

## О возможности эксперимента, касающегося «нелокальности» электродинамики

Р.И.Храпко

*С XIX века известно, что электромагнитная волна с круговой поляризацией несёт угловой импульс. Простой опыт Ригхи (Righi) (1882 г.), по-видимому, свидетельствует о распределении углового импульса по всему сечению пучка. Согласно некоторым современным представлениям, угловой импульс пучка с указанной поляризацией локализован вблизи «поверхности» пучка и является спином фотонов, в то время как энергия в пучке распределена по всему его сечению, что не соответствует принципу локальности/близкодействия. Для экспериментального определения области локализации углового импульса мы предлагаем новую схему, в которой исследуется интерференционная картина двух когерентных пучков с круговой поляризацией. Каждый пучок предварительно пропускается через полуволновую пластинку, причем одна из пластинок разделена на две коаксиальные части. При (ручном) вращении одной из частей пластинки изменяется частота прошедшего через нее света: пластинка поглощает момент импульса и, следовательно, совершается работа. Это изменение частоты должно вызвать движение интерференционных полос и показать распределение углового импульса по сечению пучка.*

**Ключевые слова:** угловой импульс светового пучка, электродинамический момент силы, классический спин, интерферометр.

### 1. Введение

Хорошо известно, что пучок электромагнитного излучения с круговой поляризацией [1, 2],

$$\mathbf{E} = \omega \exp(ikz - i\omega t) \left[ \mathbf{x} + iy + \frac{1}{k} \mathbf{z}(i\partial_x - \partial_y) \right] u(x, y), \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = -ik\mathbf{E}/\omega$$

(выражение написано для правой круговой поляризации), несёт момент импульса [1–7]. Поэтому на тело, которое поглощает, по крайней мере, часть пучка или/и изменяет состояние его поляризации, будет действовать момент силы.

Электромагнитное поле (1) удовлетворяет широко используемому волновому уравнению в параксиальном приближении. Это приближение предполагает медленное изменение интенсивности пучка вдоль его оси ( $\partial_z u \ll ku$ ) и приводит к уравнению  $\partial_{xx}^2 u + \partial_{yy}^2 u + i2k\partial_z u = 0$  [2]. По аналогии с [1, 5, 6], мы рассматриваем широкий пучок (1) и полагаем, что амплитуда  $u$  постоянна в центральной его части ( $u = u_0$ ) и уменьшается до нуля в узком поверхностном слое на расстоянии  $R$  от оси (см. рис. 1, а, а также рис. 9.3 из [5] и рис. 1 из [6]).

Эксперимент Бета [3] и многочисленные современные эксперименты с микрочастицами [2, 7] подтверждают существование момента импульса в пучке с круговой поляризацией. Теоретически этот вопрос обсуждался также в

работах [8–10]. К сожалению, сейчас не известен ни один эксперимент, в котором определяется распределение момента импульса по поперечному сечению пучка. Однако именно это распределение представляет исключительный интерес ввиду следующих обстоятельств.

Согласно работам [2, 4],  $z$ -компонента объемной плотности момента импульса  $j_z$  и  $z$ -компонента плотности потока момента импульса вдоль оси  $z$ , т.е. компонента плотности момента силы  $\mu_z$ , локализованы вблизи «поверхности» пучка и задаются формулами

$$j_z = -\varepsilon_0 \omega r \partial_r |u(r)|^2 / 2, \quad \mu_z = -c \varepsilon_0 \omega r \partial_r |u(r)|^2 / 2 \quad (2)$$

(под «поверхностью» пучка понимается слой, в котором радиальный градиент интенсивности очень большой). Эти плотности пропорциональны радиальному градиенту интенсивности в пучке, тогда как плотность энергии  $w$  и вектор Пойнтинга  $\mathbf{S}$  зависят от самой интенсивности:

$$w = \varepsilon_0 \omega^2 |u|^2, \quad \mathbf{S} = c \varepsilon_0 \omega^2 |u|^2 \mathbf{z}. \quad (3)$$

Поэтому отношение плотностей

$$\frac{j_z}{w} = \frac{\mu_z}{S} = -\frac{r \partial_r |u(r)|^2}{2\omega |u(r)|^2} \quad (4)$$

должно существенно изменяться по поперечному сечению пучка.

Аллен и другие пишут: «Локальное значение отношения углового импульса к энергии изменяется от точки к точке в световом пучке» [2, с. 300]. «В различных точках волнового фронта ожидаются различные количества углового импульса» [11]. «Поток углового импульса, делённый на поток энергии, не имеет простого выражения для конкретной точки» [7].

**Р.И.Храпко.** Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, 125993 Москва, Волоколамское ш., 4; e-mail: khrapko\_ri@hotmail.com

Поступила в редакцию 18 марта 2012 г., после доработки – 27 июля 2012 г.

Симмондз и Гуттман пишут: «Поверхность [пучка] является единственным местом, где  $z$ -компонента углового импульса не равна нулю» [5].

Таким образом,  $|\mu_z/S| \gg 1/\omega$  в поверхностном слое и  $\mu_z/S = 0$  во всех других точках. Отсюда естественно сделать вывод, что тело, поглощающее рассматриваемый пучок, испытывает момент силы только там, где поглощается поверхностный слой пучка, а большая внутренняя область поглотителя не испытывает вращающего момента силы, хотя согласно (3) она поглощает всю мощность пучка.

Однако Бет [3] объяснял возникновение действующего момента силы совсем по-другому: «Световая волна вызывает момент силы из-за того, что диэлектрическая постоянная  $\hat{K}$  является тензором. Поэтому напряженность электрического поля  $\mathbf{E}$ , вообще говоря, не параллельна электрической поляризации  $\mathbf{P}$  или электрической индукции  $\mathbf{D} = \hat{K}\mathbf{E} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P}$  в среде. Момент силы  $\boldsymbol{\tau}$  в единице объема  $V$ , возникающий из-за воздействия электрической напряженности на поляризацию среды,  $\boldsymbol{\tau}/V = \mathbf{P} \times \mathbf{E}$ ». Согласно этому рассуждению, момент силы распределён равномерно по всему поперечному сечению пучка.

Также Каррара [12] писал: «Если волна с круговой поляризацией поглощается экраном или превращается в линейно поляризованную волну, угловой импульс исчезает. Поэтому экран должен испытывать момент силы на единицу поверхности, равный изменению углового импульса в единицу времени. Плотность этого момента силы равна  $\pm S/\omega$ ».

Лоудон [13] является сторонником концепции, описываемой формулами (2) и (4). Тем не менее он учитывает член  $\mathbf{P} \times \mathbf{E}$  при расчёте воздействия пучка на диэлектрик (см. формулу (7.18) в [13]).

Фейнман [14] использовал понятие спина фотонов при круговой поляризации света: «... Вектор  $\mathbf{E}$  электрического поля света с круговой поляризацией бежит по кругу (рис.15.5,а). Теперь положим, что мы осветили таким светом стенку, способную поглотить его, и рассмотрим один из атомов стенки, опираясь на классические представления... В итоге электрон этого атома будет двигаться по кругу (рис.15.5,б). Он сместится из положения равновесия в начале координат на величину  $r$  и начнет двигаться по кругу, отставая по фазе от вектора  $\mathbf{E}$ . Электрическое поле с течением времени поворачивается, но с такой же частотой поворачивается и смещение, так что относительная ориентация остается той же. Посмотрим теперь, какая работа производится над электроном. Скорость, с которой электрон приобретает энергию, равна его скорости  $v$ , умноженной на компоненту  $\mathbf{E}$ , параллельную этой скорости:  $dW/dt = eE_t v$ .

Но вы не можете не заметить, что у электрона в это время непрерывно увеличивается и момент количества движения, потому что он все время испытывает действие момента, вращающего его вокруг начала координат. Вращательный момент  $\boldsymbol{\tau} = eE_t r$ , и он обязан равняться скорости изменения момента количества движения  $dJ_z/dt$ :

$$dJ_z/dt = \boldsymbol{\tau} = eE_t r.$$

Вспоминая, что  $v = \omega r$ , имеем  $dJ_z/dW = 1/\omega$ ».

Таким образом, по Фейнману плотность вращающего механического момента силы  $\mu_z$  относится к плотности потока энергии на поглощающую поверхность  $S$  так же, как полный вращающий момент относится к полному по-

току энергии и как спин фотона  $\hbar$  относится к энергии фотона  $\hbar\omega$ :

$$|\mu_z/S| = |dJ_z/dW| = |j_z/\omega| = 1/\omega. \quad (5)$$

Стало быть, плотность вращающего момента постоянна на поглощающей поверхности в пределах освещённой области, а не сосредоточена на границе данной области, как это следует из формулы (2).

Весной 1999 г. проблема распределения момента импульса по сечению пучка с круговой поляризацией обсуждалась на Московском семинаре В.Л.Гинзбурга и была сформулирована в терминах возможного эксперимента [8]. Позже проблема была детально проанализирована теоретически в статье [10].

Анализ заключался в следующем. Предположим, что поглотитель разделён коаксиально при радиусе  $r_1 < R$  на внутреннюю ( $r < r_1$ ) и внешнюю ( $r > r_1$ ) части так, что поверхностный слой пучка света поглощается внешней частью. Спрашивается, будет ли внутренняя часть испытывать действие момента силы (и вращаться)? Этот вопрос является принципиально важным.

Действительно, если внутренняя часть не испытывает действия момента силы, то спиновый угловой импульс фотонов поглощается на периферии поглотителя, тогда как энергия фотонов поглощается внутренней частью. Если внутренняя часть поглотителя испытывает действие момента силы, это будет противоречить формулам (2) и (4). Во всяком случае интересно исследовать эту проблему экспериментально, т.к. оба варианта ответа предполагают существенную «нелокальность» электродинамики. Схема соответствующего эксперимента предлагается и обсуждается в настоящей работе.

## 2. Эксперимент Ригхи (Righi) (1882 г.)

Рассмотрим, как и в опыте Бета [3], вместо поглощающего тела полуволновую пластинку, которая изменяет направление круговой поляризации на обратное, так что пластинка испытывает плотность момента силы  $\mu = 2\mu_z$ . В эксперименте Ригхи, описанном в [15], пластинку вращали вручную (в плоскости пластинки) с угловой скоростью  $\Omega$ . Таким образом над пучком совершалась работа, что приводило к изменению энергии фотонов. Изменение энергии фотонов означает изменение частоты света и приводит к движению интерференционных полос в соответствующем интерференционном эксперименте. Примечательно, что этот эффект может наблюдаться в эксперименте на обычной студенческой оптической скамье с помощью бипризмы Френеля [15].

Изменение вектора Пойнтинга  $\Delta S = 2\mu_z \Omega$  вызывает сдвиг по частоте

$$\Delta\omega = \omega \frac{\Delta S}{S} = 2\Omega\omega \frac{\mu_z}{S}, \quad (6)$$

где  $\omega$  – угловая частота света. Соответствующий фазовый сдвиг за время  $t$  есть  $\Delta\varphi = \Delta\omega t$ ; фазовый сдвиг за полный оборот пластинки ( $t = 2\pi/\Omega$ )

$$\Phi = 4\pi \frac{\mu_z}{S} \omega, \quad (7)$$

и интерференционная картина сдвигается при этом на число полос

$$N = 2 \frac{\mu_z}{S} \omega. \quad (8)$$

Согласно концепции, описываемой формулой (2), сдвиг интерференционных полос не должен происходить во внутренней освещённой части пластинки, потому что там  $\mu_z/S = 0$ , в то же время чрезвычайно большой сдвиг ( $N \gg 1$ ) должен наблюдаться в узкой зоне поглощения поверхностного слоя пучка, т. к. там  $|\mu_z/S| \gg 1/\omega$ .

### 3. Модификация эксперимента

Мы надеемся ответить на вопрос, поставленный в работе [8], наблюдая за локальным сдвигом интерференционных полос (8). Для этого в двухлучевом интерферометре предлагается использовать две полуволновые пластинки, причем одна из них должна быть разделена на внутреннюю часть в виде диска и внешнюю кольцевую часть (рис.1,а). Для проведения эксперимента необходимо обеспечить возможность независимого вращения вручную двух частей разделённой пластинки. Полуволновые пластинки должны различаться по толщине на небольшую величину  $a$ . Из-за этого различия интерференционные кольца наблюдаются на экране, где складываются оба пучка (рис.1,б).

Расчет разности оптических путей представлен на рис.2. Если  $\alpha$  есть угол падения света, оптический путь ABC равен  $an/\cos\beta + a(\tan\alpha - \tan\beta)\sin\alpha$  ( $n$  – показатель преломления), а соответствующий путь AD через воздух составляет  $a/\cos\alpha$ . Условие конструктивной интерференции имеет вид  $an/\cos\beta + a(\tan\alpha - \tan\beta)\sin\alpha - a/\cos\alpha = m\lambda$ , т. е.

$$n\cos\beta - \cos\alpha = m\lambda/a, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Если  $\sin\alpha \approx \alpha$ , а  $\cos\alpha \approx 1 - \alpha^2/2$ , равенство (9) даёт

$$n - 1 + \alpha^2(n - 1)/(2n) = m\lambda/a. \quad (10)$$

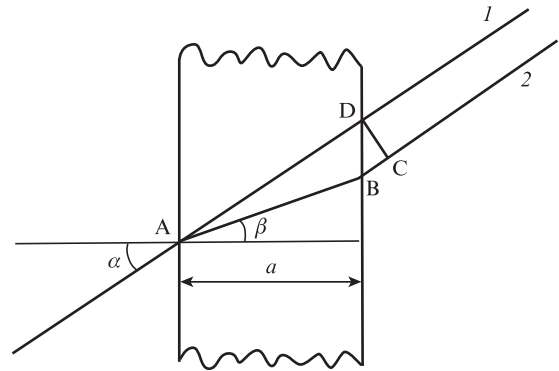


Рис.2. Расчет разности хода лучей ABC – AD: 1 – луч, проходящий через слой толщиной  $a$  по воздуху вблизи первой пластинки; 2 – луч, проходящий через слой толщиной  $a$  по второй пластинке.

Опуская постоянный член  $n - 1$ , получаем угловой размер кольца с номером  $m$

$$\alpha_m = \sqrt{\frac{2n\lambda m}{(n - 1)a}}. \quad (11)$$

Пусть  $\lambda = 630$  нм и используется кварцевая полуволновая пластинка, т. е.  $n = 1.55$ ,  $\Delta n = n_o - n_e = 0.009$ . Тогда минимальная толщина полуволновой пластинки, при которой направление круговой поляризации изменяется на обратное,  $l_{1/2} = \lambda/(2\Delta n) = 35$  мкм. Если мы положим  $a = 17 l_{1/2} = 595$  мкм, то  $\alpha_m = 0.0772\sqrt{m}$  и  $m_{\max} \leq 167\alpha_{\max}^2$ . Согласно рис.1,б угол  $\alpha_{\max} \approx 10^\circ = 0.175$ , поэтому  $m_{\max} = 5$ . Эти пять колец изображены на рис.3.

Согласно (5), мы ожидаем, что сдвиг интерференционных полос (8) будет равен 2, когда внутренняя часть пластинки совершает полный оборот, а согласно (4), мы ожидаем, что сдвиг полос на краю освещённой области будет большим, когда вращается внешняя часть пластинки. Насколько можно судить по публикации [15], сдвиг интерференционных полос во внутренней освещённой области действительно был равен 2 за один оборот неразделённой пластинки. При этом, возможно, большой

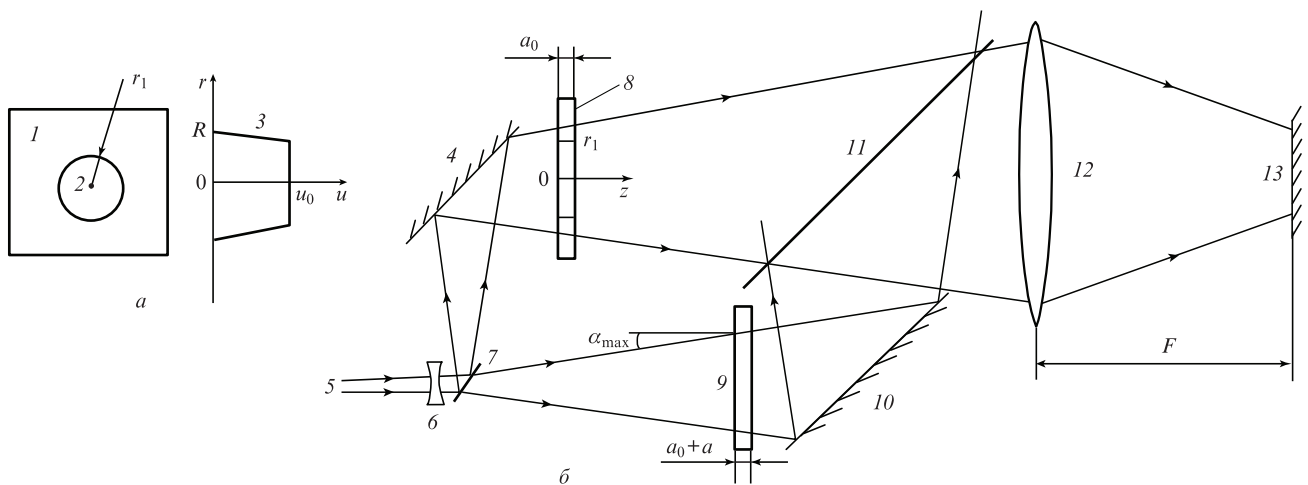


Рис.1. Полуволновая пластинка, части которой могут вращаться вручную (а) и схема эксперимента (б): 1 – внешняя часть пластинки; 2 – внутренняя часть пластинки; 3 – профиль поля светового пучка; 4 – зеркало; 5 – лазерный пучок; 6 – рассеивающая линза; 7 – полупрозрачное зеркало; 8 – первая полуволновая пластинка, части которой вращаются вручную; 9 – вторая полуволновая пластинка; 10 – зеркало; 11 – полупрозрачное зеркало; 12 – собирающая линза; 13 – экран, где складываются оба пучка.

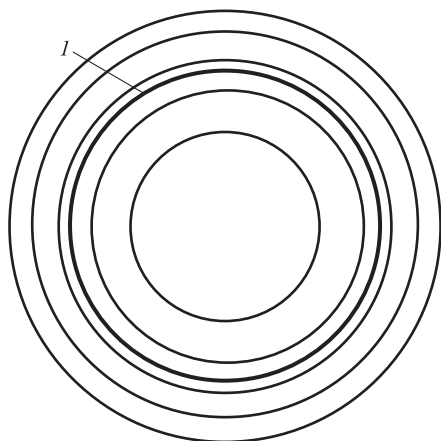


Рис.3. Интерференционные кольца:  
 l – граница между внутренней и внешней частями полуволновой пластинки.

сдвиг полос на границе освещённой области остался незамеченным.

Я глубоко благодарен Р.Ромеру за отважную публикацию моего вопроса [8] (направлен в редакцию 7 октября 1999 г.). Я также благодарю Т.Ниёминена, обратившего моё внимание на статью [15].

1. Jackson J.D. *Classical Electrodynamics* (John Wiley, 1999, p.350).
2. Allen L., Padgett M.J., Babiker M., in *Progress in Optics* (Amsterdam: Elsevier, 1999, Vol. XXXIX).
3. Beth R.A. *Phys. Rev.*, **50**, 115 (1936).
4. Zambrini R., Barnett S.M. *J. Mod. Opt.*, **52**, 1045 (2005).
5. Simmonds J.W., Guttman M.J. *States, Waves and Photons* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1970).
6. Ohanian H.C. *Am. J. Phys.*, **54**, 500 (1986).
7. Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C., Woerdman J.P. *Phys. Rev. A*, **45**, 8185 (1992).
8. Khrapko R.I. *Am. J. Phys.*, **69**, 405 (2001).
9. Храпко Р.И. *Измерительная техника*, №4, 3 (2003).
10. Khrapko R.I. *J. Mod. Opt.*, **55**, 1487 (2008).
11. Allen L., Padgett M.J. *Opt. Commun.*, **184**, 67 (2000).
12. Carrara, N. *Nature*, **164**, 882 (1949).
13. Loudon R. *Phys. Rev. A*, **68**, 013806 (2003).
14. Фейнман Р. и др. *Фейнмановские лекции по физике* (М.: Мир, 1978, т. 8, 9, гл. 15, § 4).
15. Atkinson R. *Phys. Rev.*, **47**, 623 (1935).

## Добавление

К сожалению, статьи на эту тему ранее были отклонены всеми научными журналами Планеты. Здесь я привожу часть истории отклонений.

Applied Optics. March 02, 2009

Applied Optics is not the appropriate forum for this interesting theoretical discussion.

**Scott Tyo Topical**

Journal of Modern Optics. July 24, 2009

I have had the "pleasure" of reviewing a large number of papers by this author on his alternative theory of optical angular momentum. At one stage, I recall, his manuscripts proudly proclaimed the long list of journals that had rejected his work. The author believes that there is an additional spin angular momentum for the photon, that is not present in standard (Maxwell-based) theory and all of his papers that I have seen are based on this, shall we say "dubious" idea. The conventional (Maxwell and Poynting - based) theory of optical angular momentum is in excellent agreement with all recent experiments and there is no need nor evidence for any correction of the type envisaged by the author. **Jonathan Marangos**

New Journal of Physics. August 07, 2009

We do not publish this type of article in any of our journals and so we are unable to consider your article further. **Sarah Ryder, Dr Tim Smith, Dr Elena Belsole, Rosie Walton, Dr Chris Ingle**

Physical Review A. August 18, 2009

The Physical Review publishes articles in which significant advances in physics are reported. Such advances must be placed in the context of recent developments in research. There is no discussion in your manuscript of how this work relates to other current physics research and adequate references to the recent research literature are lacking. Your manuscript therefore is too pedagogical for the Physical Review. **Gordon W.F. Drake**

International Journal of Optomechatronics. December 10, 2009

Your paper has not been considered for publication in this current form. **Hyungsuck Cho.**

Physics Letters A. December 26, 2009

Your theoretical paper does not contain the physical results which need an urgent publication in Physical Journal of Letters. **Vladimir M. Agranovich.**

Journal of Modern Optics January 13, 2010

The author has clearly failed to understand the phenomenon of the transfer of spin angular momentum to a birefringent optical element. A clear and rather straightforward account of this may be found, for example, in reference [5] for the manuscript. The author's "solution" to his "problem" is no less than to change the laws of electrodynamics, something for which there is no need and no evidence. **Jonathan Marangos**

Optics Communications. January 18, 2010

The author demonstrates his complete lack of understanding of the phenomenon of the transfer of angular momentum from a light beam to a birefringent element. He maintains, totally erroneously, that conventional Maxwell theory fails to account for this effect, something that is clearly explained in reference [5]. The author's "solution" to his "problem" is nothing less than a re-formulation of electromagnetism, something for which there is both no evidence and no need. The paper is just plain wrong and needs to be rejected.

The author is very proud of the fact that a previous **idiotic** paper was turned down over a hundred times. His arguments are confused and wrong; he is insulting to others whose work he does not understand. He inserts bits of referees comments into his next submission while not understanding them or learning anything. **Wolfgang Schleich**

Optics Letters. February 23, 2010

As we've stated in the past, we will not reconsider your work for publication in this or any other OSA journal. Please submit your paper elsewhere. Sincerely, **Optics Letters Manuscripts Office**

Foundations of Physics. May 04, 2010

I must inform you that, based on the advice received, the Editors have decided that your manuscript cannot be accepted for publication in Foundations of Physics. Below, please find the comments for your perusal. **Gerard 't Hooft**

The comments and my objections, please, see at

<http://khrapkori.wmsite.ru/ftpgetfile.php?id=45&module=files>

American Journal of Physics. May 25, 2010

You propose to do an experiment that you claim is easy to do, but don't do it as far as I can tell. At least I don't see any experimental data. Thus, your work would not be appropriate for an educational journal such as AJP. **Jan Tobochnik, Harvey Gould**

ЖЭТФ, March 23, 2011 (статья была подана и зарегистрирована December 30, 2009)

статья "Experiments Concerning Electrodynamics Nonlocality" не содержит каких-либо новых физических результатов, которые могли бы представить самостоятельный интерес для нашего журнала.

В тех случаях, когда публикация признаётся нецелесообразной, редколлегия не сообщает авторам развёрнутой аргументации, поскольку не имеет, к сожалению, возможности организовать получение подобных отзывов по существу вопроса. За этим следует обращаться в соответствующие научные учреждения. **Э.А. Манькин**

Acta Physica Polonica. September 23, 2011

The proposed experiment is useless; its result is easily predicted. Everything is based on misunderstanding. The author assumes that the absorption of photons occurs locally (where the energy density is the biggest). In fact, the process of absorption is nonlocal (best illustration: absorption of extended radiation by a small atom). **Witold Dobrowolski**

PRA. January 05, 2012

The author does not make an effort to put the question into a context of current research or developments. The manuscript addresses an already ten-year old partial discussion between the author (ref [12]) and Allen and collaborators (ref [11]). **M. Gaarde & G. Drake.**

Proc. R. Soc. A, January 23, 2012

This presents some elementary calculations and proposes a simple experiment but does not carry it out. If the experiment is carried out, the paper might merit publication in a pedagogical journal.

**Raminder Shergill**

УФН January 25, 2012

Следует подождать, пока автор не представит результаты реального эксперимента, а публиковать статью в ее нынешнем виде, фактически уже опубликованную в электронных изданиях, считаю нецелесообразным. **Рецензент**