

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.12.01

РОГОЧАЯ

Елена Павловна

ИССЛЕДОВАНИЕ НУКЛОН-НУКЛОННЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ПОДХОДЕ БЕТЕ-СОЛПИТЕРА
С СЕПАРАБЕЛЬНЫМ ЯДРОМ

Специальность: 01.04.16 – Физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2010

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор

В.В. Буров

кандидат физико-математических наук

С.Г. Бондаренко

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

В.А. Карманов (ФИАН, г. Москва)

доктор физико-математических наук

С.В. Акулиничев (ИЯИ, г. Москва)

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета, г. Москва.

Защита диссертации состоится «30» сентября 2010 г. в 16⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан «27» августа 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

кандидат физико-математических наук

А.Б. Арбузов

Проблема описания ядерных взаимодействий методами квантовой теории поля, которая великолепно проявила себя в квантовой электродинамике, возникла из-за большой константы связи сильных взаимодействий, так как при использовании разложения по ней в ряд теории возмущений невозможно ограничиться несколькими членами ряда. Поэтому, чтобы иметь возможность исследовать ядерные взаимодействия, стали прибегать к различного рода упрощениям: учитывались только предположительно ведущие вклады в описываемые процессы; рассматривались системы, состоящие из небольшого числа нуклонов, и так далее. Подобными соображениями продиктован наш выбор реакции электрорасщепления дейтрона. В этом случае мы имеем дело с простейшей системой, состоящей всего из двух нуклонов, что позволяет избежать сложностей учета коллективных взаимодействий. К тому же энергия их связи мала по масштабам ядерных сил. Эти характеристики делают дейтрон одним из самых популярных инструментов исследования нуклон-нуклонных взаимодействий. Электромагнитное взаимодействие между налетающим электроном и дейтроном намного слабее сильного взаимодействия между нуклонами в дейтроне, что позволяет рассматривать электрорасщепление в однофотонном приближении. В таком случае электронный и ядерный токи в матричном элементе, который описывает реакцию, факторизуются. Электронный ток хорошо известен, так что при расчете наблюдаемых можно исследовать свойства ядерного тока, который описывает взаимодействие между нейтроном и про-

тоном. Кроме того, так как между налетающим электроном и дейтроном есть только электромагнитное взаимодействие, описание сильных взаимодействий сводится к описанию взаимодействий между нуклонами в дейтроне. Из-за разделения токов можно выделить электронную часть, а оставшаяся адронная будет описывать процесс поглощения или излучения виртуального фотона парой нуклонов. Таким образом, разработанная модель описания процесса электроразвала в дальнейшем может быть использована при рассмотрении рассеяния протонов на нейтронах с излучением фотонов, которые распадаются на лептон-антилептонные и мезон-антимезонные пары. Исследование таких процессов актуально в настоящее время [1]-[2] в связи с поисками кварк-глюонной плазмы и изучением различных экзотических реакций. Исследование свойств такой двухчастичной системы, как дейтрон, интересно и с той точки зрения, что реакции с его участием имеют место внутри звезд, так что получаемые результаты можно использовать для понимания процессов в звездном веществе. Система двух связанных частиц является также простейшей при описании ее с позиций кваркового строения.

Исследования реакции электрорасщепления дейтрона проводятся уже более 50 лет. Несмотря на простоту самой системы (всего два связанных нуклона), до сих пор не удалось описать ее точно. Существует множество моделей описания реакции электрорасщепления. Первые подходы были нерелятивистскими [3] и основывались на решении уравнения Липпмана-

Швингера для рассеянных состояний (или Шредингера - для связанных состояний) двухчастичной системы. Позже, с увеличением точности экспериментов, стала очевидна неполнота нерелятивистского описания, поэтому к нерелятивистским решениям стали добавлять релятивистские добавки [4]-[6]. В подобных моделях взаимодействие между нуклонами представляется обменом различными мезонами и описывается так называемым реалистическим потенциалом, который строится в рамках мезон-нуклонной теории ядерных взаимодействий. Однако с возрастанием энергий участвующих в реакции частиц стала очевидна необходимость создания релятивистской модели рассматриваемого процесса. Поэтому стали появляться модели, основанные на релятивистских принципах. Одним из первых подходов такого рода была попытка применить для описания нуклон-нуклонных взаимодействий дисперсионные соотношения [7]. Большая часть таких моделей появилась во время, когда дисперсионные соотношения были очень популярны [8]. Основой метода является разложение матрицы рассеяния по Лоренц- и калибровочно-инвариантным функциям, которые определяются с помощью дисперсионных соотношений. Данный метод не получил широкого распространения из-за значительных математических трудностей. В таком подходе оказалось возможным сделать только несколько общих выводов относительно различных наблюдаемых, описывающих реакцию. К тому же для получения численных результатов приходилось ограничиваться рассмотрением небольшого количества (и клас-

са) диаграмм. Отметим также метод, основанный на разложении матрицы рассеяния по инвариантным функциям [9], которые конструируются через компоненты стандартной волновой функции дейтрона и затем связываются с различными наблюдаемыми.

Последовательное релятивистское описание дейтрона развивается в подходе, основанном на уравнении Бете-Солпитера [10]. Позже было показано, что его можно получить путем обобщения уравнения Липпмана-Швингера с заменой волновых функций операторами полей [11]. Кроме того, был предложен релятивистский вывод данного уравнения на основе метода редукционных формул [12]. Уравнение отличается от полученных в предыдущих подходах тем, что принципы релятивистского описания (все частицы описываются полями, ковариантность) заложены в него как исходные посылки. Для решения данного уравнения необходимо знать входящее в него ядро, представляющее собой сумму всех неприводимых диаграмм Фейнмана, описывающих процесс взаимодействия. Однако найти его не проще, чем решить любое квантово-полевое уравнение в случае сильных взаимодействий. Получить решение удастся в рамках приближения, основанного на разложении в ряд теории возмущений по константе связи. Поскольку приходится иметь дело с сильными взаимодействиями, полученный ряд нельзя оборвать в каком-нибудь порядке, а надо проводить суммирование всех членов ряда. Это удастся выполнить только в лестничном приближении. Однако в работе [13] была показана большая роль

перекрестных диаграмм, учесть которые оказалось возможным только в частных случаях обмена некоторыми мезонами. Это ограничивает применимость диаграммного подхода. В работе [14] для решения интегрального уравнения БС используется разложение амплитуд по гипергармоникам после поворота Вика по нулевой компоненте относительного импульса интегрирования $ip_0 \rightarrow p_4$. Однако это не помогает упростить задачу в целом, потому что существующую процедуру обратного перехода к нулевой компоненте 4-импульса [15], которую теоретически можно было бы применить к получающимся в результате волновым функциям дейтрона, пока удалось разработать только в некоторых простых случаях скалярных квантовых полей. Уравнение Бете-Солпитера в пространстве Минковского можно решить для бозонов [16], учитывая при описании системы лестничные и перекрестные диаграммы и используя преобразование Наканиши [15]. Существует целый класс подходов, называемых квазипотенциальными, в которых каким-либо способом фиксируют нулевую компоненту относительного 4-импульса, тем самым избегая интегрирования по ней. Основой таких подходов является квазипотенциальная редукция уравнения Бете-Солпитера [17, 18], когда зависимость ядра взаимодействия от нулевой компоненты фиксируют, исходя из различных физических предположений, а пропагаторы нуклонов выводятся на массовую поверхность при учете только лестничных диаграмм. Другой способ фиксации нулевой компоненты предложен в обзоре [19], в котором развивается так называемое приближение

равных времен, когда от нулевой компоненты импульса избавляются $p_0 = 0$, приравнивая друг к другу времена нуклонов. В работе [13] было показано, что учет простейших перекрестных диаграмм первого порядка вкупе с лестничными приводит к лестничному приближению, когда один из нуклонов выходит на массовую поверхность, а другой остается виртуальным. Однако учета перекрестных диаграмм первого порядка недостаточно для полного описания нуклон-нуклонных взаимодействий. Подробный обзор большинства существующих квазипотенциальных подходов и сравнение получаемых в их рамках результатов представлен в работе [20]. Существует также отдельная группа подходов, называемых релятивистскими квантовыми механиками [21]-[23]. Они основываются на гамильтоновом формализме, в котором учитываются требования специальной теории относительности. Динамика системы описывается набором операторов, для которых строится алгебра, а фоковские векторы состояния системы рассматриваются на определенной поверхности в 4-мерном пространстве-времени. Последнее позволяет зафиксировать нулевую компоненту импульса и упростить расчеты, как и в случае квазипотенциальных подходов. Одной из наиболее разработанных моделей такого рода является динамика на световом фронте [24, 25].

В нашей работе развивается подход, основанный на использовании уравнения Бете-Солпитера (БС), когда входящее в него ядро взаимодействия представляется в сепарабельном виде. Это позволяет преобразовать рассматриваемую систему интеграль-

ных уравнений в систему линейных уравнений, которая легко разрешима. Таким образом, для описания системы нейтрон-протон в таком подходе необходимо знать параметры функций, составляющих используемое сепарабельное ядро. Параметры находятся из анализа экспериментальных данных по фазам, низкоэнергетическим характеристикам (длина рассеяния, эффективный радиус и т.д.) упругого рассеяния протонов на нейтронах и дейтрона (энергия связи, асимптотическое отношение $\rho_{D/S}$ и т.д.). Причем, так как в этом случае нулевая компонента 4-импульса нуклонов не исключается из рассмотрения, удастся сохранить ковариантность описания системы связанных нуклонов, что важно для моделей, претендующих на последовательное релятивистское описание. Кроме того, ядро взаимодействия нелокально. Как было показано в [26, 27], это свойство важно для описания различных наблюдаемых как в случае рассеянных, так и в случае связанного состояния системы нейтрон-протон. В рамках подхода БС с сепарабельным ядром удалось описать процессы упругого и глубоко неупругого рассеяния электрона на дейтроне [27], а также фоторасщепление дейтрона [28]. Реакция электрорасщепления потребовала отдельного рассмотрения, поскольку наличие нулевой компоненты импульса, в интегральном уравнении БС, которая в общем случае не фиксируется кинематикой, приводит к проблемам в вычислениях. Например, это сильно осложняет учет взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) между вылетающими нуклонами. ВКС в большинстве случаев оказывает сильное влияние на на-

блюдаемые, и потому им нельзя пренебрегать. Однако с сепарабельными ядрами стандартного вида [29, 30] подобное вычисление невозможно в принципе, так как они приводят к неинтегрируемым сингулярностям. Чтобы обойти эту трудность, мы использовали сепарабельные функции нового вида [31], которые не содержат полюсов на действительной оси [32] в комплексной плоскости нулевой компоненты импульса и, как следствие, не приводят к сингулярностям.

Таким образом, в представленной диссертационной работе предлагается новое сепарабельное ядро, не приводящее к неинтегрируемым выражениям, для описания различных парциальных состояний системы нейтрон-протон (np) с полным моментом $J = 0, 1$. В рамках подхода БС с сепарабельным ядром взаимодействия рассматривается реакция электрорасщепления дейтрона. Расчеты проводятся в импульсном приближении плоских волн (ИППВ). Исследуются аналитические особенности, присущие реакциям с участием электрона в однофотонном приближении, а именно: факторизация электронного и адронного токов в матричном элементе, описывающем реакцию. Проводится сравнение результатов релятивистского и нерелятивистского вычислений, а также приводится предельный переход от релятивистского выражения для адронного тока к нерелятивистскому. Для полноты изложения приведены формулы для расчета ВКС, хотя само вычисление в рамках данной работы не проводится.

Основной целью данной диссертации является исследование нуклон-нуклонных взаимодействий в подходе Бете-Солпи-

тера с сепарабельным ядром. Рассматриваются рассеянные и связанные состояния np -системы в широкой области энергий. Для этого предлагается новая параметризация для входящих в ядро взаимодействия уравнения БС сепарабельных функций. При этом не возникает необходимости исключать из рассмотрения нулевую компоненту импульса интегрирования, чтобы выражения не становились неинтегрируемыми. Таким образом, в рамках предлагаемого подхода сохраняется свойство ковариантности, которое является неотъемлемым требованием при построении релятивистского описания. Подход позволяет выйти за рамки принципиальных ограничений, с которыми сталкиваются другие модели описания нуклон-нуклонных взаимодействий. Разработанные функции можно использовать для описания процесса тормозного излучения в np -рассеянии, а также для описания различных процессов с участием дейтрона, таких как: упругое eD -рассеяние при больших переданных импульсах, глубоконеупругое рассеяние электронов на дейтроне, фоторасщепление дейтрона и так далее. Связанная система нейтрон-протон (дейтрон) исследуется на примере рассмотрения эксклюзивного и инклюзивного процессов электрорасщепления в рамках ИППВ. Производится расчет сечения в нерелятивистском и релятивистском подходах с различными моделями ядер взаимодействий уравнения БС. Для сравнения приводятся результаты, полученные в других подходах, что позволяет исследовать влияние релятивистских эффектов и используемой модели нуклон-нуклонных взаимодействий. Обсуждается влияние

на наблюдаемые выборы модели электромагнитных формфакторов нуклонов.

Научная новизна и практическая ценность. В работе предлагаются новые сепарабельные ядра для описания парциальных состояний np -системы с полным моментом $J = 0, 1$. Построенные ядра позволяют описывать экспериментальные данные одинаково хорошо как в области низких, так и в области высоких энергий единым сепарабельным ядром. Построенные ядра не приводят в вычислениях к неинтегрируемым сингулярностям даже при условии учета нулевой компоненты импульса интегрирования, в отличие от своих предшественников (типа релятивистского ядра Graz II [33]), что позволяет проводить ковариантное описание процессов с участием дейтрона без каких-либо принципиальных ограничений.

Представлено исследование связанного (дейтрон) и рассеянного состояний np -системы в рамках подхода Бете-Солпитера с сепарабельным ядром взаимодействия. Дейтрон исследуется в реакции электрорасщепления в рамках однофотонного приближения. В этом случае в получаемых выражениях можно разделить электронный (описывающий рассеяние электрона) и адронный (описывающий взаимодействие нуклонов в дейтроне) токи, а в импульсном приближении плоских волн при условии, что нейтрон является зрителем, - и квадраты модулей матричных элементов процесса для различных парциальных состояний дейтрона (свойство факторизации). Проведенные в подходе БС релятивистские и нерелятивистские расчеты сечения в

различных кинематических условиях и сравнение их друг с другом и с экспериментальными данными показали необходимость улучшения предложенных ранее ядер взаимодействий. Предлагаемое в работе новое ядро пригодно для описания процессов при больших энергиях рассматриваемых нуклонов.

С помощью ядер нового типа становится возможным выйти за рамки приближения плоских волн в вычислениях электро-расщепления дейтрона без необходимости перехода к одному из квазипотенциальных приближений. Например, это дает возможность учитывать и исследовать влияние эффектов взаимодействия в конечном состоянии на вычисляемые наблюдаемые. Такое ядро может быть востребовано для расчета процессов в ядерной материи (в звездном веществе), где использование сепарабельных ядер взаимодействий обусловлено тем, что с ними легко проводить вычисления, в то время как реалистические потенциалы слишком громоздки для этой цели.

Предложенный подход - релятивистская ковариантная модель нуклон-нуклонных взаимодействий, позволяющая описывать процессы с участием дейтрона в широкой области энергий.

Апробация работы. Результаты, представленные в данной диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна). А также на международной Балдинской конференции (ISHEPP-2004, ISHEPP-2006, ISHEPP-2008) (Дубна), на XIV научной конференции "ОМУС 2010" (Дубна), на международных

конференциях: "Symmetries and Spin" (Прага, Чехия, 2004); International Workshop "Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV" (Модра-Гармония, Словакия, 2006; Стара Лесна, Словакия, 2009); The Fourth International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics (Тайбей, Тайвань, 2009); "Relativistic Description of Two- and Three-body Systems in Nuclear Physics" (Тренто, Италия, 2009).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано работ: 5 - в журналах из списка ВАК, 4 - в трудах конференций, 1 - в виде электронного препринта.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из трех глав, введения, заключения и восьми приложений, общим объемом 165 страниц, включая 14 таблиц, 51 рисунок и список цитированной литературы из 133 наименований.

Во Введении обсуждаются причины, по которым исследование нуклон-нуклонных (NN) взаимодействий является интересной и актуальной задачей. Делается обзор существующих моделей NN взаимодействий, а также обсуждаются преимущества использования предлагаемого нами подхода, основанного на решении уравнения Бете-Солпитера с сепарабельным ядром взаимодействия. Приведены примеры использования данного подхода для описания различных реакций с участием дейтрона.

В первой главе излагается общий формализм описания *nr*-взаимодействий. Он основывается на решении интегрального

уравнения Бете-Солпитера для состояний рассеяния

$$T(p', p; P) = V(p', p; P) + \frac{i}{4\pi^3} \int d^4k V(p', k; P) S_2(k; P) T(k, p; P) \quad (1)$$

для T -матрицы, где V - ядро взаимодействия (у нас - нуклонов в дейтроне), S_2 - двухчастичная функция Грина, и уравнения для связанных состояний:

$$\Phi^{JM}(p; P) = \frac{i}{(2\pi)^4} S_2(p; P) \int d^4k V(p, k; P) \Phi^{JM}(k; P), \quad (2)$$

где Φ - амплитуда Бете-Солпитера, описывающая систему двух связанных нуклонов. Здесь p (p') - импульс начальных (конечных) нуклонов, P - полный импульс системы, J, M - полный угловой момент системы и его проекция. Основой подхода является представление ядра взаимодействия V в сепарабельном виде:

$$V(p', p) = \tilde{G}(p') \Lambda G(p), \quad (3)$$

где функции G называются формфакторами, Λ - матрица параметров. В этом случае каждое из интегральных уравнений (1), (2) можно свести к системе линейных уравнений, которая легко решается.

Во второй главе предлагается параметризация формфакторов сепарабельного ядра (3) функциями вида:

$$g(p_0, \mathbf{p}) \sim \frac{1}{((p_0^2 - \mathbf{p}^2 - \beta^2)^2 + \alpha^4)^n}, \quad (4)$$

где α, β - параметры, которые определяются из анализа экспериментальных данных в упругом np -рассеянии, n - любое целое число. Ядро взаимодействия с такими функциями не содержит полюсов на действительной оси в плоскости комплексной нулевой компоненты относительного импульса p_0 . Это, в свою очередь, позволяет решить проблему, связанную с принципиальной невозможностью проведения вычислений наблюдаемых с релятивистским сепарабельным ядром Graz II [33] при больших энергиях, в котором полюсы по p_0 приводят к неинтегрируемым сингулярностям при интегрировании по 3-мерному импульсу \mathbf{p} . В рамках представленной модели выводятся формулы для наблюдаемых, с помощью которых вычисляются параметры ядра взаимодействия. Полученные численные значения для фаз np -рассеяния и низкоэнергетических параметров (длина рассеяния, эффективный радиус и т.д.), а также характеристик дейтрона сравниваются с экспериментальными данными и результатами, полученными в других моделях.

В третьей главе электрорасщепление дейтрона детально рассматривается в однофотонном приближении. Представлен вывод дифференциального сечения $d^3\sigma/dE'd\Omega'dE_p$ для эксклюзивного процесса $d(e, e')n$, которое затем вычисляется в релятивистском и нерелятивистском подходах. Полученные результаты сравниваются с экспериментом в различных кинематических условиях при небольших переданных импульсах. Приводится предельный переход от релятивистского описания к нерелятивистскому. Обсуждается свойство факторизации адронной

части в сечении, когда вылетающие нуклоны считаются свободными (приближение плоских волн) и не учитывается взаимодействие налетающего электрона с нейтроном в дейтроне (нейтрон - спектатор). Также выводится инклюзивное сечение $d^2\sigma/dQ^2 d|\mathbf{p}_n|$ для электрорасщепления дейтрона $d(e, e'n)p$. Расчет такого сечения проводится при больших переданных импульсах Q^2 и потому позволяет проверить различные модели электромагнитных формфакторов нуклонов. Кроме того, сравнение результатов, полученных в рамках различных моделей NN взаимодействий, позволяет исследовать влияние используемой модели и релятивистских эффектов.

В Приложениях приведены нормировки, используемые для спиноров нуклонов и электронов. Показано, как можно упростить вычисление матричных элементов адронного тока дейтрона, сокращая число входящих в них матриц Дирака и устанавливая связь для одночастичных токов взаимодействия виртуального фотона с протоном и с нейтроном в дейтроне с помощью принципа Паули. Показано, как преобразуется фазовый объем, входящий в обсуждаемые сечения, при переходе из системы покоя np -пары в систему покоя дейтрона. Приводится способ упрощения интегралов при расчете матричных элементов тока дейтрона с учетом взаимодействия в конечном состоянии как в нерелятивистском, так и в релятивистском описаниях. Также приведены некоторые кинематические соотношения для входящих в вычисляемые сечения электрорасщепления величин и изложен вывод общего для процессов с участием электрона

свойства факторизации адронной части в сечении.

На защиту выдвигаются следующие результаты:

1. В рамках подхода Бете-Солпитера предложено сепарабельное ядро нуклон-нуклонных взаимодействий на основе нового класса функций, которые не содержат полюсов по нулевой компоненте относительного импульса на действительной оси и в расчетах не приводят к неинтегрируемым сингулярностям. Разработан метод вычисления наблюдаемых в различных реакциях с подобными функциями.
2. Параметры ядра найдены из анализа экспериментальных данных по упругому np -рассеянию: низкоэнергетических характеристик (длина рассеяния, эффективный радиус) упругого np -рассеяния и дейтрона (энергия связи, асимптотическое отношение и т.д.) и фаз рассеяния в парциальных каналах с полным угловым моментом $J = 0, 1$. Особенностью полученного ядра является широкая область применимости по энергиям взаимодействующих нуклонов.
3. В предложенном подходе исследована реакция эксклюзивного электрорасщепления дейтрона. Получено сечение для неполяризованных частиц в импульсном приближении без учета взаимодействия вылетающих нуклонов в рамках нерелятивистского и релятивистского подходов. Результаты проведенных численных расчетов находятся в хорошем согласии с экспериментом в обоих случаях при малых импульсах отдачи вылетающего нейтрона. Показано возрастание сечения с энергией вылетающего нейтрона.

тание роли релятивистских эффектов с увеличением импульса.

4. Продемонстрировано характерное для процессов развала дейтрона свойство факторизации адронного тока в дифференциальном сечении в рамках импульсного приближения плоских волн, когда нейтрон рассматривается в качестве зрителя.
5. Проведенный с помощью нового ядра расчет инклюзивного сечения электрорасщепления при больших переданных импульсах (Lab experiment E-94-019) показывает сильную зависимость от асимптотического поведения импульсного распределения используемой модели нуклон-нуклонных взаимодействий, а также от выбора модели формфакторов нуклонов. В импульсном приближении без учета взаимодействия в конечном состоянии удастся получить хорошее согласие с экспериментом при небольших импульсах отдачи нейтрона.

Список публикаций:

1. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, A. A. Goy, E. P. Rogochaya, Phys. Part. Nucl., Lett. **2**, No. 5(128), 323-326 (2005).
2. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, E. P. Rogochaya, A. A. Goy, Phys. Atom. Nucl. **70**, No. 12, 2054-2065 (2007) [arXiv:nucl-th/0612071].

3. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, W-Y. Pauchy Hwang, E. P. Rogochaya, JETP, Lett. **87**, iss. 12, 653-658 (2008) [arXiv:0804.3525 [nucl-th]].
4. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, W-Y. Pauchy Hwang, E. P. Rogochaya, Nucl. Phys. **A 832**, 233-248 (2010) [arXiv:0810.4470 [nucl-th]].
5. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, W.-Y. Pauchy Hwang, E. P. Rogochaya, Nucl. Phys. **A**, doi:10.1016/j.nuclphysa.2010.08.007, 17 pp. [arXiv:1002.0487 [nucl-th]].
6. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, E. P. Rogochaya, Y. Yanev, Proceedings of the XVIII International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic nuclear physics and quantum chromodynamics". Dubna, 2006. V. II, p. 120-129 [arXiv:0806.4866 [nucl-th]].
7. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, A. A. Goy, E. P. Rogochaya, Proceedings of the 9th International Workshop "Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV" SAS, JINR. Modra-Harmonia, Slovakia, 2006. P. 76-91 [nucl-th/0611028].
8. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, E. P. Rogochaya, Proceedings of the 10th International Workshop "Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV" SAS, JINR. Stara Lesna, Slovakia, 2009. P. 90-101.

9. С. Г. Бондаренко, В. В. Буров, Е. П. Рогочая, Труды XIV-ой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ. Дубна, Россия, 2010. Р. 50-53.
10. S. G. Bondarenko, V. V. Burov, E. P. Rogochaya, arXiv: 1008.0107 [nucl-th], 7pp.

Список литературы

- [1] Salabura P. et al. (HADES Collaboration). Acta Phys. Polon. B **35** (2004) 1119-1129.
- [2] Holzmann R. et al. (HADES Collaboration). Prog. Part. Nucl. Phys. **53** (2004) 49-58.
- [3] Mathiot J.F. Nucl. Phys. A **412** (1984) 201-227.
- [4] Mosconi B., Pauschenwein J., Ricci P. Few-Body Syst., Suppl. **6** (1992) 223-228.
- [5] Wilbois T., Beck G., Arenhövel H. Few-Body Syst. **15** (1993) 39-66.
- [6] Котляр В.В., Мельник Ю.П., Шебеко А.В. ЭЧАЯ **26**, вып. 1 (1995) 192-274.
- [7] Ogawa K., Kamae T., Nakamura K. Nucl. Phys. A **340** (1980) 451-481.

- [8] Боголюбов Н.Н., Медведев Б.В., Поливанов М.К. Вопросы теории дисперсионных соотношений. М.: Физматлит, 1958. 204с.
- [9] Gakh G.I., Rekalov A.P., Tomasi-Gustafsson E. *Annals Phys.* **319** (2005) 150-216 [hep-ph/0412112].
- [10] Salpeter E.E., Bethe H.A. *Phys. Rev.* **84**, No. 6 (1951) 1232-1242.
- [11] Lurie D. *Particles and Fields*. New-York: Interscience Publisher, 1968.
- [12] Korchin A.Yu., Shebeko A.V. Preprint КРТИ.88-56. - 24p.
- [13] Gross F. *Modern Topics in Electron Scattering*. World Scientific, 1991.
- [14] Dorkin S.M., Beyer M., Semikh S.S., Kaptari L.P. *Few Body Syst.* **42** (2008) 1-32 (arXiv:0708.2146 [nucl-th]).
- [15] Nakanishi N. *Prog. Theor. Phys. Suppl.* **43** (1969) 1-81.
- [16] Carbonell J., Karmanov V.A. *Eur. Phys. J. A* **27** (2006) 11-21.
- [17] Blankenbecler R., Sugar R. *Phys. Rev.* **142**, No. 4 (1966) 1051-1059.
- [18] Logunov A.A., Tavkhelidze A.N. *Nuovo Cim.* **29** (1963) 380; Kadyshevsky V.G. *Nucl. Phys. B* **6** (1968) 125-148.

- [19] Pascalutsa V., Tjon J.A. Phys. Rev. C **61** (2000) 054003-1 - 054003-20.
- [20] Браун Дж., Джексон А.Д. Нуклон-нуклонные взаимодействия. М.: Атомиздат, 1976. 248с.
- [21] Ажгирей Л.С., Юдин Н.П. ЭЧАЯ **37**, вып. 4 (2006) 1011-1109 [Azhgirey L.S., Yudin N.P. Phys. Part. Nuclei **37**, No. 4 (2006) 535-586].
- [22] Akulinichev S.V. PRINT-93-0337 (Moscow), TAMU-CI-93-06, 1993 (nucl-th/9303024).
- [23] Mangin-Brinet M., Carbonell J., Karmanov V.A. Phys. Rev. C **68** (2003) 055203-1 - 055203-41 (hep-th/0308179).
- [24] Carbonell J., Desplanques B., Karmanov V.A., Mathiot J.F. Phys. Rept. **300** (1998) 215-347 (nucl-th/9804029).
- [25] Krutov A.F., Troitsky V.E. Phys. Part. Nucl. **40** (2009) 136-161.
- [26] Machleidt R. Phys. Rev. C **63** (2001) 024001-1 - 024001-32 (arXiv:nucl-th/0006014).
- [27] Bondarenko S.G., Burov V.V., Molochkov A.V., Smirnov G.I., Toki H. Prog. Part. Nucl. Phys. **48** (2002) 449-535.
- [28] Bondarenko S.G., Burov V.V., Kazakov K.Yu., Shulga D.V. Phys. Part. Nucl. Lett. 1 (2004) 178-185 [Письма в ЭЧАЯ. **1**, No. 4(121) (2004) 17-29].

- [29] Mathelitsch L., Plessas W., Schweiger W. Phys. Rev. C **26** (1982) 65-76.
- [30] Haidenbauer J., Plessas W. Phys. Rev. C **30** (1984) 1822-1839.
- [31] Schwartz K., Frölich J., Zingl H.F.K., Streit L. Acta Physica Austriaca **53** (1981) 191-202.
- [32] Bondarenko S.G., Burov V.V., Pauchy-Hwang W.-Y., Rogochaya E.P. JETP, Lett. **87**, iss. 12 (2008) 753-758.
- [33] Rupp G., Tjon J.A. Phys. Rev. C **41** (1990) 472-483.