

Спин, передаваемый зеркалу при отражении света

Р.И. Храпко

Рассмотрено отражение плоской электромагнитной волны круговой поляризации от идеального зеркала. Рассчитана передача спина волны зеркалу и, соответственно, механический вращающий момент силы, действующий на зеркало. Использовано выражение классического тензора спина электродинамики и формула для спинового момента силы.

1. Постановка проблемы

В недавней статье [1] было указано, что передача спинового момента импульса от света к веществу происходит, если подающий и рассеянный лучи имеют различные направления. Момент импульса, передаваемый объекту, равен векторной разности спина рассеянного и спина падающего луча. В этом случае объект испытывает механический момент силы, равный потоку спина, передаваемого объекту. Авторы статьи [1] использовали оптически захваченные прозрачные объекты, преломляющие эллиптически поляризованные лучи, которыми эти объекты были захвачены. Возникает, однако, вопрос, будет ли момент силы действовать на зеркало, которое *отражает* свет круговой поляризации?

Очевидно, что стандартная электродинамика не знает сил, которые могли бы обеспечить момент силы, действующий на идеальное зеркало. Соответственно этому, анонимный рецензент 1 журнала "Optics Letters", который отклонил эту статью, написал: «Спиновый момент импульса света может передаваться изотропному объекту при преломлении света, как это показано в работе [1], потому что преломление (с отражением) может изменить эллиптичность падающего света. Я сомневаюсь, что чистое отражение, не изменяющее эллиптичность падающего света, может вызывать какую либо передачу спинового момента импульса»¹. Аналогично, рецензент 2 написал, что «идеальный отражатель любого типа испытывает линейную силу (то есть световое давление), но не момент силы. ... Рассматриваемая статья предполагает, что момент силы воздействует даже на идеальный отражатель. Я верю, что это предсказание нефизично и, следовательно, по всей вероятности, неправильно».²

¹ The spin angular momentum of light may be transferred to isotropic objects by refraction as shown in reference [1], because refraction (with reflection) could change the ellipticity of the input light. I doubt a pure reflection unchanging the ellipticity of the input light could result in any transfer of spin angular momentum.

² Hence from a perfect reflector (or any type) there is a linear force (i.e. radiation pressure) but no torque. ... The paper implies that the torque arises even for a perfect reflector that is a prediction which I believe to be non-physical and hence in all likelihood is wrong.

Я понимаю, как трудно рецензентам поверить, что передача спина происходит в случае идеального отражателя. Я понимаю, как трудно поверить, что момент силы действует на гладкое идеальное зеркало. Однако закон сохранения требует этого! Если вы верите в законы сохранения, вам ничего не остается, как принять, что момент силы действует на зеркало. И ученые должны объяснить это явление. Но для этого мы должны улучшить стандартную электродинамику.

В настоящей статье представлено количественное описание этого явления в чистом виде. Рассмотрен простейший случай. Плоская электромагнитная волна правой круговой поляризации распространяется в полупространстве $z < 0$ и отражается от сверхпроводящей плоскости $z = 0$. Мы утверждаем [2 – 13], что такая волна несет спиновый момент импульса, вопреки стандартному мнению, что «Плоская волна, распространяющаяся вдоль оси z (и не ограниченная в направлениях x, y) не имеет момента количества движения относительно этой оси, так как вектор Пойнтинга $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ направлен по оси z и, следовательно, $[\mathbf{r} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{B})]_z = 0$ » [14]. Наше улучшение стандартной электродинамики заключается во введении в классическую электродинамику тензорной плотности спина [2 – 13]

$$Y^{\lambda\mu\nu} = 2A^{[\lambda} \partial^{|\nu|} A^{\mu]} \quad (1)$$

Здесь A^λ есть магнитный векторный потенциал. По определению, 4-спин

$$dS^{\lambda\mu} = Y^{\lambda\mu\nu} dV_\nu, \quad \lambda, \mu, \nu, \dots = 0, 1, 2, 3 \quad (2)$$

содержится в 4-объеме dV_ν . Если $\lambda = i, \mu = j, \nu = k, \quad i, j, k, \dots = 1, 2, 3$, мы имеем:

$$dS^{ij} = Y^{ijk} da_k dt, \quad \text{i.e.,} \quad d\tau^{ij} = Y^{ijk} da_k, \quad (3)$$

где $d\tau^{ij}$ есть момент силы, действующий на элемент поверхности da_k , который ограничивает электромагнитное поле.

Пусть zx -плоскость есть плоскость падения/отражения волны и Φ есть угол падения/отражения. При отражении правая поляризация волны изменяется на левую поляризацию. Поэтому направление S_z компоненты спина волны не изменяться, и эта компонента момента силы не должна действовать на проводящую плоскость. Однако S_x -компонента спина в отраженной волне направлена против этой компоненты в падающей волне. Поэтому проводящая плоскость поглощает x -компоненту спинового момента импульса, то есть она испытывает момент силы τ^{yz} . Другими словами, в пространстве $z < 0$ присутствует плотность потока спина Y^{yzz} . Значит, элемент da_z проводящей плоскости получает $d\tau^{yz} = dS^{yz} / dt = Y^{yzz} da_z$ спин в единицу времени, то есть испытывает момент силы. И мы рассчитаем этот момент силы, используя

$$Y^{yzz} = 2A^{[y} \partial^{|z|} A^z] \quad (4)$$

в качестве компонента тензора спина электродинамики, то есть поверхностной плотности момента силы τ_a^{yz} .

2. Плоские волны и тензор спина

Пусть плоская электромагнитная волна правой круговой поляризации в координатах x', y', z' имеет вид

$$E_1^{x'} = \cos(z'-t), \quad E_1^{y'} = -\sin(z'-t), \quad B_1^{x'} = \sin(z'-t), \quad B_1^{y'} = \cos(z'-t). \quad (5)$$

Преобразование координат

$$x' = x \cos \varphi - z \sin \varphi, \quad z' = x \sin \varphi + z \cos \varphi, \quad y' = y \quad (6)$$

дает выражение падающей волны

$$E_1^x = \cos \varphi \cos(x \sin \varphi + z \cos \varphi - t), \quad E_1^y = -\sin(x \sin \varphi + z \cos \varphi - t), \quad E_1^z = -\sin \varphi \cos(x \sin \varphi + z \cos \varphi - t), \\ B_1^x = \cos \varphi \sin(x \sin \varphi + z \cos \varphi - t), \quad B_1^y = \cos(x \sin \varphi + z \cos \varphi - t), \quad B_1^z = -\sin \varphi \sin(x \sin \varphi + z \cos \varphi - t).$$

Пусть плоская электромагнитная волна левой круговой поляризации в координатах x', y', z' имеет вид

$$E_2^{x'} = -\cos(z'+t), \quad E_2^{y'} = -\sin(z'+t), \quad B_2^{x'} = -\sin(z'+t), \quad B_2^{y'} = \cos(z'+t). \quad (7)$$

Преобразование координат

$$x' = x \cos \varphi + z \sin \varphi, \quad z' = -x \sin \varphi + z \cos \varphi, \quad y' = y \quad (8)$$

дает выражение отраженной волны.

$$E_2^x = -\cos \varphi \cos(-x \sin \varphi + z \cos \varphi + t), \quad E_2^y = -\sin(-x \sin \varphi + z \cos \varphi + t), \quad E_2^z = -\sin \varphi \cos(-x \sin \varphi + z \cos \varphi + t), \\ B_2^x = -\cos \varphi \sin(-x \sin \varphi + z \cos \varphi + t), \quad B_2^y = \cos(-x \sin \varphi + z \cos \varphi + t), \quad B_2^z = -\sin \varphi \sin(-x \sin \varphi + z \cos \varphi + t),$$

Полное поле представляется выражениями

$$E^x = E_1^x + E_2^x = -2 \cos \varphi \sin(z \cos \varphi) \sin(x \sin \varphi - t)$$

$$E^y = E_1^y + E_2^y = -2 \sin(z \cos \varphi) \cos(x \sin \varphi - t)$$

$$E^z = E_1^z + E_2^z = -2 \sin \varphi \cos(z \cos \varphi) \cos(x \sin \varphi - t)$$

$$B^x = B_1^x + B_2^x = 2 \cos \varphi \cos(z \cos \varphi) \sin(x \sin \varphi - t)$$

$$B^y = B_1^y + B_2^y = 2 \cos(z \cos \varphi) \cos(x \sin \varphi - t)$$

$$B^z = B_1^z + B_2^z = -2 \sin \varphi \sin(z \cos \varphi) \cos(x \sin \varphi - t)$$

Магнитный векторный потенциал, согласно $\mathbf{A} = -\int \mathbf{E} dt$, равен

$$A^y = -2 \sin(z \cos \varphi) \sin(x \sin \varphi - t), \quad A^z = -2 \sin \varphi \cos(z \cos \varphi) \sin(x \sin \varphi - t). \quad (9)$$

Наконец, учитывая, что $\partial^z = g^{zz} \partial_z = -\partial_z$ потому что мы выбрали сигнатуру $(+ - - -)$, мы получаем

$$Y^{yz} = A^y \partial^z A^z - A^z \partial^z A^y = 2 \sin(2\varphi) \sin^2(x \sin \varphi - t), \quad \langle Y^{yz} \rangle = \sin(2\varphi), \quad (10)$$

что нам и требовалось, согласно (4).

3. Объемная плотность момента силы, $\tau_V = \mathbf{j} \times \mathbf{A}$, является аналогом силы Ампера $\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$

Мы должны теперь объяснить, как спин света действует на проводящую плоскость; как плотность потока спина вызывает момент силы, воздействующий на отражающую плоскость. Мы используем аналогию для этого объяснения.

Как известно, мы можем подсчитать *давление* p , действующее на плоскость двумя способами.

(i) Давление является плотностью потока импульса, то есть компонентой максвелловского тензора энергии-импульса $T^{\alpha\mu}$,

$$p = \langle [T^{zz}]_{z \rightarrow 0} \rangle = \langle \frac{1}{2} [-(E^z)^2 + (B^x)^2 + (B^y)^2]_{z \rightarrow 0} \rangle = 2 \cos^2 \varphi \quad (11)$$

(ii) Давление P есть поверхностная плотность силы Лоренца, объемная плотность которой является дивергенцией максвелловского тензора,

$$f^i = -\partial_\beta T^{i\beta} = -j_0 F^{i0} - j_k F^{ik} = \rho E^i + j_k B^{ik}, \quad \mathbf{f} = \rho \mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (12)$$

Первый способ (i) в применении к *моменту силы*, действующему на плоскость, представлен выражением (10)

$$\tau_a^{yz} = \langle Y^{yz} \rangle = \sin(2\varphi).$$

Согласно второму способу (ii), мы должны вычислить дивергенцию тензора спина (1) и получить

таким образом объемную плотность 4-момента силы, $\tau_V^{\mu\nu} = dS^{\mu\nu} / dV dt$,

$$\tau_V^{\mu\nu} = -\partial_\lambda Y^{\mu\nu\lambda} = -2\partial_\lambda (A^{[\mu} \partial^{|\lambda|} A^{\nu]}) = 2j^{[\mu} A^{\nu]}. \quad (13)$$

Значит, поверхностная плотность момента силы, происходящего от поглощения спина, равна

$$\tau_a^{yz} = 2j_a^{[y} A^{z]} = j_a^y A^z = -B^x A^z = 2 \sin(2\varphi) \sin^2(x \sin \varphi - t), \quad \langle \tau_a^{yz} \rangle = \sin(2\varphi), \quad (14)$$

потому что $[A^y]_{z \rightarrow 0} = 0$, и поверхностная плотность тока $j_a^y = -B^x|_{z \rightarrow 0}$. В результате, получается уравнение (14), совпадающее с (10). Таким образом, новая формула

$$\tau_V^{ik} = d\tau^{ik} / dV = 2j^{[i} A^{k]} = \mathbf{j} \times \mathbf{A}, \quad (15)$$

для объемной плотности спинового момента силы, воздействующего на среду, является аналогом силы Ампера $\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$.

4. Заключение

Классическая плоская электромагнитная волна круговой поляризации несет спиновый момент импульса. Часть этого спина может передаваться отражателю, если волна отражается. В этом случае на отражатель действует плотность момента силы $\tau_V = \mathbf{j} \times \mathbf{A}$.

5. Notes

Результаты (1), (15) были направлены в журнал «Письма в ЖЭТФ» 14 мая 1998 года и в «ЖЭТФ» 27 января 1999 года. Оба раза статьи были отклонены, потому что их публикация была признана нецелесообразной. С тех пор материал настоящей статьи был отклонен свыше трехсот раз следующими научными журналами: Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ, ТМФ, УФН, Изв. вузов, AJP, EJP, EPL, PRA, PRD, PRE, APP, FP, PLA, JPA, JPB, JMP, JOPA, JMO, CJR, OL, NJP, arXiv. В частности, настоящая статья отклонена журналом “J. Mod. Opt.” на основании рецензии, которая приводится здесь полностью: «Эта статья опирается на уравнение (1) для спинового тензора, которое не принято физическим сообществом и, как отмечено в благодарностях, была уже отклонена Журналом так же, как большим числом других рецензируемых журналов. Поскольку настоящая статья основывается на этой не принятой формуле, я не вижу, как она может быть принята к публикации и рекомендую немедленное отклонение без возможности переподдачи.»³

Исключением в мире научных журналов оказался журнал «Измерительная техника», свободный от номенклатурных теоретиков [4, 5].

Я глубоко благодарен профессору Роберту Ромеру за публикацию моего вопроса [15], а также профессору Тимо Ниеминену за плодотворную дискуссию в интернете (Newsgroups: sci.physics.electromag).

Список литературы

1. R. Dasgupta R, Gupta P.K., Rotation of transparent, nonbirefringent objects by transfer of the spin angular momentum of light. // Opt Lett. – 2005, **30**.- p.394
2. Храпко Р.И. Спин классической электродинамики. //Вестник Российского университета дружбы народов, Серия Физика. – 2002, № 10(1).- с.40-48

³ This paper hinges on the use of an equation (1) for the spin tensor which has not been accepted by the physics community and indeed, as noted in the acknowledgments, was already rejected by the Journal of Modern Optics as well as a large number of other peer-reviewed journals. As the current paper builds on this unaccepted form, I cannot see how this paper itself can be regarded as acceptable and recommend rejection forthwith with no possibility of resubmission.

3. R.I.Khrapko. The Beth's experiment is under review // mp_arc@mail.ma.utexas.edu REQUEST: send papers NUMBER: 03-307 (2003)
4. Khrapko R.I. Experimental verification of Maxwellian electrodynamics. // Measurement Techniques – 2003, **46**, No. 4.- p.317.
5. Храпко Р.И. Экспериментальная проверка электродинамики Максвелла.// Измерительная техника. – 2003, № 4.- с.3-5.
6. Храпко Р.И. Истинные тензоры энергии-импульса и спина среды однозначны.// Теоретические и экспериментальные проблемы общей теории относительности и гравитации. X Российская гравитационная конференция, Владимир. 1999: Тез. докл. - Москва, 1999. - с.47.
7. R.I. Khrapko. True energy-momentum tensors are unique. Electrodynamics spin tensor is not zero. - <http://arXiv.org/abs/physics/0102084> (10.08.2001)
8. R.I. Khrapko. Violation of the gauge equivalence. - <http://arXiv.org/abs/physics/0105031> (11.12.2001)
9. Храпко Р.И. Локализация энергии-импульса и спин.// Вестник Российского университета дружбы народов, *Серия Физика*. – 2002, № 10(1).- с.35-39.
10. R.I.Khrapko. Radiation of spin by a rotator. - mp_arc@mail.ma.utexas.edu REQUEST: send papers NUMBER: 03-315
11. R.I.Khrapko. A circularly polarized beam carries the double angular momentum. - mp_arc@mail.ma.utexas.edu REQUEST: send papers NUMBER: 03-311
12. Khrapko R.I. Classical spin in space with and without torsion. // Gravitation & Cosmology – 2004, **10**, No. 1-2.- p.91.
13. R.I. Khrapko. Transfer of spin to a mirror2. – <http://www.sciprint.org> (17.09.05)
14. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. – М.: ИЛ, 1956.- 459с.
15. Khrapko R.I. Does plane wave not carry a spin? //Amer. J. of Physics. – 2001, **69**.- p.405.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Храпко Радий Игоревич, доцент кафедры физики Московского авиационного института (Государственного технического университета), к.ф.-м.н. E-mail: khrapko_ri@hotmail.com

121433, Москва, Б. Филевская, 43 – 92, т. 1446312