

**СПЕКТР ВИРТУАЛЬНЫХ ФОТОНОВ В РЕАКЦИИ ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ  
ПИОНОВ НА ДЕЙТРОНЕ**

К.А. Шарко, В.В. Гаузштейн, А.Ю. Логинов

Научный руководитель: д.ф-м.н. А.Ю. Трифонов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [gauzshtein@tpu.ru](mailto:gauzshtein@tpu.ru)

**THE SPECTRUM OF VIRTUAL PHOTONS IN THE ELECTROPRODUCTION  
OF PIONS ON A DEUTERON**

K.S. Sharko, V.V. Gauzshtein, A.Yu. Loginov

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.Yu. Trifonov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [gauzshtein@tpu.ru](mailto:gauzshtein@tpu.ru)

***Abstract.** Numerical and analytical calculations of the virtual photon spectrum have been performed for the electroproduction of pions on a deuteron. The numerical calculations of the virtual photon spectrum were performed without recourse to any approximations while a number of approximations were admitted in the derivation of the analytical expression. A comparison of the results of an exact numerical calculation of the virtual photon spectrum with the results of a calculation obtained using an approximate analytical expression for the virtual photon spectrum has been performed. It is shown that the discrepancy between the virtual photon spectra obtained with the help of numerical and analytical methods can reach 10% in the kinematic region of photoproduction of pions with intermediate energies.*

**Введение.** Процессы взаимодействия фотонов с нуклонами и ядрами имеют фундаментальное значение в физике элементарных частиц, ядерной физике и космологии. Среди них можно выделить фоторасщепление дейтрона и фоторождение пионов на нуклонах и легких ядрах. Ввиду своей значимости эти процессы являются предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований. Однако при экспериментальных исследованиях этих процессов на электронных ускорителях возникает проблема, связанная с получением источника реальных фотонов. В данном случае пучок реальных фотонов может быть получен в процессе тормозного излучения релятивистских электронов при их рассеянии на ядрах мишени-конвертора. Очевидно, что при этом ускоритель не сможет работать в режиме накопителя, что приведет к существенному уменьшению числа зарегистрированных событий. Чтобы избежать этого и использовать преимущества метода внутренней мишени электронного накопителя, в экспериментах по фоторождению и фоторасщеплению используют квазиреальные виртуальные фотоны, возникающие при рассеянии релятивистских электронов на внутренней мишени накопителя под малыми углами. Концепция виртуальных фотонов (ВФ) широко используется в исследовании электромагнитных процессов [1-3]. Таким образом, информация о реакциях фоторождения и фоторасщепления извлекается из экспериментальных данных по реакциям электроорождения и электрорасщепления.

**Спектр виртуальных фотонов.** В данном докладе приведено сравнение приближенного аналитического спектра ВФ со спектром ВФ, полученным путем численного интегрирования точного аналитического выражения. В работе [4], в приближение нулевого угла рассеяния электрона, в лабораторной системе координат, было получено следующее соотношение между сечениями реакций электро- и фоторождения пиона на дейтроне:

$$\frac{d\sigma_e}{dE_1 dE_2 d\Omega_1 d\Omega_2} = \frac{N_e}{E_\gamma} \frac{d\sigma_\gamma}{dE_1 d\Omega_1 d\Omega_2} \left| \frac{E_\gamma + m_d - E_1 - \frac{E_2}{p_2} (E_\gamma \cos\theta_2 - p_1 \cos\theta_{12})}{D_0} \right|, \quad (1)$$

где

$$N_e(\omega) = \frac{\alpha}{\pi^2} \frac{E_\gamma^2 D_0}{\varepsilon_i} \int \frac{\varepsilon_f v_T}{D Q^4} d\Omega_e \quad (2)$$

спектр ВФ,  $\vec{k}_i, \varepsilon_i, m_e$ ;  $\vec{k}_f, \varepsilon_f, m_e$ ;  $\vec{p}_1, E_1, m_p$ ;  $\vec{p}_2, E_2, m_p$  - импульсы, энергии и массы электронов и протонов,  $\vec{p}_\gamma, E_\gamma$  - импульс и энергия фотона,  $m_d$  - масса дейтрона,  $\omega = \varepsilon_f - \varepsilon_i$  - энергия виртуального фотона,  $Q^2 = (\varepsilon_i - \varepsilon_f)^2 - (\vec{k}_i - \vec{k}_f)^2$  - квадрат 4-импульса виртуального фотона,  $D(\theta_e, \varphi_e) = \varepsilon_i + m_d - E_1 - E_2 - \varepsilon_i \cos\theta_e + p_1 \cos\theta_{1e} + p_2 \cos\theta_{2e}$  - кинематический фактор,  $D_0 = D(0,0)$ ,  $v_T = -Q^2 / 2 + \vec{k}_i^2 \vec{k}_f^2 \sin^2 \theta_e / \vec{q}^2$  - лептонная структурная функция, соответствующая поперечным виртуальным фотонам. В выражении (2) энергия конечного электрона  $\varepsilon_f$ , как функция нуклонных переменных и углов вылета электрона  $\theta_e$  и  $\varphi_e$  имеет вид:

$$\varepsilon_f = \frac{2\varepsilon_i (P_z - A) + A^2 - P^2 - m_\pi^2}{2(\varepsilon_i (1 - \cos\theta_e) - A + P \cos\theta_{pf})}, \quad (3)$$

где  $A = E_1 + E_2 - m_d$ ,  $\vec{P} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ ,  $\theta_{pf}$  - угол между импульсами  $\vec{P}$  и  $\vec{k}_f$ . Из выражения (2) следует, что при вычислении спектра ВФ для каждого конкретного  $\omega = \varepsilon_f - \varepsilon_i$  необходимо выполнить сложное интегрирование по углам вылета  $\theta_e$  и  $\varphi_e$  конечного электрона. Такое интегрирование можно выполнить лишь с помощью численных методов, что существенно замедляет скорость статистического моделирования реакции. В этой связи, используя ряд приближений, в работе [4] было получено приближенное аналитическое выражение спектра ВФ:

$$N_e = \frac{\alpha}{2\pi} \frac{\omega_0^2}{k_i^2} \frac{b}{b'} \frac{a_r + b_r}{a_r - a' b'^{-1} b_r} \left( \left( 1 - \frac{2a}{\omega_0^2} \right) \ln \left( \frac{(a' - b')(a_r + b_r)}{(a + b)(a_r - b_r)} \right) - \frac{4b}{\omega_0^2} \right), \quad (4)$$

где  $a = m_e^2 - \varepsilon_i \varepsilon_f(0^\circ)$ ,  $b = k_i k_f(0^\circ)$ ,  $\delta = (m_e^2 b_r / a_r) (1 - \varepsilon_f / \varepsilon_f(0^\circ))$ ,  $\omega_0 = \varepsilon_i - \varepsilon_f(0^\circ)$ ,  $a' = a - \delta$ ,  $b' = b + \delta$ ,  $a_r = \varepsilon_i - E_1 - E_2 + m_d$ ,  $b_r = p_{1z} + p_{2z} - \varepsilon_i$ .

**Сравнение спектров виртуальных фотонов.** Представление экспериментальных результатов основано на распределении событий по интервалам разбиения не более чем одной из шести кинематических переменных реакции  $\gamma d \rightarrow p p \pi^-$  из-за недостаточной статистики. Величину энергии ВФ

определяем в приближении рассеяния электронов вперед по известным кинематическим характеристикам двух конечных нуклонов. Относительное число таких фотонов получается интегрированием выражения (2) по телесному углу  $\Omega_e$  рассеянного электрона.

На рис. 1 представлены потоки ВФ, как функции протонных углов: сплошные линии отвечают полученному аналитическому выражению (4), точки – результату численного интегрирования формулы (2). Как видим, степень согласия этих вычислений зависит от области значений нуклонных углов и энергий. Из рис. 1 следует, что результаты аналитического выражения (15) могут отличаться от результатов численного интегрирования выражения (13) более чем на 10%. Это вносит определенные проблемы при применении аналитических спектров виртуальных фотонов для статистического моделирования реакции фоторождения пиона на дейтроне во всей кинематической области нашего эксперимента. Таким образом, из результатов данной работы следует, что при статистическом моделировании выходов реакции  $\gamma d \rightarrow p p \pi^-$  следует использовать спектр ВФ, полученный путем численного интегрирования выражения (13). Это приведет к существенному увеличению времени, необходимого для статистического моделирования реакции. С другой стороны, асимметрии и поляризационные наблюдаемые, связанные с поляризацией дейтериевой мишени, слабо зависят от спектра ВФ, поскольку они находятся из отношений комбинаций выходов, в определение которых спектр ВФ входит как множитель. Поэтому при статистическом моделировании асимметрий реакций фоторождения пионов на дейтроне можно использовать приближенное аналитическое выражение спектра ВФ.

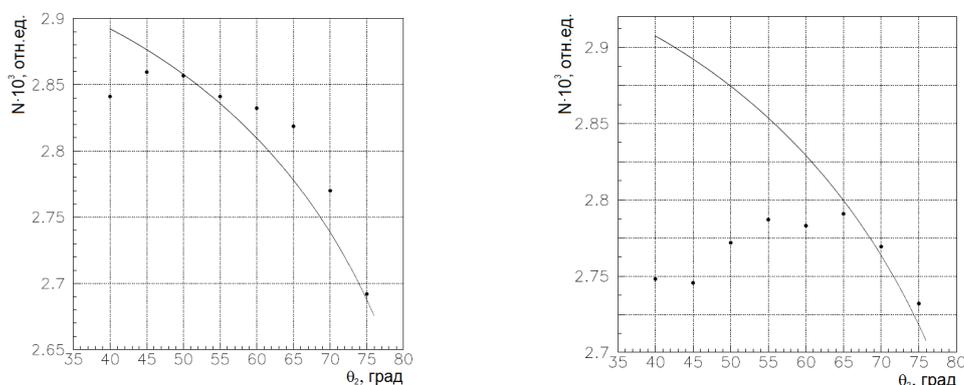


Рис 1. Относительное количество ВФ как функция полярного угла одного из протонов: линия соответствует аналитическому выражению (4), точки – результату численного интегрирования выражения (3). Левая панель соответствует значениям параметров  $\theta_1=60^\circ$ ,  $E_1=50$  МэВ,  $E_2=100$  МэВ, правая панель соответствует значениям параметров  $\theta_1=60^\circ$ ,  $E_1=100$  МэВ,  $E_2=100$  МэВ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-32-00013.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dalitz R.H. and Yennie D.R. // Phys. Rev. – 1957. – V.105. – P.1598.
2. Budnev V.H. et al. // Phys. Reports (Section C of Phys. Lett.) – 1975. – V.15. – N.4. – P.181.
3. Tiator L. et al. // Nucl. Phys. A. – 1982. – V.379. – P.407.
4. Gauzshtein V.V. et al. // Russian Physics Journal – 2017. – V.60. – P.1182.