

**М.И. Левчук<sup>1</sup>, А.И. Львов<sup>2</sup>, М.Н. Невмержицкий<sup>3</sup>,  
Р.Г. Шуляковский<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова» НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь,

<sup>2</sup>Физический институт РАН, Москва, Россия,

<sup>3</sup>ГНУ «Институт прикладной физики Национальной академии наук  
Беларуси», Минск, Беларусь

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯРИЗУЕМОСТЕЙ НЕЙТРОНА В КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЙАНИИ НА ДЕЙТРОНЕ**

В последнее время значительный интерес проявляется к изучению комптоновского рассеяния на протоне и нейтроне в области низких и средних энергий. Это связано с тем, что в указанных процессах могут быть определены фундаментальные структурные постоянные нуклонов – их электрическая ( $\alpha$ ) и магнитная ( $\beta$ ) поляризуемости. Они содержат важную информацию о структуре нуклонов на средних и

больших расстояниях, в частности, о радиусе кваркового кора, о мезонной шубе, о вкладе в мезонную шубу коррелированных  $\pi\pi$ -пар или  $\sigma$ -мезона и т.д. Соответствующие вопросы подробно обсуждаются в обзорах [1, 2].

Знание амплитуд  $\gamma p$ - и  $\gamma n$ -рассеяния необходимо также для интерпретации данных по рассеянию фотонов на ядрах. Такого рода исследования могут, например, дать ответ на вопрос о том, насколько различаются электромагнитные свойства свободных и связанных нуклонов. Ниже мы обсудим современный статус поляризуемостей нуклона.

Вследствие того, что нуклон имеет внутреннюю структуру, он может деформироваться во внешнем электромагнитном поле, приобретая в результате дополнительную энергию

$$V_{pol}(r) = -\frac{1}{2}4\pi[\alpha\mathbf{E}^2(r) + \beta\mathbf{H}^2(r)], \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  – напряженности электрического и магнитного полей, соответственно. Отметим здесь, что появление фактора  $4\pi$  в (1) связано с тем, что мы в дальнейшем будем использовать систему единиц Хевисайда для зарядов и полей, в которой, например,  $e^2 = 4\pi / 137$ , но, по историческим причинам, используем систему Гаусса для поляризуемостей.

Поляризационное взаимодействие (1) приводит к дополнительному вкладу в амплитуду комптоновского рассеяния на нуклоне

$$T_{pol} = 4\pi \left[ \omega^2 \alpha \mathbf{e} \cdot \mathbf{e}^* + \beta (\mathbf{e} \times \mathbf{k}) \cdot (\mathbf{e}^* \times \mathbf{k}') \right], \quad (2)$$

где  $\mathbf{e}$  ( $\mathbf{e}'$ ) и  $\mathbf{k}$  ( $\mathbf{k}'$ ) – векторы поляризации и импульса начального (конечного) фотонов,  $\omega$  – энергия фотона.

Существует различие в ситуациях, связанных с определением поляризуемостей протона и нейтрона. Можно показать, что разложение дифференциального сечения комптоновского рассеяния на протоне в лабораторной системе с учетом поляризуемостей имеет вид [1]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{po} - \frac{e^2}{4\pi m} \omega^2 \left[ \frac{\alpha + \beta}{2} (1 + \cos\Theta)^2 + \frac{\alpha - \beta}{2} (1 - \cos\Theta)^2 \right] + O(\omega^4), \quad (3)$$

где  $e$  и  $m$  – заряд нуклона и его масса. Первый член в правой части – это т.н. сечение Поуэлла для рассеяния фотона на точечной заряженной частице спина  $\frac{1}{2}$ , имеющей также аномальный магнитный момент. Второй член обусловлен интерференцией томсоновской амплитуды и членов с поляризуемостями (2). Анализ выражения (3) пока-

зывает, что в случае протона этот член становится измеримым при достаточно малых энергиях фотона (начиная примерно с 50 МэВ).

Поляризуемости же нейтрона проявляют себя только в члене порядка  $\omega^4$ . Следовательно, соответствующее сечение может быть измерено только при бóльших энергиях (мы не приводим здесь выражения для дифференциального сечения в этом порядке ввиду его громоздкости).

Сумма поляризуемостей может быть рассчитана с помощью известного правила сумм Балдина [3], связывающего  $\alpha_N + \beta_N$  с интегралом от полного сечения адронного фотопоглощения на нуклоне  $\sigma_N(\omega)$ :

$$\alpha_N + \beta_N = \frac{1}{2\pi^2} \int_{\omega_0}^{\infty} \frac{\sigma_N(\omega)}{\omega^2} d\omega. \quad (4)$$

В выражении (4)  $\omega_0$  – это порог фотопоглощения на нуклоне ( $\omega_0 \approx 150$  МэВ). Вследствие фактора  $\omega^{-2}$  в подынтегральном выражении интеграл в правой части (4) быстро сходится и может быть вычислен весьма надежно [4]:

$$\alpha_p + \beta_p = 14,0 \pm 0,5; \quad \alpha_n + \beta_n = 15,2 \pm 0,5 \quad (5)$$

в единицах  $10^{-4}$  Фм<sup>3</sup>, которые мы будем использовать в дальнейшем для поляризуемостей. Разница же поляризуемостей  $\alpha_N - \beta_N$  не может быть рассчитана с достаточной точностью и обычно считается свободным параметром.

### Результаты измерений поляризуемостей протона

Выполненный недавно наиболее полный анализ всех (ранних и поздних) экспериментальных данных по дифференциальному сечению упругого  $\gamma p$  рассеяния при энергиях  $\omega < 150$  МэВ [5] дал значения  $\alpha_p = 11,7 \pm 0,8(exp) \pm 0,7(theory)$  и  $\beta_p = 2,3 \pm 0,9(exp) \pm 0,7(theory)$ .

### Результаты измерений поляризуемостей нейтрона

Что касается поляризуемостей нейтрона, то здесь ситуация гораздо хуже, несмотря на то, что эксперименты по определению  $\alpha_n$  начались раньше, чем для протона. Основные трудности при измерении поляризуемостей нейтрона связаны с отсутствием плотной, стабильной нейтронной мишени и с малостью дифференциального сечения комптоновского рассеяния на нейтроне.

До недавнего времени  $\alpha_n$  измерялась в основном в экспериментах по рассеянию медленных нейтронов в кулоновском поле тяжелых ядер. Результатом этих измерений стала только область возможных значений  $\alpha_n$  – от 7 до 19.

Таким образом, ситуация с измерением электрической поляризуемости нейтрона в указанных экспериментах весьма неудовлетворительная, и следует искать альтернативные методы для измерения  $\alpha_n$ . Что касается магнитной поляризуемости нейтрона  $\beta_n$ , то до 90-х годов прошлого столетия не было никакой экспериментальной информации об ее величине, кроме той, которая может быть получена при совместном использовании "измеренной" электрической поляризуемости и предсказаний правила сумм Балдина (4) для нейтрона (5).

В работе [6] предложен и разработан метод изучения комптоновского рассеяния на нейтроне в реакции  $\gamma d \rightarrow \gamma' np$  в области нейтронного квази-упругого пика, т.е. в области малых импульсов протона. Этот метод был использован в эксперименте группы Геттингген-Майнца [7]. Было измерено дифференциальное сечение указанной реакции при угле рассеяния фотона  $136^\circ$  в области энергий фотона от 200 до 400 МэВ. Фиксируя сумму поляризуемостей нейтрона согласно (5), авторы получили значения

$$\alpha_n = 12.5 \pm 1.8(stat)_{-0.6}^{+1.1}(syst) \pm 1.1(model), \quad \beta_n = 2.7 \mp 1.8(stat)_{-1.1}^{+0.6}(syst) \mp 1.1(model)$$

Еще один метод получения информации о поляризуемостях нейтрона состоит в использовании комптоновского рассеяния на дейтроне. Конечно, при использовании дейтронной мишени можно определить не сами нейтронные поляризуемости, а только изоскалярные поляризуемости нуклонов  $\alpha_s = (\alpha_p + \alpha_n)/2$ ,  $\beta_s = (\beta_p + \beta_n)/2$ . Но этот факт не имеет принципиального значения, поскольку, как сказано выше, поляризуемости протона измерены достаточно надежно. Вычитая из изоскалярных поляризуемостей  $\alpha_s$  и  $\beta_s$  протонные значения, можно определить нейтронные поляризуемости.

Из рисунка 1 видно, что учет поляризуемостей сильно изменяет величину дифференциального сечения. Поэтому можно ожидать, что измерение этого сечения с хорошей точностью позволит получить надежные значения поляризуемостей нейтрона.

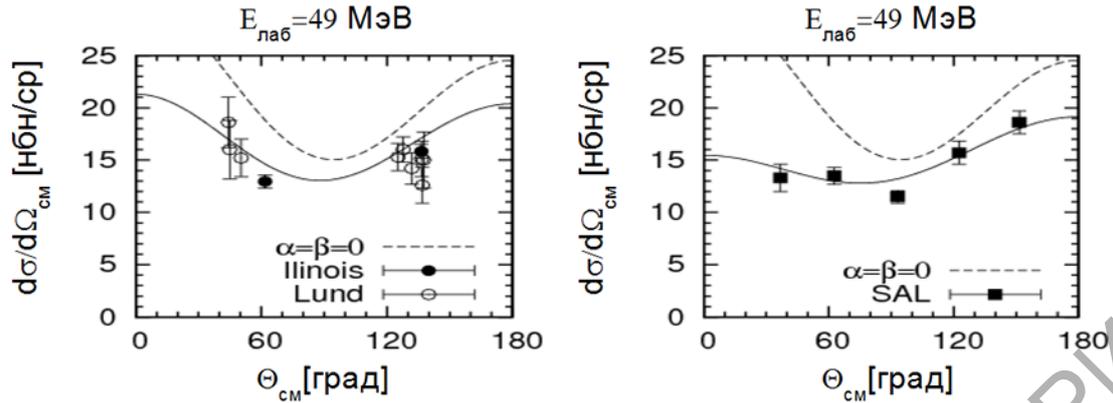


Рисунок 1 – Дифференциальное сечение реакции комптоновского рассеяния на дейтроне. Показаны сечения без поляризуемостей (штрихованные кривые) и с учетом поляризуемостей (сплошные кривые). Приведены данные экспериментов из Иллинойса [8], Саскачевана [9] и Лунда [10]

Фит данных, показанных на рисунке 2 в рамках модели [4], дал следующие значения для изоскалярных электрической и магнитной поляризуемостей нуклона

$$\alpha_s = 12,7 \pm 0,7, \quad \beta_s = 2,1 \pm 0,6. \quad (6)$$

При этом  $\chi^2 / N_{dof} = 49 / 48$ . В этом фите из анализа были исключены три точки, отмеченные овалами на рисунке 2, так как они явно выпадают из поведения других точек. Если все-таки учитывать эти точки, то получаем такие значения поляризуемостей:

$$\alpha_s = 13,0 \pm 0,7, \quad \beta_s = 2,2 \pm 0,6. \quad (7)$$

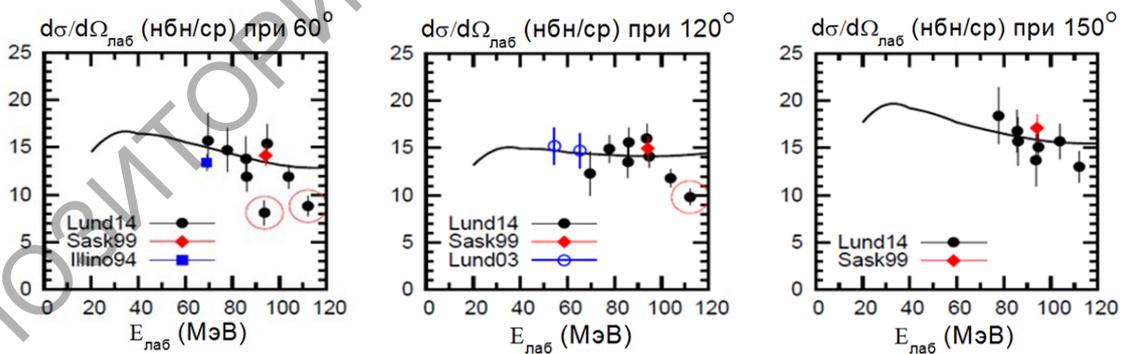


Рисунок 2 – Дифференциальное сечение реакции комптоновского рассеяния на дейтроне. Показаны данные экспериментов из Иллинойса [8], Саскачевана [9] и Лунда [10,11]

Они близки к значениям (6), но с большим  $\chi^2 / N_{dof} = 88 / 51$ . Результаты (6) совместно с протонными значениями

$\alpha_p = 11,7 \pm 1,1$ ,  $\beta_p = 2,3 \pm 1,1$  дают следующие поляризуемости нейтрона

$$\alpha_n = 13,7 \pm 1,8, \quad \beta_n = 1,9 \pm 1,6. \quad (8)$$

Эти результаты близки к значениям, полученным в реакции  $\gamma d \rightarrow \gamma' np$ .

Работа поддержана грантами Ф17Д-001 и Ф18Д-010 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

### Литература

1. Петрунькин, В.А. Электрическая и магнитная поляризуемости адронов // В.А. Петрунькин / ЭЧАЯ. – 1981. – Т. 12, вып. 3. – С. 692–753.

2. L'vov, A.I. Photon scattering as a tool for study of nucleon and nucleus structure // A.I. L'vov, V.A. Petrun'kin / Lect. Notes Phys. – 1990. – Vol. 365. – P. 123–144.

3. Baldin, A.M. Polarizability of nucleons // A.M. Baldin / Nucl. Phys. – 1960. – Vol. 18, № 2 – P. 310–317.

4. Levchuk, M.I. Deuteron Compton scattering below pion photoproduction threshold / M.I. Levchuk, A.I. L'vov // Nucl. Phys. – 2000. – Vol. A674, № 3,4. – P. 449–492.

5. Экспериментальный статус электрической и магнитной поляризуемостей протона / П.С. Баранов [и др.] // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2001. – Том 32, № 3. – С.699–733.

6. Levchuk, M.I. Photon scattering on quasi-free neutron in the reaction  $\gamma d \rightarrow \gamma' np$  and neutron polarizabilities. // M.I. Levchuk, A.I. L'vov, V.A. Petrun'kin / Few-Body Systems. – 1994. – Vol. 16, № 2. – P. 101–125.

7. Neutron polarizabilities investigated by quasifree Compton scattering from the deuteron // K. Kossert [et al.] / Phys. Rev. Lett. – 2002. – Vol. 88, № 16. – P. 162301.

8. Lucas, M.A. Compton scattering from the deuteron at intermediate energies / M.A. Lucas. – Illinois, 1994. – 173 p. (Preprint/University of Illinois № 3).

9. Hornidge, D.I. Elastic Compton scattering from the Deuteron and Nucleon Polarizabilities / D.I. Hornidge [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 84, № 11. – P. 2334–2337.

10. Compton scattering from the deuteron and extracted neutron polarizabilities / M. Lundin [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2003. – Vol. 90, № 19. – P. 192501–192505.

11. Measurement of Compton Scattering from the Deuteron and an Improved Extraction of the Neutron Electromagnetic Polarizabilities / L.S. Myers [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2014. – Vol. 113, № 26. – P. 262596.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ