

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА  
MATEMATICS AND MECHANICS

**Хохлов Н. А., Калугина Н. А., Лин Ко Ко**  
**N. A. Khokhlov, N. A. Kalugina, Ko Ko Lin**

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФОРМФАКТОРА НЕЙТРОНА  
ИЗ РЕАКЦИИ УПРУГОГО РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОНА НА ДЕЙТРОНЕ**

**THE EXTRACTION OF THE NEUTRON ELECTRIC FORM FACTOR FROM THE REACTION  
CONNECTED WITH ELASTIC SCATTERING OF ELECTRON ON DEUTERON**

**Хохлов Николай Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: nikolahokhlov@yandex.ru.

**Mr. Nikolay A. Khokhlov** – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Physics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av. E-mail: nikolahokhlov@yandex.ru.

**Калугина Наталья Анатольевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: natanat55@mail.ru.

**Ms. Natalia A. Kalugina** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Physics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av. E-mail: natanat55@mail.ru.

**Лин Ко Ко** – аспирант кафедры прикладной математики и информатики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: linkoko53@gmail.com.

**Mr. Ko Ko Lin** – a post-graduate student, Department of Applied mathematics and Informatics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Av. E-mail: linkoko53@gmail.com.

**Аннотация.** В работе показано, что статические электромагнитные свойства дейтрона могут быть описаны в рамках модели импульсного приближения для оператора двухнуклонного электромагнитного тока.

**Summary.** It is shown that the static electromagnetic properties of deuteron may be described in frames of the spectator approximation model for the two-nucleon electromagnetic current operator.

**Ключевые слова:** потенциал двухнуклонного взаимодействия, релятивистский формализм, дейтрон, нуклон, форм-фактор, оператор тока.

**Key words:** nucleon-nucleon potential, relativistic formalism, deuteron, nucleon, form factor, current operator.

УДК 538.171.11

Нуклон-нуклонное взаимодействие является основой для численного решения большинства задач современной ядерной физики, поскольку это взаимодействие определяет как структуру атомных ядер, так и динамику ядерных реакций. Обычным является описание этого взаимодействия нуклон-нуклонным (NN) потенциалом. Микроскопический, фундаментальный подход к построению такого потенциала предполагает его расчет в рамках квантовой хромодинамики. Однако такие расчеты в настоящее время нереализуемы. По этой причине все реалистические NN потенциалы, используемые в расчетах, являются феноменологическими. В таких микроскопически обоснованных моделях всегда имеются свободные параметры. Указанные параметры подгоняются численно с тем, чтобы наилучшим образом описать экспериментальные данные упругого NN рассеяния и статические свойства дейтрона. К сожалению, указанных данных недостаточно для однозначного определения NN потенциала.

В литературе на уровне учебников бытует мнение, что даже статические электромагнитные свойства дейтрона не могут быть описаны в рамках лишь двухнуклонной модели. Это заблуждение возникло во времена недостаточного развития численных методов и некоторой переоценки модели Юкавы. Модель Юкавы предполагает, что сильное взаимодействие между нуклонами обусловлено обменом мезонами, с массой несколько меньше массы нуклонов. Указанная модель в настоящее время представляет лишь исторический интерес, поскольку она имеет лишь качественный характер и не является микроскопической с точки зрения фундаментальной квантовой хромодинамики. Расчеты показывают, что, действительно, локальный потенциал с асимптотикой потенциала Юкавы и описывающий данные нуклон-нуклонного рассеяния не дает описания статических квадрупольного и магнитного моментов дейтрона. Однако нуклон-нуклонный потенциал лишь приближенно может рассматриваться как локальный и не является таким в современных реалистических моделях. Обычно предполагается, что согласия с экспериментальными значениями можно достичь введением аддитивных поправок в оператор электромагнитного тока двухнуклонной системы. Эти поправки учитывают влияние обменных мезонных токов на электромагнитные свойства NN системы. Имеющиеся в такой модели свободные параметры, действительно, могут быть подогнаны с тем, чтобы достичь согласия с экспериментом. Однако реалистических нуклон-нуклонных потенциалов много – порядка десяти только наиболее часто используемых в расчетах ядерных свойств и реакций. Эти потенциалы отличаются друг от друга также и различными параметрами мезонных обменных токов. Такая ситуация не является противоречивой. Нуклон-нуклонный потенциал не является наблюдаемой величиной и с микроскопической точки зрения нуклон-нуклонный потенциал, учитывающий только NN канал без связи с изобарными и другими возможными каналами, – это оптический потенциал, определение которого неоднозначно. В связи с этим возникает следующий вопрос: «Можно ли построить такой нуклон-нуклонный оптический потенциал, для которого влияние мезонных обменных токов будет минимальным или вовсе пренебрежимым?». Наличие такого потенциала существенно упростит расчет электромагнитных свойств ядер и электромагнитных реакций с ядрами. В настоящей работе мы показываем, что из электромагнитных свойств дейтрона можно извлечь волновую функцию дейтрона, которая описывает эти свойства без обменных добавок в двухнуклонный оператор электромагнитного тока.

Ранее нами был разработан в рамках точечной формы релятивистской квантовой механики формализм расчета электромагнитных реакций с двумя нуклонами. В работах [1; 2; 3; 4; 6; 7; 8] показано, что этот формализм дает хорошее согласие с экспериментальными результатами. Поскольку здесь мы используем этот формализм без изменений, здесь он не приводится. Детали его применения к расчету электромагнитных свойств дейтрона подробно описаны нами в [3; 5]. Здесь мы опишем, каким образом извлекалась волновая функция дейтрона.

Волновая функция дейтрона в импульсном представлении имеет следующий вид:

$$|\chi\rangle = \frac{1}{q} \sum_{l=0,2} u_l(q) |l, 1; 1M_J\rangle.$$

Здесь  $u_l(q)$  является радиальной частью функции с орбитальным моментом  $l$ ;  $|l, S; J| - M_J\rangle$  определяет спин-угловую часть волновой функции с суммарным спином  $S = 1$ , полным моментом  $J = 1$ , проекцией полного момента  $M_J$ ;  $q$  – импульс одного из нуклонов в системе отсчета покоящегося дейтрона.

Для радиальных волновых функций мы используем следующую удобную для расчетов параметризацию:

$$u_l(q) = \sum_{i=0}^n a_{l,i} R_{l,i}(r_0 \cdot q) + \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} \sum_{j=1}^m \frac{C_{l,j}}{q^2 + m_j^2}.$$

Здесь  $m_j = (0,23145 + (j-1) \cdot 0,5) \text{Фм}^{-1}$  обеспечивает правильную асимптотику функции.

Поведение волновой функции на малых расстояниях определяется функциями осцилляторного базиса

$$R_{l,i}(r) = (-1)^i \sqrt{\frac{2i!}{r_0 \Gamma(i+l+3/2)}} r^{l+1} e^{-r^2/2} L_i^{l+1/2}(r^2),$$

где  $L_i^\alpha(x)$  – присоединенные полиномы Лагера; осцилляторный радиус  $r_0 = 0,4$  Фм.

Постоянные  $a_{l,i}$  и  $C_{l,i}$  были нами подогнаны для наилучшего описания электромагнитных свойств дейтрона.

На рис. 1 показаны полученные в результате такой подгонки волновые функции дейтрона (eD) в сравнении с волновыми функциями дейтрона для реалистических потенциалов Боннского (CDBonn) [9], Парижского (Paris) [8], Московского (Moscow) [7], Аргонского (Argo18) [12], Идахо (Idaho) [4], Ниймегенских (NijmI и NijmII) [11] и JISP16 [10].

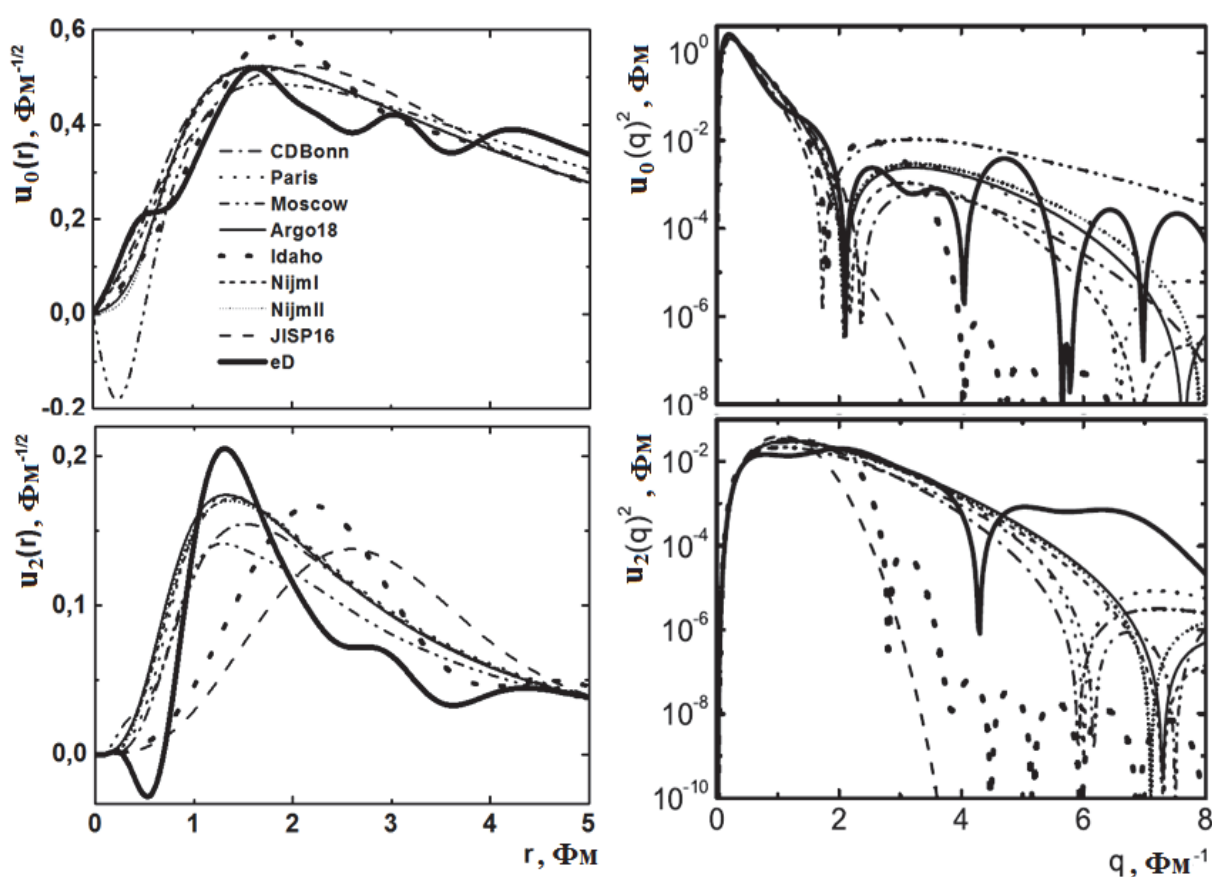


Рис. 1. Волновые функции дейтрона для различных реалистических потенциалов и извлеченная из электромагнитных свойств дейтрона (eD) сплошная линия: слева – волны в конфигурационном пространстве; справа – те же волны в импульсном пространстве

Мы видим, что некоторое варьирование волновых функций приводит к хорошему описанию электромагнитных свойств дейтрона, результаты их расчета для всех потенциалов приведены в табл. 1.

Результаты расчетов статических форм-факторов дейтрона

	$G_M(0)$	$G_Q(0)$
Эксперимент	1,715	25,83
CDBonn	1,704	24,39
Paris	1,694	25,21
Moscow	1,699	24,23
Argo18	1,694	24,42
Idaho	1,714	26,20
NijmI	1,695	24,60
NijmII	1,695	24,51
JISP16	1,714	26,12
eD	1,715	25,83

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кныр, В. А. Реакция эксклюзивного электрорасщепления дейтрона в рамках точечной формы релятивистской квантовой механики / В. А. Кныр, Н. А. Хохлов. – М.: Ядерная физика, 2007. – Т. 70. – № 12. – С. 2117-2128.
2. Хохлов, Н. А. Электродинамика двухнуклонных систем в точечной форме релятивистской квантовой механики / Н. А. Хохлов. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2011. – 182 с.
3. Хохлов, Н. А. Реакция упругого рассеяния электрона на дейтроне в релятивистской потенциальной модели / Н. А. Хохлов, А. А. Вакулук. – М.: Ядерная физика, 2015. – Т. 78. – № 1-2. – С. 97-109.
4. Entem, D. R. Accurate charge-dependent nucleon-nucleon potential at fourth order of chiral perturbation theory / D. R. Entem and R. Machleidt. – Phys. Rev. C 68, 041001, 2003. – P. 1-4.
5. Garcon, M. The Deuteron: structure and Form Factors / M. Garcon, J. W. Van Orden Adv. – Nucl. Phys. 26, 2001. – P. 293-373.
6. Khokhlov, N. A. Reconstruction of the optical potential from scattering data / N. A. Khokhlov, V. A. Knyr. – Phys. Rev. C 73, 024004, 2006. – P. 1-11.
7. Khokhlov, N. A. Nucleon-nucleon wave function with short-range nodes and high-energy deuteron photodisintegration / N. A. Khokhlov, V. A. Knyr, V. G. Neudatchin. – Phys. Rev. C 75, 064001, 2007. – P. 1-15.
8. Parametrization of the Paris N – N potential / M. Lancome, B. Loiseau, J. M. Richard [et al.]. – Phys. Rev. 21, C, 1980. – 861 p.
9. Machleidt, R. The Bonn meson-exchange model for the NN interaction / R. Machleidt, K. Holinde, Ch. Elster. – Phys. Reports., 1, 1999. – 149 p.
10. Shirokov, A. M., Mazur, A. I., Zaytsev, S. A., Vary, J. P., and T. A. Weber – Phys. Rev. C 70, 044005, 2004.
11. Stoks V. G. J., Klomp R. A. M., Terheggen C. P. F., and J. J. de Swart – Phys. Rev. C 49, 2950, 1994.
12. Wiringa, R. B. Accurate nucleon-nucleon potential with charge-independence breaking / R. B. Wiringa, V. G. J. Stoks and R. Schiavilla. – Phys. Rev. C 51, 1995. – P. 38-51.