УДК 538.171.11

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДЕЙТРОНА В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

Хохлов Н. А. – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры «Физика», e-mail: khokhlov@fizika.khstu.ru (ТОГУ)

В рамках точечной формы релятивистской квантовой механики получены выражения электромагнитных формфакторов дейтрона. Представлены результаты расчета статических магнитного и квадрупольного моментов дейтрона в релятивистской квазипотенциальной модели для Московского и Ниймегенского потенциалов нуклон-нуклонного взаимодействия.

Expressions of the electromagnetic deuteron formfactors are derived in frames of the point form of the relativistic quantum mechanics. Calculation results of the static magnetic and quadrupole moments of the deuteron are presented in the relativistic quasipotential model with the Moscow and Nijmegen potentials of the nucleon-nucleon interaction.

Ключевые слова: дейтрон, релятивистская квантовая механика, магнитный момент, квадрупольный момент, электромагнитные формфакторы, нуклон-нуклонное взаимодействие.

Одним из наиболее подходящих объектов для исследования проявлений кварковых и мезонных степеней свободы в ядерных реакциях в области действия непертурбативной квантовой хромодинамики является дейтрон. Эта область соответствует малым и промежуточным характерным энергиям реакции. При промежуточных энергиях (порядка энергии нуклона) необходим учет релятивистских поправок. В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал для реакции упругого рассеяния электрона на дейтроне при малых и промежуточных величинах переданного 4-импульса Q^2. Анализ этого материала позволяет получить зависимость электромагнитных формфакторов дейтрона от величины Q^2 [1]. В настоящей работе разработана техника расчета электромагнитных формфакторов в рамках релятивистского подхода, разработанного нами ранее и успешно применяемого для описания электромагнитных реакций с двумя нуклонами [2–4]. Выполнен расчет для статических электромагнитных формфакторов дейтрона.

Используемый в нашей работе подход основан на точечной форме динамики релятивистской квантовой механики [2–5]. Дейтрон описывается волновой функцией, которая является собственной функцией оператора массы системы. Потенциал вводится как возмущающая добавка к оператору квадрата массы. Волновая функция, описывающая состояние системы в системе центра масс, является решением уравнения типа Шредингера [2–3].

В наших предыдущих работах [2–4] описывались реакции, в которых двухнуклонная система находилась в состоянии рассеяния, по меньшей мере, в конечном состоянии. Это позволяло при расчете матричных элементов реакции учитывать взаимодействие в конечном состоянии как поправку к плосковолновому приближению. При этом использовались волновые функции нуклон-нуклонных состояний в координатном представлении. Такой подход, очевидно, не пригоден в настоящем случае. Использование импульсного представления позволяет точно учесть взаимодействие в конечном и в начальном состоянии. Для определения радиальных волновых функций используются, как и в работах [2–4], квазипотенциальное уравнение, парциальные нуклон-нуклонные потенциалы, описывающие данные упругого *NN*-рассеяния и свойства дейтрона. Используемая нами внутренняя часть волновой функции в импульсном представлении имеет вид:

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

где: $u_l(q)$ радиальная часть функции с орбитальным моментом l, $\left|l,1;1M_J\right\rangle = \sum_{m,\mu}\left|S=1,\mu\right\rangle Y_{lm}(\vec{n})C_{lm1\mu}^{1M_J}$ – спин-угловая часть, с проекцией полного момента M_J, $\vec{q}$ – импульс одного из нуклонов в системе покоя дейтрона, $\left|S=1,\mu\right\rangle$ – спиновая часть волновой функции, $Y_{lm}(\vec{n})$ – сферические функции, $\vec{n}\equiv\vec{q}/q$, $C_{lm1\mu}^{1M_J}$ – коэффициенты Клебша-Гордона. При определении формфакторов используются спиральные состояния дейтрона. В этом случае для конечного состояния (направляя ось z по импульсу дейтрона в конечном состоянии) мы должны положить $M_J = \Lambda_f$, где Λ_f – спиральность конечного дейтрона, для начального состояния $M_J = -\Lambda_i$, где Λ_i – спиральность начального дейтрона. Используя обычную параметризацию матричных элементов релятивистского тока дейтрона [5], мы можем получить связь спиральных матричных элементов оператора тока $j^\mu(\vec{h})$ в используемом нами формализме с электромагнитными формфакторами:

$$j_{00}^0(Q^2) = G_C(Q^2) + \frac{4}{3}\frac{h^2}{1-h^2}G_Q(Q^2) \tag{2}$$

$$j_{+-}^0(Q^2) = G_C(Q^2) - \frac{2}{3}\frac{h^2}{1-h^2}G_Q(Q^2) \tag{3}$$

$$j_{+0}^+(Q^2) = -\frac{h}{1-h^2}G_M(Q^2)\,. \tag{4}$$

Здесь $j^{\lambda}_{\Lambda_i \Lambda_f} \equiv \left\langle \Lambda_f \middle| \varepsilon^{\lambda}_{\mu} \cdot j^{\mu}\left(\vec{h}\right) \middle| \Lambda_i \right\rangle$, ε^{λ} – 4-вектор поляризации λ виртуального фотона. В случае, когда в начальном и в конечном состоянии дейтрон, векторный параметр $\vec{h} = \vec{P}_f / P^0_f$ связан с 4-импульсом конечного дейтрона P.

Квадрат переданного 4-импульса может быть записан в виде $Q^2 = 4h^2 m_d^2 / \left(1 - h^2\right)$, где m_d – масса дейтрона. Оператор $j\left(\vec{h}\right)$ определяет действие оператора электромагнитного тока NN-системы в пространстве внутренних функций [10]. Электрический $G_C\left(Q^2\right)$, магнитный $G_M\left(Q^2\right)$ и квадрупольный $G_Q\left(Q^2\right)$ формфакторы дейтрона рассчитываем из (3–5) после расчета матричных элементов $j^{\lambda}_{\Lambda_i \Lambda_f}$. Расчет этих матричных элементов может быть выполнен численно с использованием волновых функций (1) и определения оператора $j\left(\vec{h}\right)$. Опишем порядок расчета. Оператор $j\left(\vec{h}\right)$ был нами представлен [2] в виде:

$$j^{\mu}\left(\vec{h}\right) = \sum_{i=1,2} \left(C^{\mu}_{1i} + \left(\vec{C}^{\mu}_{2i} \cdot \vec{s}_i\right) + \left(\vec{C}^{\mu}_{3i} \cdot \vec{s}_k\right) + \left(\vec{C}^{\mu}_{4i} \cdot \vec{s}_i\right)\left(\vec{C}^{\mu}_{5i} \cdot \vec{s}_i\right)\right) I_i\left(\vec{h}\right), \tag{5}$$

k =1 при *i = 2*, *k =2* при *i =1*. Оператор $I_i\left(\vec{h}\right)$ определен выражением:

$$I_i\left(\vec{h}\right)\chi\left(\vec{q}\right) = \chi\left(\vec{q} \mp \frac{2\vec{h}}{1-h^2}\left(w(q) \mp \left(\vec{h} \cdot \vec{q}\right)\right)\right), \; i = \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \tag{6}$$

$C^{\mu}_{1i} \equiv C^{\mu}_{1i}\left(\vec{q}\right)$ – некоторые тензорные функции $\vec{q}$, $w(q) = \sqrt{q^2 + m^2}$, m – масса нуклона. Расчет матричных элементов $j^{\lambda}_{\Lambda_i \Lambda_f}$ после разложения выражения (5) по неприводимым тензорным операторам и расчета спиновых множителей (см. [2]) сводится к интегрированию:

$$\int d^3q \; Y_{l_f m_f}\left(\vec{n}\right) \, u_{l_f}(q) \; C^{\mu}_{1i}\left(\vec{q}\right) \; I_i\left(\vec{h}\right) \, u_{l_i}(q) Y_{l_i m_i}\left(\vec{n}\right). \tag{7}$$

Статические формфакторы дейтрона могут быть выписаны в явном виде. В частности, для магнитного формфактора было получено следующее выражение:

$$\begin{aligned} G_M(0) = {} & \frac{3}{2} G_e^p \int_0^{\infty} u_2^2(q)\,dq + m G_m^{pn} \int_0^{\infty} \frac{2u_0^2(q) - u_2^2(q)}{w(q)}\,dq + \\ & + \frac{G_m^{pn}}{3} \int_0^{\infty} \frac{q^2}{w(q)\left(m + w(q)\right)} \left(\sqrt{2}u_0(q) + u_2(q)\right)^2 dq + \\ & + \frac{G_e^p - G_m^{pn}}{3m} \int_0^{\infty} \frac{q^2}{w(q)} \left(2u_2^2(q) - u_0^2(q) + \sqrt{2}u_2(q)u_0(q)\right) dq, \end{aligned} \tag{8}$$

здесь $G_m^{pn} = G_m^p + G_m^n$. G_m^p, G_m^n – магнитные формфакторы протона и нейтрона; G_e^p – зарядовый формфактор протона. Два первых слагаемых выражения

(8) при $w(q) \approx m$ дают известное нерелятивистское приближение. Аналогичное выражение для квадрупольного момента мы не приводим из-за его громоздкости. Экспериментальные статические электромагнитные формфакторы дейтрона равны [1]:

$$G_Q(0) = m_d{}^2 Q_d = 25.83 \text{ и } G_M(0) = \frac{m_d}{m}\mu_d = 1{,}714$$

где: Q_d, μ_d – квадрупольный и магнитный моменты дейтрона соответственно. Значение формфакторов нами было рассчитано для двух типов потенциалов. Для Московского потенциала с запрещенными состояниями [2] были получены следующие значения: G_M (0) = 1,688, релятивистская поправка Δ_M = -0,011; G_Q (0) = 25,72, релятивистская поправка Δ_Q = 0,08. Для Неймегенского потенциала (NMGII) были получены значения: G_M (0) = 1,692, релятивистская поправка Δ_M = - 0,003; G_Q (0) = 25,68, релятивистская поправка Δ_Q = 0,02. Наш расчет моментов дает несколько заниженные значения для магнитных моментов, и несколько завышенные значения для квадрупольных моментов, в то время как в работе [6] был получен обратный результат. Связано это может быть с различием используемых потенциалов. Результаты показывают необходимость учета релятивистских эффектов уже при расчете статических формфакторов. С ростом Q^2 влияние релятивистских эффектов и различие между результатами для двух использованных нами потенциальных моделей растет. Так при Q = 1,4 *ГэВ* величина магнитного формфактора для Московского потенциала составляет $2 \cdot 10^{-4}$, а для Ниймегенского потенциала $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ (экспериментальное значение $0{,}8 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$ [1]). Для более точного описания статических формфакторов требуется учет эффектов, связанных с мезонными обменными токами. Учет этих эффектов будет выполнен нами в дальнейшем.

Библиографические ссылки

1. *Phenomenology* of the deuteron electromagnetic form factors / D. Abbott, A. Ahmidouch, H. Anklin et al. // Eur. Phys. – J. A7. – 2000.

2. *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. – 2007.

3. *Релятивистское* описание реакции эксклюзивного электрорасщепления дейтрона / В. А. Кныр, Н. А. Хохлов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – № 2. – 2006.

4. *Описание* поведения индуцированной поляризации в реакции фоторасщепления дейтрона при энергиях фотона до 2.5 ГэВ в рамках релятивистского квазипотенциального формализма / В. А. Кныр, В. Г. Неудачин, Н. А. Хохлов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – № 4. – 2007.

5. *Exact* Constraction of the Electromagnetic Current Operator in Relativistic Quantum Mechanics / F. Lev // Ann. Phys. (N.Y.) 237. – 1995.

6. *Point-Form* Analysis of Elastic Deuteron Form Factors / T. W. Allen, W. H. Klink, W. N. Polyzou // Phys. Rev. – C 63. – 2001.