

## Орбитальный поток энергии и поток спина в остром фокусе

С.С. Стафеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

### Аннотация

В работе показано, что обратный поток энергии (отрицательная проекция на оптическую ось вектора Пойнтинга) в остром фокусе оптического вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией возникает потому, что осевой поток спина имеет отрицательную проекцию на оптическую ось и больше по величине, чем положительная проекция на оптическую ось орбитального потока энергии (канонического потока энергии). Также с помощью формул Ричардса–Вольфа показано, что в области обратного потока энергии на оптической оси имеет место правая круговая поляризация света, хотя фокусируется свет с левой круговой поляризацией.

**Ключевые слова:** орбитальный поток энергии, поток спина, острая фокусировка, обратный поток энергии, оптический вихрь.

**Цитирование:** Стафеев, С.С. Орбитальный поток энергии и поток спина в остром фокусе / С.С. Стафеев // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 520-524. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-867.

**Citation:** Stafeev SS. An orbital energy flow and a spin flow at the tight focus. Computer Optics 2021; 45(4): 520-524. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-867.

### Введение

Обратный поток энергии в оптике известен с 1919 года после работы В. Игнатовского [1]. Его также изучали в более поздних работах Э. Вольфа [2], Г. Кармана [3], М. Берри [4], М. Соскина [5] и А. Воляра [6, 7]. В этих работах [1–7] обратный поток возникает в стороне от оптической оси, в малых периферийных областях, и мал по величине. В [8] А. Новицкий и Д. Новицкий показали, что при соосном сложении двух векторных пучков Бесселя с ТЕ- и ТМ-поляризациями обратный поток может быть и на оптической оси. Обратный поток энергии был обнаружен и в других лазерных пучках с замечательными свойствами: в векторных Х-волнах [9], непараксиальных пучках Эйри [10] и пучках Бесселя дробного порядка [11]. В [12, 13] обратный поток энергии был обнаружен на оптической оси в остром фокусе апланатической оптической системы и фокусе обычной зонной пластинки. По величине обратный поток в фокусе сравним с прямым потоком энергии. В [14] обратный поток исследовался экспериментально. В 2007 году А. Бекшаев [15] показал, что вектор Пойнтинга является суммой двух векторов: потока спина и орбитального потока энергии. Это представление потока энергии как суммы двух потоков (спина и орбитальной энергии [16–19]) позволяет дать интерпретацию эффекту обратного потока в оптике. Обратный поток возникает в той области светового поля, где поток спина отрицательный и больше по величине, чем всегда положительный поток орбитальной энергии. Причем орбитальный поток энергии

не обязательно связан с оптическим вихрем, он есть у любого светового поля.

В данной статье мы показали, что обратный поток энергии (отрицательная проекция на оптическую ось вектора Пойнтинга) в остром фокусе оптического вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией возникает потому, что осевой поток спина имеет отрицательную проекцию на оптическую ось и больше по величине, чем положительная проекция на оптическую ось орбитального потока энергии (канонического потока энергии). Также с помощью формул Ричардса–Вольфа показано, что в области фокуса поперечный поток энергии и поперечный спиновый угловой момент (СУМ) вращаются в разные стороны. Хотя фокусируется свет с левой круговой поляризацией в фокусе вблизи оптической оси, свет имеет правую круговую поляризацию (инверсия продольной составляющей СУМ). Продольная проекция СУМ положительная и равна по абсолютной величине обратному потоку энергии.

### Поток спина и орбитальный поток энергии в декартовых координатах

В 2007 году А. Бекшаев показал [15], что вектор Пойнтинга  $\mathbf{P}$  (поток энергии) равен сумме двух слагаемых: орбитального потока энергии  $\mathbf{P}_o$  и потока спина  $\mathbf{P}_s$  [17]:

$$\mathbf{P} = \frac{\text{Re}}{2}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}) = \mathbf{P}_o + \mathbf{P}_s, \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_o = \frac{\text{Im}}{2k}(\mathbf{E}^* (\nabla \mathbf{E})), \quad \mathbf{P}_s = \frac{1}{4k}(\nabla \times \text{Im}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{E})), \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  – вектора напряженности электрического и магнитного полей,  $\text{Re}()$  и  $\text{Im}()$  – реальные и мнимые части числа,  $\times$  – знак векторного умножения,  $k$  – волновое число. Из (2) следует, что поток спина  $\mathbf{P}_s$  – это ротор от вектора спинового углового момента  $\mathbf{S}$  [19]:

$$\mathbf{S} = \frac{\text{Im}}{2}(\mathbf{E}^* \times \mathbf{E}). \quad (3)$$

В декартовой системе координат проекции вектора орбитального потока энергии имеют вид:

$$\begin{aligned} P_{o,x} &= \frac{\text{Im}}{2k} \left( E_x^* \frac{\partial}{\partial x} E_x + E_y^* \frac{\partial}{\partial x} E_y + E_z^* \frac{\partial}{\partial x} E_z \right), \\ P_{o,y} &= \frac{\text{Im}}{2k} \left( E_x^* \frac{\partial}{\partial y} E_x + E_y^* \frac{\partial}{\partial y} E_y + E_z^* \frac{\partial}{\partial y} E_z \right), \\ P_{o,z} &= \frac{\text{Im}}{2k} \left( E_x^* \frac{\partial}{\partial z} E_x + E_y^* \frac{\partial}{\partial z} E_y + E_z^* \frac{\partial}{\partial z} E_z \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогично проекции вектора потока спина можно записать в виде:

$$\begin{aligned} P_{s,x} &= \frac{1}{2k} \left( \frac{\partial}{\partial y} \text{Im}(E_x^* E_y) + \frac{\partial}{\partial z} \text{Im}(E_x^* E_z) \right), \\ P_{s,y} &= \frac{1}{2k} \left( \frac{\partial}{\partial z} \text{Im}(E_y^* E_z) + \frac{\partial}{\partial x} \text{Im}(E_y^* E_x) \right), \\ P_{s,z} &= \frac{1}{2k} \left( \frac{\partial}{\partial x} \text{Im}(E_z^* E_x) + \frac{\partial}{\partial y} \text{Im}(E_z^* E_y) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

### Проекция вектора напряженности электрического поля в остром фокусе

В этом параграфе мы кратко повторим формулы из работы [20], чтобы были понятны последующие результаты моделирования. Пусть на входе в апланатическую оптическую систему проекции электрического и магнитного векторов для случая оптического вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией имеют вид:

$$\mathbf{E} = \frac{A(\theta)e^{i2\varphi}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H} = \frac{A(\theta)e^{i2\varphi}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

тогда по теории Ричардса–Вольфа [2] проекции вектора напряженности электрического поля вблизи фокуса будут иметь вид [12, 13]:

$$\begin{aligned} E_x(r, \varphi, z) &= (i/\sqrt{2})(I_{2,0} + e^{2i\varphi} I_{0,2}), \\ E_y(r, \varphi, z) &= (1/\sqrt{2})(-I_{2,0} + e^{2i\varphi} I_{0,2}), \\ E_z(r, \varphi, z) &= -\sqrt{2}e^{i\varphi} I_{1,1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} I_{\nu,\mu} &= \left( \frac{\pi f}{\lambda} \right)^{\nu} \int_0^{\theta_0} \sin^{\nu+1} \left( \frac{\theta}{2} \right) \cos^{3-\nu} \left( \frac{\theta}{2} \right) \cos^{1/2}(\theta) \times \\ &\times A(\theta) e^{ikz \cos \theta} J_{\mu}(x) d\theta, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $f$  – фокусное расстояние апланатической системы,  $x = kr \sin \theta$ ,  $J_{\mu}(x)$  – функция Бесселя первого рода,  $NA = \sin \theta_0$  – числовая апертура. Амплитуда входной функции (6)  $A(\theta)$  может быть выбрана произвольно, в частности, в виде функции Бесселя–Гаусса:

$$A(\theta) = J_1 \left( \frac{2\gamma \sin \theta}{\sin \theta_0} \right) \exp \left( \frac{-\gamma^2 \sin^2 \theta}{\sin^2 \theta_0} \right), \quad (9)$$

где  $\gamma$  – отношение радиуса зрачка апланатической системы к радиусу перетяжки Гауссова пучка.

Топологический заряд выбран равным двум, потому что только в этом случае на оптической оси формируется обратный поток энергии [12]. Действительно, проекции вектора Пойнтинга (потока энергии)  $\mathbf{P} = (1/2) \text{Re}[\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}]$  вблизи фокуса для оптического вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией равны:

$$\begin{aligned} P_x &= -I_{1,1}(I_{0,2} + I_{2,0}) \sin \varphi, \\ P_y &= I_{1,1}(I_{0,2} + I_{2,0}) \cos \varphi, \\ P_z &= \frac{1}{2}(I_{0,2}^2 - I_{2,0}^2). \end{aligned} \quad (10)$$

Из (10) следует, что поперечный поток энергии в плоскости фокуса ( $z=0$ ) вращается вокруг оптической оси против часовой стрелки, а продольная проекция вектора Пойнтинга отрицательная ( $P_z(z=r=0) = -I_{2,0}^2/2$ ). Далее найдем проекции СУМ (3) в плоскости фокуса для случая фокусировки оптического вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией:

$$\begin{aligned} S_x &= I_{1,1}(I_{2,0} + I_{0,2}) \sin \varphi, \\ S_y &= -I_{1,1}(I_{2,0} + I_{0,2}) \cos \varphi, \\ S_z &= \frac{1}{2}(I_{2,0}^2 - I_{0,2}^2). \end{aligned} \quad (11)$$

Из (11) следует, что поперечные компоненты вектора СУМ вращаются по часовой стрелке, а продольная проекция СУМ положительная: ( $S_z(z=r=0) = I_{2,0}^2/2$ ).

Из выражений (10) и (11) можно сделать следующие выводы: 1) поперечный поток энергии и поперечный СУМ вращаются в разные стороны; 2) хотя фокусируется свет с левой круговой поляризацией в фокусе вблизи оптической оси, свет имеет правую круговую поляризацию (инверсия продольной составляющей СУМ); 3) поток энергии на оптической оси отрицательный (обратный поток энергии); 4) продольная проекция СУМ положительная и равна по абсолютной величине обратному потоку энергии:

$$P_z = -S_z = -\frac{1}{2}(I_{2,0}^2 - I_{0,2}^2). \quad (12)$$

Общий вывод из этого параграфа такой: вблизи фокуса в области, где формируется обратный поток энергии, продольная компонента СУМ испытывает инверсию. Направление (положительное или отрицательное) продольной проекции СУМ можно определить по направлению вращения (по часовой или против часовой стрелки) поглощающей сферической микрочастицы, помещенной в фокус с центром на оптической оси. То есть обратный поток энергии обнаруживает себя в виде эффекта инверсии (обращения) продольной составляющей СУМ. Или наоборот, инверсия СУМ может служить индикатором обратного потока энергии в фокусе.

**Поток спина и орбитальный поток энергии в фокусе**

В этом параграфе на примере фокусировки оптического вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией мы покажем, что обратный поток имеет место тогда, когда поток спина отрицательный и больше по модулю, чем положительный орбитальный поток энергии (2). Действительно, подставляя проекции электрического вектора (7) в выражения (4) и (5), получим для продольных компонент потока спина и орбитального потока энергии выражения:

$$P_{o,z} = \frac{1}{2} (I_{0,2} \tilde{I}_{0,2} + I_{2,0} \tilde{I}_{2,0} + 2I_{1,1} \tilde{I}_{1,1}),$$

$$P_{s,z} = \frac{1}{2} (I_{0,2}^2 - I_{2,0}^2) - \frac{1}{2} (I_{0,2} \tilde{I}_{0,2} + I_{2,0} \tilde{I}_{2,0} + 2I_{1,1} \tilde{I}_{1,1}),$$

$$P_z = \frac{1}{2} (I_{0,2}^2 - I_{2,0}^2), \quad P_z = P_{o,z} + P_{s,z}.$$

В (13) использованы обозначения интегралов:

$$\tilde{I}_{\nu,\mu} = \left( \frac{\pi f}{\lambda} \right)^{\theta_0} \int_0^{\theta_0} \sin^{\nu+1} \left( \frac{\theta}{2} \right) \cos^{3-\nu} \left( \frac{\theta}{2} \right) \cos^{3/2}(\theta) \times A(\theta) e^{i k z \cos \theta} J_{\mu}(x) d\theta. \quad (14)$$

Из (13) следует, что на оптической оси ( $r=0$ ),

$$P_{o,z}(r=0) = 0,5 I_{2,0} \tilde{I}_{2,0} > 0,$$

$$P_{s,z}(r=0) = -0,5 (I_{2,0}^2 + I_{2,0} \tilde{I}_{2,0}) < 0,$$

$$|P_{s,z}| > P_{o,z}, \quad P_z(r=0) = -0,5 I_{2,0}^2 < 0.$$

Таким образом, физический смысл обратного потока энергии на оптической оси в остром фокусе заключается в том, что на оптической оси вблизи фокуса возникает конкуренция двух осевых потоков: поток спина направлен в отрицательном направлении вдоль оптической оси, а орбитальный поток энергии (канонический поток энергии) направлен в положительном направлении вдоль оптической оси, и поток спина по модулю больше, чем орбитальный поток энергии.

**Моделирование**

В данном параграфе с помощью формул Ричардса-Вольфа моделировалась острая фокусировка оптиче-

ского вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией апланатическим объективом с числовой апертурой 0,95. Длина волны равна 0,532 мкм, волновой фронт фокусируемого света плоский. При моделировании света левой круговой поляризации компоненты векторов электрической и магнитной напряженностей считались по формуле (6).

Распределение интенсивности (рис. 1) имеет вид кольца, при этом его диаметр меньше, чем при фокусировке света с правой круговой поляризацией. Отдельные поперечные составляющие  $I_x$  и  $I_y$  имеют вид асимметричных колец с ненулевыми значениями в центре (похожи по форме на греческую букву  $\theta$ ). Продольная составляющая интенсивности  $I_z$  в отличие от света правой поляризации уменьшает кольцо суммарной интенсивности  $I$  – диаметр кольца продольной составляющей меньше диаметров колец поперечных составляющих (в случае с правой поляризацией наоборот).

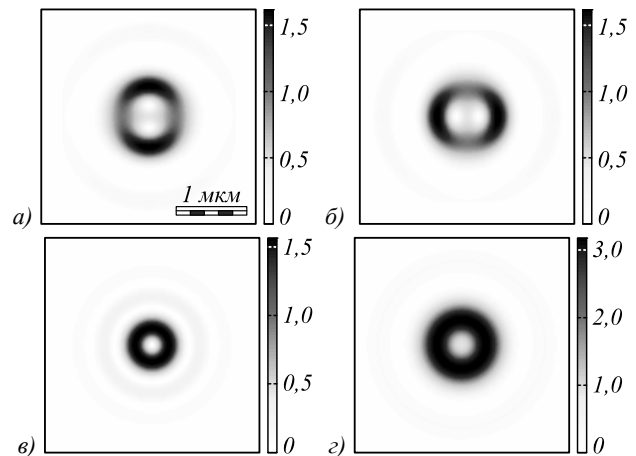


Рис. 1. Распределение отдельных составляющих интенсивности  $I_x$  (а),  $I_y$  (б) и  $I_z$  (в) и суммарной интенсивности  $I = I_x + I_y + I_z$  (г) в фокальной плоскости

Распределение компонент вектора Пойнтинга (1) и вектора СУМ (3) приведено на рис. 2–3.

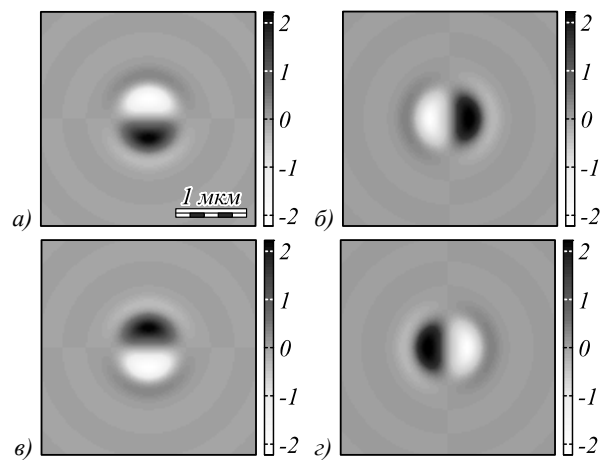


Рис. 2. Распределение поперечных компонент вектора Пойнтинга (верхний ряд) и вектора СУМ (нижний ряд) в фокусе:  $P_x$  (а),  $P_y$  (б),  $S_x$  (в),  $S_y$  (г)

В случае с левой круговой поляризацией компоненты вектора Пойнтинга оказались противоположны компонентам спинового углового момента: поперечная компонента  $P_x \mathbf{i} + P_y \mathbf{j}$  закручена против часовой стрелки (как и поперечная компонента орбитального потока энергии), в то время как поперечная компонента спинового углового момента  $S_x \mathbf{i} + S_y \mathbf{j}$  закручена по часовой стрелке. Спиновый угловой момент имеет вид отрицательного кольца с положительными значениями на оси. Продольная компонента вектора Пойнтинга  $P_z$ , напротив, имеет вид кольца, в котором она положительна, а внутри кольца (на оси) она приобретает отрицательное значение. Рис. 2–3 находятся в согласии с выводами, полученными на основе уравнений (10) и (11).

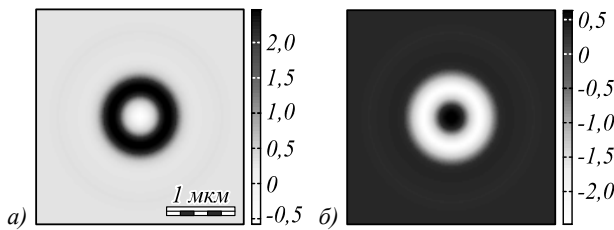


Рис. 3. Распределение продольных компонент вектора Пойнтинга и вектора СУМ:  $P_z$  (а) и  $S_z$  (б)

На рис. 4 и 5 показано распределение компонент потока спина и орбитального потока энергии, вычисленных в соответствии с (2).

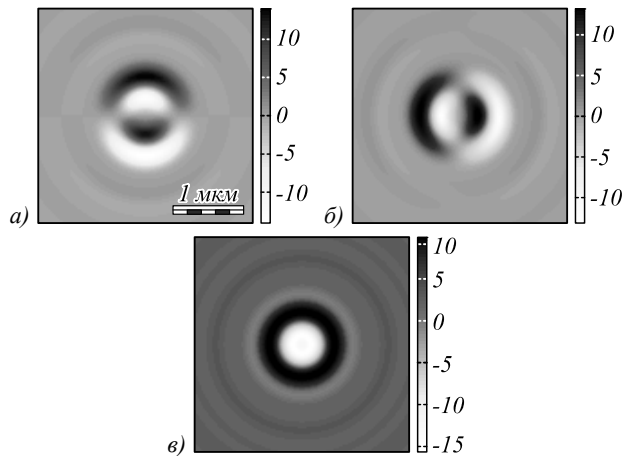


Рис. 4. Распределение компонент спинового потока энергии  $P_{s,x}$  (а),  $P_{s,y}$  (б) и  $P_{s,z}$  (в) в фокальной плоскости

Из рис. 4в видно, что продольный спиновый поток имеет такой же характер распределения, как и продольная составляющая вектора Пойнтинга (рис. 3а). А вид продольной компоненты орбитального потока энергии (рис. 5в) похож на вид суммарной интенсивности (рис. 1з).

Поперечные составляющие спинового потока (рис. 4а, б) имеют вид двух колец, внешнее закручено по часовой стрелке, а внутреннее – против.

Суммарный поток энергии складывается из потока спина  $P_s$  (рис. 4) и орбитального потока энергии  $P_o$  (рис. 5). Распределение суммы потоков, приведенное на рис. 6, качественно совпадает с распределением вектора Пойнтинга (рис. 2–3).

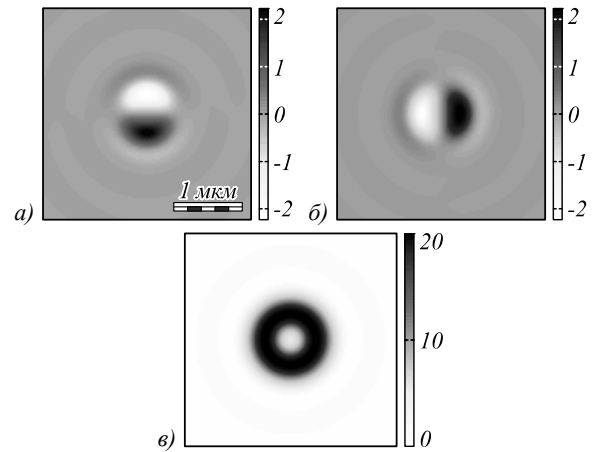


Рис. 5. Распределение компонент орбитального потока энергии  $P_{o,x}$  (а),  $P_{o,y}$  (б) и  $P_{o,z}$  (в) в фокальной плоскости

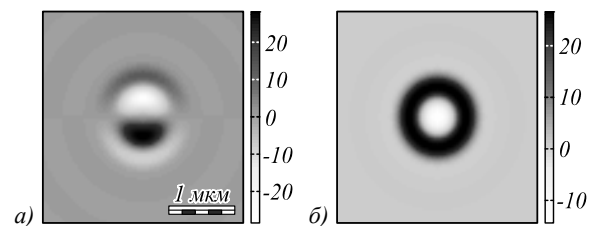


Рис. 6. Распределение суммарных потоков энергии  $P_{o,x} + P_{s,x}$  (а) и  $P_{o,z} + P_{s,z}$  (б)

### Заключение

В данной работе показано, что обратный поток энергии (отрицательная проекция на оптическую ось вектора Пойнтинга) в остром фокусе оптического вихря с топологическим зарядом 2 и левой круговой поляризацией возникает потому, что осевой поток спина имеет отрицательную проекцию на оптическую ось и больше по величине, чем положительная проекция на оптическую ось орбитального потока энергии (канонического потока энергии). Также с помощью формул Ричардса–Вольфа показано, что в области фокуса поперечный поток энергии и поперечный СУМ вращаются в разные стороны. Хотя фокусируется свет с левой круговой поляризацией, в фокусе вблизи оптической оси свет имеет правую круговую поляризацию (инверсия продольной составляющей СУМ). Продольная проекция СУМ положительная и равна по абсолютной величине обратному потоку энергии.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00595) в части моделирования, Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-20003) в теоретической части и Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

### Литература

1. Ignatovsky, V.S. Diffraction by a lens having arbitrary opening / V.S. Ignatovsky // Transactions of the Optical Institute in Petrograd. – 1920. – Vol. 1. – P. 4.

2. **Richards, B.** Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system / B. Richards, E. Wolf // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical Engineering Sciences. – 1959. – Vol. 253, Issue 1274. – P. 358-379.
3. **Karman, G.P.** Creation and annihilation of phase singularities in a focal field / G.P. Karman, M.W. Beijersbergen, A. van Duijl, J.P. Woerdman // Optics Letters. – 1997. – Vol. 22, Issue 19. – P. 1503-1505.
4. **Berry, M.V.** Wave dislocation reactions in non-paraxial gaussian beams / M.V. Berry // Journal of Modern Optics. – 1998. – Vol. 45, Issue 9. – P. 1845-1858.
5. **Vasnetsov, M.V.** Wavefront motion in the vicinity of a phase dislocation: “optical vortex” / M.V. Vasnetsov, V.N. Gorshkov, I.G. Marienko, M.S. Soskin // Optics and Spectroscopy. – 2000. – Vol. 88, Issue 2. – P. 260-265.
6. **Volyar, A.V.** Nonparaxial gaussian beams: 1. Vector fields / A.V. Volyar // Technical Physics Letters. – 2000. – Vol. 26, Issue 7. – P. 573-575.
7. **Volyar, A.V.** Structure of a nonparaxial gaussian beam near the focus: III. Stability, eigenmodes, and vortices / A.V. Volyar, V.G. Shvedov, T.A. Fadeeva // Optics and Spectroscopy. – 2001. – Vol. 91, Issue 2. – P. 235-245.
8. **Novitsky, A.V.** Negative propagation of vector Bessel beams / A.V. Novitsky, D.V. Novitsky // Journal of the Optical Society of America A. – 2007. – Vol. 24, Issue 9. – P. 2844-2849.
9. **Salem, M.A.** Energy flow characteristics of vector X-Waves / M.A. Salem, H. Bağcı // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, Issue 9. – P. 8526-8532.
10. **Vaveliuk, P.** Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams / P. Vaveliuk, O. Martinez-Matos // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, Issue 24. – P. 26913-26921.
11. **Mitri, F.G.** Reverse propagation and negative angular momentum density flux of an optical nondiffracting nonparaxial fractional Bessel vortex beam of progressive waves / F.G. Mitri // Journal of the Optical Society of America A. – 2016. – Vol. 33, Issue 9. – P. 1661-1667.
12. **Kotlyar, V.V.** Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.G. Nalimov // Optics Letters. – 2018. – Vol. 43, Issue 12. – P. 2921-2924. – DOI: 10.1364/OL.43.002921.
13. **Kotlyar, V.V.** Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov // Physical Review A. – 2019. – Vol. 99, Issue 3. – P. 033840. – DOI: 10.1103/PhysRevA.99.033840.
14. **Kotlyar, V.V.** Mechanism of formation of an inverse energy flow in a sharp focus / V.V. Kotlyar, S.S. Stafeev, A.G. Nalimov, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev // Phys. Rev. A. – 2020. – Vol. 101, Issue 3. – P. 033811. – DOI: 10.1103/PhysRevA.101.033811.
15. **Bekshaev, A.Y.** Transverse energy flows in vectorial fields of paraxial beams with singularities / A.Y. Bekshaev, M.S. Soskin // Optics Communications. – 2007. – Vol. 271, Issue 2. – P. 332-348.
16. **Bekshaev, A.Y.** Subwavelength particles in an inhomogeneous light field: optical forces associated with the spin and orbital energy flows / A.Y. Bekshaev // Journal of Optics. – 2013. – Vol. 15, Issue 4. – P. 044004.
17. **Bliokh, K.Y.** Angular momenta and spin-orbit interaction of nonparaxial light in free space / K.Y. Bliokh, M.A. Alonso, E.A. Ostrovskaya, A. Aiello // Physical Review A. – 2010. – Vol. 82, Issue 6. – P. 063825.
18. **Berry, M.V.** Optical currents / M.V. Berry // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. – 2009. – Vol. 11, Issue 9. – P. 094001.
19. **Bliokh, K.Y.** Extraordinary momentum and spin in evanescent waves / K.Y. Bliokh, A.Y. Bekshaev, F. Nori // Nature Communications. – 2014. – Vol. 5, Issue 1. – P. 3300.
20. **Налимов, А.Г.** Инверсия продольной составляющей спинового углового момента в фокусе оптического вихря с круговой поляризацией / А.Г. Налимов, Е.С. Козлова // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 699-706. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-761.

### Сведения об авторе

**Стафеев Сергей Сергеевич**, 1985 года рождения. В 2009 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ по специальности «Прикладные математика и физика». Кандидат физико-математических наук с 2012 года. Научный сотрудник лаборатории лазерных измерений Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, разностное решение уравнений Максвелла, оптика ближнего поля. E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com). ORCID: 0000-0002-7008-8007

ГРНТИ: 29.31.01

Поступила в редакцию 26 января 2021 г. Окончательный вариант – 12 марта 2021 г.

---

# An orbital energy flow and a spin flow at the tight focus

S.S. Stafeev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,  
443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

<sup>2</sup>Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

## Abstract

We have shown that a reverse energy flow (negative projection of the Poynting vector onto the optical axis) at the sharp focus of an optical vortex with topological charge 2 and left-hand circular polarization arises because the axial spin flow has a negative projection onto the optical axis and is greater in magnitude than positive projection onto the optical axis of the orbital energy flow (canonical energy flow). Also, using the Richards-Wolf formulas, it is shown that when focusing a left-handed circularly polarized light, in the region of the on-axis reverse energy flow, the light is right-handed circularly polarized.

**Keywords:** orbital energy flow, spin flow, tight focusing, energy backflow, optical vortex.

**Citation:** Stafeev SS. An orbital energy flow and a spin flow at the tight focus. *Computer Optics* 2021; 45(4): 520-524. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-867.

**Acknowledgements:** This work was supported by the Russian Science Foundation (grant 18-19-00595) in terms of modeling, the Russian Foundation for Basic Research (grant 18-29-20003) in the theoretical part, and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of works on the State task of the Federal Research Center "Crystallography and Photonics" RAS.

## References

- [1] Ignatowsky VS. Diffraction by a lens having arbitrary opening. *Trans Opt Inst Petrogr* 1920; 1: 4.
- [2] Richards B, Wolf E. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. Structure of the image field in an aplanatic system. *Proc Math Phys Eng Sci* 1959; 253(1274): 358-379
- [3] Karman GP, Beijersbergen MW, van Duijl A, Woerdman JP. Creation and annihilation of phase singularities in a focal field. *Opt Lett* 1997; 22(19): 1503-1505.
- [4] Berry MV. Wave dislocation reactions in non-paraxial gaussian beams. *J Mod Opt* 1998; 45(9): 1845-1858.
- [5] Vasnetsov MV, Gorshkov VN, Marienko IG, Soskin MS. Wavefront motion in the vicinity of a phase dislocation: “optical vortex.” *Opt Spectrosc* 2000; 88(2): 260-265.
- [6] Volyar AV. Nonparaxial gaussian beams: 1. Vector fields. *Tech Phys Lett* 2000; 26(7): 573-575.
- [7] Volyar AV, Shvedov VG, Fadeeva TA. Structure of a nonparaxial gaussian beam near the focus: III. Stability, eigenmodes, and vortices. *Opt Spectrosc* 2001; 91(2): 235-245.
- [8] Novitsky AV, Novitsky DV. Negative propagation of vector Bessel beams. *J Opt Soc Am A* 2007; 24(9): 2844-2849.
- [9] Salem MA, Bağcı H. Energy flow characteristics of vector X-Waves. *Opt Express* 2011; 19(9): 8526-8532.
- [10] Vaveliuk P, Martinez-Matos O. Negative propagation effect in nonparaxial Airy beams. *Opt Express* 2012; 20(24): 26913-26921.
- [11] Mitri FG. Reverse propagation and negative angular momentum density flux of an optical nondiffracting nonparaxial fractional Bessel vortex beam of progressive waves. *J Opt Soc Am A* 2016; 33(9): 1661-1667.
- [12] Kotlyar VV, Kovalev AA, Nalimov AG. Energy density and energy flux in the focus of an optical vortex: reverse flux of light energy. *Opt Lett* 2018; 43(12): 2921-2924. DOI: 10.1364/OL.43.002921.
- [13] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG. Energy backflow in the focus of a light beam with phase or polarization singularity. *Phys Rev A* 2019; 99(3): 033840. DOI: 10.1103/PhysRevA.99.033840.
- [14] Kotlyar VV, Stafeev SS, Nalimov AG, Kovalev AA, Porfiriev AP. Mechanism of formation of an inverse energy flow in a sharp focus. *Phys Rev A* 2020; 101(3): 033811. DOI: 10.1103/PhysRevA.101.033811.
- [15] Bekshaev AY, Soskin MS. Transverse energy flows in vectorial fields of paraxial beams with singularities. *Opt Commun* 2007; 271(2): 332-348.
- [16] Bekshaev AY. Subwavelength particles in an inhomogeneous light field: optical forces associated with the spin and orbital energy flows. *J Opt* 2013; 15(4): 044004.
- [17] Bliokh KY, Alonso MA, Ostrovskaya EA, Aiello A. Angular momenta and spin-orbit interaction of nonparaxial light in free space. *Phys Rev A* 2010; 82(6): 063825.
- [18] Berry MV. Optical currents. *J Opt A-Pure Appl Opt* 2009; 11(9): 094001.
- [19] Bliokh KY, Bekshaev AY, Nori F. Extraordinary momentum and spin in evanescent waves. *Nat Commun* 2014; 5(1): 3300.
- [20] Nalimov AG, Kozlova ES. Inversion of the longitudinal component of spin angular momentum in the focus of a left-handed circularly polarized beam. *Computer Optics* 2020; 44(5): 699-706. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-761.

---

## Author's information

**Sergey S. Stafeev** (b. 1985) received Master's degree in Applied Mathematics and Physics in Samara State Aerospace University (2009). He received his PhD in 2012. He is researcher of Laser Measurements laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Scientific interests: diffractive optics, FDTD method, near-field optics. E-mail: [sergey.stafeev@gmail.com](mailto:sergey.stafeev@gmail.com). ORCID: 0000-0002-7008-8007.

---

*Received January 26, 2021. The final version – March 12, 2021.*

---