

**В. В. Андреев, О. М. Дерюжкова, Н. В. Максименко**  
г. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины

## **ДИПОЛЬНЫЕ СПИНОВЫЕ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ И ЭЛЕКТРОСЛАБЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НУКЛОНА**

С развитием стандартной модели электрослабых взаимодействий в последнее время введены новые электрослабые характеристики адронов, связанные с несохранением четности, которые обладают свойствами гирации в оптике [1]. В свою очередь, такие характеристики, как поляризуемости и гирации, непосредственно связаны с внутренней структурой адронов и с механизмами электрослабых фотон-адронных взаимодействий.

Для более достоверного определения поляризуемостей и характеристик адронов, связанных с нарушением четности, используется достаточно широкий класс электродинамических процессов, в которых реализуется рассеяние реальных и виртуальных фотонов, а также двухфотонное рождение в адрон-адронных взаимодействиях. Решение подобных задач возможно выполнить в рамках релятивистского теоретико-полевого подхода описания взаимодействия электромагнитного поля с адронами с учетом их электромагнитных и электрослабых характеристик.

Важную роль в понимании взаимодействия электромагнитного поля с адронами играют низкоэнергетические теоремы, поскольку в их основе лежат общие принципы квантовой теории и разложения амплитуд комптоновского рассеяния по энергиям фотонов. В последнее время одним из эффективных методов исследования электродинамических процессов является

использование феноменологических лагранжианов, полученных в рамках теоретико-полевых подходов и согласующихся с низкоэнергетическими теоремами, установленными в стандартной модели электрослабых взаимодействий. Построение таких лагранжианов позволяет получить физическую интерпретацию электромагнитных и электрослабых характеристик адронов.

В работе [2] для построения эффективного релятивистски-инвариантного лагранжиана взаимодействия электромагнитного поля с частицами с постоянными электрическими и магнитными дипольными моментами был введен антисимметричный тензор дипольных моментов, который не зависит от тензора электромагнитного поля  $F_{\mu\nu}$ .

В данной работе получен квантово-полевой релятивистски-инвариантный лагранжиан, в котором определен тензор наведенных дипольных моментов, т.е. этот тензор, в отличие от работы [2], зависит от  $F_{\mu\nu}$ . Тем самым, посредством релятивистского полевого учета свойств С-, Р-, Т-преобразований, а также перекрестной симметрии, установлены ковариантные спиновые структуры амплитуды комптоновского рассеяния и выполнено согласование с низкоэнергетическими теоремами.

В работе [3] предложен вариант релятивистски-инвариантного определения спиновой поляризуемости нуклона. В продолжение этой работы определим эффективный лагранжиан взаимодействия электромагнитного поля с нуклоном с учетом электрослабых характеристик подбных гирации и обратим внимание на различие вкладов в амплитуду комптоновского рассеяния дипольных спиновых поляризуемостей и электрослабых характеристик.

Амплитуду комптоновского рассеяния в области низких энергий в дипольном приближении можно получить, если воспользоваться определением дипольных моментов с помощью тензоров поляризуемостей:

$$\alpha_{ij} = \alpha \delta_{ij} + i\tilde{\alpha} \epsilon_{ijk} \hat{S}_k + i\chi_E \epsilon_{ijk} \partial_k, \quad (1)$$

$$\beta_{ij} = \beta \delta_{ij} + i\tilde{\beta} \epsilon_{ijk} \hat{S}_k + i\chi_M \epsilon_{ijk} \partial_k. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) введены величины  $\alpha$  и  $\beta$  – электрическая и магнитная поляризуемости,  $\tilde{\alpha}$  и  $\tilde{\beta}$  – спиновые поляризуемости,  $\chi_E$  и  $\chi_M$  – гирации структурной частицы.

Вклад гираций  $\chi_E$  и  $\chi_M$  в амплитуду комптоновского рассеяния имеет вид:

$$T(\vec{n}_2) = 4\pi i \omega^3 \left[ \chi_E \left( \vec{e}^{(x_2)} \left[ \vec{n}_1 \vec{e}^{(\lambda_1)} \right] \right) + \chi_M \left( \vec{n}_1 \left[ \vec{n}_2 \vec{e}_2 \right] \left[ \vec{n}_1 \vec{e}_1 \right] \right) \right]. \quad (3)$$

Поскольку гирация связана с нарушением четности, то в ковариантном лагранжиане работы [3], не будем учитывать инвариантность относительно инверсии пространства. В результате получим:

$$L = \frac{i\pi}{4m^2} \epsilon^{\mu\beta\lambda\alpha} \left[ \chi_E F_{\nu\mu} \tilde{\partial}_\lambda F_{\alpha\sigma} + \chi_M \tilde{F}_{\nu\mu} \tilde{\partial}_\lambda \tilde{F}_{\alpha\sigma} \right] \bar{\Psi} \left[ (\gamma^\nu \tilde{\partial}^\sigma) \tilde{\partial}_\beta \right] \Psi, \quad (4)$$

где  $\Psi$  – биспинор нуклона,  $\tilde{\partial}^\sigma = \partial^\sigma - \bar{\partial}^\sigma$ ,  $\gamma^\nu$  – матрицы, удовлетворяющие перестановочным соотношениям  $\gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}$ .

Амплитуда комптоновского рассеяния (3), полученная с использованием лагранжиана (4), имеет вид:

$$T = 4\pi i \omega^3 \chi_f \left\{ \begin{array}{l} \chi_E \omega_1 \omega_2 \left( (\vec{k}_1 + \vec{k}_2) \left[ \vec{e}^{(\lambda_2)} \vec{e}^{(\lambda_1)} \right] \right) + \\ + \chi_M \left( (\vec{k}_1 + \vec{k}_2) \left[ \left[ \vec{k}_2 \vec{e}_2 \right] \left[ \vec{k}_1 \vec{e}_1 \right] \right] \right) \end{array} \right\} \chi_i, \quad (5)$$

где  $\chi_i$  и  $\chi_f$  – спиноры начального и конечного нуклонов соответственно.

Согласно работе [3] вклад спиновых поляризуемостей в низкоэнергетическом приближении определяется соотношением:

$$T = 4\pi i (\omega_1 + \omega_2) (\omega_1 \omega_2) \chi_f \left\{ \begin{array}{l} \chi_1 \left( \hat{S} \left[ \vec{e}^{(x_2)} \vec{e}^{(x_1)} \right] \right) + \\ + \chi_2 \left( \hat{S} \left[ [\vec{n}_2 \vec{e}_2] [\vec{n}_1 \vec{e}_1] \right] \right) \end{array} \right\} \chi_i. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) следует:

- 1) в обеих амплитудах выполняется условие перекрестной симметрии;
- 2) если в соотношении (6) выполняется условие инвариантности относительно инверсии пространства, то в соотношении (5) это условие нарушается;
- 3) вклады гираций и спиновых дипольных поляризуемостей в амплитуду комптоновского рассеяния на нуклоне начинаются с третьего порядка по частоте излучения.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (г. Минск).

#### Список использованных источников

- 1 Федоров, Ф. И. Теория гиротропии / Ф. И. Федоров. – Минск : Наука и техника. – 1976. – 456 с.
- 2 Anandan, J. S. Classical and quantum interaction of the dipole / J. S. Anandan // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 85. – P. 1354–1357.
- 3 Андреев, В. В. Ковариантное представление спиновых поляризуемостей нуклона / В. В. Андреев, О. М. Дерюжкова, Н. В. Максименко // Проблемы физики, математики и техники. – 2014. – № 3. – С. 7–12.