

Л В Э

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-99-322

На правах рукописи
УДК 539.12.01

Б-811

БОНДАРЕНКО
Сергей Григорьевич

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДЕЙТРОНА
В ФОРМАЛИЗМЕ БЕТЕ-СОЛПИТЕРА

Специальность: 01.04.16 — физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1999

Общая характеристика диссертации.

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор

В.В. БУРОВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

А.В. ШЕБЕКО (ННЦ ХФТИ, г.Харьков)

кандидат физико-математических наук

С.А. КУЛАГИН (ИЯИ РАН, г.Москва)

Ведущая организация:

Научно - исследовательский институт ядерной физики Московского государственного университета, г. Москва.

Защита диссертации состоится "19" января 2000 г. на заседании диссертационного совета К 047.01.01 при Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "16" декабря 1999 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

доктор физико-математических наук



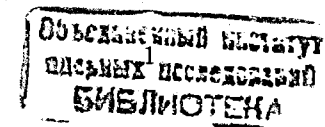
А.Е. ДОРОХОВ

Актуальность темы. Изучение статических и динамических электромагнитных свойств легких ядер дает возможность глубже понять природу сильных взаимодействий и, в частности, нуклон-нуклонных взаимодействий. Актуальность таких исследований связана со значительным экспериментальным материалом накопленным на сегодняшний день, а также с планируемыми новыми экспериментами, которые позволят продвинуться в область больших передач импульса в упругих электрон-ядерных реакциях, а также в процессах электро- и фоторасщепления ядер.

Большие энергии в реакциях подразумевают использование релятивистских подходов. Уравнение Бете-Солпитера, возникшее в результате применения квантово-полевых методов к двухчастичной задаче (E.E.Salpeter and H.A.Bethe, 1951), а также разработанная техника вычисления наблюдаемых (S.Mandelstam, 1955), составляют основу ковариантного самосогласованного подхода. Однако, исследование малочастичных ядерных систем (включая простейшую ядерную систему - дейтрон) тормозилось многочисленными трудностями, в том числе техническими.

Современный интерес к использованию формализма Бете-Солпитера для описаний реакций с легкими ядрами вызван прежде всего новейшими экспериментальными данными, полученными в таких центрах как TJNAF, Bates, JINR, CERN, DESY и др. Особую актуальность вызывают измерения поляризационных характеристик в упругих электрон-, адрон-дейтронных реакциях, процессах расщепления дейтрона с участием как электронов и фотонов, так и адронов в области больших передач импульса. Изучение поляризационных наблюдаемых дает новый, более глубокий уровень понимания нуклон-нуклонных взаимодействий, их зависимости от спиновых характеристик.

Другой активно обсуждаемой в последнее время проблемой, представляющей несомненно огромный интерес, является извлечение из экспериментов с легкими ядрами информации о структуре связанного нуклона. Такого рода задачи требуют последовательного и максимально точного исследования побочных искажающих эффектов, не связанных с нуклонной структурой, учитывающих релятивистскую кинематику реакции и динамику взаимодействия. Именно поэто-



му построение самосогласованного ковариантного подхода и подробный анализ релятивистских эффектов в электромагнитных реакциях с легкими ядрами является актуальной и интересной задачей.

Целью работы является подробное исследование статических и динамических свойств дейтрона в реакциях упругого eD -рассеяния и электрорасщепления дейтрона в формализме Бете-Солпитера; анализ релятивистских эффектов в ковариантном подходе.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации рассмотрены реакции упругого eD -рассеяния и электрорасщепления дейтрона в формализме Бете-Солпитера, последовательно исследованы релятивистские эффекты.

Найдена связь релятивистских P -волн с нерелятивистскими мезонными обменными токами.

Проведены расчеты наблюдаемых в упругом электрон-дейтронном рассеянии с различными моделями нуклонных форм-факторов. Расчеты позволяют сделать вывод о применимости моделей в различных кинематических режимах. Сделаны предсказания о поведении компонент тензора поляризации дейтрона для экспериментальных условий TJNAF.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах Лаборатории теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна), Лаборатории теоретической и ядерной физики Дальневосточного государственного университета (г.Владивосток), физических факультетов университетов г.Росток, г.Гиссен, г.Бонн (ФРГ), г.Токио, г.Хиросима, г.Осака, г.Кобе, Токийского Института Ядерной Физики (Япония), а также представлялись и докладывались на международных симпозиумах "Дейтрон 95", "Дейтрон 97", "Дейтрон 99" (Дубна, 1995, 1997, 1999), международном рабочем совещании "Современные проблемы малочастичных систем" (Дубна, 1997), международном совещании "Симметрия и спин" – Прага. Спин-97 (Прага, Чехия, 1997), XIII и XIV международных семинарах по проблемам физики высоких энергий "Релятивистская ядерная физика и квантовая хромодинамика" (Дубна, 1996, 1998).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 работ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений общим объемом 112 страниц, включая 5 таблиц, 16 рисунков и список цитированной литературы из 100 наименований.

Содержание работы

Во введении обсуждается актуальность работы и место подхода Бете-Солпитера (БС) в изучении свойств малочастичных систем, сформулированы рассматриваемые проблемы.

Первая глава носит вводный характер и посвящена обсуждению основных понятий формализма Бете-Солпитера: после введения уравнения БС и соответствующей терминологии (раздел 1), рассматривается парциальное разложение амплитуды БС с использованием различных представлений (раздел 2). Кроме стандартного представления прямого произведения строится матричное представление двухчастичного базиса, которое позволяет свести суммирование по спинорным индексам к нахождению следа произведения γ -матриц Дирака и тем самым значительно упростить и автоматизировать процедуру вычислений. Находятся спин-угловые функции амплитуды БС для различных каналов. Также обсуждаются решения уравнения БС, используемые в данной диссертации (раздел 3): решение для амплитуды БС, полученное в лестничном приближении и решение для T -матрицы, полученное с сепарабельным ядром взаимодействия.

Вторая глава посвящена исследованию реакции упругого электрон-дейтронного рассеяния. После определения релятивистской кинематики процесса и введения основных определений реакции (раздел 1), рассматривается структура матричного элемента оператора электромагнитного тока в релятивистском импульсном приближении. После проведения аналитических расчетов матричного элемента анализируется его структура (раздел 2). Затем приводятся численные расчеты зарядового F_C , магнитного F_M и квадрупольного F_Q форм-факторов дейтрона, структурных функций A и B , компонент тензора поляризации T_{20} , T_{21} , T_{22} дейтрона. Исследуется также влияние нуклонных электромагнитных форм-факторов на перечисленные выше характеристики, в частности на поляризационные наблюдаемые (раздел 3). Расчеты проводятся для трех моделей нуклонных форм-факторов: дипольной модели, модели доминантности векторных мезонов (МДВМ) и модели релятивистского гармонического осциллятора

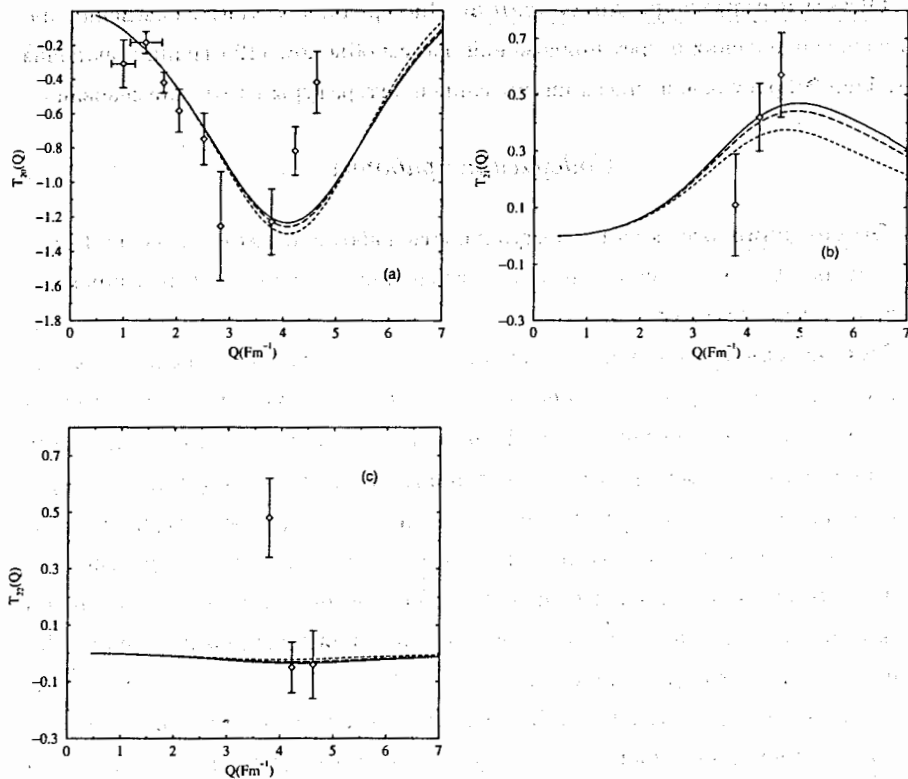


Рис. 1. (а) Компонента $T_{20}(q^2)$ тензора поляризации дейтрона ($\theta_e = 70^\circ$). (б) Компонента $T_{21}(q^2)$ ($\theta_e = 78.7^\circ$). (с) Компонента $T_{22}(q^2)$ ($\theta_e = 78.7^\circ$). Обозначения и экспериментальные значения даны в тексте.

(MRGO). Проводится обсуждение полученных результатов. Отмечается, что при $Q^2 \sim 50 \text{ Фм}^{-2}$ различные модели нуклонных форм-факторов приводят к сильным расхождениям в расчетах компоненты T_{21} тензора поляризации дейтрона и в тоже время не оказывают значительного влияния на компоненты T_{20} и T_{22} (рис. 1): сплошная кривая – дипольная модель, короткий пунктир – MRGO и длинный пунктир – МДВМ. Экспериментальные данные из: для рис.1(а) – The, I. *et al.*, Phys. Rev Lett., 67, p.173 (1991); для рис.1(б),(с) – Garcon, M. *et al.*, Phys. Rev. C49, p.2516 (1994).

Третья глава содержит исследование электромагнитных моментов дейтрона с использованием решения уравнения БС для амплитуды в лестничном приближении (глава I, раздел 3). После определения магнитного и квадрупольного моментов дейтрона как предела соответствующих комбинаций матричных элементов электромагнитного тока при $Q^2 \rightarrow 0$ (раздел 1) проводятся аналитические расчеты выражений для магнитного (раздел 2) и квадрупольного (раздел 3) моментов в терминах амплитуд БС, а затем и численные расчеты.

В результате аналитических расчетов были получены следующие релятивистские выражения для магнитного момента:

$$\mu_D = \mu_{NR} + \Delta\mu,$$

$$\Delta\mu = R_+ + \Delta\mu_- + \mu_{3-}.$$

Здесь

$$\mu_{NR} = (\mu_p + \mu_n) - \frac{3}{2}(\mu_p + \mu_n - \frac{1}{2})p_D,$$

нерелятивистское выражение для магнитного момента дейтрона, μ_p, μ_n – магнитные моменты протона и нейтрона, p_D – псевдовероятность релятивистской ${}^3D_1^+$ -волны в дейтроне, R_+ – релятивистские поправки к вкладу волн с положительной энергией, обусловленные исключительно релятивистской кинематикой (Лоренц-преобразованиями), $\Delta\mu_-$ – вклад переходов между волнами с отрицательной энергией и другими волнами, а также переходы между P -волнами, μ_{3-} – вклад переходов между волнами с положительной энергией и P -состояниями.

Проведенные численные расчеты магнитного момента дейтрона показали, что:

- полное релятивистское значение магнитного момента дейтрона составило $\mu_D = 0.856140 (e/2m)$, что на 0.15% меньше экспериментального ($\mu_{exp} = 0.857406 \pm 10^{-6} (e/2m)$);

- наибольшую поправку к нерелятивистскому значению в полный момент дает вклад $\mu_{3-} = 6.099 \cdot 10^{-3}$, который положителен и составляет около 0.71% от полного значения;

- поправка $R_+ = -9.75 \cdot 10^{-4}$ – отрицательна и составляет 0.11% от μ_D ;

- поправка $\Delta\mu_- = 2.99 \cdot 10^{-4}$ – положительна и составляет всего около 0.04% от μ_D .

Из расчетов квадрупольного момента дейтрона следует, что основной вклад ($Q_p^{++} = 0.2690 \text{ Фм}^2$) в момент дает член содержащий переходы между волнами с положительной энергией, который при некоторых предположениях может быть соотнесен с нерелятивистским выражением для квадрупольного момента дейтрона. Остальные переходы суммарно дают отрицательную поправку -0.0012 Фм^2 . Окончательное значение рассчитанного квадрупольного момента составляет 0.2678 Фм^2 , что на 6% меньше экспериментального ($Q_D^{exp} = 0.2859 \pm 0.003 \text{ Фм}^2$).

Четвертая глава посвящена подробному анализу вклада релятивистских P -волн в магнитный момент дейтрона. Для этого сначала была проведена нерелятивистская редукция выражений для магнитного момента (раздел 1), включающая: 1) интегрирование по нулевой компоненте относительного импульса и учет только полюса от положительной части двухчастичного пропагатора; 2) k/m -разложение до членов второго порядка. В результате, полученные выражения содержат зависимость от радиальных частей вершинных функций БС при фиксированной относительной энергии $\bar{k}_0 = M/2 - E_k$, где M – масса дейтрона, а $E_k = \sqrt{m^2 + k^2}$. Функции, отвечающие волнам с положительной энергией ${}^3S_1^+$ и ${}^3D_1^+$ могут быть теперь заменены на нерелятивистские $u(p)$ и $w(p)$ волновые функции дейтрона. Для того чтобы выразить функции соответствующие P -волнам в терминах нерелятивистских волновых функций необходимо воспользоваться приближением одной итерации (раздел 2). В результате (при рассмотрении уравнения БС в лестничном приближении с обменом только пионом) для P -волн было получено:

$$g_{3P_1}(\bar{k}_0, k) = -(-3) \frac{4\pi\sqrt{2M}}{\sqrt{3m}} \frac{g_{\pi NN}^2}{4\pi} \int_0^{+\infty} dr \frac{e^{-\mu_\pi r}}{r} (1 + \mu_\pi r)(u(r) + \frac{1}{\sqrt{2}}w(r)) j_1(kr),$$

$$g_{1P_1}(\bar{k}_0, k) = -(-3) \frac{4\pi\sqrt{2M}}{\sqrt{3m}} \frac{g_{\pi NN}^2}{4\pi} \int_0^{+\infty} dr \frac{e^{-\mu_\pi r}}{r} (1 + \mu_\pi r)(-\frac{1}{\sqrt{2}}u(r) + w(r)) j_1(kr),$$

где μ_π – масса пиона, а $g_{\pi NN}$ – константа пион-нуклонной связи. Остальные P -волны оказались равными нулю.

На основе полученных выражений было проведено $g_{\pi NN}$ -разложение и показано, что:

– переходы между волнами с положительной энергией аналитически воспроизводят вклад нерелятивистского импульсного приближения;

– переходы между волнами с положительной энергией и P -волнами аналитически воспроизводят вклад изоскалярного пионного парного тока.

В пятой главе рассматривается процесс электрорасщепления дейтрона около порога. После описания релятивистской кинематики процесса (раздел 1), изучаются поляризационные наблюдаемые реакции и показывается, что если в конечном состоянии np -пары учитывать только 1S_0 -состояние, то различные ассиметрии для векторно-поляризованного дейтрона и тензорная анализирующая способность дейтрона зависят лишь от кинематических переменных (раздел 2). Аналитически рассчитывается матричный элемент электромагнитного тока (раздел 3). После проведения нерелятивистской редукции полученных выражений (раздел 4) и применения формул, найденных в приближении одной итерации (глава 4, раздел 2), показывается, что переходы между волнами с положительной энергией соответствуют нерелятивистскому импульсному приближению, а переходы между релятивистскими P -волнами и состояниями с положительной энергией – нерелятивистскому изовекторному парному току (раздел 5). Проводится обсуждение полученных результатов.

В заключении подведены итоги исследования электромагнитных свойств дейтрона в формализме БС и сформулированы основные выводы и результаты диссертации.

В приложения А, Б и В вынесены громоздкие аналитические выражения.

На защиту выдвигаются следующие результаты. В рамках релятивистского подхода Бете-Солпитера:

1. впервые построено матричное представление двухнуклонного базиса для парциального разложения амплитуды Бете-Солпитера и вычислены спин-угловые функции в различных каналах;
2. исследована реакция упругого электрон-дейтронного рассеяния с использованием релятивистского сепарабельного ядра взаимодействия (Graz II), изучены релятивистские эффекты кинематического характера (Лоренц-преобразования), исследовано влияние нуклонных форм-факторов на наблюдаемые в этом процессе, даны предсказания для компонент тензора поляризации;
3. впервые получены полные аналитические релятивистские выражения для магнитного и квадрупольного моментов дейтрона и проведены численные

расчеты с использованием амплитуды Бете-Солпитера, полученной в лестничном приближении;

4. впервые с помощью приближения одной итерации получены выражения, связывающие P -волны амплитуды Бете-Солпитера с S - и D -компонентами нерелятивистской волновой функции дейтрона. С использованием найденной связи был проведен анализ магнитного момента дейтрона и амплитуды электрорасщепления дейтрона около порога и показано, что переходы включающие в себя P -волны аналитически воспроизводят парные мезонные токи, возникающие в нерелятивистском подходе;

5. показано, что в реакции электрорасщепления дейтрона около порога, при учете только 1S_0 -канала в конечном состоянии, поляризационные характеристики дейтрона зависят только от кинематических переменных.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. S.G.Bondarenko, V.V.Burov, S.M.Dorkin. "Dispersion approach for nucleon-nucleon interaction". Proc. of the International Conference "Mesons and nuclei at intermediate energies", Dubna, 1994. World Scientific Publishing Co., Singapore, 1994, pp.613-618.
2. M.Beyer, S.G.Bondarenko, V.V.Burov, S.M.Dorkin. "Magnetic moment of the deuteron as probe of relativistic corrections". In: "Selected topics of nuclear physics". Dubna D2,4-95-470, 1995, pp.61-67.
3. С.Г.Бондаренко, В.В.Буров, С.М.Доркин. "Ковариантные волновые функции Бете-Солпитера двухнуклонной системы". In: "Теория квантовых систем с сильным взаимодействием", Тверь, 1995, стр.31-39.
4. S.G.Bondarenko, V.V.Burov, S.M.Dorkin. "Elastic form factors of the deuteron in the Bethe-Salpeter approach and charge form factor of the neutron". Proc. of the XII ISHEPP "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics". Dubna 1994. Eds. A.M. Baldin, V.V. Burov. E1,2-97-79. Dubna, 1997, v.II, pp.227-237.
5. L.P.Kaptari, A.Yu.Umnikov, S.G.Bondarenko, K.Yu.Kazakov, F.C.Khanna, B.Kampfer. "Bethe-Salpeter amplitudes and static properties of the deuteron". Phys. Rev. C54, 1996, pp.986-1005.

6. S.G.Bondarenko, V.V.Burov, M.Beyer, S.M.Dorkin. "Deuteron electrodisintegration near threshold in the Bethe-Salpeter approach". Preprint MPG-VT-UR 87/96, Rostock, 1996; E-print nucl-th/9612047.
7. S.G.Bondarenko, V.V.Burov, M.Beyer, S.M.Dorkin. "Can we learn anything new from polarization observables of the deuteron disintegration near threshold?" Proc. of the XIII ISHEPP "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics". Dubna 1996. Eds. A.M. Baldin, V.V. Burov. E1,2-98-154. Dubna, 1998, v.I, pp. 272-276.
8. S.G.Bondarenko, V.V.Burov, M.Beyer, S.M.Dorkin. "Isovector meson exchange currents in the Bethe-Salpeter approach". Phys. Rev. C58, 1998, pp.3143-3152.
9. С.Г.Бондаренко, В.В.Буров, М.Байер, С.М.Доркин. "О вкладе P -компонент амплитуды Бете-Солпитера в магнитный момент дейтрона". Ядерная Физика 62 (6), 1999, стр.983-991.
10. S.G.Bondarenko, V.V.Burov, M.Beyer, S.M.Dorkin. "Light-front versus Bethe-Salpeter forms of two nucleon amplitudes". Few Body Syst. 26 (2-4), 1999, pp.185-196.
11. S.G.Bondarenko, V.V.Burov, S.M.Dorkin. "On the sensitivity of polarization observables in the elastic eD -scattering to the neutron form factor". Ядерная Физика 63 (5), 2000, (in press).

Рукопись поступила в издательский отдел
10 декабря 1999 года.