

А.И. Серый

Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина

ОБ ЭФФЕКТЕ БАРЫШЕВСКОГО–ЛЮБОШИЦА В ВОДОРОДЕ В КОСМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Получена расчетная формула для угла поворота плоскости поляризации фотона на единицу пройденного расстояния в эффекте Барышевского–Любошица в электронно-протонной среде с поляризованными по спину частицами. При этом несобственные интегралы, входящие в исходную формулу и относящиеся одновременно к первому и второму родам, преобразуются в несобственные интегралы первого рода от функций с устранимыми разрывами.

Ключевые слова: вращение плоскости поляризации, эффект Барышевского–Любошица, электронно-протонное вещество.

Введение. Эффектом Барышевского–Любошица называется вращение плоскости линейной поляризации фотонов, которое, в отличие от эффекта Фарадея, обусловлено разницей между амплитудами комптоновского рассеяния фотона на фермионе для сонаправленных и противоположно направленных спинов фотона и фермиона. Теоретически предсказанный в 1965 г. В.Г. Барышевским и В.Л. Любошицем для фотона, распространяющегося в среде с поляризованными электронами (для магнитных полей, индукция которых мала по сравнению со швингеровской), эффект был обнаружен в 1970-е годы в жестком рентгеновском диапазоне [1, с. 88–99].

Дальнейшие теоретические исследования велись по следующим направлениям: 1) учет влияния квантующего магнитного поля [2, с. 41–46; 3, с. 43–48; 4, с. 30–36; 5, с. 36–42; 6, р. 420–422; 7, с. 40–49; 8, р. 101–103]; 2) учет влияния квантующего магнитного поля и температуры [9, р. 1036–1038; 10, с. 97–102]; 3) учет вклада со стороны поляризованных по спину нуклонов [11, с. 418–423; 12, с. 386–390; 13, с. 357–358; 14, с. 15–17]. Актуальность исследований в последнем из перечисленных направлений обусловлена предсказываемой возможностью спонтанной спиновой поляризации нуклонов в астрофизических условиях [15, р. 506–512; 16, с. 549–555]. Часть идей, лежащих в основе работы, принадлежат В.Г. Барышевскому и В.В. Тихомирову.

Основная часть. Рассмотрим модель электронно-протонной (т.е. водородной) плазмы с поляризованными по спину частицами, в которой вдоль оси x распространяется фотон плоскополяризованный (направление движения задается единичным вектором $\vec{n}$). Спиновая поляризация нуклонов предполагается спонтанной, поэтому индукция магнитного поля невелика, ее влиянием на расчетные формулы можно пренебречь (в этом случае степень поляризации электронов мала). Выражение для угла $d\varphi$ поворота плоскости поляризации фотона на единицу пройденного пути dx в общем виде может быть записано следующим образом:

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{2\pi n_p c}{\omega} \sum_{j=e,p} (\vec{p}_j \cdot \vec{n}) \text{Re} F_j(\omega), \quad \text{Re} F_j(\omega) = s_j^{(a)}(\omega, \Delta\mu_j) + s_j^{(d)}(\omega), \quad j = e, p. \quad (1)$$

В (1) приняты следующие обозначения: n_p – концентрация протонов (которая равна концентрации электронов, поскольку среда считается электрически нейтральной); c – скорость света в вакууме; ω – частота фотона; $\vec{p}_e$ и $\vec{p}_p$ – векторы спиновой поляризации электронов и протонов, соответственно; $ReF_e(\omega)$ и $ReF_p(\omega)$ – действительные части функций, определяющих спин-зависимые вклады в амплитуды комптоновского рассеяния фотона на электроне и протоне, соответственно. В указанных действительных частях можно выделить составляющие, зависящие от аномальных магнитных моментов ($s_e^{(a)}(\omega, \Delta\mu_e)$ и $s_p^{(a)}(\omega, \Delta\mu_p)$, соответственно), а также дисперсионные ($s_e^{(d)}(\omega)$ и $s_p^{(d)}(\omega)$, соответственно).

Выражения для $s_e^{(a)}(\omega, \Delta\mu_e)$ и $s_e^{(d)}(\omega)$ приведены в [1, с. 93]. Выражение для $s_p^{(a)}(\omega, \Delta\mu_p)$ было получено в [11, с. 419–421]; выражение для $s_p^{(d)}(\omega)$ было получено в [12, с. 387–390] по аналогии с алгоритмом, изложенным в [1, с. 92–93], на основе сведений из [17, р. 64–67], в виде

$$s_p^{(d)}(\omega) = \frac{\hbar^2 \omega \alpha^2 m_{np} c^3}{\pi (m_{np} c^2 + 2E_\gamma)} \sum_{i=1}^4 \int_0^{+\infty} \int_0^{+\pi} \sin \theta d\theta \frac{y f_i(y, \theta) dy}{y^2 - \omega^2}. \quad (2)$$

Выражения (довольно громоздкие) для величин $f_i(y, \theta)$ приведены в [12, с. 388–389; 17, р. 64–67]. При этом m_{np} – приведенная масса протона и нейтрона, $\hbar$ – постоянная Планка, α – константа электромагнитного взаимодействия. Для E_γ справедливо соотношение:

$$\hbar^2 \omega^2 (m_{np} c^2 + 2E_\gamma) = m_{np} c^2 E_\gamma^2.$$

Интегралы по y в (2) содержит сингулярность при $y = \omega$, т.е. относится одновременно к несобственным интегралам первого и второго родов. Для его вычисления можно поступить так же, как это было сделано в [1, с. 93] при устранении аналогичной сингулярности в $s_e^{(d)}(\omega)$. Воспользуемся соотношением

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\int_0^{\omega-\varepsilon} \frac{dy}{y^2 - \omega^2} + \int_{\omega+\varepsilon}^{+\infty} \frac{dy}{y^2 - \omega^2} \right) = 0. \quad (3)$$

С учетом (3) вместо (2) можно записать

$$s_p^{(d)}(\omega) \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\hbar^2 \omega \alpha^2 m_{np} c^3}{\pi (m_{np} c^2 + 2E_\gamma)} \sum_{i=1}^4 (G_i(\omega, 0, \omega - \varepsilon) + G_i(\omega, \omega + \varepsilon, +\infty)),$$

$$G_i(\omega, a, b) = \int_a^b \int_0^\pi \sin \theta d\theta \left(\frac{\omega f_i(\omega, \theta)}{y^2 - \omega^2} - \frac{y f_i(y, \theta)}{y^2 - \omega^2} \right) dy. \quad (4)$$

Разрыв в скобках подынтегрального выражения в (4) является устранимым при $y = \omega$, что упрощает дальнейшую процедуру вычисления интеграла.

Полученный результат носит оценочный характер, поскольку требуется переход к лабораторной системе отсчета, в которой центр масс макроскопической водородной системы покоится, после чего выполнить температурное усреднение по импульсам электронов и протонов.

Заключение. Получена формула для расчета угла поворота плоскости поляризации фотона на единицу пройденного расстояния в эффекте Барышевского–Любошица в электронно-протонной среде с поляризованными по спину электронами и протонами в пренебрежении влиянием внешнего магнитного поля на амплитуды и сечения рассеяния. При этом выполнена процедура преобразования исходных несобственных интегралов, входящих в формулу и относящихся одновременно к первому и второму родам, в несобственные интегралы первого рода от функций с устранимыми разрывами. Это позволяет упростить дальнейшие вычисления. Результаты могут найти применение при анализе и интерпретации данных, получаемых при астрономических наблюдениях областей ионизированного водорода.

Список использованных источников

1. Барышевский, В.Г. Ядерная оптика поляризованных сред / В.Г. Барышевский. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
2. Серый, А.И. К вопросу о комптоновском вращении плоскости поляризации рентгеновских фотонов в магнитном поле / А.И. Серый // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2011. – № 1. – С. 41–46.
3. Серый, А.И. О комптоновском вращении при движении фотонов под произвольным углом к линиям индукции магнитного поля. / А.И. Серый // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2011. – № 2. – С. 43–48.
4. Серый, А.И. О комптоновском вращении в магнитном поле с учетом ширины резонанса / А.И. Серый // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2012. – № 2. – С. 30–36.
5. Серый, А.И. О некоторых поляризационных эффектах в астрофизической плазме / А.И. Серый // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2014. – № 1. – С. 30–43.
6. Sery, A.I. To the Problem of Compton Rotation of Photons in a Strong Magnetic Field: Limit of Total Spin Polarization of Electrons / A.I. Sery // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2014. – Vol. 17, № 4. – P. 420–422.
7. Серый, А.И. Влияние резонансного комптоновского рассеяния в магнитном поле на вращение плоскости поляризации фотонов / А.И. Серый // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2020. – № 2. – С. 40–49.
8. Sery, A.I. Influence of resonance Compton scattering in a magnetic field on rotation of the polarization plane of photons / A.I. Sery // Materials Physics and Mechanics. – 2020. – Vol. 45, № 1. – P. 101–103.

9. Sery, A.I. Baryshevsky–Luboshitz Effect in Spin-Polarized Electron Gas at High Temperatures in Quantizing Magnetic Field / A.I. Sery // *Astronomy Reports*. – 2021. – Vol. 65, № 10. – P. 1036–1038.

10. Серый, А.И. Эффект Барышевского–Любошица при низких отличных от нуля температурах / А.И. Серый // Научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф.И. Федорова (Гомель, 25 июня 2021 года) [Электронный ресурс] : сб. материалов / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, отделение физики, математики и информатики Национальной академии наук Беларуси, государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» ; редкол. : С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Электронные текстовые данные (12 МБ). – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – Системные требования: IE от 11 версии и выше или любой актуальный браузер, скорость доступа от 56 кбит. – Режим доступа: <http://conference.gsu.by>. – Заглавие с экрана. – С. 97–102.

11. Sery, A.I. To the Problem of the Contribution of Spin-Polarized Hadrons to Baryshevsky–Luboshits Effect at Low Energies of Photons / A.I. Sery // *Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the Twenty eight Anniversary Seminar NPC'S'2021, Minsk, May 18–21, 2021* = Нелинейная динамика и приложения : труды XXVIII Междунар. семинара, Минск, 18–21 мая 2021 г. / редкол.: В.А. Шапоров [и др.] ; под ред. В.А. Шапорова, А.Г. Трифонова ; Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси. – Минск : Право и экономика, 2021. – С. 418–423.

12. Sery, A.I. To the problem of the contribution of spin-polarized protons to Baryshevsky–Luboshits effect / A.I. Sery // *Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the Twenty nine Anniversary Seminar NPC'S'2022, Minsk, June 21–24, 2022* = Нелинейная динамика и приложения : труды XXIX Международного семинара, Минск, 21–24 июня 2022 г. / редкол.: В.А. Шапоров [и др.] ; под ред. В.А. Шапорова, А.Г. Трифонова ; Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси. – Минск : Право и экономика, 2022. – С. 386–390.

13. Серый, А.И. Сравнительная характеристика эффектов Барышевского–Любошица на электронах и протонах / А. И. Серый // Материалы докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2022. – Т. 1. – С. 357–358.

14. Серый, А.И. О комбинированном эффекте Барышевского–Любошица в водороде / А.И. Серый // Актуальные вопросы современной науки : сб. ст. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза, 2024. – С. 15–17.

15. Sery, A.I. Spin Polarization of Nucleons: Limits of Low and High Temperatures / A.I. Sery // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. – 2015. – Vol. 79, No 4. – P. 506–512.

16. Серый, А.И. Спиновая поляризация нуклонов. Пределы низких и высоких температур / А.И. Серый // Известия РАН. Серия физическая. – 2015. – Т. 79, № 4. – С. 549–555.

17. Bernard, V. Chiral Dynamics in Nucleons and Nuclei / V. Bernard // [Electronic resource]. – Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9501384.pdf>. – P. 0–153. – Date of access: 10.03.2025.