

УДК 539.12...17; 539.128.2

**Елена Сергеевна Кокоулина¹, Михаил Иванович Левчук²,
Максим Николаевич Невмержицкий³, Константин Михайлович Хвалеи⁴,
Роман Георгиевич Шуляковский⁵**

¹д-р физ.-мат. наук, доц., нач. сектора

Объединенного института ядерных исследований (Россия)

²д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник

Института физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси

³науч. сотрудник Института прикладной физики НАН Беларуси

⁴студент 3 курса факультета прикладной математики и информатики
Белорусского государственного университета

⁵канд. физ.-мат. наук, доц., ведущий науч. сотрудник Института ядерных проблем
Белорусского государственного университета,

ведущий науч. сотрудник Института прикладной физики НАН Беларуси

**Elena Kokoulina¹, Michael Levchuk², Maxim Nevmerzhitsky³,
Kanstantsin Khvalei⁴, Roman Shulyakovsky⁵**

¹Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor,

Head of Sector at Joint Institute for Nuclear Research

²Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher

of B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

³Researcher of Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus

⁴3rd Year Student of the Faculty of Applied Mathematics and Computer Science
at Belarusian State University

⁵Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Lead Researcher
of Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,

Lead Researcher of Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
e-mail: nevmerzhmn@gmail.com

О КОМПОНЕНТЕ ТЕНЗОРНОЙ АСИММЕТРИИ T_{20} В РЕАКЦИИ КОГЕРЕНТНОГО ФОТОРОЖДЕНИЯ ПИОНА НА ДЕЙТРОНЕ В ОБЛАСТИ Δ -РЕЗОНАНСА

В рамках плосковолнового импульсного приближения рассчитана компонента тензорной асимметрии T_{20} в реакции когерентного фоторождения π^0 -мезона на дейтроне. Оператор фоторождения пиона на нуклоне построен в CGLN-параметризации с использованием модели MAID07. Исследована чувствительность результата к выбору параметризации дейтронной волновой функции. Сходство полученных результатов объясняется тем, что в работе использованы параметризации, основанные на высокоточных потенциалах нуклон-нуклонного взаимодействия. Проведено сравнение полученных значений с предсказаниями других моделей и с экспериментальными данными. Заметное расхождение теории и эксперимента наблюдается при энергии фотона $E_\gamma = 400$ МэВ.

Ключевые слова: фоторождение пиона, дейтрон, поляризационные наблюдаемые.

On the Component of the Tensor Asymmetry T_{20} in the Reaction of Coherent Pion Photoproduction on the Deuteron in the Δ -Resonance Region

Within the framework of the plane-wave impulse approximation, the tensor asymmetry component T_{20} in the reaction of coherent photoproduction of the π^0 meson on the deuteron is calculated. The operator of pion photoproduction on nucleon is constructed in CGLN-parameterization using the MAID07 model. The sensitivity of the result to the choice of the parameterization of the deuteron wave function is explored. The similarity of the results obtained is explained by the fact that we used parameterizations based on high-precision potentials of the nucleon-nucleon interaction. The obtained values are compared with the predictions of other models and with experimental data. A noticeable discrepancy between theory and experiment is observed at the photon energy $E_\gamma = 400$ MeV.

Key words: pion photoproduction, deuteron, polarization observables.

Введение

Эксперименты по рождению пионов на нуклонах и ядрах предоставляют уникальную возможность для изучения внутренней структуры нуклона и других сильно-взаимодействующих систем. Исследования в этой области долгое время являются одним из основополагающих направлений физики частиц и ядер. Дейтрон является простейшим ядром, содержащим нейтрон. Его малая энергия связи и хорошая изученность в сравнении с более тяжелыми ядрами предоставляют хорошую возможность для изучения нейтрона, недоступного для изучения в свободном виде. В этом контексте дейтронные исследования представляют особый интерес.

Стоит отметить, что существует как минимум еще одно важное приложение дейтронных исследований – изучение нуклон-нуклонных и пион-нуклонных взаимодействий, что особенно касается фоторождения нейтральных пионов из-за короткого времени жизни π^0 -мезона.

Истории теоретического изучения когерентной реакции на дейтроне положено начало работами [1; 2], в которых было проведено приближенное рассмотрение модели ядерного ферми-газа. Позднее проведено множество теоретических исследований, использовавших более деликатные подходы. Среди них приближение факторизации для рассмотрения движения Ферми в плосковолновом импульсном приближении [3], различные подходы к перерассеянию в конечном состоянии [4–9], динамические модели взаимодействия нуклонов с нуклонными резонансами [10] и др.

В 2020 г. опубликованы результаты уникальных измерений компоненты тензорной асимметрии T_{20} в реакции когерентного фоторождения пиона на дейтроне [11]. Эксперимент проведен на установке VEPP-3 в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера СО РАН.

Настоящая работа посвящена проверке успешности различных моделей в воспроизведении экспериментальных данных [11]. Тесты на поляризационных наблюдаемых налагают еще более строгие требования на точность по сравнению с тестами на данных по неполяризованной реакции. В работе мы строим свой подход для нахождения компоненты тензорной асимметрии T_{20} в реакции $\gamma d \rightarrow \pi^0 d'$. Используется реалистичный оператор фоторождения пионов, основанный на унитарной изобарной модели MAID07 [12] и параметризации волновой функции, полученной из высокоточных потенциалов нуклон-нуклонного взаимодействия.

1. Кинематика

Все расчеты проводятся в системе отсчета центра масс. Введем обозначения $k = (\omega, \vec{k})$, $p = (E, -\vec{k})$, $q = (\varepsilon_\pi, \vec{q})$ и $p' = (E', -\vec{q})$ для 4-импульсов начального фотона, начального дейтрона, конечного пиона и конечного дейтрона соответственно. $W = \sqrt{M^2 + 2ME_\gamma}$ – полная энергия системы, E_γ – энергия фотона в лабораторной системе отсчета.

Для массы пиона $\mu = 134,98$ МэВ пороговая энергия реакции составляет

$$E_\gamma^{\text{th}} = \mu + \frac{\mu^2}{2M} = 139,8 \text{ МэВ.} \quad (1)$$

Записав импульс пиона как

$$q = \frac{1}{2W} \sqrt{[W^2 - (M + \mu)^2][W^2 - (M - \mu)^2]}, \quad (2)$$

можем обнаружить, что кинематика полностью определена.

В расчетах мы используем только 9 из 18 поляризованных амплитуд – те, для которых спиральность фотона равна $\lambda = 1$. Вследствие сохранения четности для амплитуд выполняется равенство

$$\langle -m'_d | T | -\lambda - m_d \rangle = (-1)^{1+m_d+m'_d+\lambda} \langle m'_d | T | \lambda m_d \rangle. \quad (3)$$

В случае реальных фотонов ($\lambda = \pm 1$) это соотношение может быть записано в более простой форме

$$\langle -m'_d | T | -\lambda - m_d \rangle = (-1)^{m_d+m'_d} \langle m'_d | T | \lambda m_d \rangle. \quad (4)$$

Таким образом, искомая компонента тензорной асимметрии T_{20} запишется как

$$T_{20} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sum_{m_d} (|\langle m_d | T | +1+1 \rangle|^2 + |\langle m_d | T | +1-1 \rangle|^2 - 2|\langle m_d | T | +10 \rangle|^2)}{\sum_{m'_d m_d} |\langle m'_d | T | +1 m_d \rangle|^2}. \quad (5)$$

2. Модель реакции

Описание реакции проводится с помощью диаграммного подхода в рамках плосковолнового импульсного приближения (ПВИА). Соответствующая диаграмма приведена на рисунке 1.

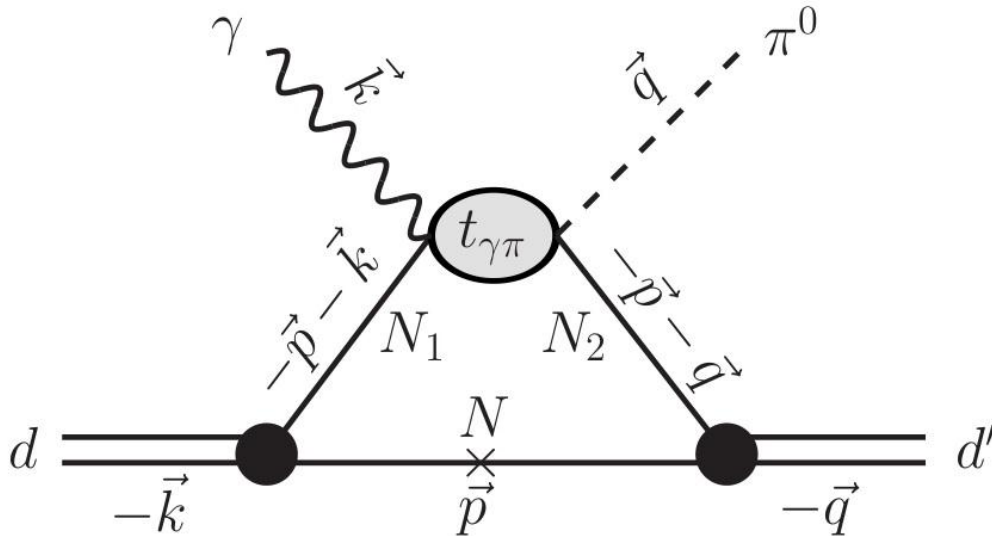


Рисунок 1. – Диаграмма ПВИА для реакции $\gamma d \rightarrow \pi^0 d'$

Амплитуда реакции в ПВИА имеет следующий вид:

$$\langle m'_d | \mathcal{M}(\vec{q}, \vec{k}) | 1 m_d \rangle = \int \frac{d^3 \vec{p}}{(2\pi)^3} \sum_{m_2 m_1 \tilde{m}} \Psi_{m_2 \tilde{m}}^{m'_d \dagger} \left(\vec{p} + \frac{\vec{q}}{2} \right) \langle m_2 | t_{\gamma\pi} | 1 m_1 \rangle \Psi_{m_1 \tilde{m}}^{m_d} \left(\vec{p} + \frac{\vec{k}}{2} \right),$$

где $t_{\gamma\pi}$ – амплитуда фоторождения нейтрального пиона на нуклоне, Ψ^{m_d} – волновая функция дейтрона. Связь матрицы рассеяния и \mathcal{M} - и T -матрицы можно записать как

$$\mathcal{M}_{m'_d 1 m_d}(\theta, \varphi) = e^{i(1+m_d)\varphi} T_{m'_d 1 m_d}(\theta), \quad (6)$$

что уже использовано в (5).

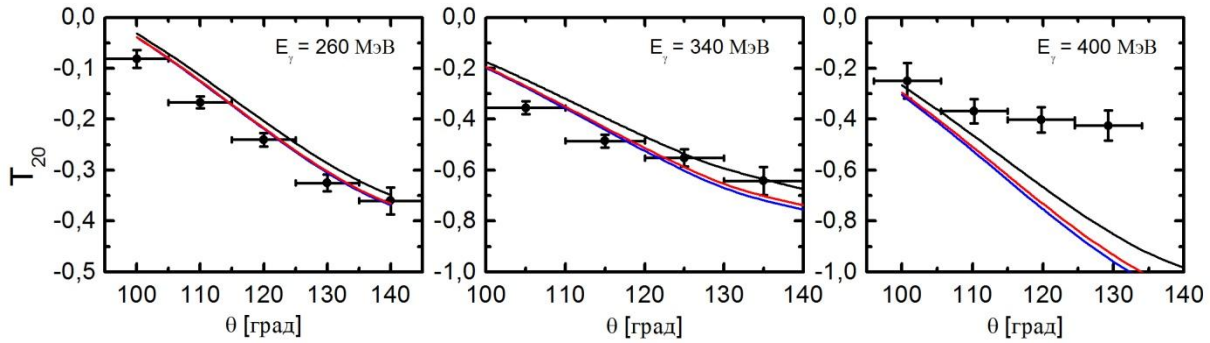
Вид оператора фоторождения пиона на нуклоне в системе фотон-нуклонного центра масс хорошо известен [13]:

$$\langle m_2 | t_{\gamma\pi} | \lambda m_1 \rangle = \frac{4\pi W_{\gamma N_1}}{m} \langle m_2 | i\vec{\sigma} \cdot \epsilon_\lambda F_1 + \vec{\sigma} \cdot \hat{q} \vec{\sigma} \cdot (\hat{k} \times \epsilon_\lambda) F_2 + \\ + i\vec{\sigma} \cdot \hat{k} \hat{q} \cdot \epsilon_\lambda F_3 + i\vec{\sigma} \cdot \hat{q} \hat{q} \cdot \vec{\epsilon}_\lambda F_4 | m_1 \rangle. \quad (7)$$

Амплитуды $F_i (i=1-4)$ взяты из унитарной изобарной модели MAID07 для фоторождения пиона на нуклоне [12].

3. Результаты

На рисунке 2 приведено сравнение расчетов, использующих различные параметризации волновых функций дейтрона. Можно видеть, что разница между предсказаниями мала. Это объясняется тем, что все использованные в расчетах нуклон-нуклонные потенциалы являются реалистичными. Тем не менее мы рассматриваем потенциал CD-Bonn в качестве основного в настоящей работе.

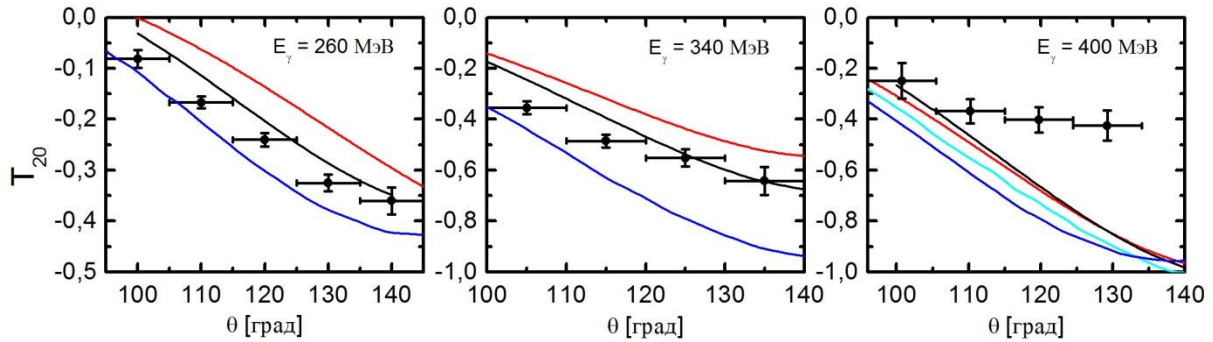


Оператор фоторождения пиона на нуклоне построен в параметризации (7) [13] с использованием [12]. Точки – экспериментальные данные из работы [11]. Черные кривые – результаты, полученные с использованием волновой функции, соответствующей потенциалу CD-Bonn [14], синие – потенциалу V18 [15], красные – потенциалу Nijm93 [16]. Результаты, полученные для потенциала NijmII [16], совпадают с таковыми для V18 и на рисунке не представлены.

Рисунок 2. – Зависимость результатов от выбора потенциала нуклон-нуклонного взаимодействия

На рисунке 3 представлены предсказания, выполненные в рамках различных моделей. Можно видеть, что наша модель успешно описывает экспериментальные данные при энергиях фотона 260 и 340 МэВ. Однако при 400 МэВ наблюдается сильное расхождение. Более того, как следует из рисунков 2 и 3, ни одна из рассмотренных моделей не описывает экспериментальные данные при 400 МэВ.

Стоит отметить, что расхождение наших предсказаний с предсказаниями [17] является отдельным важным вопросом, поскольку использованные в расчетах модели практически идентичны.



Черные кривые – то же, что и на рисунке 3, получены в рамках описанной в разделе 2 модели. Синие кривые – полный расчет из работы [4]. Красные кривые получены из модели, аналогичной нашей [17]. Голубые линии – предсказания из работы [9].

Рисунок 3. – Сравнение с предсказаниями других моделей

Заклучение

В рамках плосковолнового импульсного приближения с использованием унитарной изобарной модели MAID07 и различных параметризаций волновой функции дейтрона, основанных на реалистичных нуклон-нуклонных потенциалах, получена компонента тензорной асимметрии T_{20} в реакции $\gamma d \rightarrow \pi^0 d'$. Получена потенциальная зависимость результата.

Сравнение предсказаний нашей модели с экспериментальными данными показывает, что наша модель адекватно описывает данные для энергий фотонов, равных 260 МэВ и 340 МэВ, но не работает в случае энергии, равной 400 МэВ. Следует отметить, что все представленные в литературе модели имеют близкие к нашим предсказания при 400 МэВ и, соответственно, те же проблемы. У нас пока нет объяснения для этого несоответствия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Osland, P. Coherent pion photoproduction from deuterium at intermediate energies / P. Osland, A. K. Rej // *Nuov. Cim. A.* – 1976. – Vol. 32, nr 4. – P. 469–483.
2. Lazard, C. Theoretical study of coherent pion photoproduction on the deuteron / C. Lazard, R. J. Lombard, Z. Maric // *Nucl. Phys. A.* – 1976. – Vol. 271, iss. 2. – P. 317–341.
3. Rekalov, M. E. Neutral pion photoproduction on deuterons in the resonance energy region / M. E. Rekalov, I. V. Stoletnii // *J. Phys. G.* – 1991. – Vol. 17, iss. 11. – P. 1643–1656.
4. Kamalov, S. S. Coherent π^0 and η photoproduction on the deuteron / S. S. Kamalov, L. Tiator, C. Bennhold // *Phys. Rev. C.* – 1997. – Vol. 55, nr 1. – P. 98–110.
5. Bosted, P. Electromagnetic properties of the πNN system: (II). The $\gamma D \rightarrow \pi^0 D$ reaction / P. Bosted, J. M. Laget // *Nucl. Phys. A.* – 1978. – Vol. 296, iss. 3. – P. 413–430.
6. Koch, J. H. Near threshold photoproduction of neutral pions from the deuteron / J. H. Koch, R. M. Woloshyn // *Phys. Rev. C.* – 1977. – Vol. 16, iss. 5. – P. 1968–1975.
7. Blaazer, E. Coherent pion production on the deuteron spin observables / E. Blaazer, B. L. G. Bakker, H. J. Boersma // *Nucl. Phys. A.* – 1994. – Vol. 568, nr 4. – P. 681–702.
8. Garcilazo, H. Pion photoproduction of the deuteron: The reaction $\gamma d \rightarrow \pi^0 d'$ / H. Garcilazo, E. M. Guerra // *Phys. Rev. C.* – 1995. – Vol. 52, iss. 1. – P. 49–60.
9. Wilhelm, P. Coherent pion photoproduction on the deuteron in the Δ resonance region / P. Wilhelm, H. Arenhövel // *Nucl. Phys. A.* – 1995. – Vol. 593, nr 4. – P. 435–462.

10. Effect of the $N\Delta$ interaction on observables of the πNN and γNN systems / M. T. Peña [et al.] // Phys. Rev. C. – 1992. – Vol. 45, iss. 4. – P. 1487–1511.
11. Measurement of the tensor analyzing power T_{20} for the reaction $\gamma d \rightarrow \pi^0 d$ / V. V. Gauzshtein [et al.] // Eur. Phys. J. A. – 2020. – Vol. 56, nr 6. – P. 169 (7).
12. Drechsel, D. Unitary isobar model – MAID2007 / D. Drechsel, S. S. Kamalov, L. Tiator // Eur. Phys. J. – 2007. – Vol. A 34. – P. 69–97.
13. Relativistic Dispersion Relation Approach to Photomeson Production / G. F. Chew [et al.] // Phys. Rev. – 1957. – Vol. 106, nr 6. – P. 1345–1355.
14. Machleidt, R. High-precision, charge-dependent Bonn nucleon-nucleon potential / R. Machleidt // Phys. Rev. C. – 2001. – Vol. 63, nr 2. – P. 024001 (32).
15. Wiringa, R. B. Accurate nucleon-nucleon potential with charge-independence breaking / R. B. Wiringa, V. G. J. Stoks, R. Schiavilla // Phys. Rev. C. – 1995. – Vol. 38, iss. 1. – P. 38–51.
16. Construction of high-quality NN potential models / V. G. J. Stoks [et al.] // Phys. Rev. C. – 1994. – Vol. 49, iss. 6. – P. 2950–2963.
17. Darwish, E. M. Chastnoje soobshchijenije (2021).

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 27.09.2021