100 to 800 MeV / R. Crawford [et al.] // *Nucl. Phys. A.* — 1996. — Vol. 603, no. 3. — P. 303–325.
29. *Schmitt K.-M., Wilhelm P., Arenhövel H.* Deuteron photodisintegration at low energies // *Few-Body Systems.* — 1991. — Vol. 10, no. 3. — P. 105–133.
30. *Wilhelm P., Arenhövel H.* Photodisintegration of the deuteron in the Δ -resonance region // *Phys. Lett. B.* — 1993. — Vol. 318, no. 3. — P. 410–414.
31. *Uzikov Yu. N.* Phenomenology of spin observables in the reactions of meson production with the 1S_0 diproton $pN \rightarrow \{pp\}_s X$ // *Physics of Atomic Nuclei.* — 2014. — Vol. 77, no. 5. — P. 646–650.
32. Reaction ($d_{\text{pol}}, ^2\text{He}$) at intermediate energies / C. Ellegaard [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 1987. — Vol. 59, issue 9. — P. 974–977.
33. Cross section and deuteron analysing powers of the $^1\text{H}(d, 2p)n$ reaction at 200 and 350 MeV / S. Kox [et al.] // *Nucl. Phys. A.* — 1993. — Vol. 556, no. 4. — P. 621–640.

34. Cross sections of the $pp \rightarrow pp\pi^0$ reaction between 310 and 425 MeV / R. Bilger [et al.] // Nucl. Phys. A. — 2001. — Vol. 693, no. 3. — P. 633–662.
35. ANKE, a new facility for medium energy hadron physics at COSY-Jülich / S. Barsov [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. — 2001. — Vol. 462, issue 3. — P. 364–381.
36. Maier R. Cooler synchrotron COSY — Performance and perspectives // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. — 1997. — Vol. 390, issue 1. — P. 1–8.
37. Yashchenko S. Deuteron Breakup $\vec{p}d \rightarrow (pp)n$ with a Fast Forward Diproton Studied at ANKE-COSY : PhD thesis / Yashchenko Sergey. — Der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Friedrich–Alexander–Universität Erlangen–Nürnberg, 2004. — 103 P.
38. Measurement of the cross section and analysing power of the $\vec{p}p \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ reaction, COSY proposal #158 / A. Kulikov [et al.]. — 2006. — URL: <http://collaborations.fz-juelich.de/ikp/anke/proposals.shtml>.
39. p -wave pion production from nucleon-nucleon collisions / V. Baru [et al.] // Phys. Rev. C. — 2009. — Vol. 80, no. 4. — P. 044003.
40. Production of the 1S_0 diproton in the $pp \rightarrow pp\pi^0$ reaction at 0.8 GeV / S. Dymov [et al.] // Phys. Lett. B. — 2006. — Vol. 635, issue 5/6. — P. 270–274.
41. Systematic studies on hydrogen cluster beam production / A. Khoukaz [et al.] // Eur. Phys. J. D. — 1999. — Vol. 5, issue 2. — P. 275–281.
42. The Forward Detector of the ANKE Spectrometer. Scintillation and Cherenkov Hodoscopes / B. Chiladze [et al.] // Part. Nucl. Lett. — 2002. — No. 4. — P. 95–100.
43. The Forward Detector of the ANKE Spectrometer. Tracking System and Its Use in Data Analysis / S. Dymov [et al.] // Part. Nucl. Lett. — 2004. — No. 2. — P. 40–53.
44. Шмакова В. В. Изучение процесса $pn \rightarrow \{pp\}_s\pi^-$ вблизи порога с образованием 1S_0 протонных пар в поляризованном эксперименте на установке ANKE-COSY : дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.04.16 / Шмакова Вера Васильевна. — Дубна : Объединённый институт ядерных исследований, 2017. — 125 с.
45. Trigger electronics for the forward and backward hodoscopes of ANKE: Communication of JINR / S. N. Dymov [et al.] ; JINR. — Dubna, 2002. — 18 P. — E10–2002–19.
46. Куликов А. В. Методы построения и реализации систем отбора событий по характерным параметрам пар частиц в конечном состоянии в экспериментах в ГэВ-ной области энергий : дисс. д-ра физ.-мат. наук: 01.04.01 / Куликов Анатолий Владимирович. — Дубна : Объединённый институт ядерных исследований, 2007. — 164 с.

47. *Дымов С. Н.* Исследование развала дейтрона протонами 0.6 – 1.9 ГэВ с испусканием вперёд протонной пары : дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.04.16 / Дымов Сергей Николаевич. — Дубна : Объединённый институт ядерных исследований, 2007. — 124 с.
48. *Соколов С. Н., Силин И. Н.* Нахождение минимумов функционалов методом линеаризации: Препринт ОИЯИ / ОИЯИ. — Дубна, 1961. — 19 с. — Д-810.
49. *Silin I. N.* FUMILI / CERN. — CERN Program Library D510. — 1983.
50. Constrained minimization in the C++ environment / S. N. Dymov [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. — 2000. — Vol. 440, no. 2. — P. 431–437.
51. *Мороз В. И.* Сведение минимизации квадратичного функционала с условиями связи к минимизации функционала с дополнительным квадратичным членом: Сообщение ОИЯИ / ОИЯИ. — Дубна, 1965. — 10 с. — P-1958.
52. SAID partial wave analysis framework. — URL: <http://gwdac.phys.gwu.edu> (visited on 11/18/2016).
53. Polarization analyzing power $A(\theta)$ in pp elastic scattering at 796 MeV / M. W. McNaughton [et al.] // Phys. Rev. C. — 1981. — Vol. 23, issue 3. — P. 1128–1133.
54. Elastic $p-p$ scattering at 796 MeV in the Coulomb-nuclear interference region / F. Irom [et al.] // Phys. Rev. C. — 1982. — Vol. 25, issue 1. — P. 373–386.
55. Differential cross sections and analyzing powers for pp elastic scattering at 1.46 GeV/ c in the Coulomb-nuclear interference region / G. Pauletta [et al.] // Phys. Rev. C. — 1983. — Vol. 27, issue 1. — P. 282–295.
56. *Watson K. M.* The Effect of Final State Interactions on Reaction Cross Sections // Phys. Rev. — 1952. — Vol. 88, issue 5. — P. 1163–1171.
57. *Migdal A. B.* The theory of nuclear reactions with production of slow particles // Sov. Phys. JETP. — 1955. — Vol. 1, issue 1. — P. 2–6.
58. *Deepak P. N., Haidenbauer J., Hanhart C.* Partial-wave analysis of $\bar{p}\bar{p} \rightarrow pp\pi^0$ data // Phys. Rev. C. — 2005. — Vol. 72, issue 2. — P. 024004.
59. Pion production in nucleon-nucleon collisions in chiral effective field theory: Next-to-next-to-leading order contributions / A. A. Filin [et al.] // Phys. Rev. C. — 2012. — Vol. 85, issue 5. — P. 054001.
60. Differential cross section and analysing power of the quasi-free $pn \rightarrow \{pp\}_s\pi^-$ reaction at 353 MeV / S. Dymov [et al.] // Phys. Lett. B. — 2012. — Vol. 712, no. 4. — P. 375–380.
61. Measurement of spin observables in the quasifree $np \rightarrow \{pp\}_s\pi^-$ reaction at 353 MeV / S. Dymov [et al.] // Phys. Rev. C. — 2013. — Vol. 88, issue 1. — P. 014001.

62. *Shmakova V., ANKE collaboration.* Measurement of the spin-correlation coefficients $A_{x,x}$ and $A_{y,y}$ in the quasi-free $np \rightarrow \{pp\}_s \pi^-$ reaction near threshold at ANKE-COSY // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2014. — Vol. 45, no. 1. — P. 117–119. — Proceedings of the 20th International Spin Physics Symposium (SPIN2012).
63. *Hanhart C., van Kolck U., Miller G. A.* Chiral Three-Nucleon Forces from p -wave Pion Production // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — Vol. 85, issue 14. — P. 2905–2908.
64. Three-nucleon forces from chiral effective field theory / E. Epelbaum [et al.] // *Phys. Rev. C*. — 2002. — Vol. 66, issue 6. — P. 064001.
65. *Olive K. A., Particle Data Group.* Review of Particle Physics // *Chin. Phys. C*. — 2014. — Vol. 38, no. 9. — P. 090001.
66. *Platonova M. N., Kukulin V. I.* ABC effect as a signal of chiral symmetry restoration in hadronic collisions // *Phys. Rev. C*. — 2013. — Vol. 87, issue 2. — P. 025202.
67. *Gal A., Garcilazo H.* Three-body model calculations of $N\Delta$ and $\Delta\Delta$ dibaryon resonances // *Nucl. Phys. A*. — 2014. — Vol. 928. — P. 73–88.
68. *Platonova M. N., Kukulin V. I.* Hidden dibaryons in one- and two-pion production in NN collisions. — 2014. — eprint: [arXiv:1412.4574](https://arxiv.org/abs/1412.4574).
69. *Wilhelm P., Niskanen J., Arenhövel H.* Signatures from polarization observables for photon absorption on a 1S_0 proton pair // *Nucl. Phys. A*. — 1996. — Vol. 597, no. 4. — P. 613–622.
70. *Wilhelm P., Niskanen J. A., Arenhövel H.* Photon absorption on a proton-proton pair in ^3He // *Phys. Rev. C*. — 1995. — Vol. 51, issue 5. — P. 2841–2843.
71. Total Cross Section for Photon Absorption by Two Protons in ^3He / T. Emura [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 1994. — Vol. 73, issue 3. — P. 404–407.
72. Complete measurement of three-body photodisintegration of ^3He for photon energies between 0.35 and 1.55 GeV / S. Niccolai [et al.] // *Phys. Rev. C*. — 2004. — Vol. 70, issue 6. — P. 064003.
73. The reaction $^3\text{He}(\gamma, pp)n$ at low neutron recoil momentum / G. Audit [et al.] // *Phys. Lett. B*. — 1993. — Vol. 312, no. 1. — P. 57–61.
74. *Johansson A., Wilkin C.* Hard bremsstrahlung in the $pp \rightarrow ppy$ reaction // *Phys. Lett. B*. — 2009. — Vol. 673, no. 1. — P. 5–8.
75. *Johansson A., Wilkin C.* Erratum to “Hard bremsstrahlung in the $pp \rightarrow ppy$ reaction” [*Phys. Lett. B* 673 (2009) 5] // *Phys. Lett. B*. — 2009. — Vol. 680, no. 1. — P. 111.
76. *Laget J.-M.* Nucleons in nuclei (II) // *Nucl. Phys. A*. — 1989. — Vol. 497. — P. 391–411.

77. *Uzikov Yu. N.* Dynamics of 1S_0 diproton formation in the reactions $pp \rightarrow (pp)_s + \pi^0$ and $pp \rightarrow (pp)_s + \gamma$ in the GeV region // Proc. XIX Int. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems. Vol. 2 (2008) / ed. by A. Sissakian [et al.]. — JINR, Dubna, Russia, 2009. — P. 307. — eprint: [arXiv:0812.4661](https://arxiv.org/abs/0812.4661) [nucl-th].
78. Onset of Asymptotic Scaling in Deuteron Photodisintegration / P. Rossi [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2005. — Vol. 94, issue 1. — P. 012301.
79. Hard photodisintegration of a proton pair in ^3He / S. Brodsky [et al.] // Phys. Lett. B. — 2004. — Vol. 578, no. 1/2. — P. 69–77.

Цирков Дмитрий Алексеевич

Реакции $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ и $pp \rightarrow \{pp\}_s \gamma$
с образованием 1S_0 дипротона
при промежуточных энергиях 0.35–0.8 ГэВ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____