

# НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Ф. И. ФЕДОРОВА



Гомель  
2021

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

Отделение физики, математики и информатики  
Национальной академии наук Беларуси

Государственное научное учреждение  
«Институт физики имени Б. И. Степанова  
Национальной академии наук Беларуси»

## **НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ, ПОСВЯЩЕННАЯ 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Ф. И. ФЕДОРОВА**

(Гомель, 25 июня 2021 года)

Сборник материалов

Научное электронное издание

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2021

**ISBN 978-985-577-785-5**

© Учреждение образования  
«Гомельский государственный  
университет имени Франциска  
Скорины», 2021

**Научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова** (Гомель, 25 июня 2021 года) [Электронный ресурс] : сборник 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.

В сборнике помещены материалы докладов конференции, посвященной 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова, по следующим направлениям: электродинамика кристаллов и метаматериалов (оптический, СВЧ и терагерцовый диапазоны), акустика кристаллов (упругие волны, фотоакустика, акустооптика), теория фундаментальных взаимодействий (электрослабые свойства микрочастиц, электродинамические и адронные процессы взаимодействия, гравитация), новые материалы и технологии (физика лазеров и лазерные технологии, ионно-лучевые и плазменные технологии, формирование структуры и свойства покрытий).

Адресуется научным работникам, аспирантам, магистрантам, студентам.

Материалы публикуются в соответствии с оригиналом, подготовленным редакционной коллегией, при участии издательства.

**Редакционная коллегия:**

С. А. Хахомов (главный редактор),  
И. В. Семченко (заместитель главного редактора), О. М. Демиденко,  
Ю. В. Никитюк, Н. В. Максименко, А. В. Рогачев, Д. Л. Коваленко,  
А. Л. Самофалов, О. М. Дерюжкова,  
А. А. Серeda, Г. А. Баевич.

ГГУ имени Ф. Скорины  
246028, Гомель, ул. Советская, 104,  
тел. (232) 50-49-03, 50-38-59  
<http://www.gsu.by>

© Учреждение образования  
«Гомельский государственный  
университет имени Франциска  
Скорины», 2021

**А. И. Серый**

УО «Брестский государственный университет  
имени А. С. Пушкина», Брест, Беларусь

## **ЭФФЕКТ БАРЫШЕВСКОГО – ЛЮБОШИЦА ПРИ НИЗКИХ ОТЛИЧНЫХ ОТ НУЛЯ ТЕМПЕРАТУРАХ**

### **Введение**

Эффект Барышевского – Любошица представляет собой вращение плоскости линейной поляризации фотонов вследствие различия между амплитудами комптоновского рассеяния фотона на электроны для сонаправленных и противоположно направленных спинов фотона и электрона. Эффект был теоретически предсказан В. Г. Барышевским и В. Л. Любошицем [[1, с. 89](#)] в 1965 г., а в начале 1970-х гг. обнаружен экспериментально в жестком рентгеновском диапазоне.

Для магнитных полей с малыми значениями индукции, когда можно пренебречь квантующим воздействием магнитного поля на волновые функции и уровни энергии электронов, эффект Барышевского – Любошица возникает во втором порядке теории возмущений по электромагнитной константе связи  $\alpha$  [[1, с. 92](#)]. Для квантующих магнитных полей данный эффект возникает уже в первом порядке теории возмущений по  $\alpha$ ; результаты соответствующих исследований были опубликованы, в частности, в [[2, 3](#)], причем усреднение по импульсам электронов либо не проводилось, либо осуществлялось в приближении абсолютного нуля температуры.

В настоящей работе выполнено усреднение полученных ранее результатов при низкой, но отличной от нуля температуре. Часть идей, лежащих в основе данной работы, принадлежат В. Г. Барышевскому и В. В. Тихомирову.

## 1. Исходные соотношения

Пусть плоскополяризованный фотон с частотой  $\omega$  движется в поляризованном по спину электронном газе в магнитном поле с индукцией  $B$  под углом  $\theta$  к силовым линиям магнитного поля, направлены по оси  $z$ . Обозначая массу электрона через  $m_e$ , импульс электрона через  $p_z$ , магнетон Бора через  $\mu_B$ , элементарный заряд через  $e$ , запишем выражение для угла  $d\varphi$  поворота плоскости поляризации фотона на единицу пройденного пути  $dl$  для случая, когда  $\hbar\omega < m_e c^2$  [3, с. 39–41]:

$$\frac{d\varphi}{dl} = \frac{\alpha m_e c \mu_B B}{4\hbar^2 \omega} \exp\left(-\frac{\hbar\omega^2 \sin^2 \theta}{2cBe}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\hbar\omega^2 \sin^2 \theta}{cBe}\right)^{n-1} \int_{-w_1}^{+w_1} (\tilde{R}_n(w) - \tilde{S}_n(w)) dw, \quad (1)$$

$$\tilde{R}_n(w) = \frac{\Omega_1(w)(\Omega_2(w)\cos\theta - 2\sqrt{2n}w\sin^2\theta)}{\Omega_3(w)\left(\Omega_1^2(w) + \frac{\Gamma_n^2}{\hbar^2\omega^2}\left(1 + 4n\frac{\mu_B B}{m_e c^2} + \left(w + \frac{\hbar\omega}{m_e c^2}\cos\theta\right)^2\right)\right)}, \quad (2)$$

$$\tilde{S}_n(w) = (-\Omega_2(w)\cos\theta + 2\sqrt{2n}w\sin^2\theta)/(\tilde{\Omega}_1^{(-)}(w)\Omega_3(w)), \quad (3)$$

$$w = p_z/(m_e c), \quad \Omega_1(w) = \tilde{\Omega}_1^{(+)}(w) + \Gamma_n^2/(4\hbar\omega m_e c^2), \quad \tilde{\Omega}_1^{(\pm)}(w) = Q_n \pm \Omega_2(w),$$

$$\Omega_2(w) = 2(\sqrt{1+w^2} - w\cos\theta), \quad \Omega_3(w) = \sqrt{1+w^2} + \hbar\omega/(m_e c^2),$$

$$Q_n = \hbar\omega \sin^2 \theta/(m_e c^2) - 4n\mu_B B/(\hbar\omega), \quad \Gamma_n \approx 16(2n-1)\alpha(\mu_B B)^2/(3m_e c^2). \quad (4)$$

## 2. Усреднение по импульсам при конечной температуре

Соотношения (1–4) были получены в приближении абсолютного нуля температуры в пределе полной спиновой поляризации электронов, причем значение  $w_1$  в (1) соответствует предельному (конечному) значению импульса. При конечной температуре  $T$  электроны могут

находиться на возбужденных уровнях, поэтому полная спиновая поляризация, строго говоря, невозможна.

Вместе с тем, можно учесть вклад во вращение со стороны только тех электронов, спиновая поляризация которых ничем не скомпенсирована. Для этого запишем энергию электрона в пренебрежении его аномальным магнитным моментом во внешнем квантующем магнитном поле [4, с. 41]:

$$\varepsilon = \sqrt{c^2 p_z^2 + m_e^2 c^4} + 2m_e c^2 \mu_B B(2n + 1 + 2s), \quad (5)$$

где  $n$  – номер уровня Ландау,  $s = \pm 1/2$  – спиновое квантовое число. Учитывая, что при одинаковом  $|p_z|$  равны значения энергии у электронов с  $n = n_0$ ,  $s = +1/2$ , и  $n = n_0 + 1$ ,  $s = -1/2$ , получаем, что в эффект Барышевского–Любошица при любой температуре вносят вклад только электроны с  $n = 0$ ,  $s = -1/2$ , для которых

$$\varepsilon = \sqrt{c^2 p_z^2 + m_e^2 c^4}, \quad (6)$$

поскольку суммарный спин остальных электронов близок к нулю. Тогда усреднение по импульсам в (1) должно осуществляться только для этих электронов на основе вычисления интеграла ( $k$  – постоянная Больцмана,  $\chi$  – химический потенциал электронного газа)

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} (\tilde{R}_n(w) - \tilde{S}_n(w)) (\exp((\varepsilon - \chi)/(kT)) + 1)^{-1} dw, \quad w = \sqrt{\varepsilon^2 - m_e^2 c^4} / (m_e c^2). \quad (7)$$

Для интеграла в (7) при выполнении замен

$$\varepsilon' = \varepsilon - m_e c^2 = \sqrt{c^2 p_z^2 + m_e^2 c^4} - m_e c^2, \quad \chi' = \chi - m_e c^2 \quad (8)$$

выполняются условия применимости приближенной формулы [5, с. 596–597]

$$\int_0^{+\infty} \frac{\varphi(\varepsilon') d\varepsilon'}{(\exp((\varepsilon' - \chi')/(kT)) + 1)} \approx \int_0^{\chi'} \varphi(\varepsilon') d\varepsilon' + \frac{(\pi kT)^2}{6} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon'} \right)_{\varepsilon' = \chi'}, \quad kT/\chi' \ll 1. \quad (9)$$

Тогда при  $kT/\chi' \ll 1$  для интеграла в (7) можно приближенно записать

$$\begin{aligned}
I &\approx \int_{-w_1}^{+w_1} (\tilde{R}_n(w) - \tilde{S}_n(w)) dw + \frac{(\pi k T)^2}{6} \left( \frac{d(\tilde{R}_n(w) - \tilde{S}_n(w))}{dw} \right)_{w=w_1} \left( \frac{dw}{d\varepsilon'} \right)_{\varepsilon'=\chi'} = \\
&= \int_{-w_1}^{+w_1} (\tilde{R}_n(w) - \tilde{S}_n(w)) dw + \frac{(\pi k T)^2 \chi}{6 m_e c^2 \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4}} \left( \frac{d(\tilde{R}_n(w) - \tilde{S}_n(w))}{dw} \right)_{w=w_1}, \\
w_1 &= \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} / (m_e c^2). \tag{10}
\end{aligned}$$

Общее аналитическое выражение для интеграла в (10) было получено в [2, с. 34; 3, с. 41–42] (с последующей подстановкой другого значения  $w_1$ , соответствующего  $T = 0$  К). Для производной с учетом (2)–(4) получаем

$$\begin{aligned}
(d\tilde{R}_n(w)/dw)_{w=w_1} &= (AE_n + C_n(A \cos \theta - 2\sqrt{2n} \sin^2 \theta)) / (DE_n) - \\
&- B_n C_n D^{-2} E_n^{-2} (E_n \chi^{-1} \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} + 2D\Gamma_n^2 (\sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} + \hbar \omega \cos \theta) (\hbar^2 \omega^2 m_e c^2)^{-1}), \tag{11}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
(d\tilde{S}_n(w)/dw)_{w=w_1} &= -\chi^{-1} D^{-1} \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} \cos \theta + \\
&+ (2\sqrt{2n} \sin^2 \theta (F_n D - G_n (m_e c^2)^{-1} \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4}) + Q_n G_n \cos \theta) / (F_n^2 D^2), \tag{12}
\end{aligned}$$

$$A = 2 \left( \frac{\sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4}}{\chi} - \cos \theta \right),$$

$$B_n = \frac{2(\chi \cos \theta - \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} (\cos^2 \theta + \sqrt{2n} \sin^2 \theta))}{m_e c^2},$$

$$C_n = Q_n + 2(\chi - \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} \cos \theta) (m_e c^2)^{-1} + \Gamma_n^2 (4\hbar \omega m_e c^2)^{-1},$$

$$D = (\chi + \hbar \omega) (m_e c^2)^{-1},$$

$$E_n = C_n^2 + \Gamma_n^2 \hbar^{-2} \omega^{-2} \left( 1 + 4n\mu_B B (m_e c^2)^{-1} + \left( \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} + \hbar \omega \cos \theta \right)^2 (m_e c^2)^{-2} \right),$$

$$F_n = Q_n - 2 \left( \chi - \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} \cos \theta \right) (m_e c^2)^{-1}, \quad G_n = F_n \chi^{-1} \sqrt{\chi^2 - m_e^2 c^4} - 2DA. \quad (13)$$

При этом взаимосвязь  $\chi$  с концентрацией электронов  $n_e$  при низких температурах можно выразить в виде [6, с. 11]

$$n_e \approx \frac{m_e \mu_B B}{6\pi^2 \hbar^3 c} \sum_{n=0}^j (2 - \delta_{0n}) \left( 6\sqrt{\chi^2 - H} - (\pi k T)^2 H (\chi^2 - H)^{-3/2} \right), \quad (14)$$

$$j = \left[ (\chi^2 - m_e^2 c^4) / (4m_e c^2 \mu_B B) \right], \quad H = H(n, B) = m_e^2 c^4 + 4m_e c^2 \mu_B B n. \quad (15)$$

### 3. Обсуждение результатов

Вычисление угла поворота  $d\varphi/dl$  можно осуществлять следующим образом. При фиксированных значениях  $T$ ,  $B$ ,  $\omega$ ,  $\theta$  задавать  $\chi$  и вычислять  $n_e$  в соответствии с (14) и (15), а  $d\varphi/dl$  – в соответствии с (1), (10-13) и с результатами [2, с. 34; 3, с. 41–42]. Это позволит найти в параметрическом виде  $d\varphi/dl$  как функцию аргументов  $T$ ,  $B$ ,  $\omega$ ,  $\theta$ ,  $n_e$ .

Вопрос об экспериментальной проверке полученных результатов заслуживает дальнейших исследований.

### Заключение

В данной работе получена формула для угла поворота плоскости поляризации фотона на единицу пройденного пути в поляризованном по спину электронном газе в квантующем магнитном поле при низких конечных температурах путем усреднения полученных ранее в [2, 3] результатов по импульсам электронов с применением приближенных формул вычисления интегралов при низких температурах. По сравнению с результатами, полученными в приближениях нулевого импульса электронов и абсолютного нуля температуры, данные результаты представляют больший интерес с точки зрения их будущей экспериментальной проверки.



## Литература

1. Барышевский, В. Г. Ядерная оптика поляризованных сред / В. Г. Барышевский. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
2. Серый, А. И. О комптоновском вращении в магнитном поле с учетом ширины резонанса. / А. И. Серый // Веснік Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2012. – № 2. – С. 30–36.
3. Серый, А. И. О некоторых поляризационных эффектах в астрофизической плазме. / А. И. Серый // Веснік Брэсцкага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка». – 2014. – № 1. – С. 30–43.
4. Секержицкий, В. С. Равновесные системы фермионов и бозонов в магнитных полях: монография / В. С. Секержицкий; Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина. – Брест: Издательство БрГУ, 2008. – 198 с.
5. Румер, Ю. Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика: учеб. пособие. / Ю. Б. Румер, М. Ш. Рывкин. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 608 с.
6. Серый, А. И. О вычислении степени спиновой поляризации релятивистского электронного газа в квантующем магнитном поле при низких отличных от нуля температурах / А. И. Серый // Наука, образование, инновации: актуальные вопросы современные аспекты: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. В 2 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2021. – 224 с. – С. 9–12.