

На правах рукописи

Платонова Мария Николаевна

**Проявление ненуклонных степеней свободы
в NN - и Nd -рассеянии
при промежуточных энергиях**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ)

Научный руководитель:

Кукулин Владимир Иосифович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИЯФ МГУ, г. Москва

Официальные оппоненты:

Фильков Лев Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук (ФИАН), г. Москва

Крутенкова Анна Петровна, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Государственного научного центра РФ – Института теоретической и экспериментальной физики (ГНЦ РФ ИТЭФ), г. Москва

Ведущая организация:

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна

Защита состоится «_____» _____ 2015 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.77 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-й корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: Москва, Ломоносовский проспект, д. 27 и на сайте <http://www.sinp.msu.ru/ru/dissertations/21008>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.77,
доктор физ.-мат. наук, профессор

С.И. Страхова

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Построение теории ядерных сил и адронных процессов на основе фундаментальной теории сильных взаимодействий — квантовой хромодинамики (КХД) — является одной из важнейших задач современной теоретической физики. В последние десятилетия значительный прогресс в этой области был достигнут в основном благодаря развитию техники расчетов КХД на решетке. В частности, были получены реалистические предсказания для ряда наблюдаемых величин в адронной физике, а также воспроизведены некоторые черты нуклон-нуклонного взаимодействия. Тем не менее, реализация расчетов на решетке является чрезвычайно трудоемкой и сталкивается с различными трудностями, как технического, так и фундаментального характера. В настоящее время данная техника не позволяет производить реалистические расчеты адронных и ядерных процессов, требующиеся для описания многочисленных экспериментальных данных. В связи с этим остается необходимость в построении эффективных КХД-мотивированных моделей адронного взаимодействия и ядерных сил.

Весьма перспективной областью для тестирования моделей ядерных сил, основанных на КХД, представляются процессы рассеяния в малонуклонных системах, прежде всего, при больших переданных импульсах, т.е. в области малых межнуклонных расстояний. Следует подчеркнуть, что многочисленные экспериментальные данные последних лет по рассеянию в малонуклонных системах выявили ряд значительных эффектов, которые не объясняются традиционными теоретическими подходами, учитывающими лишь нуклонные степени свободы, а также их усовершенствованными версиями, включающими пионы и Δ -изобары. В качестве яркого примера здесь можно привести рассеяние нуклонов на ядрах дейтерия (Nd -рассеяние) при промежуточных энергиях $0.2 < T_N < 2$ ГэВ. В то время как рассеяние под малыми углами хорошо описывается стандартными подходами, основанными на решении точных трехчастичных уравнений Фаддеева с учетом реалистического нуклон-нуклонного (NN) взаимодействия, в рассеянии под большими углами наблюдаются существенные расхождения между теоретическими расчетами и экспериментальными данными. Эти расхождения увеличиваются с ростом энергии соударения, т.е. по мере продвижения в область все более коротких межнук-

лонных расстояний, что указывает на проявление кварковой структуры нуклонов в этой области. В таком случае возникает вопрос о методах описания NN -взаимодействия на коротких расстояниях с учетом кварковой структуры нуклонов. Ясно, что явный учет кварковых и глюонных степеней свободы при описании адронных процессов в области промежуточных энергий является чрезвычайно сложной задачей. С другой стороны, на расстояниях $r_{NN} \lesssim 1$ Фм, где кварковые остовы двух нуклонов перекрываются друг с другом, становится возможным образование единого шестикваркового ($6q$) мешка, свойства которого тесно связаны с природой короткодействующих NN -сил.

Образование таких компактных шестикварковых объектов — *дибарионов* — было впервые предсказано на основе $SU(6)$ -симметрии еще в 1964 г. в пионерской работе Дайсона и Ксуонга [1]. В конце 1970-х гг. дибарионные состояния (в том числе, узкие дибарионы, не распадающиеся по NN -каналу) были также предсказаны в рамках кварковых моделей (см., например, [2, 3]). Впоследствии были найдены многочисленные экспериментальные и теоретические указания на существование как широких, так и узких дибарионных резонансов. Так, указания на рождение ряда узких дибарионов в неупругом pp - и pd -рассеянии были получены в ОИЯИ, ИЯИ РАН, ИТЭФ и др. (см., например, [4, 5]). Сигналы широких дибарионных резонансов были обнаружены в процессах упругого и неупругого pp -рассеяния, фоторасщепления дейтрона и т.д. (см. обзор [6]). Однако достаточно надежное подтверждение существования таких резонансов появилось лишь недавно, в серии экспериментов по реакциям двухпионного рождения в pn -, pd - и dd -соударениях, выполненных международными коллаборациями CELSIUS/WASA и затем WASA@COSY в эксклюзивной постановке, в полной 4π -геометрии и с очень высокой статистикой [7]. В этих экспериментах был обнаружен четкий сигнал изоскалярного дибарионного резонанса $\mathcal{D}_{03}(2380)$ с квантовыми числами $I(J^P) = 0(3^+)$, который был затем подтвержден новыми данными фазового анализа упругого np -рассеяния [8]. Помимо этого, резонансные полюсы, соответствующие изоскалярному дибариону $\mathcal{D}_{03}(2380)$ и изовекторному дибариону $\mathcal{D}_{12}(2150)$ (также впервые предсказанному в работе [1]) были найдены недавно в рамках решения уравнений Фаддеева для систем $\pi N\Delta$ и πNN [9].

В настоящее время продолжают поиски и других предсказанных ранее дибарионных состояний, в том числе, странного H -дибариона, нестранных

дибарионов с изоспинами $I = 2$ и 3 , а также сверхузких дибарионных резонансов с массой $M_D < 2m_N + m_\pi$. Надежное экспериментальное обнаружение таких резонансов будет иметь важные следствия для ядерной физики и астрофизики. Однако в настоящей диссертации рассматриваются только широкие дибарионные резонансы, связанные с NN -каналом, поскольку они могут играть существенную роль в NN -взаимодействии на малых расстояниях и в структуре короткодействующих ядерных сил.

Модель ядерных сил, учитывающая образование одетого дибариона (bq -мешка, окруженного мезонными полями) на коротких межнуклонных расстояниях и построенная на основе фундаментальных кварковых симметрий, была предложена группой ученых из НИИЯФ МГУ и Университета г. Тюбингена (Германия) в начале 2000-х гг. [10, 11]. Согласно этой модели, основным механизмом, ответственным за NN -притяжение, является сильная связь NN -канала с дибарионным каналом, в котором отдельные нуклоны сливаются в единый bq -мешок, одетый сильным скалярным полем. Скалярное поле излучается в результате перехода bq -мешка из возбужденного состояния с кварковой конфигурацией $s^4 p^2$ в основное состояние s^6 . Т.е. фактически стандартный t -канальный сигма-обмен между нуклонами заменяется s -канальным сигма-обменом. В рамках этой модели, с использованием минимального числа свободных параметров, были описаны эмпирические фазовые сдвиги упругого NN -рассеяния вплоть до энергий 1 ГэВ, а также успешно воспроизведены свойства легчайших ядер. Кроме того, дибарионная модель позволила предсказать ряд новых эффектов, некоторые из которых уже подтвердились экспериментально (например, рождение дибарионов в NN -соударениях, структура Роперовского резонанса и др.).

Таким образом, в работах [10, 11] было найдено, что основные эффекты кварковой структуры нуклонов в NN -взаимодействии могут быть вполне адекватно описаны в терминах промежуточных дибарионов. Такое описание уже не требует явного введения кварк-глюонных степеней свободы и непосредственно связано с переменными соответствующего адронного канала. Однако наблюдаемые упругого NN -рассеяния и статические свойства ядер, описанные ранее в рамках дибарионной модели, содержат лишь весьма небольшие проявления кварковых степеней свободы и также могут быть довольно хорошо описаны в рамках традиционных мезон-обменных моделей. В связи с

этим, представляет интерес применение эффективного формализма дибарионной модели для описания процессов с большими передачами импульса (таких, как неупругое NN -рассеяние, упругое Nd -рассеяние под большими углами и др.), традиционное описание которых сталкивается со значительными трудностями.

Цель диссертационной работы состоит в выяснении роли ненуклонных степеней свободы в процессах упругого и неупругого рассеяния нуклонов промежуточных энергий (порядка 1 ГэВ) на нуклонах и ядрах дейтерия, включая процессы рождения мезонов. В частности, необходимо прояснить вопрос о вкладе промежуточных дибарионных резонансов в процессы одно- и двухпионного рождения в NN -соударениях. При этом особое внимание должно быть уделено исследованию соотношения между вкладами традиционных механизмов, учитывающих нуклонные (и изобарные) степени свободы, и механизмов возбуждения промежуточных дибарионных резонансов.

Результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Впервые выполнено обобщение дифракционной модели Глаубера-Ситенко для рассеяния быстрых нуклонов на ядрах дейтерия с учетом спиновой структуры нуклон-нуклонных амплитуд и волновой функции ядра-мишени, а также процесса двойной перезарядки. Получены явные аналитические формулы связи инвариантных Nd - и NN -амплитуд. В рамках построенной модели рассчитаны сечения и поляризационные наблюдаемые упругого pd -рассеяния и выполнено детальное сравнение предсказаний дифракционной модели с результатами точных трехчастичных расчетов и экспериментальными данными. Показано, что проведенное обобщение позволяет существенно расширить область применимости дифракционной модели и улучшить описание данных в широком интервале энергий.

2. Предложен новый механизм Nd -рассеяния под большими углами, включающий трехчастичное взаимодействие с рождением промежуточного дибарионного резонанса. Установлена связь этого механизма с процессами неупругого NN -рассеяния ($NN \rightarrow d\pi$, $NN \rightarrow d\pi\pi$ и т. д.) и возможность его исследования в таких процессах.

3. Исследована относительная роль стандартных мезон-обменных механизмов, в том числе, с возбуждением промежуточной Δ -изобары, и механизмов возбуждения изовекторных дибарионных резонансов в реакции однопи-

онного рождения $NN \rightarrow d\pi$. Показано, что учет механизмов рождения промежуточных дибарионов позволяет значительно улучшить описание данных для рассматриваемой реакции при условии согласованной параметризации мезон-барионных вершин в процессах NN - и πN -рассеяния. Также впервые указана возможность исследования изовекторных дибарионных резонансов в реакциях двухпионного рождения в pp -соударениях.

4. На основе дибарионной модели NN -взаимодействия предложена новая количественная интерпретация околопорогового усиления (АВС-эффекта) в реакциях двухпионного рождения $np \rightarrow d\pi$, $pd \rightarrow {}^3\text{He}\pi$ и др., открытого экспериментально более 50 лет назад и до сих пор не получившего признанного теоретического объяснения. Впервые показано, что АВС-эффект можно рассматривать как прямое экспериментальное подтверждение восстановления киральной симметрии в адронных соударениях при промежуточных энергиях.

Научная новизна. Основные результаты, представленные в диссертации, являются новыми и оригинальными. В частности, обобщение дифракционной модели Глаубера–Ситенко для задачи Nd -рассеяния с учетом полной спиновой структуры NN -амплитуд и дейтронной волновой функции, а также процесса двойной перезарядки было сделано впервые. Кроме того, впервые выполнено детальное сравнение предсказаний дифракционной модели с точными расчетами по уравнениям Фаддеева для реалистического NN -взаимодействия. Также впервые получено согласованное описание процессов одно- и двухпионного рождения в NN -соударениях с учетом возбуждения промежуточных дибарионных резонансов. Наконец, предложена новая количественная интерпретация околопорогового усиления (АВС-эффекта) в реакциях двухпионного рождения, основанная на излучении скалярного σ -мезона из возбужденного дибариона в условиях частичного восстановления киральной симметрии.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенная в диссертации интерпретация АВС-эффекта в реакциях двухпионного рождения открывает новые возможности исследования фундаментального явления восстановления киральной симметрии и рождения относительно стабильных легких скалярных мезонов в NN - и Nd -соударениях при промежуточных энергиях порядка 1 ГэВ. (До сих пор эти явления теоретически рассматривались только в ядерной материи высокой плотности и/или температуры.)

Резонансный (дибарионный) механизм для реакций одно- и двухпионно-

го рождения в NN -соударениях, развитый в диссертации, дает новую теоретическую основу для описания процессов рождения мезонов. (Базовые механизмы таких процессов, предложенные ранее в литературе, включали в себя только псевдорезонансы, обусловленные возбуждением отдельных барионов.) Предложенный дибарионный механизм может быть в дальнейшем включен в расчеты более сложных процессов типа упругого и неупругого рассеяния нуклонов на ядрах при больших передачах импульса.

Формализм обобщенной дифракционной модели может быть использован для расчетов поляризационных характеристик в рассеянии адронов промежуточных и высоких энергий на ядрах. В частности, обобщенная дифракционная модель была недавно использована учеными из ОИЯИ и Исследовательского центра Юлиха (Германия) для расчетов спиновых наблюдаемых рассеяния антипротонов на дейтерии. Эти расчеты являются важными для тестирования различных моделей антинуклон-нуклонных амплитуд и интерпретации будущих экспериментов с поляризованными антипротонными пучками.

В целом, результаты, изложенные в диссертации, могут быть использованы для дальнейших расчетов адронных и ядерных процессов при промежуточных энергиях, а также для интерпретации существующих и предсказания новых экспериментальных данных.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации были доложены на следующих международных и всероссийских конференциях:

LIX, LX и LXII Международные совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра “ЯДРО 2009” (Чебоксары, 2009), “ЯДРО 2010” (Санкт-Петербург, 2010) и “ЯДРО 2012” (Воронеж, 2012); The Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics (Manchester, UK, 2011); Mini-workshop on two-pion production in the HADES and WASA experiments (IPN Orsay, France, 2013); The 22nd European Conference on Few-Body Problems in Physics “EFB 22” (Cracow, Poland, 2013); The 13th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon “MENU 2013” (Rome, Italy, 2013); XII Всероссийская Конференция “Молодые ученые России” (Москва, 2014).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 21 работе, из них 9 статей в рецензируемых научных журналах и 12 тезисов докладов. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, представленные

в диссертации, были получены автором лично. Автором разработаны теоретические модели исследуемых физических процессов, сделан выбор расчетных методов, выполнены аналитические и численные расчеты, проведено детальное сравнение с экспериментальными данными.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации 154 страницы, из них 134 страницы текста, включая 28 рисунков и 6 таблиц. Библиография включает 175 наименований на 16 страницах. Объем приложения 4 страницы, включая 4 таблицы.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована ее основная цель, представлены результаты работы и выносимые на защиту научные положения, аргументирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, оценен личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы и структуре диссертации.

Первая глава посвящена рассмотрению упругого Nd -рассеяния под малыми и большими углами.¹ Исследование этого фундаментального процесса может дать важную информацию о NN -взаимодействии и структуре ядра. В частности, в области больших переданных импульсов возможно проявление ненуклонных степеней свободы и трехчастичных сил. Однако, даже в рамках лишь нуклонных степеней свободы, к настоящему времени не создано количественной теории данного процесса при промежуточных и высоких энергиях. Так, в силу ряда причин, точные трехчастичные уравнения Фаддеева могут эффективно применяться только при энергиях падающего протона $T_p \lesssim 350$ МэВ, где возможные переданные импульсы и проявление короткодействующих NN -корреляций еще относительно малы. Поэтому необходимо построить достаточно надежную теоретическую модель pd -рассеяния при промежуточных энергиях $T_p \sim 1$ ГэВ, учитывающую нуклонные степени сво-

¹ В дальнейшем для определенности будем говорить о pd -рассеянии, имея в виду только ядерное взаимодействие (кулоновские эффекты при энергиях $T_p > 200$ МэВ проявляются только в рассеянии на очень малые углы и не рассматриваются в диссертации).

боды, как основу для последующего включения ненуклонных степеней свободы и связанных с ними трехчастичных сил.

Известно, что сечение упругого pd -рассеяния под небольшими углами в области энергий $T_p \sim 1$ ГэВ хорошо описывается дифракционной моделью Глаубера–Ситенко [12, 13], основанной на эйкональном приближении в теории рассеяния и учитывающей однократные и двукратные соударения падающего протона с нуклонами мишени. Однако в большинстве предшествующих работ по дифракционной модели использовалось весьма приближенное описание NN -взаимодействия, что затрудняло оценку точности как исходной модели, так и различных поправок к ней. В частности, в рамках дифракционной модели для pd -рассеяния так и не был произведен учет спиновой и изоспиновой структуры NN -амплитуд вместе с D -компонентой волновой функции дейтрона. Вместе с тем, такое обобщение модели необходимо для анализа поляризационных наблюдаемых, чувствительных к тонким деталям взаимодействия и хорошо изученных в последние годы в целом ряде экспериментов, и для установления количественной степени точности дифракционной модели.

В разделе 1.2 описана разработка обобщенной версии дифракционной модели Глаубера, включающей спиновую структуру NN -амплитуд, D -волну дейтрона и процесс двойной перезарядки (который может быть представлен как следствие изоспиновой структуры полной NN -амплитуды). Произведен детальный вывод явных аналитических формул связи инвариантных Nd - и NN -амплитуд. Конечные формулы для 12 инвариантных Nd -амплитуд имеют вид:

$$A_j(q) = A_j^{(s)}(q) + \frac{i}{2\pi^{3/2}} \int d^2q' \left(2\mathcal{A}_j^{(d)}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') - \mathcal{A}_j^{(c)}(\mathbf{q}, \mathbf{q}') \right) + n \leftrightarrow p, \quad (1)$$

где $j = \overline{1, 12}$ и $n \leftrightarrow p$ означает замену протонных индексов на нейтронные и наоборот. Амплитуды однократного рассеяния ($A_j^{(s)}$), а также подынтегральные выражения для амплитуд двукратного рассеяния и перезарядки ($\mathcal{A}_j^{(d)}$ и $\mathcal{A}_j^{(d)} - \mathcal{A}_j^{(c)}$, соответственно), явно выражаются через инвариантные NN -амплитуды (6 для pp - и 6 для np -рассеяния) и различные мультипольные составляющие формфактора дейтрона. Наблюдаемые величины (дифференциальное сечение, анализирующие способности и др.) представляют собой билинейные комбинации инвариантных Nd -амплитуд.

Важным элементом обобщенной дифракционной модели является также

использование точных эмпирических NN -амплитуд и современных дейтронных волновых функций в качестве “входных данных”. Раздел 1.3 посвящен параметризации спиральных NN -амплитуд и дейтронных волновых функций. Спиральные NN -амплитуды (связанные с инвариантными амплитудами простыми линейными соотношениями) строятся на основе современных данных фазового анализа упругого NN -рассеяния и затем параметризуются в гауссовом виде. Для дейтронных волновых функций также получено удобное представление в виде суммы гауссоид. В расчетах используются две альтернативные модели волновой функции дейтрона — CD-Bonn и дибарионная модель.

Далее, в разделе 1.4 проводится исследование точности и пределов применимости обобщенной дифракционной модели в широком интервале энергий. Выполнены расчеты дифференциальных сечений и поляризационных наблюдаемых (протонных и дейтронных анализирующих способностей) pd -рассеяния при энергиях $T_p = 250, 440$ и 1000 МэВ. Также проведено сравнение полученных результатов с точными трехчастичными расчетами на основе решения уравнений Фаддеева (в той области энергий, где такое сравнение возможно) и имеющимися экспериментальными данными. При этом установлено очень хорошее согласие предсказаний обобщенной дифракционной модели с экспериментальными данными как для сечений, так и для векторных и тензорных анализирующих способностей в области переданных импульсов² $-t = q^2 < 0.35$ ГэВ², причем двукратное рассеяние играет очень важную роль. В итоге сравнения с точным решением уравнений Фаддеева установлено, что результаты, полученные на основе обобщенной дифракционной модели, согласуются с предсказаниями точной трехчастичной теории для поляризационных наблюдаемых в той же области переданных импульсов $-t < 0.35$ ГэВ² — см. Рис. 1. Вне этой области приближенное и точное описание анализирующих способностей не согласуются друг с другом, но и точная теория уже не описывает экспериментальные данные. И если расхождение дифракционной модели с экспериментом при больших переданных импульсах можно объяснить приближениями, заложенными в основу этой модели, то расхождение точных расчетов с данными свидетельствует о каких-то неучтенных механизмах. Естественно предположить, что в этой области проявляются ненуклонные степени свободы и связанные с ними трехчастичные силы.

² В диссертации для записи импульсов и масс частиц используются энергетические единицы ($c = 1$).

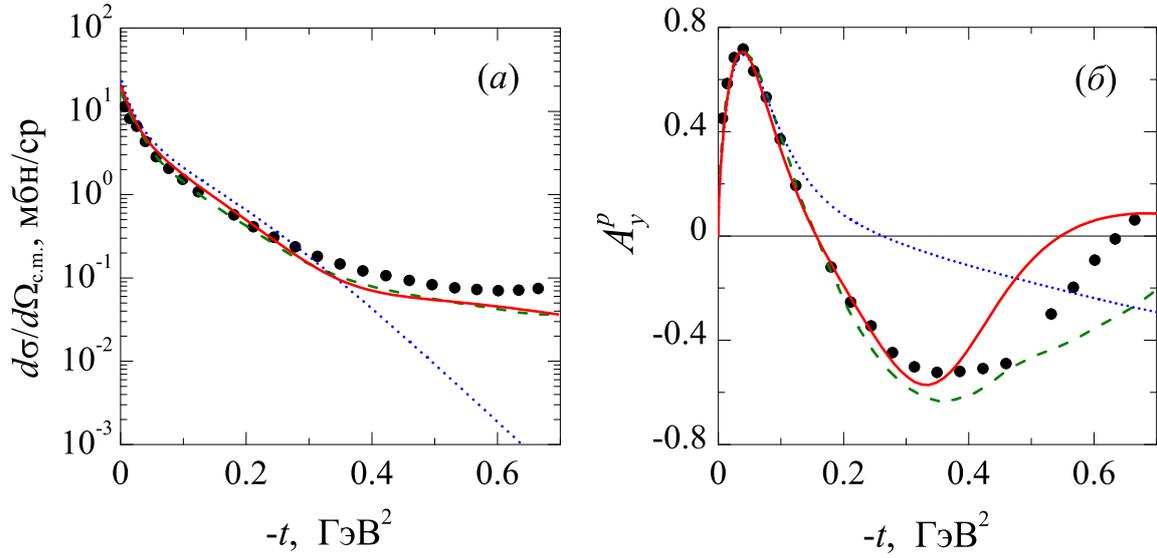


Рис. 1. Дифференциальное сечение (а) и протонная анализирующая способность (б) в упругом pd -рассеянии при энергии падающего протона $T_p = 250$ МэВ. Кривые: сплошные — предсказания обобщенной дифракционной модели (с дейтронной волновой функцией CD-Bonn), точечные — вклад однократного рассеяния, штриховые — результаты расчетов по уравнениям Фаддеева с NN -потенциалом CD-Bonn. Точки — экспериментальные данные (RCNP, 2002).

Важно отметить, что значение квадрата переданного импульса $|t| \approx 0.35$ ГэВ^2 в двукратном рассеянии соответствует передаче импульса в каждом однократном NN -соударении $q \approx 300$ МэВ. При бóльших передачах импульса существенный вклад в упругое pd -рассеяние должны давать процессы *неупругого* NN -рассеяния, в которых большую роль играет возбуждение барионных (а, возможно, и дибарионных) резонансов.

Раздел 1.5 посвящен качественному рассмотрению проявлений ненуклонных степеней свободы в упругом Nd -рассеянии под большими углами и его связи с неупругим NN -рассеянием. Основным процессом неупругого NN -рассеяния является рождение пионов. Известно, что в процессе $NN \rightarrow d\pi$, начиная практически от порога, очень важную роль играет механизм возбуждения нуклонной изобары $\Delta(1232)$. При включении такого механизма в Nd -рассеяние возникает трехчастичная сила (предложенная еще в 1957 г.), представляющая собой 2π -обмен между нуклонами с рождением промежуточной Δ -изобары. Однако попытки описания Nd -рассеяния с учетом этой трехчастичной силы, в том числе, в рамках полного фаддеевского формализма с последовательным учетом Δ -изобары, привели лишь к частичному улучшению согласия с экспериментальными данными. В связи с этим можно предположить, что в Nd -рассеянии все еще не учитывается какой-то важный коротко-

действующий механизм.

В качестве такого недостающего механизма в диссертации предлагается рассмотреть рождение промежуточных дибарионных резонансов в NN -системе. Согласно дибарионной модели ядерных сил [10], учет промежуточных дибарионов приводит к возникновению новой трехчастичной силы, обусловленной мезонным обменом между нуклоном и дибарионом. Сочетание трехчастичной силы такого типа с однонуклонным обменом в начальном (или конечном) состоянии (см. Рис. 2) может дать существенный вклад в Nd -рассеяние под большими углами. При этом возможно дополнительное усиление за счет образования возбужденных дибарионов (резонансов D^*) в промежуточном состоянии.

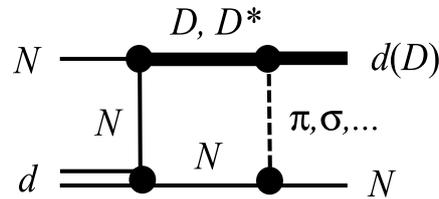


Рис. 2. Новый механизм упругого Nd -рассеяния, возникающий в дибарионной модели NN -сил и включающий дибарионную компоненту (D) дейтронной волновой функции.

Предложенный новый механизм, так же, как и стандартный механизм, включающий возбуждение промежуточной Δ -изобары, содержит в качестве подпроцесса неупругое NN -рассеяние с рождением мезонов. Поэтому перед тем, как включать такой механизм в расчеты Nd -рассеяния, целесообразно провести исследование относительной роли промежуточных барионных и дибарионных резонансов в более простой реакции $NN \rightarrow d\pi$.

Во второй главе рассматриваются вклады барионных и дибарионных резонансов в сечение реакции однопионного рождения $NN \rightarrow d\pi$. Эта реакция сопровождается довольно большими переданными импульсами $q > 360$ МэВ, поэтому даже в полных сечениях должны проявляться короткодействующие механизмы. В действительности, исследованиям реакции $NN \rightarrow d\pi$ было посвящено очень большое число как экспериментальных, так и теоретических работ, начиная с 1950-х гг. Эта реакция рассматривалась в рамках феноменологических моделей, с помощью метода связанных каналов, а также на основе уравнений Фаддеева для системы πNN с учетом Δ -изобары. При этом уже давно было установлено, что основные черты этого процесса могут быть

объяснены возбуждением промежуточной системы $N\Delta$. Однако ряд более чувствительных поляризационных характеристик не удается описать на основе традиционных мезон-обменных моделей, в том числе, в рамках последовательного фаддеевского подхода.

С другой стороны, вблизи порога возбуждения системы $N\Delta$ имеются многочисленные указания на существование целой серии изовекторных дибарионных резонансов $^1D_2(2150)$, $^3F_3(2240)$, $^1G_4(2430)$ и т. д. [6], которые могут проявляться и в реакции $NN \rightarrow d\pi$. Предыдущие попытки учета изовекторных дибарионов в данной реакции заключались в *ad hoc* подгонке параметров нескольких гипотетических резонансов под экспериментальные данные. Из такой подгонки было весьма сложно сделать обоснованные выводы, поскольку параметры дибарионов не были согласованы с предсказаниями кварковых моделей или с данными фазового анализа. Поэтому необходимо было провести более последовательный анализ относительных вкладов барионных и дибарионных резонансов в реакции однопионного рождения.

В разделе 2.2 рассматривается традиционное описание реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ на основе суперпозиции двух базовых механизмов ONE (однуклонного обмена) и $N\Delta$ (возбуждения системы $N + \Delta$ в промежуточном состоянии). Основная проблема в таком описании состоит в выборе параметров короткодействующего обрезания в вершинах πNN и $\pi N\Delta$. В настоящее время точные значения этих параметров не установлены, хотя многие авторы сходятся в том, что они должны быть весьма малыми, т.е. $\Lambda \simeq 0.4\text{--}0.9$ ГэВ (для монополярной формы вершинных функций). В диссертации используется наиболее простая параметризация для мезон-барионных вершин, которая следует из основ нерелятивистской квантовой механики в сочетании с принципом минимального релятивизма. Именно, вершинная функция для процесса $a \rightarrow b + c$ предполагается зависящей от (релятивистски-инвариантного) модуля относительного импульса в паре частиц bc и некоторого параметра обрезания $\tilde{\Lambda}$: $F_{a \rightarrow bc} = f(p_{bc}, \tilde{\Lambda})$. Такая параметризация вершин допускает однозначное продолжение в область вне массовой поверхности, т.е. процессы с участием реальных и виртуальных пионов, например, $\pi N \rightarrow \Delta \rightarrow \pi N$ и $\pi d \rightarrow N\Delta \rightarrow NN$, могут быть описаны на единой основе, без привлечения дополнительных свободных параметров. Тогда монополярный параметр $\Lambda_{\pi N\Delta}$ может быть найден из описания эмпирических данных по упругому πN -рассеянию и составляет 0.44

ГэВ. Для параметра $\Lambda_{\pi NN}$ было принято значение 0.7 ГэВ, которое согласуется с результатами расчетов КХД на решетке.

Показано, что сечение реакции $pp \rightarrow d\pi^+$, рассчитанное на основе традиционных механизмов, очень сильно зависит от параметра $\Lambda_{\pi N\Delta}$. При выборе этого параметра из согласия с данными по упругому πN -рассеянию традиционные механизмы дают только 40–50% парциального (1D_2P) и полного сечений реакции $pp \rightarrow d\pi^+$. Хотя увеличение параметра $\Lambda_{\pi N\Delta}$ *ad hoc* позволяет примерно описать абсолютную величину сечений, такое описание уже не является вполне последовательным. Альтернативный путь состоит в учете промежуточных дибарионных резонансов.

В разделе 2.3 рассматривается учет механизма рождения промежуточного дибариона \mathcal{D}_{12} с квантовыми числами $I(J^P) = 1(2^+)$, массой $M_{\mathcal{D}_{12}} \simeq 2150$ МэВ и шириной $\Gamma_{\mathcal{D}_{12}} \simeq 110$ МэВ в основной парциальной волне реакции 1D_2P . Соответствующие парциальная амплитуда и сечение имеют вид

$$A(^1D_2P) = -\frac{8\pi s}{\sqrt{pq}} \frac{\sqrt{2\Gamma_{\mathcal{D}_{12} \rightarrow pp}(s)\Gamma_{\mathcal{D}_{12} \rightarrow \pi d}(s)}}{s - M_{\mathcal{D}_{12}}^2 + i\sqrt{s}\Gamma_{\mathcal{D}_{12}}(s)}, \quad \sigma(^1D_2P) = \frac{5}{64\pi s} \frac{q}{p} |A(^1D_2P)|^2, \quad (2)$$

где s — квадрат инвариантной энергии системы, p и q — абсолютные величины импульсов протона и дейтрона в с.ц.и., соответственно. Параметры резонанса $\mathcal{D}_{12}(2150)$ не подгонялись под наблюдаемые процесса $pp \rightarrow d\pi^+$, а были выбраны из независимых источников (в основном, из данных фазового анализа упругого pp - и π^+d -рассеяния). В итоге найдено, что учет рождения дибарионного резонанса $\mathcal{D}_{12}(2150)$ позволяет значительно улучшить описание эмпирических данных для парциального сечения в волне 1D_2P (см. Рис. 3). Для описания полного сечения в широком интервале энергий нужно учесть возбуждение двух изовекторных резонансов: $\mathcal{D}_{12}(2150)$ (1D_2) и $\mathcal{D}_{13}^-(2240)$ (3F_3).

В разделе 2.4 проводится анализ вкладов механизма рождения дибариона $\mathcal{D}_{12}(2150)$ в упругое pp - и π^+d -рассеяние. Результаты расчетов показывают, что вклад дибарионных резонансов в полные сечения упругого рассеяния очень мал ($\simeq 2.5\%$), поэтому их весьма сложно обнаружить в таких процессах.

Таким образом, можно сделать вывод, что в случаях, когда гипотетический дибарионный резонанс лежит вблизи порога возбуждения псевдорезонансной системы типа $N + N^*$ и имеет примерно такую же ширину, вклад s -канального резонансного механизма может быть довольно хорошо описан

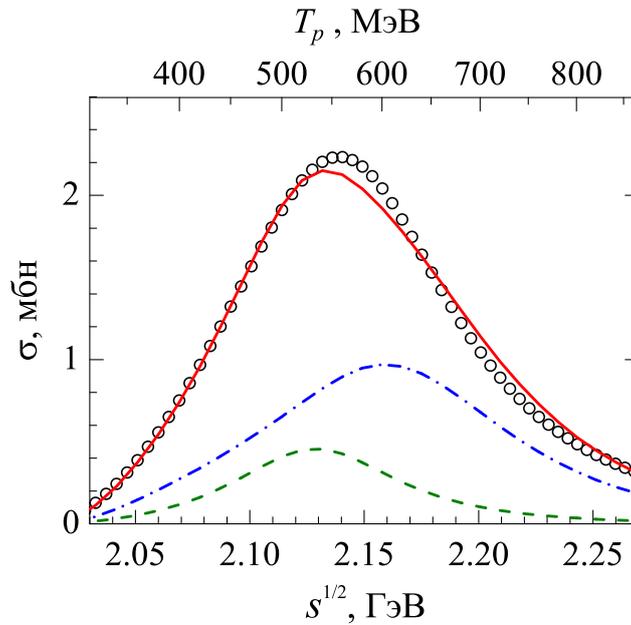


Рис. 3. Сечение реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ в частичной волне 1D_2P . Кривые: штрих-пунктирная — суммарный вклад механизмов однонуклонного обмена и возбуждения промежуточной Δ -изобары, штриховая — вклад механизма рождения промежуточного дибариона $\mathcal{D}_{12}(2150)$, сплошная — полный расчет с учетом трех указанных механизмов. Точки — данные парциально-волнового анализа (SAID, решение C500).

t -канальным псевдорезонансным механизмом. При этом требуется подгонка параметров короткодействующего обрезания в мезон-барионных вершинах под конкретный процесс, что неизбежно приводит к нарушению согласованности в описании различных процессов с участием одних и тех же механизмов. Тем не менее, поскольку истинные параметры обрезания в вершинах пока еще плохо известны, сделать однозначные выводы в такой ситуации весьма сложно. Поэтому важно найти такие реакции, в которых дибарионные резонансы проявляются более четко и не могут быть “замаскированы” стандартными мезон-обменными механизмами, даже при подгонке параметров.

В третьей главе исследуется возбуждение дибарионных резонансов в реакциях двухпионного рождения. Такие реакции сопровождаются еще большими переданными импульсами $q > 500$ МэВ и затрагивают, в основном, область очень малых межнуклонных расстояний. Особый интерес представляет чисто изоскалярный процесс $pn \rightarrow d(\pi\pi)_0$, поскольку только в нем наблюдается загадочный АВС-эффект [14] — ярко выраженное околороговое усиление в спектре инвариантных масс 2π -системы. Общепринятым механизмом реакций двухпионного рождения долгое время считался так называемый

t -канальный Δ - Δ механизм, основанный на образовании двух Δ -изобар посредством мезонного обмена с их последующим распадом по каналу $N+\pi$. Однако недавние эксклюзивные эксперименты [7], выполненные в условиях полной 4π -геометрии и с очень высокой статистикой, показали, что t -канальный Δ - Δ механизм не дает не только количественного, но и качественного описания данных. В то же время, в этих экспериментах был обнаружен сигнал рождения в pn -соударении дибарионного резонанса \mathcal{D}_{03} с квантовыми числами $I(J^P) = 0(3^+)$, массой $M_{\mathcal{D}_{03}} \simeq 2380$ МэВ и шириной $\Gamma_{\mathcal{D}_{03}} \simeq 70$ МэВ, причем была установлена связь АВС-эффекта с распадом этого резонанса [7]. Однако сам механизм распада дибариона \mathcal{D}_{03} , приводящий к АВС-усилению, оставался неясным.

В разделе 3.2 предлагается новая модель реакции $pn \rightarrow d(\pi\pi)_0$ при энергиях $T_p = 1-1.3$ ГэВ, учитывающая две моды распада резонанса $\mathcal{D}_{03}(2380)$ по каналу $d + \pi\pi$: (i) излучение σ -мезона (в d -волне по отношению к bq -остову) с его последующим распадом на два пиона; (ii) последовательное излучение двух p -волновых пионов через промежуточный изовекторный дибарион $\mathcal{D}_{12}(2150)$. С формальной точки зрения, предложенные механизмы распада \mathcal{D}_{03} полностью аналогичны двум модам распада Роперовского резонанса по каналу $N + \pi\pi$: $N^*(1440) \rightarrow N + (\pi\pi)_{I=0}^{s\text{-wave}}(\sigma)$ и $N^*(1440) \rightarrow \Delta + \pi$. В действительности, в дибарионной модели резонансы $\mathcal{D}_{12}(2150)$ и $\mathcal{D}_{03}(2380)$ можно рассматривать как возбужденные состояния дибарионной компоненты дейтрона $\mathcal{D}_{01}(1876)$, по аналогии с возбужденными состояниями нуклона.

Диаграммы, иллюстрирующие два соответствующих механизма реакции $pn \rightarrow d(\pi\pi)_0$, изображены на Рис. 4 (а) и (б). Полная амплитуда процесса в рамках рассматриваемой модели вычисляется по формуле

$$\mathcal{M} = \frac{\mathcal{F}_{pn \rightarrow \mathcal{D}_{03}}(\mathbf{p})}{s - M_{\mathcal{D}_{03}}^2 + i\sqrt{s}\Gamma_{\mathcal{D}_{03}}(s)} \times \left\{ \frac{\mathcal{F}_{\mathcal{D}_{03} \rightarrow d\sigma}(\mathbf{q})\mathcal{F}_{\sigma \rightarrow \pi\pi}(\mathbf{k})}{M_{\pi\pi}^2 - m_\sigma^2 + iM_{\pi\pi}\Gamma_\sigma(M_{\pi\pi})} + \left(\frac{\mathcal{F}_{\mathcal{D}_{03} \rightarrow \mathcal{D}_{12}\pi}(\mathbf{k}_1)\mathcal{F}_{\mathcal{D}_{12} \rightarrow d\pi}(\lambda_1)}{M_{d\pi}^2 - M_{\mathcal{D}_{12}}^2 + iM_{d\pi}\Gamma_{\mathcal{D}_{12}}(M_{d\pi})} + \pi_1 \leftrightarrow \pi_2 \right) \right\}. \quad (3)$$

Элементарные амплитуды $\mathcal{F}(\mathbf{p})$ представляют собой произведения $F(p)G(\hat{p})$, где формфактор $F(p)$ связан с парциальной шириной распада соотношением $\Gamma_{a \rightarrow bc}(p) = p|F(p)|^2/8\pi M_{bc}^2$, а для вычисления угловой части $G(\hat{p})$ был использован нерелятивистский тензорный формализм. Распределение по инвариант-

ной массе двух пионов $M_{\pi\pi}$ находится по формуле

$$\frac{d\sigma}{dM_{\pi\pi}} = \frac{1}{(4\pi)^5 p E^2} \int \int q k d\Omega_q d\Omega_k \overline{|\mathcal{M}(\mathbf{q}, \mathbf{k})|^2}, \quad (4)$$

где черта сверху обозначает усреднение по начальным и суммирование по конечным спиновым состояниям.

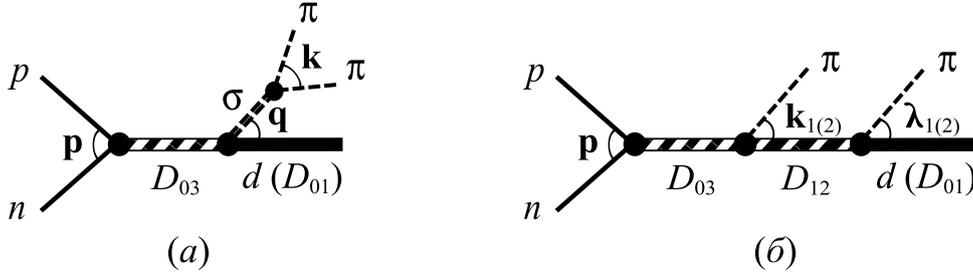


Рис. 4. Диаграммы двух резонансных механизмов реакции $pn \rightarrow d + (\pi\pi)_0$ в области энергий $T_p = 1\text{--}1.3$ ГэВ. Импульсы в с.ц.и. двух частиц показаны между соответствующими линиями.

В разделе 3.3 приводятся результаты расчетов в рамках предложенной модели для дифференциальных распределений по инвариантным массам $M_{\pi\pi}$ и $M_{d\pi}$ при энергии $\sqrt{s} = 2.38$ ГэВ, где полное сечение близко к максимуму (см. Рис. 5 (а) и (б), соответственно), а также для ряда угловых и энергетических распределений в реакции $pn \rightarrow d\pi^0\pi^0$. Найдено очень хорошее согласие теоретических расчетов с экспериментальными данными. Анализ отдельных вкладов двух механизмов распада резонанса \mathcal{D}_{03} , т.е. через промежуточный σ -мезон (а) и \mathcal{D}_{12} -дибарион (б), показывает, что каждый из этих механизмов дает явное резонансное усиление в соответствующем спектре инвариантных масс. Так, механизм (а), хотя и имеет весьма малую вероятность в сравнении с механизмом (б), дает заметное околороговое усиление (АВС-эффект) в $M_{\pi\pi}$ -спектре. Конструктивная интерференция между процессами (а) и (б) приводит к дополнительному усилению АВС-пика и дает его наблюдаемую величину. Предложенная модель дает хорошее описание АВС-пика в интервале энергий $\sqrt{s} = 2.34\text{--}2.44$ ГэВ, однако при приближении к $\Delta\Delta$ -порогу ($\sqrt{s} = 2.46$ ГэВ) растет вклад фоновых процессов, в основном, t -канального $\Delta\Delta$ -механизма.

В разделе 3.4 кратко рассматривается связь полученных результатов с фундаментальным явлением восстановления (приближенной) киральной симметрии КХД. Масса и ширина σ -мезона, необходимые для описания АВС-пика, должны быть весьма малы: $m_\sigma \simeq 300$ МэВ, $\Gamma_\sigma \simeq 100$ МэВ. Однако в

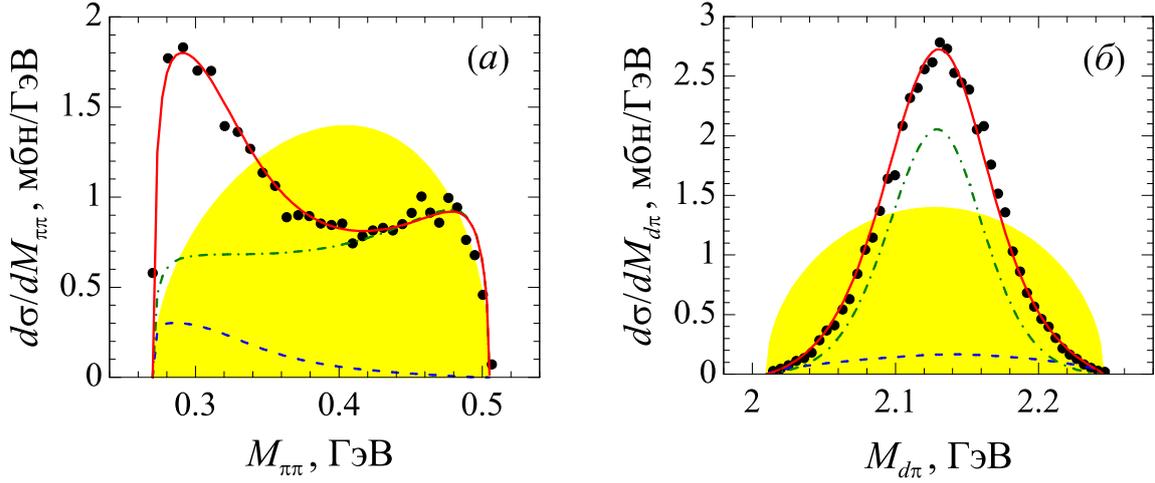


Рис. 5. Спектры инвариантных масс двух пионов (а), а также пиона и дейтрона (б), полученные в реакции $pn \rightarrow d + \pi^0\pi^0$ при энергии $\sqrt{s} = 2.38$ ГэВ. Кривые: штриховые — вклад механизма рождения промежуточного σ -мезона, штрих-пунктирные — вклад механизма образования промежуточного изовекторного дибариона D_{12} , сплошные — полный расчет. Затененные области соответствуют фазовому объему, нормированному на полное сечение. Точки — экспериментальные данные (WASA@COSY, 2011, 2013).

свободном $\pi\pi$ -рассеянии σ -мезон проявляется как очень широкий резонанс с параметрами $m_\sigma \sim \Gamma_\sigma \sim 500$ МэВ. В действительности, скалярный σ -мезон — самый легкий резонанс в КХД с квантовыми числами вакуума — имеет весьма сложную структуру и необычные свойства. В частности, как было показано в ряде работ, уменьшение массы и ширины σ -мезона может служить индикатором частичного восстановления киральной симметрии, которое предсказывается в изолированных сильно возбужденных адронах, а также в ядерной материи высокой плотности и/или температуры. Поскольку дибарион D_{03} является очень плотным объектом, и, кроме того, имеет энергию возбуждения $E^* \simeq 500$ МэВ, естественно предположить, что в дибарионе также должно происходить частичное восстановление киральной симметрии. В этом случае, σ -мезон, испускаемый дибарионом, будет иметь меньшую массу и ширину в сравнении со свободным σ -мезоном (рождающимся в $\pi\pi$ -рассеянии). Именно это показывает эксперимент в области АВС-пика. Согласно дибарионной модели ядерных сил, восстановление киральной симметрии играет ключевую роль в NN -взаимодействии на коротких расстояниях [15]. В рамках предложенной интерпретации АВС-эффект можно рассматривать как первое экспериментальное подтверждение этого предсказания.

В разделе 3.5 обсуждаются возможные проявления изовекторных дибарионов.

рионов в реакциях 2π -рождения в pp -соударениях. В частности, предложена альтернативная модель реакции $pp \rightarrow pp\pi^0\pi^0$ в терминах промежуточных дибарионов. Показано, что такая модель приводит к качественно лучшему согласию с экспериментальными данными для полного сечения данной реакции, чем традиционная модель, учитывающая возбуждение псевдорезонансов типа $N + N^*$ в промежуточном состоянии. Наконец, в разделе 3.6 приводятся сведения о спектроскопии дибарионов, обсуждается их возможная кварковая структура и влияние этой структуры на вероятность распада дибарионов с двухпионной эмиссией.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы. Основным вывод работы состоит в том, что учет рождения промежуточных дибарионных резонансов позволяет согласованно описать широкий круг процессов, сопровождающихся большими передачами импульса и не имеющих удовлетворительного объяснения в рамках традиционных мезон-обменных моделей. В частности, в диссертации получено согласованное описание реакций одно- и двухпионного рождения в NN -соударениях в терминах промежуточных дибарионов. На основании полученных результатов можно предположить, что дибарионные резонансы — это не только “мультикварковая экзотика”, но и проявление фундаментальных свойств непертурбативной КХД, которые определяют взаимодействие нуклонов на малых расстояниях и короткодействующие корреляции в ядрах. Количественная проверка этой гипотезы требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Список основных публикаций

1. Platonova M. N., Kukulkin V. I. Refined Glauber model versus Faddeev calculations and experimental data for pd spin observables // *Phys. Rev. C*. 2010. Vol. 81. P. 014004.
2. Платонова М. Н., Кукулин В. И. Описание спин-зависящих наблюдаемых в упругом pd -рассеянии на основе обобщенной дифракционной модели // *Ядерная физика*. 2010. Т. 73, № 1. С. 90–110.
3. Платонова М. Н. Развитие обобщенной дифракционной модели для упругого pd -рассеяния при промежуточных энергиях // *Изв. РАН. Сер. физ.*

2010. Т. 74, № 11. С. 1650–1656.
4. Кукулин В. И., Платонова М. Н. О возможности восстановления nn и np спиральных амплитуд на основе $\vec{p} + \vec{d}$ и $\vec{n} + \vec{d}$ данных рассеяния при промежуточных энергиях. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2011. Т. 75, № 4. С. 551–555.
 5. Platonova M. N., Kukulkin V. I. Quark degrees of freedom in the deuteron and their testing in nucleon-deuteron scattering // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2012. Vol. 381. P. 012110.
 6. Platonova M. N., Kukulkin V. I. ABC effect as a signal of chiral symmetry restoration in hadronic collisions // *Phys. Rev. C.* 2013. Vol. 87, no. 2. P. 025202.
 7. Кукулин В. И., Платонова М. Н. Короткодействующие компоненты ядерных сил: эксперимент против мифологии // *Ядерная физика.* 2013. Т. 76, № 12. С. 1549–1565.
 8. Platonova M. N. New interpretation of the ABC effect in two-pion production in NN collisions // *Few-Body Syst.* 2014. Vol. 55. P. 791–794.
 9. Kukulkin V. I., Platonova M. N. Chiral symmetry restoration in σ -meson production in hadronic processes // *EPJ Web Conf.* 2014. Vol. 73. P. 05005.
 10. Платонова М. Н. Обобщенная дифракционная модель для спиновых наблюдаемых в упругом $p + d$ рассеянии // Сборник тезисов LIX Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Чебоксары, 2009. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2009. С. 208.
 11. Platonova M. N. Quark degrees of freedom in the deuteron and their testing in nucleon-deuteron scattering // Book of abstracts of the Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics, Manchester, UK, 2011. Bristol: IOP Publishing, 2011. P. 55.
 12. Platonova M. N., Kukulkin V. I. Manifestation of quark degrees of freedom in backward pd scattering // Book of Abstracts of LXII International Conference “NUCLEUS 2012”, Voronezh, 2012. St. Petersburg: SPbGU, 2012. P. 179.

Цитированная литература

1. Dyson F. J., Xuong N.-H. $Y = 2$ states in $SU(6)$ theory // *Phys. Rev. Lett.* 1964. Vol. 13. P. 815–817.

2. Mulders P. J. G., Aerts A. T. M., de Swart J. J. Negative parity, NN resonances and extraneous states // [Phys. Rev. Lett.](#) 1978. Vol. 40. P. 1543.
3. Matveev V. A., Sorba P. Quark analysis of multi-baryonic systems // [Nuovo Cim.](#) 1978. Vol. A45. P. 257–279.
4. Fil'kov L. V., Kashevarov V. L., Konobeevski E. S. et al. Search for supernarrow dibaryons in pd interaction // [Phys. Rev. C.](#) 2000. Vol. 61. P. 044004.
5. Khrykin A. S., Boreiko V. F., Budyashov Yu. G. et al. Search for NN -decoupled dibaryons using the process $pp \rightarrow \gamma\gamma X$ below the pion production threshold // [Phys. Rev. C.](#) 2001. Vol. 64. P. 034002.
6. Макаров М. М. Дибарионные резонансы // [УФН.](#) 1982. Т. 136. С. 185–214.
7. Adlarson P. et al. ABC effect in basic double-pionic fusion — observation of a new resonance? // [Phys. Rev. Lett.](#) 2011. Vol. 106. P. 242302.
8. Adlarson P. et al. Evidence for a new resonance from polarized neutron-proton scattering // [Phys. Rev. Lett.](#) 2014. Vol. 112. P. 202311.
9. Gal A., Garcilazo H. Three-body model calculations of $N\Delta$ and $\Delta\Delta$ dibaryon resonances // [Nucl. Phys.](#) 2014. Vol. A928. P. 73–88.
10. Faessler A., Kukulín V. I., Obukhovskiy I. T., Pomerantsev V. N. The new mechanism for intermediate-range and short-range nucleon-nucleon interaction // [J. Phys. G.](#) 2001. Vol. 27. P. 1851–1868.
11. Kukulín V. I., Obukhovskiy I. T., Pomerantsev V. N., Faessler A. Two-component dressed-bag model for NN interaction: Deuteron structure and phase shifts up to 1 GeV // [Int. J. Mod. Phys.](#) 2002. Vol. E11. P. 1–33.
12. Glauber R. J. Cross sections in deuterium at high energies // [Phys. Rev.](#) 1955. Vol. 100. P. 242–248.
13. Ситенко А. Г. К теории ядерных реакций с участием сложных частиц // [УФЖ.](#) 1959. Т. 4. С. 152–163.
14. Abashian A., Booth N. E., Crowe K. M. Possible anomaly in meson production in $p + d$ collisions // [Phys. Rev. Lett.](#) 1960. Vol. 5. P. 258–260.
15. Kukulín V. I., Grabmayr P., Faessler A. et al. Experimental and theoretical evidences for an intermediate σ -dressed dibaryon in the NN interaction // [Ann. Phys.](#) 2010. Vol. 325. P. 1173–1189.